



CFD Modeling of Odorant Distribution in a Gas Pipeline Network and Optimization of Operating Conditions

Navid Naseri¹, Masoud Haqshenasfard^{2*}, Kioumars Taheri³, Amir Homayoon Rezaeian⁴, Ali Sadouni⁵, Ahmad Moheb²

1. Chemistry & Chemical Engineering Technical Center, Academic center for Education, Culture and Research (ACECR), Isfahan university of Technology branch, Isfahan, Iran

2. Faculty of Chemical Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran

3. Department of Mining and Metallurgical Engineering, Yazd University, Yazd, Iran

4. Head of Health, Safety, Environment and Passive Defense, Hormozgan Province Gas Company, Bandar Abbas, Iran

5. Safety Expert, Hormozgan Province Gas Company, Bandar Abbas, Iran

haghshenas@iut.ac.ir

DOI: 10.22078/pr.2024.5039.3250

Received: February/20/2023

Accepted: January/08/2024

Introduction

Numerous studies have been conducted on various types of odorants, methods of gas odorization [1-2], odorizing equipment, the chemical structure of odorants, and the optimization and automation of odorizing equipment [3-4]. However, there has been limited research on the distribution and dispersion of odorants within the pipeline. A review of existing studies shows that there has been little research on modeling and optimizing odorant injection conditions at City Gas Station (CGS). Another challenge is the varying operational conditions at different stations in terms of capacity at different times. Therefore, the results of published research cannot be used to evaluate the performance of a specific station in Iran. This study aims to examine the key parameters that influence the distribution of injected odorant in gas pipelines. The goal is to identify the causes of incomplete odorant distribution in the gas pipeline at the Imam Hossein station in Bandar Abbas and to propose practical solutions to address this issue.

As mentioned, to evaluate the models used, empirical measurements of odorant were conducted at the CGS Imam Hossein station in Bandar Abbas. Consequently, the modeling conditions and the scope of the solution precisely match the conditions at this station, and the

results of the model can be used to optimize injection conditions at the station. Currently, many CGS stations in the country use injection systems for natural gas odorization, and many of these systems lack automatic control and are usually manually adjusted by operators. As a result, at certain times of the day or in some areas, the gas odor is more pronounced due to over-injection of odorant, causing problems.

The findings of this study can be used to optimize industrial odorant injection systems, ensuring more uniform odorant distribution in the pipeline and preventing excess odorant consumption. In this article, after presenting the odorant measurement method, the governing equations for Computational Fluid Dynamics (CFD) analysis are provided, followed by an interpretation of the modeling results. The modeling was carried out under various injection conditions and station capacities at different temperatures and pressures, and finally, solutions for optimizing system performance are proposed.

Materials and Methods

CFD Modeling of Odorant Distribution in a Pipeline

In this study, COMSOL software was used to model the distribution of odorant in natural gas. As mentioned,

the computational geometry includes 1000 meters of the gas transmission pipeline. To analyze turbulent fluid flow along with mass transfer, the Turbulent Flow and Mass Transport modules were used. The flow was modeled as unsteady. The computational geometry was meshed using 840,000 tetrahedral elements, and due to the significant length of the pipeline relative to its diameter, the precise structure of the cells is not specified, and a detailed geometry of the mesh is not provided.

The following assumptions were made for the flow modeling:

The odorant flow is considered a gas phase, and the governing equations are treated as single-phase [5].

A no-slip condition is assumed for the pipeline walls.

The inner surface of the pipeline wall is smooth.

The odorant does not react with natural gas [6].

Differences in elevation and changes in the pipeline direction are neglected.

The governing equations include mass transfer equations, continuity, and momentum equations, along with equations related to turbulent flow. One of the main challenges in modeling is to determine the inlet velocity into the pipeline. The gas flow continuously enters the pipeline, whereas the odorant is injected into the pipeline in a pulsating manner by the pump [7-8]. Therefore, for the odorant inlet, a pulsating function was defined according to Fig. 1. In this figure, the parameters I_j and t_j represent the distance between peaks and the injection time in seconds, respectively, and must be defined at the start of each modeling process based on the operational conditions of the pipeline.

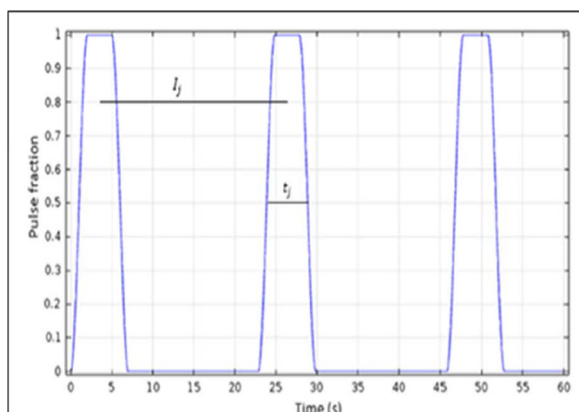


Fig. 1 Inlet pulse of odorant.

Results and Discussion

Considering that the experimental odorant measurement data pertains to June 2021, the prevailing conditions of the system at that time were used in the modeling. Observations at the station indicated that in June 2021, the injection pump was set to perform 27 injections per minute. The station's actual capacity was typically 30% of its nominal capacity, equivalent to 7000 m³/

hr, with a system pressure of 250 psi. Therefore, the modeling conditions were based on these parameters.

The results of each modeling simulation include the distribution of odorant concentration at different times and locations along the pipeline. This allows for determining the exact distance at which the odorant reaches a uniform concentration and distribution, as well as the final concentration of the odorant. To identify the distance from the injection point where the odorant concentration becomes uniformly distributed in the pipeline, the odorant distribution must be shown at various lengths of the pipeline. Given the substantial length of the pipeline, which is 1000 meters, the odorant distribution is illustrated at several sections, as shown in Fig. 2.

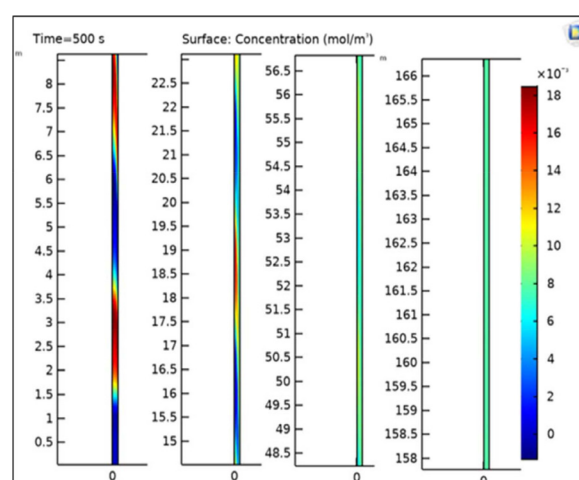


Fig. 2 Odorant distribution in the pipeline.

According to Figure 2, it is evident that at the beginning of the pipeline, close to the injection point, the odorant is introduced and dispersed in gas phase clusters. As the distance from the beginning of the pipeline increases, due to the diffusion of the odorant in the natural gas, the concentration along the pipeline becomes more uniform. For instance, at a distance of approximately 160 meters from the start of the pipeline, the injected odorant concentration becomes nearly constant.

Conclusions

The main objective of this study is to analyze the distribution of odorant in a pipeline. To achieve this, a computational geometry model consisting of one kilometer of pipeline was simulated using CFD analysis with COMSOL software and the finite element method under various conditions. The model used can accurately control all the injection parameters of the odorant pump, including gas velocity, injected odorant concentration, injection time, injection volume, number of pulses, and the interval between injections. Initially, the current conditions at the station were modeled, and the concentration predicted by the model was compared with the experimental measurements taken at the station. It was confirmed that the model's

results are reliable. The modeling results, reflecting the current operational conditions, indicated that at a distance of approximately 200 meters from the start of the pipeline, the odorant concentration stabilizes. However, when the station operates at a capacity of 7000 m³/hr, the amount of odorant consumed is excessive. According to the modeling results, it was found out that reducing the injection volume from 200 mm³ to 100 mm³ still maintains the output concentration within standard limits while preventing the excessive consumption of odorant.

References

1. Anderson, R. N. (2012). Forensic engineering investigation of an LP-gas installation and an analysis of odor fade, *Journal of the National Academy of Forensic Engineers*, 29(2): doi.org/10.51501/jotnafe.v29i2.773.
2. Usher, M. J. (1999). Odor fade—Possible Causes and Remedies. *Proceedings of the CGA Gas Measurement School*, 285.
3. Graf, F., Kröger, K., & Reimert, R. (2007). Sulfur-free odorization with gasodor S-free—a review of the accompanying research and development activities. *Energy & fuels*, 21(6), 3322-3333, doi.org/10.1021/ef700406x.
4. Heidaryan, E., Moghadasi, J., & Rahimi, M. (2010). New correlations to predict natural gas viscosity and compressibility factor. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 73(1-2): 67-72, doi.org/10.1016/j.petrol.2010.05.008.
5. Ivanov, I., Strmen, J., & Jones, L. (2009). Pre-odorization or “Pickling” of new natural gas pipe. *Pipeline & Gas Journal*, 236(11): 48-54.
6. Saadatmand, M., Foroughi, H., Dai, T., Misra, T., Bensabath, T., & Farnood, R. (2015). Odor fading in natural gas distribution systems. *Process Safety and Environmental Protection*, 94, 131-139, doi.org/10.1016/j.psep.2015.01.005.
7. Gross, R., Fontana, E., Silva, A., Quadri, M. B., & Souza, S. M. A. G. U. (2018). Dispersion of odorants in natural gas distribution networks. *Heat and Mass Transfer*, 54, 2827-2834.
8. Deymi-Dashtebayaz, M., Abadi, R. N. B., Dehkordi, M. M., & Amini, Z. (2019). Experimental and numerical investigation of odorant dispersion in natural-gas pipelines. *The European Physical Journal Plus*, 134(6): 294, doi.org/10.1140/epjp/i2019-12666-2.

مدل سازی CFD جهت بررسی توزیع بودارکننده در خط لوله شبکه گاز و بهینه سازی شرایط عملیاتی

نوید ناصری^۱، مسعود حق شناس فرد^{۲*}، کیومرث طاهری^۳، امیرهمایون رضائیان^۴، علی سعدونی^۵ و احمد محب^۲

۱- مرکز خدمات تخصصی شیمی و مهندسی شیمی، جهاد دانشگاهی واحد صنعتی اصفهان، ایران

۲- دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی اصفهان، ایران

۳- دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه یزد، ایران

۴- اداره محیط زیست و پدافند غیرعامل، شرکت گاز استان هرمزگان، بندرعباس، ایران

۵- شرکت گاز استان هرمزگان، بندرعباس، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۲/۰۱ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۰/۱۸

چکیده

در این پژوهش، چگونگی توزیع و پخش ماده بودارکننده در یک خط لوله گاز طبیعی توسط دینامیک سیالات محاسباتی مورد تحلیل و بررسی قرار گرفت. سیستم بودارکننده مورد بررسی از نوع تزریقی بوده و توزیع بودارکننده از نقطه تزریق تا فاصله ۱ km با استفاده از تکنیک المان محدود مدل سازی شد. پارامترهای تنظیم کننده عملکرد پمپ تزریق مثل زمان تزریق، حجم تزریق و تعداد نوسان های تزریق مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج مدل سازی نشان داد در فاصله حدود ۲۰۰ m از ابتدای خط لوله غلظت بودارکننده ثابت شده و در مواقعی که ایستگاه با ظرفیت $7000 \text{ m}^3/\text{h}$ مشغول به کار است میزان بودارکننده مصرفی آن بیش از حد لازم است. در صورتی که حجم تزریق از 200 mm^3 به 100 mm^3 کاهش دهیم کماکان غلظت خروجی در حد استاندارد است. نتایج مربوط به مدل سازی سیستم نشان داد در ساعت های کاهش مصرف غلظت نهایی بودارکننده به حدود $85 \text{ mg}/\text{m}^3$ می رسد که تقریباً ۴ برابر میزان استاندارد است و همین امر سبب ایجاد بوی زیاد بودارکننده در منطقه می گردد. برای ایستگاه مورد نظر با تغییر در پارامترهای عملکردی پمپ، مقادیر بهینه این پارامترها در ساعت های روز و شب به دست آمد و مشخص شد میزان بهینه تزریق بودارکننده به ترتیب برابر ۱۶ و ۸ نوسان در دقیقه برای روز و شب است.

کلمات کلیدی: بودارکننده، مدل سازی، گاز طبیعی، بودارکننده تزریقی، المان محدود

مقدمه

مصرف کننده صنعتی و خانگی خطرات زیادی به دنبال خواهد داشت. بنابراین با تزریق ماده بودارکننده به جریان گاز طبیعی و یا گاز مایع، از آن به عنوان یک ماده هشداردهنده استفاده می شود

گاز طبیعی تصفیه شده، به خودی خود فاقد بو است. لذا در صورت نشت از خطوط لوله یا دستگاه های

بودار کردن گاز، تجهیزات بودار کننده، ساختار شیمیایی بودار کننده ها و بهینه سازی و اتوماسیون تجهیزات بودار کننده انجام شده است، اما در خصوص چگونگی توزیع و پخش ماده بودار کننده داخل خط لوله تحقیقات انگشت شماری انجام شده است. در یک تحقیق جامع سعادت مند و همکارانش [۶] به تحلیل میزان جذب ماده بودار کننده در خطوط لوله گاز پرداختند. تحقیق مورد نظر در دما و فشارهای مختلف صورت گرفته است. در این تحقیق برای بررسی جذب سطحی ماده بودار کننده، از پارامتر C_t/C_0 استفاده شد. این نسبت بیانگر میزان غلظت ماده بودار کننده در شرایط فعلی (C_t) به غلظت بودار کننده در لحظه اولیه (C_0) است. هر چقدر این مقدار به ۱ نزدیک شود جذب سطحی کاهش می یابد و نشان از اشباع جذب دارد. در نهایت این نتیجه حاصل شد که با گذشت زمان میزان غلظت ماده بودار کننده به غلظت اولیه آن نزدیک می شود که به دلیل اشباع جذب سطحی فیزیکی و شیمیایی در مسیر جریان است. به عنوان نتیجه کلی در لوله هایی که تازه در خط لوله جای گذاری شده اند این امکان وجود دارد که ماده بودار کننده در بدنه لوله جذب شده و غلظت آن کاهش یابد. اما نکته ای که وجود دارد این است که جذب بودار کننده با گذشت زمان کاهش یافته و پس از مدتی مقدار آن ناچیز خواهد شد. تحقیق جدیدی در زمینه مدل سازی پخش بودار کننده در خط لوله گاز توسط گراس و همکارانش [۷] انجام شده است. گراس و همکارانش با استفاده از تکنیک دینامیک سیالات محاسباتی توزیع بودار کننده را در یک خط لوله گاز طبیعی مورد بررسی قرار دادند. اثر پارامترهایی مثل سرعت و فشار گاز بر توزیع غلظت بودار کننده مورد بررسی قرار گرفت. مشخص شد که بودار کننده در خط لوله به صورت جبهه هایی با فواصل زیاد حرکت می کند. بنابراین بسته به سرعت گاز و غلظت بودار کننده تزریق شده، غلظت بودار کننده در فاصله چند کیلومتری از ابتدای خط

معمولاً از مرکاپتان ها و ترکیبات سولفیدی مثل بوتیل مرکاپتان، ایزوپروپیل مرکاپتان، نرمال پروپیل مرکاپتان، دی متیل سولفاید و متیل اتیل سولفاید به عنوان بودار کننده استفاده می شود [۳]. انواع مختلفی از دستگاه های بودار کننده گاز در صنعت استفاده می شود، از جمله بودار کننده قطره ای یا چکیدی، تزریقی، کنار گذر تبخیری، کنار گذر فیتیله ای، کنار گذر حبابی و نوری [۴]. بودار کننده های کنار گذر و تزریقی در ایران بیشتر استفاده می شوند. نقطه ضعف اصلی سیستم کنار گذر، قدیمی بودن و عدم کنترل در غلظت خروجی دستگاه است. سازوکار کلی بدین صورت است که یک جریان گازی از خط لوله اصلی وارد بودار کننده شده و ماده بودار کننده گاز که معمولاً پایه سولفوری دارد جذب گاز می شود. سپس گاز بودار شده به خط لوله اصلی برمی گردد و با قسمت اصلی جریان گاز مخلوط می شود و مقدار مجاز بودار کننده در لوله اصلی گاز که باید در محدوده $15-25 \text{ mg/m}^3$ باشد را تأمین می کند [۲]. در روش تزریقی، ماده بودار کننده متناسب با حجم گاز مصرفی و با فشار بیشتر از آن به داخل لوله اصلی تزریق می شود. ساختار دستگاه های تزریقی به این شکل است که ماده بودار کننده موجود در مخزن دستگاه، توسط یک پمپ تزریق با فشار بیشتر از فشار گاز به داخل آن تزریق می شود. حجم ماده تزریقی به سرعت پمپ بستگی دارد. لذا یک سیستم کنترل قادر است متناسب با حجم گاز عبوری از ایستگاه، سرعت پمپ را تغییر دهد. یکی از مشکلاتی که این نوع از سیستم ها با آن مواجه هستند معمولاً عدم توزیع یکنواخت و پیوسته ماده بودار کننده در خط لوله است. از جمله عوامل مؤثر بر عدم توزیع یکنواخت بودار کننده می تواند به عملکرد نامناسب سیستم تزریق، میزان دما و فشار گاز، جذب سطحی بودار کننده روی دیواره لوله، اکسیداسیون بودار کننده، وجود رطوبت در گاز و نوع بودار کننده اشاره کرد [۵]. تاکنون مطالعات زیادی در خصوص انواع بودار کننده ها، روش های

مانند مرکاپتان به صورت فیزیکی در فاز مایع حل می شوند. این پدیده تنها در صورتی اتفاق می افتد که مایعات چگالیده شده (مانند میعانات) یا مواد افزودنی (مانند نفت) در خط لوله وجود داشته باشند. این فرآیند تازمانی که اشباع جذبی مایع رخ دهد، ادامه می یابد [۱۲ و ۱۳].

مروری بر مطالعات انجام شده نشان می دهد که تاکنون تحقیقات کمی جهت مدل سازی و بهینه سازی شرایط تزریق بودارکننده در ایستگاه های تقلیل فشار گاز انجام گرفته است. چالش دیگر مربوط به متفاوت بودن شرایط عملیاتی در ایستگاه های مختلف از نقطه نظر ظرفیت ایستگاه در زمان های مختلف می باشد. بنابراین نمی توان از نتایج تحقیقات منتشر شده جهت ارزیابی عملکرد یک ایستگاه خاص در ایران استفاده نمود. در این تحقیق سعی شده است پارامترهای مهم و تأثیرگذار بر توزیع بودارکننده تزریقی در خطوط لوله گاز بررسی شوند. هدف از این تحقیق در حقیقت یافتن علل توزیع ناقص بودارکننده در خط لوله گاز ایستگاه امام حسین بندرعباس و ارائه راه کارهای عملی جهت رفع این مشکل می باشد. همان گونه که اشاره شد جهت ارزیابی مدل های مورد استفاده، سنجش تجربی بودارکننده در CGS امام حسین بندرعباس انجام شده است، لذا شرایط مدل سازی و دامنه حل دقیقه مطابق با شرایط موجود در این ایستگاه بوده و از نتایج حاصل از مدل می توان جهت بهینه سازی شرایط تزریق در ایستگاه استفاده نمود. در حال حاضر در بسیاری از ایستگاه های CGS کشور از سیستم تزریقی جهت بودار کردن گاز طبیعی استفاده می شود و بسیاری از این سیستم ها مجهز به سیستم کنترل برخط نبوده و معمولاً توسط اپراتور به صورت دستی تنظیم می گردند. لذا در برخی از ساعت های شبانه روز و یا در برخی از مناطق، به دلیل تزریق بیشتر از استاندارد بودارکننده، بوی گاز بیشتر حس شده و سبب بروز مشکلاتی می شود.

لوله متغیر بوده و به تدریج کاهش می یابد تا به غلظت استاندارد برسد. آنها از روابط ناویر استوکس، روابط غلظت و مدل آشفته گی $k-\epsilon$ برای مدل سازی عددی جریان آشفته و تراکم ناپذیر استفاده کردند. تزریق ماده بودارکننده در خط لوله گاز توسط یک بودارکننده به طور متناوب انجام می شود که باعث ایجاد نوسان در غلظت ماده بودارکننده می گردد. دامنه این نوسان در ابتدای خط لوله شبکه بیشتر است و با پیشرفت آن کاهش می یابد. فرآیند تزریق ماده بودارکننده به گاز طبیعی تا زمان رسیدن غلظت ماده بودارکننده به حالت مطلوب با استفاده از روش المان محدود شبیه سازی شد. تحقیقات مختلفی نیز در زمینه عوامل مؤثر بر عملکرد جذب بودارکننده، جذب سطحی بودارکننده توسط دیواره لوله و نقش بودارکننده در خوردگی لوله های انتقال گاز انجام گرفته است [۱۰ و ۱۱]. اسفندیاری و همکاران [۱۰] طی آزمایش های تجربی تأثیر عوامل مختلفی همچون واکنش شیمیایی و جذب فیزیکی مولکول های بودارکننده با اکسید آهن موجود در سطح داخلی لوله فولادی، مایع شدن بودارکننده به صورت قطرات کوچک در داخل لوله و واکنش شیمیایی بودارکننده با ذرات جامد جمع آوری شده توسط فیلترهای جداکننده شبکه توزیع گاز را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج نشان داد گاز طبیعی عبوری از لوله های فولادی جدید با پوششی از اکسیدهای آهن، تا زمانی که یک لایه پیوسته از اکسید آهن بر روی سطح کل خط لوله تشکیل شود، حذف شدن بودارکننده را تجربه می کند. علاوه بر این، باید توجه داشت که سرعت حذف شدن مرکاپتان ها در اثر واکنش های شیمیایی و جذب سطحی به دلیل عدم وجود اکسید آهن واکنش نداده در سطوح داخل لوله و همچنین اشباع شدن سایت های جذب به تدریج کاهش می یابد. همچنین وجود مایعات مثل آب درون خط لوله از عوامل مؤثر بر جذب بودارکننده در گاز طبیعی معرفی شده است. در صورت وجود فاز مایع، مولکول های فاز گاز

مخازن گاز ۹ جایگاه گاز طبیعی فشرده و مصارف خانگی تعبیه شده است. این خط لوله ۱۰ in از ایستگاه تقلیل فشار خط ۲۲ سرخون منشعب می شود. در این ایستگاه جهت بودار کردن گاز طبیعی از سیستم بودار کننده تزریقی که در **شکل ۱** نشان داده شده است استفاده می شود. جهت سنجش بودار کننده در نقاط مختلف خط لوله معمولاً از دستگاه قابل حمل (مدل Odor Handy Plus) استفاده می شود. این دستگاه مجهز به یک سنسور الکتروشیمیایی است که برای سنجش غلظت مرکابت هایی مثل تتراهیدروتیوفن و بوتیل مرکاپتان نوع سوم مناسب است. عملکرد این دستگاه در محدوده $0-100 \text{ mg/m}^3$ و دقت نمایش اعداد در این محدوده طبق اعلام شرکت سازنده معادل mg/m^3 ۰/۱ است. طبق داده های تجربی بودار کننده سنجی که توسط شرکت گاز استان هرمزگان تهیه شده است، میزان متوسط غلظت بودار کننده در خردادماه ۱۴۰۰ در محدوده $25-31 \text{ mg/m}^3$ بوده و مقادیر هر نقطه مطابق **جدول ۱** است.

نتایج این تحقیق می تواند جهت بهینه سازی سیستم های صنعتی تزریق بودار کننده استفاده شود و همچنین با توجه به ایجاد شرایط بهینه، توزیع بودار کننده در خط لوله یکنواخت تر شده و از مصرف بودار کننده اضافه نیز جلوگیری می شود. بدین منظور در این مقاله پس از ارائه روش سنجش بودار کننده، روابط حاکم جهت آنالیز دینامیک سیالات محاسباتی ارائه شده و در ادامه نتایج حاصل از مدل سازی تفسیر شده اند. مدل سازی تحت شرایط مختلف تزریق و در ظرفیت های مختلف ایستگاه تحت شرایط مختلف دما و فشار انجام شده و در انتها راه کارهایی جهت بهینه سازی عملکرد سیستم ارائه شده است.

روش تحقیق

سنجش تجربی بودار کننده در CGS امام حسین شهرستان بندرعباس

خط انتقال گاز در شهر بندرعباس از مبدأ بلوار امام حسین (ع) به طول ۸۱۸۰ m با هدف تغذیه



شکل ۱ سیستم بودار کننده تزریقی موجود در CGS امام حسین بندرعباس

جدول ۱ نتایج تجربی سنجش غلظت متوسط بودار کننده

تاریخ نمونه برداری	محل نمونه برداری	میزان بودار کننده در محل نمونه گیری (mg/m^3)
خرداد ۱۴۰۰	فاز سوم الهیه شمالی، کوچه الهیه ۱، پلاک ۱	۳۱
خرداد ۱۴۰۰	فاز سوم نبوت، کوچه میثم، پلاک ۴۶	۳۱

از داده‌های **جدول ۱** در بخش‌های بعدی جهت ارزیابی و صحت‌سنجی داده‌های مدل‌سازی استفاده می‌گردد. ذکر این نکته ضروری است که به دلیل محدودیت‌هایی که در سنجش بودارکننده وجود داشته تعداد نقاط مورد بررسی بودارکننده سنجی محدود به دو مکان مشخص شده در **جدول ۱** می‌باشد.

مدل‌سازی CFD توزیع بودارکننده در خط لوله

در این تحقیق، جهت مدل‌سازی توزیع بودارکننده در گاز طبیعی از نرم‌افزار کامسول استفاده شده است. همان‌طور که ذکر شد هندسه محاسباتی شامل ۱۰۰۰ m از طول لوله انتقال گاز می‌باشد. جهت تحلیل جریان سیال آشفته همراه با انتقال جرم از مدل‌های جریان آشفته و مدل انتقال اجزاء استفاده شد. جریان به‌صورت ناپایا مدل‌سازی شده است. از ۸۴۰۰۰۰ المان چهاروجهی جهت شبکه‌بندی هندسه محاسباتی استفاده شد و به دلیل این‌که طول لوله نسبت به قطر بسیار زیاد بوده و ساختار دقیق سلول‌ها مشخص نمی‌باشد شکلی از هندسه شبکه‌بندی شده ارائه نشده است. فرضیات ذیل جهت مدل‌سازی جریان مورد استفاده قرار گرفت:

- جریان بودارکننده به‌صورت فاز گاز بوده و روابط حاکم بر جریان به‌صورت تکفازی در نظر گرفته شده‌اند.

- شرط عدم لغزش برای دیواره لوله در نظر گرفته شده است.

- سطح داخلی دیواره لوله صاف می‌باشد.

- بودارکننده با گاز طبیعی واکنش نمی‌دهد.

- از اختلاف ارتفاع و تغییر جهت خط لوله صرف‌نظر شده است.

روابط حاکم شامل روابط انتقال جرم، پیوستگی و اندازه حرکت به‌همراه روابط مربوط به جریان آشفته مورد استفاده قرار گرفتند [۱۴ و ۱۵].

- معادله پیوستگی:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho \nabla U = 0 \quad (۱)$$

- معادله اندازه حرکت:

$$\rho \frac{\partial U}{\partial t} + \rho (U \cdot \nabla) U = \nabla \cdot \left[-PI + (\mu + \mu_r) (\nabla U + (\nabla U)^T) - \frac{2}{3} \rho k I \right] + F \quad (۲)$$

- روابط آشفته‌گی:

$$\rho \frac{\partial k}{\partial t} + \rho (U \cdot \nabla) k = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_r}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + P_k - \rho \varepsilon \quad (۳)$$

$$\mu_r = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (۴)$$

- روابط انتقال جرم:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \nabla \cdot (-D_{eff} \nabla C) + U \cdot \nabla C = 0 \quad (۵)$$

$$D_{eff} = D + D_T \quad (۶)$$

$$D_T = \frac{\mu_r}{\rho S C_t} \quad (۷)$$

این روابط در تمامی سلول‌های محاسباتی در نظر گرفته شده به‌روش "المان محدود" حل شده و پارامترهایی مثل گرادیان سرعت، فشار و جزء حجمی گاز و ماده بودارکننده در طول سیستم به‌دست می‌آیند. سیستم تحت حالت ناپایا مدل‌سازی شد تا تغییرات لحظه‌ای بودارکننده مشخص شود. جهت تخمین دقیق توزیع غلظت بودارکننده، پارامترهای کلیدی زیادی برای سیستم تعریف شد که در هر مدل می‌توان آنها را تغییر داد. این پارامترها عبارتند از زمان تزریق، غلظت مطلوب یا نهایی بودارکننده، غلظت اولیه بودارکننده، سرعت گاز، فاصله بین تزریق‌های متوالی، حجم هر ضربه یا تزریق، دمای گاز، فشار سیستم و ترکیب دقیق بودارکننده. نتایج حاصل شامل توزیع سرعت و توزیع غلظت بودارکننده نسبت به‌زمان و مکان است. با این روش می‌توان مقدار دقیق غلظت بودارکننده را در زمان‌های مختلف و در فواصل مختلف از نقطه تزریق تخمین زد. هندسه محاسباتی شامل یک لوله به طول ۱۰۰۰ m و قطر ۲۵/۴ cm می‌باشد. در ورودی لوله شرط مرزی سرعت ورودی در نظر گرفته شد. در این مرز مقدار سرعت ورودی گاز طبیعی و همچنین سرعت و غلظت بودارکننده مشخص می‌شود. در خروجی لوله شرط فشار خروجی در نظر گرفته شد و برای دیواره‌های لوله شرط عدم لغزش به‌کار گرفته شد. در این حالت فرض می‌شود سرعت فازها روی دیواره لوله صفر می‌باشد.

مربوط به خردادماه سال ۱۴۰۰ بود، شرایط حاکم بر سیستم در همان زمان، در مدل سازی نیز مورد استفاده قرار گرفت. طبق مشاهدات انجام شده در ایستگاه مشخص شد که در خردادماه ۱۴۰۰ پمپ تزریق به گونه ای تنظیم شده که در هر دقیقه ۲۷ تزریق انجام می دهد. ظرفیت عملی ایستگاه معمولاً ۳۰٪ ظرفیت اسمی ایستگاه بوده و معادل $7000 \text{ m}^3/\text{h}$ و فشار سیستم ۲۵۰ psi در نظر گرفته شد. بنابراین شرایط مدل سازی نیز بر همین اساس انجام گرفت. نتایج هر مدل سازی شامل توزیع غلظت بودارکننده در زمان ها و مکان های مختلف از خط لوله است. بنابراین می توان مشخص نمود که دقیقاً بودارکننده پس از طی کردن چه مسافتی به غلظت و توزیع یکنواخت می رسد و غلظت نهایی بودارکننده چقدر است. برای مشخص کردن اینکه دقیقاً در چه فاصله ای از نقطه تزریق غلظت بودارکننده به صورت یکنواخت در لوله توزیع می شود بایستی توزیع بودارکننده در طول های متفاوتی از لوله نشان داده شود. با توجه به طول زیاد لوله که ۱۰۰۰ m است، توزیع بودارکننده در چند مقطع به صورت **شکل ۳** نشان داده شده است. با توجه به **شکل ۳** کاملاً مشخص است که در ابتدای خط لوله که نزدیک به محل تزریق است، بودارکننده به صورت توده هایی در فاز گاز وارد و پراکنده می شود.

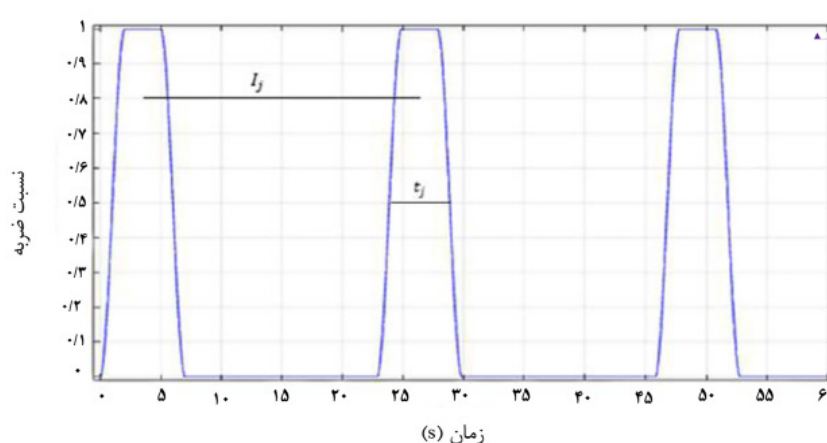
یکی از چالش های اصلی مدل سازی، سرعت ورودی به خط لوله است. جریان گاز به صورت مداوم وارد خط لوله می شود ولی جریان بودارکننده به صورت نوسانی توسط پمپ، داخل خط لوله تزریق می شود. بنابراین برای ورودی بودارکننده یک تابع نوسانی مطابق با **شکل ۲** تعریف شد. مطابق شکل مقادیر I_a و t_a به ترتیب فاصله بین قله ها و زمان تزریق برحسب ثانیه می باشند که بایستی در شروع هر مدل سازی براساس شرایط عملیاتی حاکم بر خط لوله تعریف شوند. علاوه بر مقادیر سرعت ورودی، تعداد تزریق در دقیقه یا تعداد نوسان و زمان تزریق، مقدار حجم تزریق نیز باید مشخص شود. پمپ های مختلف دارای حجم تزریق های مختلفی می باشند که معمولاً قابل تنظیم و کنترل هستند. معمولاً بسته به مشخصات پمپ تزریق، در هر بار تزریق، به میزان 100 mm^3 - ۲۰۰ از بودارکننده قابل تزریق است.

نتایج و بحث

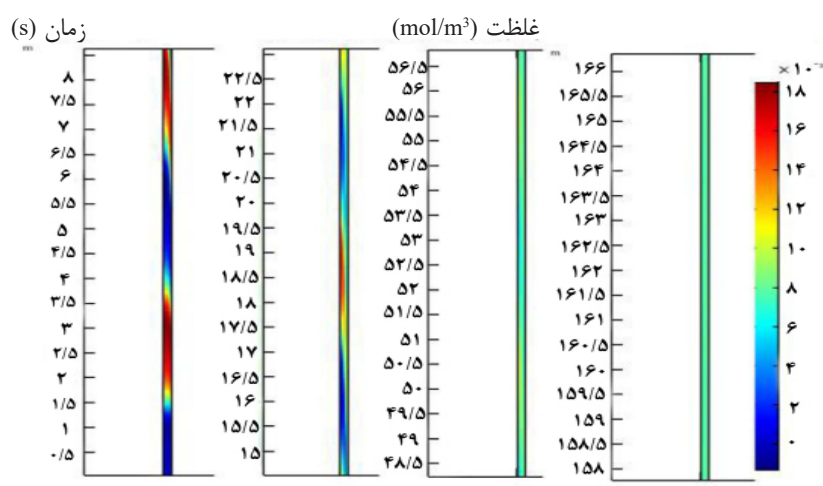
جهت مدل سازی سعی شده است شرایط کنونی حاکم بر ایستگاه در مدل اعمال شود. ظرفیت عملی ایستگاه تقریباً ۳۰٪ ظرفیت اسمی ایستگاه بوده و معادل $7000 \text{ m}^3/\text{h}$ در نظر گرفته شد.

مدل سازی سیستم تحت شرایط موجود در ایستگاه

با توجه به اینکه داده های تجربی سنجش بودارکننده



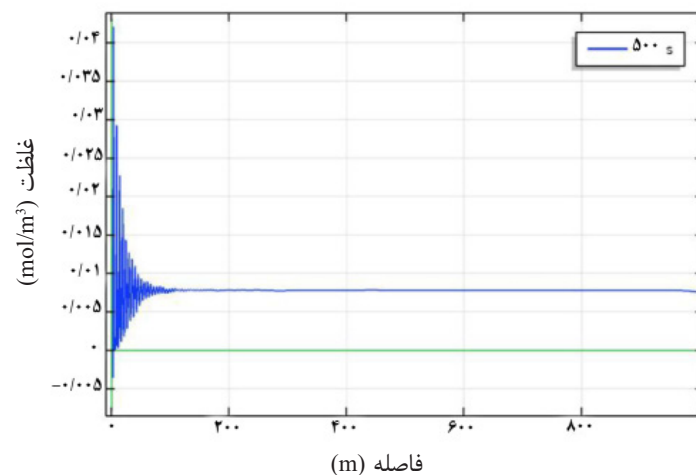
شکل ۲ تابع نوسانی ورودی بودارکننده



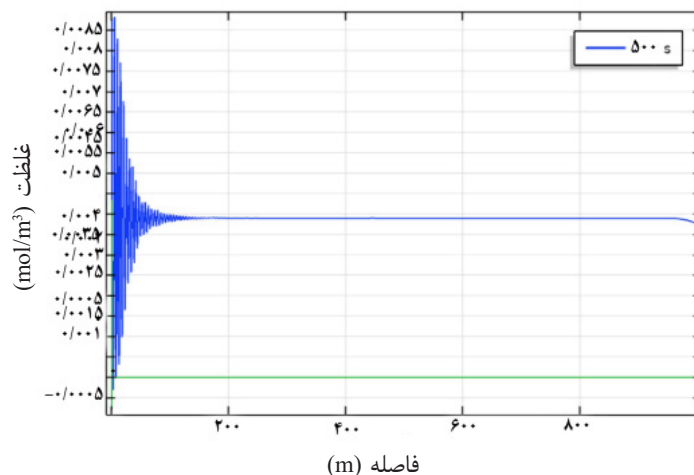
شکل ۳ توزیع غلظت بودارکننده پس از ۵۰۰ s در فواصل مختلفی از ابتدای خط لوله

بودارکننده تجربی را با داده‌های مدل‌سازی مقایسه نمود. بنابراین مجدد لازم به ذکر است که یکی از چالش‌های اصلی در این تحقیق محدود بودن تعداد داده‌های تجربی مربوط به مکان‌های سنجش بودارکننده می‌باشد. اگر در همین مدل حجم بودارکننده تزریقی در هر نوسان نصف شود و بقیه پارامترها ثابت بماند، نتایج نشان داده شده در **شکل ۵** حاصل می‌گردد. با بررسی شکل ۵ مشخص است که با نصف شدن حجم تزریق فاصله لازم جهت یکنواخت شدن غلظت بودارکننده به حدود ۱۶۰ m رسیده است و غلظت نهایی بودارکننده مطابق شکل به حدود 0.038 mol/m^3 رسیده است. این مقدار غلظت برحسب واحد استاندارد معادل 20 mg/m^3 است که در محدوده میزان استاندارد است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت با توجه به اینکه پمپ موجود در این ایستگاه به گونه‌ای تنظیم شده است که در هر تزریق حجمی معادل 200 mm^3 تزریق می‌نماید، ضمن اینکه عملکرد مناسبی از لحاظ توزیع بودارکننده دارد ولی میزان بودارکننده مصرفی آن بیش‌ازحد لازم است. طبق محاسبات فوق مشخص است که در صورتی که حجم تزریق از ۲۰۰ به 100 mm^3 کاهش یابد کماکان غلظت خروجی در حد استاندارد است ضمن این‌که از مصرف بودارکننده زیادی هم جلوگیری شده است.

با فاصله گرفتن از ابتدای خط لوله با توجه به نفوذ بودارکننده در گاز طبیعی، میزان غلظت در طول لوله یکنواخت‌تر شده و به‌عنوان مثال در فاصله‌ای حدود ۱۶۰ m از ابتدای خط لوله غلظت بودارکننده تزریقی تقریباً ثابت شده است. برای بررسی دقیق‌تر می‌توان نمودار غلظت بودارکننده برحسب فاصله از نقطه تزریق را به‌صورت **شکل ۴** نشان داد. با بررسی **شکل ۴** می‌توان گفت غلظت بودارکننده پس از طی مسافتی در حدود ۱۷۰ m از نقطه تزریق به توزیع یکنواخت خواهد رسید. قبل از این فاصله توزیع بودارکننده به‌صورت سیسنوسی است و برای سنجش بودارکننده باید این نکته را مد نظر قرار داد. در فواصل کمتر از حدود ۱۰۰ m توزیع غلظت بودارکننده هنوز به‌صورت یکنواخت نشده ولی در فاصله حدود ۱۷۰ m از خط لوله غلظت ثابت شده و به حدود 0.007 mol/m^3 رسیده است. این مقدار غلظت برحسب واحد استاندارد معادل 34 mg/m^3 است که به مقدار تجربی گزارش شده در ایستگاه نزدیک بوده و البته بیشتر از مقدار استاندارد است. در این حالت درصد خطای نسبی معادل ۸/۸ می‌باشد. با توجه به اینکه در آزمایش‌های سنجش بودارکننده امکان سنجش غلظت در فاصله‌های دلخواه مثلاً در فاصله ۱۷۰ m وجود ندارد بنابراین نمی‌توان به‌صورت نقطه‌ای مقادیر غلظت



شکل ۴ غلظت محلی بودارکننده بر حسب فاصله از نقطه تزریق، حجم تزریق 200 mm^3

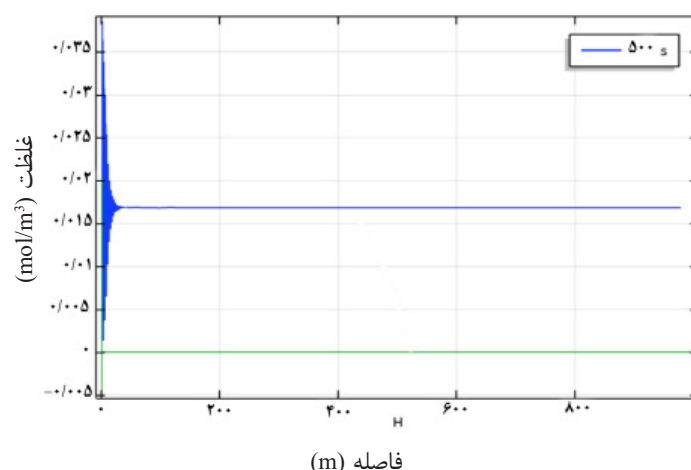


شکل ۵ غلظت محلی بودارکننده بر حسب فاصله از نقطه تزریق، حجم تزریق 100 mm^3

مدل سازی سیستم تحت شرایط حاکم بر ایستگاه در ساعات های شبانه

در این بخش هدف یافتن شرایط عملکردی پمپ تزریق در زمان هایی است که ظرفیت ایستگاه کاهش می یابد. بدین منظور مدل سازی تحت شرایطی انجام گرفته که فرض شده ظرفیت ایستگاه در ساعات های شبانه به حدود $3000 \text{ m}^3/\text{h}$ رسیده باشد. ضمناً فرض می شود که پمپ در هر 27 m تزریق با حجم 200 mm^3 انجام دهد. نتایج مربوط به این حالت در شکل ۶ نشان داده شده است. با توجه به شکل مشخص است که در این حالت فاصله لازم جهت یکنواخت شدن غلظت بودارکننده به کمتر از 100 m رسیده است.

لازم به ذکر است این محاسبات مربوط به مواقعی است که ایستگاه با ظرفیت حدود $7000 \text{ m}^3/\text{h}$ مشغول به کار است. در فصل های مختلف سال و همچنین در ساعات های مختلف شبانه روز، مقدار ظرفیت ایستگاه تغییر می کند. به عنوان مثال در ساعات های نیمه شب که مصرف ایستگاه های CNG مستقر در منطقه کاهش می یابد، ظرفیت ایستگاه کاهش قابل ملاحظه ای می کند، در حالی که تنظیمات پمپ ثابت بوده و کماکان در هر دقیقه حدود 27 بار تزریق انجام می دهد. بدین خاطر میزان بودارکننده مصرفی بیش از حد نیاز است و غلظت آن افزایش یافته و بوی تند آن سبب مشکلاتی در منطقه می گردد.



شکل ۶ غلظت محلی بودارکننده برحسب فاصله از نقطه تزریق در ساعت‌های شبانه

در منطقه، میزان بودارکننده مصرفی به‌میزان قابل توجهی کاهش خواهد یافت.

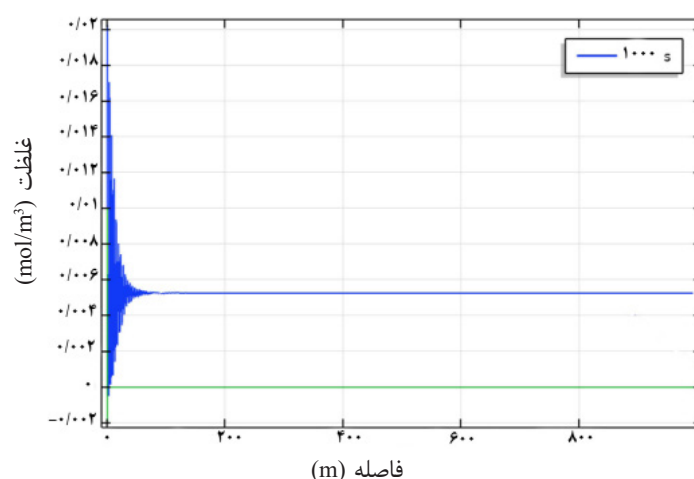
تعیین شرایط بهینه تزریق بودارکننده تحت شرایط عملیاتی یکسان در روز و شب

در این بخش، هدف یافتن تعداد تزریق بهینه پمپ برای رسیدن به غلظت استاندارد بودارکننده در خط لوله است. غلظت استاندارد بودارکننده معمولاً $25\text{--}20\text{ mg/m}^3$ می‌باشد [۲].

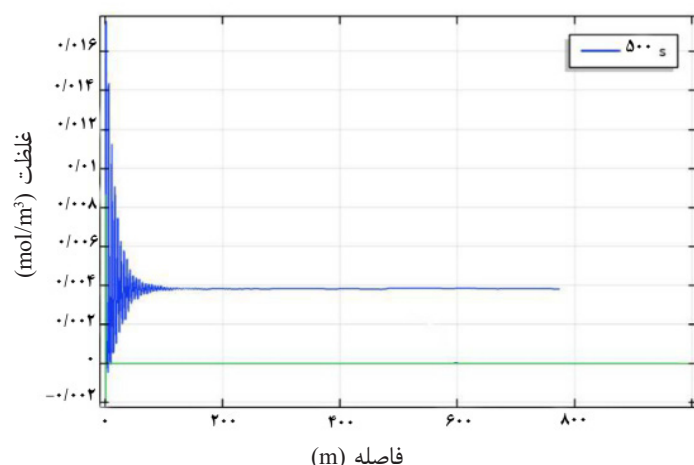
مدل‌سازی شرایط بهینه تزریق بودارکننده در ساعت‌های روز

در این بخش زمان تزریق 1 s و حجم تزریق 200 mm^3 در نظر گرفته شد. میزان مصرف روزانه $7000\text{ m}^3/\text{h}$ و دما 27°C است. طبق نتایج تعداد تزریق تحت این شرایط که براساس شرایط حاکم بر ایستگاه به‌دست آمده برای رسیدن به غلظت استاندارد، معادل 16 ضربه در دقیقه است. تحت این شرایط نتایج مدل‌سازی در شکل ۸ نشان داده شده است. مشخص است که بودارکننده پس از طی مسافتی در حدود 100 m به غلظت استاندارد 20 mg/m^3 رسیده است که شرایط مطلوبی است. این شرایط در حقیقت شرایط بهینه عملیاتی در ساعت‌های روز در ایستگاه است که پیشنهاد می‌شود به‌عنوان الگوی بهینه در ایستگاه امام حسین بندرعباس در ساعت‌های روز مورد استفاده قرار گیرد.

ولی غلظت نهایی بودارکننده مطابق شکل به حدود 0.017 mol/m^3 رسیده است. این مقدار غلظت برحسب واحد استاندارد معادل 85 mg/m^3 است که نسبت به حالت استاندارد بسیار بیشتر است. بنابراین لازم است در ساعت‌های شبانه برنامه پمپ تزریق تغییر یافته و بهینه شود. جهت بهینه‌سازی شرایط تزریق در ساعت‌های کاهش مصرف و ساعت‌های شبانه ایستگاه، شرایط تزریق بودارکننده تغییر داده شد. این مدل تحت شرایطی حاصل شده که تعداد نوسان‌های تزریق پمپ در هر دقیقه 16 بار و در هر تزریق 100 mm^3 بودارکننده در 0.5 s تزریق می‌گردد. شکل ۷ نتایج مربوط به این حالت را نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۷ مشخص است که در این حالت فاصله لازم جهت یکنواخت شدن غلظت بودارکننده به حدود 100 m رسیده است و غلظت نهایی بودارکننده مطابق شکل به حدود 0.053 mol/m^3 رسیده است. این مقدار غلظت برحسب واحد استاندارد معادل 26 mg/m^3 است که در محدوده استاندارد است. بنابراین می‌توان گفت در ساعت‌هایی که ظرفیت ایستگاه کاهش می‌یابد میزان بهینه تزریق بودارکننده توسط پمپ مقدار 16 ضربه بر دقیقه است. با تغییر شرایط کنونی حاکم بر ایستگاه به شرایط بهینه، علاوه‌بر رفع مشکل بوی بودارکننده



شکل ۷ غلظت محلی بودارکننده برحسب فاصله از نقطه تزریق در ساعت‌های کاهش مصرف در حالت بهینه



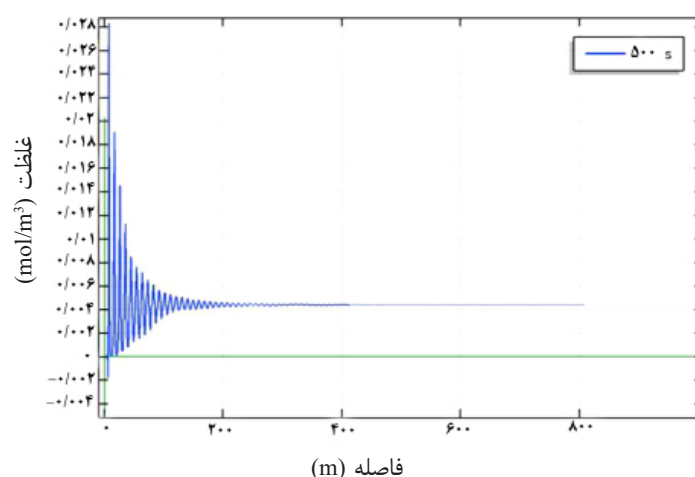
شکل ۸ غلظت بودارکننده برحسب فاصله از نقطه تزریق تحت شرایط بهینه در ساعت‌های روز

براساس شرایط حاکم بر ایستگاه به دست آمده معادل ۸ ضربه در دقیقه است. از شکل ۹ مشخص است که بودارکننده پس از طی مسافتی در حدود ۲۰۰ m به غلظت استاندارد 23 mg/m^3 رسیده است که شرایط مطلوبی است. این شرایط در حقیقت شرایط بهینه عملیاتی در ساعت‌های شبانه در ایستگاه امام حسین است. بدین مفهوم که بدون تغییر دادن شرایط عملکردی پمپ، تنها تعداد ضربه از ۱۶ تزریق در دقیقه که مربوط به روز است به ۸ تزریق در دقیقه کاهش یابد. در این حالت بودارکننده بهترین عملکرد هم از نظر فنی و هم از نظر اقتصادی را در طول شب خواهد داشت.

بدین مفهوم که اگر شرایط پمپ را در حالت حجم تزریق 200 mm^3 و زمان هر تزریق ۱ s و تعداد دفعات تزریق در دقیقه را ۱۶ تنظیم گردد، بودارکننده بهترین عملکرد هم از نظر فنی و هم از نظر اقتصادی را خواهد داشت.

مدل سازی شرایط بهینه تزریق بودارکننده در ساعت‌های شبانه

فرض می‌شود تنظیمات اصلی پمپ یعنی زمان تزریق ۱ s و حجم تزریق برابر دقیقاً مثل حالت قبل در نظر گرفته شده باشد. میزان مصرف شبانه $3000 \text{ m}^3/\text{h}$ و دما 27°C است. تحت این شرایط نتایج مدل سازی در شکل ۹ نشان داده شده است. تعداد تزریق تحت این شرایط که



شکل ۹ غلظت ادورانت برحسب فاصله از نقطه تزریق تحت شرایط بهینه در شب

فرآیندی مثل سرعت گاز، دمای گاز، فشار خط لوله، پارامترهای تنظیم‌شونده در پمپ، ظرفیت ایستگاه و طریقه عملکرد و کارکرد سیستم ادورایزر جزء عواملی هستند که می‌توانند توسط ابزار مدل‌سازی مورد بررسی قرار گیرند. در این بخش پارامترهای کلیدی مثل سرعت گاز (ظرفیت ایستگاه)، دما و فشار خط لوله مورد بررسی قرار گرفته‌اند.

بررسی اثر ظرفیت ایستگاه CGS بر توزیع بهینه بودارکننده

در این بخش، هدف یافتن اثر ظرفیت ایستگاه بر چگونگی توزیع بودارکننده در خط لوله است. با توجه به اینکه ظرفیت ایستگاه در ساعت‌های مختلف شبانه‌روز و همچنین در فصل‌های مختلف سال تغییر می‌کند، به نظر می‌رسد مشخص کردن مقدار تزریق بهینه بودارکننده تحت شرایط مختلف بسیار پارامتر مهمی باشد. از نتایج این بخش می‌توان در طراحی سیستم‌های کنترل جهت تزریق دقیق و بهینه بودارکننده استفاده نمود. حداکثر ظرفیت ایستگاه CGS امام حسین برابر $30000 \text{ m}^3/\text{h}$ است. در این بخش، سیستم تحت ظرفیت‌های مختلف مدل‌سازی شده و مقدار بهینه تزریق بودارکننده براساس هر ظرفیت مشخص شده است. ظرفیت‌های در نظر گرفته شده بین بازه بیشینه و کمینه معادل $30000 \text{ m}^3/\text{h}$ تا $1000 \text{ m}^3/\text{h}$ متغیر در نظر گرفته شده است.

البته طبق شکل ۷ هم که مربوط به تنظیمات پمپ در ساعت‌های شبانه بود این نتیجه حاصل شد که اگر در ساعت‌های شبانه زمان تزریق s $0/5$ و حجم تزریق برابر 100 mm^3 در نظر گرفته شود تعداد ضربه‌های پمپ باید در ۱۶ تزریق در دقیقه تنظیم شود تا غلظت مناسبی معادل 26 mg/m^3 برای بودارکننده حاصل گردد. در هر صورت هر کدام از این دو حالت که برای پمپ موجود در ایستگاه امام حسین قابلیت اجرا داشته باشد می‌تواند به‌عنوان حالت بهینه مورد استفاده قرار گیرد. خلاصه نتایج سه حالت اخیر برای عملکرد بهینه سیستم در شب و روز در جدول ۲ نشان داده شده است.

بررسی عوامل فرآیندی کلیدی بر چگونگی توزیع بودارکننده

طبق مطالعات انجام شده مشخص شد که عوامل متعددی بر چگونگی توزیع بودارکننده در خط لوله گاز طبیعی مؤثر می‌باشند. از جمله این عوامل می‌توان به خوردگی، کیفیت گاز، اختلاف ارتفاع لوله در محل تزریق، اثر سطح به حجم لوله، اثرات جذب سطحی در دیواره لوله، جنس لوله، پوشش‌دهنده‌ها، اثر وجود آب، وجود ذرات جامد در گاز ورودی، واکنش شیمیایی بودارکننده با دیواره لوله، زنگ‌زدگی خط لوله و سقوط ذرات مرکابتان به کف لوله اشاره نمود. اثرات پارامترهای

جدول ۲ شرایط عملکردی بهینه پمپ برای رسیدن به غلظت استاندارد بودارکننده در شب و روز

شرایط ایستگاه	ظرفیت (m ³ /h)	زمان هر تزریق (s)	حجم تزریق (mm ³)	تعداد تزریق در دقیقه (NPF)	غلظت خروجی بودارکننده (mg/m ³)
عملکرد در ساعت های روز	۷۰۰۰	۱	۲۰۰	۱۶	۲۰
عملکرد در ساعت های شب	۳۰۰۰	۱	۲۰۰	۸	۲۳
عملکرد در ساعت های شب	۳۰۰۰	۰/۵	۱۰۰	۱۶	۲۶

جدول ۳ میزان مصرف گاز یا ظرفیت ایستگاه را که در این بخش مورد بررسی قرار گرفته نشان می دهد. در این بخش فرض می شود تمام مشخصات قابل تنظیم پمپ، دقیقاً معادل حالت بهینه ای باشد که در بخش های قبلی به دست آمده است. هدف یافتن تعداد تزریق بهینه و تخمین غلظت بودارکننده خروجی در ظرفیت های مختلف ایستگاه است. **شکل ۱۰** تعداد بهینه ضربه های پمپ تزریق بودارکننده بر حسب ظرفیت ایستگاه و همچنین میزان غلظت خروجی بودارکننده را نشان می دهد. با توجه به نتایج ارائه شده می توان برای ظرفیت های مختلف ایستگاه، پمپ را به گونه ای برنامه ریزی نمود که همیشه غلظت بودارکننده در خروجی در محدوده استاندارد باشد.

بررسی اثر فشار خط لوله بر توزیع بودارکننده

با توجه به اینکه ممکن است در برخی مواقع، فشار خط دچار نوسان شود، در این بخش هدف یافتن شرایط بهینه برای تزریق بودارکننده تحت شرایط افت فشار خط لوله است. دو مقاله پژوهشی به بررسی این موضوع پرداخته اند، ولی نتایج حاصل از این دو تحقیق با یکدیگر همخوانی ندارد. طبق گفته دیمی و همکاران افزایش فشار سبب کاهش جذب و افزایش غلظت بودارکننده در خروجی می گردد ولی طبق نتایج گراس و همکاران با افزایش فشار گاز، عملکرد جذب بهتر می شود و بودارکننده در فاصله کمتری از ابتدای لوله به غلظت استاندارد می رسد. با توجه به تناقض نتایج موجود، در این بخش مدل سازی سیستم تحت شرایط مختلف فشار از ۲۵۰ psi تا ۱۵۰ psi انجام شده تا نقش افت فشار

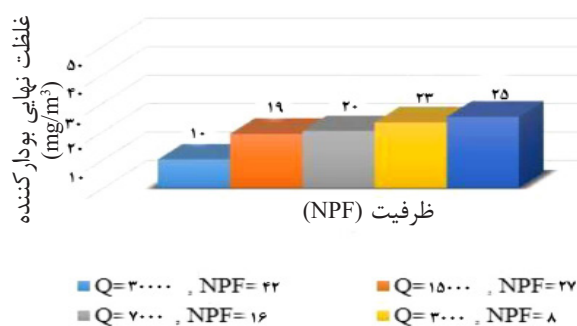
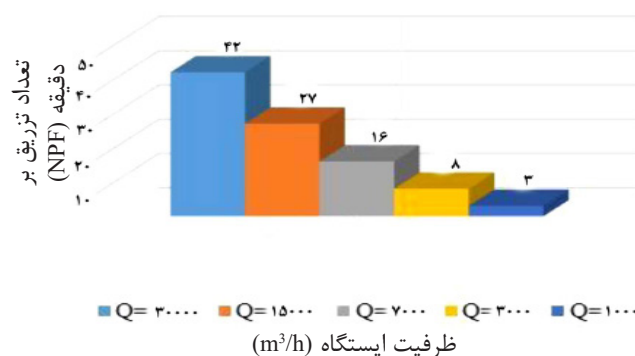
گاز بر توزیع بودارکننده دقیق تر مشخص شود. دمای گاز برابر ۲۷ °C و ظرفیت ایستگاه ۳۰۰۰۰ m³/h در نظر گرفته شده است. **شکل ۱۱** غلظت متوسط ادورانت داخل خط لوله را بر حسب فشار طبق رابطه مربوط نشان می دهد. با کاهش فشار طبق رابطه مربوط به زمان تزریق، میزان فواصل بین تزریق های متوالی افزایش می یابد. همان طور که با بررسی مطالعه گراس و همکاران نیز اشاره شد با کاهش فشار فرکانس تزریق کم و دوره نوسان I₂ کاهش یافته و بنابراین میزان جذب بودارکننده کاهش می یابد. یعنی در فشارهای پایین، بودارکننده مسافت بیشتری از طول لوله را طی می کند تا به غلظت ثابت استاندارد برسد. همان گونه که از **شکل ۱۱** مشخص است درحالی که اگر فشار گاز ۲۵۰ psi باشد بودارکننده پس از طی مسافتی در حدود ۲۰۰ m به غلظت ثابت و در محدوده استاندارد می رسد، درحالی که با کاهش فشار تا ۱۵۰ psi در فاصله حدود ۳۰۰ m از ابتدای لوله غلظت بودارکننده ثابت می شود. ضمن اینکه در فشار ۲۵۰ psi و ۱۵۰ psi غلظت خروجی بودارکننده به ترتیب ۲۳ mg/m³ و ۱۶ mg/m³ می باشند.

بررسی اثر دمای خط لوله بر توزیع بودارکننده

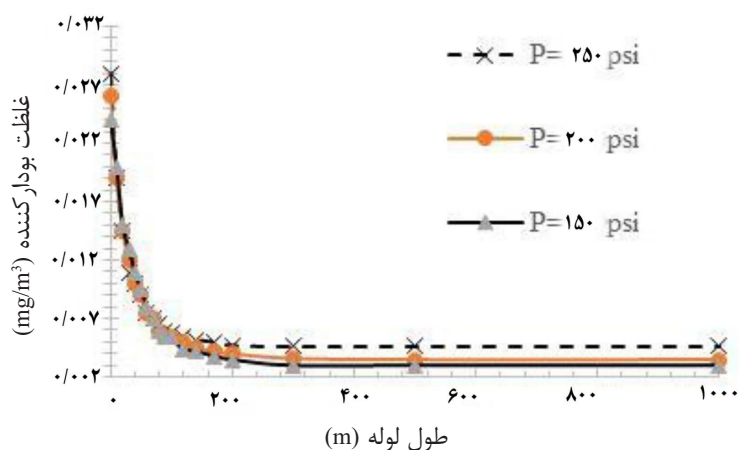
در این بخش هدف بررسی اثر دمای گاز بر چگونگی توزیع بودارکننده است. دمای گاز برابر ۲۷ °C و ظرفیت ایستگاه ۳۰۰۰۰ m³/h در نظر گرفته شده است. با توجه به گرمسیر بودن منطقه، دمای گاز در محدوده ۲۰ °C تا ۴۰ °C مورد بررسی قرار گرفت. **شکل ۱۲** توزیع بودارکننده در ۱۰۰۰ m از طول لوله را نشان می دهد.

جدول ۳ مقادیر در نظر گرفته شده برای ظرفیت ایستگاه CGS

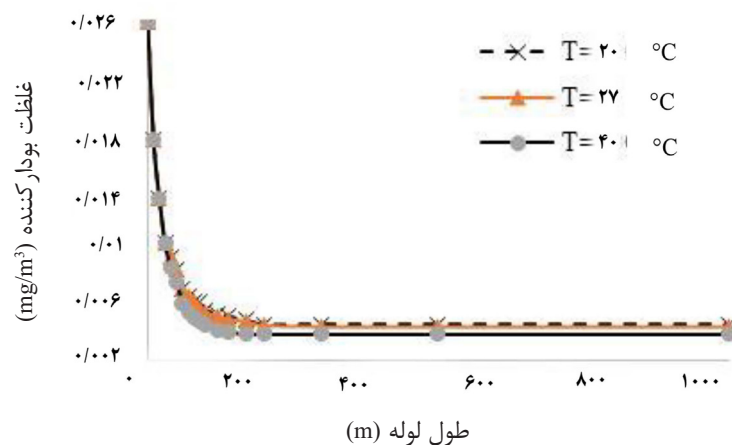
ظرفیت ایستگاه	میزان مصرف گاز (m ³ /h)	سرعت گاز در خط لوله (m/s)
بیشینه ظرفیت اسمی	۳۰۰۰۰	۹/۶
۵۰٪ ظرفیت اسمی	۱۵۰۰۰	۴/۸
ظرفیت عملیاتی در روز	۷۰۰۰	۲/۱۶
ظرفیت عملیاتی در شب	۳۰۰۰	۰/۹۲
حداقل ظرفیت	۱۰۰۰	۰/۳۲



شکل ۱۰ تعداد بهینه ضربه‌های پمپ تزریق بودار کننده و غلظت نهایی بودار کننده برحسب ظرفیت ایستگاه



شکل ۱۱ اثر فشار گاز بر روی توزیع بودار کننده در خط لوله



شکل ۱۲ اثر دمای گاز بر روی توزیع بودارکننده در خط لوله

مدل سازی هندسه محاسباتی شامل یک کیلومتر از خط لوله توسط آنالیز CFD با استفاده از نرم افزار کامسول و روش المان محدود، تحت شرایط مختلف بررسی شد. مدل مورد استفاده قادر است دقیقاً تمامی شرایط تزریق بودارکننده توسط پمپ را کنترل کند. سرعت گاز، غلظت بودارکننده تزریقی، زمان هر تزریق، حجم تزریق، تعداد ضربه و فاصله بین تزریق ها قابل کنترل و بهینه سازی می باشند. ابتدا شرایط موجود در ایستگاه مدل سازی شده و غلظت پیش بینی شده توسط مدل با مقدار تجربی اندازه گیری شده در ایستگاه مقایسه شد و مشخص شد که می توان به داده های حاصل از مدل اطمینان نمود. نتایج مدل سازی که مربوط به شرایط کنونی حاکم بر سیستم است نشان داد در فاصله حدود ۲۰۰ m از ابتدای خط لوله غلظت بودارکننده ثابت شده ولی در مواقعی که ایستگاه با ظرفیت $7000 \text{ m}^3/\text{h}$ مشغول به کار است میزان بودارکننده مصرفی آن بیش از حد لازم است. طبق نتایج مدل سازی مشخص شد که در صورتی که حجم تزریق را از 200 mm^3 به 100 mm^3 کاهش دهیم کماکان غلظت خروجی در حد استاندارد است ضمن اینکه از مصرف بودارکننده زیادی هم جلوگیری شده است. نکته دیگری که بایستی مورد توجه قرار گیرد این است که در ساعت های

همان گونه که در بخش تئوری ذکر شد دما بر روی پارامترهایی مثل خواص فیزیکی گاز و بودارکننده و همچنین بر روی ضریب نفوذ بودارکننده و میزان انتقال جرم و جذب بودارکننده در گاز اثر دارد. با تغییر در خواص فیزیکی ممکن است کمی سرعت گاز تغییر کند، به عنوان مثال افزایش دما با افزایش سرعت رابطه مستقیم دارد که قبلاً در بخش بررسی اثر ظرفیت گاز، اثر تغییرات سرعت مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به نتایج حاصل مشخص است که تغییر دما از 20°C تا 27°C تأثیر ناچیزی بر توزیع بودارکننده و غلظت نهایی بودارکننده دارد. با افزایش دما به 40°C تغییرات مقداری محسوس تر است و مشخص است که غلظت خروجی بودارکننده به میزان کمی کاهش یافته و غلظت آن پس از طی مسافت کمتری ثابت می گردد. به عنوان مثال در دمای 20°C بودارکننده پس از مسافتی حدود ۲۰۰ m به غلظت ثابت می رسد ولی در دمای 40°C این طول به حدود ۱۴۰ m کاهش می یابد. علت این امر تغییر در سرعت گاز و افزایش ضریب نفوذ و میزان جذب است.

نتیجه گیری

در این مقاله هدف اصلی تحلیل چگونگی توزیع بودارکننده در خط لوله بود. بدین منظور

نیمه شب که مصرف ایستگاه‌های CNG مستقر در منطقه کاهش می‌یابد، ظرفیت ایستگاه کاهش قابل ملاحظه‌ای می‌کند، در حالیکه تنظیمات پمپ ثابت بوده و کماکان در هر دقیقه حدود ۲۷ بار تزریق انجام می‌دهد. بدین خاطر میزان بودارکننده مصرفی بیش از حد نیاز است و غلظت آن افزایش می‌یابد و بوی تند آن سبب مشکلاتی در منطقه می‌گردد. برای بررسی این موضوع مدل‌سازی تحت شرایطی انجام گرفت که فرض شده ظرفیت ایستگاه به حدود $3000 \text{ m}^3/\text{h}$ رسیده باشد. ضمناً فرض شد که مطابق شرایط عملیاتی حاکم بر ایستگاه، پمپ در هر دقیقه ۲۷ تزریق با حجم 3200 mm انجام دهد. نتایج مربوط به این حالت نشان داد غلظت نهایی بودارکننده به حدود 85 mg/m^3 می‌رسد که تقریباً ۴ برابر میزان استاندارد است و همین امر سبب ایجاد بوی زیاد بودارکننده در منطقه می‌گردد. برای تعیین شرایط بهینه در ساعت‌های پایین مصرف مدل‌سازی دیگری انجام گرفت و مشخص شد که بهتر است در ساعت‌های کاهش مصرف، میزان تزریق بودارکننده توسط پمپ به ۱۶ تزریق در دقیقه کاهش یابد. در این شرایط علاوه بر رفع بوی زیاد بودارکننده در منطقه، میزان بودارکننده مصرفی کاهش چشم‌گیری می‌یابد که از نظر اقتصادی مورد توجه است. اثر پارامترهای فرآیندی از جمله دما و فشار خط لوله نیز بر توزیع بودارکننده مورد بررسی قرار گرفت و مشخص شد که اثر فشار بر توزیع بودارکننده در محدوده فشار مورد بررسی قابل توجه نیست. همچنین بر طبق نتایج مشخص شد که تغییر دما از 20°C تا 27°C تأثیر ناچیزی بر توزیع بودارکننده و غلظت نهایی بودارکننده دارد. با افزایش دما به 40°C تغییرات کمی محسوس‌تر است و مشخص است که غلظت خروجی بودارکننده به میزان کمی کاهش یافته و غلظت بودارکننده پس از طی مسافت کمتری ثابت می‌گردد. علت این امر تغییر در سرعت گاز

و افزایش ضریب نفوذ و میزان جذب است. ذکر این نکته مهم است که در این تحقیق منظور از بهینه‌سازی فقط ارائه شرایط حاکم بر فرآیند جهت کم شدن مصرف بودارکننده و یکنواخت شدن توزیع بودارکننده بوده است. با توجه به اینکه از مدل‌های ریاضی و الگوریتم‌های طراحی آزمایشات استفاده نشده است لذا نمیتوان برهم‌کنش بین پارامترها را در این روش در نظر گرفت. با توجه به پیشنهادات ارائه شده جهت بهبود عملکرد سیستم، تنظیم تعداد تزریق پمپ در هر دقیقه یا تعداد نوسان ورودی بر طبق شرایط حاکم بر ایستگاه کاملاً عملی به نظر می‌رسد و قابلیت اجرا دارد.

تشکر و قدردانی

از شرکت گاز استان هرمزگان به واسطه حمایت‌های مالی و معنوی از این تحقیق تشکر و قدردانی می‌گردد.

علائم و نشانه‌ها

- C : غلظت بودارکننده (mol/L)
 C_{s1} : ثابت روابط ۳ و ۴ (بدون بعد)
 C_{s2} : ثابت روابط ۳ و ۴ (بدون بعد)
 $C\mu$: ثابت معادله ۵ (بدون واحد)
 D : ضریب نفوذ بودارکننده در گاز طبیعی (m^2/s)
 F : نیرو (N)
 P : فشار (Pa)
 T : دما (K)
 t : زمان (s)
 U : سرعت (m/s)
 K : انرژی جنبشی (J/kg)
 $\dot{K}$: اتلاف انرژی جنبشی (m^2/s^3)
 ρ : دانسیته (kg/m^3)
 μ : ویسکوزیته (N.s/m^2)
 σ : ثابت روابط ۳ و ۴ (بدون بعد)

مراجع

- [1]. Anderson, R. N. (2012). Forensic engineering investigation of an LP-gas installation and an analysis of odor fade, *Journal of the National Academy of Forensic Engineers*, 29(2): doi.org/10.51501/jotnafe.v29i2.773.
- [2]. Gross, R., Fontana, E., Silva, A., Quadri, M. B., & Souza, S. M. A. G. U. (2018). Dispersion of odorants in natural gas distribution networks. *Heat and Mass Transfer*, 54, 2827-2834.
- [3]. Graf, F., Kröger, K., & Reimert, R. (2007). Sulfur-free odorization with gasodor S-free—a review of the accompanying research and development activities. *Energy & Fuels*, 21(6), 3322-3333, doi.org/10.1021/ef700406x.
- [4]. Heidaryan, E., Moghadasi, J., & Rahimi, M. (2010). New correlations to predict natural gas viscosity and compressibility factor. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 73(1-2): 67-72, doi.org/10.1016/j.petrol.2010.05.008.
- [5]. Ivanov, I., Strmen, J., & Jones, L. (2009). Pre-odorization or “Pickling” of new natural gas pipe. *Pipeline & Gas Journal*, 236(11): 48-54.
- [6]. Saadatmand, M., Foroughi, H., Dai, T., Misra, T., Bensabath, T., & Farnood, R. (2015). Odor fading in natural gas distribution systems. *Process Safety and Environmental Protection*, 94, 131-139, doi.org/10.1016/j.psep.2015.01.005.
- [7]. Gross, R., Fontana, E., Silva, A., Quadri, M. B., & Souza, S. M. A. G. U. (2018). Dispersion of odorants in natural gas distribution networks. *Heat and Mass Transfer*, 54, 2827-2834.
- [8]. Deymi-Dashtebayaz, M., Abadi, R. N. B., Dehkordi, M. M., & Amini, Z. (2019). Experimental and numerical investigation of odorant dispersion in natural-gas pipelines. *The European Physical Journal Plus*, 134(6): 294, doi.org/10.1140/epjp/i2019-12666-2.
- [9]. Negaresh, M., Farrokhnia, M., & Mehranbod, N. (2018). Modeling and control of natural gas bypass odorizer. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 50, 339-350, doi.org/10.1016/j.jngse.2017.12.010.
- [10]. Esfandiari, K., Banihashemi, M., Mokhtari, A., & Soleimani, P. (2021). Experimental investigation of influencing parameters on natural gas odor fading in gas distribution networks. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 95, 104191, doi.org/10.1016/j.jngse.2021.104191.
- [11]. Ossai, C. I. (2012). Advances in asset management techniques: An overview of corrosion mechanisms and mitigation strategies for oil and gas pipelines. *International Scholarly Research Notices*, 2012(1): 570143, doi.org/10.5402/2012/570143.
- [12]. Jacobus, J., & Yaeger, A. G. (2008). Odorant loss in new gas distribution steel pipelines. *Pipeline & Gas Journal*, 4(235): 48-49.
- [13]. Wang, W., Sun, Y., Wang, B., Dong, M., & Chen, Y. (2022). CFD-based erosion and corrosion modeling of a pipeline with CO₂-containing gas–water two-phase flow. *Energies*, 15(5): 1694, doi.org/10.3390/en15051694.
- [14]. Patankar, S. (2018). Numerical heat transfer and fluid flow. CRC Press.
- [15]. Bu, F., Chen, S., Liu, Y., Guan, B., Wang, X., Shi, Z., & Hao, G. (2022). CFD analysis and calculation models establishment of leakage of natural gas pipeline considering real buried environment. *Energy Reports*, 8, 3789-3808, doi.org/10.1016/j.egy.2022.03.007.