

Research Paper

A Novel Method for Natural Gas Odorization at Pressure Stations Based on the Bypass Technique

Ali Zomorodnia¹, Shahnaz Davoudi^{2*}, Mostafa Narimani³, Afsaneh Maleki⁴

¹ Department of Engineering, Petroleum and Energy Research Center, Om. C., Islamic Azad University, Omidiyeh, Iran

² Department of Chemistry, Om. C., Islamic Azad University, Omidiyeh, Iran

³ Department of Chemical Engineering, Om. C., Islamic Azad University, Omidiyeh, Iran

⁴ Department of Chemistry, Om. C., Islamic Azad University, Omidiyeh, Iran

Use your device to scan and read the article online



Abstract

In this study, a novel method for the optimized odorization of natural gas using a bypass system with a cylindrical bubble column was employed. The natural odorant used in this research was ethyl mercaptan. The performance characteristics of a butterfly valve, which could be applicable for use in the gas-phase bypass odorization control system, were investigated. Additionally, a mathematical model was developed to predict the process. The results indicate that the high mass transfer rate in this method leads to a high operational capacity of the system. At valve opening angles below 50 degrees, the butterfly control valve allows only a negligible amount of gas to pass under specified pressure differentials.

DOI:

10.82281/jnec.2024.1208593

Keywords:

Bypass, Ethyl mercaptan, Mass transfer, Odorant, Natural gas

Corresponding author: Shahnaz Davoudi

Email: shahnazdavoudi@iau.ac.ir

مقاله پژوهشی

روش جدید بودار کردن گاز طبیعی در ایستگاه‌های فشار بر پایه روش کنار گذر

علی زمر دنیا^۱، شهناز داودی^{۲*}، مصطفی نریمانی، افسانه مالکی^۲

۱ گروه فنی و مهندسی، مرکز تحقیقات نفت و انرژی، واحد امیدیه، دانشگاه آزاد اسلامی، امیدیه، ایران

۲ گروه شیمی، واحد امیدیه، دانشگاه آزاد اسلامی، امیدیه، ایران

۳ گروه مهندسی شیمی، واحد امیدیه، دانشگاه آزاد اسلامی، امیدیه، ایران

۴ گروه شیمی، واحد امیدیه، دانشگاه آزاد اسلامی، امیدیه، ایران

شماره صفحات:

چکیده

در این پژوهش از یک روش جدید برای بودار کردن بهینه گاز طبیعی به صورت کنار گذر با به کارگیری ستون حبایی استوانه‌ای استفاده شده است. ماده بودار کننده طبیعی مورد استفاده در این تحقیق، اتیل مرکاپتان می‌باشد. پارامترهای مربوط به ویژگی‌های عملکرد شیر پروانه‌ای که می‌تواند برای استفاده در سیستم کنترل بودار کننده کنار گذر حالت گاز کاربردی باشد، مورد بررسی قرار گرفت. همچنین یک مدل ریاضی برای پیش‌بینی فرایند ارائه شد. نتایج نشان می‌دهد که میزان بالای انتقال جرم در این فرایند منجر به ظرفیت عملیاتی بالای این سیستم می‌شود. در زاویه باز شدگی کمتر از ۵۰ درجه، شیر کنترل پروانه‌ای مقدار ناچیزی از گاز را تحت اختلاف فشارهای مشخص عبور می‌دهد.

از دستگاه خود برای اسکن و خواندن مقاله به صورت آنلاین استفاده کنید



DOI:

10.82281/jnec.2024.1208593

واژه‌های کلیدی:

کنار گذر، اتیل مرکاپتان، انتقال جرم، بودار کننده، گاز طبیعی

* نویسنده مسوول: شهناز داودی

پست الکترونیکی: shahnazdavoudi@iaue.ac.ir

۱. مقدمه

با گسترش چشمگیر استفاده از گاز طبیعی در صنایع و مصارف خانگی، مسئله بودار کردن گاز به یکی از چالش‌های مهم تبدیل شده است. گاز طبیعی به طور ذاتی ماده‌ای بی‌رنگ و بی‌بو است که در صورت نشت و ایجاد مخلوطی قابل انفجار با هوا، خطرات جدی به دنبال دارد. به همین دلیل، با افزودن ترکیبات شیمیایی خاص موسوم به بودارکننده‌ها، این گاز را بودار می‌کنند تا تشخیص نشت آن به سهولت امکان پذیر شود. ادورانت، ماده‌ای بودارکننده است که برای بودار کردن گاز طبیعی یا گاز مایع استفاده می‌شود. به همین دلیل، تزریق این ماده بودارکننده به جریان گاز، نقش هشداردهنده‌ای ایفا می‌کند. با توجه به وارداتی بودن این ماده و احتمال تشدید تحریم‌ها، نیاز به تأمین داخلی ادورانت در صنعت گاز، به ویژه برای شرکت ملی گاز ایران، بیش از پیش احساس می‌شود. بررسی منابع و پایگاه‌های اطلاعاتی نشان می‌دهد که هیچ طرح تحقیقاتی یا مقاله‌ای در خصوص فرآیند سیستم بودارکننده کنار گذر و مدل سازی رفتار آن یا کنترل این سیستم‌ها یافت نشده است. علت این امر ممکن است به دقت بالای پمپ‌های تزریق با سیستم‌های کنترل تناسبی، ارزان بودن و دسترسی آسان به خدمات تعمیر در کشورهای صاحب فناوری نسبت داده شود، که باعث عدم تمایل به انجام تحقیقات در زمینه سیستم‌های تزریق کنار گذر شده است. یکی دیگر از معایب این سیستم‌ها، نبود سیستم کنترل است [۱-۲].

با این حال، با توجه به عدم نیاز به تجهیزات پیچیده و هزینه‌بر مکانیکی مانند پمپ‌های تزریق و هزینه‌های پایین تعمیر و نگهداری، سیستم‌های کنار گذر پتانسیل این را دارند که با اعمال یک سیستم کنترل نسبی و کم هزینه، در شرایط عملیاتی و دی‌های مختلف برای بودار کردن گاز طبیعی به کار گرفته شوند. از نظر عملیاتی و نحوه تزریق ماده بودارکننده، سیستم‌های بودارکننده می‌توانند در دو دسته بندی اصلی قرار گیرند: تبخیر شیمیایی و تزریق شیمیایی. در سیستم‌هایی که بر اساس تبخیر طراحی شده‌اند، ماده بودارکننده در جریان گاز طبیعی نفوذ می‌کند. از جمله این سیستم‌ها می‌توان به بودارکننده‌های فتیله‌ای و کنار گذر اشاره کرد. این سیستم‌ها مزایای ساده بودن عملکرد را دارند، اما در آن‌ها کنترل وجود ندارد و عمدتاً برای دی‌های کم و پایدار گاز استفاده می‌شوند. در سیستم‌های تزریقی، ماده بودارکننده به طور مستقیم از طریق پمپ به خط لوله گاز طبیعی تزریق می‌شود [۳-۴].

عمده تحقیقات انجام شده در زمینه بودار کردن گاز طبیعی تاکنون حول انتخاب مواد بودارکننده مناسب با توجه به شرایط عملیاتی مختلف و مقایسه عملکرد آن‌ها، بهینه سازی سیستم‌های تزریق مستقیم، و اعمال کنترل اتوماتیک بر روی این سیستم‌ها بوده است. سیستم بودارکننده کنار گذر به دلیل عدم نیاز به تجهیزات پیچیده و پرهزینه مکانیکی مانند پمپ‌های تزریق و هزینه‌های پایین تعمیرات و نگهداری، پتانسیل این را دارد که با اعمال یک سیستم کنترل نسبتاً دقیق و کم هزینه، در دی‌ها و شرایط عملیاتی مختلف برای بودار کردن گاز طبیعی استفاده شود [۵].

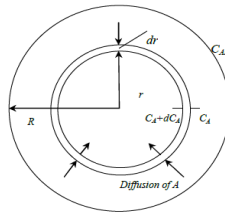
در این تحقیق بودارکننده بر اساس فرآیند جذب عمل کرده و به صورت جانبی در مسیر خروجی گاز از ایستگاه نصب می‌شود. بدون نیاز به پمپ، زیرا از فشار خط گاز برای تزریق بهره می‌گیرد. در این روش، بخشی از گاز با عبور از مخزن حاوی مرکپتان بودار می‌شود و سپس با ورود مجدد به خط اصلی، کل جریان گاز را بودار می‌کند. اختلاف فشار موجود در خط گاز، گاز را از طریق یک لوله ورودی به مخزن دستگاه هدایت می‌کند، جایی که با ماده بودارکننده تماس پیدا می‌کند. سپس، این گاز از طریق لوله خروجی دستگاه ادورایزر به خط اصلی بازمی‌گردد و به این ترتیب، فرآیند بودار کردن گاز تکمیل می‌شود. در واقع، عملکرد این سیستم بر پایه اختلاف فشار است که باعث می‌شود بخشی از گاز وارد مخزن ادورایزر شده و پس از ترکیب با بخارات مرکپتان به خط گاز تزریق گردد. به منظور بررسی این فرآیند، تغییرات فشار تفاضلی، وضعیت بازشدگی شیر کنترل پروانه‌ای تحلیل شد. پارامترهای مربوط به ویژگی‌های عملکرد شیر پروانه‌ای محاسبه شد و یک مدل ریاضی برای پیش بینی رفتار گاز تدوین شد.

۲. روش پژوهش

۱-۲ تشریح فرایند

هدف اصلی این تحقیق، بهینه سازی فرآیند بودار کردن گاز طبیعی در یک ستون حبایی استوانه‌ای (شکل ۱) به روش کنار گذر است. سیستم پیشنهادی برای بهینه سازی فرآیند بودار کردن، یک ستون حبایی استوانه‌ای به قطر ۷۰ سانتی متر و ارتفاع ۱٫۵ متر است. دما در طول ستون ثابت در نظر گرفته شده و ستون به صورت همدم عمل می‌کند. در کف ستون از ده اسپارجر (توزیع کننده گاز) با قطر سه میلی متر و فاصله ۵ سانتی متر از یکدیگر استفاده شده است. برای ارزیابی عملکرد این روش، از دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) بهره گرفته شده است. به

منظور بهبود نتایج شبیه‌سازی، معادلات موازنه جمعیت به کار گرفته شده‌اند. جریان درون ستون از دو فاز گاز و مایع تشکیل شده است. گاز طبیعی از پایین ستون وارد می‌شود و مایع بودارکننده به صورت ساکن در داخل ستون قرار دارد.



شکل ۱- المان حباب گاز به صورت پوسته کروی

۲-۲ تعیین میزان تزریق ماده بودارکننده

برای محاسبه میزان تزریق ماده بودارکننده، چه به صورت مایع و چه به صورت گاز، در روش کنار گذر و در شرایط بهینه، نیاز به دانستن خواص گاز طبیعی و ماده بودارکننده برای تأمین غلظت مناسب ماده بودارکننده در تزریق است. با داشتن دما و فشار در محل مصرف، دانسیته ماده بودارکننده در حالت گاز، وزن مولکولی ماده بودارکننده و گاز، می‌توان شدت جریان جرمی یا حجمی مورد نیاز برای تزریق را به راحتی با استفاده از روابط (۱) تا (۳) محاسبه کرد.

$$\dot{V}_h = \frac{\dot{m}RT_h}{MWP_h} \quad (1)$$

$$\rho_0 = \frac{MW_0 P_h}{RT_h} \quad (2)$$

$$\dot{m}_0 = \dot{V}_h \times C_{std} \times \rho_0 \quad (3)$$

برای انجام این محاسبات، می‌توان فرض کرد که دما و فشار در محل مصرف به ترتیب برابر با ۲۵ درجه سلسیوس و ۲۵۰ (psig) است و مقدار عددی (C_std) برابر با 4ppmv می‌باشد. این فرض به منظور هم‌راستا کردن نتایج با دستورالعمل‌های مورد استفاده در شرکت گاز برای تزریق ماده بودارکننده، که ۱۰ گرم به ازای هر ۱۰۰۰ مترمکعب گاز است، در نظر گرفته شده است. به همین ترتیب می‌توان نتیجه محاسبات را برای یک دوره ۲۴ ساعته انجام داد.

۳-۲ معادلات حاکم

سیستم ستون حبابی گاز شهری و مایع بودارکننده به صورت دوفازی و دو بعدی در حالت ناپایدار شبیه‌سازی می‌شود. این مدل‌سازی بر اساس روش اولر-اولر انجام می‌گیرد.

۱-۳-۲ قانون بقای جرم

رابطه ۴ معادلات بقای جرم برای دو فاز مایع و گاز را بیان می‌کند. در معادله بقای جرم، C_A ، D_{AB} ، t و A به ترتیب سطح تماس حباب با مایع اطراف آن، شعاع پوسته کروی المان حجمی، ضریب نفوذ غلظت جزء نفوذکننده و زمان تماس حباب با مایع اطراف آن هستند.

$$(4\pi r^2)D_{AB} \frac{\partial C_A}{\partial r} \Big|_{r+\Delta r} - (4\pi r^2)D_{AB} \frac{\partial C_A}{\partial r} \Big|_r = (4\pi r^2)\Delta r \frac{\partial C_A}{\partial t} \quad (4)$$

با میل دادن حجم المان به سمت صفر ($\Delta r \rightarrow 0$)، معادله دیفرانسیل درمی‌آید، که برای حل آن به دو شرط مرزی در جهت شعاع و یک شرط اولیه برای زمان نیاز است. شرایط مرزی به صورت روابط (۵)، (۶) و شرط اولیه رابطه (۷) در نظر گرفته شده‌اند که در آن $C_{(A_s)}$ غلظت جزء نفوذکننده روی سطح حباب است.

$$C_A = C_{A_s} \quad @ \quad t \geq 0, r = R \quad (5)$$

$$C_A = \text{finite} \quad @ \quad t \geq 0, r = 0 \quad (6)$$

$$C_A = 0 \quad @ \quad t = 0, 0 < r < R \quad (7)$$

۲-۳-۲ معادلات انتقال حرکت

در ستون‌های حبابی، نیروهای حجمی شامل نیروهای شناوری، جرم مجازی، درگ و پراکندگی توربولانسی می‌باشند که در معادله بقای ممنتوم به عنوان جمله چشمه محسوب می‌شوند. همچنین، انتقال جرم ماده بودارکننده از فاز مایع به گاز از طریق $\dot{m}_{pq}$ در معادله (۹) در نظر گرفته شده است.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_q \alpha_q \vec{u}_q) + \nabla \cdot (\rho_q \alpha_q \vec{u}_q \vec{u}_q) = -\alpha_q \nabla p - \nabla \bar{\tau}_q + \rho_q \alpha_q \vec{g} + \vec{F}_r + \sum_{p=1}^n (k_{pq}(\vec{V}_p - \vec{V}_q) + \dot{m}_{pq} \vec{V}_{pq} - \dot{m}_{qp} \vec{V}_{qp}) \quad (9)$$

$$\vec{F}_T = \vec{F}_{drag,q} + \vec{F}_{buo,q} + \vec{F}_{vm,q} + \vec{F}_{td,q}$$

۳-۳-۲ محاسبه میزان نفوذ ماده به داخل حباب گازی

در فرآیند تزریق ماده بودارکننده در حالت گاز، مهم‌ترین جنبه، محاسبه میزان کل نفوذ ماده به داخل حباب گاز در طول زمان تماس حباب با ماده بودارکننده است. برای انجام این محاسبات از رابطه (۱۰) استفاده می‌شود. شار نفوذی و سطح مقطع حباب که به طور عمود بر جهت شار است، به ترتیب از روابط (۱۱) و (۱۲) محاسبه می‌گردند. پس از جایگذاری مقادیر مورد نیاز و انجام محاسبات ریاضی، می‌توان میزان کل نفوذ به داخل حباب گاز در بازه زمانی $[0, t_c]$ را از رابطه (۱۳) به دست آورد.

$$\bar{N}_A = A_s \int_0^{t_c} N_{AR}(t) dt \quad (10)$$

$$N_{AR}(t) = -D_{AB} \left(\frac{dC_A(Z,t)}{dz} \right)_{z=0} \quad (11)$$

$$A_s = 4\pi R^2 \quad (12)$$

$$\bar{N}_A = (4\pi R^2) \left(\frac{2C_{As}}{R} \right) D_{AB} \int_0^{t_c} \sum_{n=1}^{\infty} e^{-D_{AB} \left(\frac{n\pi}{R} \right)^2 t} dt \quad (13)$$

$$= \frac{8R^3}{\pi} C_{As} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} (1 - e^{-D_{AB} \left(\frac{n\pi}{R} \right)^2 t_c})$$

غلظت ماده بودارکننده در سطح حباب گاز معادل با غلظت تعادلی است که به فشار بخار اشباع مایع در دمای مشخص مربوط می‌شود. در این شبیه‌سازی برای محاسبه فشار بخار از رابطه (۱۴) استفاده شده است. در نهایت، با اعمال قانون گاز ایده‌آل، غلظت مورد نظر از طریق رابطه (۱۵) قابل محاسبه است.

$$P^* = \exp(C_1 + \frac{C_2}{T} + C_3 \log(T) + C_4 T^{C_5}) \quad (14)$$

$$C_{As} = \frac{P^*}{RT} \quad (15)$$

۴-۳-۲ محاسبه نقطه تنظیم و تعداد نازل‌ها در بودارکننده کنارگذر حالت گاز

نقطه تنظیم در سیستم کنترل بودارکننده کنارگذر حالت گاز به میزان دبی گاز طبیعی مورد نیاز برای تزریق به مخزن ماده بودارکننده مربوط می‌شود. برای محاسبه این نقطه تنظیم، ابتدا باید مقدار ماده بودارکننده لازم که غلظت مطلوب را در محل مصرف ایجاد می‌کند، محاسبه شود. سپس باید با استفاده از مدل حباب گاز، شدت جریان حجمی مورد نیاز از گاز طبیعی خط کنارگذر که انتقال جرم متناظر با غلظت مناسب را فراهم می‌کند، محاسبه کرد و این مقدار به عنوان ورودی به کنترل‌کننده اعمال می‌شود. برای مدل‌سازی خواص مورد نیاز، ابتدا دما و فشار گاز طبیعی و ماده بودارکننده به دست می‌آید. مدل می‌تواند میزان کل انتقال جرم را در طول زمان تماس فازها و در دبی معینی از گاز طبیعی کنارگذر محاسبه کند. با استفاده از روش حدس و خطا و امتحان دبی‌های مختلف، می‌توان دبی مورد نیاز از گاز طبیعی (نقطه تنظیم) را که منجر به دستیابی به انتقال جرم متناظر با غلظت مطلوب می‌شود، تعیین کرد.

۵-۳-۲ مدل ریاضی حباب گاز

در این قسمت، مدل محاسبه قطر حباب گاز و میزان انتقال جرم بین فاز گاز و مایع بررسی شده است. تزریق ماده بودارکننده در دستگاه کنارگذر حالت گاز نیازمند وارد کردن گاز طبیعی به صورت حباب در ماده بودارکننده است. در این فرآیند، عملیات انتقال جرم بین فازهای گاز و مایع صورت می‌گیرد و ماده بودارکننده از فاز مایع به حباب گاز طبیعی نفوذ می‌کند. با حرکت تدریجی حباب از پایین مخزن به سطح، غلظت ماده بودارکننده در حباب افزایش می‌یابد. با تغییر شدت جریان گاز طبیعی ورودی به مخزن از طریق نازل با قطر معین، می‌توان قطر حباب‌ها، تعداد حباب‌ها و در نهایت میزان تزریق ماده بودارکننده به جریان گاز طبیعی را کنترل کرد. بنابراین، میزان تزریق ماده بودارکننده به متغیرهای فرآیندی زیر بستگی دارد:

۱. دما، فشار، خواص گاز و شدت جریان حجمی گاز طبیعی ورودی به مخزن ماده بودارکننده.

۲. قطر و تعداد نازل‌هایی که در پایین مخزن ماده بودارکننده قرار دارند.

۳. دما و خواص ماده بودارکننده و عمق سیالی که بالای نوک نازل در مخزن وجود دارد. موارد اول و دوم سطح تماس بین فاز مایع (ماده بودارکننده) و فاز گاز (حباب گاز طبیعی) را تعیین می‌کنند، در حالی که موارد اول و سوم زمان تماس بین دو فاز را مشخص می‌کنند. سطح تماس بین دو فاز از حاصل ضرب سطح جانبی یک حباب در تعداد حباب‌ها به دست می‌آید. برای محاسبه سطح جانبی یک حباب، می‌توان فرض کرد که حباب به شکل کروی است و قطر معادل حباب را به عنوان قطر کره در نظر گرفت. این فرض زمانی معتبر است که تنها عامل

ایجاد تلاطم در فاز مایع، حرکت حباب‌های گاز به سمت بالا باشد. با فرض چنین شرایطی در طراحی نهایی، شدت جریان عبوری از هر نازل می‌تواند در سه دسته طبقه‌بندی شود.

در حالتی که شدت جریان حجمی گاز بسیار کم باشد (که رابطه (۱۶) آن را نشان می‌دهد) قطر حباب از رابطه (۱۷) به دست می‌آید.

$$Q_{G0} < \left[\frac{20(\sigma d_0 g_c)^5}{(g(\rho_w - \rho_b))^2 \rho_w^3} \right]^{1/6} \quad (16)$$

$$d_b = \left(\frac{6 d_0 \sigma g_c}{g(\rho_w - \rho_b)} \right)^{1/3} \quad (17)$$

در حالتی که شدت جریان‌های حجمی گاز متوسط باشد و رابطه (۱۸) معتبر باشد، و رژیم جریان آرام ($Re < 2100$) باشد، قطر حباب‌ها بزرگتر از حالت قبلی خواهد بود. در این صورت، قطر حباب‌های تولیدی را می‌توان از رابطه (۲۱) محاسبه کرد.

$$Q_{G0} > \left[\frac{20(\sigma d_0 g_c)^5}{(g(\rho_w - \rho_b))^2 \rho_w^3} \right]^{1/6} \quad (18)$$

$$N_{Re0} = \frac{d_0 v_0 \rho_b}{\mu_b} \quad (19)$$

$$v_0 = \frac{4 Q_{G0}}{\pi d_0^2} \quad (20)$$

$$d_b = \left(\frac{72 \rho_w}{\pi^2 g(\rho_w - \rho_b)} \right)^{1/5} Q_{G0}^{0.4} \quad (21)$$

در شدت جریان‌های حجمی بسیار زیاد گاز، زمانی که عدد رینولدز (N_{Re0}) در محدوده ۱۰۰۰۰ تا ۵۰۰۰۰ قرار دارد. برای محاسبه قطر حباب‌ها در این شرایط، می‌توان از رابطه (۲۲) استفاده نمود.

$$d_b = 0.0071 N_{Re0}^{-0.05} \quad (22)$$

برای تعیین زمان تماس حباب گاز با ماده بودارکننده، که نشان‌دهنده زمان لازم برای حرکت یک حباب از عمق ستون مایع درون مخزن ماده بودارکننده به سطح است، می‌توان از سرعت پایدار حباب در حرکت به سمت بالا و ارتفاع ستون مایع در مخزن استفاده کرد. هنگامی که یک حباب گاز در یک مایع حرکت می‌کند، ابتدا شتاب می‌گیرد تا به سرعتی ثابت برسد که به آن سرعت پایدار یا حدی گفته می‌شود. در این وضعیت، بر اساس قانون دوم نیوتن، نیروی خالصی که به حباب وارد می‌شود برابر با صفر است. نیروهای مؤثر بر حباب در این شرایط عبارتند از:

نیروی گرانش: نیرویی که ناشی از جاذبه زمین بر حباب گاز وارد می‌شود

$$F_g = \frac{m_b g}{g_c} = \frac{\rho_l V g}{g_c} \quad (23)$$

نیروی شناوری: نیرویی که از طرف سیال ساکن بر حباب گاز در سیال وارد می‌شود.

$$F_{b0} = \frac{m_l g}{g_c} = \frac{\rho_l V g}{g_c} \quad (24)$$

نیروی مقاوم در مقابل حرکت: نیرویی که در اثر حرکت حباب گاز و سیال نسبت به هم، بر خلاف جهت حرکت حباب گاز وارد شده

$$F_d = \frac{C_D A_c \rho_l v_s^2}{2} \quad (25)$$

ضریب نیروی مقاوم (C_D) تابعی از عدد بدون بعد رینولدز و شکل هندسی جسم غوطه‌ور می‌باشد. برای حالتی که حباب گاز کروی است روابط تجربی (۲۶) و (۲۷) برای محاسبه ضریب نیروی مقاوم ارائه شده‌اند. عدد رینولدز در این حالت از رابطه (۲۸) بدست می‌آید.

$$N_{Re0} \leq 0.5 \quad C_D = \frac{24}{N_{Re0}} \quad (26)$$

$$0.5 < N_{Re0} \leq 10^4 \quad C_D = \frac{24}{N_{Re0}} + \frac{3}{\sqrt{N_{Re0}}} + 0.34 \quad (27)$$

$$N_{Re0} = \frac{\rho_l v_s d_b}{\mu_l} \quad (28)$$

حال با توجه به اینکه در شرایط سرعت حد، برآیند نیروهای وارد بر حباب صفر است خواهیم داشت:

$$\sum F = 0 \Rightarrow F_g + F_d - F_b = 0 \quad (29)$$

$$\rho_b V_b \frac{g}{g_c} + C_D A_c \rho_l \frac{v_l^2}{2} - \rho_l V_b \frac{g}{g_c} = 0 \quad (30)$$

$$(\rho_l - \rho_b) V_b \frac{g}{g_c} = C_D A_c \rho_l \frac{v_l^2}{2} \quad (31)$$

و در نتیجه رابطه (۳۲) برای سرعت حد بدست می‌آید که در ادامه به ساده سازی آن خواهیم پرداخت:

$$v_l = \sqrt{\frac{2 g V_b (\rho_l - \rho_b)}{g_c C_D A_c \rho_l}} \quad (32)$$

با جایگذاری سطح مقطع در معرض جریان و حجم حباب کروی به ترتیب در رابطه (۳۲)، رابطه (۳۳) برای سرعت حد بدست می‌آید.

$$A_c = \frac{\pi d^2}{4} \quad V_b = \frac{\pi d^3}{6} \quad (33)$$

$$v_t = \sqrt{\frac{4gd_b(\rho_l - \rho_g)}{g_c 3C_D \rho_l}} \quad (34)$$

حال با معلوم بودن ارتفاع مایع درون مخزن، زمان تماس از رابطه (۳۵) قابل محاسبه خواهد بود:

$$t_c = \frac{h}{v_t} \quad (35)$$

۳. تجزیه و تحلیل نتایج

۳-۱ مش‌بندی

برای دستیابی به اهداف پژوهش، از روش عددی با استفاده از نرم‌افزار ANSYS بهره گرفته شده است. پس از اتمام مدل‌سازی هندسی جهت مش‌بندی، مدل به ماژول Mesh منتقل می‌شود. هدف اصلی این مرحله، تعیین مقادیر بهینه برای مش‌بندی است که تعادلی میان دقت و زمان محاسبات برقرار کند و امکان تحلیل مناسب هندسه سیستم را فراهم آورد. جدول ۴-۱ نتایج مربوط به نرخ جریان جرمی را بر اساس تغییر تعداد شبکه‌های به کاررفته در مدل‌سازی نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، از حالت پنجم به بعد، نرخ جریان خروجی به یک روند ثابت نزدیک شده است. این موضوع نشان می‌دهد که مش‌بندی نهایی مدل شامل ۳۴۱۴۸۷۱ سلول، ۷۸۱۵۶۱۲ وجه و ۱۲۰۵۸۳۸ نود است. در مرحله بعد، با تعریف شرایط مرزی و اعمال معادلات حاکم، شبیه‌سازی و تحلیل سیستم انجام خواهد شد.

جدول ۱- استقلال از مش در حالت دبی خروجی گاز در فشار (psi) 247 و زاویه شیر ۱۵ درجه

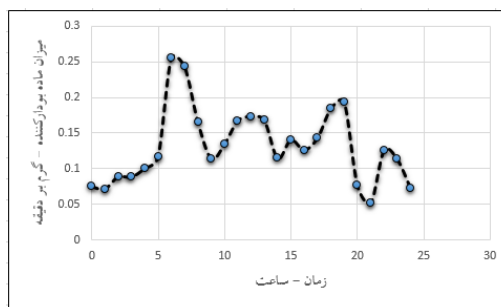
حالات	تعداد سلول	دبی خروجی (میلی لیتر بر دقیقه)
۱	۲۱۱۷۰۵	۸,۱۸۵
۲	۲۹۴۲۱۵	۱۰,۲۲۸
۳	۳۲۷۵۴۹	۱۳,۲۵۲
۴	۷۸۴۵۸۲۴	۱۳,۸۹۶
۵	۳۴۱۴۸۷۱	۱۴,۳۰۰
۶	۳۷۲۱۰۴۲	۱۴,۳۰۰۱
۷	۳۹۴۱۴۵۲	۱۴,۳۰۰۱

۳-۲ میزان ماده بودارکننده و دبی گاز طبیعی

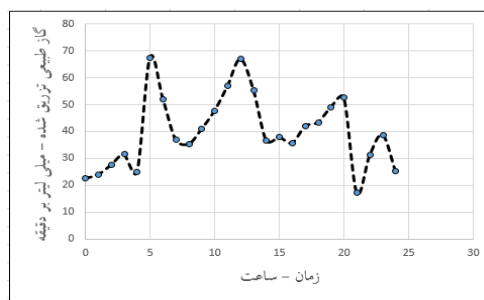
مقدار ماده بودارکننده لازم برای افزودن به گاز طبیعی به منظور دستیابی به غلظت مناسب، همراه با نمودار نشان‌دهنده میزان گاز موردنیاز برای تزریق به صورت حباب به مخزن ماده بودارکننده، در شکل‌های ۲ و ۳ نمایش داده شده است. شایان ذکر است که شرایط عملیاتی بر اساس داده‌های ارائه شده در جدول ۲ تعیین شده‌اند.

جدول ۲- شرایط مربوط به تعیین میزان ماده بودارکننده

پارامتر	مقدار
ماده بودارکننده	اتیل مرکاپتان
فشار در ایستگاه گاز (فشار ورودی)	250 (psi)
دما در ایستگاه گاز	۲۹۸ درجه کلوین (۲۵ درجه سلسیوس)
دما در محل مصرف	۲۹۸ درجه کلوین (۲۵ درجه سلسیوس)
ارتفاع اولیه مخزن ماده بودارکننده	۱ متر
قطر مخزن ماده بودارکننده	۸۰ سانتی متر
قطر داخلی نازل	۱ میلی متر
تعداد نازل	۲ عدد



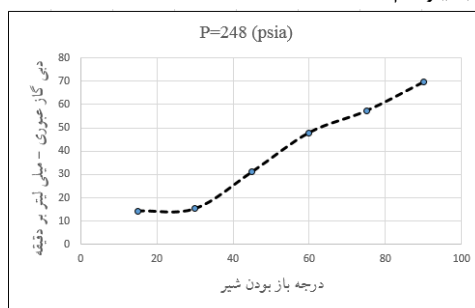
شکل ۲- میزان ماده بودار کننده مورد نیاز ایستگاه نسبت به زمان



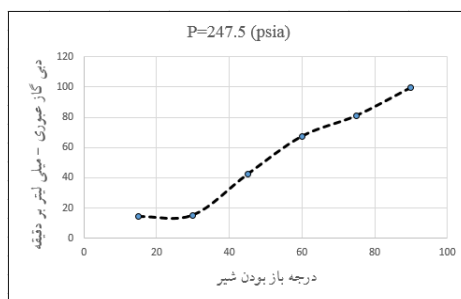
شکل ۳- نمودار میزان دبی گاز مورد نیاز ایستگاه گاز

۳-۳ تعیین میزان نفوذ گاز

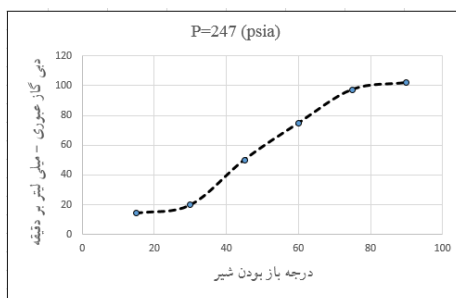
آزمایش‌ها به منظور تحلیل دقیق تر رفتار شیر تحت اختلاف فشارهای مختلف (شامل فشار قبل از شیر و فشار بعد از شیر) در مقادیر ۲، ۳، ۴، ۵ و ۴، ۵ psi انجام شده است. در این آزمایش، فشار ورودی به ایستگاه گاز معادل ۲۵۰ psi و فشار بعد از شیر به ترتیب ۲۴۷، ۲۴۶، ۲۴۵ و ۲۴۴ psi تنظیم شده است. نتایج شکل‌های ۳ تا ۱۰ نشان می‌دهند که در درجات باز شدن شیر کمتر از ۵۰ درجه، مقدار گاز عبوری از شیر در اختلاف فشارهای مختلف بسیار کم است.



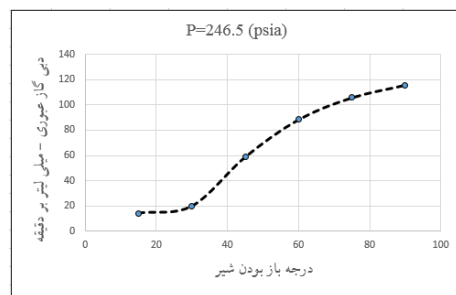
شکل ۴- منحنی مشخصه شیر در فشار پس از شیر برابر با 248 (psia)



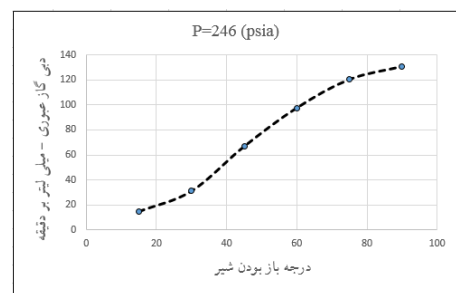
شکل ۵- منحنی مشخصه شیر در فشار پس از شیر برابر با ۲۴۷/۵ (psia)



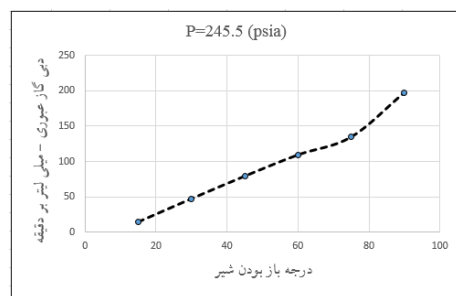
شکل ۶- منحنی مشخصه شیر در فشار پس از شیر برابر با ۲۴۷ (psia)



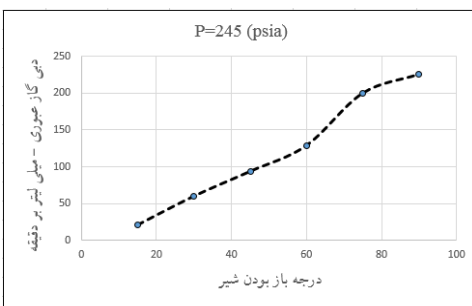
شکل ۷- منحنی مشخصه شیر در فشار پس از شیر برابر با ۲۴۶/۵ (psia)



شکل ۸- منحنی مشخصه شیر در فشار پس از شیر برابر با ۲۴۶ (psia)



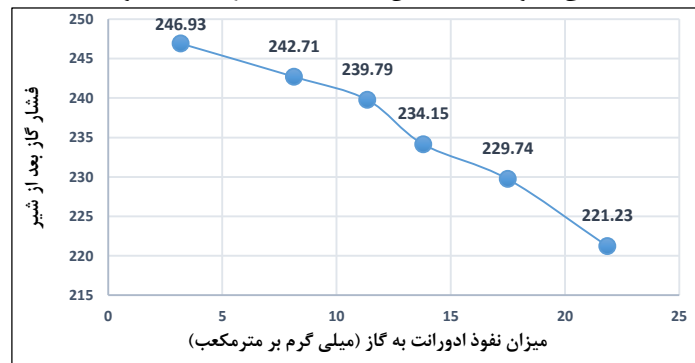
شکل ۹- منحنی مشخصه شیر در فشار پس از شیر برابر با ۲۴۵/۵ (psia)



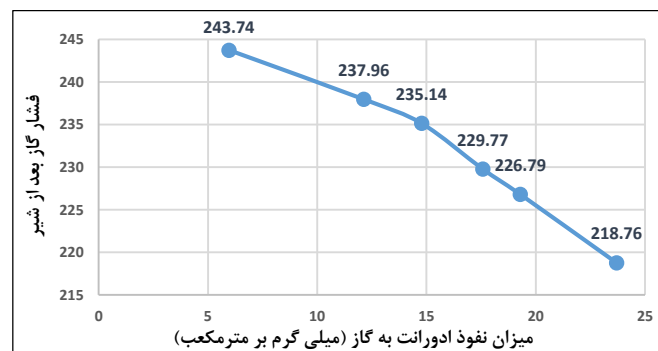
شکل ۱۰- منحنی مشخصه شیر در فشار پس از شیر برابر با ۲۴۵ (psia)

۳-۴ مدل سازی اثر دبی

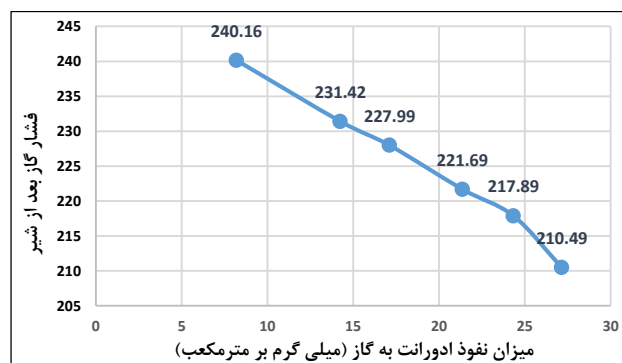
شکل‌های ۱۱ تا ۱۳ به تحلیل میزان نفوذ ادورانت به گاز بر اساس دبی، فشار پیش از شیر و پس از آن، و درجه باز بودن شیر پرداخته‌اند. لازم به ذکر است که شیر در حالت صفر درجه کاملاً بسته و در حالت ۹۰ درجه کاملاً باز است. علاوه بر این، بسته به دبی‌های مختلف، قطر لوله‌ها نیز متغیر است. به طور خاص، در شرایط دبی ۵۰۰۰ مترمکعب در ساعت، قطر لوله‌ها ۸ اینچ است؛ در شرایط دبی ۱۰۰۰۰ مترمکعب در ساعت، قطر لوله‌ها باز هم ۸ اینچ باقی می‌ماند؛ و در شرایط دبی ۱۵۰۰۰ مترمکعب در ساعت، قطر لوله‌ها به ۱۰ اینچ تغییر می‌کند. در شکل ۱۴ می‌توان مقایسه میزان نفوذ ادورانت به گاز در دبی‌ها و درجه باز شدن‌های مختلف شیر مشاهده نمود.



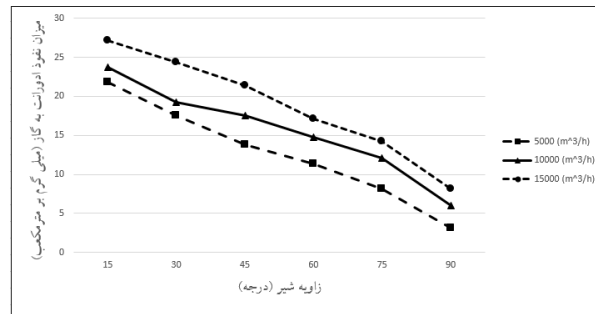
شکل ۱۱- میزان نفوذ ادورانت به گاز (میلی گرم بر مترمکعب) در افت فشار ایجاد شده توسط شیر در دبی ۵۰۰۰ مترمکعب در ساعت همان‌طور که در شکل فوق نشان داده شده است، با کاهش درجه باز و بسته شدن شیر، افت فشار بعد از شیر مشاهده می‌شود که این تغییر فشار بر میزان تزریق ادورانت تأثیر می‌گذارد. به عبارت دیگر، افزایش سرعت گاز ورودی منجر به افزایش دبی گاز ورودی می‌شود که به نوبه خود سطح انتقال جرم موثر را افزایش داده و باعث افزایش غلظت ماده بودار کننده (اتیل مرکاپتان) همراه با گاز در خروجی می‌گردد. در ادامه، نتایج مربوط به دبی‌های ۱۰۰۰۰ و ۱۵۰۰۰ مترمکعب بر ساعت مورد بررسی قرار خواهد گرفت.



شکل ۱۲- میزان نفوذ ادورانت به گاز (میلی گرم بر مترمکعب) در افت فشار ایجاد شده توسط شیر در دبی ۱۰۰۰۰ مترمکعب در ساعت



شکل ۱۳- میزان نفوذ ادورانت به گاز (میلی گرم بر مترمکعب) در افت فشار ایجاد شده توسط شیر در دبی ۱۵۰۰۰ مترمکعب در ساعت



شکل ۱۴- مقایسه میزان نفوذ گاز ادورانت به گاز در دبی ها و درجه باز شدن های مختلف شیر

همان‌طور که در شکل فوق نشان داده شده است، با توجه به رابطه $PV=nRT$ ، افزایش دبی سیال باعث کاهش بیشتر فشار بعد از شیر می‌شود. از سوی دیگر، با افزایش افت فشار، میزان مکش ماده بودار کننده افزایش یافته و تزریق آن به گاز طبیعی نیز بیشتر می‌گردد. همچنین با افزایش درجه باز شدن شیر، اختلاف فشار قبل و بعد از شیر کاهش می‌یابد.

۴. نتیجه‌گیری

این پژوهش به بررسی جامع فرآیند دستگاه بودارکننده گاز طبیعی در دو حالت مایع و گاز پرداخته است. بر اساس نوع فرآیند و هدف آن، یک سیستم کنترلی مناسب پیشنهاد شده و عملکرد و نیازمندی‌های آن در هر دو حالت مایع و گاز مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. به‌منظور امکان‌سنجی عملی سیستم، منحنی‌های مشخصه شیر برای حالات مایع و گاز به‌عنوان نمونه تعیین شدند؛ همچنین مدلی ریاضی برای پیش‌بینی رفتار فرآیند در حالت گاز ارائه گردید. در این مدل‌سازی از مدل حباب گاز استفاده شد. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که به‌کارگیری برج حبابی به‌صورت کنارگذر برای بودار کردن گاز طبیعی، موجب افزایش راندمان انتقال جرم در محدوده مجاز تعیین‌شده و کاهش مصرف ماده بودارکننده می‌شود. در این تحقیق، اتیل مرکاپتان به‌عنوان ماده بودارکننده طبیعی در شرایط فشار گاز ورودی ۲۵۰ psi و دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد به‌کار گرفته شده است. برای ارزیابی عملکرد شیر، اختلاف فشارهای مختلفی بین ۲ (psia) تا ۵ با گام ۰/۵ (psia) در نظر گرفته شد. بررسی‌ها نشان داد که شیر در این شرایط با کمتر از ۵۰ درجه باز شدن، مقدار کمی از گاز را از خود عبور می‌دهد. همچنین با تغییر دبی ورودی از ۵۰۰۰ تا ۱۵۰۰۰ مترمکعب بر ساعت، مشخص شد که افزایش سرعت گاز ورودی منجر به افزایش دبی گاز و در نتیجه افزایش سطح مؤثر انتقال جرم و غلظت ماده بودارکننده در خروجی می‌شود.

References

- [1]. Carneiro, L. E. M., Martins, G. S. O., Rosero, C. M. P., Loureiro, J. B. R., & Silva Freire, A. P. (2024b). Surging parametrization for gas-liquid centrifugal pumps. *Progress in Nuclear Energy*, 170, 105099. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2024.105099>
- [2]. Guerrero, T. N., Le-Minh, N., Fisher, R. M., Prata, A. A., & Stuetz, R. M. (2025). Odour emissions from anaerobically co-digested biosolids: Identification of volatile organic and sulfur compounds. *Science of The Total Environment*, 959, 178192. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.178192>
- [3]. Boldyryev, S., Kuznetsov, M., Ryabova, I., Krajačić, G., & Kaldybaeva, B. (2023). Assessment of renewable energy use in natural gas liquid processing by improved process integration with heat pumps. *E-Prime - Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy*, 5, 100246. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.prime.2023.100246>
- [4]. Zhang, Q., Liu, T., Cheng, X., Guo, S., Zhang, L., & Lü, X. (2024). Experimental investigation on flue gas condensation heat recovery system integrated with heat pump and spray heat exchanger. *Thermal Science and Engineering Progress*, 49, 102454. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.tsep.2024.102454>
- [5]. Alves Soares, T., Caspers, B. A., & Loos, H. M. (2024). The smell of zebra finches: Elucidation of zebra finch odour applying gas chromatography-mass spectrometry and olfaction-guided approaches. *Talanta Open*, 9, 100277. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.talo.2023.100277>