

# روش جدید تزریق ماده بودار کننده در ایستگاه تقلیل فشار گاز بر پایه روش کنارگذر با استفاده از اجکتور

کوروش گودرزی\*

گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه یاسوج، ایران

**چکیده:** با وجود چندین سیستم بودارکننده گاز طبیعی مصرفی، مانند سیستم کنارگذر و سیستم تزریقی، به دلایلی از جمله مشکلات و محدودیت های سیستم های موجود، معرفی سیستم بودار کننده جدید با محدودیت های کمتر ضروری به نظر می رسد. در حال حاضر، در سیستم توزیع گاز در سطح کشور تنها از دو سیستم فوق برای بودار کردن گاز استفاده می شود. از آنجا که سیستم تزریقی از هزینه بالای تعمیر و نگهداری برخوردار است و همچنین سیستم کنارگذر نیز محدود به ظرفیت های پایین است، معرفی یک سیستم جدید برای بودار کردن گاز طبیعی مصرفی بسیار ضروری است. در این مقاله به معرفی یک سیستم جدید بودار کننده گاز پرداخته شده است. سیستم مورد نظر با ترکیب یک اجکتور با سیستم کنارگذر بوجود آمده است. در این مقاله، مدل سازی سیستم ترکیبی مورد مطالعه انجام گرفته و تاثیر پارامترهای مهم مانند فشار گاز زیرکش شده (فشار گاز در بالادست)، دبی جرمی ماده بودارکننده، دمای گاز زیرکش شده (دما در بالادست)، قطر نازل و تعداد نازل نیز بر روی میزان گاز زیرکش شده جهت ورود به مخزن مرکپتان و جذب مقدار مورد نیاز از ماده بودارکننده متناسب با شرایط، انجام گرفته است. نتایج نشان می دهد که قطر نازل و تعداد نازل تاثیر بر روی نرخ جرمی جریان گاز مورد نیاز برای سیستم بودارکننده ندارد. اما نرخ جرمی جریان گاز مورد نیاز برای سیستم بودارکننده متاثر از فشار گاز و دمای گاز در بالادست سیستم بودارکننده است.

**واژگان کلیدی:** گاز طبیعی، بودار کردن گاز، سیستم کنارگذر، اجکتور

**KEYWORDS:** Natural gas, gas odorizing process, bypass system, ejector

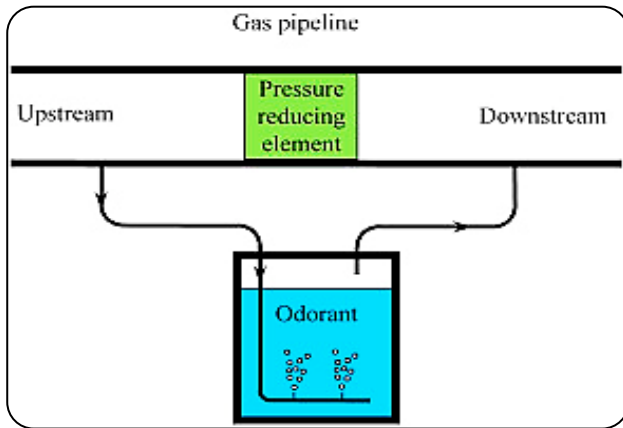
## مقدمه

استاندارد مناسب است. نوع دوم بودارکننده های تزریقی است که با اندازه گیری جریان گاز و ارسال سیگنال متناسب با حجم عبور گاز به پمپ های تزریقی، عملیات تزریق مرکپتان را انجام می دهد. هر کدام از این سیستم ها ویژگیها و محدودیت های خاصی دارند. بطور نمونه مشکل اصلی سیستم کنارگذر، علاوه بر ظرفیت پایین ایستگاه، دقت کم در تزریق ماده بودارکننده است. به عبارت دیگر، مصرف بیش از حد یا ناکافی بودن مواد بودارکننده در خط لوله گاز

با توجه به این که گاز طبیعی گازی است بی بو و در صورت نشت گاز در منازل مسکونی و همچنین صنایع می تواند سبب بروز خطرات زیادی گردد، در ایستگاه های تقلیل فشار ورودی شهرها، گاز توسط یک ماده بودارکننده مانند مرکپتان بودار می گردد. در میان سیستم های بودارکننده گاز، دو نوع کنارگذر و تزریقی بیشتر مورد استفاده قرار می گیرد. نوع اول بودارکننده های کنارگذر نامیده می شوند که برای حجم کم گاز تا ظرفیت ۱۰۰۰۰ مترمکعب

\*Email: kgoudarzi@yu.ac.ir

\* عهده دار مکاتبات



شکل ۱ - شماتیک سیستم بودارکننده کنارگذر

درون مخزن، می‌توان در جریان گاز درون مخزن آشفته‌گی ایجاد کرد و سبب تبخیر بیشتر بودارکننده شد.

تاکنون تحقیقات اندکی در زمینه این سیستم‌های بودارکننده صورت گرفته است. وانگ<sup>۱</sup> و همکاران [۲] در سال ۲۰۰۲، انتقال جرم بین فازهای گاز و مایع در ستون حبایی به کمک دینامیک سیالات محاسباتی را بررسی کردند. آنها نشان دادند که توزیع اندازه حباب‌ها، سرعت لغزش حباب‌ها، شدت پراکنندگی آشفته‌گی، به هم پیوستگی و شکست حباب‌ها بر روی انتقال جرم بین دو فاز موثرند. زینگ<sup>۲</sup> و همکاران [۳] در سال ۲۰۱۳، اثر ویسکوزیته مایع را بر روی عملکرد ستون حبایی به کمک دینامیک سیالات محاسباتی بررسی کردند. نتایج این شبیه‌سازی نشان داد که اثر ویسکوزیته مایع، بر روی به هم پیوستگی حباب‌ها نسبت به شکست حباب‌ها، ناچیز است. در سال ۲۰۱۸ نگارش و همکاران [۴] به منظور غلبه بر مشکلات سیستم بودارکننده کنارگذر یعنی مصرف بیش از حد یا ناکافی بودن مواد بودارکننده در خط لوله گاز، یک سیستم کنترل پیشخور متشکل از سه جزء مدل انتقال جرم، رابطه تخمین قطر حباب و مدل کنترل نهایی را پیشنهاد دادند. معدود محققانی نیز در مطالعاتی اندک، از افت فشار ایجاد شده در ایستگاههای تقلیل فشار گاز برای تولید توان و تبرید به روشی پاک استفاده کردند [۵، ۶].

با وجود تلاش‌هایی که برای ارائه یک سیستم بودارکننده که بتواند بر مشکلات دو روش اصلی ذکر شده در فوق فائق آید، اما تاکنون سیستم بودارکننده با این ویژگی معرفی نشده است. برای نمونه می‌توان به سیستم بودارکننده فتیله‌ای که در شکل ۲ نشان داده شده است، اشاره کرد. در این سیستم نیز مکانیزم فیزیکی مشابه روش کنارگذر و بر اساس تبخیر مایع مرکاپتان در اثر عبور

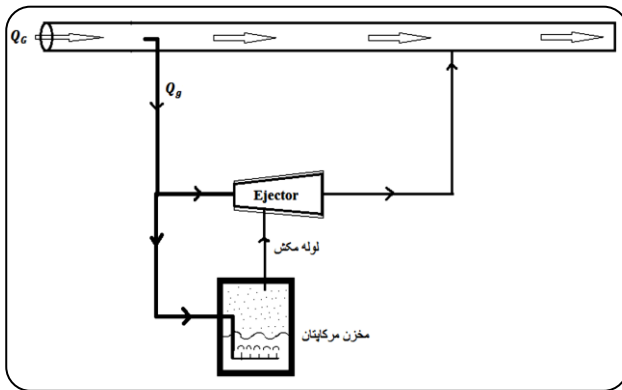
از مشکلات استفاده از این سیستم می‌باشد. مهمترین مشکل سیستم بودارکننده تزریقی، مصرف انرژی و هزینه بالای نگهداری و تعمیرات پمپ مورد استفاده است. از دیگر اشکالات این سیستم بودارکننده این است که این نوع سیستم‌ها به دلیل وجود اتصالات خارجی زیاد و احتمال نشتی مواد بودارکننده، مطلوب نبوده و می‌تواند باعث ایجاد آلودگی در اطراف ایستگاه تقلیل فشار گاز شوند. در این مقاله از یک روش جدید برای تزریق ماده بودارکننده در ایستگاه تقلیل فشار گاز بر پایه روش کنارگذر استفاده شده است [۱].

تزریق ماده بودارکننده در سیستم کنارگذر مستلزم وارد کردن گاز طبیعی به صورت حباب در ماده بودارکننده است. حباب گاز طبیعی ایجاد شده در پایین مخزن نگهداری ماده بودارکننده به علت اختلاف چگالی گاز و مایع به سمت بالا و سطح مایع حرکت می‌کند. در طی این حرکت و تحت کنترل عملیات انتقال جرم، ماده بودارکننده از فاز مایع به درون حباب گاز طبیعی نفوذ کرده و به تدریج که حباب از پایین مخزن به سطح بالایی مخزن حرکت می‌کند، غلظت ماده بودارکننده در آن افزایش می‌یابد. بدین ترتیب گازی که روی سطح ماده بودارکننده وجود می‌آید دارای مقداری قابل محاسبه از ماده بودارکننده خواهد بود و به راحتی تحت فشار بالادست به پایین دست جریان، قابل تزریق خواهد بود. این نوع سیستم در ایستگاه‌های با ظرفیت پایین تا ظرفیت ۱۰۰۰۰ مترمکعب استاندارد مورد استفاده قرار می‌گیرند. فشار گاز در سیستم‌های کنارگذر حداکثر ۶۰ Psi است. شماتیکی از این بودارکننده‌ها در شکل ۱ نشان داده شده است. در این روش، بخش کوچکی از جریان اصلی گاز در بالادست که حاوی فشار بالا می‌باشد به سمت مخزن ذخیره ماده بودارکننده منحرف و کنارگذر می‌شود. گاز کنارگذر شده در حین عبور از مایع موجود در مخزن، مقداری از ماده بودارکننده را جذب و در حالی که اشباع شده است، در پایین دست که فشار گاز کمتری دارد با جریان اصلی گاز مخلوط می‌شود [۱].

نسبت بودارکنندگی در بودارکننده کنارگذر به نوسانات دمایی بودارکننده وابسته است. با استفاده از یک مخزن ذخیره مدفون در زیر خاک می‌توان تغییرات دمایی را به حداقل رساند. در برخی از سیستم‌ها برای جلوگیری از مدفون کردن مخزن در زیر خاک، از المنت‌های ترموستاتیکی کنترل حرارت استفاده می‌کنند. بودارکننده کنارگذر معمولاً از مخازن افقی استفاده می‌کنند. گاز از سمت فشار بالای مخزن وارد می‌شود و از سمت فشار پایین آن خارج می‌شود. با استفاده از صفحات نصب شده

(۱) Wang

(۲) Xing



شکل ۳ - شماتیک کلی از سیستم بودار کننده ترکیبی

به عبارت دیگر در این سیستم اجکتور با سیستم بودار کننده کنارگذر ترکیب شده است. استفاده از این سیستم ترکیبی سبب می شود که این سیستم دیگر محدودیت های روش تزریق را نداشته باشد و همچنین کنترل میزان مرکپتان نیز با روش ارزاتری انجام گیرد. شماتیکی از این سیستم در شکل ۳ نشان داده شده است. چنانچه در شکل مشاهده می شود، مقدار گاز مورد نیاز را از خط لوله اصلی گاز در ایستگاه زیرکش و به مخزن مرکپتان هدایت و به گونه ای تنظیم می گردد که در پایین مخزن و توسط تعدادی نازل بصورت حباب های گاز خارج گردد. حباب های تولید شده با عبور از ارتفاع مایع در مخزن و حرکت به سمت سطح بالایی مخزن، مقداری از مایع مرکپتان را جذب می کنند. در نهایت در بالای مخزن گازی که حاوی مرکپتان موردنظر است جمع می گردد و توسط اجکتور مکش و وارد خط لوله اصلی گاز می گردد.

### مدل سازی ریاضی

مساله مهم در این روش محاسبه میزان دبی گاز مورد نیاز برای جذب مقدار مشخص مرکپتان است. برای این کار با داشتن شدت جریان جرمی ماده بودار کننده مورد نیاز، می توان به روش سعی و خطا، شدت جریان جرمی گاز مورد نیاز که باید به صورت حباب در ماده بودار کننده وارد شود را محاسبه نمود. روند تعیین شدت جریان جرمی گاز طبیعی، به مخزن ماده بودار کننده به شرح زیر می باشد [۱۰-۷].

- ۱- تعیین شدت جریان جرمی مورد نیاز از ماده بودار کننده  $0.675 \text{ g/s}$
- ۲- حدس  $Q_G$  (جریان جرمی گاز ورودی به مخزن ماده بودار کننده)
- ۳- محاسبه  $d_b$  (قطر حباب گاز برای جریان های جرمی بسیار کم) اندازه حباب های گاز به نرخ جریان عبوری از سوراخ ها، قطر سوراخ، خواص سیال و مقدار آشفستگی موجود در مخزن مایع بستگی دارد. برای دبی های خیلی کم؛



شکل ۲ - سیستم بودار کننده فیتله ای [۵]

حباب های گاز انجام می گیرد. به منظور بالا بردن میزان کارایی سیستم های اشاره شده، سیستم ترکیبی کنارگذر همراه با فیتله نیز مورد استفاده قرار گرفته است.

با توجه به سادگی روش کنارگذر و مشکلات و محدودیت های این روش از جمله قابلیت کاربرد در ایستگاه های با ظرفیت پایین و مصرف بیش از حد یا ناکافی بودن مواد بودار کننده در خط لوله گاز، در این مقاله سعی شده با بکارگیری یک اجکتور و اضافه کردن آن به سیستم بودار کننده کنارگذر مرسوم، به سیستم جدیدی دست یافت، به گونه ای که محدودیت های روش کنارگذر را نداشته باشد. ویژگی مهم آن این است که برخلاف سیستم بودار کننده کنارگذر قابل استفاده برای ایستگاه های با ظرفیت بالا است. لازم به ذکر است که در این سیستم جدید، برخلاف سیستم تزریقی، بدون نیاز به استفاده از منابع انرژی عملکرد سیستم کنارگذر بهبود یافته است.

### سیستم ترکیبی بودار کننده

استفاده از اجکتور به تنهایی و بدون ترکیب با سیستم کنارگذر دارای یک اشکال اساسی است. یعنی کنترل دبی ماده بودار کننده مکش شده توسط اجکتور با توجه به مقدار بسیار کم و دانسیته نسبتا بالای آن، کار نسبتا دشواری است. بنابراین در سیستم موردنظر بجای مکش مرکپتان مایع، گاز هدایت شده به سمت مخزن مرکپتان (که مقدار مرکپتان موردنیاز را نیز در خود جذب کرده است) تحت مکش قرار می گیرد. بر این اساس می توان دبی گاز مکش شده و در واقع میزان مرکپتان تزریقی را کنترل نمود.

$$C_D = \begin{cases} \frac{24}{Re_e} & Re_e < 0.1 \\ \frac{24}{Re_e} \left(1 + \frac{3}{16} Re_e\right) & Re_e > 0.1 \end{cases} \quad (۶)$$

$Re_e$  عدد رینولدز حباب است که به صورت زیر تعریف می شود.

$$Re_e = \frac{\rho_l V_t d_b}{\mu_l} \quad (۷)$$

۵ - محاسبه زمان تماس حباب با ماده بودارکننده [۱۲،۱۱]  
 زمان تماس حباب با ماده بودارکننده بر اساس سینماتیک حرکت ذره از رابطه زیر بدست می آید.

$$t = h/V_t \quad (۸)$$

در رابطه فوق  $h$  ارتفاع ستون سیال مایع در مخزن است. در حالت کلی  $h$  نسبت به زمان تغییر می کند. در این طراحی جهت ساده کردن مسأله، از یک مقدار متوسط برای آن یعنی ۶۰ سانتی متر استفاده شده است.

۶ - محاسبه غلظت متوسط در حباب گاز

برای محاسبه میزان انتقال جرم به یک تک حباب می توان معادله بقای جرم برای یک حباب کروی را (در غیاب واکنش شیمیایی) به صورت زیر نوشت.

$$D_{lg} \left( \frac{\partial^2 C_l}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial C_l}{\partial r} \right) = \frac{\partial C_l}{\partial t} \quad (۹)$$

برای محاسبه  $D_{lg}$  می توان از مراجع مربوطه استفاده نمود.

معادله فوق یک معادله دیفرانسیل جزئی می باشد که برای حل آن به دو شرط مرزی در جهت شعاع و یک شرط اولیه برای زمان نیاز است. شرط اولیه و شرایط مرزی برای حباب گاز به صورت زیر است.

$$C_l = 0.0 \text{ at } t = 0.0 \text{ and } 0.0 \leq r \leq R$$

$$C_l = C_{ls} \text{ at } t \geq 0.0 \text{ and } r = R$$

$$\frac{\partial C_l}{\partial r} = 0.0 \text{ at } t \geq 0.0 \text{ and } r = 0.0$$

$$C_l = \text{finite at } t \geq 0.0 \text{ and } r = 0.0$$

با اعمال تغییر متغیر  $Y = C_l - C_{ls}$  شرط اولیه و شرایط مرزی به صورت همگن در می آید و معادله به یک معادله دیفرانسیل پاره ای سهموی تبدیل می شود. در نهایت با توجه به شرایط مرزی ارائه شده می توان آن را به روش جداسازی متغیرها حل کرد. غلظت در حباب گاز به صورت تابعی از شعاع حباب و زمان به صورت زیر به دست می آید.

$$C_l - C_{ls} = \frac{2RC_{ls}}{\pi} \sum \frac{1}{r} \frac{(-1)^n}{n} \sin\left(\frac{n\pi}{R}r\right) \exp\left(-D_{lg} \left(\frac{n\pi}{R}\right)^2 t\right) \quad (۱۰)$$

(۱) Terminal velocity

$$Q_G < \left[ \frac{20(\sigma d_n)^5}{(g\Delta\rho)^2 \rho_l^3} \right]^{1/6}$$

داریم

$$d_b = \left[ \frac{6d_n\sigma}{g\Delta\rho} \right]^{1/3} \quad (۱)$$

رابطه فوق برای سوراخ‌های تا قطر ۱۰ میلی متر مناسب است. در رابطه بالا  $g$ ،  $\sigma$  و  $\Delta\rho$  که به ترتیب بیانگر شتاب جاذبه، نیروی کشش سطحی  $0.۳۱ \text{ N/m}$  و اختلاف دانسیته گاز طبیعی و مرکاپتان می باشد، مقادیر ثابتی دارند که در ابتدای الگوریتم مشخص می شوند.  $\rho_l$  بیانگر دانسیته مرکاپتان مایع است.  $d_n$  که بیانگر قطر نازل است را می توان  $1/5$  تا  $3$  میلی متر در نظر گرفت. برای مایع های با ویسکوزیته بالا (بزرگتر از  $10 \text{ kg/m.s}$ )؛

$$d_b = 2.312 \left[ \frac{\mu_l Q_G}{g\rho_l} \right]^{1/4} \quad (۲)$$

برای دبی های متوسط؛

$$Q_G > \left[ \frac{20(\sigma d_n)^5}{(g\Delta\rho)^2 \rho_l^3} \right]^{1/6}, \quad Re < 2100$$

داریم

$$d_b = \left[ \frac{72 \rho_l}{g \pi^2 \Delta\rho} \right]^{1/5} Q_G^{0.4} \quad (۳)$$

برای دبی های زیاد؛

$$10000 < Re < 50000$$

داریم

$$d_b = 0.0071 Re^{-0.05} \quad (۴)$$

معادله (۴) برای آب - هوا گزارش شده است. برای مرکاپتان - گاز رابطه ای وجود ندارد.  $Re$  عدد رینولدز جریان گاز است.

۴ - محاسبه سرعت حدی حباب [۱۱]

سرعت حدی حباب به سرعت یکنواخت حرکت حباب در سیال گفته می شود. که مقدار آن را می توان با نوشتن قانون دوم نیوتن برای یک حباب و لحاظ کردن نیروهای درگ، شناوری و ... بدست آورد.

$$V_t = \sqrt{\frac{4gd_b\Delta\rho}{3C_D\rho_l}} \quad (۵)$$

که  $C_D$  ضریب نیروی درگ مربوط به حباب است. مقدار آن را می توان از رابطه زیر بدست آورد.

مرکاپتان مشاهده می شود، با افزایش فشار گاز در بالادست، دانسیته گاز نیز افزایش یافته و در نتیجه افزایش دانسیته گاز، اختلاف دانسیته گاز و مایع مرکاپتان کم شده و در نهایت سرعت حدی حباب گاز در درون مایع کاهش خواهد یافت. بنابراین افزایش فشار گاز موجب افزایش دبی جرمی گاز مورد نیاز خواهد شد.

در شکل ۶ تاثیر دمای گاز در بالادست سیستم ماده بودارکننده بر روی نرخ جریان جرمی گاز مورد نیاز برای سیستم بودارکننده نشان داده شده است. چنانچه مشاهده می شود با افزایش دما، نرخ جریان جرمی گاز نیز زیاد می شود. نرخ افزایش در دماهای بالا بسیار بیشتر از دماهای پایین است.

تاثیر قطر نازل و تعداد نازل بر روی نرخ جریان جرمی گاز مورد نیاز برای سیستم بودارکننده، به ترتیب در شکل های ۷ و ۸ نشان داده شده است. چنانچه در شکل ۶ نشان داده شده است، در مقادیر مختلف فشار گاز در بالادست، افزایش قطر نازل تاثیر چندانی بر روی نرخ جریان جرمی گاز مورد نیاز برای سیستم بودارکننده نخواهد داشت. چنانچه در رابطه ۱ قابل مشاهده است، با توجه به اینکه تغییرات قطر نازل بسیار کم و تقریباً برابر یک میلی متر است، و همچنین قطر حباب وابسته به توان یک سوم قطر نازل است، بنابراین قطر حباب ها تغییر محسوسی نداشته و در نتیجه آن نرخ جریان جرمی گاز نیز تقریباً ثابت است. همچنین نتایج نشان داده شده در شکل ۸، بیانگر این است که افزایش تعداد نازل ها تاثیر چندانی بر روی نرخ جریان جرمی گاز مورد نیاز ندارد. از آنجا که مقدار دبی جرمی مرکاپتان مورد نیاز برای دبی جرمی گاز مصرفی ثابت است، بنابراین افزایش یا کاهش تعداد نازل ها تاثیری بر روی نرخ جریان جرمی گاز مورد نیاز ندارد.

### نتیجه گیری

در مقاله حاضر از یک روش جدید با استفاده از ترکیب اجکتور به سیستم بودارکننده کنارگذر به منظور بودار کردن گاز طبیعی در ایستگاه های شهری استفاده شده است. از اجکتور برای رفع مشکل اصلی سیستم کنارگذر و توسعه این سیستم بعنوان یک سیستم ارزان بهره برده شده است. عملکرد سیستم مذکور با استفاده از مدل سازی ریاضی مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج بدست آمده از مدل سازی نشان می دهد که قطر نازل و تعداد نازل تاثیر چندانی بر روی نرخ جرمی جریان گاز مورد نیاز برای سیستم بودارکننده ندارد. اما نرخ جرمی جریان گاز مورد نیاز برای سیستم بودارکننده متأثر از فشار گاز و دمای گاز در بالادست سیستم بودارکننده است.

و غلظت متوسط در حباب گاز به صورت تابعی از زمان به صورت زیر به دست می آید.

$$\frac{\bar{C}_l - C_0}{C_{ls}} = 1 - \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \exp(-D_{lg} \left(\frac{n\pi}{R}\right)^2 t) \quad (11)$$

همانطور که در معادله فوق مشاهده می شود برای محاسبه غلظت متوسط ماده بودارکننده در حباب گاز نیاز است که سه پارامتر قطر حباب، ضریب نفوذ و زمان تماس معلوم باشد.

$C_0$  غلظت اولیه درون حباب ( $C_0 = 0$ )،  $C_s$  غلظت اشباع ( $C_s = 0.4 \text{ ppm}$ )،  $D$  ضریب نفوذ مایع بودارکننده در گاز،  $t$  مدت زمان تماس و  $R$  شعاع حباب می باشد. این مقادیر بصورت زیر در نظر گرفته شده است. ضریب نفوذ یک ماده (گاز) در یک حلال (مایع)، براساس مدل ترکیبی استوکس-انیشتمین بصورت زیر بدست می آید.

$$D_{AB} = \frac{k_B T}{6\pi\mu_B R_A} \quad (12)$$

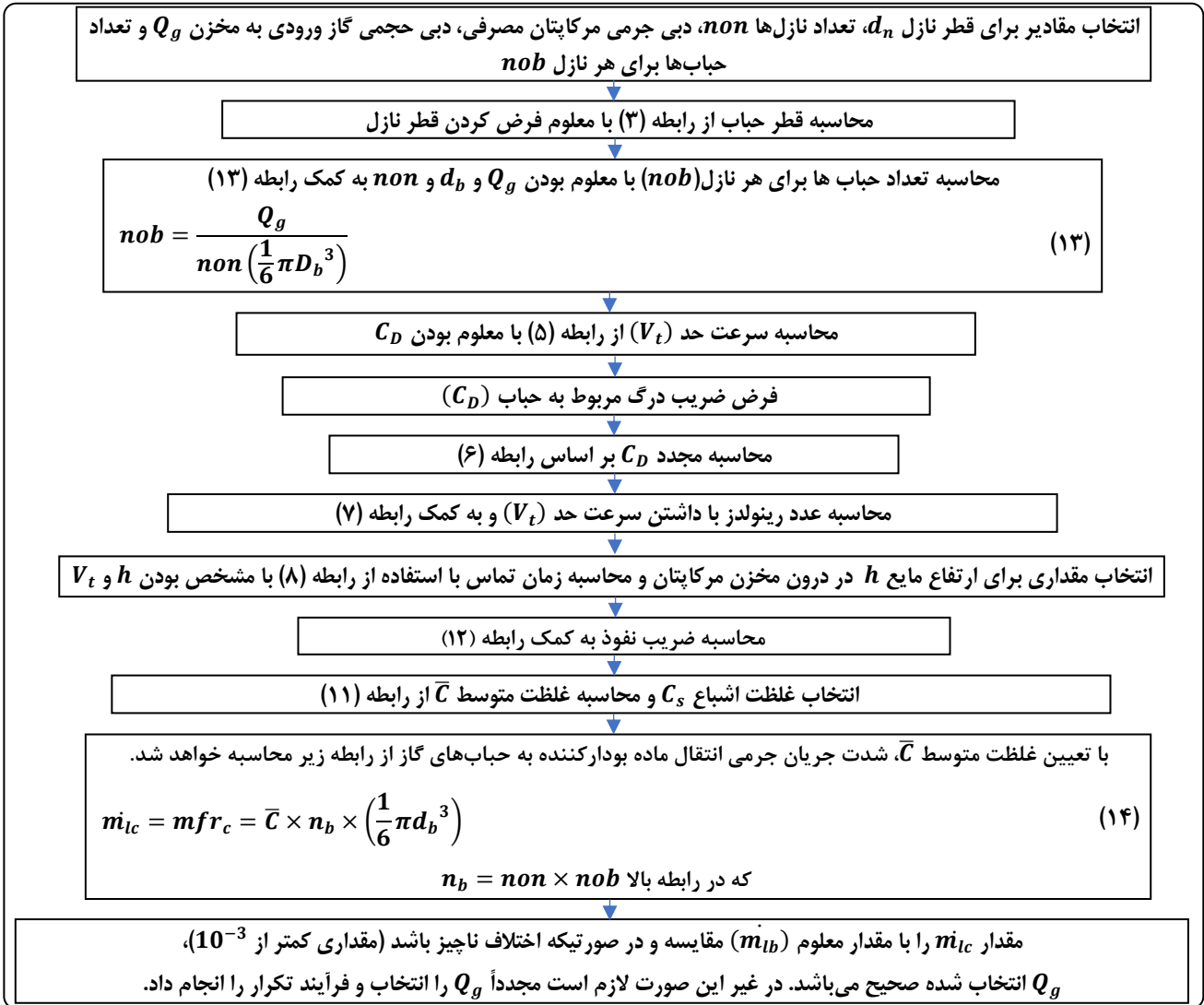
در رابطه بالا،  $k$  ثابت بولتزمن ( $k = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$ )،  $T$  دمای مطلق بر حسب کلوین،  $\mu_B$  ویسکوزیته حلال و  $R_A$  شعاع مولکول نفوذ کننده است.

در نهایت از الگوریتم نشان داده شده در شکل ۴ برای مدل سازی این سیستم جدید بودارکننده استفاده شده است [۱۳].

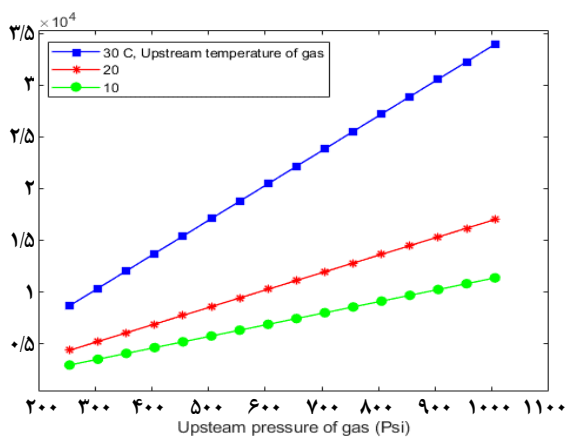
### نتیجه ها و بحث

در این مقاله برای یک ایستگاه نمونه، مدل سازی سیستم ترکیبی کنارگذر و اجکتور انجام گرفته است. بر اساس الگوریتم شرح داده شده در این مقاله، کد محاسباتی و شبیه سازی در نرم افزار متلب نوشته شده است. تاثیر برخی از پارامترهای مهم نیز بر روی میزان گاز زیرکش شده جهت ورود به مخزن مرکاپتان و جذب مقدار مورد نیاز از ماده بودارکننده متناسب با شرایط، انجام گرفته است. پارامترهای مورد بررسی عبارتند از فشار گاز زیرکش شده (فشار در بالادست)، دبی جرمی ماده بودارکننده، دمای گاز زیرکش شده (دما در بالادست)، قطر نازل و تعداد نازل.

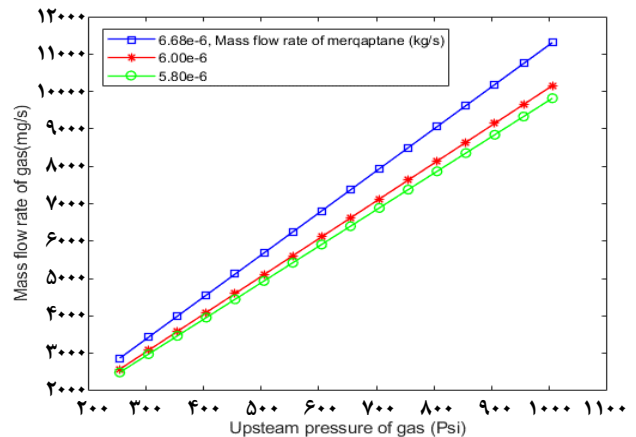
در شکل ۵ تاثیر فشار گاز در بالادست اجکتور بر روی نرخ جرمی جریان گاز مورد نیاز برای سیستم بودارکننده نشان داده شده است. مقادیر برای سه مقدار دبی جرمی ماده بودارکننده ارائه شده است. چنانچه نتایج نشان می دهد، با افزایش فشار گاز در بالادست سیستم بودارکننده، مقدار دبی جرمی گاز مورد نیاز سیستم زیاد می شود. همچنین هرچه نرخ جریان جرمی ماده بودارکننده افزایش یابد، نرخ جریان جرمی گاز مورد نیاز برای سیستم بودارکننده نیز افزایش می یابد. چنانچه در روابط مربوط به حرکت حباب گاز در مایع



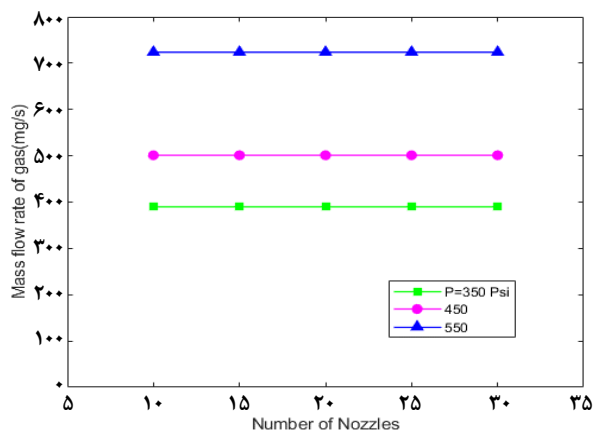
شکل ۴ - الگوریتم شبیه سازی سیستم ترکیبی بودارکننده گاز طبیعی



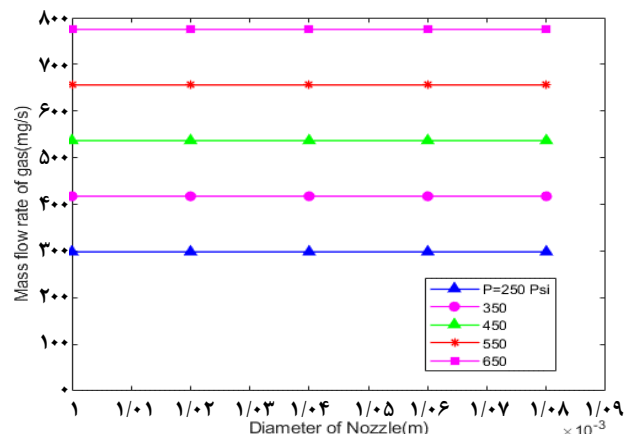
شکل ۶ - تغییرات نرخ جرمی جریان گاز مورد نیاز برای سیستم بودارکننده بر حسب فشار گاز در بالادست اجکتور برای مقادیر مختلف دمای گاز



شکل ۵ - تغییرات نرخ جرمی جریان گاز مورد نیاز برای سیستم بودارکننده بر حسب فشار گاز در بالادست اجکتور برای مقادیر مختلف دبی جرمی ماده بودارکننده



شکل ۸ - تغییرات نرخ جرمی جریان گاز مورد نیاز برای سیستم بودار کننده بر حسب تعداد نازل برای مقادیر مختلف فشار گاز



شکل ۷ - تغییرات نرخ جرمی جریان گاز مورد نیاز برای سیستم بودار کننده بر حسب قطر نازل برای مقادیر مختلف فشار گاز

## سپاس‌گزاری

از همکاری‌ها و زحمات همکاران در واحد پژوهش شرکت گاز استان کهگیلویه و بویراحمد، آقایان مهندس ریحان بهادر، مهندس شجاع الدین جهانبازی و مهندس روزبه کرمی تقدیر و سپاس‌گزاری می‌گردد.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۲/۱۷؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۹/۲۱

## مراجع

- [1] Johannes Fink, "Petroleum Engineer's Guide to Oil Field Chemicals and Fluids", Elsevier Inc., (2015).
- [2] Tiefeng W., Jinfu W., Numerical Simulations of Gas-Liquid Mass Transfer in Bubble Columns with a CFD-PBM Coupled Model, *Chemical Engineering Science*, **62**: 7107-7118 (2007).
- [3] Chutian X., Tiefeng W., Jinfu W., Experimental Study and Numerical Simulation with a Coupled CFD-PBM Model of the Effect of Liquid Viscosity in a Bubble Column, *Chemical Engineering Science*, **95**: 313-322 (2013).
- [4] Negaresh M., Farrokhnia M., Mehranbod N., Modeling and Control of Natural Gas Bypass Odorizer, *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, **50**: 339-350 (2018).
- [5] Poživil J., Use of Expansion Turbines in Natural Gas Pressure Reduction Stations, *Acta Montanistica Slovaca*, **9(3)**: 258-260 (2004).
- [6] Z.D. Li, Q.L. Cheng, Y.W. Chen, J.D. Wei, L.L. Lv, H. Wu, Y. Liu, Electric Power Generation Technology of Natural Gas Pressure Reduction: Insights from Black Box-Gray Box Hierarchical Exergy Analysis and Evaluation Method, *Journal of Petroleum Science*, **19**: 329-338 (2022).
- [7] <https://www.gasodorizer.com>

- [8] Smith J.M., Van Ness H.C., Abbott M., Swihart M., "Introduction to Chemical Engineering Thermodynamics", McGrawHill, (2001).
- [9] Mokhatab S., Poe W.A., Mak J.Y., "Handbook of Natural Gas Transmission and Processing", Elsevier, (2015).
- [10] Sohrab Z., Alireza B., "Shale Oil and Gas Handbook", Elsevier, (2017).
- [11] Treybal R.E., "Mass Transfer Operations", McGrawHill, (1980).
- [12] Fair J.R., "Gas Absorption and Gas-Liquid System Design, Section 14", Perry's Chemical Engineers' Handbook, McGrawHill, (1999).
- [13] Wojciech J.K., "Technical and Economic Evaluation of the Natural Gas Odorizing Process - the Case of Poland", Rynek Energii, (2009).