Journal of Health and Safety at Work 2022; 12(2): 418-431

ORIGINAL RESEARCH PAPER

Analysis of the safety effectiveness of methane gas valve pits: A Case Study in the Steel Industry Based on Hazardous Areas Classification

Ali Fardi[1], Mohammad Karkhaneh[2], Hamidreza Heidari[3], Abolfazl Mohammadbeigi[4], Ahmad Soltanzadeh[5*]

[1] Department of Occupational Safety and Health Engineering, School of Public Health, Hamedan University of Medical Sciences and Health Services, Hamedan, Iran
[2] Department of Medicine, University of Alberta, Edmonton, Alberta, Canada
[3] Department of Occupational Safety and Health Engineering, Faculty of Health, Research Center for Environmental Pollutants, Qom University of Medical Sciences, Qom, Iran
[4] Department of Epidemiology and Biostatistics, Faculty of Health, Research Center for Environmental Pollutants, Qom University of Medical Sciences, Qom, Iran
[5] Department of Occupational Safety and Health Engineering, Faculty of Health, Research Center for Environmental Pollutants, Qom University of Medical Sciences, Qom, Iran

Received: 2019-9-1 Accepted: 2020-8-6

ABSTRACT

Introduction: Methane is one of the most widely used gases in industries with a high flammability potential. This study aimed to evaluate the efficiency of ventilation systems installed on methane valve pits based on hazardous areas classification.

Material and Methods: This study was implemented in a steel industry in Qom Province in 2019. The tools used in this study were a DELTA OHM pitot tube (DO-2003) to measure wind speed, EPA Protocol for equipment leak emission estimates (U.S. Environmental Protection Agency) and IEC-60079-10 for evaluating the safety of ventilation of methane valve pits.

Results: The methane LELm was about 0.0334 kg/m^3, and the volume of the release area was approximately VZ=0.053 m3. The expected leak emissions were within the Vz<0.1 m^3 range. The ventilation system embedded on methane distribution pipelines was not effective for openings with diameters of more than 0.3 mm and the volume of gas inside the valve pits would quickly exceed high ventilation border which might lead to a dangerous accumulation of gas in the valve pits.

Conclusion: Given that a very small opening or leak in gas transmission valves may lead to the formation of an explosive atmosphere, it is essential to monitor methane before entering the valve pit area and performing any operations on valve pits.

Keywords: *Methane gas, Safety, Ventilation, Hazardous areas, Valve pit*

HOW TO CITE THIS ARTICLE

Fardi A, Karkhaneh M, Heidari H, Mohammadbeigi A, Soltanzadeh A. Analysis of the safety effectiveness of methane gas valve pits: A Case Study in the Steel Industry Based on Hazardous Areas Classification. J Health Saf Work. 2022; 12(2): 418-431.

1. INTRODUCTION

Methane gas is widely used as a source of energy and gas intermediate in chemical processing. It is used in many industries to supply the heat required in chemical process and in water steam generation, as well as in the buildings' heating systems. Given that methane is potentially explosive that can cause serious damage to human and equipment, its transportation and storage are of significant

* Corresponding Author Email: *soltanzadeh.ahmad@gmail.com*

Copyright © 2022 The Authors.
Published by Tehran University of Medical Sciences

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International license (https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/). Non-commercial uses of the work are permitted, provided the original work is properly cited.

Figure 1: A 3D view of a Vault

safety concern. Methane is usually transferred and distributed to industrial units through pipelines. Valves and other connectors in various types and sizes are used in these facilities for conducting gas to the plants. For monitoring purposes, some of these connectors are placed in pits or vaults of various dimensions covered with metal lids protecting them from various environmental and physical damage (Figure 1). Given that any accident caused by methane accumulation in a valve pit can be devastating to human lives and equipment as well as a costly cessation of operations of industries, this study aimed to evaluate the safety of methane valve pits in the steel industry. This study has employed standard measures from international hazardous area classification to introduce the best approach required for improving the safety of valve pits and for prevention of hazards resulted from possible methane emissions.

2. MATERIAL AND METHODS

This study was designed and implemented in a steel industry, manufacturing cold-rolled steel sheets in Qom province, Iran, in 2019. In the steel manufacturing process, methane is used for steam production and for altering the physical properties of the rolled sheets in annealing process. In order to supply methane gas, at about 500 meters distant from the plant, a 6-inch diameter pipeline is branched from the main line which delivers gas to different plant's divisions through four valve pits. We studied four valve pits, each of which consisted of an in-ground 2-4 cubic-meters concrete pit protecting one or two 6- or 4-inch valves inside it. The pressure is about 4.5 bar in the line, and the ventilation system is a 4-inch vent tube installed in the pit's lid.

Our investigation was divided into two sections:

Section A: Evaluation of ventilation efficiency and its capacity to vent methane out of valve pits during common emissions. In this section the emissions were calculated using tables of the EPA protocol

Section B: Evaluation of ventilation efficiency and its capacity to vent methane out of valve pits during unintentional emissions. In this section the emissions were calculated using mathematical models. Also, the speed of wind in the vent was measured for calculating the degree of ventilation.

In both cases, ventilation efficiency was assessed according to IEC-60079, Part 10.

3. RESULTS AND DISCUSSION

A. *The results of the calculations based on EPA protocol for equipment leak emission estimates*

The maximum rate of release obtained, based on the EPA protocol, was 2.7×10^{-5} kg/s. According to this standard, if the air flow is normal, the maximum wind speed will be 0.05 m/s. While according to the measurements made by a DELTA OHM pitot tube (DO-2003), the wind speed in the vent channels was about 4 m/s.

In addition, methane LEL_m was about 0.0334 kg/m^3, methane distribution valve pit dimensions were about $4m^3$ and the volume of the release area was approximately $V_z=0.053m^3$. Therefore, given that IEC60079-10 defines the permitted range of V_z *to be* less than 0.1 m3 for 'high' *ventilation*, we are confident that despite the simplicity of implementation, the ventilation system designed for methane distribution valve pits can provide high degrees of ventilation according to IEC 60079-10.

B. *The results of calculations of leak emissions from small openings in gas transmission pipelines*

As shown in Table 1, for openings with a

Table 1. Maximum rate of release based on the diameter of the opening in gas transmission pipelines

Row	Hole diameter (mm)	Hole area (m^2)	V_z (m^3)
1	0. 1	7.85E-09	0.01041819
2	0. 2	3.14E-08	0.04167278
3	0. 3	7.07E-08	0.09376375
4	0. 4	1.26E-07	0.16669112
5	0. 5	1.96E-07	0.26045487

diameter more than 0.3mm, $V_z > 0.1$ m^3, which was not within the permitted range defined by the EPA protocol and IEC 60079-10 norm, the ventilation system installed in the methane distribution valve pits was not sufficient and the volume of gas inside the valve pits can *quickly* exceed the high ventilation threshold, leading to hazardous gas accumulation inside the valve pits.

4. CONCLUSIONS

Methane emissions can lead to explosion and fire accidents as a result of the accumulation of flammable mixture in chambers with inadequate ventilation. This explosion needs an ignition source. This study aimed to evaluate the capacity of the studying chambers to exhaust explosive gases and prevent the formation of explosive atmospheres during possible and/or common emissions in the chambers. An important hypothesis in this study was that not complying with the relevant standard of construction of a ventilation system in the valve pits may result in failure of the valve chambers to prevent potential hazards. According to NFPA 325 standard, since the flame index number for methane is 4 and highly flammable, fire safety measures in such plants that use methane in their manufacturing process is of great importance in planning and maintenance.

As a result, in any industry, Health, Safety and Environment (HSE) and Repair and Maintenance units should pay particular attention to the following important issues:

1) Following the international and national standards codes for safety of valve pits for regular inspection and planning for appropriate maintenance. According to the U.S. regulations, periodic inspection of valve pits must be performed at least once every 15 months, however, for complex industries and busy sites, the proposed program must be performed once every month. Leak detection by foam spray (at least) and inspection of vent pipeline routes are essential. Valve pits should also be free from any source of ignition or flammable materials. If a leakage occurs in the system, it must be eliminated as soon as possible, and if it is noticeable, gas flow must be halted.

2) Repair and Maintenance unit should develop instructions for repair and maintenance of the equipment in order to prevent the corrosions of the valves and any potential damage resulting in leakage. Also, it is necessary to keep the air ventilation canal open. This issue is very important, additionally installing insect trap on the air vent route is recommended according to DIN 1239.

3) Taking a safe distance from these valve pits and installing warning labels and explosion hazard signs around the valve pits should be mandatory. HSE unit must prevent the personnel from trafficking around the valve pits as well as to avoid making high heat condition around it.

4) Safety precautions to prevent any ignition source such as fire and sparks close to the chambers. That is because even a very small hole or leak in gas transportation valves may lead to the formation of an explosive atmosphere. It is also very crucial to monitor methane gas before entering the valve pit area and before performing any operation on it.

This study has some strengths. The first and foremost is that we used international validated standards formulas and models for the measurements, which has not been addressed by this method. Our study encourages the preventive policy in similar industries to avoid devastating human casualties and costly accidents in the manufacturing process. Moreover, to our best of knowledge, this study was the first in its kind in Iran. This study also had some limitations. one of them was about limited number of the investigated

valve pits. Another limitation was measuring the air flow inside the vent tube only in colder seasons including fall and winter and the results were generalized for other warmer seasons. In addition, we did not control for the effects of climate and geographical conditions on the efficiency of these valve pits. Finally, further research to evaluate various types and high number of valve pits considering climate change and other conditions is warranted.

5. ACKNOWLEDGMENT

This article is a part of the research project No. 97974 and ethical code IR.MUQ.REC.1397.155 approved by the Vice-Chancellor for Research and Technology of Qom University of Medical Sciences and Health Services.

1. 749, C., Vault maintenance. 2014. 192.
2. Ni, X., et al., Experimental studies on the extinction of methane/air cup-burner flames with gas–solid composite particles. Fire Saf J. 2015. 76: p. 1-8.

تحلیل اثربخشی ایمنی ولوپیت‌های گاز متان:
یک مطالعه موردی در صنعت فولاد بر اساس طبقه‌بندی فضاهای خطرناک

علی فردی[۱]، محمّد کارخانه[۲]، حمیدرضا حیدری[۳]، ابوالفضل محمدبیگی[۴]، احمد سلطان‌زاده[۵]*

[۱] گروه مهندسی بهداشت حرفه‌ای و ایمنی کار، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی همدان، همدان، ایران
[۲] دپارتمان پزشکی، دانشگاه آلبرتا، ادمونتون، آلبرتا، کانادا
[۳] گروه مهندسی بهداشت حرفه‌ای و ایمنی کار، مرکز تحقیقات آلاینده‌های محیطی، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی قم، قم، ایران
[۴] گروه اپیدمیولوژی و آمار زیستی، مرکز تحقیقات علوم اعصاب، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی قم، قم، ایران
[۵] گروه مهندسی بهداشت حرفه‌ای و ایمنی کار، مرکز تحقیقات آلاینده‌های محیطی، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی قم، قم، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۶/۱۰، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۵/۱۶

چکیده

مقدمه: گاز متان به‌عنوان یکی از پرکاربردترین گازهای مورد استفاده در صنایع دارای پتانسیل اشتعال‌پذیری بسیار بالایی می‌باشد. لذا انجام تمهیدات ایمنی به‌منظور جلوگیری از بروز حریق این گاز باید در اولویت یک صنعت باشد. هدف از انجام این مطالعه سنجش و تحلیل اثربخشی عملکرد سیستم تهویه موجود بر روی گودال شیر یا ولوپیت‌های انتقال گاز متان بر اساس استاندارد طبقه‌بندی فضاهای خطرناک بود.

روش کار: این مطالعه در یک صنعت تولید فولاد در استان قم در سال ۱۳۹۸ طراحی و اجرا شده است. بخش موردمطالعه شامل ولوپیت‌های ورودی گاز متان و ولوپیت‌های توزیع گاز متان در صنعت موردمطالعه بود. ابزارهای مورداستفاده در این مطالعه شامل دستگاه لوله پیتو DELTA OHM مدل DO-2003 برای اندازه‌گیری سرعت باد، دستگاه گاز سنج متان متعلق به شرکت BW مدل GasAlert Max XTII، پروتکل نشت تأسیسات هیدروکربنی مربوط به سازمان حفاظت محیط‌زیست آمریکا (EPA)، مدل ریاضی تعیین دبی جرمی گاز در زمان نشتی و استاندارد طبقه‌بندی فضاهای خطرناک IEC-60079-10 برای تحلیل اثربخشی ایمنی ولوپیت‌های انتقال گاز متان بود.

یافته ها: میزان LELm برای گاز متان در حدود ۰/۰۳۳۴ kg/m^3 و میزان حجم محوطه نشت بر اساس معادلات استاندارد IEC-60079-10 در حدود ۰/۰۵۳ m^3 = Vz بود. بر اساس سناریوهای نشتی، نتایج اندازه‌گیری‌ها، شبیه‌سازی‌های نشت و محاسبات صورت گرفته در استانداردهای IEC-60079-10 و EPA، نشتی رایج ناشی از اتصالات در محدوده Vz < ۰/۱ مترمکعب بوده است. بعلاوه، نتایج محاسبات میزان نشتی غیرمتداول ناشی از تأسیسات نشان داد برای سوراخ‌های با قطر بیش از ۰,۳ mm، سیستم تهویه تعبیه‌شده بر روی ولوپیت‌های توزیع گاز متان موردمطالعه اثربخش نبوده و به‌سرعت حجم گاز داخل ولوپیت‌ها از مرز تهویه بالا عبور کرده و احتمال تجمع خطرناک گازها در ولوپیت‌ها را به همراه خواهد داشت.

نتیجه گیری: یافته‌های این مطالعه بیانگر این بود که با وجود کوچک‌ترین میزان نشتی، احتمال بروز جو انفجاری درون ولوپیت‌های موردمطالعه وجود دارد، لذا بایستی تمهیدات ویژه‌ای برای جانمایی، تعمیر و نگهداری، بازرسی نشتی، تمهیدات ایمنی برای ورود به ولوپیت‌ها و همچنین پیشگیری از رسیدن منابع حرارتی لازم مانند الکتریسیته ساکن و غیره توسط کاربران این تأسیسات بکار گرفته شود.

کلمات کلیدی: *گاز متان، ایمنی، تهویه، فضاهای خطرناک، ولوپیت (گودال شیر)*

* پست الکترونیکی نویسنده مسئول مکاتبه: *soltanzadeh.ahmad@gmail.com*

مقدمه

استفاده از گاز متان به‌عنوان یک منبع انرژی و گاز واسط در فرایندهای شیمیایی بسیار کاربرد دارد. این گاز در صنایع جهت تأمین حرارت موردنیاز در فرایندهای شیمیایی، تأمین حرارت فرایند تولید بخار آب و نیز تأسیسات گرمایش پرسنل کاربرد دارد (۱).

حوادثی مانند انفجار گاز اغلب در فرآیند تولید و توزیع گاز اتفاق می‌افتد. انفجار گاز در حین انتقال و توزیع گاز در خطوط لوله ممکن است منجر به تلفات و خسارات قابل‌ملاحظه‌ای گردد (۲-۴). باوجوداینکه فراوانی حوادث مربوط به خطوط لوله به نسبت دیگر حوادث صنعتی در حوزه انتقال و توزیع پایین می‌باشد، اما این حوادث دارای پیامدهای فاجعه باری بوده که اگر در درون یک صنعت به وقوع بپیوندد می‌تواند بقای آن صنعت را تهدید نماید (۳, ۵).

نتایج مطالعه Khan و Abbasi (۱۹۹۹) نشان داده است که ۲۰٪ از حوادث صنعتی مربوط به انتقال و توزیع خطوط لوله می‌باشد (۶). در مطالعه Groohi و همکاران (۲۰۰۲)، از ۱۰۸۹ مورد سوختگی ۳۶۴ مورد منجر به فوت شده است که ۲۹ مورد این سوختگی‌ها مربوط به انفجار گاز متان بوده است (۷). در یک مطالعه که بر روی ۲۰۴۳ بیمار دچار سوختگی در شیراز انجام شده است، ۲۰۲ مورد از این حوادث مربوط به انفجار گاز متان بوده است که ۴۸ مورد منجر به مرگ شده است (۸).

حدود کمترین و بیشترین مقدار قابل‌انفجار گاز متان برابر با ۴٪ (LEL) و ۱۶٪ (UEL) می‌باشد. با توجه به اینکه گاز متان، گازی است انفجاری و در صورت بروز حادثه، امکان آسیب انسانی و تجهیزاتی بسیار محتمل می‌باشد، لذا بحث ایمنی این گاز چه در زمان انتقال و یا توزیع و چه در زمان مصرف، دارای اهمیت بسیار بالا می‌باشد (۹). نحوه انتقال این گاز به صنایع و توزیع آن در واحدهای صنعتی به‌وسیله لوله‌کشی می‌باشد. در تأسیسات لوله‌کشی برای انتقال گاز به صنایع و نیز توزیع گاز در واحدهای مختلف یک واحد صنعتی از تجهیزات صنعتی در انواع و سایزهای مختلف استفاده می‌شود که یکی از این تأسیسات شیرها (valve) می‌باشند. جهت حفظ سلامت این تجهیزات از آسیب‌های فیزیکی و نیز محافظت آن‌ها تحت شرایط ایمن محیط، این تجهیزات را در گودال‌ها یا چاله‌ها یا پیت‌هایی (Pit) با ابعاد مختلف قرار داده که به آن گودال شیر یا ولوپیت می‌گویند (۱۰). بر اساس آئین‌نامه انجمن گاز آمریکا و نیز قانون فدرال آن کشور (کشورهای دیگر مانند ایران نیز در همین قالب عمل می‌کنند)، برای پیشگیری از بروز اتمسفر انفجاری در ولوپیت‌ها از یک لوله عصایی یا J pipe یا Air Vent حداقل به قطر ۴ اینچ جهت ایجاد تهویه و گردش هوای تازه و جلوگیری از تشکیل جو انفجاری استفاده می‌شود (شکل ۱). یکی از الزاماتی که در طراحی این ولوپیت‌ها بایستی لحاظ شود تهویه آن‌ها می‌باشد. لذا، بر اساس ۴۹ CFR ۱۹۲.۱۸۷ طراحی و اجرای این تهویه بایستی به‌گونه‌ای بوده که از تشکیل اتمسفر انفجاری در داخل چاله جلوگیری نماید (۱۱).

با توجه به اینکه این ولوپیت‌ها دارای فضای بسته می باشند، بنابراین احتمال تجمع گاز متان به دو دلیل نشتی ناشی از اتصالات و نقص در تأسیسات در آن‌ها وجود دارد. نشتی‌های ناشی از اتصالات مربوط به فرار گاز از درزبندی‌های تأسیسات مانند گازکت‌ها، آب‌بندها بوده که به مرور زمان به خاطر استهلاک تجهیزات ناشی از تغییرات دمایی و دیگر آیتم‌های محیطی حاصل می‌شود. بعلاوه، نشتی‌های ناشی از نقص در تأسیسات به دلیل خوردگی، شکست به دلیل ضعف و یا تخریب اتصالات جوشی و فیتیگ‌ها حاصل می‌شود. بدیهی است روش محاسبه این نشتی‌ها بر اساس مدل‌های ریاضی بوده و میزان نشت با توجه به مدل‌های رایج قابل شبیه‌سازی و محاسبه می‌باشد (۱۲). لذا با توجه به وجود احتمال این دو نشتی، ایمنی حریق ولوپیت‌ها بنا به دلایلی مانند امکان بروز هر دو حالت نشتی در تأسیسات انتقال گاز، محصور بودن و قابلیت تجمع و تشکیل جو انفجاری و قرارگیری این چاله‌ها در مسیر تردد پرسنل صنایع و دیگر مراجعه‌کنندگان و یا قرار گرفتن آن‌ها در نزدیکی منابع تأمین‌کننده حرارت و افزایش پتانسیل جو انفجاری

شکل ۱. ولوپیت و لوله عصایی در صنعت موردمطالعه

موجود در ولوپیت ها دارای اهمیت می‌باشند (۱۳).

مطالعات محدودی درباره حریق و انفجار گاز متان در تأسیسات زیرزمینی مانند ولوپیت‌ها موجود می‌باشد، بااین‌وجود Chen و همکاران (۲۰۱۶) در تجزیه‌وتحلیل یک مورد انفجار فاجعه‌بار گاز متان در خط لوله زیرزمینی در تایوان بیان نموده‌اند که این حادثه بزرگ‌ترین فاجعه نفتی در تاریخ تایوان بوده و منجر به مرگ ۳۲ نفر شده است (۳)؛ بنابراین، اهمیت بررسی و مطالعه بر روی مناطقی که احتمال تشکیل اتمسفرهای انفجاری وجود دارد و دسته‌بندی آن به‌اندازه‌ای است که در صنایع مختلف به ایمنی عملکردی در برابر خطرات این نوع اتمسفر توجه ویژه‌ای شده است (۱۴). در ایران براساس آئین‌نامه‌های داخلی شرکت گاز و نیز کدهای مهندسی (مبحث ۱۷) لزوم نصب این تجهیزات وجود دارد؛ اما در ایران کار مطالعاتی بر روی بررسی راندمان و میزان عملکرد تهویه این تجهیزات تاکنون صورت نگرفته است؛ بنابراین، با توجه به این نکته بسیار مهم و حیاتی که هرگونه رویداد ناشی از تجمع گاز قابل‌انفجار متان می‌تواند سبب حادثه و آسیب انسانی و تجهیزاتی شده و همچنین ایجاد وقفه عملیاتی نماید که دارای آثار بسیار مخرّبی بر تولید و دارایی‌های صنعت می‌باشد (۱۵)، لذا این مطالعه با هدف ارزیابی ایمنی ولوپیت‌های گاز متان و بر اساس طبقه‌بندی فضاهای خطرناک و همچنین با هدف ارائه اقدامات اصلاحی لازم برای بهبود شرایط ایمنی این ولوپیت‌ها و پیشگیری از مخاطرات ناشی از نشت احتمالی گاز متان طراحی و انجام شده است.

روش کار

مکان مطالعه

این مطالعه در سال ۱۳۹۸ بر اساس طبقه‌بندی فضاهای خطرناک و در تأسیسات یک صنعت تولید فولاد طراحی و اجرا شده است. محصول نهائی این صنعت تولید ورق سرد نوردشده می‌باشد. در فرایند تولید ورق نورد سرد، علاوه بر استفاده از گاز متان جهت استفاده در فرایند تولید بخار، برای واحد آنیلینگ جهت بازگردان خواص فیزیکی ورق‌های نورد شده کاربرد دارد. بدین منظور جهت تأمین گاز موردنیاز از مسیر خط اصلی انشعابی با قطر ۶ اینچ به فاصله تقریباً ۵۰۰ متری از کارخانه منشعب گردیده است که طی چهار ایستگاه توزیع (valve pit) که در بیرون از کارخانه می‌باشند به قسمت‌های مختلف عملیات گازرسانی را انجام می‌دهند. گروه یا بخش موردمطالعه شامل ۴ ولوپیت ورودی گاز متان و ولوپیت‌های توزیع گاز متان در این صنعت فولاد بود. هر یک از ولوپیت‌ها شامل یک گودال داخل زمین می‌باشد که در آن‌ها بسته به نوع انشعاب یک یا دو شیر با ابعاد ۴ و یا ۶ اینچ تعبیه گشته است که فشار درون‌خط در حدود ۴/۵ بار (Bar) می‌باشد و سیستم تهویه آن‌ها با توجه به محدودیت‌های اجرائی تنها محدود به یک لوله وِنت به قطر ۴ اینچ می‌باشد که بر روی دریچه ورودی به گودال تعبیه شده است. قابل‌ذکر است جنس تمامی گودال‌ها از جنس بتون بوده و ابعاد

آن‌ها ۴-۲ مترمکعب بوده است.

ابزار مطالعه

ابزارهای مورداستفاده در این مطالعه شامل دستگاه لوله پیتو DELTA OHM مدل DO-۲۰۰۳ برای اندازه‌گیری سرعت باد، دستگاه گاز سنج متان متعلق به شرکت BW مدل GasAlert Max XTII، پروتکل نشت تأسیسات هیدروکربنی مربوط به سازمان حفاظت محیط‌زیست آمریکا (EPA)، مدل ریاضی تعیین دبی جرمی گاز در زمان نشتی و استاندارد طبقه‌بندی فضاهای خطرناک IEC-۶۰۰۷۹-۱۰ برای تحلیل اثربخشی ایمنی ولوپیت‌های انتقال گاز متان بود.

لوله پیتو

یکی از آیتم‌های مهم در این مطالعه برای ارزیابی ایمنی تهویه، اندازه‌گیری سرعت هوا بود. برای اندازه‌گیری سرعت جریان هوا از دستگاه لوله پیتو DELTA OHM مدل DO-۲۰۰۳ استفاده شده است. اندازه‌گیری سرعت جریان هوا توسط محققین بر روی چهار عدد از ولوپیت‌های موردبررسی صورت گرفته است. اندازه‌گیری در طول مدت فصول زمستان و تابستان صورت گرفته است. در هر فصل در ۴ نوبت اقدام به اندازه‌گیری شده است و از میانگین اعداد به‌دست‌آمده در محاسبات استفاده شده است. علت اندازه‌گیری در فصل زمستان اعمال اثر فاکتورهایی مانند کاهش دما، وارونگی هوا و رطوبت در سردترین فصل سال و در تابستان به علت اعمال اثر فاکتورهایی مانند افزایش دما، رطوبت در گرم‌ترین فصل سال بوده است.

پروتکل تخمین میزان نشت تجهیزات

این پروتکل مربوط به سازمان حفاظت محیط‌زیست آمریکا (EPA) به شماره EPA-۴۵۳/R-۹۵-۰۱۷ بوده و مفروضات پژوهش را جهت محاسبه میزان نشتی احتمالی در شیرهای موجود در تأسیسات انتقال گاز را فراهم نموده است (۱۶).

استاندارد IEC-۶۰۰۷۹-۱۰

بخش ۱۰ استاندارد IEC-۶۰۰۷۹ مربوط به طبقه‌بندی مناطق خطرناکی است که ممکن است خطرات ناشی از اشتعال گاز یا بخار در آن به وجود آید. در این مطالعه، از این استاندارد برای محاسبه تهویه بر اساس تجهیزات موجود استفاده شد (۱۷).

روش مطالعه

هدف از این مطالعه بررسی توانایی سیستم تهویه ولوپیت‌های گاز متان (لوله عصایی یا J Pipe) در مقابل دو نشتی متصور برای این‌گونه تأسیسات بوده است. این دو نشتی به‌صورت دو سناریو شامل نشتی ناشی از اتصالات و نشتی ناشی از نقص در تأسیسات مورد ارزیابی قرار گرفت.

نشتی‌های ناشی از اتصالات

سناریو نشتی ناشی از اتصالات و محاسبه این نشتی‌ها بر اساس پروتکل نشتی EPA انجام شده است. مراحل مطالعه جهت بررسی این نوع نشتی و امکان تهویه آن توسط J pipe (لوله عصایی) مستقر بر روی ولوپیت‌های موردمطالعه به شرح ذیل بوده است:

۱) محاسبه میزان نشتی گاز متان (دبی نشت) با توجه به فشار گاز، سایز لوله و سایز شیر موجود در ولوپیت. این محاسبات بر اساس پروتکل EPA صورت گرفته است (۱۶).

۲) بر اساس استاندارد IEC-۶۰۰۷۹-۱۰ و دبی گاز نشت شده در ولوپیت، اقدام به تعیین درجه‌بندی نشت، میزان تهویه لازم برای جلوگیری از به وجود آمدن مخلوط (اتمسفر) قابل‌انفجار و تعیین درجه تهویه شد (۱۷).

۳) در این مرحله سنجش سرعت جریان هوا درون لوله عصایی با استفاده از لوله پیتو DELTA OHM مدل DO-۲۰۰۳ انجام شده است.

۴) ارزیابی وجود جو انفجاری درون ولوپیتت‌ها با استفاده از دستگاه گاز سنج پرتابل گاز متان متعلق به شرکت BW مدل GasAlert Max XTII با دقت ۰/۲ LEL گاز انجام شده است. این اندازه‌گیری‌ها نیز در زمان

اندازه‌گیری سرعت جریان هوا و در طول فصول زمستان و تابستان انجام شده است.

نشتی‌های ناشی از نقص در تأسیسات:

مراحل ارزیابی این نوع نشتی و امکان تهویه آن توسط J pipe (لوله عصایی) مستقر بر روی ولوپیت‌های موردمطالعه بر اساس استاندارد IEC-۶۰۰۷۹-۱۰ به شرح ذیل انجام شده است:

۱) در این حالت، چون نشتی یک امر احتمالی بوده، لذا برای محاسبه میزان نشتی از شبیه‌سازی ریاضی استفاده شد؛ بنابراین، با استفاده از یک مدل ریاضی، دبی جرمی نشتی‌های احتمالی شبیه‌سازی شدند. در این مدل میزان دبی جرمی گاز بر اساس فشار گاز، سایز لوله، نوع سیال، سایز نشتی و مشخصات ترمودینامیکی گاز محاسبه گردید. در این سناریو، میزان نشتی برای سایزهای ۰/۱ الی ۰/۵ میلی‌متر محاسبه شده است (۱۸).

۲) در این مرحله سنجش سرعت جریان هوا درون لوله عصایی با استفاده از لوله پیتو DELTA OHM مدل DO-۲۰۰۳ انجام شد.

۳) توانایی سیستم تهویه ولوپیت (لوله عصایی) جهت خروج گاز متان نشت شده مورد ارزیابی قرار گرفت. برای سایزهای مختلف نشتی که در مرحله قبل دبی جرمی حاصل از آن میزان نشتی محاسبه شده است، توانایی به وجود آمدن جو انفجاری با استفاده از استاندارد IEC-۶۰۰۷۹-۱۰ مورد ارزیابی قرار گرفت (۱۷). مدل‌سازی ریاضی به شرح ذیل انجام شده است:

بر اساس استاندارد IEC-۶۰۰۷۹-۱۰ طبقه‌بندی فضاهای خطرناک مستقیماً وابسته به درجه‌بندی نشت و تهویه بوده، نشتی‌ها در این استاندارد بر اساس احتمال بروز نشتی و میزان نشت حاصله به سه دسته اصلی نشت پیوسته، اولیه و ثانویه تقسیم شده (۱۷) و تعیین اثر تهویه بر طبقه‌بندی فضاهای خطرناک، میزان دسترسی تهویه و درجه تهویه مشخص شد. دسترسی تهویه با توجه به پیوستگی وجود تهویه در زمان عملکرد عادی به سه دسته خوب، متوسط و ضعیف تقسیم شده و درجه تهویه نیز بر اساس روابط زیر محاسبه گردید:

محاسبه میزان تهویه لازم ($(\frac{dV}{dt})_{min}$) برای جلوگیری از به وجود آمدن مخلوط قابل‌انفجار

برای محاسبه میزان تهویه لازم ($(\frac{dV}{dt})_{min}$) با استفاده از بیشینه نرخ نشت از معادله (۱) استفاده شده است (۱۹).

معادله ۱
$$(\frac{dV}{dt})_{min} = \frac{(\frac{dG}{dt})_{max}}{k \times LEL_m} \times \frac{T}{293}$$

$(dV/dt)_{min}$: حداقل نرخ جریان حجمی هوای تازه (m^3/s)

$(dG/dt)_{max}$: حداکثر نرخ انتشار در منبع (kg/s)

LEL_m: حد پائین اشتعال‌پذیری جرمی (kg/m^3)

k: فاکتور ایمنی بکارگرفته شده برای LEL (k=۰/۲۵؛ نشت پیوسته و اولیه و k=۰/۵؛ نشت ثانویه)

T: دمای محیط (^oK)

محاسبه حجم کنترل (V_z) برای تعیین درجه تهویه

برای محاسبه حجم کنترل (V_z) از معادله (۲) استفاده شده است.

معادله ۲
$$V_z = \frac{f \times (\frac{dV}{dt})_{min}}{C}$$

V_z: حجم فرضی که امکان تعیین درجه تهویه را فراهم می‌کند.

C: تعداد تغییرات هوای تازه در واحد زمان (s^{-1})

dV/dt: میزان کل جریان هوای تازه از طریق حجم موردنظر

f: راندمان تهویه برحسب اثربخشی آن در رقیق‌سازی جو گاز انفجاری؛ f =۱ (وضعیت ایده آل) تا f=۵ (جریان هوا با مانع).

بنابراین، با به دست آمدن حجم کنترل (V_z) و مقایسه آن با حجم محیط، درجه تهویه مشخص گردید.

پس از مشخص شدن درجه‌بندی نشت، دسترسی

جدول ۱. مختصات درجه تهویه بر اساس Vz

درجه تهویه	Vz
بالا	$<۰/۱m^3$
متوسط	۰/۱<Vz<Vo
پایین	$Vz>Vo$

جدول ۲. تأثیر تهویه بر نوع منطقه خطر

درجه نشت	درجه تهویه						
	بالا			**متوسط**		**پایین**	
	دسترسی تهویه						
	خوب	**متوسط**	**ضعیف**	**خوب**	**متوسط**	**ضعیف**	**خوب، متوسط یا ضعیف**
پیوسته	منطقه صفر†	منطقه صفر†	منطقه صفر†	منطقه صفر†	منطقه صفر + دو	منطقه صفر + یک	منطقه صفر
اولیه	منطقه یک†	منطقه یک†	منطقه یک†	منطقه یک	منطقه یک + دو	منطقه یک + دو	منطقه یک یا صفر‡
ثانویه	منطقه دو†	منطقه دو†	منطقه دو	منطقه دو	منطقه دو	منطقه دو	منطقه یک یا صفر‡
+: تحت پوشش قرار گرفته شده توسط							
نکته ۱: منطقه صفر†، یک† یا دو† یک منطقه تئوری را نشان می‌دهد که در شرایط عادی از اهمیت ناچیزی برخوردار است. نکته ۲‡: در صورتی منطقه صفر خواهد شد که تهویه بسیار ضعیف بوده و نشت به‌گونه‌ای باشد که جو گاز انفجاری عملاً به‌طور مداوم وجود داشته باشد (نزدیک شدن به شرایط "بدون تهویه").							

جدول ۳. تخمین میزان نشت تجهیزات

نوع تجهیزات	نوع ماده	میزان نشت (kg/hr/source)
شیر (*valve*)	گاز	$۴/۵\times۱۰^{-۳}$
فلنج (*flange*)	گاز	$۳/۹\times۱۰^{-۴}$

تهویه و درجه تهویه، منطقه خطر در محل بر اساس جدول ۲ مشخص گردید.

نرخ نشت گاز از هر تجهیز اولین گامی است که برای تعیین درجه تهویه موردنیاز است. امّا، قبل از بروز یک نشت، نمی‌توان عدد دقیقی برای این نرخ مشخص نمود؛ بنابراین، در این مطالعه از دو پروتکل تخمین میزان نشت تجهیزات (جدول ۳) و میزان نشتی بر اثر وجود سوراخ بر روی مسیر خطوط انتقال گاز (معادله ۳) با استفاده از مدل ریاضی و شبیه‌سازی نشت برای به دست آوردن میزان نشتی استفاده شده است (۱۹, ۲۰).

معادله ۳

$$\dot{m} = C_D A P_1 \sqrt{\frac{kg_c M}{R_g T_1}\left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k+1}{k-1}}}$$

$\dot{m}$: میزان سرعت جرمی گاز از سوراخ (kg/s)

C_D: ضریب تخلیه (۰/۸۵)

A: مساحت سوراخ (m^2)

P_1: فشار بالادست سوراخ (Pa)

جدول ۴. نتایج حاصل از شبیه‌سازی برای میزان حداکثر نشت بر اساس قطر سوراخ بر روی خط انتقال گاز

ردیف	قطر سوراخ (mm)	مساحت سوراخ (m^2)	V_z (m^3)
۱	۰/۱	$۷/۸۵\times۱۰^{-۹}$	۰/۰۱۰۴۱۸۱۹
۲	۰/۲	$۳/۱۴\times۱۰^{-۸}$	۰/۱۴۱۶۷۲۷۸
۳	۰/۳	$۷/۰۷\times۱۰^{-۸}$	۰/۰۹۳۷۶۳۷۵
۴	۰/۴	$۱/۲۶\times۱۰^{-۷}$	۰/۱۶۶۶۹۱۱۲
۵	۰/۵	$۱/۹۶\times۱۰^{-۷}$	۰/۲۶۰۴۵۴۸۷

g_c: ثابت گرانشی ($N.m / Kg.s^2$)
M: وزن مولکولی گاز (Kg/Kmole)
k: نسبت ظرفیت گرمایی (بدون واحد)
R_g: ثابت گاز ایده آل ($Pa.m^3/Kmole.K$)
T_1: درجه حرارت بالادست اولیه گاز

یافته ها

بر اساس آنچه در بخش روش مطالعه (۲-۳) ارائه شد، با توجه به داده‌های به‌دست‌آمده مربوط به درجه‌بندی نشت، نشتی‌های مربوط به لوله‌کشی، اتصالات، فلنج‌ها و یا شیرها که نشت مواد قابل اشتعال از آن‌ها در طول عملکرد عادی مورد انتظار بود، به‌عنوان نشتی‌های اولیه شناخته شدند.

یافته‌های نشتی‌های ناشی از اتصالات

نتایج مربوط به سناریو اول (نشتی‌های ناشی از اتصالات) نشان داد چنانچه حداکثر میزان نشت بر اساس پروتکل EPA مدنظر قرار گیرد، مقدار به‌دست‌آمده به‌اندازه $۲/۷\times۱۰^{-۵}$ کیلوگرم بر ثانیه (*Kg/s*) خواهد بود. بر اساس این استاندارد، چنانچه هوای جریان یافته به‌صورت طبیعی باشد، بایستی سرعت باد را حداکثر ۰/۰۵ m/s در نظر بگیریم (درحالی‌که با توجه به اندازه‌گیری‌های انجام شده توسط دستگاه لوله پیتو *DELTA OHM* مدل *DO*-۲۰۰۳ حدود سرعت باد در کانال‌های *vent* در حدود ۴ m/s بود). بعلاوه، بر اساس معادله (۲) میزان LEL_m برای گاز متان در حدود $۰/۰۳۳۴ kg/m^3$ بوده، ابعاد ولوپیت‌های توزیع گاز متان در حدود $۴ m^3$ و میزان حجم محوطه نشت بر اساس معادله (۱) در حدود $۰V_z=/m^3۰۵۳$ بود؛ بنابراین، بر اساس محدوده مجاز تعریف‌شده در استاندارد IEC-۶۰۰۷۹-۱۰ که حد مجاز V_z را برای درجه تهویه بالا کمتر از $۰/m^3۱$ عنوان کرده بود (جدول ۱)، می‌توان اطمینان داشت که سیستم تهویه طراحی‌شده برای ولوپیت‌های توزیع گاز متان، علی‌رغم سادگی در اجرا، توانائی مناسبی برای تأمین حد بالای تهویه بر اساس استاندارد IEC-۶۰۰۷۹-۱۰ دارا هستند.

یافته‌های نشتی‌های ناشی از نقص در تأسیسات

نتایج مربوط به سناریو دوم (نشتی‌های ناشی از نقص در تأسیسات) (جدول ۴) نشان داد با در نظر گرفتن حداکثر میزان نشت ناشی از اتصالات، برای سوراخ‌های با قطر بیش از ۳/ mm ۰شاخص ۱/<Vz ۰مترمکعب بوده و بر اساس پروتکل EPA و استاندارد IEC-۶۰۰۷۹-۱۰ در محدوده مجاز تعریف‌شده قرار نگرفته است؛ بنابراین، سیستم تهویه تعبیه‌شده بر روی ولوپیت‌های توزیع گاز متان موردمطالعه اثربخش نبوده و به‌سرعت حجم گاز داخل ولوپیت‌ها از مرز تهویه بالا عبور کرده و احتمال تجمع خطرناک گازها در ولوپیت‌ها را به همراه خواهد داشت.

بحث

مواد و ترکیبات شیمیایی مانند متان به‌عنوان خطرناک‌ترین منابع خطر در صنایع و محیط‌های شغلی

شناخته شده‌اند که می‌توانند علاوه بر بروز رویدادهایی مانند حریق و انفجار که باعث تحمیل آسیب‌های انسانی و خسارت‌های اقتصادی فاجعه‌بار می‌شوند، دلیل اصلی توقف و اختلال در فرآیندهای تولیدی نیز می‌باشند (۲۱-۲۴). یافته‌های این مطالعه بر اساس سناریو نشتی رایج ناشی از اتصالات بیانگر این بود که بر اساس اندازه‌گیری و محاسبات انجام شده، سیستم تهویه فعلی یعنی لوله عصایی مورداستفاده در ولوپیت‌های موردمطالعه قابلیت خوبی برای جلوگیری از تشکیل اتمسفر انفجاری به دلیل نشتی ناشی از اتصالات را دارد. بعلاوه، نتایج مربوط به سناریو نشتی غیرمتداول ناشی از نقص در تأسیسات که با استفاده از مدل‌سازی ریاضی و بر اساس پروتکل EPA و معادلات استاندارد IEC-۶۰۰۷۹-۱۰ به دست آمد بیانگر این بود که سیستم تهویه ولوپیت‌های موردمطالعه توانایی خروجی نشتی بیش از ۰/۳ میلی‌متر را نداشته، درنتیجه در صورت بروز هرگونه نقص در تأسیسات و نشتی از آن جو انفجاری حاصل خواهد شد (۱۹)؛ بنابراین، نشت احتمالی گاز متان به‌عنوان یکی از حلقه‌های ایجاد حوادث آتش‌سوزی و انفجار عمل نموده و در صورت عدم وجود تهویه مناسب مطابق با نتایج سناریو دوم، مخلوط قابل اشتعال به وجود آمده و در صورت وجود منبع احتراق سبب بروز حوادث غیرقابل جبرانی خواهد شد.

بر اساس هدف مطالعه (مطالعه و ارزیابی توانایی تأسیسات موردمطالعه در خروج گازهای انفجاری و پیشگیری از تشکیل جو انفجاری در زمان نشت‌های احتمالی و همچنین نشت‌های متداول در این تأسیسات)، فرضیه مهم در این مطالعه این بود که عدم رعایت استانداردهای مربوطه در ساخت تهویه گاز تجمعی در ولوپیت‌های موردمطالعه ممکن است باعث ناتوانی این تأسیسات در پیشگیری از مخاطرات احتمالی باشد. با توجه به پتانسیل اشتعال‌پذیری بالای گاز متان (شاخص حریق گاز متان بر اساس استاندارد NFPA ۷۰۴ عدد ۴ می‌باشد)، بنابراین اهمیت ایمنی حریق گاز متان بایستی بسیار موردتوجه قرار گیرد (۲۵). بعلاوه، الزام ساخت ولوپیت به‌عنوان یکی از اجزاء سیستم لوله‌کشی گاز طبیعی و دیگر گازها در قانون فدرال آمریکا تصریح‌شده و یکی از الزاماتی که در طراحی این گودال‌ها لحاظ می‌شود تهویه آن‌ها می‌باشد (۲۶). بر اساس استاندارد CFR ۴۹ ۱۹۲.۱۸۷ طراحی و اجرای تهویه بایستی به‌گونه‌ای باشد که از تشکیل اتمسفر انفجاری در داخل گودال جلوگیری نماید (۱۱).

با توجه به نتایج مطالعه که بر اساس معادلات استاندارد IEC-۶۰۰۷۹-۱۰ به‌دست‌آمده است، توان لوله تهویه نصب‌شده برای خروج گاز متان از گودال شیر به بیرون مناسب ارزیابی شد، امّا در صورت بروز نشتی ناخواسته گاز تجمع پیدا کرده و لوله تهویه توان خروج گاز متان را نداشته و جو انفجاری حاصل خواهد شد؛ بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که سیستم‌های تهویه مستقر بر روی ولوپیت‌های توزیع گاز متان که به‌صورت گسترده‌ای در این صنعت و دیگر صنایع متداول می‌باشند، علی‌رغم قیمت پائین دارای توانایی مطلوبی جهت تأمین تهویه مناسب برای نشتی‌های بسیار اندک (که در اتصالات صنعتی قابل پیش‌بینی است) می‌باشد. امّا، چنانچه در سیستم، نشتی پیش‌بینی‌نشده‌ای به علت بروز نقص، خوردگی و یا آسیب جزئی به خطوط رخ دهد، حتی به‌صورت کوچک‌ترین سوراخ، توانائی تهویه مطلوب را نداشته و سبب می‌شود که سیستم سریعاً به مرز مناطق پرخطر رسیده و حادثه ایجاد شود.

نتیجه گیری

با توجه به نتایج به‌دست‌آمده از دو سناریو اشاره‌شده بر اساس دو نوع نشتی رایج و غیرمتداول در مطالعه، ناکارآمدی این نوع تأسیسات تهویه‌ای به اثبات رسیده است. به‌طوری‌که لوله‌های عصایی به‌کاررفته در ولوپیت ها توانایی ممانعت از تشکیل جو انفجاری درون ولوپیت را نداشته و در صورت رسیدن منبع حرارتی مانند جرقه، الکتریسیته ساکن، خاکستر سیگار و دیگر منابع حرارتی، امکان بروز انفجار بسیار بالا می‌باشد. بر این اساس، نویسندگان اقدام به ارائه توصیه‌های ایمنی در رابطه با کاهش احتمال این انفجار و پیامدهای آن نموده‌اند:

۱) تدوین دستورالعمل ملی (آئین‌نامه‌های ملّی) جهت بازرسی این گودال‌ها، این دستورالعمل در کشور آمریکا در قالب یک قانون تدوین شده است (۲۱). طبق دستورالعمل آمریکایی، زمان بازرسی‌های دوره‌ای از این گودال‌ها حداکثر ۱۵ ماهه تعریف شده است، اما برنامه پیشنهادی برای صنایع و محل‌های پر تردّد بایستی یک‌ماهه تعریف گردد. تست‌هایی که بایستی مدنظر گرفته شود، تست نشتی توسط اسپری فوم (حداقل) و چک کردن مسیر لوله گاز خروجی می‌باشد. همچنین ولوپیت‌ها بایستی عاری از هرگونه مواد قابل اشتعال و یا منابع احتراقی باشند. در صورت وجود نشتی در سیستم با توجه به نوع نشتی و میزان آن بایستی هر چه سریع‌تر اقدام به رفع نشتی نمود که این موضوع شاید باعث توقف عملیات گازرسانی نیز گردد.

۲) تدوین دستورالعمل تعمیر و نگهداری این تجهیزات بایستی در دستور کار واحد تعمیرات و نگهداری قرار گیرد تا از بروز فرسودگی در شیرها و آسیب‌های احتمالی که بروز نشتی را به همراه خواهد داشت، جلوگیری شود. همچنین، بایستی از باز بودن مسیر گاز خروجی به‌صورت کامل اطمینان حاصل پیدا کرد. اهمیت این موضوع به‌اندازه ای است که در استاندارد din ۱۲۳۹ توصیه به نصب تله حشرات در مسیر گاز خروجی شده است.

۳) تدوین فاصله ایمن از گودال‌های تأسیسات گازرسانی و نصب علائم و تابلوهای هشداردهنده خطر انفجار در اطراف گودال شیرها. واحد HSE بایستی تمهیداتی را تأمین نماید تا حتی‌الامکان از تردد پرسنل در اطراف این گودال‌ها و انجام کار گرم در اطراف آن‌ها خودداری شود. بعلاوه، محدوده‌ای به‌عنوان محدوده خطر در اطراف این گودال‌ها با در نظر گرفتن استانداردهای و دستورالعمل‌های موجود، در نظر گرفته شود.

۴) ارائه تدابیر ایمنی جهت جلوگیری از رسیدن منابع احتراقی مانند آتش و جرقه به محدوده این تأسیسات. با توجه به اینکه کوچک‌ترین سوراخ و یا نشت در شیرهای انتقال گاز ممکن است سبب ایجاد اتمسفر انفجاری شود، بایستی قبل از ورود به فضای گودال‌های شیرها و انجام هرگونه عملیات بر روی این شیرها اقدام به سنجش گاز انفجاری متان نمود.

قابل‌ذکر است، اگرچه در این مطالعه برای سنجش و تحلیل اثربخشی ایمنی ولوپیت‌های انتقال گاز متان از مدل‌ها و دستورالعمل‌های بین‌المللی و معتبر استفاده شده بود که تاکنون به چنین مسئله بسیار مهمی در جغرافیای مطالعه پرداخته نشده است و این به‌عنوان یک نقطه قوت بسیار حائز اهمیت برای این مطالعه می‌باشد، امّا، علی‌رغم ارزیابی همه ولوپیت‌های موجود در صنعت موردمطالعه، یکی از محدودیت‌های مطالعه حاضر تعداد محدود ولوپیت‌های بررسی شده بود. محدودیت دیگر این مطالعه زمان مطالعه بود. اندازه‌گیری جریان هوا درون لوله خروجی گاز فقط در فصول سرد شامل پاییز و زمستان انجام شده و به روزهای دیگر سال تعمیم داده شده است. بعلاوه، عدم تأثیر شرایط جوی و جغرافیایی بر روی عملکرد این ولوپیت‌ها، محدودیت دیگر این مطالعه بود؛ بنابراین پیشنهاد می‌شود در مطالعات آینده تعداد ولوپیت‌های بیشتر، با موردتوجه قرار دادن شرایط جوی و یا دیگر شرایط برای آن‌ها ارزیابی شود.

تشکر و قدردانی

نویسندگان مراتب قدردانی خود را از همکاری مدیریت صنعت فولاد موردمطالعه اعلام می‌دارند. این مقاله بخشی از نتایج طرح تحقیقاتی شماره ۹۷۹۷۴ مصوب معاونت تحقیقات و فناوری دانشگاه علوم پزشکی و خدمات بهداشتی درمانی قم می‌باشد. کد اخلاق برای این مطالعه IR.MUQ.REC.۱۳۹۷.۱۵۵ بود.

REFERENCES

1. Ghaib K, Ben-Fares F-Z. Power-to-Methane: A state-of-the-art review. Renew Sustain Energy Rev. 2018;81:433-46.
2. Yin W, Fu G, Yang C, Jiang Z, Zhu K, Gao Y. Fatal gas explosion accidents on Chinese coal mines and the characteristics of unsafe behaviors: 2000–2014. Saf Sci. 2017;92:173-9.
3. Chen C-H, Sheen Y-N, Wang H-Y. Case analysis of catastrophic underground pipeline gas explosion in Taiwan. Eng Fail Anal. 2016;65:39-47.
4. Harati B, Karimi A, Askari A, Dehghani F, Nasrollahi A. Modeling and evaluation of safety consequences of propylene oxide leakage, a petrochemical company. J Health Saf Work. 2018;8(2):199-209.
5. Peekema RM. Causes of natural gas pipeline explosive ruptures. J Pipeline Syst Eng Pract. 2013;4(1):74-80.
6. Khan FI, Abbasi S. Major accidents in process industries and an analysis of causes and consequences. J Loss Prev Process Ind. 1999;12(5):361-78.
7. Groohi B, Alaghehbandan R, Lari AR. Analysis of 1089 burn patients in province of Kurdistan, Iran. Burns. 2002;28(6):569-74.
8. Panjeshahin M-R, Lari AR, Talei A-R, Shamsnia J, Alaghehbandan R. Epidemiology and mortality of burns in the South West of Iran. Burns. 2001;27(3):219-26.
9. Witkowski A, Rusin A, Majkut M, Stolecka K. Analysis of compression and transport of the methane/hydrogen mixture in existing natural gas pipelines. International Journal of Pressure Vessels and Piping. 2018;166:24-34.
10. Jinjin F. Remote Monitoring System for Natural Gas Valve Pits Based on GSM Short Message. Gas & Heat. 2014(2):17.
11. Bellman M. 192.187 Vaults: Sealing, venting, and ventilation. GPTC Guide for Gas Transmission, Distribution, and Gathering Piping Systems 2019:118-9.
12. Kirchgessner DA, Lott RA, Cowgill RM, Harrison MR, Shires TM. Estimate of methane emissions from the US natural gas industry. Chemosphere. 1997;35(6):1365-90.
13. Toole TM. Construction site safety roles. J Constr Eng Manag. 2002 Jun;128(3):203-10.
14. Lebecki K. Functional safety in industrial explosion protection. TRANSACTIONS of the VŠB–Technical University of Ostrava, Safety Engineering Series. 2012;7(2):44-8.
15. Cooke DL, Rohleder TR. Learning from incidents: from normal accidents to high reliability. System Dynamics Review. 2006;22(3):213-39.
16. Dadashzadeh M, Khan F, Hawboldt K, Abbassi R. Emission factor estimation for oil and gas facilities. Process Saf Environ Prot. 2011;89(5):295-9.
17. Bozek A, editor Application of IEC 60079-10-2.0 For hazardous area classification. 2017 Petroleum and Chemical Industry Technical Conference (PCIC); 2017: IEEE.
18. Arendt JS, Lorenzo DK. Evaluating process safety in the chemical industry: A user's guide to quantitative risk analysis: John Wiley & Sons; 2010.
19. KS C. 60079-10-1:" Explosive atmospheres Part 10-1: Classification of Areas-Explosive Gas Atmospheres. Korean Industrial Standards. 2015.
20. Tommasini R. The classification of hazardous areas where explosive gas atmospheres may be present. Saf Sci. 2013;58:53-8.
21. Soltanzadeh A, Heidari H, Mohammad H, Mohammadbeigi A, Sarsangi V, Darakhshan Jazari M. Comprehensive causal analysis of occupational accidents' severity in the chemical industries; A field study based on feature selection and multiple linear regression techniques. J Health Saf Work. 2019;9(4):298-310.
22. Ghashghaei R, Sabzghabaei GR, Dashti S, Jafari Azar S, Salehipour F. Modeling and prediction of environmental consequences of methanol as the most dangerous goods in ports (Case Study: Bandar Imam Khomeini). J Health Saf Work. 2019;9(2):157-67.
23. Jafari M, Mohammadfam I, Zarei E. Analysis and simulation of severe accidents in a steam methane reforming plant. Int. J. Occup. Hyg. 2014;6(3):120-30.
24. Soltanzadeh A, Aliabadi MM, Mohammadbeigi A. Safety Locus of Control and occupational trauma; a cross-sectional study. Int. J. Occup. Hyg. 2019;11(1).
25. Association NFP. NFPA 704, Standard System for the Identification of the Hazards of Materials for Emergency Response: National Fire Protection Association; 2017.
26. Mangold D, Huntley R, editors. Utilizing Modern Data and Technologies for Pipeline Risk Assessment. 2016 11th International Pipeline Conference; 2016: American Society of Mechanical Engineers Digital Collection.