Archive of SID
Journal of Safety Promotion and Injury Prevention,
Vol.6, No.4, Winter 2018
Research Article

Evaluation of Consequence Modeling of Fire and Explosion on Methane Storage Tanks in a CNG refueling Station

Mohsen Sadeghi Yarandi [1], Ali Karimi [2*]

1- MSc Student of Occupational Health Engineering, School of Public Health, Tehran University of Medical Sciences, Tehran, Iran.
2- Department of Occupational Health Engineering, School of Public Health, Tehran University of Medical Sciences, Tehran, Iran.

***Corresponding Author:** a_karimi@sina.tums.ac.ir

Abstract

Background and Aim: One of the most fuel materials that recently considered is compressed natural gas (CNG). Despite all the known benefits, storage, transportation and use of compressed natural gas as a fuel have risks such as explosions and fires. This study was aimed towards Consequence Modeling of Fire and Explosion on Methane Storage Tanks in a CNG refueling Station.

Materials and Methods: In this study, A CNG station was evaluated. Considering the results of the visit the CNG station, survey of the recent studies and events and review of experts' opinions, four scenarios of discharges, catastrophic rupture, jet fire and explosions in compressed natural gas storage tanks were evaluated. Then each of these scenarios by using the software is modeled and Possible Consequences of each scenario were evaluated. In order to Consequence Modeling and examine the outcome of Consequences in this study, the PHAST software version 6.7 was used.

Results: In this study two jet fire and explosion scenarios of storage tanks were selected as the worst case scenarios. In jet fire scenario the maximum area affected by fire is 135/13 square meters in the leakage dimension of 150 millimeters. The results of CNG storages explosion modeling also showed that at a distance of 20 meters from storage tanks, the explosion pressure increase is 1 bar (The probability of death in this pressure is 100%) and gradually decrease by increase the distance from the storage tanks, as far as the distance of 400 meters, it reaches at 0.01 bar that is a safe area. It was also found, in the radius 52, 69 and 232 meters of the storage tanks there were 0.21, 0.14 and 0.02 bar increasing pressure, respectively.

Conclusion: The results of present study showed that leakage and damage of the storage tanks, can lead to deadly accidents, Particular in dual-purpose refueling stations (CNG and Gasoline). So according to the results of this study, increasing the number of this refueling stations in recent years, corrective actions in order to increasing the safety levels in methane gas storage tanks in CNG refueling Station is essential.

Keywords: Consequence Modeling, Fire, Compressed Natural Gas, PHAST Software.

How to cite this article:
Sadeghi Yarandi M, Karimi A. Evaluation of Consequence Modeling of Fire and Explosion on Methane Storage Tanks in a CNG refueling Station. J Saf Promot Inj Prev. 2018; 6(4):237-46.

www.SID.ir

مطالعه موردی

مجله ارتقای ایمنی و پیشگیری از مصدومیت ها
دوره۶، شماره ۴، زمستان ۱۳۹۷، صفحات ۲۳۷ تا ۲۴۶
Archive of SID

ارزیابی پیامد حریق و انفجار مخازن گاز متان در یک جایگاه توزیع گاز طبیعی فشرده

محسن صادقی یارندی[۱]، علی کریمی[۲*]

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی بهداشت حرفه‌ای، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی تهران، تهران، ایران
۲- گروه مهندسی بهداشت حرفه‌ای، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی تهران، تهران، ایران

چکیده

سابقه و هدف: یکی از مواد سوختی که اخیراً موردتوجه قرارگرفته است، گاز طبیعی فشرده می‌باشد. باوجود تمام مزایای شناخته‌شده، ذخیره‌سازی، حمل‌ونقل و استفاده از گاز طبیعی به‌عنوان سوخت همواره خطراتی از قبیل انفجار و آتش‌سوزی را با خود به همراه دارند. مطالعه حاضر با هدف ارزیابی پیامد حریق و انفجار مخازن گاز متان در یک جایگاه توزیع گاز طبیعی فشرده انجام پذیرفت.

روش بررسی: در این مطالعه، با توجه به نتایج حاصل از بررسی و بازدید از جایگاه موردبررسی، بررسی مطالعات و حوادث گذشته و بررسی نظرات متخصصان، چهار سناریوی تخلیه، ترکیدگی فاجعه‌بار، آتش فورانی و انفجار در مخازن گاز متان فشرده مورد ارزیابی قرار گرفت. در ادامه هر یک از سناریوها با استفاده از نرم‌افزار، مدل‌سازی شده و پیامدهای محتمل هرکدام از سناریوها مورد ارزیابی قرار گرفت. به‌منظور واکاوی پیامد در مطالعه حاضر نیز نرم‌افزار PHAST۶,۷ مورداستفاده قرار گرفت.

یافته‌ها: با توجه به نتایج مطالعات پیشین و همچنین بررسی پیامد سناریوهای موردبررسی، دو سناریوی آتش فورانی و انفجار کامل مخازن به‌عنوان مخاطرات اصلی نشت گاز متان انتخاب گردید. نتایج حاصل از سناریو آتش فورانی نشان داد که بیشترین مساحت متأثر از آتش فورانی در این سناریو مقدار ۱۳۵/۱۳ مترمربع و در اندازه نشتی ۱۵۰ میلی‌متر است. نتایج حاصل از مدل‌سازی انفجار مخازن نیز نشان داد که در فاصله ۲۰ متری، میزان افزایش فشار حاصل از انفجار ۱ بار بوده (احتمال مرگ افراد در این فشار ۱۰۰ درصد است) و به‌تدریج با افزایش فاصله از مخزن کم شده تا جایی که در فاصله‌ی ۴۰۰ متری به ۰/۰۱ بار می‌رسد که همان حریم ایمن می‌باشد. همچنین مشخص گردید که در شعاع ۵۲، ۶۹ و ۲۳۲ متری مخزن به ترتیب مقدار ۰/۲۱، ۰/۱۴ و ۰/۰۲ بار، افزایش فشار وجود دارد.

نتیجه‌گیری: نتایج حاصل از این مطالعه نشان داد که با توجه به اینکه گاز متان، گازی قابل اشتعال و انفجار است، در صورت نشتی و آسیب مخزن و بروز حریق و انفجار، می‌تواند منجر به حوادث ناگواری شود. علل الخصوص در جایگاه‌های سوخت‌گیری دومنظوره که علاوه بر گاز متان فشرده، بنزین نیز مورداستفاده قرار می‌گیرد. لذا با توجه به موارد پیش گفت و افزایش روزافزون این جایگاه‌ها، انجام اقدامات کنترلی به‌منظور افزایش سطوح ایمنی در مورد مخازن گاز متان در جایگاه‌های سوخت‌گیری امری ضروری می‌باشد.

کلیدواژه‌ها: مدل‌سازی پیامد، حریق، گاز طبیعی فشرده، نرم‌افزار PHAST

مقدمه

انرژی یکی از موارد مهم و اساسی در راستای تأمین آسایش و رفاه انسان است (۱). در بین شکل‌های مختلف انرژی، نفت و گاز به‌عنوان سوخت‌های کارآمد و باکیفیت، به‌طور گسترده‌ای در تأمین سوخت شهری، صنایع شیمیایی، تأمین برق و سایر زمینه‌های صنعتی مورداستفاده واقع می‌شوند (۲). همواره با پیشرفت تکنولوژی و فناوری، افزایش تولید و گسترش حمل‌ونقل، میزان نیاز به مواد شیمیایی بیشتر می‌شود، به‌طوری‌که امروزه وقوع حوادث ناگواری که ناشی از رهایش و انفجار مواد شیمیایی و سمی در بخش‌های مختلف است، باعث ایجاد خطرات زیادی برای افراد جامعه شده است (۳).

یکی از مواد سوختی که اخیراً موردتوجه قرارگرفته است، گاز طبیعی فشرده[۱] می‌باشد. گاز طبیعی فشرده یکی از مشتقات نفتی و

۱. Compressed Natural Gas

* آدرس نویسنده مسئول مکاتبات: a_karimi@sina.tums.ac.ir
www.SID.ir

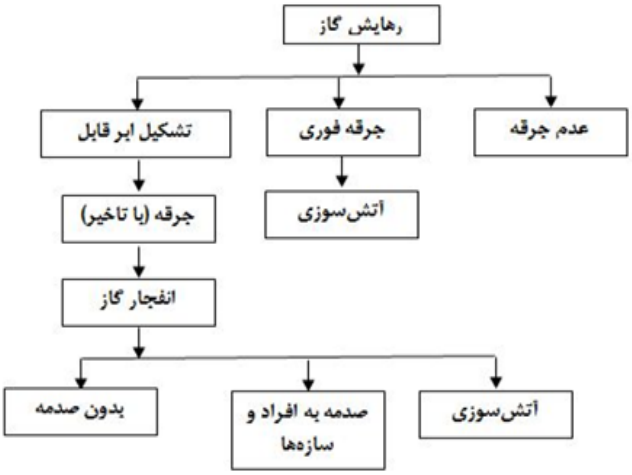
Archive of SID

ازجمله سوخت‌هایی است که اخیراً استفاده ازآن‌رو به افزایش بوده و بیشترین میزان استفاده از آن در راستای ایجاد نیروی محرکه برای وسایل نقلیه موتوری است (۴). یکی از بارزترین مشخصات این گاز، میزان تولید و انتشار کم‌گازهای گلخانه‌ای در بین سایر سوخت‌های با پایه هیدروکربنی است که آن را به سوختی تمیز و پرمصرف مبدل کرده است (۵, ۶). از دیگر مزایای آن می‌توان به چگالی کم نسبت به بنزین، نسبت هیدروژن به کربن بالا، قابلیت اختلاط سریع با هوا، عدد اکتان بالا (۱۲۰ تا ۱۳۰) و مقرون‌به‌صرفه بودن از نظر اقتصادی اشاره نمود (۷, ۸). گاز متان یا همان متیل هیدرید دارای جرم مولی ۱۷ کیلوگرم بر مول، نقطه آتش‌گیری ۱۳۶/۱۱- درجه سانتی‌گراد، دمای خود اشتعالی ۵۳۷ درجه سانتی‌گراد، انرژی احتراق ۲۴/۶ میلی ژول بر مترمکعب، سرعت انتشار شعله ۰/۴۱ متر بر ثانیه بوده و حد پایین و بالای اشتعال آن نیز به ترتیب ۵ و ۱۵ درصد حجمی در هوا می‌باشد (۹).

لیکن باوجود تمام مزایای شناخته‌شده، ذخیره‌سازی، حمل‌ونقل و استفاده از گاز طبیعی به‌عنوان سوخت همواره خطراتی از قبیل انفجار و آتش‌سوزی را با خود به همراه دارند (۱۰). خطرات گاز طبیعی ناشی از قابلیت اشتعال بسیار زیاد و مقادیر بالای انرژی آزادشده در صورت اشتعال یا انفجار است (۱۱). با توجه به اهمیت و مزایای گاز طبیعی فشرده و رشد روزافزون استفاده از آن، توجه به سطح ایمنی جایگاه‌های توزیع گاز طبیعی فشرده از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. مطابق با مطالعات انجام‌شده، انجام اقداماتی از قبیل رعایت حداقل فاصله ایمن نسبت به مخزن اصلی که دارای فشار بالایی در حدود ۲۰۰ بار معادل با ۳۰۰۰ پوند بر اینچ مربع است، کاملاً ضروری ست (۲, ۱۲). ماهیت اشتعال‌پذیر گاز متان، فشار بالا و همچنین تراکم بالای جمعیت در اطراف جایگاه‌های توزیع گاز طبیعی فشرده، ازجمله دلایلی است که اهمیت بررسی وضعیت ایمنی جایگاه‌های مذکور را هویدا می‌سازد (۱۳, ۱۴).

در یک جایگاه گاز طبیعی فشرده، اجزای مختلفی همچون انواع حسگرها، دماسنج‌ها و فشارسنج‌ها، شیرهای اطمینان، مخازن ذخیره، کمپرسور، توزیع‌کننده، خطوط لوله و ... وجود دارد که بازرسی منظم و دوره‌ای و اطمینان از سطح ایمنی آن‌ها، ارزیابی ریسک و مدل‌سازی پیامد، به‌منظور کاهش ریسک حوادث در این جایگاه‌ها، از اهمیت بالایی برخوردار است (۱۵, ۱۶)

بررسی دقیق حوادث معروف ثابت می‌کند که قسمت اعظم خسارت‌های ناشی از آن‌ها و احتمال بروز آن‌ها نه‌فقط قابل‌پیشگیری است، بلکه قابل پیش‌بینی نیز بوده‌اند، مشروط بر آنکه دست‌کم تحلیل‌های مهندسی ایمنی نظیر مدل‌سازی پیامد و ارزیابی کمی ریسک به‌موقع انجام گیرد (۱۷). پیامدهای ناشی از رهایش یک ماده را می‌توان به سه دسته ایجاد آتش‌سوزی، ایجاد انفجار و آثار مربوط به سمیت مواد در محیط تقسیم کرد. انواع پیامد ناشی از رهایش تصادفی گازهای قابل اشتعال در شکل ۱ آورده شده است (۱۸).



شکل ۱. پیامدهای ناشی از رهایش تصادفی گازهای قابل اشتعال

تعیین شعاع آسیب‌رسانی در حین بروز یک حادثه مربوط به انتشار گازهای قابل اشتعال و سمی از اهمیت به سزایی برخوردار است. این کار جهت مشخص شدن حریم ایمن و خطر است تا بتوان در صورت وقوع چنین رویدادی افراد را از محدوده خطر دور کرده و میزان تلفات را کاهش داد (۱۹). ارزیابی ریسک کمی و مدل‌سازی پیامد یکی از مهم‌ترین راه‌های بررسی محدوده اثر و تخمین اثرات تابش‌های گرمایی ناشی از اشتعال، موج فشار ناشی از انفجار و اثرات سمی ناشی از رهایش مواد سمی در محیط است (۲۰).

بررسی مطالعات انجام‌شده در خارج از کشور نشان‌دهنده اهمیت بالای مطالعه سطوح ایمنی جایگاه‌های گاز طبیعی فشرده و همچنین حوادث و آسیب‌هایی است که در اثر اشتعال و انفجار مخازن در این جایگاه‌ها ایجادشده است (۲۱, ۲۲). مطالعات متعددی نیز در داخل کشور در زمینه مدل‌سازی و ارزیابی پیامد حریق و انفجار انجام‌شده است که ازجمله برخی از آن‌ها می‌توان به مطالعه شاهدی علی‌آبادی در مورد ارزیابی پیامد حریق مخازن گاز متان (۲۳)، مطالعه محمد فام و زارعی در رهایش گاز طبیعی و هیدروژن در سال۲۰۱۵ (۱۱)، مطالعه پروینی و همکاران در ایستگاه‌های گاز طبیعی فشرده (۱۴)، مطالعه زارعی و همکاران در واحدهای تولید هیدروژن در سال‌های ۲۰۱۳ و ۲۰۱۴ (۲۴) و مطالعه کاریزنوی و همکاران در مخازن ذخیره گاز مایع در سال ۲۰۱۷ (۲۵) اشاره نمود. لذا با توجه به

www.SID.ir

Archive of SID

قابلیت اشتعال و انفجار بالای گاز طبیعی فشرده، وجود مخاطرات بالقوه و بروز حوادث بسیار در جایگاه‌های شهری توزیع گاز طبیعی فشرده، افزایش روزافزون این جایگاه‌ها و سیاست‌گذاری دولت ایران مبنی برافزایش استفاده از گاز طبیعی فشرده، مطالعه حاضر با هدف ارزیابی پیامد حریق و انفجار مخازن گاز متان در یک جایگاه توزیع گاز طبیعی فشرده انجام پذیرفت.

مواد و روش‌ها

در این مطالعه گزارش موردی و از نوع مدل‌سازی یک جایگاه توزیع گاز طبیعی فشرده واقع در فردیس – کرج در سال ۱۳۹۶ مورد ارزیابی قرار گرفت. بدین منظور در ابتدا هماهنگی‌های لازم با مسئولین جایگاه انجام‌شده و سپس جمع آموری اطلاعات مربوطه و تصویربرداری انجام گردید. به‌منظور واکاوی پیامد در مطالعه حاضر، نرم‌افزار PHAST.6.7 مورداستفاده قرار گرفت. این نرم‌افزار یکی از قویی‌ترین و مشهورترین نرم‌افزارهایی است که از سوی شرکت DNV[2] به‌منظور مدل‌سازی حوادث ناشی از رهایش مواد سمی، آتش‌سوزی و انفجار عرضه‌شده است. ازجمله ویژگی‌های این نرم‌افزار شامل بانک اطلاعاتی قدرتمند از مواد و مدل‌های شبیه‌سازی، امکان تعریف مخلوط مواد، توانایی تطبیق نتایج روی نقشه و امکان رسم نمودارهای متغیر بازمان است (۱۷). شایان‌ذکر است که این نرم‌افزار، قادر به مدل‌سازی انواع سناریوها، شامل گسیختگی مخزن ذخیره، پارگی خط لوله، پارگی صفحه پاره شونده، نشتی، شکست سقف مخزن، خط لوله طولانی، باز شدن دریچه ایمنی و غیره است (۲۵).

در این مطالعه با توجه به نتایج حاصل از بررسی و بازدید از جایگاه گاز طبیعی فشرده موردمطالعه، بررسی مطالعات و حوادث گذشته و بررسی نظرات متخصصان، چهار سناریوی تخلیه، ترکیدگی فاجعه‌بار، آتش فورانی و انفجار در مخازن گاز طبیعی فشرده مورد ارزیابی قرار گرفت. پارامترهای مربوط به منبع انتشار در وضعیت عادی در جدول ۱ آورده شده است. سناریو، واقعه یا مجموعه‌ای از وقایع است که سبب ایجاد حادثه می‌شود و اکثراً به‌صورت پارگی و یا نشتی از تجهیزات فرایندی (مخزن، تانک، لوله و ...) حاوی مواد خطرناک (سمی، قابل اشتعال) تعریف می‌شود. مهم‌ترین مرحله در ارزیابی پیامد، همین گام نخست است. در این مرحله سناریوهایی که اولاً محتمل و ثانیاً دارای شدت و تأثیر قابل‌توجهی هستند، انتخاب می‌شود (۲۶).

جدول ۱. پارامترهای مربوط به منبع انتشار (مخازن) در وضعیت عادی

پارامتر	مقدار / نوع
نوع مخزن – وضعیت قرارگیری	استوانه‌ای – افقی
فشار (بار)	۲۰۰
دما (درجه سانتی‌گراد)	۱۲
ظرفیت مخزن (لیتر)	۷۰۰

در صورت ایجاد هرگونه آسیب در مخازن گاز طبیعی فشرده موجود در جایگاه، نشت گاز متان به علت مشخصات فیزیکی آن اتفاق می‌افتد (گسترش آدیاباتیک). در این رویداد ایجاد هرگونه حادثه مانند آتش‌سوزی و انفجار محتمل است (۲۷).

کلیه پارامترهای موردنیاز به‌منظور مدل‌سازی و ارزیابی پیامد، ازجمله نوع مخزن، ظرفیت مخزن، دما و فشار عملیاتی مخزن، اندازه نشتی، ارتفاع نشتی و ... از طریق بررسی مستندات موجود در جایگاه، استانداردهای موجود در مورد شرایط و تجهیزات جایگاه‌های گاز طبیعی فشرده (۲۸) و مطالعات انجام‌شده در داخل و خارج از کشور گردآوری گردید. همچنین کلیه پارامترهای آب و هوایی منطقه نیز با هدف تعیین غلظت مواد در محیط‌های تحت تأثیر حادثه، از طریق داده‌های موجود در سایت هواشناسی منطقه موردبررسی، در بهمن‌ماه تحصیل گردیده و در جدول ۲ آورده شده است.

جدول ۲. میانگین پارامترهای محیطی جایگاه گاز طبیعی فشرده موردمطالعه

میانگین پارامترهای محیطی	روز	شب
دما (درجه سانتی‌گراد)	۱۵	۸
سرعت باد (متر بر ثانیه)	۲/۵	۲
رطوبت نسبی (درصد)	۴۹	۵۲
کلاس پایداری جو	D	F

در ادامه هر یک از سناریوهای موردبررسی، تشریح گردیده، با استفاده از نرم‌افزار مدل‌سازی شده و پیامدهای محتمل هرکدام از سناریوها مورد ارزیابی قرار گرفت.

۲. Det Norske Veritas

www.SID.ir

Archive of SID

جدول ۳. مقادیر معیار اندازه نشتی، ارائه‌شده توسط Det Norske Veritas

تجهیزات	مقدار معیار برای مدل‌سازی
لوله‌های با قطر کمتر از ۱/۵ اینچ	۵ میلی‌متر و گسیختگی کامل
لوله‌های با قطر بین ۲ تا ۶ اینچ	۵ میلی‌متر، ۲۵ میلی‌متر و گسیختگی کامل
لوله‌های با قطر بین ۸ تا ۱۲ اینچ	۵ میلی‌متر، ۲۵ میلی‌متر، ۱۰۰ میلی‌متر و گسیختگی کامل
مخازن	گسیختگی کامل خطوط ورودی و خروجی و تخلیه ناگهانی
پمپ‌ها	بسته به قطر لوله‌های ورودی و خروجی، نشتی از درزگیر به قطرهای ۵، ۲۵ و ۱۰۰ میلی‌متر

سناریو اول (مدل‌سازی انتشار): سوراخی در دیواره یکی از مخازن گاز طبیعی فشرده موجود در جایگاه که در دمای ۱۲ درجه سانتی‌گراد و فشار ۲۰۰بار قرار دارند، ایجادشده است. طول و قطر مخزن به ترتیب ۱/۵ و ۰/۴ متر می‌باشد. سوراخ در فاصله یک متری از کف مخزن ایجادشده است. میزان گاز خروجی از مخزن در زمان‌های مختلف محاسبه گردید. فاز رهایش گاز بوده و معیار اندازه نشتی نیز طبق جدول ۳، گسیختگی کامل و تخلیه ناگهانی در نظر گرفته شد. این سناریو با در نظر گرفتن داده‌های هواشناسی موجود در جدول ۲ در دو کلاس پایداری جو پاسکوییل (کلاس پایداری F و D) و با هدف تعیین غلظت مواد در فواصل مختلف نسبت به منبع انتشار موردبررسی قرار گرفت.

سناریو دوم (مدل‌سازی ترکیدگی فاجعه‌بار مخزن): در این بخش از سناریوی Catastrophic Rupture و مشخصات سناریو یک استفاده‌شده و میزان غلظت گاز متان در فواصل مختلف از منبع و مساحت تحت تأثیر آن در اثر ترکیدگی مخزن، محاسبه‌شده است.

سناریو سوم (مدل‌سازی آتش فورانی): با توجه به اینکه مطالعات پیشین نشان داده‌اند که آتش فورانی ازجمله مخاطرات اصلی در مورد نشت گاز متان از مخازن است (۲۲)، این سناریو با توجه به مشخصات فوق مطرح گردیده و در سه سطح شدت تابش ۴، ۱۲/۵ و ۳۷/۵ کیلووات بر مترمربع، به‌عنوان سطوح شدت تابش مبنا ارائه‌شده در نرم‌افزار و مطالعات پیشین به‌عنوان سطوح آستانه ایجاد اثرات نامطلوب در تجهیزات و افراد (جدول ۴)، مورد ارزیابی واقع شد. در این بخش از متد مدل مخروطی [۳]در بخش مدل‌سازی آتش فورانی استفاده گردید. در مخزن گاز متان موجود در جایگاه که دارای فشار ۲۰۰ بار و دمای ۱۲ درجه سانتی‌گراد است، در اثر ضربه سوراخی به قطر ۲۵، ۵۰ و ۱۵۰ میلی‌متر ایجادشده است، لازم به ذکر است که ابعاد مذکور با توجه به نتایج مدل‌سازی‌های انجام‌شده در ۱۰ سایز مختلف (از ۱۵ میلی‌متر تا ۲۵۰ میلی‌متر با توجه به نتایج مطالعات پیشین) و انتخاب ۳ سایز ۲۵، ۵۰ و ۱۵۰ میلی‌متر که در آن بیشترین مساحت تحت تأثیر ناشی از گرمای تشعشعی در سطوح مبنای تعیین‌شده، مشاهده می‌گردد (بدترین سناریو انتخابی)، انتخاب‌شده‌اند. سوراخ مذکور در فاصله ۲ متری در سطح زمین است. اثرات ناشی از آتش فورانی در فواصل مختلف موردبررسی قرار گرفت. معیارهای مربوط به ارزیابی پیامد حوادث در هرکدام از سناریوهای موردبررسی و توصیف آن‌ها در جدول ۴ آورده شده است.

سناریو چهارم (مدل‌سازی انفجار مخازن): در این بخش از مدل جرم معادل تی ان تی [۴]به‌عنوان روشی رایج در محاسبه میزان افزایش فشار ناشی از انفجار در فواصل مختلف نسبت به منبع و در سه سطح افزایش فشار ۰/۰۲، ۰/۱۳ و ۰/۲ بار (جدول ۴) و با استفاده از مشخصات سناریوهای پیشین و جدول ۱، استفاده‌شده و میزان افزایش فشار در فواصل مختلف از منبع انفجار محاسبه گردیده است.

۳. Cone model
۴. TNT Equivalence Method

www.SID.ir

Archive of SID

جدول ۴. معیارهای ارزیابی پیامد حوادث در هرکدام از سناریوهای موردبررسی و توصیف آن‌ها

پیامد	شاخص		آسیب
	سطح	مقدار	
آتش فورانی	اول	۴ کیلووات بر مترمربع	حد آستانه درد و سوختگی درجه دوم
	دوم	۱۲/۵ کیلووات بر مترمربع	حداقل انرژی لازم برای ذوب لوله‌های لاستیکی
	سوم	۳۷/۵ کیلووات بر مترمربع	آسیب به تجهیزات فرآیندی و مرگ فوری افراد
آتش ناگهانی	اول	۰/۵ LFL	مشکلات تنفسی
	دوم	LFL	مرگ فوری
انفجار	اول	۰/۰۲ بار	حریم ایمن
	دوم	۰/۱۳ بار	آسیب جزئی
	سوم	۰/۲ بار	آسیب متوسط
	چهارم	۰/۸۳ بار	تخریب کامل ساختمان‌ها و تجهیزات، مرگ افراد

یافته‌ها

در این مطالعه چهار سناریوی انتشار، ترکیدگی فاجعه‌بار، آتش فورانی و همچنین انفجار مخزن موردبررسی قرار گرفت. با توجه به نتایج مطالعات پیشین و همچنین بررسی پیامد سناریوهای موردبررسی، دو سناریوی آتش فورانی و انفجار کامل مخازن به‌عنوان مخاطرات اصلی ناشی از نشت گاز طبیعی فشرده از مخزن گاز متان انتخاب گردید. نتایج حاصل از مدل‌سازی سناریو اول (سناریو انتشار) در شرایط آب و هوایی مختلف نشان داد که در صورت نشت گاز متان از مخازن، غلظت این گاز تا فاصله ۱۷ متری نیز بسیار بالا بوده و حدود ۳۹۰۰۰ پی پی ام است. کل حجم گاز موجود در مخزن نیز در طی مدت‌زمان ۶۷۶/۰۳ ثانیه تخلیه می‌شود. در سناریو دوم، نتایج مربوط به مساحت تحت تأثیر در صورت بروز آتش فورانی در مخزن موجود در جایگاه، در سطوح مختلف تابشی موردبررسی (۴، ۱۲/۵ و ۳۷/۵ کیلو وات بر مترمربع) و در شرایط مختلف آب و هوایی طبق معیار پایداری جو پاسکوییل (۱/F۵، ۱/D۵، D۵) در سه اندازه نشتی ۲۵، ۵۰ و ۱۵۰ میلی‌متر در جدول ۵ آورده شده است.

جدول ۵. مساحت تحت تأثیر (مترمربع) ناشی از ایجاد آتش فورانی مخزن گاز طبیعی فشرده در سه اندازه نشتی ۲۵، ۵۰ و ۱۵۰ میلی‌متر

میزان تشعشع (کیلووات بر مترمربع)	۴			۱۲/۵			۳۷/۵		
شرایط آب و هوایی اندازه نشتی (میلی‌متر)	۱/۵ F*	۱/۵ D*	۵ D*	۱/۵ F*	۱/۵ D*	۵ D*	۱/۵ F*	۱/۵ D*	۵ D*
۲۵	۹۵/۸۲	۸۶/۲۳	۸۹/۶۵	۶۶/۵۸	۵۹/۳۶	۶۳/۹۶	۴۴/۶۹	۴۲/۸۵	۴۰/۶۳
۵۰	۱۰۰/۰۹	۹۹/۵۶	۱۰۰/۲۸	۹۲/۴۵	۸۶/۶۴	۹۰/۵۵	۷۶/۸۵	۷۷/۸۹	۷۹/۳۳
۱۵۰	۱۲۲/۵۱	۱۲۸/۹۶	۱۳۵/۱۳	۱۱۲/۳۳	۱۱۵/۶۶	۱۱۹/۳۸	۱۰۹/۸۲	۱۱۱/۲۸	۱۰۵/۴۵

۱/F* ۵: سرعت جریان هوا ۱/۵ متر بر ثانیه و هوای پایدار

۱/D* ۵: سرعت جریان هوا ۱/۵ متر بر ثانیه و هوای خنثی

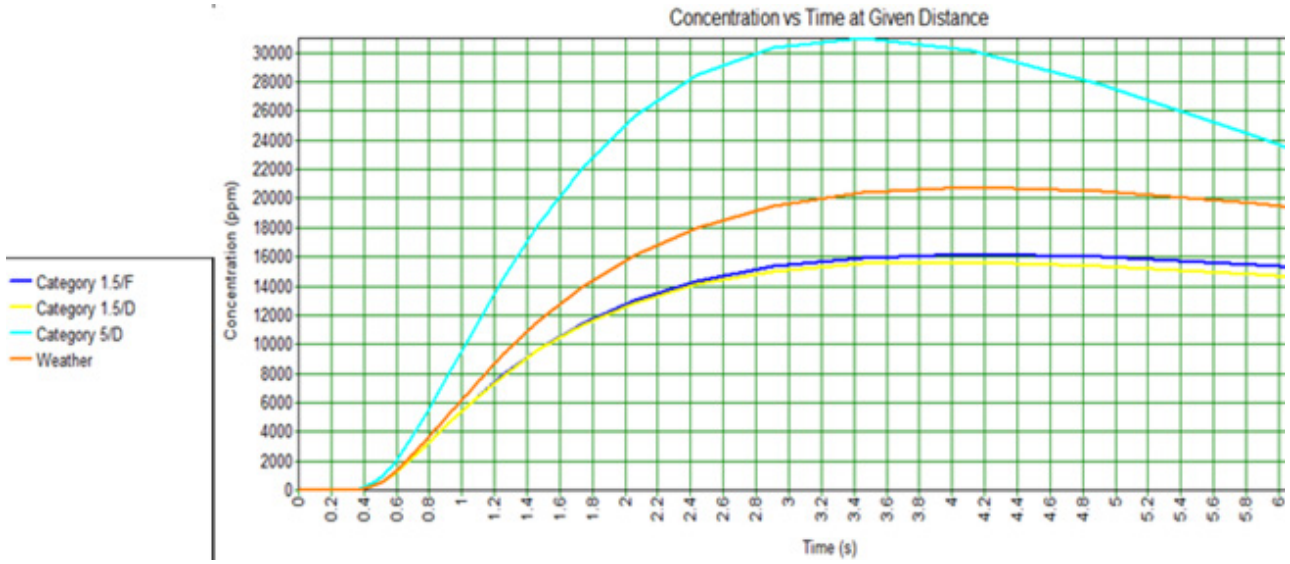
D* ۵: سرعت جریان هوا ۵ متر بر ثانیه و هوای خنثی

نتایج حاصل از بررسی سناریو بروز آتش فورانی نشان داد که بیشترین میزان گرمای تابشی در شرایط آب و هوایی 1.5F، 1.5D و 5D در فاصله‌ی ۱۶/۵ متری از مخزن بوده و بیشینه آن در این فاصله مقدار ۳۹/۲۶ کیلووات بر مترمربع است. همچنین در این بخش مشخص گردید که حداکثر توان نشری شعله در آتش فورانی مقدار ۴۲/۰۳ کیلووات بر مترمربع بوده و طول شعله نیز به ۱۵ متر می‌رسد. نتایج حاصل از بررسی سناریو ترکیدگی فاجعه‌بار مخزن نیز نشان داد که در صورت ترکیدگی مخزن، میزان غلظت گاز تا ۰/۴ ثانیه صفر بوده

www.SID.ir

Archive of SID

و پس‌ازآن در ثانیه ۳/۴ به پیک خود رسیده و در این ثانیه غلظت گاز متان به مقدار ۳۰۰۰۰ پی پی ام می‌رسد. نمودار مربوط به میزان غلظت گاز متان برحسب زمان در فاصله ۱۰ متری از مخازن در شرایط آب و هوایی مختلف در شکل ۲ آورده شد.



شکل ۲. نمودار میزان غلظت گاز متان (پی پی ام) برحسب زمان در فاصله ۱۰ متری از مخازن در صورت ایجاد ترکیدگی فاجعه‌بار مخزن

در بخش مدل‌سازی انفجار از مدل جرم معادل TNT استفاده‌شده و میزان افزایش فشار در فواصل مختلف از منبع انفجار محاسبه گردیده و در جدول ۶ ارائه‌شده است. نتایج نشان داد که در فاصله ۲۰ متری، میزان افزایش فشار حاصل از انفجار ۱ بار بوده (احتمال مرگ افراد در این فشار ۱۰۰ درصد است) و به‌تدریج با افزایش فاصله از مخزن کم شده تا جایی که در فاصله‌ی ۴۰۰ متری به ۰/۰۱ بار می‌رسد که همان حریم ایمن می‌باشد (جدول ۴).

همچنین مشخص گردید که در شعاع ۵۲، ۶۹ و ۲۳۲ متری مخزن به ترتیب مقدار ۰/۲۱، ۰/۱۴ و ۰/۰۲ بار، افزایش فشار وجود دارد. میزان افزایش فشار در اثر انفجار در اطراف مخزن گاز متان در مدل جرم معادل TNT در شکل ۳ آورده شده است.

جدول ۶. مساحت تحت تأثیر (مترمربع) در اطراف مخزن در اثر انفجار در شرایط آب و هوایی مختلف

افزایش فشار (Bar)		۰/۰۲۰۶۸	۰/۱۳۷۹	۰/۲۰۶۸
شرایط آب و هوایی	۱.۵/F	۲۱۶/۰۸	۶۲/۲۳	۴۶/۸۷
	۱.۵/D	۲۲۵/۰۹	۶۴/۶۵	۴۹/۸۸
	۵/D	۲۳۱/۹۶	۶۸/۵۶	۵۱/۸۹

شکل ۳. میزان افزایش فشار در اثر انفجار در اطراف مخزن گاز متان در مدل جرم معادل TNT

www.SID.ir

Archive of SID

بحث:

طی مطالعه حاضر، مطابق با بررسی‌های انجام‌شده دو سناریوی ایجاد آتش فورانی و انفجار به‌عنوان مهم‌ترین پیامدهای محتمل، موردمطالعه قرار گرفت. با توجه به ماهیت گاز طبیعی فشرده، امکان بروز انفجار بخار مایعات در حال جوش[۵] و همچنین آتش استخری[۶] در این مطالعه وجود ندارد. به‌منظور مدل‌سازی سناریوهای مذکور نیز از نرم‌افزار PHAST.6.7 استفاده گردید. مطالعات پیشین نشان داده‌اند که این نرم‌افزار یکی از قابل‌اعتمادترین نرم‌افزارهای موجود در حوزه مدل‌سازی نشت مواد است (۲۹). نتایج حاصل از بررسی سناریو بروز آتش فورانی نشان داد که بیشترین میزان گرمای تابشی در شرایط آب و هوایی 1.5F، 1.5D و 5D در فاصله‌ی ۱۶/۵ متری از مخزن بوده و بیشینه آن در این فاصله مقدار ۳۹/۲۶ کیلووات بر مترمربع است که در این بخش احتمال آسیب به تجهیزات فرآیندی، سازه‌ها و مرگ‌ومیر قطعی افراد وجود دارد (جدول ۴). در این سناریو سه اندازه نشتی ۲۵، ۵۰ و ۱۵۰ میلی‌متر با توجه به مدل‌سازی‌های انجام‌شده در سایزهای مختلف و انتخاب سه سایز مذکور به‌عنوان بدترین سناریو، موردبررسی قرار گرفت و نتایج حاصل نشان داد که بیشترین مساحت تحت تأثیر از تشعشع در اندازه نشتی ۱۵۰ میلی‌متر و شرایط آب و هوایی 5D بوده و کمترین نیز در اندازه نشتی ۲۵ میلی‌متر است، درنتیجه مشخص گردید که میزان شعاع سوراخ ایجادشده در بدنه مخازن عاملی تأثیرگذار در مساحت تحت تأثیر آتش فورانی است و تأثیر بیشتری نسبت به شرایط آب و هوایی دارد. در اثر ایجاد پارگی کامل بدنه مخزن نیز، با توجه به فشار بالای مخزن و تخلیه آنی گاز متان فشرده موجود، امکان ایجاد آتش فورانی وجود ندارد. در مطالعه‌ای که توسط پارک و همکاران در سال ۲۰۱۴ و همچنین شاهدی علی‌آبادی و همکاران در سال ۲۰۱۶ انجام شد، مشخص گردید که اندازه نشتی عاملی تأثیرگذار بر مساحت تحت تأثیر انفجار و آتش ناگهانی است (۲۰, ۲۳) که با نتایج مطالعه حاضر همخوانی دارد. با توجه به اینکه بخش غربی و شرقی جایگاه موردبررسی منتهی به زمین‌های خالی از سکنه می‌باشد، در این دو جهت خسارات کمتری نسبت به بخش‌های شمالی و جنوبی آن‌که منتهی به مناطق مسکونی و بلوارهای پرتردد است، در هر سه اندازه نشتی، ایجاد خواهد شد. لازم به ذکر است که در تمام شعاع‌های موردبررسی در این سناریو، همواره بخش‌هایی همچون خطوط لوله، کمپرسور به‌عنوان قلب جایگاه و همچنین مخازن نصب‌شده روی اتومبیل‌ها به‌عنوان منابع ثانویه خطر مطرح‌شده و تحت تأثیر حریق قرار می‌گیرند. بیشترین مساحت متأثر از آتش فورانی در این سناریو مقدار ۱۳۵/۱۳ متر و در اندازه نشتی ۱۵۰ میلی‌متر بوده (جدول ۵) که در این حالت کلیه بخش‌های جایگاه، بلوار اصلی و مناطق مسکونی اطراف جایگاه تحت تأثیر قرار خواهد گرفت. تحلیل شرایط آب و هوایی نیز نشان داد که در تمامی ابعاد نشتی موردبررسی جهت باد تأثیر مستقیمی بر شعاع منطقه تحت تأثیر از آتش فورانی داشته است که با نتایج مطالعه شاهدی علی‌آبادی و همکاران همخوانی دارد (۲۲). همچنین مشخص گردید که در صورت کاهش دما در زمان شب، شدت تشعشع آتش فورانی بالاتر است که با نتایج مطالعه زارعی و همکاران همخوانی دارد (۱۱).

نتایج حاصل از بررسی سناریو ترکیدگی فاجعه‌بار مخزن نیز نشان داد که در صورت ترکیدگی مخزن، میزان غلظت گاز تا ۰/۴ ثانیه صفر بوده و پس‌ازآن در ثانیه ۳/۴ به پیک خود رسیده و در این ثانیه غلظت گاز متان به مقدار ۳۰۰۰۰ پی پی ام می‌رسد که می‌تواند باعث ایجاد ریسک مرگ‌ومیر ۱۰۰ درصدی افراد تا شعاع ۱۰ متری از محل نشتی شود. در بخش مدل‌سازی انفجار از مدل جرم معادل TNT استفاده‌شده و میزان افزایش فشار در فواصل مختلف از منبع انفجار محاسبه گردیده و در جدول ۶ ارائه‌شده است. نتایج نشان داد که در فاصله ۲۰ متری، میزان افزایش فشار حاصل از انفجار ۱بار بوده (احتمال مرگ افراد در این فشار ۱۰۰ درصد است) و به‌تدریج با افزایش فاصله از مخزن کم شده تا جایی که در فاصله‌ی ۴۰۰ متری به ۰/۰۱ بار می‌رسد که همان حریم ایمن می‌باشد. همچنین مشخص گردید که در شعاع ۵۲، ۶۹ و ۲۳۲ متری مخزن به ترتیب مقدار ۰/۲۱، ۰/۱۴ و ۰/۰۲ بار، افزایش فشار وجود دارد (شکل ۶). بررسی تأثیر شرایط آب و هوایی بر روی شدت انفجار ایجادشده نیز نشان داد که این فاکتور بر روی ناحیه اثر انفجار، تأثیری ندارد که با نتایج مطالعه کاریزنوی و همکاران همخوانی دارد (۲۵). همچنین در این سناریو با توجه به وجود تجهیزاتی همچون تأسیسات توزیع سوخت، کمپرسورهای مورداستفاده در جایگاه، مخازن موجود در وسایل نقلیه که خود یکی از مهم‌ترین تجهیزاتی هستند که می‌توانند بیشترین تأثیر را از وقوع انفجار در جایگاه بپذیرند و اغلب نصب آن‌ها در اتومبیل‌های مطابق با استانداردها انجام‌نشده و تخلفاتی در این حوزه انجام می‌شود، احتمال ایجاد حوادث دومینویی[۷]، در این سناریو بسیار زیاد است. لذا با توجه به موارد مذکور و همچنین ذکر این نکته که جایگاه موردبررسی دومنظوره بوده و وجود مخازن بنزین نیز ریسک بروز انفجار و حریق را چندین برابر می‌کند، پیشنهاد می‌شود که توجه بیشتری به نحوه نصب و بررسی مخازن اتومبیل‌ها و همچنین تأسیسات موجود در جایگاه‌ها از قبیل مخازن، خطوط لوله، کمپرسورها و ... شود. نتایج حاصل از این مطالعه نشان داد که با توجه به اینکه گاز متان، گازی قابل اشتعال و انفجار است، در

۵. BELEVE: boiling liquid – expanding vapor explosion
۶. Pool Fire
۷. Domino Effect

www.SID.ir

Archive of SID

صورت نشتی و آسیب مخزن، می‌تواند منجر به حوادث ناگواری شود. علل الخصوص در جایگاه‌های سوخت‌گیری دومنظوره که علاوه بر گاز متان فشرده، بنزین نیز مورداستفاده قرار می‌گیرد. ازجمله نقاط قوت مطالعه حاضر می‌توان به کاربردی بودن آن اشاره کرد، با توجه به اینکه تاکنون مطالعات کمی در داخل کشور در حوزه مدل‌سازی جایگاه‌های توزیع گاز طبیعی فشرده شهری انجام‌شده است، نتایج مطالعه حاضر می‌تواند به‌عنوان یک راهنما در جهت ایجاد اقدامات کنترلی مناسب همچون احداث جایگاه‌های مذکور با رعایت فواصل ایمن نسبت به مناطق مسکونی و پرتردد و همچنین افزایش سطوح ایمنی جایگاه‌ها، مورداستفاده قرار گیرد. ازجمله محدودیت‌های این مطالعه نیز می‌توان به عدم در نظر گرفتن اثر دومینویی در نرم‌افزار PHAST اشاره کرد. طی مطالعه حاضر عواملی همچون مخازن بنزین موجود در جایگاه و همچنین مخازن گاز طبیعی فشرده نصب‌شده بر روی وسایل نقلیه، می‌توانند به‌عنوان منابع ثانویه عمل کرده و شدت پیامد ایجادشده را به‌مراتب تشدید نمایند، لذا با توجه به اینکه در نرم‌افزار PHAST امکان در نظر گرفتن اثر دومینویی منابع، وجود ندارد، پیشنهاد می‌شود طی مطالعات آینده، محققان مدل‌سازی‌های مربوطه را با سایر نرم‌افزارهای موجود نیز انجام داده و اقدام به مقایسه نتایج تحصیل شده، نمایند. لذا با توجه به موارد پیش گفت و افزایش روزافزون میزان استفاده از این سوخت به‌عنوان ماده‌ای نسبتاً سازگار با محیط‌زیست، اقدامات کنترلی ذیل به‌منظور افزایش سطوح ایمنی در مورد مخازن گاز متان در جایگاه‌های سوخت‌گیری پیشنهاد می‌گردد:

استفاده از دستگاه‌های مناسب به‌منظور تشخیص نشتی در کمترین زمان ممکن، انجام بازرسی‌های منظم و دوره‌ای، آموزش لازم و کافی برای کارکنان جایگاه‌های توزیع سوخت به‌منظور انجام عکس‌العمل‌های مناسب در مواقع اضطراری، حذف علل منجر به وقوع نشتی، استفاده از اقدامات مناسب برای کاهش احتمال و شدت حوادث بالقوه و احداث جایگاه‌های سوخت‌گیری در فاصله حداقل ۵۰ متری تا مناطق و ساختمان‌های مسکونی به‌منظور کاهش تلفات احتمالی و مرگ‌ومیر افراد.

تشکر و قدردانی

بدین‌وسیله نویسندگان از کلیه دوستانی که در راستای انجام این مطالعه، همکاری نموده‌اند، صمیمانه تشکر و قدردانی می‌نمایند.

References

1. Mousavi J, Parvini M. Analyzing effective factors on leakage-induced hydrogen fires. Journal of Loss Prevention in the Process Industries. 2016;40:29-42. [Scopus]

2. Haghnazarloo H, Parvini M, Lotfollahi MN. Consequence modeling of a real rupture of toluene storage tank. Journal of Loss Prevention in the Process Industries. 2015;37:11-8. [Scopus]

3. Kamaei M, Alizadeh SSA, Keshvari A, Kheyrkhah Z, Moshashaei P. Risk assessment and consequence modeling of BLEVE explosion wave phenomenon of LPG spherical tank in a refinery. Health and Safety at Work. 2016;6(2):10-24.

4. Kagiri C, Zhang L, Xia X. Optimization of a compressed natural gas station operation to minimize energy cost. Energy Procedia. 2017;142:2003-8. [Scopus]

5. Ally J, Pryor T. Life-cycle assessment of diesel, natural gas and hydrogen fuel cell bus transportation systems. Journal of Power Sources. 2007;170(2):401-11. [Scopus]

6. Mac Kinnon MA, Brouwer J, Samuelsen S. The role of natural gas and its infrastructure in mitigating greenhouse gas emissions, improving regional air quality, and renewable resource integration. Progress in Energy and Combustion science. 2018;64:62-92. [Scopus]

7. Rubel RI. Natural Gas Driven Vehicles Safety and Regulatory Regime-Challenges in Bangladesh. Journal of Materials and Engineering Structures «JMES». 2017;4(3):113-20.

8. Sehgal A, Saxena M, Pandey S, Malhotra R. Improving Performance of Compressed Natural Gas Fueled Passenger Car Engine by Addition of Hydrogen. 2018.
www.SID.ir

Archive of SID

9. Khan MI, Yasmin T, Shakoor A. Technical overview of compressed natural gas (CNG) as a transportation fuel. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2015;51:785-97.

10. Vinnem JE. On the development of failure models for hydrocarbon leaks during maintenance work in process plants on offshore petroleum installations. Reliability Engineering & System Safety. 2013;113:112-21. [Scopus]

11. Mohammadfam I, Zarei E. Safety risk modeling and major accidents analysis of hydrogen and natural gas releases: A comprehensive risk analysis framework. International Journal of Hydrogen Energy. 2015;40(39):13653-63. [Scopus]

12. Dadgar P, Tehrani GM, Borgheipour H. Identification and Assessment of Human Error in CNG Stations with SHERPA Technique. International Journal of Environmental and Science Education. 2017.

13. Badri N, Nourai F, Rashtchian D. The role of quantitative risk assessment in improving hazardous installations siting: a case study. Iranian Journal of Chemistry and Chemical Engineering (IJCCE). 2011;30(4):113-9. [Scopus]

14. Parvini M, Kordrostami A. Consequence modeling of explosion at Azad-Shahr CNG refueling station. Journal of Loss Prevention in the Process Industries. 2014;30:47-54. [Scopus]

15. Kagiri C, Zhang L, Xia X, editors. Compressor and priority panel optimization for an energy efficient CNG fuelling station. Control Conference (ASCC), 2017 11th Asian; 2017: IEEE.

16. Saadat-Targhi M, Khadem J, Farzaneh-Gord M. Thermodynamic analysis of a CNG refueling station considering the reciprocating compressor. Journal of Natural Gas Science and Engineering. 2016;29:453-61. [Scopus]

17. Jafari M, Zarei E, Dormohammadi A. Presentation of a method for consequence modeling and quantitative risk assessment of fire and explosion in process industry (Case study: Hydrogen Production Process). Health and Safety at Work. 2013;3(1):55-68.

18. Koller G, Fischer U, Hungerbühler K. Assessing safety, health, and environmental impact early during process development. Industrial & Engineering Chemistry Research. 2000;39(4):960-72. [Scopus]

19. Beheshti MH, Hajizadeh R, Mehri A, Borhani Jebeli M. Modeling the result of hexane leakage from storage tanks and planning a emergency response programm in a petrochemical complex. Iran Occupational Health. 2016;13(1):69-79. [Scopus]

20. Dan S, Lee CJ, Park J, Shin D, Yoon ES. Quantitative risk analysis of fire and explosion on the top-side LNG-liquefaction process of LNG-FPSO. Process Safety and Environmental Protection. 2014;92(5):430-41. [Scopus]

21. Khan MI, Yasmin T, Khan NB. Safety issues associated with the use and operation of natural gas vehicles: learning from accidents in Pakistan. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering. 2016;38(8):2481-97. [Scopus]

22. Selvan RT, Siddqui NA. Risk Assessment of Natural Gas Gathering Station & Pipeline Network. International Journal of Theoretical and Applied Mechanics. 2017;12(2):227-42.

23. Assari MJ, Kalatpour O, Zarei E, Mohammadfam I. Consequence modeling of fire on Methane storage tanks in a gas refinery. Journal of Occupational Hygiene Engineering. 2016;3(1):51-9.

24. Zarei E, Jafari MJ, Badri N. Risk assessment of vapor cloud explosions in a hydrogen production facility with consequence modeling. Journal of research in health sciences. 2013;13(2):181-7. [Scopus]

www.SID.ir

25. Kariznovi H, AsgharFarshad A, Yarahmadi R, Khosravi Y, Yari P. Consequence analysis of fire and explosion of a cylindrical LPG tanks in an oil and gas industry. Iran Occupational Health. 2017;14(3):37-45. [Scopus]

26. Dadashzadeh M, Khan F, Hawboldt K, Amyotte P. An integrated approach for fire and explosion consequence modelling. Fire Safety Journal. 2013;61:324-37. [Scopus]

27. Yang JM, Ko BS, Park C, Yoo B, Shin D, Ko JW. Design and implementation of an integrated safety management system for compressed natural gas stations using ubiquitous sensor network. Korean Journal of Chemical Engineering. 2014;31(3):393-401. [Scopus]

28. Goulding D, Fitzpatrick D, O'Connor R, Browne J, Power N. Introducing gaseous transport fuel to Ireland: A strategic infrastructure framework. Renewable Energy. 2019. [Scopus]

29. Meysami H, Ebadi T, Zohdirad H, Minepur M. Worst-case identification of gas dispersion for gas detector mapping using dispersion modeling. Journal of Loss Prevention in the Process Industries. 2013;26(6):1407-14. [Scopus]

www.SID.ir