

مقاله پژوهشی

مدل سازی فرآیند بودار کردن گاز طبیعی در ایستگاه های فشار به منظور استفاده گاز شهری در خطوط لوله

علی زمردنیا^۱، شهناز داودی^{۲*}، مصطفی نریمانی^۱، 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

چکیده

در این پژوهش، فرآیند شبیه سازی سیستم بودارکننده در خط فرعی انتقال گاز طبیعی مورد ارزیابی قرار گرفته است. به منظور بررسی این فرآیند، میزان جریان گاز ورودی تحلیل شد. یک مدل ریاضی برای پیش بینی رفتار گاز در شرایط حباب زایی تدوین شد. نتایج نشان داد با افزایش نرخ جریان ورودی از ۵۰۰۰ به ۱۵۰۰۰ مترمکعب در ساعت، در گام های ۵۰۰۰ مترمکعب در ساعت به افزایش نرخ جریان عبوری گاز منجر می شود. این امر سبب افزایش سطح انتقال جرم مؤثر شده و غلظت ماده بودارکننده (اتیل مرکاپتان) همراه گاز در خروجی افزایش می یابد. همچنین نتایج حاصل از این مدل، اندازه بهینه حباب های گازی را تعیین کرد.

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



واژه های کلیدی:

گاز طبیعی، اتیل مرکاپتان، شبیه سازی، بودارکننده

* نویسنده مسوول: شهناز داودی

پست الکترونیکی: shahnazdavoudi@iau.ac.ir

DOI: <https://sanad.iau.ir/Journal/jnec/Article/1209561>

مقدمه

در نتیجه پیشرفت های چشمگیر صنایع، به ویژه در حوزه نفت و گاز، خطرات مرتبط با استخراج، انتقال و ذخیره این مواد به طور مداوم در حال افزایش است. شناسایی دقیق مخاطرات بالقوه و عوامل آسیب رسان در این صنایع، همراه با مدیریت کارآمد ریسک، اهمیت بسیاری در بهبود ایمنی و کاهش خطرات جانی و مالی دارد. نشت مواد خطرناک مانند گازهای قابل اشتعال، مواد انفجاری یا ترکیبات سمی، همواره به عنوان تهدیدی جدی برای کارکنان، ساکنان مناطق مجاور و همچنین محیط زیست مطرح بوده است. حوادث مرتبط با صنایع نفت و گاز اغلب از یک رویداد آغاز می شوند که می تواند شامل انفجار خطوط لوله، ترکیدگی مخازن یا وقوع واکنش های غیرقابل کنترل باشد. این حوادث منجر به انتشار حجم زیادی از مواد در محیط می شود که احتمال بروز پیامدهای ثانویه ای مانند آتش سوزی، انفجار یا مسمومیت را افزایش می دهد. امروزه استفاده گسترده از خطوط لوله برای انتقال حجم عظیمی از گاز در مسافت های طولانی بسیار مورد توجه قرار گرفته است. وجود میلیون ها کیلومتر خط لوله در سراسر جهان نشان دهنده اهمیت این فناوری است که همچنان در حال گسترش می باشد. با این حال، این توسعه گسترده بدون اتخاذ تدابیر مناسب، از جمله تعیین حریم ایمن و ارزیابی خطرات احتمالی در صورت وقوع حادثه، غیرقابل قبول است [۲-۱].

به همین دلیل از تزریق ماده بودارکننده به جریان گاز طبیعی و یا گاز مایع به عنوان یک ماده هشداردهنده استفاده می شود. به طور کلی اساس کار دستگاه ها در روش های بودارکننده به دو روش تزریقی و کنارگذر تقسیم می شوند. سیستم های بودارکننده کنارگذر بر اساس فرآیند انتقال جرم از فاز مایع به فاز گاز عمل می کنند. این انتقال جرم می تواند از طریق تماس مستقیم بین فازهای مایع و گاز و یا از طریق تبخیر مولکول های ماده بودارکننده در فاز گاز انجام شود. در این روش، بخشی از جریان گاز از طریق یک خط لوله کنارگذر وارد مخزن حاوی ماده بودارکننده می شود. پس از تماس با ماده بودارکننده، بخشی از آن تبخیر شده و به جریان گاز اضافه می شود. گاز غنی شده با ماده بودارکننده پس از بازگشت به خط اصلی، با جریان گاز اصلی مخلوط شده و باعث بودار شدن آن می گردد [۳-۴]. این نوع سیستم به نام "بودارکننده کنارگذر حالت گاز" شناخته می شود. نوع دیگری از این سیستم ها که "بودارکننده کنارگذر حالت مایع" نام دارد، عملکرد ساده تری دارد. در این روش، جریان گاز در خط کنارگذر به عنوان عامل ایجاد فشار عمل می کند و ماده بودارکننده را از مخزن خارج کرده و از طریق یک شیر تنظیم دقیق به خط اصلی تزریق می کند. در این تحقیق بودار کردن گاز طبیعی به صورت کنارگذر بر اساس فرایند جذب صورت می گیرد. در نهایت مدل ریاضی به نام مدل حباب گاز جهت بررسی عملکرد دستگاه بودارکننده کنارگذر بر اساس سرعت گاز ورودی و توزیع اندازه بهینه حباب در این فرآیند ارائه شد.

روش پژوهش

تعیین میزان تزریق ماده بودارکننده

برای محاسبه میزان تزریق ماده بودارکننده، چه به صورت مایع و چه به صورت گاز، در روش کنارگذر 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، می توان 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، می توان فرض کرد که دما و فشار در محل مصرف به ترتیب برابر با ۲۵ درجه سلسیوس و ۰٫۲۵ (psig) است و مقدار عددی (C_{std}) برابر با ۴ ppmv می باشد. این فرض به منظور هم راستا کردن نتایج با دستورالعمل های 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 می توان نتیجه محاسبات را برای یک دوره ۲۴ ساعته انجام داد.

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 می گیرد و ماده بودارکننده از فاز مایع به حباب گاز طبیعی نفوذ می کند. با حرکت تدریجی حباب از پایین مخزن به سطح، غلظت

ماده بودارکننده در حباب افزایش می یابد. با تغییر شدت جریان گاز طبیعی ورودی به مخزن از طریق نازل با قطر معین، می توان قطر حباب ها، تعداد حباب ها 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:

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

قطر و تعداد نازل هایی که در پایین مخزن ماده بودارکننده قرار دارند.

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 می کنند، در حالی که موارد اول و سوم زمان تماس بین دو فاز را مشخص می کنند. به طور کلی، تمامی این پارامترها میزان انتقال جرم بین دو فاز و در نتیجه میزان تزریق ماده بودارکننده را تحت تأثیر قرار می دهند. در ادامه، نحوه محاسبه پارامترهای مؤثر در این فرآیند، شامل سطح تماس، زمان تماس و میزان انتقال جرم بین دو فاز، ارائه می شود.

سطح تماس بین دو فاز از حاصل ضرب سطح جانبی یک حباب در تعداد حباب ها به دست می آید. برای محاسبه سطح جانبی یک حباب، می توان فرض کرد که حباب به شکل کره ای 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 حباب های گاز به سمت بالا باشد. به عبارت دیگر، شدت جریان حجمی گاز ورودی به هر نازل باید به اندازه ای باشد که حباب های منفرد تولید کند و فاصله حداقلی بین نازل ها رعایت شود. در این شرایط، حباب های تولید شده در یک نازل با حباب های نازل های مجاور تداخل نخواهند داشت و در طول مسیر حرکت خود به سمت بالا، با یکدیگر ادغام نمی شوند.

در این حالت، قطر حباب هایی که از یک نازل تولید می شوند، به شدت جریان حجمی گاز ورودی، قطر نازل، خواص فیزیکی گاز و تلاطم فاز مایع وابسته است. برای جلوگیری از تداخل حباب ها، نازل ها به صورت افقی نصب می شوند و فاصله حداقلی بین دو نازل مجاور سه برابر قطر حباب در نظر گرفته می شود. با فرض چنین شرایطی در طراحی نهایی، شدت جریان عبوری از هر نازل می تواند در سه دسته طبقه بندی شود. در حالتی که شدت جریان حجمی گاز بسیار کم باشد (که رابطه (۴) آن را نشان می دهد)، نیروی وارد بر حباب صفر است و قطر حباب از تساوی نیروی شناوری (که تمایل دارد حباب را از نازل خارج کند) و نیروی کشش سطحی (که تمایل دارد حباب را روی نازل نگه دارد) محاسبه می شود. به این ترتیب، قطر حباب از رابطه (۵) به دست می آید.

$$Q_{G_0} < \left[\frac{20(\sigma d_0 g_c)^5}{(g(\rho_w - \rho_b))^2 \rho_w^3} \right]^{1/6} \quad (4)$$

$$d_b = \left(\frac{6d_0 \sigma g_c}{g(\rho_w - \rho_b)} \right)^{1/3} \quad (5)$$

در حالتی که شدت جریان های حجمی گاز متوسط باشد و رابطه (۶) معتبر باشد، و رژیم جریان آرام ($Re < 2100$) باشد، قطر حباب ها بزرگتر از حالت قبلی خواهد بود. در این حالت، اگرچه حباب ها تقریباً یکنواخت ایجاد می شوند، اما به شکل زنجیرهایی به هم متصل هستند و به طور مجزا از یکدیگر نیستند. در این صورت، قطر حباب های تولیدی را می توان از رابطه (۹) محاسبه کرد.

$$Q_{G_0} > \left[\frac{20(\sigma d_0 g_c)^5}{(g(\rho_w - \rho_b))^2 \rho_w^3} \right]^{1/6} \quad (6)$$

$$N_{Re_0} = \frac{d_0 v_0 \rho_b}{\mu_b} \quad (7)$$

$$v_0 = \frac{4Q_{G_0}}{\pi d_0^2} \quad (8)$$

$$d_b = \left(\frac{72\rho_w}{\pi^2 g(\rho_w - \rho_b)} \right)^{1/5} Q_{G_0}^{0.4} \quad (9)$$

در شدت جریان های حجمی بسیار زیاد گاز، زمانی که عدد رینولدز (N_{Re_0}) در محدوده ۱۰۰۰۰ تا ۵۰۰۰۰ قرار دارد، گاز به صورت جت از نازل خارج شده و پس از فاصله ای مشخص به صورت حباب در می آید. در این حالت، حباب ها کوچکتر از حالت های قبلی بوده و اندازه آنها یکنواخت نمی باشد. برای محاسبه قطر حباب ها در این شرایط، می توان از رابطه (۱۰) استفاده نمود.

$$d_b = 0.0071 N_{Re_0}^{-0.05} \quad (10)$$

برای تعیین زمان تماس حباب گاز با ماده بودارکننده، که نشان دهنده زمان لازم برای حرکت یک حباب از عمق ستون مایع درون مخزن ماده بودارکننده به سطح است، می توان 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 می کند، ابتدا شتاب می گیرد تا به سرعتی ثابت برسد که به آن سرعت پایدار یا حدی گفته می شود. پس از آنکه

به این سرعت رسید، حباب با همان سرعت ثابت و بدون تغییر به حرکت خود ادامه می دهد. در این وضعیت، بر اساس قانون دوم نیوتن، نیروی خالصی که به حباب وارد می شود برابر با صفر است. نیروهای مؤثر بر حباب در این شرایط عبارتند از:

$$F_g = \frac{m_b g}{g_c} = \frac{\rho_l V g}{g_c} \quad (11)$$

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

$$F_{b0} = \frac{m_l g}{g_c} = \frac{\rho_l V g}{g_c} \quad (12)$$

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

$$F_d = \frac{C_D A_c \rho_l v_{\infty}^2}{2} \quad (13)$$

ضریب نیروی مقاوم (C_D) تابعی از عدد بدون بعد رینولدز و شکل هندسی جسم غوطه ور می باشد. برای حالتی که حباب گاز کروی است روابط تجربی (۱۴) و (۱۵) برای محاسبه ضریب نیروی مقاوم ارائه شده اند. عدد رینولدز در این حالت از رابطه (۱۶) بدست می آید.

$$N_{Re0} \leq 0.5 \quad C_D = \frac{24}{N_{Re0}} \quad (14)$$

$$0.5 < N_{Re0} \leq 10^4 \quad C_D = \frac{24}{N_{Re0}} + \frac{3}{\sqrt{N_{Re0}}} + 0.34 \quad (15)$$

$$N_{Re0} = \frac{\rho_l v_{\infty} d_b}{\mu_l} \quad (16)$$

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

$$\sum F = 0 \Rightarrow F_g + F_d - F_b = 0 \quad (17)$$

$$\rho_b V_b \frac{g}{g_c} + C_D A_c \rho_l \frac{v_l^2}{2} - \rho_l V_b \frac{g}{g_c} = 0 \quad (18)$$

$$(\rho_l - \rho_b) V_b \frac{g}{g_c} = C_D A_c \rho_l \frac{v_l^2}{2} \quad (19)$$

و در نتیجه رابطه (۲۰) برای سرعت حد بدست می آید که در ادامه به ساده سازی آن خواهیم پرداخت:

$$v_l = \sqrt{\frac{2gV_b(\rho_l - \rho_b)}{g_c C_D A_c \rho_l}} \quad (20)$$

با جایگذاری سطح مقطع در معرض جریان و حجم حباب کروی به ترتیب از روابط (۲۱) و (۲۲) در رابطه (۲۰)، رابطه (۲۳) برای سرعت حد بدست می آید.

$$V_b = \frac{\pi d^3}{6} \quad (21)$$

$$A_c = \frac{\pi d^2}{4} \quad (22)$$

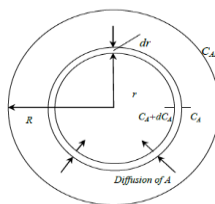
$$v_t = \sqrt{\frac{4gd_b(\rho_l - \rho_b)}{g_c 3 C_D \rho_l}} \quad (23)$$

حال با معلوم بودن ارتفاع مایع درون مخزن، زمان تماس از رابطه (۲۴) قابل محاسبه خواهد بود:

$$t_c = \frac{h}{v_t} \quad (24)$$

شرح فرآیند تولید

در این تحقیق، یک روش جدید برای بودار کردن بهینه گاز طبیعی به صورت کنارگذر با استفاده از یک ستون حبابی استوانه ای (شکل ۱) معرفی شده است. جریان درون ستون از دو فاز گاز و مایع تشکیل شده است. گاز طبیعی از پایین ستون وارد می شود و مایع بودارکننده به صورت ساکن در داخل ستون قرار دارد. سیستم پیشنهادی برای بهینه سازی فرآیند بودار کردن، یک ستون حبابی استوانه ای 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 می کند. در کف ستون از ده اسپارجر (توزیع کننده گاز) با قطر سه میلی متر و فاصله ۵ سانتی متر از یکدیگر استفاده شده است.



شکل ۱- المان حباب گاز به صورت پوسته کروی

معادلات حاکم

سیستم ستون حبابی گاز شهری و مایع بودارکننده به صورت دوفازی و دو بعدی در حالت ناپایدار شبیه سازی می شود. این مدل سازی بر اساس روش اولر-اولر انجام می گیرد. در این تحقیق، از تشریح بوتیل مرکاپتان به عنوان ماده بودارکننده استفاده شده است. در این حال معادله معادله بقای جرم به شکل رابطه (۲۵) بدست می آید:

$$(4\pi r^2)D_{AB} \frac{\partial C_A}{\partial r} \Big|_{r+\Delta r} - (4\pi r^2)D_{AB} \frac{\partial C_A}{\partial r} \Big|_r = (4\pi r^2)\Delta r \frac{\partial C_A}{\partial t} \quad (25)$$

با میل دادن حجم المان به سمت صفر ($\Delta r \rightarrow 0$)، معادله دیفرانسیل به صورت رابطه (۳-۳۵) در می آید، که یک معادله دیفرانسیل پاره ای می باشد و برای حل آن به دو شرط مرزی در جهت شعاع و یک شرط اولیه برای زمان نیاز است. شرایط مرزی به صورت روابط (۲۶)، (۲۷) و شرط اولیه رابطه (۲۸) در نظر گرفته شده اند که در آن $C_{(A_s)}$ غلظت جزء نفوذکننده روی سطح حباب است.

$$C_A = C_{A_s} \quad @ \quad t \geq 0, r = R \quad (26)$$

$$\frac{\partial C_A}{\partial r} = 0 \quad @ \quad t \geq 0, r = 0 \quad (27)$$

$$C_A = 0 \quad @ \quad t = 0, 0 < r < R \quad (28)$$

معادله (۲۷) در نقطه $r = 0$ تعریف نشده است (به این دلیل که r در مخرج کسر قرار دارد) ولی از طرف دیگر می دانیم که در $r = 0$ غلظت دارای مقداری مشخص است. پس برای بدست آوردن حل تحلیلی معادله (۲۵) می توان شرط مرزی (۲۷) را به صورت (۲۹) نوشت:

$$C_A = \text{finite} \quad @ \quad t \geq 0, r = 0 \quad (29)$$

با استفاده از روش تحلیلی جداسازی متغیرها، پس از همگن نمودن شرایط مرزی انجام شده است. حاصل این حل رابطه (۳۰) برای توزیع غلظت در حباب گاز بر حسب شعاع حباب و زمان می باشد.

$$C_A - C_{A_s} = \frac{2C_{A_s}R}{\pi} \sum \frac{1}{r} \frac{(-1)^n}{n} \sin\left(\frac{n\pi}{R}r\right) e^{-D_{AB}\left(\frac{n\pi}{R}\right)^2 t} \quad (30)$$

در ستون های حبابی، نیروهای حجمی شامل نیروهای شناوری، جرم مجازی، درگ و پراکندگی توربولانسی می باشند که در معادله بقای ممنتوم به عنوان جمله چشمه محسوب می شوند. همچنین، انتقال جرم ماده بودارکننده از فاز مایع به گاز از طریق m_{pq} در معادله (۳۲) در نظر گرفته شده است.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_q \alpha_q \vec{u}_q) + \nabla \cdot (\rho_q \alpha_q \vec{u}_q \vec{u}_q) = -\alpha_q \nabla p - \nabla \bar{\tau}_q + \rho_q \alpha_q \vec{g} + \vec{F}_r + \sum_{p=1}^n (k_{pq}(\vec{V}_p - \vec{V}_q) + m_{pq} \vec{V}_{pq} - m_{qp} \vec{V}_{qp}) \quad (31)$$

$$\vec{F}_T = \vec{F}_{drag,q} + \vec{F}_{buo,q} + \vec{F}_{vm,q} + \vec{F}_{td,q} \quad (32)$$

در فرآیند تزریق ماده بودارکننده در حالت گاز، مهم ترین 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 (۳۳) استفاده می شود. شار نفوذی و سطح مقطع حباب که به طور عمود بر جهت شار است، به ترتیب از روابط (۳۴) و (۳۵) محاسبه می گردند. پس از جایگذاری مقادیر مورد نیاز و انجام محاسبات ریاضی، می توان میزان کل نفوذ به داخل حباب گاز در بازه زمانی $[0, t_c]$ را از رابطه (۳۶) به دست آورد. با اعمال معادله کلی بقای جرم از زمان آغاز تا زمان t_0 برای یک حباب گاز، رابطه (۳۷) به دست می آید. با استفاده از این معادله و با توجه به معادله ریاضیاتی (۳۸)، رابطه (۳۹) برای محاسبه غلظت متوسط ماده A در حباب گاز به دست می آید. همانطور که در معادله (۳۹) مشاهده می شود، برای محاسبه غلظت متوسط ماده در حباب گاز، سه پارامتر قطر حباب، ضریب نفوذ و زمان تماس فازها باید مشخص شوند.

$$\bar{N}_A = A_s \int_0^{t_c} N_{AR}(t) dt \quad (33)$$

$$N_{AR}(t) = -D_{AB} \left(\frac{dC_A(z,t)}{dz} \right)_{z=0} \quad (34)$$

$$A_s = 4\pi R^2 \quad (35)$$

$$\bar{N}_A = (4\pi R^2) \left(\frac{2C_{As}}{R} \right) D_{AB} \int_0^{t_c} \sum_{n=1}^{\infty} e^{-D_{AB} \left(\frac{n\pi}{R} \right)^2 t} dt \quad (36)$$

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

$$(C_{A0} - \bar{C}_A) \times \frac{4}{3} \pi R^3 = \bar{N}_A \quad (37)$$

$$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} = \frac{\pi^2}{6} \quad (38)$$

$$\frac{\bar{C}_A - C_{A0}}{C_{A0}} = 1 - \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \exp \left(-\frac{D_{AB} n^2 \pi^2 t}{R^2} \right) \quad (39)$$

ضریب نفوذ مولکولی یکی از ویژگی هایی است که به عوامل مختلفی همچون دما، فشار و ویژگی های اجزای تشکیل دهنده سیستم چند جزئی بستگی دارد. رایج ترین روش برای محاسبه این ضریب در سیستم های گازی، استفاده از تئوری جنبشی گازها است. طبق این تئوری، روابطی برای محاسبه ضریب نفوذ در مخلوط های گازی در فشار پایین پیشنهاد شده است.

برای ساده سازی، فرض شده که مولکول های گاز به صورت کره های صلب در نظر گرفته شده اند و هیچ گونه نیروی بین مولکولی میان آن ها وجود ندارد. بدین ترتیب، برخورد میان مولکول ها به صورت کاملاً الاستیک فرض می شود. با این فرضیات، رابطه ای برای یک مخلوط گاز ایده آل شامل اجزای سازنده و ایزوتوپ های آن ها ارائه شده است که در رابطه (۴۰) قابل مشاهده است.

در این رابطه، پارامتر D_{aa^*} ضریب نفوذ خودی نامیده می شود. همچنین λ طول مسیر آزاد متوسط جز componenta و u سرعت متوسط این جز هستند که از روابط (۴۱) و (۴۲) محاسبه می شوند. با جایگزینی u و λ در روابط مربوطه، رابطه (۴۳) برای ضریب نفوذ به دست می آید. یکی از فرضیات ساده سازی در به دست آوردن رابطه (۴۳) نادیده گرفتن نیروهای بین مولکولی است. در سال ۱۹۴۹، هیچفلدر و همکارانش با استفاده از تئوری پتانسیل Lennard-Jones رابطه ای دیگر برای مولکول های غیرقطبی ارائه دادند که در آن نیروهای بین مولکولی به صورت نیروهای جاذبه و دافعه در نظر گرفته می شود.

طبق این تئوری، مولکول ها زمانی که به یکدیگر نزدیک یا از هم دور می شوند، یک پتانسیل شیمیایی بین آن ها ایجاد می شود که از رابطه (۴۴) محاسبه می شود. در این رابطه، σ_{AB} و ϵ_{AB} پارامترهای معادله Lennard-Jones هستند که به ترتیب قطر برخورد و انرژی تداخل مولکولی برای سیستم دو جزئی A-B را نشان می دهند. همچنین رابطه (۴۵) برای محاسبه ضریب نفوذ با استفاده از این تئوری ارائه شده است.

Ω_D یکی دیگر از پارامترهای مدل Lennard-Jones است که به عنوان *collision integral* شناخته می شود. این پارامتر تابعی از عبارت بی بعد $\alpha = (kT/\epsilon_{AB})$ است که خود از یک سری داده های تجربی در مراجع مختلف قابل دسترسی می باشد. به منظور تسهیل در انجام محاسبات رایانه ای، این داده های تجربی برای محدوده ای از ۰٫۷ تا ۱٫۹ برای عدد بی بعد α ، به صورت یک معادله منحنی و در قالب رابطه (۴۶) ارائه شده است.

مقادیر قطر برخورد و انرژی تداخل مولکولی معمولاً تنها برای تعداد محدودی از گازهای خالص در دسترس هستند. در صورت عدم وجود داده های تجربی، می توان از روابط (۴۷) و (۴۸) برای محاسبه این دو پارامتر استفاده کرد. همچنین برای یک سیستم دو جزئی، پارامترهای σ_{AB} و ϵ_{AB} از روابط (۴۹) و (۵۰) محاسبه می شوند.

$$D_{aa^*} = \frac{1}{3} \lambda u \quad (40)$$

$$\lambda = \frac{kT}{\sqrt{2} \pi \sigma_A^2 P} \quad (41)$$

$$u = \sqrt{\frac{8kNT}{\pi M_a}} \quad (42)$$

$$D_{aa^*} = \frac{2T^{\frac{3}{2}}}{3\pi^2 \sigma_a^2 P} \left(\frac{k^3 N_{AV}}{M_a} \right)^{1/2} \quad (43)$$

$$\phi_{AB}(r) = 4\epsilon_{AB} \left[\left(\frac{\sigma_{AB}}{r} \right)^{12} - \left(\frac{\sigma_{AB}}{r} \right)^6 \right] \quad (44)$$

$$D_{AB} = \frac{0.001858 T^{\frac{3}{2}} \left[\frac{1}{MW_A} + \frac{1}{MW_B} \right]^{\frac{1}{2}}}{P \sigma_{AB}^2 \Omega_D} \quad (45)$$

$$\Omega_D = 0.196387a^4 - 1.297688a^3 + 3.382420a^2 - 4.368843a + 3.52678 \quad (46)$$

$$\sigma = 1.18V_{boiling}^{1/3} = 0.841 V_c^{1/3} = 2.44 \left(\frac{T_c}{P_c}\right)^{1/3} \quad (47)$$

$$\frac{\varepsilon_A}{k} = 1.15 T_{boiling} = 0.77 T_c \quad (48)$$

$$\sigma_{AB} = \frac{\sigma_A + \sigma_B}{2} \quad (49)$$

$$\varepsilon_{AB} = \sqrt{\varepsilon_A \varepsilon_B} \quad (50)$$

غلظت ماده بودارکننده در سطح حباب گاز معادل با غلظت تعادلی است که به فشار بخار اشباع مایع در دمای مشخص مربوط می شود. برای محاسبه فشار بخار اشباع مواد مایع در دماهای مختلف، روابط تجربی متعددی وجود دارد که به صورت تابعی از دما در منابع مختلف ذکر شده است.

$$P^* = \exp(C_1 + \frac{C_2}{T} + C_3 \log(T) + C_4 T^{C_5}) \quad (51)$$

$$C_{AS} = \frac{P^*}{RT} \quad (52)$$

استفاده از مدل حباب گاز و روش حدس و خطا برای تعیین نقطه تنظیم در بودارکننده کنارگذر حالت گاز، نیازمند طراحی اولیه دستگاه بودارکننده براساس نیاز تزریق است. در این طراحی، با استفاده از داده های ایستگاه گازرسانی برای مقادیر حداکثر و حداقل مصرف گاز طبیعی، تعداد نازل های مورد نیاز و قطر آنها به کمک الگوریتم زیر محاسبه می شود. سپس کنترل کننده می تواند از روش حدس و خطا برای شرایط مختلف عملیاتی استفاده کند تا این مقادیر را تعیین نماید.

محاسبه دبی مورد نیاز برای حداقل تزریق در کمترین میزان مصرف گاز طبیعی در طول سال.

محاسبه قطر نازل با استفاده از دبی لازم برای حداقل تزریق مورد نیاز، طبق رابطه (۶)

تعیین حداکثر دبی مجاز قابل عبور از یک نازل با قطر مشخص با استفاده از روابط (۷) و (۸) برای جریان آرام. ($Re < 2100$)

محاسبه میزان تزریق ماده بودارکننده به خط در حداکثر دبی عبوری از یک نازل با قطر معین با استفاده از مدل حباب گاز.

مقایسه میزان تزریق در حداکثر دبی عبوری از یک نازل و میزان تزریق حداکثر مورد نیاز ایستگاه با توجه به مصرف گاز طبیعی در طول سال.

افزایش تعداد نازل ها با قطر معین در صورت کافی نبودن میزان تزریق با حداکثر دبی عبوری از یک نازل.

نرم افزار

برای دستیابی به اهداف پژوهش، از روش عددی با استفاده از نرم افزار ANSYS بهره گرفته شده است. اولین مرحله در تحلیل اجزای محدود یک سیستم سازه ای، ایجاد مدل هندسی دقیق آن است. به این ترتیب، باید توانست مدل هندسی موردنظر را به درستی طراحی کرده، تغییرات لازم را اعمال کرد، و بخش های غیرضروری را حذف نمود. پس از انجام اصلاحات، مدل هندسی نهایی آماده خواهد شد.

مش بندی مدلسازی

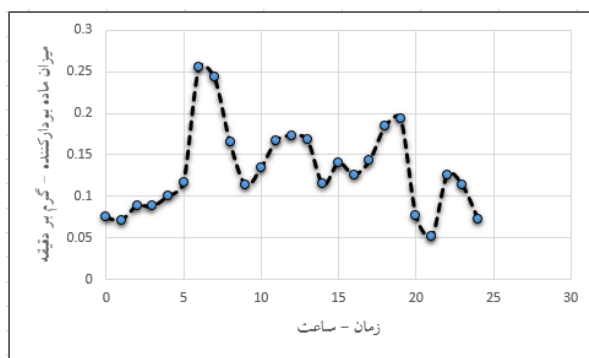
پس از اتمام مدل سازی هندسی، مش بندی اولیه با تنظیمات پیش فرض نرم افزار انجام می گیرد. در این مرحله، ابعاد و اندازه نودها و المان های مختلف شبکه مورد ارزیابی قرار می گیرند. در هر گام، نرخ جریان خروجی گاز از شیر محاسبه می شود. این ارزیابی به این دلیل انجام می گیرد که تغییر اندازه سلول ها و نودهای شبکه بندی می تواند بر حل معادلات جریان سیالات تأثیر بگذارد. نتایج مربوط به نرخ جریان جرمی بر اساس تغییر تعداد شبکه های به کاررفته در مدل سازی نشان داد که بعد از ۳۴۱۴۸۷۱ سلول، نرخ جریان خروجی به یک روند ثابت نزدیک شده است. این موضوع نشان می دهد که مش بندی نهایی مدل شامل ۳۴۱۴۸۷۱ سلول، ۷۸۱۵۶۱۲ وجه و ۱۲۰۵۸۳۸ نود است. در مرحله بعد، با تعریف شرایط مرزی و اعمال معادلات حاکم، شبیه سازی و تحلیل سیستم انجام خواهد شد.

تجزیه و تحلیل نتایج

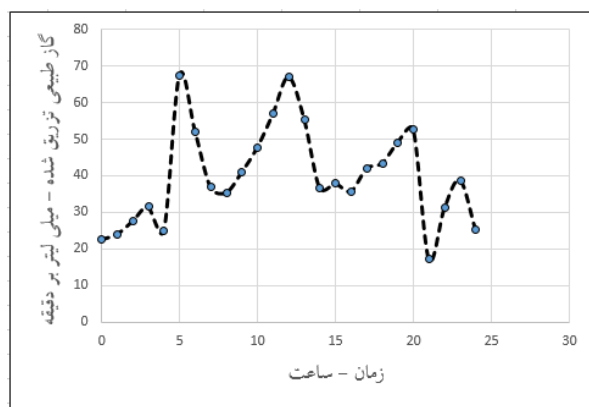
مقدار ماده بودارکننده لازم برای افزودن به گاز طبیعی به منظور دستیابی به غلظت مناسب، همراه با نمودار نشان دهنده میزان گاز مورد نیاز برای تزریق به صورت حباب به مخزن ماده بودارکننده، در شکل های ۲ و ۳ نمایش داده شده است. شایان ذکر است که شرایط عملیاتی بر اساس داده های ارائه شده در جدول ۱ تعیین شده اند.

جدول ۱- شرایط مربوط به تعیین میزان ماده بودارکننده

پارامتر	مقدار
بودارکننده ماده	اتیل مرکاپتان
گاز (فشار ورودی) ایستگاه در فشار	۲۵۰ (psi)
گاز ایستگاه در دما	۲۹۸ درجه کلوین (۲۵ درجه سلسیوس)
مصرف محل در دما	۲۹۸ درجه کلوین (۲۵ درجه سلسیوس)
بودارکننده ماده مخزن اولیه ارتفاع	۱ متر
بودارکننده ماده مخزن قطر	۸۰ سانتی متر
نازل داخلی قطر	۱ میلی متر
تعداد نازل	۲ عدد



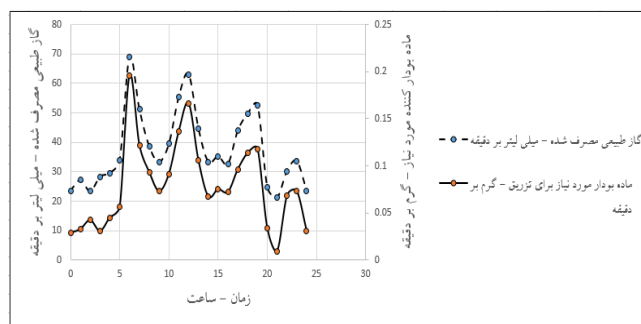
شکل ۲- میزان ماده بودارکننده مورد نیاز ایستگاه نسبت به زمان



شکل ۳- نمودار میزان دبی گاز مورد نیاز ایستگاه گاز

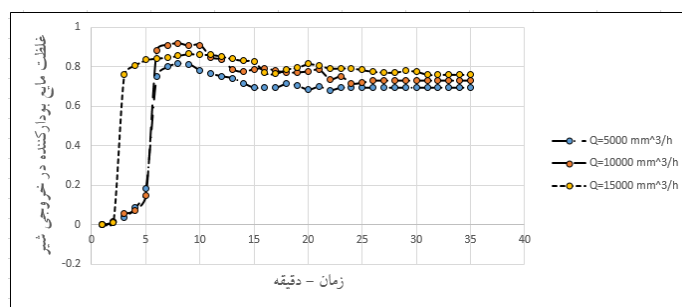
طبق نتایج نمایش داده شده در شکل های مذکور، در بالاترین میزان مصرف گاز ایستگاه، بالاترین دبی گاز در خط کنارگذر حدود ۶۹ میلی لیتر در دقیقه به دست آمده است. همانطور که در بحث فرآیند و سیستم کنترل بودارکننده گاز بیان شده، عملکرد سیستم کنترل نه تنها به عنصر کنترل نهایی، بلکه به نحوه انتقال جرم در فرآیند نیز بستگی دارد. به عبارت دیگر، برای اجرای مؤثر سیستم کنترل، باید مدلی برای پیش بینی رفتار فرآیند در دسترس باشد.

همچنین، همان طور که پیش تر اشاره شد، سرعت جریان گاز در شرایط دما و فشار ۲۵۰ psi و ۲۵ درجه سانتی گراد در ایستگاه های TBS و CGS اندازه گیری شده است. برای محاسبه مقدار ماده بودارکننده مورد نیاز جهت تزریق به لوله گاز، ابتدا داده ها با شرایط دما و فشار در نقطه مصرف (۲۵۰ psi و ۲۵ درجه سانتی گراد) هماهنگ شده و سپس با غلظت ماده بودارکننده در نقطه مصرف (۴ppmv) ضرب می شوند. کاهش سرعت جریان گاز طبیعی و تغییرات محاسبه شده برای غلظت ماده بودارکننده (اتیل مرکاپتان) در شکل ۴ نشان داده شده است.



شکل ۴- نمودار مصرف گاز طبیعی نسبت به ماده بودار کننده مورد نیاز در مدل

در ادامه به بررسی اثر تغییر دبی ورودی گاز بر غلظت خروجی مایع بودار کننده در گاز طبیعی می پردازیم. این موضوع در شکل ۵ نشان داده شده است.



شکل ۵- تاثیر دبی ورودی گاز بر غلظت خروجی مایع بودار کننده نسبت به زمان

با توجه به شکل ۵ مشاهده می شود که با افزایش سرعت گاز ورودی، دبی گاز ورودی نیز افزایش یافته و در نتیجه سطح مؤثر انتقال جرم بیشتر می شود. این تغییرات باعث افزایش غلظت ماده بودار کننده، به ویژه اتیل مرکپتان، در خروجی می گردد.

مدلسازی حباب گاز

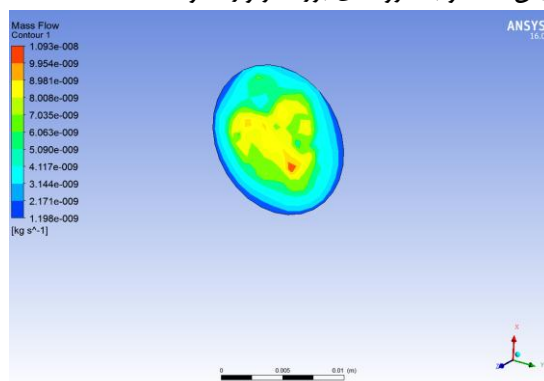
قطر حباب گاز یکی از پارامترهای مهم دیگری است که باید بررسی شود. نحوه محاسبه قطر حباب در فصل سوم به طور کامل توضیح داده شده است. همانطور که اشاره شد، قطر حباب گاز عامل تعیین کننده در محاسبه سطح تماس دو فاز است و علاوه بر وابستگی به خواص فیزیکی فازهای گاز و مایع، به شرایط عملیاتی و نوع جریان نیز بستگی دارد. قطر حباب گاز از عوامل اصلی در محاسبات انتقال جرم با استفاده از مدل ریاضی حباب گاز است. به همین دلیل، برای اطمینان از دقت روابط مربوط به محاسبه قطر حباب گاز و با توجه به نقشی که این پارامتر در تعیین زمان تماس فازها و در رابطه (۳۷) ایفا می کند، بررسی این روابط در فرآیند مدل سازی حباب ضروری است. از آنجا که خروجی نهایی مدل حباب گاز، به ویژه رابطه (۳۶)، مدلی برای پیش بینی رفتار فرآیند بودار کننده کنارگذر در حالت گاز است، این فرآیند باید در مقیاس آزمایشگاهی طراحی و شبیه سازی شود. در جدول ۲ داده های بدست آمده مربوط به قطر حباب های گاز در ۳ دبی حجمی مختلف ارائه شده اند.

جدول ۲- نتایج بدست آمده قطر حباب گاز (میزان نفوذ) در دبی های مختلف

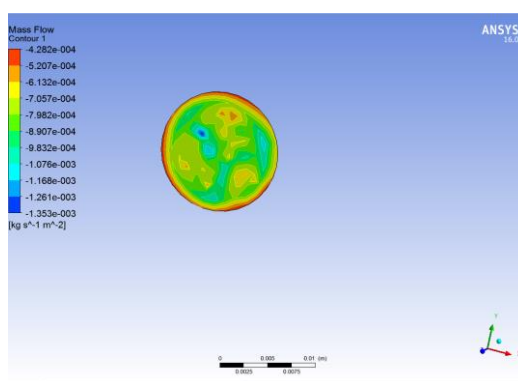
مدل آزمایش	$Q_{G0}(\text{mm}^3/\text{hour})$	$d_b^{\text{model}}(\text{mm})$	$d_{\text{min}}^{\text{model}}(\text{mm})$
۱	5000	3.18	3.34
۲	10000	4.98	5.22
۳	15000	5.12	6.49

برای محاسبه توزیع اندازه حبابها در طول ستون، قطر حبابهای تشکیل شده در ورودی اسپارجرها با استفاده از معادلات دلنوج تعیین گردید و توزیع اولیه حبابها بر اساس قطر ورودی به صورت محاسباتی انجام شد. شکل ۶ روند تغییرات اندازه حبابها در برج را در شرایط پایدار نشان می دهد. توزیع اندازه حبابها به پنج گروه مختلف تقسیم بندی شده است. در شکل (الف)، گروهی از ریزترین حبابها که اندازه حبابهای ورودی را نشان می دهند، در بخش پایین برج و نزدیک توزیع کننده ها قرار دارند و با افزایش ارتفاع و بزرگ تر شدن حبابها، تعداد آنها به طور چشمگیری کاهش می یابد. در شکل های (ب) و (پ)، حبابها سهم بیشتری از اندازه ها در طول برج دارند و به وضوح مشاهده می شود که با حرکت حبابها به سمت بالا، ابتدا وارد گروه اندازه ای چهارم و سپس سوم می شوند. در نهایت، در شکل های (ج) و (د)، بیشتر حبابها در

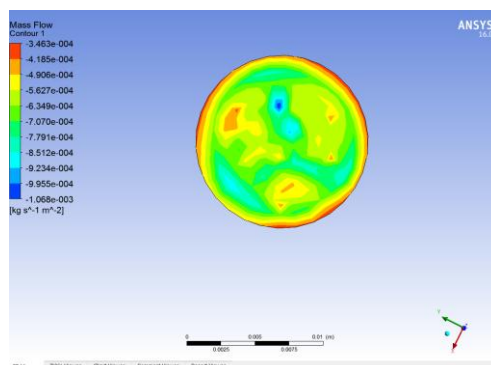
دیواره برج شکل می گیرند و در مسیر اصلی حرکت فاز گاز حضور ندارند، که نشان می دهد حباب هایی که در نزدیکی دیواره برج باقی می ماند، فرصت پیدا می کنند تا اندازه خود را افزایش دهند و به گروه های بزرگ تر وارد شوند.



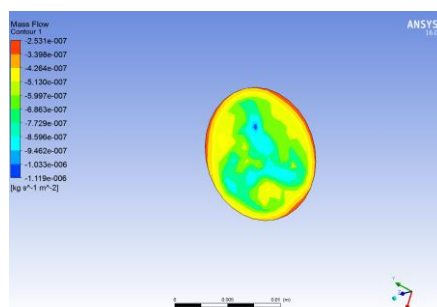
(الف)



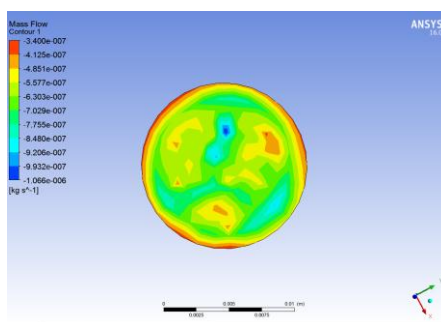
(ب)



(پ)



(ج)



(د)

شکل ۶- توزیع اندازه حباب ها در طول برج در حالت پایا در دبی ۵۰۰۰ مترمکعب بر ساعت

نتیجه گیری

این پژوهش به بررسی فرآیند دستگاه بودارکننده گاز طبیعی در دو حالت مایع و گاز پرداخته است و نتایج زیر را به دنبال داشت: در حداکثر میزان مصرف گاز ایستگاه، بیشترین دبی گاز در خط کنارگذر حدود ۶۹ میلی لیتر بر دقیقه به دست آمده است، که نشان می دهد عملکرد سیستم کنترل علاوه بر وابستگی به عنصر کنترل نهایی، به مکانیزم فرآیند انتقال جرم نیز مرتبط است و بدون مدلی برای پیش بینی رفتار فرآیند، اجرای سیستم کنترل غیرممکن خواهد بود. توزیع اندازه حباب ها در طول برج در حالت پایا و دبی ۵۰۰۰ مترمکعب بر ساعت نشان داد که ریزترین حباب ها در کف برج و نزدیک توزیع کننده ها پراکنده هستند و با افزایش ارتفاع برج، اندازه حباب ها بزرگتر شده و به طور ناگهانی از تعداد آن ها کاسته می شود. حباب های بزرگتر عمدتاً در دیواره برج تشکیل می شوند و از مسیر اصلی حرکت فاز گاز خارج می گردند که نشان دهنده این است که حباب هایی که نزدیک دیواره برج قرار دارند، فرصت افزایش اندازه را به دست می آورند اما این دسته از حباب ها تأثیر کمتری بر فرآیند انتقال جرم دارند.

References

- [1]. 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>
- [2]. Louvet, Y., Ahlgrimm, S., Pag, F., & Vajen, K. (2024). Combining expansion turbines, heat pumps, and low-temperature solar heat for enhanced primary energy savings in gas pressure regulating stations. *Solar Energy Advances*, 4, 100075. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.seja.2024.100075>
- [3]. Jia, X., Cui, H., Qin, S., Ren, J., Zhang, Z., An, Q., Zhang, N., Yang, J., Yang, Y., Fan, G., & Pan, S. (2024). Characterizing and decoding the key odor compounds of *Spirulina platensis* at different processing stages by sensomics. *Food Chemistry*, 461, 140944. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2024.140944>
- [4]. Li, L., Liu, Y., Kong, Y., Zhang, J., Shen, Y., Li, G., Wang, G., & Yuan, J. (2023). Relating bacterial dynamics and functions to greenhouse gas and odor emissions during facultative heap composting of four kinds of livestock manure. *Journal of Environmental Management*, 345, 118589. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.118589>