

## توسعه یک رابطه برای محاسبه نشت گاز طبیعی از خطوط توزیع گاز مدفون

در مقاله حاضر به محاسبه میزان نشت گاز طبیعی از یک سوراخ کوچک واقع بر سطح لوله و ارائه یک رابطه برای محاسبه آن پرداخته شده است. مدل مطالعاتی توسط نرم‌افزار گمبیت طراحی و شبکه‌بندی شده و سپس حل عددی توسط نرم‌افزار فلوئنت انجام شده است. لوله در خطوط توزیع گاز درون شهری واقع بوده، جریان به صورت آشفته می‌باشد و خاک به صورت یک ناحیه متخلخل در نظر گرفته شده است. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که در سوراخ‌های با قطر کوچک، سرعت تخلیه به سرعت صوت رسیده و به اصطلاح خفگی در جریان رخ می‌دهد. همچنین پس از نفوذ گاز طبیعی به داخل خاک و برخورد به ذرات خاک و هوای عبوری از بین ذرات خاک، یک جفت گردابه در داخل خاک تشکیل می‌شود.

امیر ابراهیمی مقدم<sup>۱</sup>  
دانشجوی کارشناسی ارشد

محمود فرزانه گرد<sup>۲</sup>  
استاد

مهدی دیمی دشت بیاض<sup>۳</sup>  
استادیار

واژه‌های راهنما: گاز طبیعی، میزان نشتی، لوله مدفون، خاک، شبیه‌سازی عددی، فلوئنت

### ۱- مقدمه

کشور عزیزمان ایران با داشتن ۱۴٫۰۷ درصد از منابع گاز طبیعی جهان، از نظر حجم منابع گاز طبیعی در سطح جهان مقام دوم را دارا می‌باشد. امروزه با توجه به محدودیت منابع نفتی در مقایسه با گاز طبیعی، استفاده از گاز طبیعی برای مصارف سوختی و همچنین به عنوان ماده اولیه صنایع پتروشیمی رو به افزایش است و در نتیجه توجه به خطوط لوله انتقال گاز و حوادث مربوط به آن، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار می‌شود [۱]. خطوط لوله ایمن‌ترین و راحت‌ترین وسیله انتقال و توزیع گازهای خطرناک مانند گاز طبیعی می‌باشند. با این وجود این خطوط می‌توانند در معرض آسیب‌های گوناگونی از جمله خوردگی و عوامل مکانیکی خارجی قرار بگیرند [۲، ۳]. سالانه مقدار قابل توجهی گاز تحت عنوان گازهای گمشده، هدر می‌رود [۴] که عبارت است از اختلاف میان گاز وارد شده به شبکه‌های گازرسانی و گازی که به مصرف کنندگان فروخته می‌شود [۴، ۵].

<sup>۱</sup> نویسنده مسئول، دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شاهرود  
amir\_abraheemi\_051@yahoo.com

<sup>۲</sup> استاد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شاهرود  
imchm@yahoo.co.uk

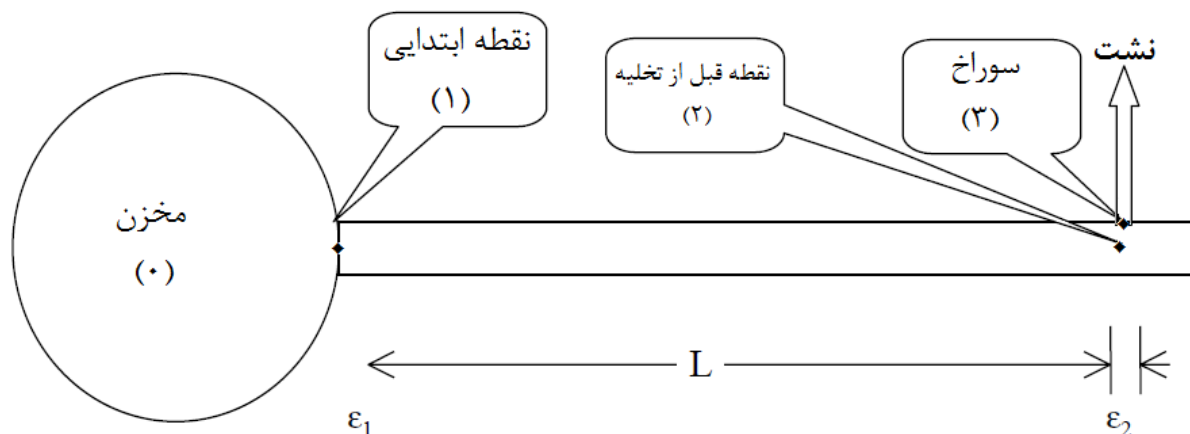
<sup>۳</sup> استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه حکیم سبزواری  
meh\_deimi@yahoo.com

تاریخ دریافت: ۹۴/۱۰/۰۹، تاریخ پذیرش: ۹۵/۰۲/۲۶

از عواملی که در گم شدن گازها دخالت دارد می‌توان به نشت گاز از لوله و اتصالات، خطاهای اندازه‌گیری، آسیب‌های شخص سوم و سرقت گاز اشاره کرد. از بین عوامل یاد شده، نشت گاز با توجه به داشتن سهم بسیار بالا (حدود ۷۹ درصد از گازهای گمشده) مهم‌ترین عامل در گازهای گمشده به شمار می‌رود [۶].

نشت گاز طبق تعریف عبارتست از خروج ناخواسته گاز از لوله‌ها، اتصالات و تاسیسات گازرسانی که می‌تواند بر اثر عوامل مختلفی چون سایش داخلی، خوردگی سطح لوله، عوامل خارجی (ضربه‌های مکانیکی همچون برخورد بیل مکانیکی با لوله)، نقص در ساختار لوله‌ها و اتصالات و... رخ دهد [۶]. 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 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 به صورت‌های مختلف مشخصات سیال را هنگام خروج از این ناحیه به دست آورد [۷]. در اثر شکستگی لوله، یک موج انبساطی درون لوله ایجاد شده و به حرکت در آمده و گاز درون لوله را به سمت نقطه شکست به جنبش در می‌آورد [۸].

برای مدل‌سازی نشت گاز در خطوط لوله، دو روش وجود دارد. در روش اول، جریان گاز نشت یافته از یک سوراخ که در این حالت لوله همانند یک مخزن در نظر گرفته می‌شود محاسبه می‌گردد که این روش به مدل سوراخ (حفره) معروف می‌باشد. اما در روش دوم، قطر سوراخ بزرگتر یا مساوی قطر لوله در نظر گرفته می‌شود. به عبارت دیگر این حالت برای مدل‌سازی شکست کامل لوله کاربرد دارد و مدل لوله نام دارد [۹]. شکل (۱) طرح‌واره مدل استفاده شده در یکی تحقیق‌های گذشته را نشان می‌دهد. مدل سوراخ به صورت گسترده در مطالعات مورد بررسی قرار گرفته است. در سال (۱۹۹۱)، Woodward و Mudan یک مدل برای محاسبه نرخ تخلیه مایع و گاز از سوراخ در مجراهای فرآیند، توسعه دادند که به محاسبه کاهش فشار به عنوان تابعی از زمان پرداخته است [۱۱]. در سال (۱۹۹۸)، Montiel 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 [۹]. به دلیل این که 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 به صورت آیزنتروپیک، جریان داخل لوله را به صورت آدیباتیک و همچنین جریان گاز را به صورت یک‌بعدی در نظر گرفته‌اند.



شکل ۱- طرح‌واره مدل سوراخ در جریان نشتی [۱۰]

سوراخ موجود در شبیه‌سازی ایشان همانند یک اروفیس با قطر متغیر در نظر گرفته شده است. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که مدل پیشنهادی توسط آن‌ها، 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 می‌باشد.

Yuhu و همکارانش در سال (۲۰۰۳) مدل و فرضیه‌های پیشنهادی توسط منتیل را با اعمال ضریب تراکم‌پذیری ثابت ۰/۹ در معادله حالت برای فشارهای بالا بررسی کرده‌اند [۱۲]. آن‌ها 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 فرآیند حالت پایدار در نظر گرفت.

Oke و همکارانش در سال (۲۰۰۳) به محاسبه جریان نشتی گاز از یک لوله در یک فرآیند گذرا پرداخته‌اند [۱۳]. آن‌ها 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 مساله استفاده کرده‌اند و جریان در محل سوراخ را به‌صورت جریان آیزنتروپیک در نظر گرفته‌اند. آن‌ها 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 نمی‌باشد.

Ahn و Jo 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 حادثه واقعی، آن را اعتبارسنجی کرده‌اند [۱۴]. آن‌ها سوراخ را در یک لوله 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 آدیاباتیک در نظر گرفته‌اند. همچنین اتلاف اصطکاکی در نازل و سوراخ را در مقایسه با اتلاف اصطکاکی لوله ناچیز فرض کرده‌اند. آن‌ها برای محاسبه نرخ گاز نشت‌یافته از سوراخ، از تغییرات انرژی جنبشی گاز در معادله مومنتوم صرف‌نظر کرده و به این نتیجه رسیده‌اند که مدل ساده صریح پیشنهادی، از مدل تئوری نرخ تخلیه گاز را کمی بیش‌تر نشان می‌دهد که برای نسبت گرمای ویژه ۱/۴۲، مقدار این انحراف از ۰ تا ۲۰ درصد متغیر می‌باشد.

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

Skorek و Kostowski در سال (۲۰۱۲) به بررسی جریان در لوله‌های آسیب‌دیده شبکه توزیع گاز طبیعی پرداخته‌اند و در مدل پیشنهادی خود، لوله آسیب‌دیده را به صورت باز بودن دیوارکناری در نظر گرفته‌اند [۱۶]. آن‌ها جریان داخل لوله را در حالت‌های جریان دماثابت و جریان آدیاباتیک شبیه‌سازی کرده و هر یک از این دو حالت را برای گاز کامل و گاز واقعی بررسی کرده‌اند و اثر ضریب تخلیه را در دبی خروجی گاز مورد تحلیل قرار داده‌اند.

در سال (۲۰۱۴)، Lu و همکارانش به تحلیل تئوری نشت گاز طبیعی در خطوط لوله شهری فشار متوسط پرداخته‌اند و مدل پیشنهادی خود را برای دو حالت پایا و گذرا (ناپایا) مورد بررسی قرار داده‌اند [۱۷]. به دلیل این که فشار سیستم مورد بررسی آن‌ها در محدوده فشار متوسط بود، از فرض گاز ایده‌آل برای سیال خود استفاده کردند و جریان درون لوله را به صورت آدیاباتیک و جریان در سوراخ را به صورت آیزنتروپیک فرض کرده‌اند. همچنین مدل‌سازی جریان را به صورت یک‌بعدی انجام داده‌اند.

در این پژوهش به تعیین میزان نشت گاز در خطوط لوله توزیع گاز درون شهری مدفون، با استفاده از روش‌های عددی پرداخته می‌شود. لذا با به کارگیری نرم‌افزارهای قدرتمند موجود در زمینه دینامیک سیالات محاسباتی، به تعیین نشت گاز بر اساس تغییر در تمام پارامترهای موثر بر آن پرداخته خواهد شد. تقریباً در تمامی تحقیق‌های انجام گرفته در گذشته به محاسبه نشت گاز از خطوط لوله گاز رو زمینی پرداخته شده است و در زمینه محاسبه نشت از خطوط مدفون در خاک تحقیقی صورت نگرفته است. همچنین در تحقیقات گذشته، مدل‌سازی جریان به صورت یک‌بعدی انجام گرفته و در اکثر موارد لوله را به صورت یک مخزن بسته مدل‌سازی کرده‌اند. به عبارت دیگر طولی از لوله را برای بعد از سوراخ در نظر نگرفته‌اند. لذا به دلیل عدم وجود مراجع معتبر مشابه در زمینه لوله‌های مدفون، ابتدا برای صحت‌سنجی شبیه‌سازی انجام گرفته در این تحقیق، به شبیه‌سازی جریان گاز نشت یافته از خطوط توزیع گاز رو زمینی پرداخته شده و در ادامه به شبیه‌سازی و بررسی خطوط لوله مدفون در خاک پرداخته شده است.

در این تحقیق، مدل‌سازی به صورت دوبعدی انجام شده است و همچنین طول لوله بعد از سوراخ نیز در نظر گرفته شده است. به عبارت دیگر، جریان به دو قسمت جریان بالادست و پایین دست تقسیم شده است. از طرفی دیگر، در هیچ یک از تحقیقات گذشته رابطه‌ای کاربردی جهت محاسبه نشت گاز ارائه نشده و صرفاً به ارائه نتایج حاصل از شبیه‌سازی بسنده شده است. لذا در انتهای پژوهش یک رابطه ساده و کاربردی برای محاسبه نشت گاز بر حسب متغیرهایی که بر میزان نشت گاز دخالت دارند ارائه خواهد شد.

## ۲- تئوری مساله

همانطور که اشاره شد، برای محاسبه مقدار نشتی، دو روش وجود دارد که عبارتند از:

الف) مدل سوراخ (حفره)

ب) مدل لوله

در حالت (الف)، جریان گاز نشت یافته از یک سوراخ محاسبه می‌گردد که در این روش لوله همانند یک مخزن در نظر گرفته می‌شود. به عبارت دیگر در این حالت سوراخی بر سطح جانبی لوله وجود دارد که قطر سوراخ از قطر لوله کوچک‌تر می‌باشد و جریان سیال از این سوراخ به بیرون نشت می‌یابد.

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

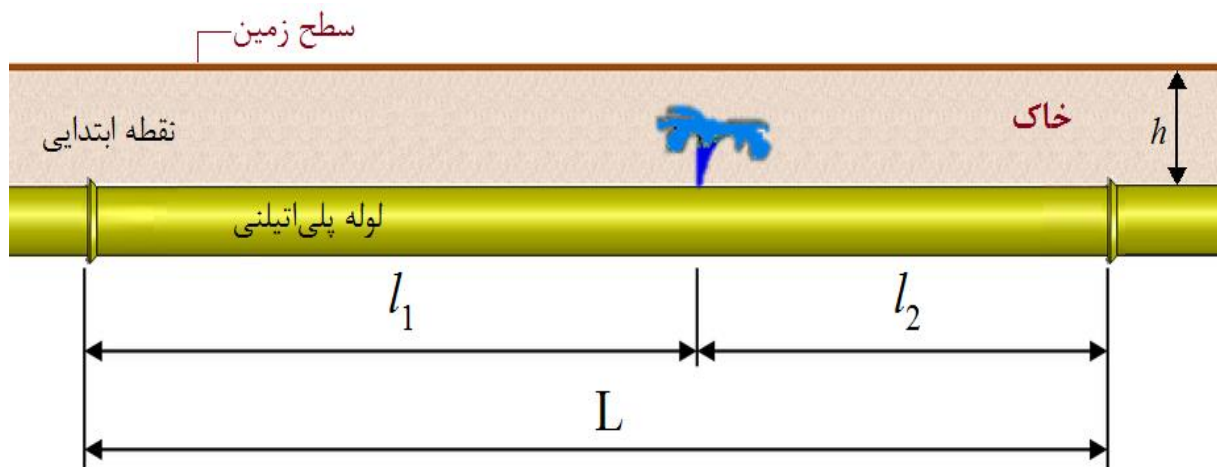
در این مقاله مدل موردنظر، از نوع مدل سوراخ می‌باشد. در این حالت ملاک تشخیص اینکه در مقطع خروجی چه نوع جریانی وجود خواهد داشت، بر اساس پارامتری به نام نسبت فشار بحرانی (CPR) می‌باشد که به صورت رابطه (۱) تعریف می‌شود:

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

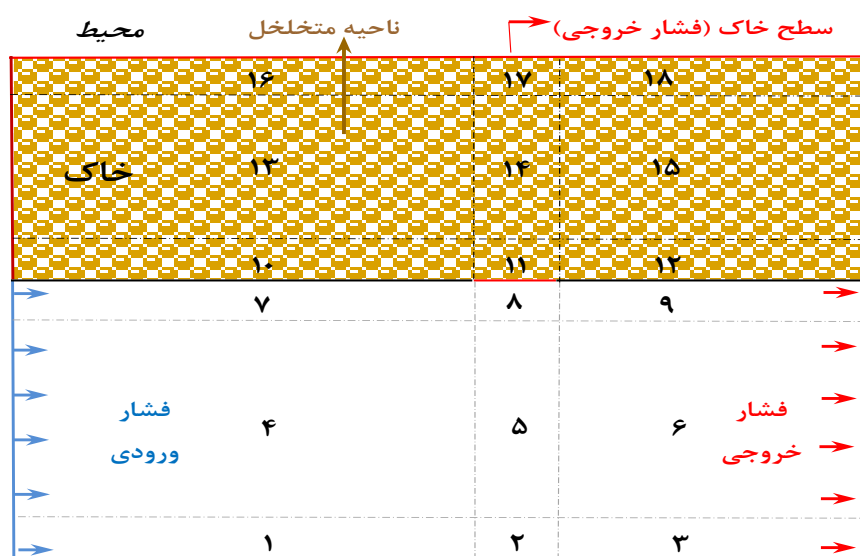
که در این رابطه  $p_a$  بیانگر فشار محیط بیرون،  $p_{2cr}$  فشار بحرانی نقطه ۲ و  $\gamma$  نسبت ظرفیت حرارتی می‌باشد. براساس رابطه (۱)، در صورتی که فشار نقطه ۲، بزرگتر از فشار بحرانی در این نقطه باشد ( $p_2 > p_{2cr}$ )، در لوله خفگی رخ داده و سرعت تخلیه به سرعت صوت می‌رسد. اما در نقطه مقابل، اگر  $p_2 < p_{2cr}$  باشد، یک جریان مادون صوت خواهیم داشت [۹، ۱۲، ۱۷].

### ۳- مدل مطالعاتی و حل عددی

برای طراحی و شبکه‌بندی مدل مطالعاتی در این پژوهش از نرم‌افزار گمبیت استفاده شده است. مدل مطالعاتی این پژوهش لوله‌ای به طول ۵ متر می‌باشد که سوراخی در فاصله ۳ متری از نقطه ابتدایی خط لوله بر سطح جانبی آن ایجاد شده است. از آنجا که دیواره‌ها به‌عنوان منبع اصلی تشکیل حالت گردابی و آشفتگی می‌باشند و در نزدیکی دیواره‌ها کمیت‌هایی چون سرعت دارای گرادیان شدیدی هستند، مدل کردن صحیح جریان در نزدیکی دیواره اثر بسیار مهمی بر موفقیت‌آمیز بودن حل دارد. لذا در نزدیکی دیواره‌ها و همچنین سوراخ، شبکه‌بندی بسیار ریزتر از نواحی دیگر انتخاب شده است. برای شبکه‌بندی هندسه تولید شده، از شبکه سازمان‌یافته (شبکه‌های مربعی) استفاده شده است و در این حالت برای دستیابی به هدف اشاره شده در فوق، محیط حل به ۱۸ ناحیه تقسیم‌بندی شده است. شکل (۲) نشان دهنده طرح‌واره مدل مطالعاتی این تحقیق و شکل (۳) نیز نشان دهنده محیط حل و شرایط مرزی می‌باشد.



شکل ۲- طرح‌واره محیط حل و شرایط مرزی



شکل ۳- محیط حل و شرایط مرزی

هدف این پژوهش تعیین میزان نشتی در خطوط توزیع گاز طبیعی و با استفاده از روش‌های عددی توسط نرم‌افزار فلونت می‌باشد. از آنجا که معادلات حاکم بر جریان درون لوله و جریان در خاک متفاوت می‌باشد، لذا معادلات به دو بخش مجزا تقسیم‌بندی می‌شوند. معادلات حاکم بر مساله با استفاده از روش بادسو<sup>۱</sup> گسسته‌سازی شده‌اند؛ به‌طوری‌که برای همگرایی بهتر و دقیق‌تر ابتدا کلیه معادلات حاکم بر مساله با استفاده از روش بادسو مرتبه اول گسسته‌سازی و حل شده‌اند. پس از اینکه جواب مساله با استفاده از روش مرتبه اول همگرا شد، در ادامه به ترتیب معادلات پیوستگی، مومنتوم و انرژی با استفاده از روش بادسوی مرتبه دوم گسسته‌سازی شده‌اند. این روش گسسته‌سازی به‌خاطر تراکم‌پذیر بودن سیال موردنظر و تغییرات ناگهانی متغیرها در نزدیکی سوراخ، مورد استفاده قرار گرفته 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 جملات سرعت و فشار نیز از طریق الگوریتم سیمپل<sup>۲</sup> صورت گرفته است.

### ۳-۱- معادلات حاکم بر جریان داخل لوله

سیال مورد استفاده در این پژوهش از نوع تراکم‌پذیر می‌باشد. بر این اساس معادله‌های حاکم بر مساله، علاوه بر معادله‌های بقای جرم (پیوستگی)، بقای اندازه حرکت (مومنتوم) و بقای انرژی، شامل معادله حالت نیز می‌باشد. این معادله‌ها برای سیال تراکم‌پذیر و در حالت پایا به‌ترتیب به‌صورت رابطه‌های (۲) تا (۵) می‌باشند [۱۹، ۱۸].

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

<sup>1</sup> Upwind

<sup>2</sup> Simple

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

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

$$pv = RT \quad (5)$$

معادله (۲) بیانگر معادله پیوستگی می‌باشد که در این معادله،  $\rho$  چگالی،  $u_i$  بردار سرعت و  $S_m$  جرم اضافه شده به فاز پیوسته اول از فاز پراکنده دوم (به‌عنوان مثال، به‌علت تبخیر قطره‌های مایع) می‌باشد. معادله (۳)، معادله پایستگی مومنوم می‌باشد که در آن  $p$  نشان دهنده فشار استاتیکی،  $\bar{\tau}_{ij}$  تانسور تنش،  $\rho g_i$  نیروی جاذبه و  $F_i$  نیروی خارجی می‌باشد و عبارت  $-\rho \overline{u_i u_j}$  به‌عنوان مؤلفه‌های تنش رینولدز شناخته می‌شود.

معادله (۴)، معادله پایستگی انرژی می‌باشد که در آن  $E$  انرژی کل،  $k_{eff}$  ضریب هدایت حرارتی موثر (مقدار این ضریب برابر  $k_{eff} = k + k_t$  می‌باشد، که در آن  $k_t$  ضریب هدایت حرارتی آشفته می‌باشد و بر اساس مدل آشفته‌گی استفاده شده، تعیین می‌گردد و در مدل‌های آشفته‌گی کا-اپسیلون<sup>۱</sup> به‌صورت  $k_t = \frac{c_p \mu_t}{Pr_t}$  تعریف می‌شود که در آن  $Pr_t$  معرف عدد بی‌بعد پرانتل آشفته می‌باشد)،  $T$  دما و  $(\bar{\tau}_{ij})_{eff}$  تانسور تنش موثر می‌باشند. دو جمله سمت راست معادله (۴) نیز به‌ترتیب معرف انتقال انرژی به‌دلیل انتقال حرارت هدایتی و اتلاف گرانی <sup>۲</sup> سیال می‌باشد.  $S_h$  هم دربرگیرنده حرارت تولید شده در اثر واکنش‌های شیمیایی و یا هر گونه منبع حرارتی دیگر می‌باشد. معادله (۵) معادله حالت گاز ایده‌آل می‌باشد که در آن  $p$ ،  $v$ ،  $T$  و  $R$  به‌ترتیب نشان دهنده فشار، حجم مخصوص، دما و ثابت گاز می‌باشند.

### ۳-۲- معادلات حاکم بر جریان در ناحیه متخلخل

به‌طور کلی معادله‌های جریان در ناحیه متخلخل به‌صورت مستقل از ناحیه درون لوله تعریف و حل می‌شوند. بر این اساس معادله‌های حاکم بر این ناحیه (معادله‌های پیوستگی، مومنوم و انرژی) به‌ترتیب به‌صورت معادله‌های (۶)، (۷) و (۸) می‌باشند [۲۰، ۱۸].

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\gamma \rho u_i) = S_m \quad (6)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\gamma \rho u_i u_j) = -\gamma \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial(\gamma \bar{\tau}_{ij})}{\partial x_j} + \gamma \rho g_i - \left(\frac{\mu}{\alpha} + \frac{C_2 \rho}{2} |u_i|\right) u_i \quad (7)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i}[u_i(\rho_f E_f + p)] = \frac{\partial}{\partial x_j}\left[k_{eff} \frac{\partial T}{\partial x_j} + u_i(\bar{\tau}_{ij})_{eff}\right] + S_f^h \quad (8)$$

که در این معادله‌ها،  $\gamma$  میزان تخلخل<sup>۳</sup> می‌باشد که عبارت‌است از سهم سیال عبوری از میان ماده متخلخل نسبت به ماده متخلخل و عددی بین ۰ تا ۱ می‌باشد؛ به‌عنوان مثال اگر بخواهیم ناحیه متخلخلی متشکل از ۸۰ درصد ماده جامد و ۲۰ درصد سیال عبوری از بین مواد جامد، تعریف نماییم، باید  $\gamma = ۰.۲$  تعریف

<sup>1</sup> k-epsilon (k-ε)

<sup>2</sup> Viscous dissipation

<sup>3</sup> Porosity

نمائیم. در آخرین جمله سمت راست معادله (۷)، عبارت اول  $(\frac{\mu}{\alpha})$  و دوم  $(\frac{C_2\rho}{2})$  به ترتیب بیان گر نیروی پسای ویسکوز و نیروی پسای اینرسی می باشند و  $\alpha$  نفوذپذیری ماده متخلخل می باشد.

در معادله (۸)،  $\rho_f$  و  $E_f$  به ترتیب چگالی و انرژی کل سیال عبوری از میان ذرات ماده متخلخل می باشد و ضریب هدایت حرارتی موثر به صورت رابطه (۹) محاسبه می شود [۲۰، ۱۸].

$$k_{eff} = Yk_f + (1 - Y)k_s \quad (9)$$

که در این رابطه،  $k_s$  و  $k_f$  به ترتیب ضریب هدایت حرارتی سیال و ماده جامد موجود در ناحیه متخلخل می باشند.

### ۳-۳- مدل آشفتگی

همان طور که اشاره شد، با توجه به عدد رینولدز (Re)، جریان به صورت آشفته در نظر گرفته می شود. تا کنون مدل های آشفتگی زیادی ارائه شده اند که هر کدام برای رژیم های خاص جریانی و حتی در ناحیه ای خاص از میدان جریان معتبر و دقیق می باشند. هدف نهایی تمام مدل های آشفتگی محاسبه اندازه تنش رینولدز  $(-\rho\overline{u_i u_j})$  در نقاط مختلف جریان است. مدل های آشفتگی به سه دسته مدل های صفر، یک و دو معادله ای تقسیم بندی می شوند. برای مدل سازی آشفتگی در این تحقیق از روش کا-اپسیلون استاندارد<sup>۱</sup> که یک مدل دو معادله ای می باشد، استفاده شده است. همچنین جهت مدل سازی رفتار ناحیه نزدیک دیواره، از تابع دیواره استاندارد<sup>۲</sup> که در جریان های معمولی رینولدز- بالا کاربرد دارد مورد استفاده قرار گرفته است.

در روش کا-اپسیلون دو معادله انتقال اضافی که معادله های  $k$  و  $\varepsilon$  نام دارند حل می شوند و ویسکوزیته آشفته  $(\mu_t)$  به عنوان تابعی از  $k$  و  $\varepsilon$  به دست می آید. معادله های  $k$  و  $\varepsilon$  در روش کا-اپسیلون استاندارد به- ترتیب به صورت معادله های (۱۰) و (۱۱) می باشند.

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (10)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon \quad (11)$$

در معادله های (۱۰) و (۱۱)،  $G_k$  تولید انرژی جنبشی آشفتگی ناشی از گردایان های سرعت متوسط،  $G_b$  تولید انرژی جنبشی آشفتگی ناشی از شناوری و  $Y_M$  سهم اتساع نوسانی<sup>۵</sup> در آشفتگی تراکم پذیر، از نرخ اتلاف کل<sup>۶</sup> می باشد. همچنین  $C_{1\varepsilon} = 1/44$ ،  $C_{2\varepsilon} = 1/92$  و عددهای ثابتی هستند. ویسکوزیته آشفته نیز به صورت  $\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$  تعریف می شود که در آن  $C_\mu = 0.09$  می باشد. همچنین  $\sigma_k = 1$  و  $\sigma_\varepsilon = 1/3$  به ترتیب بیان گر عدد پراتل آشفته برای  $k$  و  $\varepsilon$  می باشند [۲۱، ۱۹، ۱۸].

<sup>1</sup> Standard k-ε

<sup>2</sup> Standard Wall Function

<sup>3</sup> Turbulence Kinetic Energy

<sup>4</sup> Turbulence Dissipation Rate

<sup>5</sup> Fluctuating Dilatation

<sup>6</sup> Overall Dissipation Rate



### ۳-۴- شرایط مرزی

در مقطع ورودی لوله، شرط مرزی از نوع فشار ورودی<sup>۱</sup> و در مقطع انتهای لوله از نوع فشار خروجی<sup>۲</sup> استفاده شده است. از آنجایی که سوراخ یک مرز مشترک برای لوله و خاک می‌باشد، پس از جداسازی سوراخ از روی لوله و خاک، از شرط مرزی فشار خروجی (روی لوله) و مرز مشترک<sup>۳</sup> (روی خاک) 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 می‌باشد، استفاده از فرض گاز ایده‌آل (با  $c_p$  ثابت) جوابگوی این شرایط می‌باشد؛ به‌طوری‌که طبق نتایج تحقیق صورت گرفته در مرجع [۲۲]، اختلاف بین فرض گاز ایده‌آل ( $c_p$  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  $۹/۲۶\%$ ،  $۱/۶۷\%$  و  $۰/۴۱\%$  می‌باشد. نکته قابل توجه این است که فشار کل و دمای کل، به ترتیب به صورت روابط (۱۲) و (۱۳) می‌باشند.

$$\frac{p_{tot}}{p_0} = \left(1 + \frac{\gamma - 1}{2} Ma^2\right)^{\frac{\gamma}{\gamma - 1}} \quad (12)$$

$$\frac{T_{tot}}{T_0} = 1 + \frac{\gamma - 1}{2} Ma^2 \quad (13)$$

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 می‌باشد.

### ۳-۵- شبیه‌سازی عددی جریان داخل خاک

همان‌طور که قبلاً اشاره شد، برای شبیه‌سازی خاک، از تعریف یک ناحیه متخلخل استفاده شده است که خواص خاک مورد مطالعه در این پژوهش در جدول (۱) ارائه شده است. همچنین سیال عبوری از بین ذرات خاک، هوا در نظر گرفته شده است. ضرایب مورد نیاز برای مدل کردن مقاومت محیط متخلخل در برابر حرکت سیال به دو صورت تجربی و یا از خواص ماده متخلخل تعریف می‌شود. مقاومت ویسکوز<sup>۴</sup> و مقاومت اینرسی<sup>۵</sup> ضرایبی هستند که از خواص ماده متخلخل مورد استفاده به دست می‌آیند. مقاومت ویسکوز به صورت معکوس نفوذپذیری ماده متخلخل ( $\frac{1}{\alpha}$ ) تعریف می‌شود. مقاومت اینرسی برای رژیم جریان آرام بسیار ناچیز و قابل صرف نظر است. همچنین در صورت در دست نبودن خواص ماده متخلخل، می‌توان از ضرایب  $C_0$  و  $C_1$  که از داده‌های آزمایشگاهی به دست می‌آیند، استفاده کرد.

<sup>1</sup> Pressure Inlet

<sup>2</sup> Pressure Outlet

<sup>3</sup> Interface

<sup>4</sup> Viscous Resistance

<sup>5</sup> Inertial Resistance

یک روش دیگر برای تعیین ضرایب مقاومت‌های ویسکوز و اینرسی، استفاده از فرمول‌های تجربی می‌باشد. به‌عنوان نمونه، یک فرمول تجربی توسط ارگان [۲۴] برای محاسبه این ضرایب ارائه شده است که در این فرمول، مقاومت‌های ویسکوز و اینرسی به عنوان تابعی از قطر ذرات متخلخل و میزان تخلخل می‌باشد.

#### ۴- نتایج و بررسی آن‌ها

در این بخش به ارائه نتایج حاصل از این شبیه‌سازی عددی پرداخته می‌شود. به‌علت عدم وجود مرجع معتبر مشابه که به محاسبه نشت گاز از خطوط لوله زیر زمینی پرداخته باشد، برای صحت‌سنجی روش و نحوه شبیه‌سازی انجام گرفته در این تحقیق، شبیه‌سازی برای لوله رو زمینی نیز انجام شده و نتایج با نتایج مراجع معتبر در زمینه لوله‌های رو زمینی مقایسه شده‌اند. برای اعتبار سنجی نتایج حاصل از این شبیه‌سازی، نتایج حاصل از این پژوهش با نتایج تحقیق Montiel و همکاران [۹] مقایسه شده است.

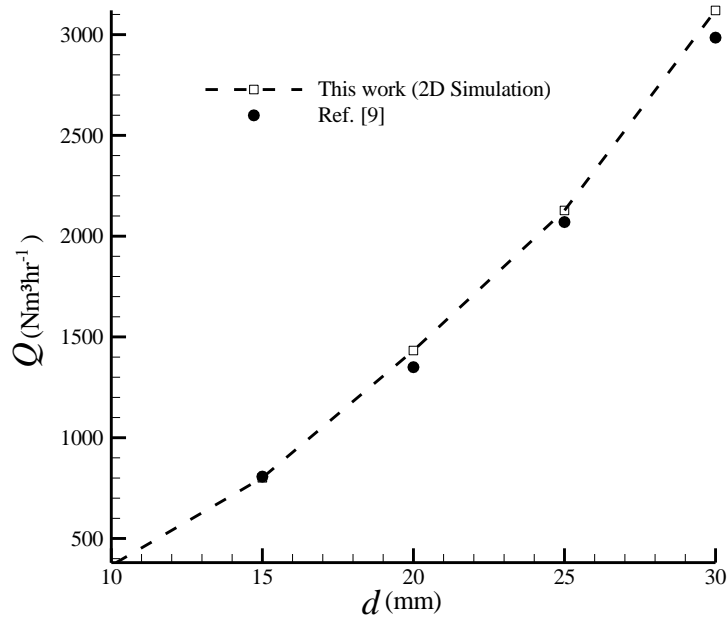
مدل استفاده شده در مرجع [۹]، لوله‌ای به طول ۱۰۰۰ متر و قطر داخلی ۱۶۳٫۶ میلی‌متر در خطوط توزیع گاز درون شهری می‌باشد که سوراخی در انتهای آن وجود داشته (لوله به‌صورت یک مخزن بسته در نظر گرفته شده است) و متان با فرض گاز ایده‌آل به‌عنوان سیال مورد بررسی در نظر گرفته شده است. مدل‌سازی مرجع [۹] به‌صورت یک‌بعدی و جریان درون لوله آدیاباتیک فرض شده است. همچنین برای حل معادله‌های حاکم بر مساله از روش‌های تفاضل محدود و با استفاده از الگوریتم تکرار شونده سکانت بهره گرفته شده است. مدل مطالعاتی این تحقیق که برای اعتبارسنجی استفاده شده است، شامل لوله‌ای به طول ۱۵۰۰ متر می‌باشد که سوراخی در فاصله ۱۰۰۰ متری از نقطه ابتدایی بر سطح جانبی لوله قرار داشته و لوله را به دو بخش بالادست و پایین‌دست جریان تقسیم‌بندی می‌کند. شرایط مرزی و فرضیات حل نیز به‌صورت یکسان و دقیقاً مشابه با مرجع [۹] برای این شبیه‌سازی نیز در نظر گرفته شده و نتایج عددی به‌دست آمده حاضر، با نتایج منتیل مقایسه شده است.

در شکل (۴) به مقایسه نتایج مربوط به دبی حجمی نرمال شده خروجی از سوراخ بین این تحقیق و تحقیق انجام شده توسط Montiel و همکاران پرداخته شده است. همانطور که مشاهده می‌شود بین نتایج حاصل از دو تحقیق، تطابق مناسبی وجود دارد که نشان‌دهنده صحت شبیه‌سازی انجام شده می‌باشد. علت اندک اختلاف و 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 شده و اختلاف نتیجه‌های دو تحقیق کمی بیشتر می‌شود.

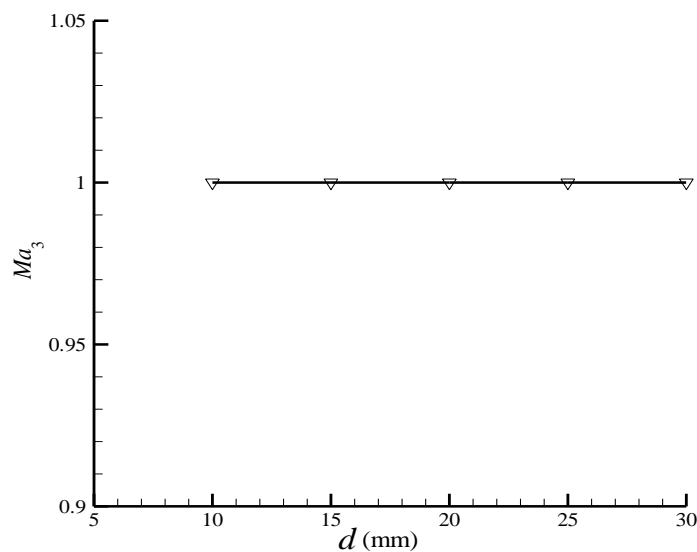
#### جدول ۱- خواص خاک مورد مطالعه [۲۳]

$1,6 \times 10^{-9}$	نفوذپذیری ( $m^2 s^{-1}$ )
۲٫۹	ضریب هدایت حرارتی ( $W m^{-1} K^{-1}$ )
۷۳۲٫۶۹	ظرفیت حرارتی ( $J kg^{-1} K^{-1}$ )
۲۶۵۰	چگالی ( $kg m^{-3}$ )

در شکل (۵) نیز نمودار مقدار عدد ماخ خروجی به ازای قطرهای مختلف سوراخ رسم شده است. طبق این نمودار، در محدوده سوراخ‌های بررسی شده در این تحقیق، برآیند عدد ماخ در سوراخ تقریباً برابر یک می‌شود که بیانگر وجود یک جریان صوتی می‌باشد و همین مطلب یکی دیگر از عوامل نشان دهنده صحیح بودن مدل‌سازی انجام شده و نتایج مربوط به آن است.



شکل ۴- مقایسه بین دبی حجمی خروجی از سوراخ در این تحقیق و سایر تحقیقاتها



شکل ۵- عدد ماخ در سوراخ به‌ازای قطرهای مختلف

در ادامه با هدف مقایسه مدل‌های مختلف، به بررسی کمیت‌های موثر بر میزان نشت گاز در حالت خطوط لوله مدفون در خاک پرداخته خواهد شد. پارامترهایی که در میزان گاز نشت یافته دخیل می‌باشند، شامل فشار نقطه ابتدایی، طول لوله، قطر لوله، قطر سوراخ و دمای متوسط خط لوله گاز هستند. در مساله محاسبه نشت گاز، تغییر طول تاثیر خود را بر فشار خط لوله و در غالب افت فشار نشان می‌دهد؛ لذا تاثیر پارامترهای طول لوله و فشار، با یکدیگر معادل می‌باشند. از طرفی تغییرات دما در طول خط لوله بسیار ناچیز و قابل صرف‌نظر می‌باشد. بر اساس این موارد، پارامترهای موثر بر میزان نشت گاز از خطوط توزیع گاز درون شهری شامل فشار نقطه ابتدایی، قطر لوله و سوراخ می‌باشد که در این تحقیق تمام این کمیت‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. همانطور که اشاره شد، دما و فشار در طول خط لوله تغییرات قابل توجهی ندارند و فقط در پیرامون سوراخ شاهد تغییرات ناگهانی فشار و سرعت هستیم. لذا برای کاهش هزینه‌های زمانی و محاسباتی فرض شده است که در یک لوله گاز با جنس پلی‌اتیلن (زبری لوله برابر ۱٫۵ میکرومتر) [۲۵] و طول ۵ متر در خطوط توزیع گاز درون شهری با سطح فشار پایین، سوراخی ایجاد شده است.

سوراخ ایجاد شده در وسط لوله قرار داشته و جریان پیش از رسیدن به سوراخ به حالت توسعه یافته رسیده است. دما در ورودی لوله برابر ۲۸۸ کلوین می‌باشد و مساله 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 ۰٫۴، ۶ و ۸ اینچ (قطرهای نامی به ترتیب عبارتند از: ۱۱۴٫۶، ۱۶۳٫۶ و ۲۰۴٫۶ میلی‌متر) که سایزهای پرکاربرد موجود در خطوط توزیع درون شهری بررسی شده است. ارتفاع خاک بالای لوله نیز برابر ۱٫۵ متر در نظر گرفته شده است.

در ابتدا به نتایج حاصل از بررسی تاثیر تعداد سلول‌های به کار رفته در شبکه جهت اثبات استقلال از تعداد شبکه پرداخته خواهد شد. جدول (۲) بیانگر اعتبارسنجی و استقلال از تعداد سلول‌های به کار رفته در هندسه می‌باشد. لازم به ذکر است که این جدول به‌عنوان نمونه برای هندسه‌ای است که قطر سوراخ آن برابر ۱۵ میلی‌متر می‌باشد. به دلیل کوچک بودن سوراخ‌ها، نتایج بررسی‌ها بیانگر این است که می‌توان این نتیجه را برای هندسه‌های با قطر سوراخ‌های دیگر نیز گسترش داد. مشاهده می‌شود که بعد از تعداد تقریباً ۱ میلیون سلول، تغییر زیادی در نتایج خروجی‌های حل مشاهده نمی‌شود. در نهایت جهت اطمینان کامل از تعداد سلول‌های موجود 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.

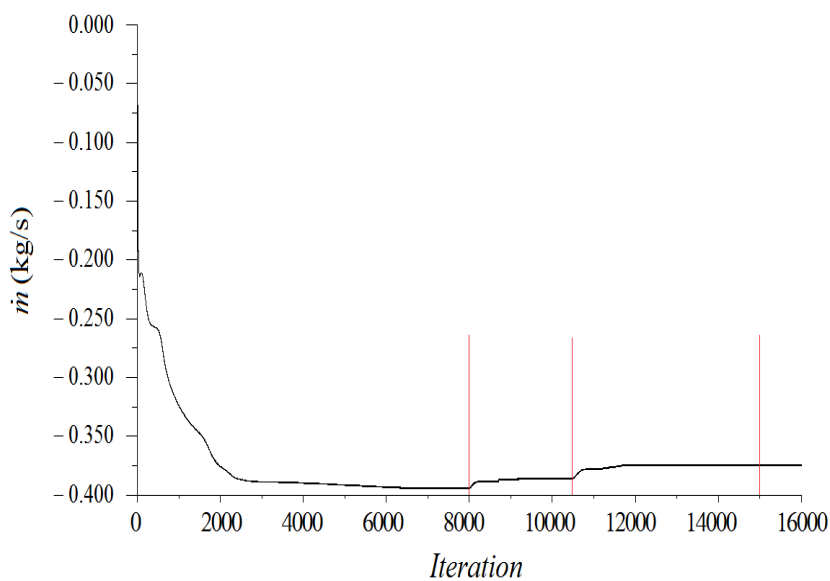
**جدول ۲- تاثیر تعداد مش بر دبی جرمی گاز نشت یافته**

تعداد سلول	دبی جرمی گاز نشت یافته ( $\text{kgs}^{-1}$ )
۲۴۰ هزار	۰٫۱۷۵
۵۳۰ هزار	۰٫۱۷۲
۱ میلیون و ۷۰ هزار	۰٫۱۵۹
۱ میلیون و ۲۶۰ هزار	۰٫۱۵۸

شکل (۶) همگرایی دبی جرمی خروجی از سوراخ با قطر ۳۰ میلی‌متر را نشان می‌دهد. در برخی از مطالعات که سیال تراکم‌پذیر می‌باشد و یا فشار کاری بالا می‌باشد، جهت همگرایی بهتر و صحیح بودن جواب‌ها، بهتر است ابتدا معادلات حاکم بر مساله به صورت مرتبه اول گسسته‌سازی شده و پس از این که حل مساله با گسسته‌سازی مرتبه اول به همگرایی رسید، در ادامه کار از گسسته‌سازی مرتبه دوم استفاده نمود. همانطور که در شکل مشاهده می‌شود، در ابتدای کار، کلیه معادلات حاکم بر مساله، ۸۰۰۰ تکرار با روش بادسو مرتبه اول گسسته‌سازی و حل شده‌اند. با اینکه پس از ۸۰۰۰ تکرار مرتبه اول، جواب به همگرایی رسیده است، اما این جواب صحت کافی ندارد. در ادامه کار، از تکرار ۸۰۰۰ تا ۱۰۵۰۰، جملات شامل عبارت‌های چگالی با استفاده از روش بادسو مرتبه دوم گسسته‌سازی شده و از تکرار ۱۰۵۰۰ تا ۱۵۰۰۰ معادله مومنتوم نیز به صورت مرتبه دوم گسسته‌سازی شده است. از تکرار ۱۵۰۰۰ الی ۱۶۰۰۰، معادله انرژی با روش بادسو مرتبه دوم گسسته‌سازی شده است و مشاهده می‌شود که در این وضعیت گسسته‌سازی مرتبه دوم معادله انرژی تاثیری بر خروجی مساله (دبی جرمی نشتی) ندارد.

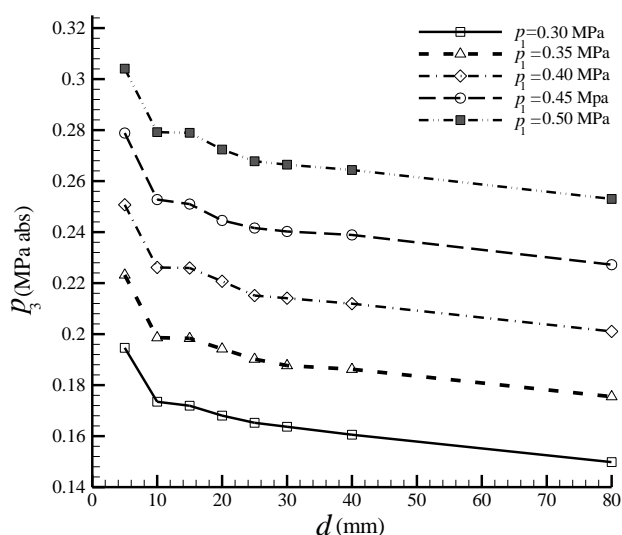
شکل (۷) تغییرات فشار در سوراخ برحسب قطر سوراخ و به‌ازای مقادیر مختلف برای فشار نقطه ورودی را نشان می‌دهد. همانطور که در این نمودار مشاهده می‌شود، به‌ازای یک مقدار مشخص برای فشار ورودی، با بزرگ‌تر شدن قطر سوراخ، اختلاف فشار نقطه ورودی و فشار سوراخ ( $p_1 - p_3$ ) بیشتر می‌شود که نتیجه آن افزایش دبی جرمی خروجی خواهد بود.

شکل (۸) تغییرات دبی جرمی برحسب قطر سوراخ به‌ازای مقادیر مختلف فشار ورودی را ارائه می‌دهند (به علت مشابه بودن نمودارها، کلیه نمودارهایی که در ادامه آورده شده‌اند مربوط به لوله با قطر ۱۶۳٫۶ میلی‌متر می‌باشند که به عنوان نمونه آورده شده‌اند). برازش داده‌های حاصل از تغییرات دبی نشتی بر حسب قطر سوراخ، نشان داد که دبی نشتی با قطر سوراخ به صورت یک تابع تقریباً درجه دو تغییر می‌کند و با نسبت قطر لوله به قطر سوراخ ( $d/D$ ) رابطه درجه چهار دارد.

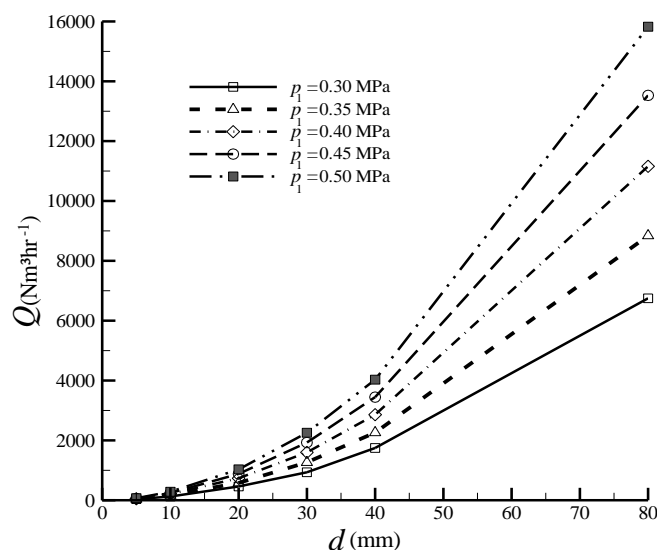


شکل ۶- همگرایی دبی جرمی خروجی از سوراخ (برای نمونه‌ای با  $d=30$  mm)

همانطور در نمودار (۸) مشاهده می‌شود، 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 پایین‌دست نسبت به سوراخ‌های کوچک‌تر، بیشتر باشد و شاهد برگشت بیش‌تر جریان از سمت پایین‌دست به سمت سوراخ باشیم لذا در نظر گرفتن طول لوله بعد از سوراخ، تاثیر خود را در سوراخ‌های با قطر بزرگ نشان می‌دهد. به عبارت دیگر، در تحقیق‌های گذشته که طولی برای جریان پایین‌دست در نظر گرفته نشده است، باعث می‌شود که نتایج از حالت واقعی فاصله بگیرد. در شکل (۹)، تغییرات دبی حجمی ناشی از نرمال شده برحسب فشار ورودی برای قطرهای مختلف سوراخ نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، دبی حجمی تابعیت تقریباً خطی با فشار ورودی دارد و با افزایش فشار نقطه تغذیه، اختلاف فشار نقطه ابتدایی و سوراخ بیشتر شده و به دنبال آن دبی گاز نشت یافته از سوراخ افزایش می‌یابد.

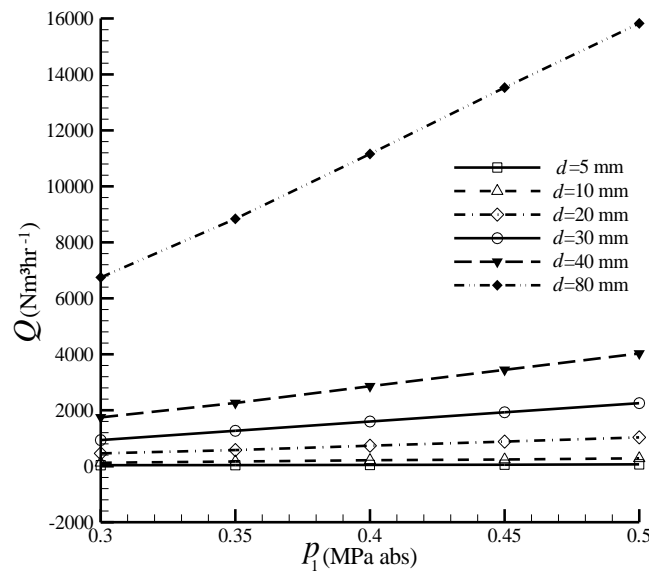


شکل ۷- تغییر فشار سوراخ برحسب قطر سوراخ به‌ازای مقادیر مختلف فشار نقطه ابتدایی

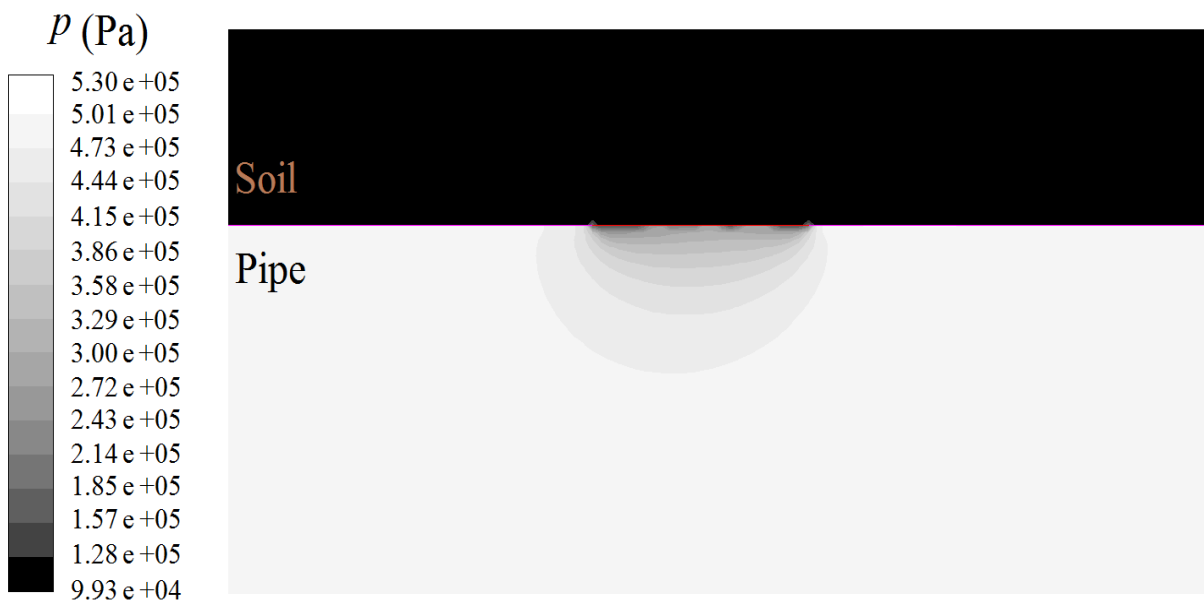


شکل ۸- تغییر دبی ناشی برحسب قطر سوراخ به‌ازای مقادیر مختلف فشار نقطه ابتدایی

شکل (۱۰) کانتور فشار در لوله و پیرامون مقطع آسیب دیده را نشان می دهد. همانطور که در این شکل مشاهده می شود، افت فشار در طول لوله بسیار کوچک می باشد اما در مقطع آسیب دیده تغییرات ناگهانی فشار، قابل ملاحظه می باشد که علت آن تغییر ناگهانی سطح مقطع در مقطع آسیب دیده می باشد (کوچک بودن قطر سوراخ نسبت به قطر لوله). به عبارت دیگر همین زیاد کوچک بودن سوراخ، باعث می شود که در مقطع آسیب دیده فشار از فشار محیط بزرگ تر باشد. همچنین بررسی نتایج نشان می دهد که با افزایش قطر سوراخ، اختلاف فشار مقطع آسیب دیده و فشار محیط کم تر می شود.



شکل ۹- تغییر دبی نشتی بر حسب فشار نقطه ابتدایی به ازای مقادیر مختلف قطر سوراخ

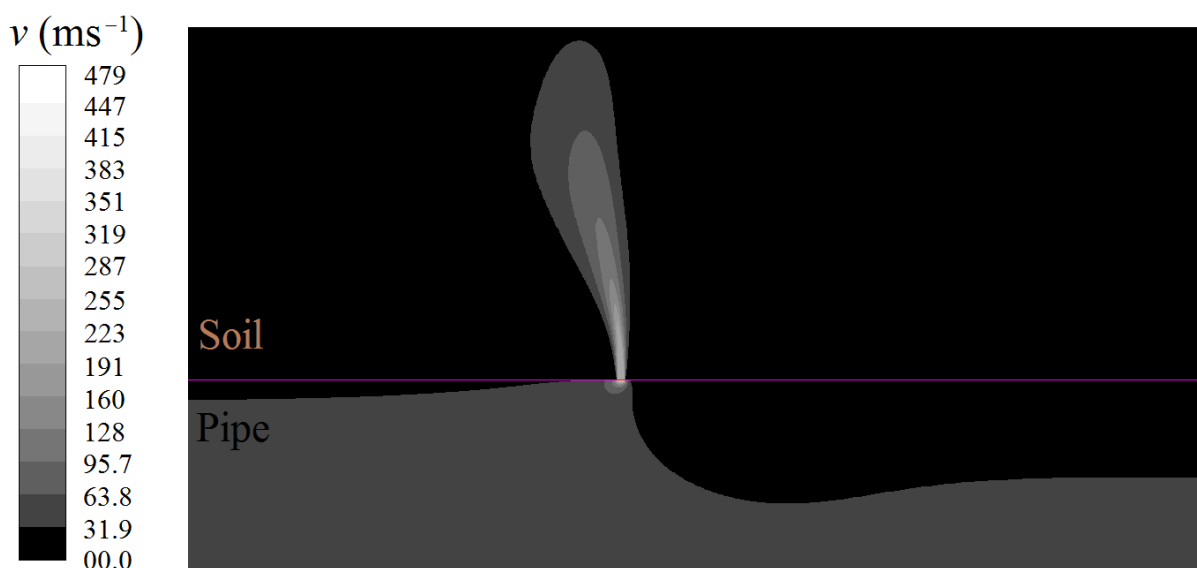


شکل ۱۰- کانتور فشار مطلق پیرامون سوراخ

دستاورد موارد اشاره شده، ایجاد یک موج انبساطی در داخل لوله است که باعث می‌شود جریان گاز را به سمت سوراخ به حرکت درآورده و همانطور که در شکل (۱۱) مشاهده می‌شود، برآیند سرعت جریان در مقطع آسیب‌دیده، برابر سرعت صوت باشد. از طرفی مقطع آسیب‌دیده، یک مقطع مشترک بین لوله و خاک می‌باشد. لذا دقیقاً در مجاورت سوراخ و در داخل خاک (بلافاصله پس از ورود جریان گاز به داخل خاک)، شاهد یک جریان مادون صوت هستیم. علت این امر نیز مقاومت ناشی از خاک است که باعث کاهش سرعت جریان گاز هنگام ورود به خاک می‌شود. همچنین فشار ناشی از خاک بالای مقطع آسیب‌دیده، باعث می‌شود تا فشار در ورودی و خروجی مقطع آسیب‌دیده متفاوت باشد. همانطور که در کانتورها مشاهده می‌شود، به علت تراکم‌پذیر بودن سیال مورد بررسی در این تحقیق، تمامی کمیت‌ها در نقاط مختلف سوراخ مقادیر مختلفی دارند. لذا برای تعیین کمیت‌ها در سوراخ، باید میانگین وزنی (Mass-Weighted Average) آن‌ها در نظر گرفته شوند. ورود جریان گاز طبیعی به داخل خاک و برخورد آن با ذرات خاک و همچنین هوای عبوری از بین ذرات خاک، باعث ایجاد دو عدد گردابه در سمت راست و چپ جریان گاز داخل خاک می‌شود. شکل (۱۲) نشان دهنده بردارهای سرعت داخل لوله و خاک در پیرامون سوراخ می‌باشد. با بزرگنمایی و افزایش سایز بردارهای سرعت، گردابه‌های ایجاد شده در تصویر C شکل (۱۲) مشاهده می‌شوند. در هندبوک مهندسی گاز (GPSA) [۲۶]، روابطی برای محاسبه نشت گاز وجود دارد. بر اساس مطالب موجود در این هندبوک، برای تخمین گاز نشت یافته از یک حفره در یک لوله، در صورتی که قطر سوراخ بسیار کوچک باشد، می‌توان شدت جریان نشت یافته را به صورت رابطه (۱۴) تخمین زد. لازم به ذکر است که این رابطه با فرض ساده شونده جریان آرام به دست آمده است.

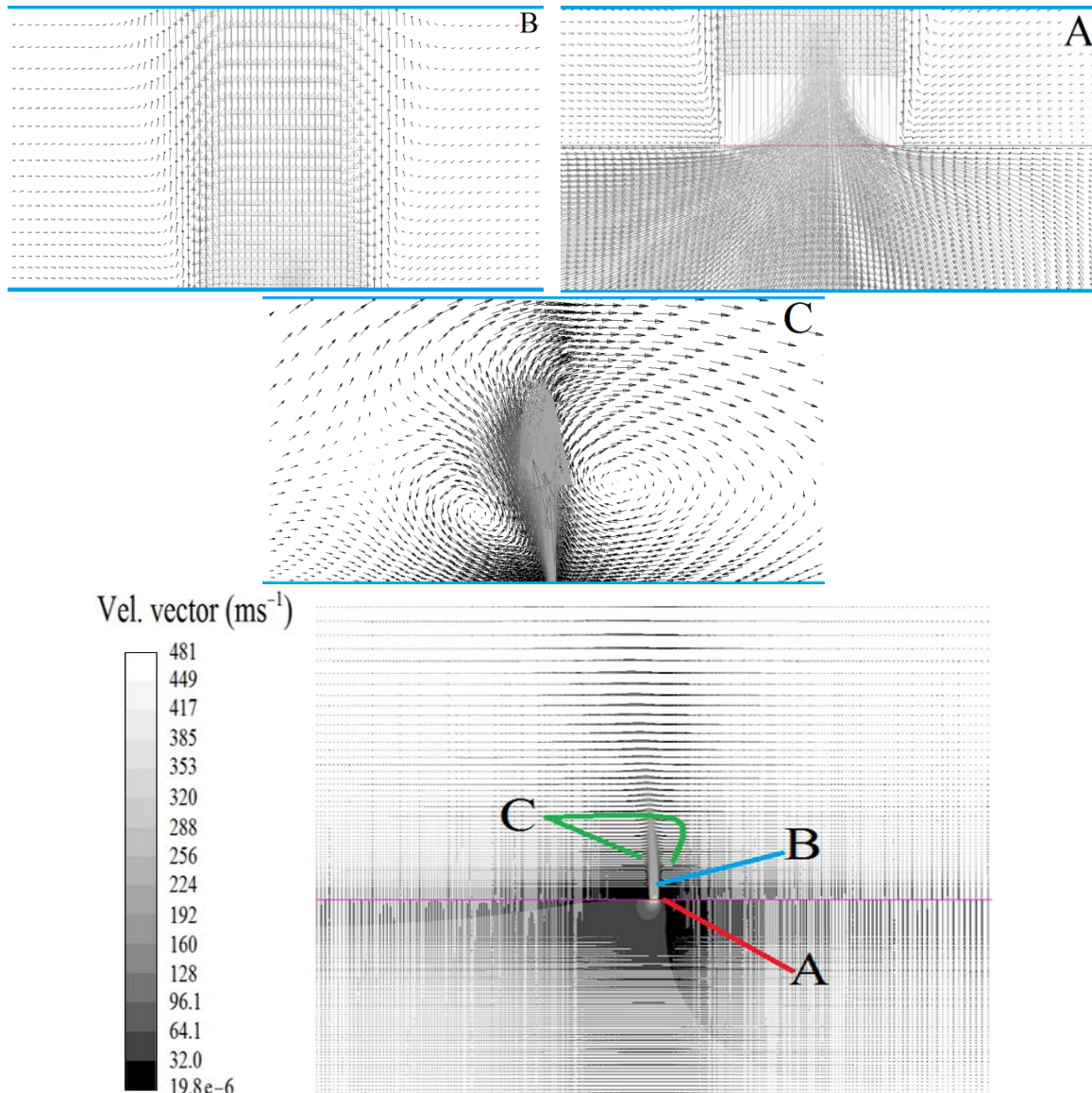
$$Q_d = 16330d_{orf}^2(1 + \beta^4)\sqrt{H(29.32 + 0.3H)} \quad (14)$$

در این رابطه،  $Q_d$  (حجم گاز نشت،  $\frac{ft^3}{day}$ )،  $\beta = \frac{d}{D_p}$  ثابت اوریفیس،  $d_{orf}$  (قطر سوراخ،  $in$ )،  $D_p$  قطر لوله و  $H$  (فشار ابتدای خط می‌باشد).



شکل ۱۱- کانتور سرعت پیرامون سوراخ





شکل ۱۲- بردارهای سرعت پیرامون سوراخ

بر اساس نتایجی که از برآزش کلیه نتایج این تحقیق به دست آمده، مشاهده شد که تغییرات دبی حجمی گاز نشت یافته با قطر سوراخ، نسبت قطر سوراخ به قطر و فشار نقطه ابتدایی تقریباً مطابق با معادله (۱۴) بوده و با این متغیرها به ترتیب به صورت توابع درجه دو، چهار و خطی تغییر پیدا می کند. لذا معادله (۱۴) با فرض جریان آشفته، مدل دوبعدی، در نظر گرفتن طول لوله بعد از سوراخ و در حالت لوله مدفون در خاک به صورت معادله (۱۵) در می آید.

$$Q = \begin{cases} 0.472(1 + \beta^4)d^2p_1 & ; \quad d \leq 15 \text{ mm} \\ 0.440(1 + \beta^4)d^2p_1 & ; \quad 15 < d \leq 80 \text{ mm} \end{cases} \quad (15)$$

در این رابطه،  $Q$  دبی حجمی نرمال شده گاز ( $Nm^3/h$ )،  $d$  قطر سوراخ ( $mm$ )،  $\beta = d/D$  نسبت قطر سوراخ به قطر لوله و  $p_1$  فشار نقطه ابتدایی ( $bar abs$ ) می باشد.

لازم به ذکر است که این رابطه برای سه لوله پر کاربرد مورد استفاده در خطوط توزیع گاز درون شهری (لوله‌های ۴، ۶ و ۸ اینچ)، در محدوده فشار  $0.3 \leq p_1 \leq 0.5$  مگاپاسکال و برای سوراخ‌های کوچک با قطری در بازه  $5 \leq d \leq 80$  میلی‌متر معتبر می‌باشد.

## ۶- نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

در این مقاله، ابتدا به مدل‌سازی عددی جریان گاز دوبعدی نشت یافته از یک سوراخ بر اساس روش‌های حجم محدود و با استفاده از نرم‌افزار فلوئنت پرداخته شد. با توجه به اینکه مدل مطالعاتی در خطوط توزیع گاز درون شهری در محدوده فشار پایین می‌باشد، سیال مورد استفاده در این پژوهش گاز تراکم‌پذیر با فرض حالت گاز ایده‌آل است و متان به‌عنوان گاز طبیعی در نظر گرفته شده است. همچنین براساس عدد رینولدز بحرانی در داخل لوله‌ها، جریان به‌صورت آشفتگی می‌باشد. 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 همچنین مقطع آسیب‌دیده (سوراخ) می‌باشد. مدل مورد بررسی در حالت لوله گاز مدفون در خاک، توسط نرم‌افزار گمبیت طراحی شده و برای شبیه‌سازی خاک، از تعریف ناحیه متخلخل در نرم‌افزار فلوئنت استفاده شده است.

در ادامه کار، نتایج حاصل از شبیه‌سازی نشان داد که با بزرگ‌تر شدن قطر سوراخ، فشار مقطع آسیب‌دیده کاهش یافته و به‌دنبال آن اختلاف فشار مقطع ابتدایی و مقطع آسیب‌دیده بیش‌تر می‌شود که نتیجه آن افزایش دبی نشتی می‌باشد. به‌دلیل 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. همچنین در سوراخ‌های با قطر بزرگ‌تر، به‌علت افزایش جریان برگشتی از سمت پایین‌دست به سمت سوراخ، در نظر گرفتن طول لوله بعد از سوراخ تاثیر قابل توجهی در نتایج خواهد داشت.

وقتی لوله در خاک مدفون می‌باشد، مقطع آسیب‌دیده، یک مقطع مشترک بین لوله و خاک می‌باشد و در این حالت نیز در سوراخ یک جریان صوتی داریم اما دقیقاً بلافاصله پس از ورود جریان گاز به داخل خاک، شاهد یک جریان مادون صوت هستیم. علت این امر نیز مقاومت ناشی از خاک است که باعث کاهش سرعت جریان گاز هنگام ورود به خاک می‌شود. همچنین فشار ناشی از خاک بالای مقطع آسیب‌دیده، باعث می‌شود تا فشار در ورودی و خروجی مقطع آسیب‌دیده متفاوت باشد.

پس از ورود جریان گاز طبیعی به داخل خاک و برخورد آن با ذرات خاک و همچنین هوای عبوری از بین این ذرات، شاهد ایجاد یک جفت گردابه در طرفین جت گاز خروجی ورودی به داخل خاک هستیم.

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 به‌ترتیب به‌صورت توابع صعودی تقریباً درجه دوم، چهارم و اول تغییر پیدا می‌کند. بر این اساس در انتهای مقاله، یک رابطه ساده و کاربردی بر حسب این متغیرها برای محاسبه دبی حجمی گاز نشت یافته ارائه شده است.

## سپاسگزاری

پژوهش حاضر با حمایت مالی شرکت گاز استان سمنان انجام گرفته است. لذا از کلیه زحمات و پشتیبانی مسئولین آن شرکت کمال تشکر را داریم.

## مراجع

- [۱] 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).
- [2] Yiting, H., Guoning, R., Wangzuo, C., Jinhua, P., Ronghai, L., Xinfu, Z., and 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).
- [4] Costello, K., "Lost and Unaccounted-for Gas: Challenges for Public Utility Regulators", *Utilities Policy*, Vol. 29, No. 1, pp. 17-24, (2014).
- [5] Arpino, F., Dell'Isola, M., Ficco, G., and 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).
- [6] Montiel, H., Vilchez, J., Arnaldos, J., and 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).
- [۷] جابری خسروشاهی، علیرضا، حسین پور، 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).
- [8] 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).
- [9] Montiel, H., Vilchez, J., Casal, J., and Arnaldos, J., "Mathematical Modeling of Accidental Gas Releases", *Journal of Hazardous Materials*, Vol. 59, No. 2-3, pp. 211-233, (1998).
- [10] Luo, J. L., 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", *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, Vol. 19, No. 3, pp. 362-366, (2006).

- [11] Woodward, J. L., and 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).
- [12] Yuhu, D., Huilin, G., Jing'en, Z., and Yaorong, F., "Mathematical Modeling of Gas Releases through Holes in Pipelines", *Chemical Engineering Journal*, Vol. 92, No. 1-3, pp. 237-241, (2003).
- [13] Oke, A., Mahgerefteh, H., Economou, I., and Rykov, Y., "A Transient Outflow Model for Pipeline Puncture", *Chemical Engineering Science*, Vol. 58, No. 20, pp. 4591-4604, (2003).
- [14] Jo, Y., and 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).
- [۱۵] 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).
- [16] Kostowski, W. J., and Skorek, J., "Real Gas Flow Simulation in Damaged Distribution Pipelines", *Energy*, Vol. 45, No. 1, pp. 481-488, (2012).
- [17] Lu, L., Zhang, X., Yan, Y., Li, J. M., and 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).
- [18] FLUENT 6.3 User's Guide, February (2003).
- [19] Versteeg, H. K., and Malalasekera, W., "*An Introduction to Computational Fluid Dynamics; the Finite Volume Method*", Longman Scientific and Technical, London, (1995).
- [20] Ewing, R. E., Wang, J., and Weekes, S., "On the Simulation of Multicomponent Gas Flow in Porous Media", *Applied Numerical Mathematics*, Vol. 31, No. 4, pp. 405-427, (1999).
- [21] Launder, B. E., and Spalding, D. B., "The Numerical Computation of Turbulent Flows", *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol. 3, No. 2, pp. 269-289, (1974).
- [۲۲] جابری خسروشاهی، علیرضا، "ارزیابی و تحلیل مقدار گاز طبیعی تخلیه شده از لوله به محیط"، پایان‌نامه مقطع کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی سهند، (۱۳۹۳).
- [23] Itoh, O. T., "*Thermal Properties of Soils*", CRREL, United States, (1981).
- [24] Ergun, S., "Fluid Flow through Packed Columns", *Chemical Engineering Progress*, Vol. 48, No. 2, pp. 89-94, (1952).

- [25] *Handbook of Polyethylene Pipe*, Second Edition, Plastics Pipe Institute (PPI), Decker Court, (2007).
- [26] *Engineering Data Book*, Twelfth Edition, Gas Processors Suppliers Association (GPSA), Oklahoma, (2004).

### فهرست نمادهای انگلیسی

ظرفیت حرارتی فشار ثابت (J/kgK)	$c_p$
ظرفیت حرارتی حجم ثابت (J/kgK)	$c_v$
نسبت فشار بحرانی	CPR
قطر سوراخ (mm)	$d$
قطر لوله (mm)	$D$
انرژی کل (J)	$E$
شتاب جاذبه ( $m/s^2$ )	$g$
وزن مخصوص	$G$
فشار (in Hg)	$H$
ضریب هدایت حرارتی (W/mK)	$k$
طول کل لوله (m)	$L$
طول بخش بالادست لوله (m)	$l_1$
طول بخش پایین دست لوله (m)	$l_2$
عدد ماخ	Ma
فشار (Pa)	$p$
عدد پرانتل	Pr
دبی حجمی نشتی ( $m^3/hr$ )	$Q$
ثابت گاز (J/kgK)	$R$
دما (K)	$T$
سرعت (m/s)	$u$
حجم مخصوص ( $m^3/kg$ )	$v$
ضریب تراکم پذیری	$Z$

### نمادهای یونانی

نفوذپذیری ( $m^2/s$ )	$\alpha$
نرخ اتلاف آشفستگی	$\varepsilon$

نسبت ظرفیت حرارتی	$\gamma$
میزان تخلخل	$\gamma$
انرژی جنبشی آشفنگی	$k$
ویسکوزیته (kg/ms)	$\mu$
چگالی ( $\text{kg/m}^3$ )	$\rho$
تانسور تنش	$\bar{\bar{t}}$

**Abstract**

This paper paid to calculate and develop an equation to determine the amount of the natural gas leakage from a small hole located on the surface of the buried gas pipe lines. The studied case has been designed and meshed by Gambit software and then numerical solution has been done by using Fluent software. The pipe has been located in the town border distribution pipelines, flow is turbulent and soil considered as a porous zone. The results indicate that at the small hole diameters, discharge speed reaches the sound speed and at the so-called, choking occurs in the flow. Also after permeation of natural gas into the soil, and hitting the soil particles and the air moving through soil, a pair of vortex is created inside the soil.