

شبیه‌سازی عددی جریان دوبعدی نشت گاز طبیعی از خطوط توزیع گاز درون شهری

امیر ابراهیمی مقدم^۱، محمود فرزانه گرد^۲، مهدی دیمی بیاض^{۳*}

۱- دانشجوی دکتری مهندسی مکانیک، باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان، واحد مشهد، دانشگاه آزاد اسلامی، مشهد، ایران

۲- استاد مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شاهرود

۳- استادیار مهندسی مکانیک، دانشگاه حکیم سبزواری

تاریخ دریافت: ۹۴/۱۰/۱۲ تاریخ پذیرش: ۹۵/۰۲/۲۰

پیام نگار: m.deimi@hsu.ac.ir

چکیده

در مقاله حاضر، با استفاده از نرم‌افزار فلونت به شبیه‌سازی عددی نشت گاز طبیعی از یک سوراخ کوچک پرداخته‌ایم که بر سطح لوله‌ای در خطوط توزیع گاز طبیعی درون شهری ایجاد شده است. هندسه مورد بررسی به کمک نرم‌افزار گمبیت طراحی و شبکه‌بندی شده و متان با فرض گاز کامل بودن، گاز طبیعی تلقی شده و جریان آشفته است. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که در سوراخ‌هایی با قطر کوچک، سرعت تخلیه به سرعت صوت رسیده و به اصطلاح خفگی در جریان رخ می‌دهد. میزان نشت گاز با قطر سوراخ رابطه مرتبه دوم و با فشار نقطه ابتدایی رابطه خطی دارد. سرانجام، یک رابطه ساده کاربردی برای محاسبه شدت جریان حجمی گاز نشت یافته ارائه شده است. بررسی داده‌ها نمایانگر آن است که در اکثر موارد، درصد خطای نسبی میان نتایج حاصل از شبیه‌سازی و رابطه‌ای که ارائه شده، زیر ۱۰ درصد است که بیانگر دقت بسیار مناسب رابطه ارائه شده است.

کلیدواژه‌ها: نشت گاز طبیعی، خطوط توزیع گاز، شبیه‌سازی CFD دو بعدی.

۱. مقدمه

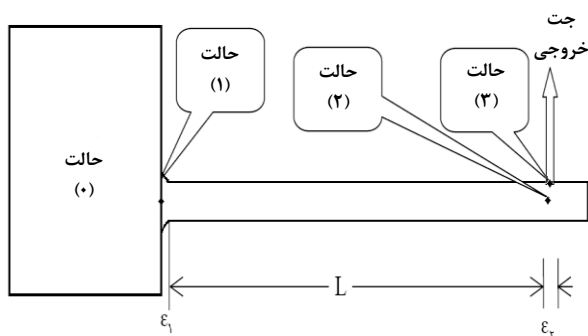
طبیعی برای مصارف سوختی و نیز به‌عنوان ماده اولیه صنایع پتروشیمی رو به افزایش و در نتیجه توجه به خطوط لوله انتقال گاز و حوادث مربوط به آن، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است [۳]. سالانه مقدار چشمگیری گاز تحت عنوان گازهای گمشده، هدر می‌رود [۴] که عبارت است از اختلاف میان گاز وارد شده به شبکه‌های گازرسانی و گازی که توسط مصرف‌کنندگان مصرف می‌شود [۴، ۵]. از عواملی که در گم شدن گازها دخالت دارد می‌توان به نشت گاز از لوله و اتصالات، سرقت گاز، خطاهای اندازه‌گیری، آسیب‌های شخص سوم و بهره‌برداری غیرمجاز گاز اشاره کرد.

خطوط لوله ایمن‌ترین و راحت‌ترین وسیله انتقال و توزیع گازهای خطرناک مانند گاز طبیعی به‌شمار می‌آیند. با این همه، این خطوط می‌توانند در معرض آسیب‌های گوناگونی، از جمله خوردگی و عوامل مکانیکی خارجی قرار بگیرند [۱، ۲]. کشور ایران با داشتن ۱۴٫۰۷ درصد منابع گاز طبیعی جهان، از نظر حجم منابع گاز طبیعی در سطح جهان مقام دوم را داراست. امروزه، با توجه به محدودیت منابع نفتی در مقایسه با گاز طبیعی، استفاده از گاز

* سبزواری، دانشگاه حکیم سبزواری، دانشکده مهندسی مکانیک

مدل مورد بررسی آنها در خطوط توزیع گاز فشار پایین و متوسط بود، آن‌ها برای ساده‌سازی مدل، گرمای ویژه در فشار ثابت را ثابت، جریان در ناحیه خروج گاز را به‌صورت تک-آنتروپ^۳، جریان داخل لوله را به‌صورت آدیاباتیک^۴ و نیز جریان گاز را به‌صورت یک‌بعدی در نظر گرفته‌اند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که مدل پیشنهادیشان، در سوراخ‌های با قطر کوچک با مدل سوراخ - که می‌توان لوله را شبیه یک مخزن در نظر گرفت که در حین خروج گاز، فشار داخل مخزن تغییر نمی‌کند - مطابقت دارد و در سوراخ‌های با قطر بزرگ‌تر، مدل پیشنهادی منطبق بر مدل شکست کامل لوله است.

جو و اهن در سال ۲۰۰۳ یک مدل ساده صریح برای محاسبه گاز نشت‌یافته از سوراخ در یک لوله حاوی گاز خطرناک پر فشار با استفاده از معادله حالت گاز ایده‌آل ارائه کرده و با مدل تجربی به‌دست آمده از رویداد واقعی، آن را اعتبارسنجی کرده‌اند [۱۲]. آنان سوراخ را در یک لوله بسته که توسط یک نازل (شیپوره) همگرا به یک مخزن وصل است، در نظر می‌گیرند و جریان را در نازل و سوراخ به‌صورت جریان تک-آنتروپ و جریان در لوله را به‌صورت آدیاباتیک تلقی می‌کنند. اتلاف اصطکاکی در نازل و سوراخ را نیز در مقایسه با اتلاف اصطکاکی لوله ناچیز فرض کرده‌اند. آنان برای محاسبه آهنگ گاز نشت‌یافته از سوراخ، از تغییرات انرژی جنبشی گاز در معادله تکانه چشم پوشیدند و به این نتیجه رسیدند که مدل ساده صریح پیشنهادی، نسبت به مدل نظریه آهنگ، تخلیه گاز را کمی بیش‌تر نشان می‌دهد که برای نسبت گرمای ویژه معادل ۱٫۴۲، مقدار این انحراف از ۰ تا ۲۰ درصد متغیر است. در شکل (۱) مدل سوراخ استفاده شده در تحقیق جو و اهن [۱۲] را مشاهده می‌کنید.



شکل ۱. طرحواره مدل استفاده شده در تحقیق جو و همکارش [۱۲].

سهم نشت گاز در میان عوامل یاد شده بسیار زیاد (حدود ۷۹ درصد از گازهای گمشده) است؛ از این رو، مهم‌ترین عامل در گازهای گمشده به شمار می‌رود [۶].

بنابر تعریف، نشت گاز عبارت است از خروج ناخواسته گاز از لوله‌ها، اتصالات و تأسیسات گازرسانی که می‌تواند بر اثر عوامل مختلفی چون سایش داخلی، خوردگی سطح لوله، عوامل خارجی (ضربه‌های مکانیکی چون برخورد بیل مکانیکی با لوله)، نقص در ساختار لوله‌ها و اتصالات و عوامل دیگری رخ دهد [۶]. بر این اساس، تعیین و شناسایی نشت یکی از روش‌های مهم برای محافظت خطوط لوله گاز طبیعی از آسیب‌ها و کاهش خطرات آن به‌شمار می‌آید [۷].

هنگام آسیب دیدن لوله، با توجه به بالا بودن سرعت جریان گاز در مقطع آسیب‌دیده، وسایل اندازه‌گیری متداول قادر به محاسبه میزان گاز رها شده نیستند. از این رو لازم است برای محاسبه میزان گاز رها شده، از مدل‌های ریاضی مبتنی بر قوانین حاکم بر دینامیک گازها استفاده شود و با مدل کردن ناحیه شکست به صورت‌های مختلف، مشخصات سیال را هنگام خروج از این ناحیه به‌دست آورد [۸]. در اثر شکستگی لوله، یک موج انبساطی درون لوله تشکیل می‌شود و به حرکت در می‌آید و گاز درون لوله را به سمت نقطه شکست به حرکت در می‌آورد [۹].

برای مدل‌سازی نشت گاز در خطوط لوله، به دو روش عمل می‌کنند. در روش اول، جریان گاز نشت یافته از یک سوراخ - که در این حالت لوله مانند یک مخزن در نظر گرفته می‌شود - محاسبه می‌شود که این به روش مدل سوراخ (حفره)^۱ می‌گویند. اما در روش دوم، قطر سوراخ بزرگ‌تر یا مساوی قطر لوله در نظر گرفته می‌شود. به بیان دیگر، حالت دوم برای مدل‌سازی شکست کامل لوله کاربرد دارد و آن را مدل لوله^۲ می‌نامند [۱۰].

در اکثر تحقیق‌های پیشین، به بررسی مدل سوراخ پرداخته‌اند. در سال ۱۹۹۱، وودوارد و مودان یک مدل برای محاسبه آهنگ تخلیه مایع و گاز از سوراخ در مجراهای فرایند، تدوین کردند که به محاسبه کاهش فشار به‌عنوان تابعی از زمان پرداخته است [۱۱].

در سال ۱۹۹۸، منتیل و همکارانش 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 [۱۰]. به دلیل این که

3. Isentropic
4. Adiabatic

1. Hole Model
2. Pipe Model

خود، لوله آسیب‌دیده را به‌صورت باز بودن جداره کناری در نظر گرفته‌اند[۱۶]. آنان جریان داخل لوله را در حالت‌های جریان دماثابت و جریان آدیاباتیک شبیه‌سازی کردند و هر یک از این دو حالت را برای گاز کامل و گاز واقعی بررسی و اثر ضریب تخلیه را در دبی خروجی گاز تحلیل کرده‌اند.

در سال ۲۰۱۴، لو و همکارانش به تحلیل نظریه نشت گاز طبیعی در خطوط لوله شهری با فشار متوسط پرداخته‌اند و مدل پیشنهادی خود را برای دو حالت پایا و گذرا (ناپایا) بررسی کرده‌اند[۱۷]. به‌دلیل این‌که فشار سیستم مورد بررسی آنان در محدوده فشار متوسط بود، از فرض گاز کامل برای سیال خود استفاده کردند و جریان درون لوله را به‌صورت آدیاباتیک و جریان در سوراخ را به‌صورت تک-آنتروپ فرض کرده‌اند. مدل‌سازی جریان را نیز به‌صورت یک‌بعدی انجام داده‌اند.

تقریباً در تمامی تحقیق‌های انجام گرفته در گذشته، مدل‌سازی جریان به‌صورت یک‌بعدی انجام گرفته و همانطور که در شکل (۱) مشاهده می‌شود، در اکثر موارد لوله را به‌صورت یک مخزن بسته مدل‌سازی کرده‌اند. به بیان دیگر، طولی از لوله را برای بعد از سوراخ در نظر نگرفته‌اند. از سویی، در هیچ یک از تحقیق‌های انجام گرفته در گذشته رابطه‌ای کاربردی برای محاسبه میزان نشت گاز ارائه نشده و به نتایج ناشی از شبیه‌سازی بسنده شده است. هدف از انجام این پژوهش ارائه رابطه‌ای برای محاسبه میزان نشت گاز در خطوط لوله توزیع گاز درون‌شهری، با بهره‌گیری از روش‌های عددی است. از این رو با استفاده از نرم‌افزاری قدرتمند در زمینه دینامیک سیالات محاسباتی^۱، به تعیین نشت گاز بر اساس تغییر در تمام پارامترهای موثر بر آن پرداخته خواهد شد. بر اساس موارد یاد شده، در این تحقیق مدل‌سازی به‌صورت دوبعدی انجام و طول لوله بعد از سوراخ نیز در نظر گرفته شده و لوله به دو قسمت بالادست و پایین‌دست تقسیم شده است. در انتهای پژوهش نیز یک رابطه کاربردی برای محاسبه نشت گاز بر حسب متغیرهایی که بر میزان نشت گاز دخالت دارند ارائه شده است.

۲. نظریه مسئله

بنابر آنچه گفته شد، برای محاسبه مقدار نشتی، از دو روش به قرار صفحه بعد بهره می‌گیرند:

یوها و همکارانش در سال ۲۰۰۳ مدل و فرضیه‌های پیشنهادی توسط منتیل را با وارد کردن ضریب تراکم‌پذیری ثابت ۰٫۹ در معادله حالت برای فشارهای بالا بررسی کرده‌اند[۱۳]. آنان علاوه بر نتایج به‌دست آمده در تحقیق منتیل و همکارانش به این نتیجه دست یافتند که نشت گاز از سوراخ‌های کوچک را می‌توان به‌صورت یک فرایند حالت پایدار در نظر گرفت.

در سال ۲۰۰۳، اوکه و همکارانش به محاسبه جریان نشتی گاز از یک لوله در یک فرایند گذرا پرداخته‌اند[۱۴]. آنان مدل خود را برای گاز طبیعی واقعی و به‌صورت مخلوطی از چندین هیدروکربن ارائه داده و از روش عددی مشخصه‌ها برای حل معادله‌های حاکم بر مسئله استفاده کرده‌اند و جریان در محل سوراخ را به‌صورت جریان تک-آنتروپ در نظر گرفته‌اند. آنان با بررسی‌هایی که انجام داده‌اند به این نتیجه رسیده‌اند که مدل‌سازی لوله به‌صورت یک مخزن بسته که جریان گاز از انتهای آن به بیرون تخلیه می‌شود، به دلیل ایجاد جریان‌های برگشتی در قسمت پایین‌دست لوله، مدل مناسبی نیست.

تحقیقی در زمینه شبیه‌سازی نشتی خطوط لوله گاز با استفاده از روش مشخصه‌ها توسط نورالهی و همکاران در سال ۱۳۸۸ انجام شده است[۱۵]. در این تحقیق از روش یک‌بعدی مشخصه‌ها برای شبیه‌سازی جریان گاز تراکم‌پذیر درون لوله و محاسبه شدت جریان نشتی استفاده شده است. همچنین فرض بر آن است که جریان درون لوله، هم آنتروپی (جریان هم آنتروپی عبارت است از جریانی که دارای تغییرات آنتروپی صفر برای مجموع نقاط آن باشد ولی ممکن است در هر نقطه آنتروپی تغییر کند) است و از این رو حل معادله پایستگی جرم و پایستگی تکانه به اضافه فرض آنتروپی ثابت در کل جریان، برای شبیه‌سازی جریان کافی‌اند. مدل مورد بررسی در این تحقیق لوله‌ای به طول ۲۵۰ متر است که در وسط آن سوراخی با سطح مقطع ۱ سانتی‌متر مربع تعبیه شده و فشار و سرعت اولیه، به ترتیب، ۳ مگاپاسکال (۳۰ بار) و ۱۲/۴۹۷ متر بر ثانیه (۴۱ فوت بر ثانیه) است. همچنین، شرط مرزی بالادست، مخزن با فشار ثابت در نظر گرفته شده و شرط مرزی پایین‌دست در سه حالت مختلف، انتهای باز، شیر با ضریب افت فشار ثابت، انتهای بسته بررسی شده است.

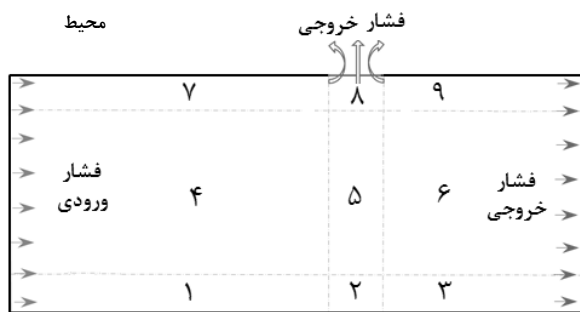
کوستوسکی و همکارش در سال ۲۰۱۲ به بررسی جریان در لوله‌های آسیب‌دیده شبکه توزیع گاز طبیعی پرداخته و در مدل پیشنهادی

1. CFD

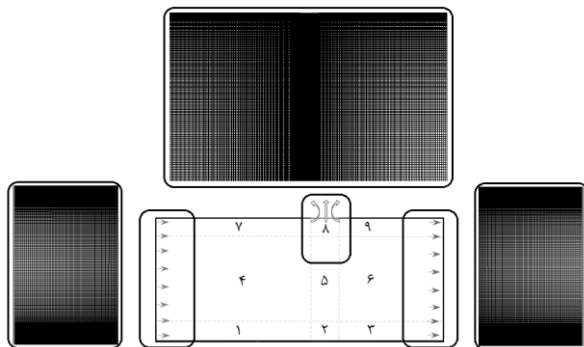
الف. مدل سوراخ (حفره)

ب. مدل لوله

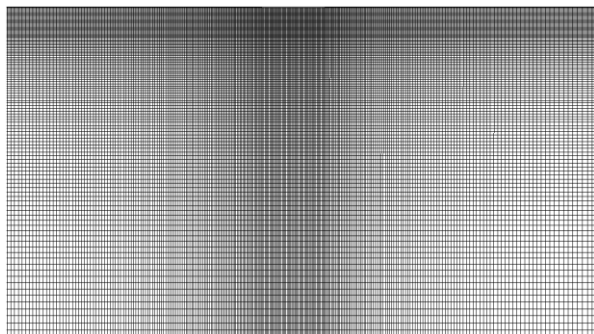
بسیار چشمگیری بر موفقیت آمیز بودن حل مسئله دارد. پس، در نزدیکی دیواره‌ها و نیز سوراخ، شبکه‌بندی بسیار ریزتر از نواحی دیگر انتخاب شده است. برای شبکه‌بندی هندسه تولید شده، از شبکه سازمان‌یافته^۴ (شبکه‌های مربعی) استفاده شده است و در این حالت برای دستیابی به هدف یادشده در بالا، محیط حل مسئله به ۹ ناحیه تقسیم‌بندی شده است که شکل (۲) نشان دهنده محیط حل و شرایط مرزی است. در شکل‌های (۳) و (۴) نیز مدل شبکه‌بندی شده مشاهده می‌شوند.



شکل ۲. طرحواره محیط حل و شرایط مرزی.



شکل ۳. تولید شبکه (مش‌بندی) در لوله و پیرامون سوراخ.



شکل ۴. بزرگنمایی شبکه تولید شده پیرامون سوراخ.

در حالت (الف)، جریان گاز نشت‌یافته از یک سوراخ محاسبه می‌شود که در این روش، لوله مانند یک مخزن تلقی می‌شود. به بیان دیگر، در این حالت سوراخی بر سطح جانبی لوله تعبیه شده که قطر سوراخ از قطر لوله کوچک‌تر است و جریان سیال از این سوراخ به بیرون نشت می‌یابد.

اما حالت (ب)، حالتی است که قطر سوراخ بزرگتر یا مساوی قطر لوله است. به بیان دیگر، روش دوم برای مدل‌سازی شکست کامل لوله کاربرد دارد.

در این مقاله، مدل موردنظر، از نوع مدل سوراخ است. در این حالت، ملاک تشخیص این‌که در مقطع خروجی چه نوع جریانی برقرار خواهد بود، بر اساس پارامتری به‌نام نسبت فشار بحرانی^۱ استوار است که به‌صورت رابطه (۱) تعریف می‌شود:

$$\text{CPR} = \frac{p_a}{p_{2cr}} = \left(\frac{2}{\gamma + 1} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma - 1}} \quad (1)$$

که در این رابطه p_a بیانگر فشار محیط بیرون، p_{2cr} فشار بحرانی نقطه ۲ و γ نسبت ظرفیت حرارتی است. بنابر رابطه (۱)، در صورتی که فشار نقطه ۲، بزرگتر از فشار بحرانی در این نقطه باشد ($p_2 > p_{2cr}$)، در لوله خفگی رخ می‌دهد و سرعت تخلیه به سرعت صوت می‌رسد. اما در نقطه مقابل، اگر $p_2 < p_{2cr}$ ، یک جریان فروصوت برقرار خواهد شد [۱۰، ۱۳، ۱۷].

۳. مدل مطالعاتی و تولید شبکه

برای طراحی و شبکه‌بندی مدل مطالعاتی، این پژوهش از نرم‌افزار گمبیت استفاده شده است. مدل مطالعاتی این پژوهش لوله‌ای به طول ۵۰۰ متر است که سوراخی در فاصله ۲۵۰ متری از نقطه ابتدایی خط لوله بر سطح جانبی آن تعبیه شده است. از آنجا که دیواره‌ها منبع اصلی تشکیل حالت گردابی^۲ و آشفتگی^۳ به‌شمار می‌آیند و در مجاورت دیواره‌ها کمیت‌هایی چون سرعت دارای گردایان شدیدی‌اند، مدل کردن صحیح جریان در نزدیکی دیواره اثر

1. Critical Pressure Ratio (CPR)
2. Vorticity
3. Turbulence

۳-۱ معادلات حاکم و جواب عددی

سیال مورد استفاده در این پژوهش از نوع تراکم‌پذیر است. بر این اساس، معادله‌های حاکم بر مسئله، علاوه بر معادله‌های پایستگی جرم (پیوستگی)، پیوستگی تکانه (مومنتم) و پایستگی انرژی، شامل معادله حالت نیز هست. این معادله‌ها برای سیال تراکم‌پذیر و در حالت پایا، به ترتیب، به صورت رابطه‌های (۲) تا (۵) هستند [۱۸، ۱۹].

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i) = S_m \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \bar{\tau}_{ij}}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} (-\rho \overline{u_i u_j}) + \rho g_i + F_i \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i} [u_i (\rho E + p)] = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[k_{eff} \frac{\partial T}{\partial x_j} + u_i (\bar{\tau}_{ij})_{eff} \right] + S_h \quad (4)$$

$$p v = RT \quad (5)$$

معادله (۲) بیانگر معادله پیوستگی است که در این معادله، ρ چگالی، u_i بردار سرعت و S_m جرم اضافه شده به فاز پیوسته اول از فاز پراکنده دوم (مثلاً، ناشی از تبخیر قطره‌های مایع) است.

معادله (۳)، معادله پایستگی تکانه است که در آن p نشان دهنده فشار استاتیکی، $\bar{\tau}_{ij}$ تانسور تنش، ρg_i نیروی گرانشی و F_i نیروی خارجی است و عبارت $-\rho \overline{u_i u_j}$ را مؤلفه‌های تنش رینولدز می‌گویند.

معادله (۴)، معادله پایستگی انرژی است که در آن E انرژی کل، k_{eff} ضریب رسانایی حرارتی موثر (مقدار این ضریب معادل $k_{eff} = k + k_t$ است، که در آن k_t ضریب رسانای حرارتی آشفته

است و بر اساس مدل آشفته‌سازی استفاده شده، تعیین می‌شود و در مدل‌های آشفته‌سازی کا-اِپسیلون^۱ به صورت $k_t = \frac{c_p \mu_t}{Pr_t}$ تعریف می‌شود،

که در آن Pr_t معرف عدد بدون بعد پرانتل آشفته است، T دما و $(\bar{\tau}_{ij})_{eff}$ تانسور تنش موثر است. دو جمله سمت راست معادله (۴)

نیز، به ترتیب، معرف انتقال انرژی ناشی از انتقال حرارت رسانشی و اتلاف گرانشی سیال است. S_h هم دربرگیرنده حرارت تولید شده بر اثر واکنش‌های شیمیایی و یا هر گونه منبع حرارتی دیگرند.

معادله (۵)، معادله حالت گاز کامل است که در آن v ، p ، T و R به ترتیب، فشار، حجم مخصوص، دما و ثابت گازند.

معادلات حاکم بر مسئله با استفاده از روش رو به باد (پادبادسو)^۲ گسسته‌سازی شده‌اند؛ به طوری که برای همگرایی بهتر و دقیق‌تر ابتدا کلیه معادلات حاکم بر مسئله با بهره‌گیری از روش پادبادسوی مرتبه اول گسسته‌سازی شده‌اند. پس از این‌که جواب مسئله با استفاده از روش مرتبه اول همگرا شد، در ادامه، به ترتیب، معادلات پیوستگی، تکانه، و انرژی با استفاده از روش پادبادسوی مرتبه دوم گسسته‌سازی شده‌اند. این روش گسسته‌سازی به‌خاطر تراکم‌پذیر بودن سیال موردنظر و تغییرات ناگهانی متغیرها در نزدیکی سوراخ، به کار گرفته شده‌اند و باعث می‌شود نتایج به‌صورت کاملاً صحیح و واقعی همگرا شوند (جزئیات بیش‌تر به همراه نمودار همگرایی در بخش نتایج آورده شده است). ارتباط بین جمله‌های سرعت و فشار نیز از طریق الگوریتم سیمپل^۳ صورت گرفته است.

۳-۲ مدل آشفته‌سازی

همان‌طور که اشاره شد، با توجه به عدد رینولدز، جریان به‌صورت آشفته در نظر گرفته می‌شود. تا کنون مدل‌های آشفته‌سازی زیادی ارائه شده‌اند که هر کدام برای رژیم‌های خاص جریانی و حتی در ناحیه‌ای خاص از میدان جریان معتبر و دقیق‌اند. هدف نهایی تمام مدل‌های آشفته‌سازی، محاسبه اندازه تنش رینولدز ($-\rho \overline{u_i u_j}$) در نقاط مختلف جریان است. مدل‌های آشفته‌سازی به سه دسته مدل‌های صفر، یک و دو معادله‌ای تقسیم‌بندی می‌شوند. برای مدل‌سازی آشفته‌سازی در این تحقیق از روش کا-اِپسیلون استاندارد^۴ که یک مدل دو معادله‌ای است، استفاده شده است. همچنین، به منظور مدل‌سازی رفتار ناحیه مجاور دیواره، از تابع دیواره استاندارد^۵ که در جریان‌های معمولی رینولدز-بالا کاربرد دارد مورد استفاده قرار گرفته است. در روش کا-اِپسیلون دو معادله انتقال اضافی - که معادله‌های k و ϵ نام دارند - حل می‌شوند و گرانشی آشفته (μ_t) به‌عنوان تابعی از k و ϵ به‌دست می‌آید. معادله‌های k و ϵ در روش کا-اِپسیلون استاندارد، به ترتیب، به صورت معادله‌های (۶) و (۷) هستند.

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_M + S_k \quad (6)$$

². Upwind

³. Simple

⁴. Standard k-ε

⁵. Standard Wall Function

¹. k-epsilon (k-ε)

۴. نتایج و بحث

در این بخش به ارائه نتایج حاصل از این پژوهش عددی می‌پردازیم. برای اعتبارسنجی، نتایج حاصل از این شبیه‌سازی با نتایج تحقیق منتیل و همکاران [۱۰] مقایسه شده است. مدل استفاده شده در تحقیق منتیل [۱۰]، لوله‌ای به طول ۱۰۰۰ متر و قطر داخلی ۱۶۳/۶ میلی‌متر در خطوط توزیع گاز شهری است که سوراخی در انتهای آن تعبیه شده (لوله به صورت یک مخزن بسته در نظر گرفته شده است) و متان با فرض گاز کامل به عنوان سیال مورد بررسی در نظر گرفته شده است. مدل‌سازی تحقیق منتیل [۱۰] به صورت یک‌بعدی و جریان درون لوله آدیاباتیک فرض شده است. همچنین، برای حل معادله‌های حاکم بر مسئله از روش‌های تفاضل متناهی و با استفاده از الگوریتم تکرار شونده سکانت بهره گرفته شده است. مدل مطالعاتی این تحقیق که برای اعتبارسنجی به کار رفته، شامل لوله‌ای به طول ۱۵۰۰ متر است که سوراخی در فاصله ۱۰۰۰ متری از نقطه ابتدایی بر جداره آن تعبیه شده و لوله را به دو بخش بالادست و پایین‌دست جریان تقسیم‌بندی می‌کند. شرایط مرزی و فرضیه‌های حل مسئله نیز به صورت یکسان و دقیقاً مشابه با تحقیق منتیل [۱۰] برای این شبیه‌سازی نیز در نظر گرفته شده و نتایج عددی به دست آمده حاضر، با نتایج منتیل مقایسه شده است.

در شکل (۵) به مقایسه نتایج مربوط به دبی حجمی بهنجار شده خروجی از سوراخ بین این تحقیق و تحقیق انجام شده توسط منتیل و همکاران پرداخته شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، بین نتایج حاصل از دو تحقیق، تطابق مناسبی برقرار است که نمایانگر صحت شبیه‌سازی انجام شده است. درصد اختلاف نسبی نتایج در قطرهای ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵ و ۳۰ میلی‌متر، به ترتیب، ۰/۷۲٪، ۰/۶۱۱٪، ۰/۲۷۸٪ و ۰/۴۵۲٪ است. همان‌طور که از این مقادیر برمی‌آید، با افزایش قطر سوراخ، تأثیر در نظر نگرفتن طول لوله بعد از سوراخ بیش‌تر قابل مشاهده است. علت بزرگ‌تر بودن عددهای این تحقیق نسبت به تحقیق منتیل را می‌توان برگشت جریان از طول لوله بعد از سوراخ دانست که با افزایش قطر سوراخ برگشت جریان از سمت پایین‌دست بیشتر تر و اختلاف نتیجه‌های دو تحقیق کمی بیشتر می‌شود.

در شکل (۶) نیز نمودار مقدار عدد ماخ خروجی به ازای قطرهای مختلف سوراخ رسم شده است. طبق این نمودار، در محدوده

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \epsilon u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (G_R) - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} + S_\epsilon \quad (7)$$

در معادله‌های (۶) و (۷)، G_R تولید انرژی جنبشی آشفتگی ناشی از گردایان‌های سرعت متوسط، G_D تولید انرژی جنبشی آشفتگی ناشی از شناوری و Y_M سهم اتساع نوسانی^۱ در آشفتگی تراکم‌پذیر، از آهنگ اتلاف کل^۲ است. همچنین، $C_{1\epsilon} = 1/44$ ، $C_{2\epsilon} = 1/92$ و عددهای ثابتی‌اند. گرانشی آشفتگی نیز به صورت $\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon}$ تعریف می‌شود که در آن $C_\mu = 0/09$ ، $\sigma_k = 1$ و $\sigma_\epsilon = 1/3$ ، به ترتیب، عدد پراگندگی آشفتگی به ازای k و ϵ هستند [۱۸، ۱۹، ۲۰].

۳-۳ شرایط مرزی

در مقطع ورودی لوله، شرط مرزی از نوع فشار ورودی و در مقطع انتهای لوله و همچنین در سوراخ از شرط مرزی فشار خروجی استفاده شده است. از آنجا که مدل مورد نظر در خطوط توزیع گاز درون شهری در سطح فشار پایین با قطر لوله نسبتاً کوچک قرار دارد، افت فشار در طول خط لوله بسیار ناچیز است، استفاده از فرض گاز کامل (با c_p ثابت) جوابگوی این شرایط است؛ به طوری که طبق نتایج تحقیق صورت گرفته در مرجع [۲۱]، اختلاف بین فرض گاز کامل (c_p ثابت) نسبت به گاز واقعی در خطوط انتقال بین شهری (سطح فشار بالا)، خطوط شبکه تغذیه (سطح فشار متوسط) و خطوط توزیع گاز درون شهری (سطح فشار پایین)، به ترتیب، ۰/۲۶٪، ۰/۶۷٪ و ۰/۴۱٪ هستند. نکته قابل توجه این است که فشار کل و دمای کل، به ترتیب به صورت روابط (۸) و (۹) هستند:

$$\frac{P_{tot}}{P_0} = \left(1 + \frac{\gamma-1}{2} Ma^2 \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \quad (8)$$

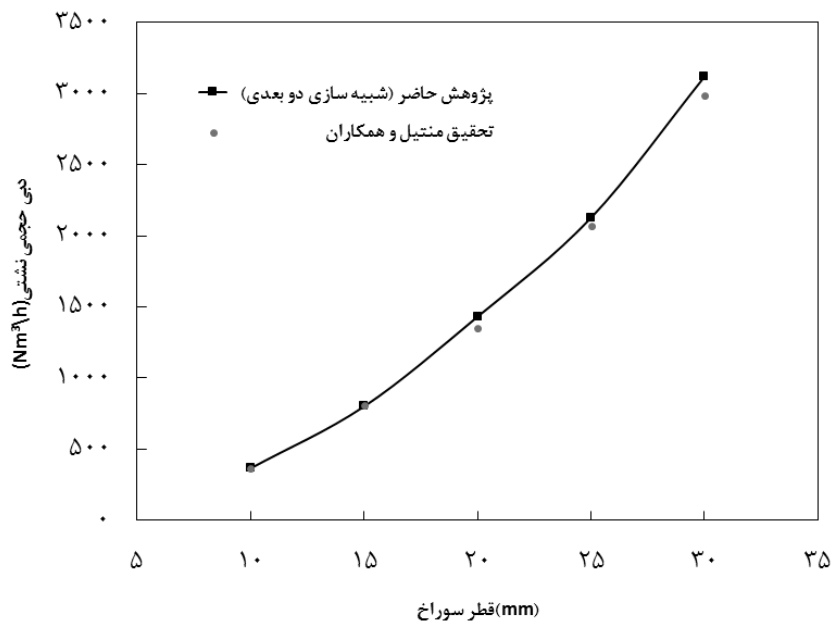
$$\frac{T_{tot}}{T_0} = 1 + \frac{\gamma-1}{2} Ma^2 \quad (9)$$

که در این روابط، P_{tot} و T_{tot} ، به ترتیب، بیانگر فشار کل و دمای کل، P_0 و T_0 ، به ترتیب، فشار سکون و دمای سکون، $\gamma = \frac{c_p}{c_v}$ نسبت ظرفیت گرمایی ویژه در فشار ثابت به ظرفیت گرمایی ویژه در حجم ثابت، و Ma عدد ماخ می‌باشد. همچنین عدد ماخ به صورت $Ma = \frac{u}{a}$ تعریف می‌شود که در آن u سرعت سیال و a سرعت صوت است.

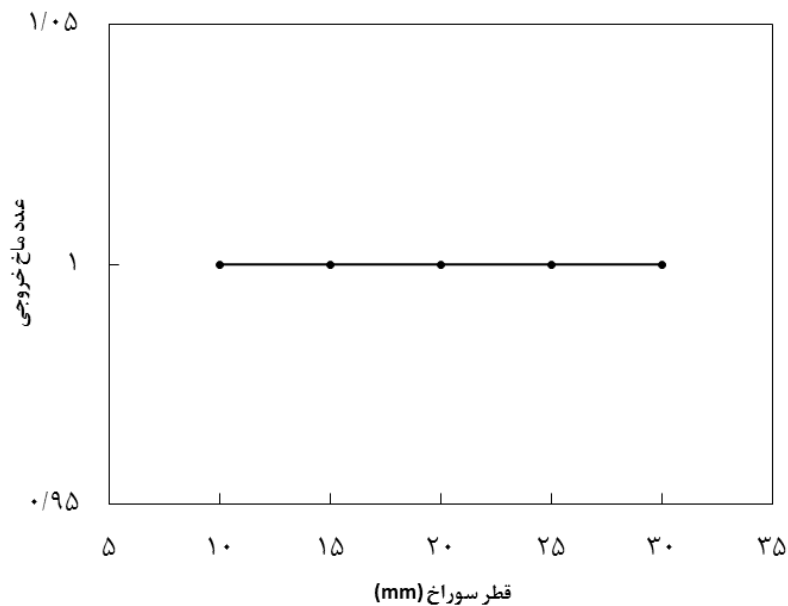
^۱. Fluctuating Dilatation

^۲. Overall Dissipation Rate

سوراخ‌های بررسی شده در این تحقیق، برآیند عدد ماخ در سوراخ همین موضوع یکی دیگر از عوامل نشان‌دهنده صحیح بودن تقریباً معادل یک می‌شود که بیانگر وجود یک جریان صوتی است و مدل‌سازی انجام شده و نتایج مربوط به آن است.



شکل ۵. مقایسه بین دبی حجمی خروجی از سوراخ در این تحقیق و تحقیق منتیل و همکاران.



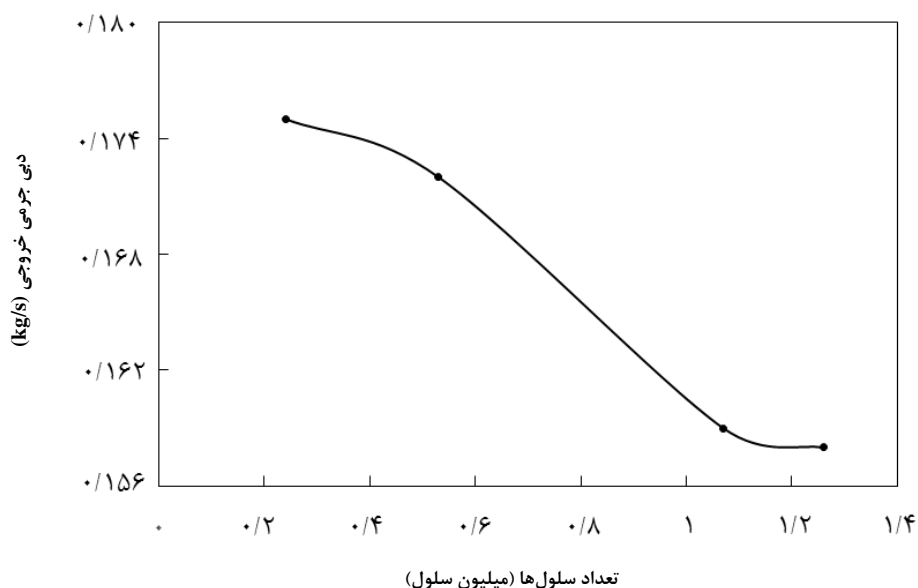
شکل ۶. عدد ماخ در سوراخ به‌ازای قطرهای مختلف.

لوله معادل ۲۸۸ کلوین است و مسئله به‌ازای مقادیر مختلف فشار نقطه ابتدایی در محدوده ۰٫۳ الی ۰٫۵ مگاپاسکال مطلق (۳ الی ۵ بار مطلق) بررسی شده است. قطر سوراخ در بازه ۵ الی ۸۰ میلی‌متر و برای سه لوله با قطرهای ۴، ۶ و ۸ اینچ (قطرهای نامی، به‌ترتیب، عبارتند از: ۱۱۴٫۶، ۱۶۳٫۶ و ۲۰۴٫۶ میلی‌متر) که اندازه‌های پرکاربرد موجود در خطوط توزیع شهری‌اند، بررسی شده است.

در ابتدا، به‌نتایج حاصل از بررسی تأثیر تعداد سلول‌های به‌کار رفته در شبکه برای اثبات استقلال از تعداد شبکه پرداخته خواهد شد. شکل (۷) بیانگر اعتبارسنجی و استقلال از تعداد سلول‌های به‌کار رفته در هندسه است. باید گفت که این جدول به‌عنوان نمونه مربوط به هندسه‌ای است که قطر سوراخ آن ۳۰ میلی‌متر است. به‌دلیل کوچک بودن سوراخ‌ها، نتایج بررسی‌ها بیانگر این است که می‌توان این نتیجه را برای هندسه‌های با قطر سوراخ‌های دیگر نیز تعمیم داد. مشاهده می‌شود که بعد از تعداد تقریباً یک میلیون سلول، تغییر زیادی در نتایج خروجی‌های جواب مشاهده نمی‌شود. سرانجام، به‌خاطر اطمینان یافتن کامل از تعداد سلول‌های تهی در شبکه و با استناد به نتایج استقلال از شبکه، دامنه محاسباتی برای تمام نمونه‌ها تقریباً ۱٫۵ میلیون سلول محاسباتی در نظر گرفته شده است.

در ادامه، با هدف مقایسه مدل‌های مختلف، به بررسی کمیت‌های موثر بر میزان نشت گاز در خطوط لوله گاز درون‌شهری پرداخته خواهد شد. پارامترهایی که در میزان نشت یافته دخیل‌اند، شامل فشار نقطه ابتدایی، طول لوله، قطر لوله، قطر سوراخ و دمای متوسط خط لوله‌گازند. در بحث محاسبه نشت گاز، تغییر طول تأثیر خود را بر فشار خط لوله و در قالب افت فشار نشان می‌دهد؛ از این رو، تأثیر پارامترهای طول لوله و فشار، با یکدیگر معادل‌اند. از طرفی تغییرات دما در طول خط لوله بسیار ناچیز و چشم‌پوشیدنی است. بر این اساس، پارامترهای موثر بر میزان نشت گاز از خطوط توزیع گاز درون‌شهری شامل فشار نقطه ابتدایی، قطر لوله و سوراخ می‌شود که در این تحقیق تمام این کمیت‌ها بررسی شده‌اند.

همان‌طور که اشاره شد، دما و فشار در طول خط لوله تغییرات چشمگیری نمی‌کنند و فقط در پیرامون سوراخ شاهد تغییرات ناگهانی فشار و سرعت هستیم. پس، برای کاهش هزینه‌های زمانی و محاسباتی فرض شده است که در یک لوله گاز با جنس پلی‌اتیلن (زبری لوله برابر ۱٫۵ میکرومتر) [۲۲] و طول ۰٫۵ کیلومتر در خطوط توزیع گاز درون‌شهری با سطح فشار پایین، سوراخی ایجاد شده است. سوراخ ایجاد شده در وسط لوله قرار دارد و جریان پیش از رسیدن به سوراخ به حالت توسعه‌یافته رسیده است. دما در ورودی



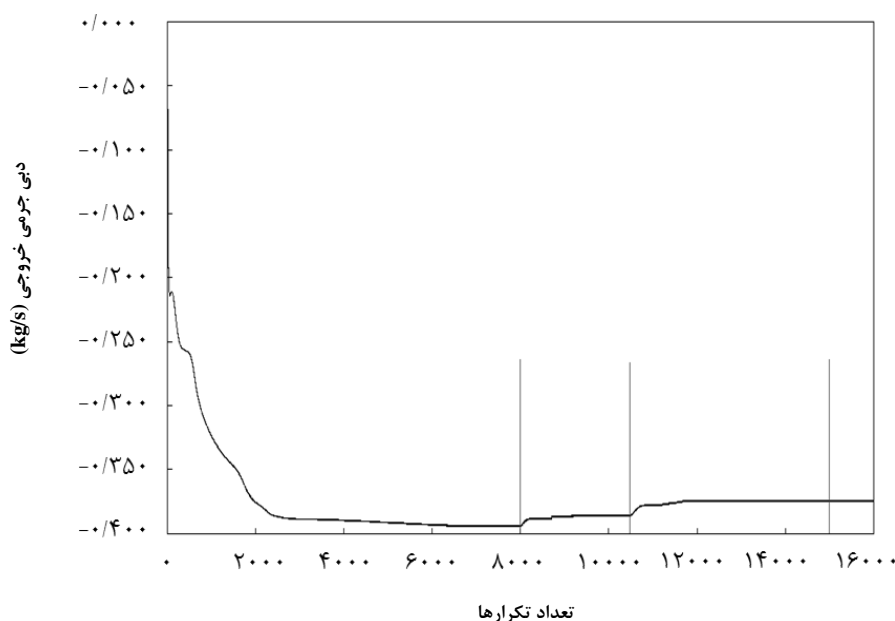
شکل ۷. استقلال از تعداد شبکه‌های دامنه جواب (برای نمونه‌ای با $d=30$ mm).

شدن قطر سوراخ، اختلاف فشار نقطه ورودی و فشار سوراخ $(p_1 - p_3)$ بیشتر می‌شود که نتیجه آن افزایش دبی حجمی خروجی خواهد بود.

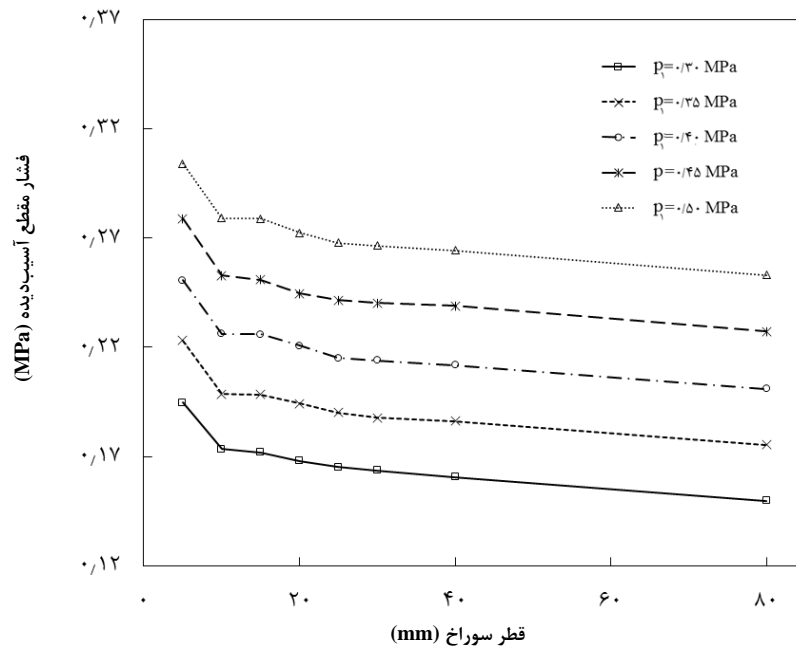
در شکل (۱۰) تغییرات دبی حجمی برحسب قطر سوراخ به‌ازای مقادیر مختلف فشار ورودی مشاهده می‌شود (به علت مشابه بودن نمودارها، کلیه نمودارهایی که در ادامه آورده شده‌اند مربوط به لوله با قطر ۱۶۳٫۶ میلی‌مترند که به عنوان نمونه آورده شده‌اند). برآزش داده‌های حاصل از تغییرات دبی ناشی بر حسب قطر سوراخ، نشان داد که دبی ناشی با قطر سوراخ به‌صورت یک تابع تقریباً درجه دو تغییر می‌کند و با نسبت قطر لوله به قطر سوراخ (d/D) رابطه درجه چهار دارد. مطابق شکل (۱۰) در سوراخ‌های با قطر بزرگ‌تر، شاهد افزایش چشمگیر دبی خروجی از سوراخ هستیم. بزرگ بودن قطر سوراخ باعث می‌شود که اختلاف فشار سوراخ و جریان بالادست نسبت به سوراخ‌های کوچک‌تر، بیش‌تر باشد و شاهد برگشت بیش‌تر جریان از سمت بالادست به سمت سوراخ باشیم. از این رو، در نظر گرفتن طول لوله بعد از سوراخ، تأثیر خود را در سوراخ‌های با قطر بزرگ نشان می‌دهد. به بیان دیگر، در تحقیق‌های گذشته که طولی برای جریان بالادست در نظر گرفته نشده است، نتایج از حالت واقعی فاصله می‌گیرند.

در شکل (۸) همگرایی دبی جرمی خروجی از سوراخ با قطر ۳۰ میلی‌متر را مشاهده می‌کنید. در برخی مطالعات که سیال تراکم‌پذیر و یا فشار کاری بالاست، به‌منظور همگرایی بهتر و صحیح بودن جواب‌ها، بهتر است ابتدا معادلات حاکم بر مسئله به‌صورت مرتبه اول گسسته‌سازی و پس از این که حل مسئله با گسسته‌سازی مرتبه اول به همگرایی رسید، در ادامه کار از گسسته‌سازی مرتبه دوم استفاده شود. مطابق شکل، در ابتدای کار، کلیه معادلات حاکم بر مسئله، ۸۰۰۰ تکرار با روش پادبادسوی مرتبه اول گسسته‌سازی و حل شده‌اند. با اینکه پس از ۸۰۰۰ تکرار مرتبه اول، جواب به همگرایی رسیده است، اما این جواب از صحت کافی برخوردار نیست. در ادامه کار، از تکرار ۸۰۰۰ تا ۱۰۵۰۰، جملات شامل عبارت‌های چگالی با استفاده از روش پادبادسوی مرتبه دوم گسسته‌سازی شده و از تکرار ۱۰۵۰۰ تا ۱۵۰۰۰ معادله تکانه نیز به‌صورت مرتبه دوم گسسته‌سازی شده است. از تکرار ۱۵۰۰۰ الی ۱۶۰۰۰، معادله انرژی با روش پادبادسوی مرتبه دوم گسسته‌سازی شده و مشاهده می‌شود که در این وضعیت گسسته‌سازی مرتبه دوم معادله انرژی تأثیری بر خروجی مسئله (دبی جرمی ناشی) ندارد.

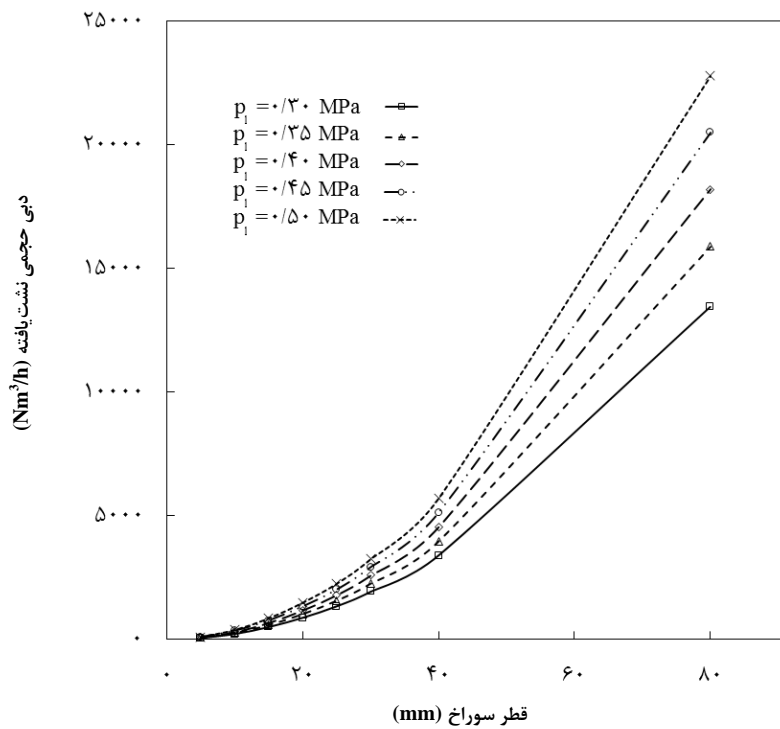
در شکل (۹) تغییرات فشار در سوراخ برحسب قطر سوراخ و به‌ازای مقادیر مختلفی برای فشار نقطه ورودی مشاهده می‌شود. مطابق این نمودار، به‌ازای یک مقدار مشخص برای فشار ورودی، با بزرگ‌تر



شکل ۸. همگرایی دبی جرمی خروجی از سوراخ (برای نمونه‌ای با $d=30$ mm).



شکل ۹. تغییر فشار سوراخ برحسب قطر سوراخ به‌ازای مقادیر مختلف فشار نقطه ابتدایی.



شکل ۱۰. تغییر دبی نشتی برحسب قطر سوراخ به‌ازای مقادیر مختلف فشار نقطه ابتدایی.

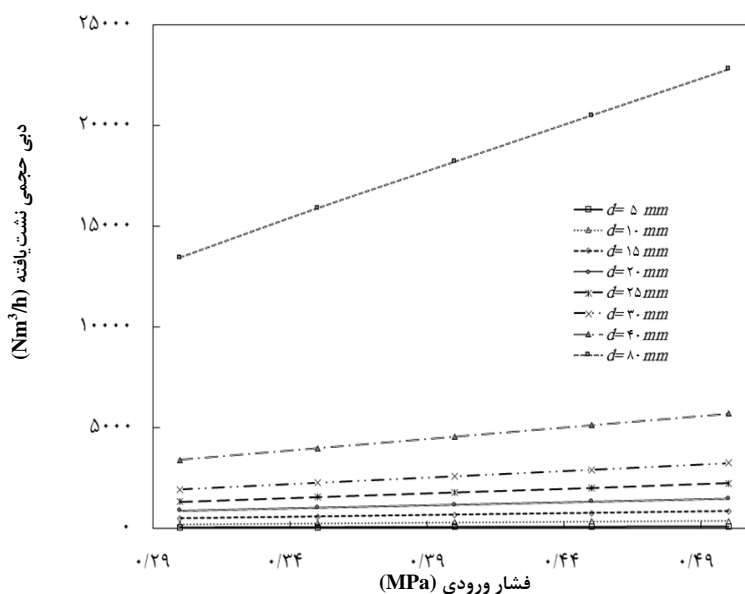
به‌طور خطی از فشار ورودی پیروی می‌کند و با افزایش فشار نقطه تغذیه، اختلاف فشار نقطه ابتدایی و سوراخ بیشتر می‌شود و به دنبال آن دبی گاز نشت یافته از سوراخ افزایش می‌یابد.

در شکل (۱۱)، تغییرات دبی حجمی نشتی به‌نحی که برحسب فشار ورودی برای قطرهای مختلف سوراخ نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، دبی حجمی تقریباً

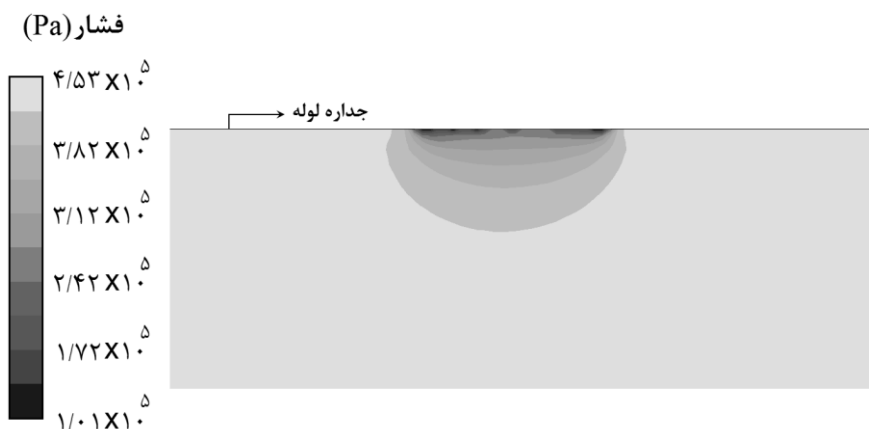
فشار محیط کم‌تر می‌شود.

دست‌آورد موارد اشاره شده، ایجاد یک موج انبساطی در داخل لوله است که باعث می‌شود جریان گاز را به سمت سوراخ به حرکت درآورد و مطابق شکل (۱۳)، برآیند سرعت جریان در مقطع آسیب‌دیده، برابر سرعت صوت باشد. همان‌طور که در پربندها مشاهده می‌شود، به علت تراکم‌پذیر بودن سیال مورد بررسی در این تحقیق، تمامی کمیت‌ها در نقاط مختلف سوراخ مقادیر مختلفی دارند. از این رو، برای تعیین کمیت‌ها در سوراخ، باید میانگین وزنی^۱ آنها در نظر گرفته شوند.

در شکل (۱۲) کانتور (پربند) فشار در لوله و پیرامون مقطع آسیب‌دیده را مشاهده می‌کنید. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، افت فشار در طول لوله بسیار کوچک است، اما در مقطع آسیب‌دیده تغییرات ناگهانی فشار چشمگیر می‌شود که علت آن تغییر ناگهانی سطح مقطع در مقطع آسیب‌دیده است (کوچک بودن قطر سوراخ نسبت به قطر لوله). به بیان دیگر، همین کوچک بودن زیادی سوراخ، باعث می‌شود که در مقطع آسیب‌دیده فشار از فشار محیط بزرگ‌تر باشد. همچنین، بررسی‌ها نتایج نشان می‌دهند که با افزایش قطر سوراخ، اختلاف فشار مقطع آسیب‌دیده و

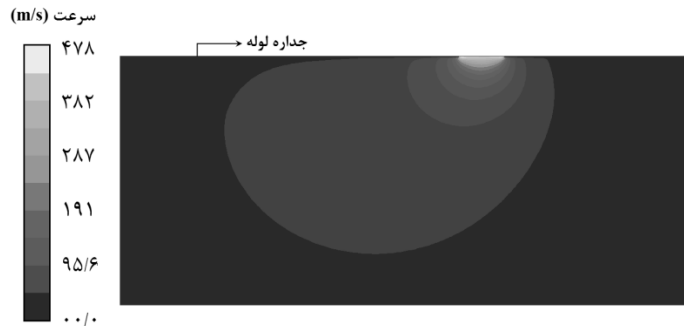


شکل ۱۱. تغییر دبی نشتی برحسب فشار نقطه ابتدایی به‌ازای مقادیر مختلف قطر سوراخ.



شکل ۱۲. پربند فشار مطلق پیرامون سوراخ.

1. Mass-Weighted Average



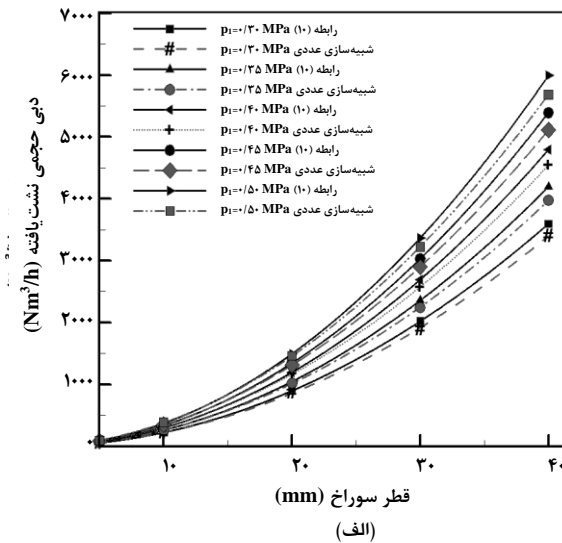
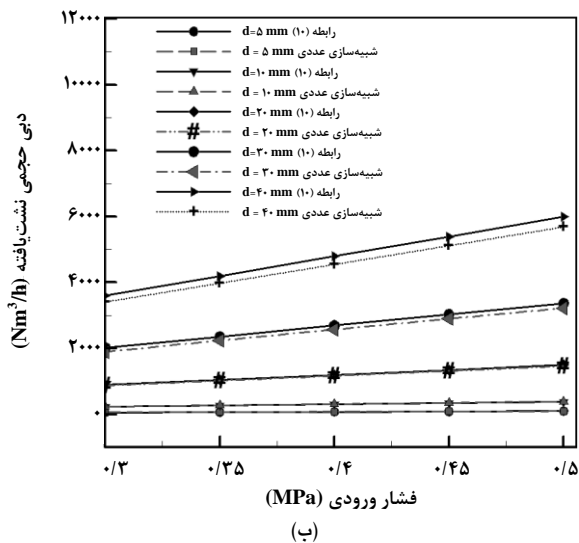
شکل ۱۳. پربند سرعت پیرامون سوراخ.

دارای دقت مناسبی است. در شکل (۱۴) نمودارهای مربوط به مقایسه نتایج حاصل شبیه‌سازی شده را در تحقیق و نتایجی که از رابطه (۱۰) به دست می‌آیند نمایش می‌دهند. با بررسی نتایج پی برده شد که کمترین میزان خطای نسبی^۱ بین نتایج موجود در این دو نمودار (مربوط به لوله با قطر $D = 20.4 \text{ mm}$ معادل $1/276$ درصد (برای نمونه‌ای با قطر سوراخ $d = 5 \text{ mm}$ و فشار $p_1 = 0.5 \text{ MPa}$) و بیشترین مقدار آن معادل $6/25$ درصد (برای نمونه‌ای با قطر سوراخ $d = 30 \text{ mm}$ و فشار $p_1 = 0.3 \text{ MPa}$) است. همچنین، مطابق نمودارها، الگوی تغییر دبی حجمی برحسب پارامترهای مختلف در نتایج شبیه‌سازی و نتایج رابطه (۱۰)، کاملاً با یکدیگر تطابق دارند.

براساس نتایجی که در بخشهای پیشین تشریح شدند، و با بررسی تغییرات مربوط به قطر سوراخ، قطر لوله و فشار نقطه ابتدایی، می‌توان دبی حجمی بهنجار شده گاز نشت یافته از سوراخ را با استفاده از رابطه (۱۰) محاسبه کرد.

$$Q = 0.748(1 + \beta^4)d^2p_1 \quad (10)$$

در این رابطه، Q دبی حجمی بهنجار شده گاز (Nm^3/h)، d قطر سوراخ (mm)، $\beta = d/D$ نسبت قطر سوراخ به قطر لوله، و p_1 فشار نقطه ابتدایی (bar abs) است. باید گفت که این رابطه برای سه لوله پر کاربرد مورد استفاده در خطوط توزیع گاز شهری (لوله‌های ۴، ۶ و ۸ اینچ)، در محدوده فشار $0.3 < p_1 < 0.5$ مگاپاسکال و برای سوراخ‌های کوچک با قطری در بازه $5 < d < 40$ میلی‌متر



شکل ۱۴. مقایسه دبی حجمی بهنجار شده حاصل از این شبیه‌سازی و فرمول (۱۰) برای نمونه‌ای با قطر لوله معادل $D = 20.4 \text{ mm}$ ، برحسب: (الف) قطر سوراخ، و (ب) فشار نقطه ابتدایی.

۱. درصد خطای نسبی = $\left| \frac{\text{تفاضل نتایج بدست آمده از شبیه‌سازی و رابطه (10)}}{\text{نتیجه بدست آمده از رابطه (10)}} \right| \times 100$

۵. نتیجه‌گیری کلی

در این مقاله، به مدل‌سازی عددی جریان گاز دوبعدی نشت یافته از یک سوراخ بر اساس روش‌های حجم محدود (متناهی) و با استفاده از نرم‌افزار فلونت پرداخته شده است. با توجه به این‌که مدل مطالعاتی در خطوط توزیع گاز شهری در محدوده فشار پایین است، سیال مورد استفاده در این پژوهش تراکم‌پذیر و در حالت گاز کامل فرض شده است و متان در حکم گاز طبیعی در نظر گرفته شده است. همچنین، بر اساس عدد رینولدز بحرانی در داخل لوله‌ها، جریان آشفته است. شرایط مرزی در نظر گرفته شده برای مدل مطالعاتی، شامل شرط مرزی فشار ورودی برای مقطع ابتدایی و شرط مرزی فشار خروجی برای مقطع انتهایی و نیز مقطع آسیب‌دیده (سوراخ) است و مدل مورد بررسی توسط نرم‌افزار گمیت طراحی شده است. اهم نتایج به‌دست آمده از این پژوهش از این قرارند:

- نتایج حاصل از شبیه‌سازی نمایانگر آن است که با بزرگ‌تر شدن قطر سوراخ، فشار مقطع آسیب‌دیده کاهش می‌یابد و به دنبال آن اختلاف فشار مقطع ابتدایی و مقطع آسیب‌دیده بیش‌تر می‌شود، که نتیجه آن افزایش دبی نشتی است. از طرفی، به دلیل این‌که در این مقاله سوراخ‌های با قطر کوچک بررسی شده است، کوچک بودن قطر سوراخ باعث می‌شود که اختلاف فشار مقطع آسیب‌دیده و فشار محیط کم باشد و در مقطع آسیب‌دیده یک جریان صوتی داشته باشیم.
- به جهت در نظر گرفتن طول لوله بعد از سوراخ، شاهد برگشت جریان از سمت پایین‌دست لوله به سمت سوراخ هستیم. همچنین، نتایج نشان می‌دهند که در نظر گرفتن طول لوله بعد از سوراخ تاثیر چشمگیری در میزان نشت گاز در سوراخ‌های با قطر بزرگ‌تر خواهد داشت.
- تحلیل نتایج حاصل از این شبیه‌سازی، بیانگر این است که دبی حجمی نشتی با قطر سوراخ، نسبت قطر سوراخ به قطر لوله و فشار نقطه ابتدایی، به ترتیب، به صورت توابع صعودی تقریباً درجه دوم، چهارم و اول تغییر یابند. همچنین، رابطه ارائه شده در اکثر نمونه‌ها، دارای خطای نسبی معادل کمتر از ۱۰ درصد است (خطای نسبی مقادیر بدست آمده از رابطه و نتایج شبیه‌سازی).

۶. سپاسگزاری

پژوهش حاضر با حمایت و پشتیبانی شرکت گاز استان سمنان صورت گرفته است. از حمایت‌ها و حسن‌نظر مسئولان مربوطه آن شرکت سپاسگزاریم.

مراجع

- [1] Husain, I. A. F., Alkhatib, M. F., Jammi, M. S., Mirghani, M. E. S., Zainudin, Z. B. Hoda, A., "Problems, Control, and Treatment of Fat, Oil, and Grease (FOG): A Review", Journal of oleo science, 63 (8), 747-752, (2014).
- [2] Yiting, H., Guoning, R., Wangzuo, C., Jinhua, P., Ronghai, L., Xinfu, Z., Keqing, C., "Quantitative Risk Analysis on the Leakage of Compressed Natural Gas Pipeline", China Safety Science Journal, Vol. 13, No. 6, pp. 21-24, (2003).
- [3] Flatt, R., "A Singly-Iterative Second-Order Method of Characteristics for Unsteady Compressible One-Dimensional", Communications in Applied Numerical Methods, Vol. 1, No. 6, pp. 269-274, (1985).
- [۴] شامحمدی، ابراهیم، لنگری مبین، نادری فر عباس، "محاسبه شدت جریان گاز خروجی از نشتی در لوله‌های گاز"، نخستین همایش بین‌المللی بازرسی و ایمنی در صنایع نفت و انرژی، تهران، ایران، (۱۳۸۹).
- [5] Costello, K., "Lost and Unaccounted-for Gas: Challenges for Public Utility Regulators", Utilities Policy, Vol. 29, No. 1, pp. 17-24, (2014).
- [6] Arpino, F., Dell'Isola, M., Ficco, G., Vigo, P., "Unaccounted for Gas in Natural Gas Transmission Networks: Prediction Model and Analysis of the Solutions", Journal of Natural Gas Science and Engineering, Vol. 17, No.1, pp. 58-70, (2014).
- [7] Montiel, H., Vilchez, J., Arnaldos, J., Casal, J., "Historical Analysis of Accidents in the Transportation of Natural Gas", Journal of Hazardous Materials, Vol. 51, No. 1-3, pp. 77-92, (1996).
- [8] Murvay, P., Silea, I., "A Survey on Gas Leak Detection and Localization Techniques", Journal of Loss Prevention in the Process Industries, Vol. 25, No. 6, pp. 966-973, (2012).
- [۹] جابری خسروشاهی، علیرضا، حسین‌پور، سیامک، نورالهی بسطام، نوراله، "شبیه‌سازی جریان و تعیین دبی گاز خروجی هنگام شکست کامل لوله با در نظر گرفتن خواص گاز واقعی"، نخستین کنفرانس بین‌المللی نفت، گاز و پتروشیمی با رویکرد توسعه پایدار (ارتباط دانشگاه با صنعت)، تهران، ایران، (۱۳۹۳).

- [10] Nouri-Borujerdi, A., "Transient Modeling of Gas Flow in Pipeline Following Catastrophic Failure", *Mathematical and Computer Modeling*, Vol. 54, No. 11-12, pp. 3037-3045, (2011).
- [11] Montiel, H., Vilchez, J., Casal, J., Arnaldos, J., "Mathematical Modeling of Accidental Gas Releases", *Journal of Hazardous Materials*, Vol. 59, No. 2-3, pp. 211-233, (1998).
- [12] Woodward, J. L., Mudan, K. S., "Liquid and Gas Discharge Rates through Holes in Process Vessels", *Journal of Loss Prevention in the Process*, Vol. 4, No. 9, pp. 161-165, (1991).
- [13] Jo, Y., Ahn, B., "A Simple Model for the Release Rate of Hazardous Gas from a Hole on High-Pressure Pipelines", *Journal of Hazardous Materials*, Vol. 97, No. 1-3, pp. 31-46, (2003).
- [14] Yuhu, D., Huilin, G., Jing-en, Z., Yaorong, F., "Mathematical Modeling of Gas Releases through Holes in Pipelines", *Chemical Engineering Journal*, Vol. 92, No. 1-3, pp. 237-241, (2003).
- [15] Oke, A., Mahgerefteh, H., Economou, I., Rykov, Y., "A Transient Outflow Model for Pipeline Puncture", *Chemical Engineering Science*, Vol. 58, No. 20, pp. 4591-4604, (2003).
- [16] نورالهی احسان، داورپناه سید احسان، برادران رحیمی اصغر، "شبیه‌سازی نشتی خطوط لوله گاز با استفاده از روش مشخصه‌ها"، دوازدهمین کنفرانس دینامیک شاره‌ها، بابل، ایران، (۱۳۸۸).
- [17] Kostowski, W. J., Skorek, J., "Real Gas Flow Simulation in Damaged Distribution Pipelines", *Energy*, Vol. 45, No. 1, pp. 481-488, (2012).
- [18] Lu, L., Zhang, X., Yan, Y., Li, J. M., Zhao, X., "Theoretical Analysis of Natural-Gas Leakage in Urban Medium-Pressure Pipelines", *Journal of Environment and Human*, Vol. 1, No. 2, pp. 71-86, (2014).
- [19] FLUENT 6.3 User's Guide, February (2003).
- [20] Versteeg, H. K., Malalasekera, W., "An Introduction to Computational Fluid Dynamics; the Finite Volume Method", Longman Scientific and Technical, London, (1995).
- [21] Launder, B. E., Spalding, D. B., "The Numerical Computation of Turbulent Flows", *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol. 3, No. 2, pp. 269-289, (1974).
- [22] جابری خسروشاهی، علیرضا، "ارزیابی و تحلیل مقدار گاز طبیعی تخلیه شده از لوله به محیط"، پایان‌نامه مقطع کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی سهند، (۱۳۹۳).
- [23] Handbook of Polyethylene Pipe, Second Edition, Plastics Pipe Institute (PPI), Decker Court, (2007).