

تعیین دبی نشتی گاز از لوله آسیب‌دیده با در نظر گرفتن معادله حالت AGA

علیرضا جابری خسروشاهی
سیامک حسین پور*
نوراله نورالهی بسطام

دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز، ایران
دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز، ایران
رئیس مهندسی گاز، اداره گاز استان آذربایجان شرقی، ایران

چکیده

در این تحقیق نتایج مدلسازی نشت گاز از لوله آسیب‌دیده در حالت پایا، یک‌بعدی و آدیاباتیک با احتساب خواص گاز واقعی با در نظر گرفتن معادله حالت AGA ارائه شده و اختلاف آن با حالتی که گاز کامل فرض گردد مورد بررسی قرار گرفته است. آسیب‌دیدگی لوله به دو صورت شکست کامل و سوراخ در لوله در نظر گرفته شده است. هدف به‌دست آوردن دبی گاز خروجی از محل آسیب‌دیده در حالت گاز واقعی و مقایسه آن با حالت گاز کامل می‌باشد. برای رسیدن به این هدف، روش‌های انتگرالی و دیفرانسیلی برای حل معادلات حاکم با اعمال خواص گاز واقعی بررسی شده و کد کامپیوتری با زبان برنامه‌نویسی Matlab برای هر دو روش نوشته شده است. از بررسی‌های دو روش نتیجه شده است که برای در نظر گرفتن تغییرات ضریب تراکم‌پذیری در طول لوله باید معادلات به روش دیفرانسیلی حل گردند. لوله آسیب‌دیده در خطوط انتقال گاز بین شهری، خطوط شبکه تغذیه گاز و خطوط شبکه توزیع گاز در داخل شهر در نظر گرفته شده است. نتایج نشان می‌دهد در خطوط انتقال درصد اختلاف دبی جرمی خروجی از محل آسیب‌دیده در حالت گاز کامل نسبت به گاز واقعی حداکثر ۹/۲۶٪- می‌باشد و باید از خواص گاز واقعی برای شبیه‌سازی جریان لوله آسیب‌دیده در این خطوط استفاده کرد ولی در خطوط شبکه تغذیه و توزیع این اختلاف به ترتیب ۱/۶۷٪- و ۰/۴۱٪- می‌باشد و می‌توان در این خطوط از فرض گاز کامل برای شبیه‌سازی استفاده کرد. همچنین نتایج نشان می‌دهد در سوراخ‌های کوچک می‌توان از فرض ثابت ماندن ضریب تراکم‌پذیری برای تعیین دبی خروجی استفاده کرد.

کلمات کلیدی: نشت گاز، شکست خط لوله گاز، گاز واقعی، معادله حالت AGA.

Determination of Gas Leakage Rate from Damaged Pipeline Considering AGA Equation of State

A. Jaberi Khosroshahi
S. Hossainpour
N. Noorolahi Bastam

Department of Mechanical Engineering, Sahand University of Technology, Tabriz, Iran
Department of Mechanical Engineering, Sahand University of Technology, Tabriz, Iran
Head of Gas Engineering Office, NIGC East Azerbaijan, Tabriz, Iran

Abstract

This paper presents simulation results of gas leakage from damaged gas pipeline in steady-state, one dimensional and adiabatic flow with considering AGA equation of state. Damaged pipeline are considered as either complete failure or hole in the pipeline wall. Aim is to get the leaked gas flow rate from the damaged area with real gas properties and compare it with perfect gas. For this purpose, integral and differential methods for solving the governing equations with considering real gas properties were investigated and the result show that for considering variable compressibility factor along the pipeline, equations should be solved by the differential method. Damaged pipeline is considered in transmission line, Supply and distribution network. The results show that in the transmission line the predicted leaked gas mass flow rate using the perfect gas deviates from the real gas by -9.26% and then real gas properties should be used in simulations. But in supply and distribution networks the deviations are respectively -1.67% and -0.41% and then perfect gas properties can be used in simulations.

Keywords: Gas leakage, Gas pipeline failure, Real gas, AGA equation of state.

۱- مقدمه

خواهد رسید. به‌منظور پیش‌بینی حوادث ناشی از شکست لوله و برآورد هزینه‌های تلف شده، به دست آوردن دبی گاز خروجی در حالت پایدار از اهمیت زیادی برخوردار است [۱].

با توجه به بالا بودن سرعت جریان گاز در لوله آسیب‌دیده، وسایل اندازه‌گیری متداول قادر به محاسبه میزان گاز رها شده نمی‌باشند. لذا برای محاسبه میزان گاز رها شده بایستی از مدل‌های ریاضی مبتنی بر قوانین حاکم بر دینامیک گازها استفاده کرد و با مدل کردن ناحیه شکست به‌صورت‌های مختلف مشخصات سیال را هنگام خروج از این ناحیه به‌دست آورد.

خطوط لوله ایمن‌ترین و راحت‌ترین وسیله برای انتقال گازهای خطرناک مانند گاز طبیعی می‌باشند. با این وجود این خطوط می‌توانند در معرض آسیب‌هایی ناشی از خوردگی و عوامل مکانیکی خارجی قرار بگیرند. در اثر این آسیب‌دیدگی‌ها، گاز داخل لوله که تحت فشار بالا قرار دارد به سمت ناحیه کم‌فشار بیرون جریان خواهد یافت. در برخی موارد، سیستم‌های کنترلی از طریق شیرهای موجود در خطوط انتقال از ادامه انتقال گاز جلوگیری کرده و گاز باقی مانده در لوله به‌صورت گذرا از لوله خارج می‌شود. اما در مواردی که چنین شیرهای کنترلی موجود نباشند، جریان گاز پس از مدتی از حالت گذرا به حالت دائمی

منتیل و همکارانش در سال ۱۹۹۸ یک مدل ریاضی برای محاسبه مقدار گاز خارج شده از سوراخ ایجاد شده در لوله برای حالت گاز کامل در فشارهای پایین و متوسط ارائه کرده‌اند [۲]. آنها برای ساده‌سازی مدل، گرمای ویژه در فشار ثابت را ثابت، جریان در ناحیه خروج گاز را به‌صورت جریان آیزنتروپیک، جریان داخل لوله را به‌صورت جریان آدیاباتیک و همچنین جریان را به‌صورت یک‌بعدی در نظر گرفته و فرض کرده‌اند کل گاز جریان یافته داخل لوله از سوراخ خارج می‌شود. سوراخ موجود را شبیه یک اوریفیس با قطر متغیر در نظر گرفته و به این نتیجه رسیده‌اند که مدل پیشنهادی در قطرهای کوچکتر با مدل سوراخ^۱، که می‌توان لوله را شبیه یک مخزن در نظر گرفت که در حین خروج گاز، فشار داخل مخزن تغییر نمی‌کند، منطبق می‌باشد و در قطرهای بزرگتر مدل پیشنهادی منطبق بر مدل شکست کامل لوله^۲ می‌باشد. یوها و همکارانش در سال ۲۰۰۳ مدل و فرضیات پیشنهادی توسط منتیل را با اعمال ضریب تراکم‌پذیری ثابت ۰٫۹ در معادله حالت، برای فشارهای بالا بررسی کرده‌اند [۱]. جو و همکارانش در سال ۲۰۰۳ یک مدل ساده صریح برای محاسبه گاز خارج شده از سوراخ در لوله‌ی حاوی گاز خطرناک پرفشار با استفاده از معادله حالت گاز ایده‌آل ارائه کرده و با مدل تجربی به‌دست آمده از حادثه واقعی آن را اعتبارسنجی کرده‌اند [۳]. آنها سوراخ را در یک لوله‌ی بسته که توسط یک نازل همگرا به یک مخزن وصل می‌باشد در نظر گرفته و جریان را در نازل و سوراخ به‌صورت جریان آیزنتروپیک و جریان در لوله را به‌صورت جریان آدیاباتیک در نظر گرفته‌اند، آنها به این نتیجه رسیده‌اند که مدل ساده صریح پیشنهادی از مدل تئوری نرخ تخلیه گاز را کمی بیشتر نشان می‌دهد. لائو و همکارانش در سال ۲۰۰۶ با تغییراتی در مدل پیشنهادی یانگ، یک فرمول ساده صریح جدید با خطای کمتر برای محاسبه نرخ جریان خروجی گاز از سوراخ ارائه کرده‌اند [۴]. کوستووسکی و همکارش در سال ۲۰۱۲ به بررسی جریان در لوله‌های آسیب‌دیده شبکه توزیع گاز طبیعی پرداخته‌اند [۵]. آنها فرض کرده‌اند کل گاز جریان یافته داخل لوله از سوراخ خارج می‌شود. آنها جریان داخل لوله را در حالت‌های جریان دما ثابت و جریان آدیاباتیک برای دو حالت گاز کامل و گاز واقعی شبیه‌سازی کرده و اثر ضریب تخلیه و مدل جریان را در دبی خروجی گاز مورد تحلیل قرار داده‌اند. آنها برای مدل کردن حالت گاز واقعی از روابط تقریبی استفاده کرده‌اند تا معادلات حاکم به‌صورت تکراری و به روش انتگرالی قابل حل باشند و برای به‌دست آوردن ضریب تراکم‌پذیری از روش بندیک-وب-روبین^۳ استفاده کرده‌اند و به این نتیجه رسیده‌اند که در فشار متوسط، تفاوت بین مدل گاز کامل و گاز واقعی قابل صرف نظر کردن می‌باشد و می‌توان برای سادگی در این حالت از مدل گاز کامل استفاده کرد ولی برای فشارهای بالا این تقریب صحیح نمی‌باشد.

در اکثر کارهای اشاره شده خواص گاز به‌صورت گاز کامل و معادله حالت گاز به‌صورت ایده‌آل در نظر گرفته شده است. با توجه به اینکه در فشار بالا مولکول‌های گاز بسیار به هم نزدیک هستند، نیروهای بین مولکولی بسیار مهم و قابل توجه می‌باشند و استفاده از فرض گاز کامل و معادله حالت گاز ایده‌آل می‌تواند خطای قابل توجهی در نتایج ایجاد

نماید و لذا بایستی خواص گاز را به‌صورت گاز واقعی و توسط معادله حالت‌های دقیق‌تر در مدلسازی‌ها در نظر گرفت [۶]. همچنین در کارهایی که خواص گاز را به‌صورت گاز واقعی در نظر گرفته‌اند، به دلیل استفاده از روش انتگرالی برای حل معادلات حاکم، مجبور به اعمال فرضیات و یا استفاده از روابط تقریبی در معادلات حاکم بوده‌اند.

با توجه به اهمیت گاز طبیعی در جهان و ارزش مادی آن، در این تحقیق دبی خروجی از سوراخ ایجاد شده در لوله‌های گاز با در نظر گرفتن خواص گاز به‌صورت گاز واقعی و با استفاده از معادله حالت AGA به‌دست آمده و درصد اختلاف آن با حالت گاز کامل و حالت گاز واقعی با فرض ضریب تراکم‌پذیری ثابت، برای فشارهای مختلف خط لوله سنجیده شده است. همچنین با توجه به محدودیت‌های روش انتگرالی در حل معادلات و زمان‌بر و پیچیده بودن روش حل دیفرانسیلی، محدوده کاربرد هر یک از روش‌ها در اعمال معادله حالت AGA و استفاده از خواص گاز واقعی نشان داده شده است.

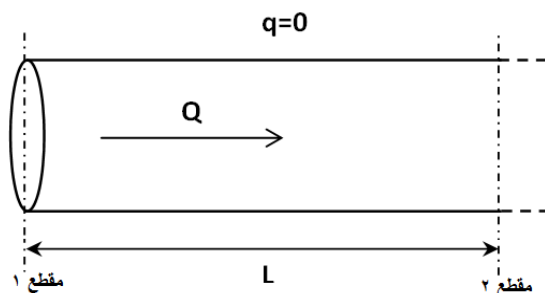
۲- مبانی و روش‌ها

۲-۱- شبیه‌سازی جریان گاز در لوله آسیب‌دیده

جریان گاز داخل لوله به‌صورت یک سیال تراکم‌پذیر و یک‌بعدی و با اعمال تنش برشی در دیواره در نظر گرفته شده است. طرح‌واره جریان گاز در لوله بین دو مقطع ۱ و ۲ به‌صورت شکل ۱ می‌باشد.

در حالت کلی، جریان گاز داخل لوله به‌صورت جریان آدیاباتیک و یا جریان دما ثابت بررسی می‌شود. مدل آدیاباتیک برای آنالیز جریان با تغییرات قابل توجه انرژی جنبشی و مدل دما ثابت برای آنالیز جریان با تغییرات ناچیز انرژی جنبشی به کار می‌رود. بسیاری از فرآیندهای واقعی بین دو حالت فوق رفتار می‌کنند، با این وجود در بیشتر موارد به‌خصوص در لوله‌های طویل این دو فرآیند نتایج مشابهی را ایجاد می‌کنند [۱ و ۵]. هنگام نشت گاز برای اینکه مدل دما ثابت حاکم باشد و دمای گاز ثابت باقی بماند باید گرمای بی‌نهایت به گاز داده شود، به این دلیل هنگام نشت گاز از لوله مدل مناسب برای این فرآیند مدل آدیاباتیک می‌باشد.

معادلات بقای جرم، بقای مومنوم و بقای انرژی داخل لوله برای حالت پایا، یک‌بعدی و آدیاباتیک با سطح مقطع ثابت به‌ترتیب به‌صورت روابط (۱)، (۲) و (۳) می‌باشند. همچنین معادله حالت به‌صورت رابطه (۴) تعریف شده است [۶].



شکل ۱- طرح‌واره جریان گاز در لوله

¹ Hole Model

² Pipe Model

³ Benedict-Webb-Rubin

در این رابطه B ضریب دوم ویرال، ρ_m چگالی مولار، ρ_r چگالی کاهیده، b_n, c_n, k_n ضرایب ثابت پارامتری، C_n^* یک ضریب تابع دمای گاز و ترکیبات گاز طبیعی می باشد.

چگالی مولار، طبق رابطه (۸) به دست می آید.

$$\rho_m = P/ZRT \quad (۸)$$

چگالی کاهیده، طبق رابطه (۹) توسط ضریب K با چگالی مولار ارتباط پیدا می کند. K پارامتری تحت عنوان پارامتر اندازه مخلوط می باشد که توسط رابطه (۱۰) تعریف شده و از مشخصه های مربوط به ساختار شیمیایی اجزاء می باشد.

$$\rho_r = K^3 \rho_m \quad (۹)$$

$$K^5 = \left(\sum_{i=1}^N x_i K_i^{5/2} \right)^2 + 2 \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N x_i x_j (K_{ij}^5 - 1) (K_i K_j)^{5/2} \quad (۱۰)$$

در این رابطه K پارامتر اندازه، K_i و K_j به ترتیب پارامترهای مربوط به اندازه اجزاء i ام و j ام، K_{ij} پارامتر اندازه برهم کنش اجزای i و j و x_i و x_j به ترتیب کسر مولی اجزای i و j مخلوط گاز می باشند.

ضریب دوم ویرال، از رابطه (۱۱) به دست می آید که در این رابطه N تعداد اجزای موجود در مخلوط گاز می باشد.

$$B = \sum_{n=1}^{18} a_n T^{-u_n} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N x_i x_j B_{nij}^* E_{ij}^{u_n} (K_i K_j)^{3/2} \quad (۱۱)$$

در این رابطه پارامتر B_{nij}^* از رابطه (۱۲) به دست می آید که در آن، $a_n, u_n, g_n, q_n, f_n, s_n, w_n$ پارامترهای ثابت می باشند.

$$B_{nij}^* = (G_{ij} + 1 - g_n)^{g_n} \times (Q_i Q_j + 1 - q_n)^{q_n} \times (F_i^{1/2} F_j^{1/2} + 1 - f_n)^{f_n} \times (S_i S_j + 1 - s_n)^{s_n} \times (W_i W_j + 1 - w_n)^{w_n} \quad (۱۲)$$

در این رابطه Q_i و Q_j پارامترهای چهار قطبی، F_i و F_j پارامترهای دما بالا، S_i و S_j پارامترهای دو قطبی، W_i و W_j پارامترهای وابسته ساز برای اجزای i ام و j ام نام دارند که در حالت های مختلف برهم کنش ذرات نسبت به یکدیگر در مخلوط گاز، مقادیر آنها اعداد ثابت متفاوتی می باشند.

در روابط (۱۱) و (۱۲)، پارامترهای دودویی E_{ij} و G_{ij} که به ترتیب پارامتر دودویی موقعیت و پارامتر دودویی انرژی برای ضریب دوم ویرال نام دارند به ترتیب از روابط (۱۳) و (۱۴) به دست می آیند.

$$G_{ij} = G_{ij}^* (G_i + G_j) / 2 \quad (۱۳)$$

$$E_{ij} = E_{ij}^* (E_i E_j)^{1/2} \quad (۱۴)$$

در این روابط، E_i و E_j پارامترهای مشخصه انرژی، G_i و G_j پارامترهای موقعیت برای اجزای i ام و j ام نام دارند. همچنین پارامترهای G_{ij}^* و E_{ij}^* به ترتیب پارامتر دودویی برهم کنش برای جهت گیری و پارامتر دودویی برهم کنش انرژی برای ضریب دوم ویرال نام دارند.

ضریب C_n^* توسط رابطه (۱۵) به دست می آید.

$$\frac{d}{dx}(\rho u) = 0 \quad (۱)$$

$$\frac{d}{dx}(\rho u^2) + \frac{dP}{dx} + \frac{2\rho u^2 f}{D} = 0 \quad (۲)$$

$$\frac{dh}{dx} + \frac{d}{dx} \left(\frac{u^2}{2} \right) = 0 \quad (۳)$$

$$P = \frac{\rho ZRT}{M_w} \quad (۴)$$

در این روابط ρ چگالی سیال، u سرعت جریان، P فشار مطلق سیال، D قطر لوله، f ضریب اصطکاک، h انتالپی ویژه، Z ضریب تراکم پذیری، $\bar{R}$ ثابت عمومی گازها، T دمای مطلق سیال و M_w جرم مولی سیال می باشد.

برای به دست آوردن ضریب اصطکاک برای اعداد رینولدز بالای ۴۰۰۰، از رابطه کولبروک-وایت^۱ طبق رابطه (۵) استفاده شده است [۵].

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left(\frac{2.51}{Re \sqrt{f}} + \frac{\epsilon}{3.71D} \right) \quad (۵)$$

در این رابطه ϵ زبری لوله و Re عدد رینولدز می باشد که از رابطه (۶) به دست می آید.

$$Re = \frac{\rho u D}{\mu} \quad (۶)$$

در این رابطه μ لزجت دینامیکی سیال می باشد.

۱-۱-۲- تفاوت حالت های گاز واقعی و گاز کامل در معادلات بقاء

پارامترهایی که در معادلات بقاء باعث تفاوت بین گاز کامل و گاز واقعی می شوند، انتالپی ویژه در معادله بقای مومنتم و ضریب تراکم پذیری در معادله حالت می باشند.

۱-۲-۲- ضریب تراکم پذیری

زمانی که گاز کامل فرض شود، ضریب تراکم پذیری برابر عدد ثابت یک می باشد ولی برای حالت گاز واقعی، انجمن گاز آمریکا یک روش دقیق به نام AGA برای محاسبه ضریب تراکم پذیری گاز طبیعی مورد استفاده در خطوط انتقال و توزیع گاز زمانی که درصد مولی اجزاء گاز موجود باشد ارائه کرده است. این روش در حال حاضر روش پذیرفته شده جهانی برای تعیین دقیق حجم استاندارد گاز عبوری در مبادی خرید و فروش محسوب می شود. درصد خطای این روش برای محدوده قابل قبول اجزاء مولی گاز، در محدوده دمای بین ۲۶۳ و ۳۵۰ کلوین و محدوده فشار بین ۰ تا ۱۲ مگاپاسکال، ۱٪ ± می باشد. ضریب تراکم پذیری در معادله AGA به صورت رابطه (۷) تعریف می شود [۷].

$$Z = 1 + B\rho_m - \rho_r \sum_{n=13}^{18} C_n^* + \sum_{n=13}^{58} C_n^* (b_n - c_n k_n \rho_r^{k_n}) \rho_r^{b_n} \exp(-c_n \rho_r^{k_n}) \quad (۷)$$

¹ Colebrook-White

$$C_n^* = a_n(G + 1 - g_n)^{g_n} \times (Q^2 + 1 - q_n)^{q_n} \times (F + 1 - f_n)^{f_n} U^{u_n} T^{-u_n} \quad (15)$$

در این رابطه U پارامتر انرژی مخلوط، G پارامتر موقعیت مخلوط، Q پارامتر چهار قطبی مخلوط و F پارامتر دما بالای مخلوط می باشد که به ترتیب از روابط (۱۶)، (۱۷)، (۱۸) و (۱۹) به دست می آیند.

$$U^5 = \left(\sum_{i=1}^N x_i E_i^{5/2} \right)^2 + \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N x_i x_j (U_{ij}^5 - 1) (E_i E_j)^{5/2} \quad (16)$$

$$G = \sum_{i=1}^N x_i G_i + \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N x_i x_j (G_{ij}^* - 1) (G_i + G_j) \quad (17)$$

$$Q = \sum_{i=1}^N x_i Q_i \quad (18)$$

$$F = \sum_{i=1}^N x_i^2 F_i \quad (19)$$

U_{ij} در رابطه (۱۶) پارامتر دودویی برهم کنش برای انرژی مخلوط می باشد.

طبق روابط (۷) و (۸)، با معلوم بودن درصد مولی هر یک از اجزای گاز، دما و فشار مطلق گاز، مجهولات رابطه، چگالی مولار و ضریب تراکم پذیری می باشند. با جایگذاری ضریب تراکم پذیری از رابطه (۸) در رابطه (۷)، یک معادله برای فشار طبق رابطه (۲۰) به دست می آید. در این رابطه چگالی مولاری باید پیدا شود که فشار به دست آمده از رابطه (۲۰) با فشار مطلق ورودی مسئله اختلافی کوچکتر از 10^{-6} داشته باشد.

$$P = \rho_m \bar{R} T \left[1 + B \rho_m - \rho_r \sum_{n=13}^{18} C_n^* + \sum_{n=13}^{58} C_n^* (b_n - c_n k_n \rho_r^{k_n}) \rho_r^{b_n} \exp(-c_n \rho_r^{k_n}) \right] \quad (20)$$

پس از به دست آمدن چگالی مولار از رابطه (۲۰) با استفاده از روش حل تکراری، ضریب تراکم پذیری با جایگذاری فشار مطلق، دمای مطلق، چگالی مولار و ثابت عمومی گازها در رابطه (۲۱) به دست می آید.

$$Z = P / (\rho_m \bar{R} T) \quad (21)$$

۲-۱-۱-۲- آنتالپی ویژه

آنتالپی ویژه در حالت کلی به صورت رابطه (۲۲) تعریف می شود [۸].

$$dh = c_p dT - \frac{\bar{R} T^2}{M_w P} \left(\frac{\partial Z}{\partial T} \right)_P dP \quad (22)$$

ضریب c_p در این رابطه، با جایگذاری رابطه (۲۲) و معادله گیبس برای انرژی داخلی ارائه شده در رابطه (۲۳)، در رابطه $dh = du_e + P dv + v dP$ و با استفاده از رابطه $C_p / C_v = \gamma$ و معادله حالت، طبق رابطه (۲۴) به دست می آید.

$$du_e = c_v dT - \frac{PT}{Z} \left(\frac{\partial Z}{\partial T} \right)_P dv \quad (23)$$

$$c_p dT = \frac{\gamma \bar{R}}{M_w (\gamma - 1)} \left\{ \left[Z + T \left(\frac{\partial Z}{\partial T} \right)_P \right] dT + \frac{T^2}{P} \left[\left(\frac{\partial Z}{\partial T} \right)_P - \left(\frac{\partial Z}{\partial T} \right)_\rho \right] dP + \left[T + \frac{T^2}{Z} \left(\frac{\partial Z}{\partial T} \right)_\rho \right] dZ \right\} \quad (24)$$

در نتیجه با جایگذاری روابط فوق در رابطه (۲۲)، آنتالپی ویژه برای گاز واقعی به رابطه (۲۵) تبدیل می شود.

$$dh = \frac{\gamma \bar{R}}{M_w (\gamma - 1)} \left\{ \left[Z + T \left(\frac{\partial Z}{\partial T} \right)_P \right] dT + \frac{T^2}{P} \left[\frac{1}{\gamma} \left(\frac{\partial Z}{\partial T} \right)_P - \left(\frac{\partial Z}{\partial T} \right)_\rho \right] dP + \left[T + \frac{T^2}{Z} \left(\frac{\partial Z}{\partial T} \right)_\rho \right] dZ \right\} \quad (25)$$

در این روابط، c_p گرمای ویژه در فشار ثابت، C_v گرمای ویژه در حجم ثابت، γ نسبت گرمای ویژه، V حجم ویژه، S آنترپوی ویژه و u_e انرژی داخلی ویژه می باشد.

با ثابت فرض کردن ضریب تراکم پذیری، آنتالپی و نسبت گرمای ویژه در فشار ثابت برای حالت گاز کامل به دست می آید.

۲-۲- به دست آوردن معادلات حاکم درون لوله با روش انتگرالی

با انتگرال گیری از معادله بقای جرم بین مقاطع ۱ و ۲، این معادله به رابطه (۲۶) تبدیل می شود.

$$M_1 P_1 \sqrt{\frac{1}{Z_1 T_1}} = M_2 P_2 \sqrt{\frac{1}{Z_2 T_2}} \quad (26)$$

معادله بقای انرژی و مومنوم با جایگذاری آنتالپی از رابطه (۲۵)، به ترتیب به صورت روابط (۲۷) و (۲۸) به دست می آید.

$$dT = - \frac{\left[T + \frac{(\gamma-1)}{2} T M^2 + \frac{T^2}{2 \gamma Z} \left(\frac{\partial Z}{\partial T} \right)_P + \frac{T^2}{2 Z} \left(\frac{\partial Z}{\partial T} \right)_\rho \right]}{\left[Z + \frac{(\gamma-1)}{2} Z M^2 + \frac{T}{2 \gamma} \left(\frac{\partial Z}{\partial T} \right)_P + \frac{T}{2} \left(\frac{\partial Z}{\partial T} \right)_\rho \right]} dZ - \frac{\left[(\gamma-1) Z T M - \frac{T^2}{\gamma M} \left(\frac{\partial Z}{\partial T} \right)_P + \frac{T^2}{M} \left(\frac{\partial Z}{\partial T} \right)_\rho \right]}{\left[Z + \frac{(\gamma-1)}{2} Z M^2 + \frac{T}{2 \gamma} \left(\frac{\partial Z}{\partial T} \right)_P + \frac{T}{2} \left(\frac{\partial Z}{\partial T} \right)_\rho \right]} dM \quad (27)$$

$$\frac{4 f dx}{D} = \left\{ \frac{(1 + \gamma M^2) \left[(\gamma-1) Z M - \frac{T}{\gamma M} \left(\frac{\partial Z}{\partial T} \right)_P + \frac{T}{M} \left(\frac{\partial Z}{\partial T} \right)_\rho \right]}{\gamma M^2 \left[Z + \frac{(\gamma-1)}{2} Z M^2 + \frac{T}{2 \gamma} \left(\frac{\partial Z}{\partial T} \right)_P + \frac{T}{2} \left(\frac{\partial Z}{\partial T} \right)_\rho \right]} + \frac{2(1 - \gamma M^2)}{\gamma M^3} \right\} dM \quad (28)$$

برای انتگرال گیری از این معادلات بین مقاطع ۱ و ۲ لازم است تا پارامترهای $\left(\frac{\partial Z}{\partial T} \right)_P$ و $\left(\frac{\partial Z}{\partial T} \right)_\rho$ در روابط فوق برابر صفر باشند. شرط برقرار بودن هر سه شرط فوق، ثابت فرض کردن ضریب تراکم پذیری بین مقاطع ۱ و ۲ می باشد. برای گاز کامل این مقدار ثابت برابر یک و برای گاز واقعی این مقدار برابر ضریب تراکم پذیری متناظر با $(Z=1)$

$$\left(\frac{\partial Z}{\partial T}\right)_P = \frac{PZ}{Z^2 \bar{R}T + PA} \left[BB - \frac{A}{T} - K^3 \sum_{n=13}^{18} CC_n^* + \sum_{n=13}^{58} CC_n^* \left(b_n - c_n k_n \left(\frac{K^3 P}{Z \bar{R}T} \right)^{k_n} \right) \left(\frac{P}{Z \bar{R}T} \right)^{b_n-1} \times K^{3b_n} \exp \left(-c_n \left(\frac{K^3 P}{Z \bar{R}T} \right)^{k_n} \right) \right] \quad (33)$$

در این روابط A ، CC_n^* و BB به ترتیب از روابط (۳۴)، (۳۵) و (۳۶) به دست می‌آیند.

$$A = B - K^3 \sum_{n=13}^{18} C_n^* + \sum_{n=15}^{58} \left\{ \left[C_n^* \left(b_n - c_n k_n \left(\frac{K^3 P}{Z \bar{R}T} \right)^{k_n} \right) \left(\frac{K^3 P}{Z \bar{R}T} \right)^{b_n} \times \exp \left(-c_n \left(\frac{K^3 P}{Z \bar{R}T} \right)^{k_n} \right) \right] \left[- \frac{c_n k_n^2 K^{3k_n} \left(\frac{P}{Z \bar{R}T} \right)^{k_n-1}}{b_n - c_n k_n K^{3k_n} \left(\frac{P}{Z \bar{R}T} \right)^{k_n}} + \frac{b_n Z \bar{R}T}{P} - c_n k_n K^{3k_n} \left(\frac{P}{Z \bar{R}T} \right)^{k_n-1} \right] \right\} \quad (34)$$

$$CC_n^* = -a_n u_n (G + 1 - g_n)^{g_n} \times (Q^2 + 1 - q_n)^{q_n} \times (F + 1 - f_n)^{f_n} U^{u_n} T^{(-u_n-1)} \quad (35)$$

$$BB = \sum_{n=1}^{18} -a_n u_n T^{(-u_n-1)} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N x_i x_j B_{nij}^* E_{ij}^{u_n} (K_i K_j)^{3/2} \quad (36)$$

معادلات بقاء حاکم با در نظر گرفتن خواص گاز واقعی قابل تبدیل به روابط (۳۷)، (۳۸) و (۳۹) می‌باشند. این روابط در کنار تغییرات ضریب تراکم‌پذیری در طول لوله به دست آمده از رابطه (۳۱) معادلات حاکم در لوله را تشکیل می‌دهند.

$$P \frac{dM}{dx} + M \frac{dP}{dx} - \frac{1}{2} \frac{MP}{T} \frac{dT}{dx} - \frac{1}{2} \frac{MP}{Z} \frac{dZ}{dx} = 0 \quad (37)$$

$$\frac{dM}{dx} + \frac{M}{2T} \frac{dT}{dx} + \frac{M}{2Z} \frac{dZ}{dx} + \frac{1}{\gamma PM} \frac{dP}{dx} + \frac{2Mf}{D} = 0 \quad (38)$$

$$\left[Z + T \left(\frac{\partial Z}{\partial T} \right)_P + \frac{(\gamma-1)}{2} Z M^2 \right] \frac{dT}{dx} + \frac{T^2}{P} \left[\frac{1}{\gamma} \left(\frac{\partial Z}{\partial T} \right)_P - \left(\frac{\partial Z}{\partial T} \right)_P \right] \frac{dP}{dx} + \left[T + \frac{T^2}{Z} \left(\frac{\partial Z}{\partial T} \right)_P + \frac{(\gamma-1)}{2} T M^2 \right] \frac{dZ}{dx} + (\gamma-1) Z T M \frac{dM}{dx} = 0 \quad (39)$$

با صفر قرار دادن پارامترهای $\left(\frac{\partial Z}{\partial T}\right)_P$ ، $\left(\frac{\partial Z}{\partial T}\right)_P$ و $\frac{dZ}{dx}$ در نظر گرفتن $Z=1$ در روابط فوق، معادلات حاکم در لوله برای حالت گاز کامل به دست می‌آیند.

۴-۲- شرایط مرزی

زمانی که لوله دچار آسیب‌دیدگی شود، گاز داخل لوله از محل آسیب‌دیده به بیرون نشت می‌کند. نشت گاز از لوله بسته به نحوه آسیب‌دیدگی، می‌تواند به صورت نشت در اثر شکست کامل لوله و یا در

میانگین فشار و دمای بین مقاطع ۱ و ۲ در نظر گرفته شده است ($Z = Z_{av}$).

با انتگرال‌گیری از این روابط بین مقاطع ۱ و ۲، معادلات بقای انرژی و مومنتوم حاکم در لوله به ترتیب به صورت روابط (۲۹) و (۳۰) به دست می‌آیند.

$$\frac{T_2}{T_1} = \frac{1 + \frac{\gamma-1}{2} M_1^2}{1 + \frac{\gamma-1}{2} M_2^2} \quad (29)$$

$$\frac{4fL}{D} = \frac{1}{\gamma} \left(\frac{1}{M_1^2} - \frac{1}{M_2^2} \right) + \frac{\gamma+1}{2\gamma} \times \ln \left(\frac{M_1^2}{M_2^2} \cdot \frac{1 + \frac{\gamma-1}{2} M_2^2}{1 + \frac{\gamma-1}{2} M_1^2} \right) \quad (30)$$

در روابط فوق، L فاصله بین محل نشت و مقطع ورودی، M ماک جریان و اندیس ۱ و ۲ به ترتیب مربوط به مقاطع ۱ و ۲ می‌باشند.

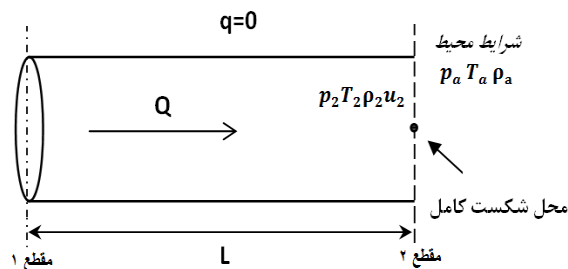
طبق معادلات بقاء فوق، زمانی که ضریب تراکم‌پذیری در طول لوله ثابت فرض می‌شود، تأثیر مستقیم در معادلات ندارد. این ضریب فقط به صورت غیرمستقیم در ضریب اصطکاک معادله مومنتوم اثر می‌گذارد. روند این تأثیر به ترتیب به صورت تأثیر ضریب تراکم‌پذیری در چگالی طبق رابطه (۴)، تأثیر چگالی بر عدد رینولدز طبق رابطه (۶) و در نهایت تأثیر عدد رینولدز بر ضریب اصطکاک طبق رابطه (۵) می‌باشد.

۳-۲- به دست آوردن معادلات حاکم درون لوله با روش دیفرانسیلی

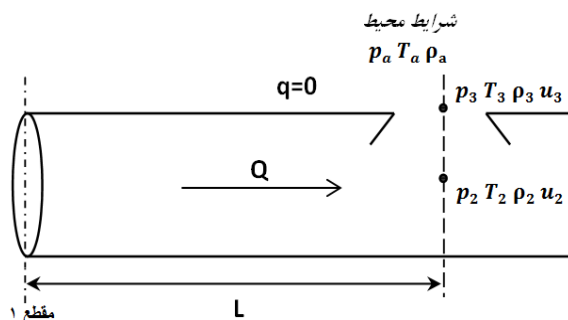
برای خلاصی از محدودیت‌های روش حل انتگرالی و اعمال تغییرات ضریب تراکم‌پذیری در طول لوله در معادلات حاکم، این معادلات باید به صورت دیفرانسیلی حل گردند. بدین منظور روابطی برای تغییرات Z در طول لوله و تغییرات Z بر حسب دما در دو حالت چگالی ثابت و فشار ثابت، با مشتق‌گیری از معادله ضریب تراکم‌پذیری تعریف شده در رابطه (۷)، به ترتیب به صورت روابط (۳۱) و (۳۲) به دست آورده شده‌اند.

$$\frac{dZ}{dx} = \frac{AZ}{Z^2 \bar{R}T + PA} \frac{dP}{dx} - \frac{Z}{Z^2 \bar{R}T + PA} \left[\frac{PA}{T} - Z \bar{R}T \left(\frac{\partial Z}{\partial T} \right)_P \right] \frac{dT}{dx} \quad (31)$$

$$\left(\frac{\partial Z}{\partial T} \right)_P = \frac{P}{Z \bar{R}T} \left[BB - K^3 \sum_{n=13}^{18} CC_n^* + \sum_{n=13}^{58} CC_n^* \left(b_n - c_n k_n \left(\frac{K^3 P}{Z \bar{R}T} \right)^{k_n} \right) \left(\frac{P}{Z \bar{R}T} \right)^{b_n-1} \times K^{3b_n} \exp \left(-c_n \left(\frac{K^3 P}{Z \bar{R}T} \right)^{k_n} \right) \right] \quad (32)$$



الف) طرحواره شکست کامل لوله



ب) طرحواره سوراخ در لوله

شکل ۲- طرحواره لوله آسیب دیده،

الف) شکست کامل لوله، ب) سوراخ در لوله

در حالت صوتی، فشار، دما و چگالی مقطع ۳ به ترتیب از روابط (۴۶)، (۴۷) و (۴۸) و در حالت مادون صوت، سرعت، دما و چگالی این مقطع به ترتیب از روابط (۴۹)، (۵۰) و (۵۱) به دست می آیند.

$$P_3 = \left(\frac{2}{\gamma + 1} \right)^{\gamma/(\gamma-1)} P_2 \quad (46)$$

$$T_3 = \left(\frac{2}{\gamma + 1} \right) T_2 \quad (47)$$

$$\rho_3 = \left(\frac{2}{\gamma + 1} \right)^{1/(\gamma-1)} \rho_2 \quad (48)$$

$$M_3 = \frac{A_c}{A_{or}} \times M_2 \times \left(\frac{P_2}{P_a} \right) \times \sqrt{\frac{Z_3 T_3}{Z_2 T_2}} \quad (49)$$

$$T_3 = \left(\frac{P_a}{P_2} \right)^{(\gamma-1)/\gamma} T_2 \quad (50)$$

$$\rho_3 = \left(\frac{P_a}{P_2} \right)^{1/\gamma} \rho_2 \quad (51)$$

همچنین دبی جرمی خروجی از محل آسیب دیده در حالت شکست کامل با اعمال خواص گاز واقعی از رابطه (۵۲) و در حالت سوراخ برای حالت های صوتی و مادون صوت به ترتیب از روابط (۵۳) و (۵۴) به دست می آیند. برای تعیین دبی خروجی، ضریب تخلیه تجربی برابر یک در نظر گرفته شده است.

اثر سوراخ شدن لوله اتفاق بیافتد، تفاوت شبیه سازی جریان در این دو حالت، شرایط مرزی ناحیه خروجی می باشد.

طرحواره های شکست کامل لوله و سوراخ ایجاد شده در لوله به ترتیب به صورت قسمت های الف و ب شکل ۲ ارائه شده اند.

در حالت شکست کامل لوله، در صورتی که جریان داخل لوله دچار خفگی شود، فشار ورودی، دمای ورودی و ماخ خروجی شرایط مرزی موجود و ماخ ورودی، دمای خروجی و فشار خروجی شرایط مرزی مجهول می باشند و در غیر این صورت فشار ورودی، دمای ورودی و فشار خروجی شرایط مرزی موجود و ماخ ورودی، دمای خروجی و ماخ خروجی شرایط مرزی مجهول می باشند. ولی در حالت سوراخ در لوله، در هر دو حالت، فشار ورودی و دمای ورودی شرایط مرزی معلوم و فشار در مقطع ۲، دما در مقطع ۲، سرعت در مقطع ۲ و سرعت ورودی، شرایط مرزی مجهول می باشند. در حالت سوراخ در لوله فرض شده است بین مقاطع ۲ و ۳ شرط آیزنتروپیک برقرار می باشد و همچنین کل گاز عبوری از لوله از سوراخ خارج می شود. در حالت انتگرالی جهت ارتباط شرایط مرزی بین مقاطع ۲ و ۳، معادلات شرطی برای دو حالت صوتی و مادون صوت به ترتیب به صورت روابط (۴۰) و (۴۱) به دست آمده اند. همچنین برای حالت دیفرانسیلی، برای حالت صوتی، شرط مرزی سرعت در مقطع ۲ بر حسب عدد ماخ، به صورت رابطه (۴۲) و برای حالت مادون صوت، شرط مرزی فشار در مقطع ۲ به صورت رابطه (۴۳) به دست آمده است.

$$\frac{A_{or}}{A_c} P_2 \sqrt{\frac{\gamma M_w}{Z_3 R T_2} \left(\frac{2}{\gamma + 1} \right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma-1}}} = M_1 P_1 \sqrt{\frac{\gamma M_w}{Z_{av} R T_1}} \quad (40)$$

$$\frac{A_{or}}{A_c} P_2 \sqrt{\frac{2 M_w}{Z_3 R T_2} \frac{\gamma}{\gamma - 1} \left[\left(\frac{P_a}{P_2} \right)^{\frac{2}{\gamma}} - \left(\frac{P_a}{P_2} \right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma}} \right]} = M_1 P_1 \sqrt{\frac{\gamma M_w}{Z_{av} R T_1}} \quad (41)$$

$$M_2 = \left(\frac{d}{D} \right)^2 \sqrt{\frac{Z_2}{Z_3} \left(\frac{2}{\gamma + 1} \right)^{\frac{(\gamma+1)}{(\gamma-1)}}} \quad (42)$$

$$P_2 = P_a \left(1 + \frac{\gamma - 1}{2} M_3^2 \right)^{\frac{\gamma}{(\gamma-1)}} \quad (43)$$

در این روابط A_{or} مساحت سوراخ، A_c مساحت سطح مقطع لوله، اندیس ۳ مربوط به مقطع ۳ و اندیس a مربوط به اتمسفر و اندیس av مربوط به حالت میانگین بین مقاطع ۱ و ۲ می باشد.

با تعریف پارامترهای β و CPR به ترتیب به صورت روابط (۴۴) و (۴۵)، می توان صوتی یا مادون صوت بودن جریان به صورت زیر تعیین می شود [۵].

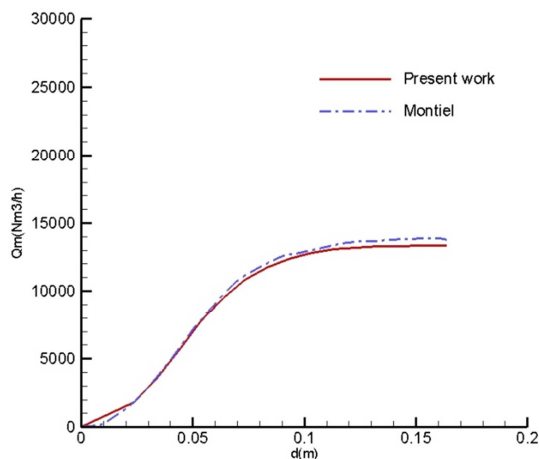
$$\begin{cases} \beta \leq CPR \rightarrow \text{صوتی} \\ \beta > CPR \rightarrow \text{مادون صوت} \end{cases}$$

$$\beta = \frac{P_a}{P_{2t}} \quad (44)$$

$$CPR = \beta_{crit} = \frac{P_a}{P_{2t_{crit}}} = \left(\frac{2}{\gamma + 1} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \quad (45)$$

برای مقایسه نتایج به دست آمده از روش انتگرالی و دیفرانسیلی در حالت گاز کامل، مطابق شکل ۴ به بررسی تغییرات دبی جرمی خروجی از محل آسیب دیده نسبت به قطر سوراخ در سطح فشار بالا برای هر دو روش پرداخته شده است. اختلاف حداکثری ۰/۰۰۲٪ بین آنها حاکی از تطابق نتایج به دست آمده از هر دو روش و در نتیجه صحت کد عددی نوشته شده برای روش دیفرانسیلی می باشد.

درصد اختلاف دبی جرمی خروجی حالت های گاز کامل و گاز واقعی با فرض ثابت ماندن ضریب تراکم پذیری در طول لوله نسبت به گاز واقعی برای سه قطر مختلف در سه سطح فشار در جدول ۲ ارائه شده است. به دلیل درصد اختلاف زیاد حالت های فوق در سطح فشار بالا، تغییرات دبی جرمی خروجی از مقطع آسیب دیده نسبت به قطر سوراخ در سطح فشار بالا در شکل ۵ برای مقایسه سه حالت گاز کامل، گاز واقعی با فرض ثابت ماندن ضریب تراکم پذیری در طول لوله و گاز واقعی نشان داده شده است.



شکل ۳- مقایسه نتیجه به دست آمده در این تحقیق با نتیجه منتیل

جدول ۱- درصد مولی اجزای تشکیل دهنده گاز طبیعی [۷]

کسر مولی	اجزاء تشکیل دهنده
۰/۰۰۶	CO ₂
۰/۰۰۳	N ₂
۰/۹۶۵	CH ₄
۰/۰۱۸	C ₂ H ₆
۰/۰۰۴۵	C ₃ H ₈
۰/۰۰۱	iso-C ₄ H ₁₀
۰/۰۰۱	n-C ₄ H ₁₀
۰/۰۰۰۵	iso-C ₅ H ₁₂
۰/۰۰۰۳	n-C ₅ H ₁₂
۰/۰۰۰۷	C ₆ H ₁₄

$$\dot{m} = \rho_1 u_1 A_c = \rho_2 u_2 A_c = M_1 P_1 A_c \sqrt{\frac{\gamma M_w}{R Z_1 T_1}} = M_2 P_2 A_c \sqrt{\frac{\gamma M_w}{R Z_2 T_2}} \quad (52)$$

$$\dot{m} = \rho_3 u_3 A_{or} = A_{or} P_2 \sqrt{\frac{\gamma M_w}{Z_3 R T_2} \left(\frac{2}{\gamma + 1} \right)^{\frac{\gamma + 1}{\gamma - 1}}} \quad (53)$$

$$\dot{m} = \rho_3 u_3 A_{or} = A_{or} P_2 \sqrt{\frac{2 M_w}{Z_3 R T_2} \frac{\gamma}{\gamma - 1} \left[\left(\frac{P_a}{P_2} \right)^{\frac{2}{\gamma}} - \left(\frac{P_a}{P_2} \right)^{\frac{\gamma + 1}{\gamma}} \right]} \quad (54)$$

با در نظر گرفتن $Z=1$ در روابط فوق، دبی خروجی حالت های مختلف برای حالت گاز کامل به دست می آید.

۲-۶- حل عددی

کدی با زبان برنامه نویسی Matlab برای شبیه سازی جریان داخل لوله برای حالت های گاز واقعی و گاز کامل نوشته شده است. در این کد برای به دست آوردن مجهولات در روش انتگرالی از روش تکراری دستور Matlab Fsolve استفاده شده و برای به دست آوردن مجهولات در روش دیفرانسیلی ابتدا معادلات حاکم در یک دستگاه به صورت پارامتری حل شده تا در هر معادله فقط مشتق یک پارامتر بر حسب X موجود باشد، سپس برای حل دستگاه معادلات دیفرانسیل توسط روش رانگ-کوتا-۴، از دستور Matlab Ode45 استفاده شده است.

۳- نتایج

جهت اعتبارسنجی کد عددی نوشته شده برای حل معادلات به روش انتگرالی در حالت گاز کامل در شکل ۳ به مقایسه دبی جرمی خروجی به دست آمده از این روش با نتیجه منتیل [۲] با اعمال فرضیات و شرایط مرزی در نظر گرفته شده توسط ایشان پرداخته شده است. شکل ۳ نشان دهنده صحت کد عددی برای روش انتگرالی می باشد.

در ادامه برای نشان دادن نتایج و مقایسه مدل های مختلف ارائه شده در تحقیق، فرض شده است یک لوله گاز با جنس پلی اتیلن (زبری لوله برابر ۱/۵۲۴ میکرومتر) و با قطر داخلی ۰/۵۰۸ متر (۲۰ اینچ) در فاصله ۱۰۰۰ متری از مقطع ورودی لوله آسیب دیده است. دما در ورودی لوله برابر ۲۸۸ کلوین، نسبت گرمای ویژه گاز طبیعی برابر ۱/۲۸ و لزجت دینامیکی گاز برابر 1.01×10^{-5} پاسکال-ثانیه در نظر گرفته شده است. همچنین کسر مولی اجزای تشکیل دهنده گاز طبیعی به صورت جدول ۱ فرض شده است.

در این تحقیق، خط لوله گاز در سه منطقه مختلف، خطوط انتقال گاز بین شهری^۲ (فشار بالا)، خطوط شبکه تغذیه گاز^۳ (فشار متوسط) و خطوط شبکه توزیع گاز در داخل شهر^۴ (فشار پایین) به ترتیب با فشار ورودی ۰/۴۱ (۶۰)، ۰/۱۷ (۲۵۰) و ۹/۳۱ (۱۳۵۰) مگاپاسکال (پوند بر اینچ مربع^۵) در نظر گرفته شده است.

^۱ Runge Kutta-4

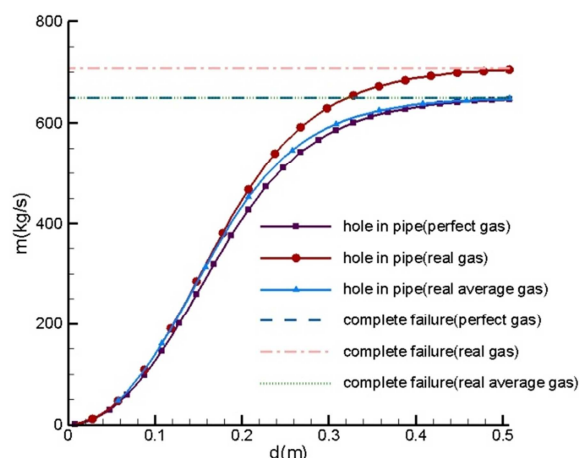
^۲ Gas Transmission Pipelines

^۳ Gas Supply Network

^۴ Gas Distribution Network

^۵ Pound Per Square Inch (psi)

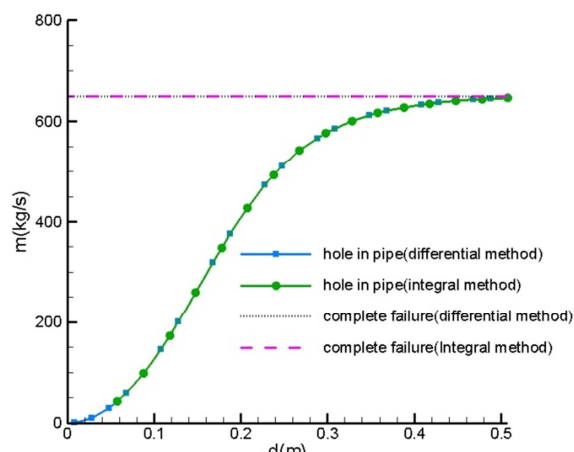
برای حالت گاز واقعی در حدود ۰/۵٪ می باشد مربوط به اختلاف شرایط مرزی دو حالت نسبت به یکدیگر است. با توجه به فرض انبساط آیزنتروپیک بین مقاطع ۲ و ۳، این اختلاف ناشی از اتلاف در اثر انبساط آیزنتروپیک می باشد.



شکل ۵- تغییرات دبی جرمی خروجی در سطح فشار بالا نسبت به قطر سوراخ

در شکل های ۷، ۸ و ۹ به ترتیب تغییرات سرعت، فشار و دما با افزایش قطر سوراخ برای حالت گاز واقعی در سطوح فشار مختلف بررسی شده است. خط چین در این شکل های نشان دهنده مرز بین جریان صوتی و مادون صوت می باشد. با توجه به شکل ۷، زمانی که جریان صوتی شده است ماخ مقطع ۲ با اینکه ماخ خروجی ثابت باقی مانده است؛ با افزایش قطر سوراخ به دلیل کاهش اتلاف انبساط آیزنتروپیک روند افزایشی داشته ولی پس از مادون صوت شدن جریان به دلیل کاهش ماخ خروجی، شیب افزایشی این روند کاهش یافته است. ماخ ورودی لوله نیز در هر دو حالت در قطرهای کوچکتر با افزایش قطر سوراخ روند افزایشی داشته ولی در قطرهای بزرگتر با افزایش قطر سوراخ تقریباً ثابت باقی مانده است.

با توجه به شکل ۸ و ۹ با افزایش قطر سوراخ به دلیل افزایش نسبت ماخ مقطع ۲ به مقطع ورودی، فشار و دما در مقطع ۲ روند کاهشی داشته و به دلیل ارتباط خطی بین فشار مقاطع ۲ و ۳ در حالت صوتی طبق رابطه (۴۶) و دمای این مقاطع طبق رابطه (۴۷)، فشار و دمای خروجی نیز کاهش پیدا کرده است. همچنین در حالت مادون صوت فشار خروجی به فشار اتمسفر رسیده ولی دمای خروجی به دلیل کاهش فشار مقطع ۲ طبق رابطه (۵۰) روند افزایشی به خود گرفته است. همچنین طبق شکل های ۸ و ۹، در سوراخ های کوچک، فشار و دمای مقطع ۲ نسبت به مقطع ورودی افت شدیدی نداشته است، بنابراین فشار و دما درون لوله ثابت باقی مانده و در نتیجه ضربه تراکم پذیری که تابعی از فشار و دما می باشد در طول لوله ثابت باقی مانده است. به این دلیل در سوراخ های کوچک، فرض گاز واقعی متوسط خطای ناچیزی نسبت حالت گاز واقعی برای تعیین دبی خروجی ایجاد کرده است.



شکل ۴- مقایسه دبی جرمی خروجی به دست آمده از طریق روش های انتگرالی و دیفرانسیلی در حالت گاز کامل در سطح فشار بالا

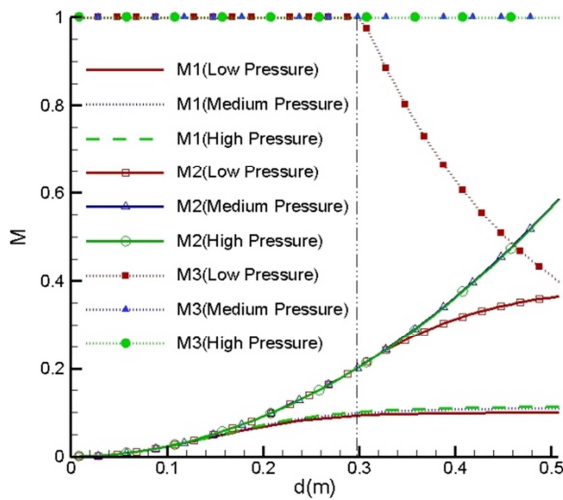
در ادامه تحقیق، گاز واقعی با فرض ثابت ماندن ضربه تراکم پذیری در طول لوله با نام گاز واقعی متوسط^۱ مشخص شده است. طبق جدول ۲، گاز واقعی متوسط در مقایسه با گاز کامل اختلاف کمتری نسبت به گاز واقعی دارد و با کوچک شدن سوراخ در لوله به دلیل کاهش اختلاف فشار و دمای مقطع ۲ نسبت به ورودی لوله، اختلاف بین گاز واقعی متوسط و گاز واقعی کمتر شده است. طبق این جدول، در سطوح فشار پایین و متوسط به دلیل اختلاف حالت گاز کامل نسبت به حالت گاز واقعی به ترتیب در حدود ۰/۴٪ و ۱/۶۲٪ در قطرهای مختلف و علی رغم کاهش این اختلاف در حالت گاز واقعی متوسط در سوراخ های کوچک و متوسط، به دلیل پیچیدگی روش AGA برای پیدا کردن ضربه تراکم پذیری در حالت گاز واقعی متوسط و همچنین پیچیدگی و زمان بر بودن استفاده از شکل دیفرانسیلی معادلات بقاء در حالت گاز واقعی، استفاده از خواص گاز کامل برای تعیین دبی خروجی از مقطع آسیب دیده در خطوط شبکه توزیع و تغذیه منطقی تر می باشد. در سطح فشار بالا، با کاهش قطر سوراخ در حالت گاز واقعی متوسط درصد اختلاف دبی خروجی با گاز واقعی کاهش یافته و از ۸/۱٪ به ۰/۱۵٪ رسیده است ولی در حالت گاز کامل با کاهش قطر سوراخ این اختلاف بیشتر شده و از ۸/۲۷٪ در قطر سوراخ برابر قطر لوله به ۹/۲۶٪ در قطرهای کوچک رسیده است. بنابراین به دلیل درصد اختلاف زیاد حالت گاز کامل در اندازه های مختلف سوراخ و گاز واقعی متوسط در سوراخ های متوسط و بزرگ نسبت به گاز واقعی فرض گاز کامل در شبیه سازی جریان خطایی زیادی در نتایج ایجاد کرده است. به دلیل استفاده از کد واحد برای تعیین دبی خروجی در خطوط مختلف گاز علی رغم درصد اختلاف کم گاز واقعی متوسط نسبت به گاز واقعی در سوراخ های کوچک برای تعیین دبی خروجی در خطوط انتقال گاز بین شهری باید از خواص گاز واقعی استفاده کرد.

طبق شکل ۶ که دبی خروجی از مقطع آسیب دیده لوله برای سطح فشار بالا در ناحیه مربوط به قطرهای بالا بزرگ نمایی شده است، دبی نشتی در حالت سوراخ در لوله زمانی که قطر سوراخ برابر قطر لوله باشد با حالت شکست کامل لوله اختلاف دارد. علت این اختلاف که

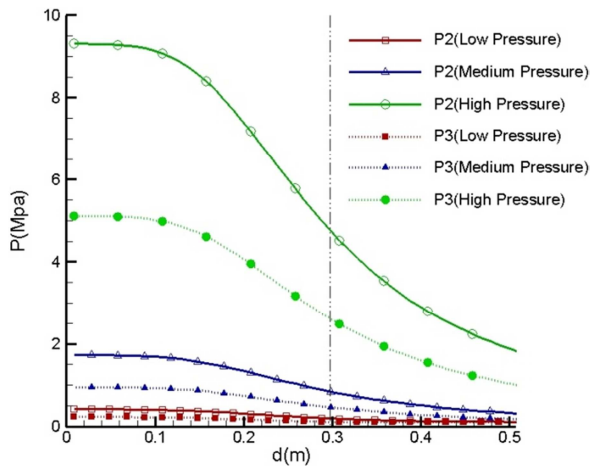
¹ Real Average Gas

جدول ۲- درصد اختلاف دبی خروجی از مقطع آسیب دیده حالت های گاز کامل و گاز واقعی متوسط نسبت به گاز واقعی در سوراخ های مختلف

قطر سوراخ ایجاد شده در لوله (متر)	گاز کامل نسبت به گاز واقعی			گاز واقعی متوسط نسبت به گاز واقعی		
	سطح فشار بالا	سطح فشار متوسط	سطح فشار پایین	سطح فشار بالا	سطح فشار متوسط	سطح فشار پایین
۰٫۵۱	-۰٫۸۲۷	-۰٫۱۶۷	-۰٫۰۴۱	-۰٫۸۱۱	-۰٫۱۶۲	-۰٫۰۴۱
۰٫۲۶	-۰٫۸۴۲	-۰٫۱۶۵	-۰٫۰۴۴	-۰٫۵۱۵	-۰٫۱	-۰٫۰۲۵
۰٫۰۶	-۰٫۹۲۶	-۰٫۱۶	-۰٫۰۳۸	+۰٫۰۱۵	+۰٫۰۲۴	+۰٫۰۰۶



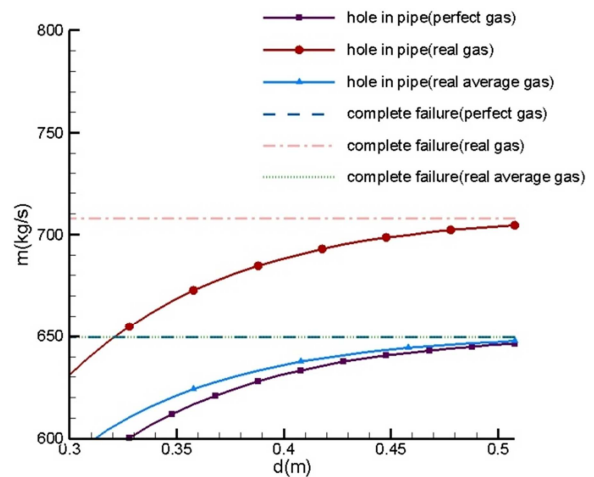
شکل ۶- مقایسه دبی خروجی حالت شکست کامل و سوراخ در لوله



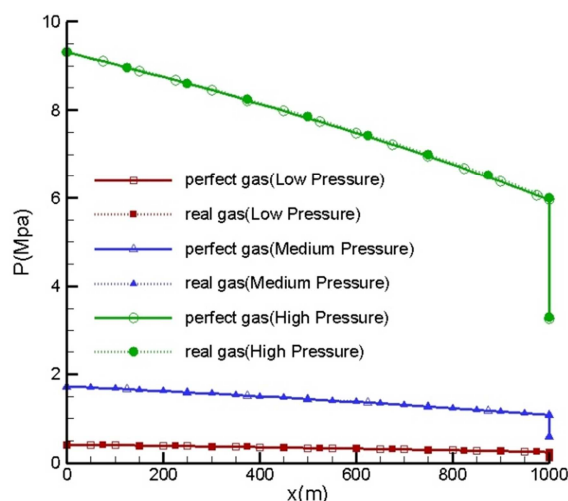
شکل ۷- تغییرات سرعت نسبت به قطر سوراخ برای حالت گاز واقعی

طبق شکل ۸ با کاهش فشار در مقطع ورودی لوله (تقلیل یافتن سطح فشار)، افت فشار بین مقاطع ۲ و ۳ در قطرهای مختلف سوراخ به دلیل کاهش فشار مقطع ۲ کاهش پیدا کرده است. در شکل ۹ به دلیل کاهش نسبت فشار مقطع ۲ به فشار ورودی و ثابت ماندن تقریبی نسبت ماخ مقطع ۲ به ماخ ورودی با افزایش سطح فشار جریان، دما با افزایش سطح فشار جریان، کاهش پیدا کرده است.

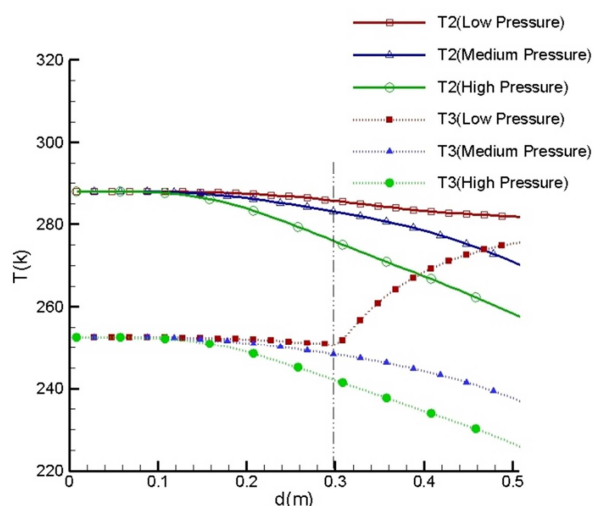
در شکل های ۱۰، ۱۱، ۱۲ و ۱۳ به ترتیب به بررسی تغییرات پارامترهای ماخ، فشار و دما در طول لوله، پس از ایجاد سوراخی به قطر ۰٫۲۵ متر در لوله برای حالت های گاز کامل و گاز واقعی و تغییرات ضریب تراکم پذیری برای حالت گاز واقعی در سطوح فشار مختلف پرداخته شده است.



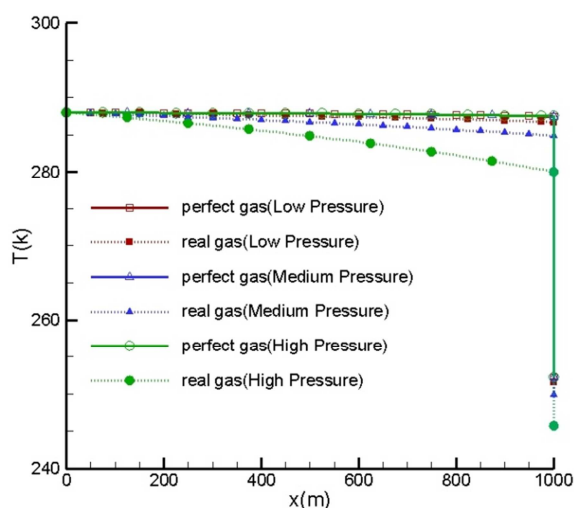
شکل ۸- تغییرات فشار نسبت به قطر سوراخ برای حالت گاز واقعی



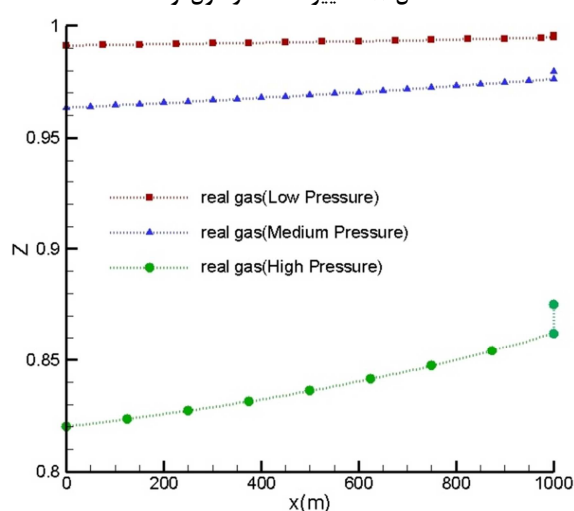
شکل ۱۱- تغییرات فشار در طول لوله



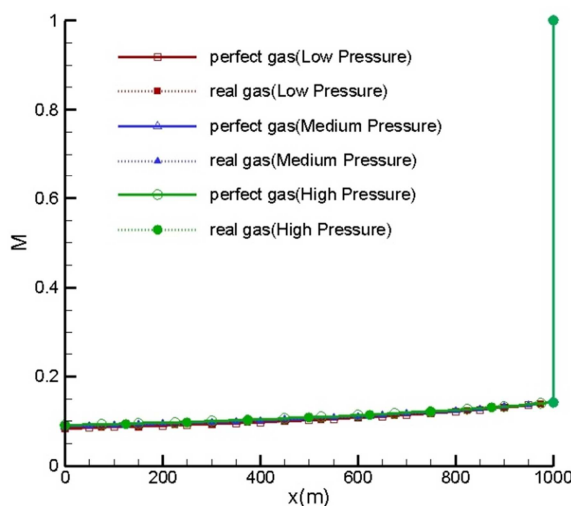
شکل ۹- تغییرات دما نسبت به قطر سوراخ برای حالت گاز واقعی



شکل ۱۲- تغییرات دما در طول لوله



شکل ۱۳- تغییرات ضریب تراکم پذیری در طول لوله



شکل ۱۰- تغییرات عدد ماخ در طول لوله

با توجه به شکل ۱۰، به علت اصطکاک داخل لوله با حرکت در طول لوله عدد ماخ افزایش پیدا کرده است. همچنین به دلیل انبساط آیزنتروپیک بین مقاطع ۲ و ۳ عدد ماخ در طول این دو مقطع افزایش پیدا کرده و در مقطع خروجی به حالت صوتی رسیده است. در شکل‌های ۱۱ و ۱۲ طبق جریان خط فانو، در داخل لوله با افزایش عدد ماخ، فشار و دمای استاتیک جریان کاهش یافته است. همچنین با افزایش سطح فشار گاز داخل لوله، افت فشار و افت دما در طول لوله افزایش پیدا کرده است. مطابق شکل ۱۳ با افزایش سطح فشار ورودی لوله، ضریب تراکم‌پذیری کمتر شده و از شرایط گاز کامل که عدد ضریب تراکم‌پذیری برابر یک می‌باشد فاصله گرفته است. همچنین با حرکت به سمت پایین دست لوله به دلیل کاهش فشار، ضریب تراکم‌پذیری نیز کاهش یافته است.

- [4] Luo J. H., Zheng M., Zhao X. W., Huo C. Y., and Yang L., Simplified expression for estimating release rate of hazardous gas from a hole on high-pressure pipelines, J. Loss Prevention in the Process Industries, Vol. 19, No. 4, pp. 362-366, 2006.
- [5] Kostowski W. J., and Skorek J., Real gas flow simulation in damaged distribution pipelines, Energy, Vol. 45, No. 1, pp. 481-488, 2012.
- [6] John J., and Anderson D., Modern Compressible Flow With Historical Perspective, McGraw-Hill Higher Education, 1990.
- [7] Institution B. S., Calculation of natural gas compression factor, ISO 12213, 2006.
- [8] Sonntag R. E., Borgnakke C., Wylen G. J. V., Fundamentals of Thermodynamics, John Wiley & Sons, Inc., New York, 2002.

مطابق شکل ۱۳ با افزایش سطح فشار ورودی لوله، ضریب تراکم‌پذیری کمتر شده و از شرایط گاز کامل که عدد ضریب تراکم‌پذیری برابر یک می‌باشد فاصله گرفته است. همچنین با حرکت به سمت پایین دست لوله به دلیل کاهش فشار، ضریب تراکم‌پذیری نیز کاهش یافته است.

همان‌طور که از شکل‌های فوق مشاهده می‌شود، فرض گاز کامل باعث تفاوت پارامترهای دما و ضریب تراکم‌پذیری در طول لوله نسبت به حالت گاز واقعی شده و اثری در پارامترهای فشار و ماخ نداشته است.

۴- نتیجه گیری

در تحقیق حاضر، نشت گاز از لوله آسیب‌دیده در حالت پایا، یک‌بعدی و آدیاباتیک با احتساب خواص گاز واقعی شبیه‌سازی شده و اختلاف آن با حالت گاز کامل مورد بررسی قرار گرفته است. برای به‌دست آوردن ضریب تراکم‌پذیری از روش AGA استفاده شده است. روش‌های انتگرالی و دیفرانسیلی برای حل معادلات حاکم بررسی شده و محدودیت‌ها و کاربردهای هر یک از روش‌ها برای اعمال خواص گاز واقعی به‌دست آمده است. برای حل معادلات حاکم کد کامپیوتری با زبان برنامه نویسی Matlab نوشته شده است. از بررسی‌های دو روش نتیجه شده است برای در نظر گرفتن تغییرات ضریب تراکم‌پذیری در طول لوله باید معادلات به روش دیفرانسیلی حل گردند. لوله آسیب‌دیده در خطوط انتقال بین شهری، خطوط شبکه تغذیه گاز و خطوط شبکه توزیع گاز در داخل شهر در نظر گرفته شده است. نتایج مدل‌سازی نشان می‌دهد که در خطوط انتقال بین شهری درصد اختلاف دبی جرمی خروجی از محل آسیب‌دیده در حالت‌های گاز کامل و گاز واقعی متوسط نسبت به گاز واقعی به‌ترتیب حداکثر ۰/۹۲۶٪ و ۰/۸۱٪ می‌باشد و باید از خواص گاز واقعی برای شبیه‌سازی جریان لوله آسیب‌دیده در این خطوط استفاده کرد؛ ولی در خطوط شبکه تغذیه این اختلاف‌ها به‌ترتیب حداکثر ۱/۶۷٪ و ۱/۶۲٪ می‌باشد و در خطوط توزیع در داخل شهر این اختلاف برای هر دو حالت حداکثر ۰/۴۱٪ بوده و می‌توان در خطوط تغذیه و توزیع از فرض گاز کامل برای شبیه‌سازی استفاده کرد. همچنین نتایج نشان می‌دهد فرض گاز کامل باعث تفاوت پارامترهای دما و ضریب تراکم‌پذیری در طول لوله نسبت به حالت گاز واقعی می‌شود و اثری در پارامترهای فشار و ماخ ندارد.

۵- سپاسگزاری

پژوهش حاضر با حمایت شرکت گاز استان آذربایجان شرقی صورت گرفته است؛ لذا از حمایت‌ها و زحمات مسئولین مربوطه آن شرکت کمال تشکر و قدردانی را داریم.

۶- مراجع

- [1] Yuhu D., Huilin G., Jing'en Z., and Yaorong F., Mathematical modeling of gas release through holes in pipelines, Chemical Engineering, J., Vol. 92, No. 1-3, pp. 237-241, 2003.
- [2] Montiel H., Vilchez J. A., Casal J., and Arnaldos J., Mathematical modelling of accidental gas releases, J. Hazardous Materials, Vol. 59, No. 2-3, pp. 211-233, 1998.
- [3] Jo Y.-D., and Ahn B. J., A Simple model for the release rate of hazardous gas from a hole on high-pressure pipelines, J. Hazardous Materials, Vol. 97, No. 1-3, pp. 31-46, 2003.