

ارائه رابطه‌ای جهت به‌دست آوردن میزان نشت گاز طبیعی از یک خط لوله مدفون فشار بالا در

یک محیط متخلخل*

مقاله پژوهشی

رضا سبزیان^(۱) علی عبدالهی^(۲) سبحان امامی کوپانی^(۳)

چکیده نشت گاز از خطوط لوله انتقال علاوه بر هدر رفت حجم زیادی از گاز و گاهاً قطع جریان گاز می‌تواند خسارت‌های جانی و محیط‌زیستی قابل توجه‌ای را به همراه داشته باشد. از این‌رو مهار نکردن نشتی، باعث ضررهای هنگفت سالیانه به شرکت ملی گاز خواهد شد. موضوع این پژوهش، شبیه‌سازی عددی نشت گاز از خطوط لوله فشار بالا (تا ۱۰۵۰ psi یا ۷۲۴۰ kPa) مدفون در خاک و ارائه رابطه‌ای جهت محاسبه میزان نشت گاز از این خطوط لوله می‌باشد. نشتی از یک سوراخ در قسمت فوقانی سطح جانبی لوله در نظر گرفته شده است. سیال کاری تراکم‌پذیر و جریان به‌صورت آشفته و پایا می‌باشد. همچنین خاک اطراف لوله به‌صورت یک ناحیه متخلخل همگن مدل‌سازی شده است. اطلاعات مورد نیاز برای شبیه‌سازی مسئله به کمک مشاور صنعتی تهیه شده است. در این مطالعه پارامترهای تاثیرگذار بر مقدار دبی حجمی گاز نشت شده مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج حاضر نشان می‌دهد که بر خلاف خطوط روزمینی، نشتی از مقطع آسیب دیده در خطوط مدفون، حتی در فشارهای بالا، در سرعت‌های پائین رخ داده و خفگی دینامیک گازی جریان مشاهده نمی‌شود. در نهایت روابط همبسته‌ی بسیار دقیقی برای تخمین میزان نشتی از خطوط تغذیه و انتقال ارائه شده است که کمینه ضریب همبستگی آن ۰/۹۹۶۰ می‌باشد.

واژه‌های کلیدی لوله‌ی مدفون، خطوط تغذیه و انتقال، نشت گاز طبیعی، محیط متخلخل، روابط همبسته.

مقدمه

وجود دارد. نشت گاز عبارت است از خروج ناخواسته گاز که بنا به علل گوناگون روی می‌دهد. در اثر نشت گاز احتمال انفجار یا آتش سوزی وجود دارد. از طرفی هدر رفتن بخشی از مواد ارزشمند که جزء محصولات و یا مواد اولیه برخی از واحدهای صنعتی هستند، از لحاظ اقتصادی نیز ناخوشایند است. از جمله مهم‌ترین عواملی که باعث آسیب دیدن خط لوله و ایجاد نشتی می‌شوند عبارت‌اند: از خوردگی و فرسودگی، شکست مکانیکی و آسیب شخص ثالث. علیرغم اعمال کلیه حفاظت‌ها و پیش‌بینی‌های فنی در طراحی و اجرا و بهره برداری شبکه‌ها و خطوط انتقال گاز هیچ‌گاه نمی‌توان

از آن‌جا که اکثر میدان‌های گاز طبیعی در جهان دور از بازار مصرف هستند، هزینه‌های مربوط به تولید، فرآوری و انتقال گاز طبیعی زیاد است. در چنین وضعیتی انتقال گاز به وسیله راه‌کارهای جدید همراه با کاهش هزینه‌ها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. همین مسئله باعث ایجاد روش‌های مختلف برای انتقال گاز طبیعی شده است که از این میان بیش‌ترین سهم انتقال، برعهده خطوط لوله است [1]. یکی از مشکلات خطوط لوله گاز طبیعی نشت گاز است. نشت گاز پدیده‌ی خطرناکی است که همواره امکان بروز آن در مسیر خطوط لوله

DOI: 10.22067/fum-mech.v31i2.86056

* تاریخ دریافت مقاله ۹۸/۱۲/۲۷ و تاریخ پذیرش آن ۹۹/۷/۳۱ می‌باشد

(۱) دانش آموخته کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران.

(۲) نویسنده مسئول، استادیار، گروه مهندسی مکانیک، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران.

Email: abdollahi@pmc.iaun.ac.ir

(۳) استادیار، گروه مهندسی مکانیک، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران.

اعمال ضریب تراکم پذیری ۰/۹ برای فشار بالا استفاده کردند. نتایج نشان می‌دهد انتشار گاز در یک سوراخ کوچک را می‌توان به عنوان یک فرآیند حالت پایا در نظر گرفت.

جو و آهن [4] یک مدل ساده صریح برای محاسبه گاز خارج شده از سوراخ در لوله‌ی گاز فشار بالا با استفاده از معادله حالت گاز ایده‌آل ارائه کرده‌اند. آن‌ها سوراخی را در یک لوله‌ی بسته که توسط یک نازل همگرا به یک مخزن وصل است در نظر گرفته و جریان داخل لوله را به صورت جریان بی‌دررو و جریان نازل و سوراخ به صورت جریان تک‌آنتروپی در نظر گرفته‌اند. همچنین به دلیل آنکه طول نازل و قطر سوراخ در مقایسه با طول لوله بسیار کوچک هستند، اتلاف ناشی از اصطکاک در نازل و سوراخ را نادیده گرفتند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که مدل ساده صریح پیشنهادی، نرخ تخلیه گاز را کمی بیشتر از مدل تئوری نشان می‌دهد که این تفاوت بین ۰ تا ۲۰ درصد برای نسبت گرمای ویژه ۱/۴۲ متغیر است. هنگامی که نقطه انتشار به مخزن نزدیک می‌شود خطا به صفر کاهش می‌یابد.

اُکه و همکاران [5] با استفاده از روش مشخصه‌ها، به شبیه‌سازی عددی جریان نشستی از خطوط لوله تحت فشار پرداخته و بر این اساس جریان خروجی از لوله را محاسبه کردند. برای شبیه‌سازی سوراخی را در خط لوله به طول ۱۶ km و قطر ۰/۴۲ m در نظر گرفته و با فرض باز یا بسته بودن انتهای لوله مدل خود را بررسی کردند. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که مدل‌های متداولی که نشستی از لوله را به صورت تخلیه مخزن از یک سوراخ مدل می‌کنند، به دلیل ایجاد جریان‌های برگشتی در قسمت پایین دست سوراخ، به ویژه در مراحل اولیه کاهش فشار نامناسب هستند.

ژائو و همکاران [6] با ارائه یک مدل گذرا به بررسی میزان نفوذ گاز نشت کرده از خطوط لوله قرار گرفته بر روی سطح زمین پرداختند. اثر پارامترهایی

احتمال بروز نشت را صفر فرض کرد. به طور کلی مطالعات مربوط به نشت گاز به دو دسته نشستیابی و محاسبه میزان گاز نشت شده تقسیم می‌شود که با توجه به هدف مطالعه حاضر مطالعاتی که در آن‌ها به بررسی میزان نشستی گاز پرداخته شده بررسی می‌شوند. مطالعات انجام گرفته در این حیطه به صورت تجربی، تحلیلی و شبیه‌سازی عددی می‌باشند.

منتیل و همکاران [2] به بررسی نرخ نشت گاز از خط لوله گاز پرداختند و یک مدل ریاضی جهت نشت جریان گاز برای خطوط لوله فشار پایین و متوسط (فشارهایی که رفتار گاز ایده‌آل در آن وجود دارد) ارائه کردند. آن‌ها برای مدل‌سازی از خط لوله‌ای با قطر mm ۱۶۳/۶ با فشار اولیه‌ی ۵ bar و از گاز متان با گرمای ویژه ثابت به جای گاز طبیعی استفاده کردند. همچنین جریان در سوراخ لوله را به صورت تک‌آنتروپی (Isentropic) و جریان داخل لوله را به صورت بی‌دررو و یک‌بعدی در نظر گرفته‌اند. این پژوهش در حالت جریان پایا و ناپایا مورد بررسی قرار گرفته است. آن‌ها یک مدل جدید به عنوان ترکیبی از مدل‌های کلاسیک "سوراخ" و "لوله" برای محاسبه انتشار گاز در سیستم‌های توزیع در فشار متوسط و کم طراحی کردند. مدل پیشنهادی در قطرهای کوچک‌تر با مدل سوراخ (که در آن می‌توان لوله را شبیه یک مخزن در نظر گرفت که در حین خروج گاز، فشار داخل مخزن تغییر نمی‌کند) منطبق است و در قطرهای بزرگ‌تر مدل پیشنهادی منطبق بر مدل شکست کامل لوله است.

یوها و همکاران [3] به مدل‌سازی ریاضی انتشار گاز از طریق سوراخ در خطوط لوله پرداختند و نرخ انتشار گاز برای سوراخ‌هایی با اندازه‌های مختلف را بررسی کردند. آن‌ها، یک مدل جدید برای حفره‌ای که بین دو حالت مدل سوراخ (هنگامی که سوراخ کوچک‌تر از قطر لوله است) و مدل لوله (هنگامی که قطر سوراخ به قطر خط لوله می‌رسد) قرار دارد پیشنهاد کردند. در این پژوهش آن‌ها از فرضیه‌های پیشنهادی توسط منتیل با

نظیر قطر سوراخ، زمان قطع جریان گاز و سرعت باد بر میزان غلظت گاز پخش شده مورد بررسی قرار گرفته و درجه حساسیت نواحی در معرض انفجار و مسمومیت به پارامترهای موثر مورد بحث قرار گرفت. نشان داده شد که پایداری جو تأثیر خاصی روی منطقه انفجار و مسمومیت دارد به طوری که پایداری بیشتر انتشار گاز را دشوارتر و منطقه تحت خطر را وسعت می‌بخشد.

سافیتی و همکاران [7] غلظت گاز و میزان گاز نشت شده از خط لوله غیرمدفون را بر اساس تصاویر به‌دست آمده از دوربین‌های مادون قرمز محاسبه کردند. در این روش نرخ نشتی گاز بر اساس اندازه توده یا ابر گاز نشت شده که به وسیله تصاویر ثبت شده از دوربین‌های تصویر برداری مادون قرمز قابل پیش‌بینی است، به‌دست می‌آید. مقادیر محاسبه شده از این روش در دبی‌های نشتی کم (کمتر از 0.1 kg/s) در شرایط آب و هوایی واقعی دارای دقت مناسبی بوده اما در دبی‌های نشتی زیاد اعتبار نتایج جای تردید دارد.

نوری بروجردی [8] جریان گاز در خطوط لوله غیرمدفون پس از شکست لوله را مورد بررسی قرار داد. در کار ایشان جریان گذرای گاز به‌صورت یک بعدی، تراکم پذیر و آدیباتیک در نظر گرفته شده و معادلات حاکم در راستای یک خط لوله طولانی با استفاده از روش تفاضل محدود مرتبه بالای ضمنی حل شدند. در این مطالعه فرض شده یک گسیختگی به‌طور تصادفی در فاصله دور از محل تغذیه خط لوله رخ می‌دهد که خط لوله را به دو بخش مجزا (فشار بالا و فشار پایین) تقسیم می‌کند. در بخش فشار بالا، تغذیه گاز ادامه می‌یابد و جریان با همان مقدار اولیه ثابت نگه‌داشته می‌شود. در بخش فشار پایین، جریان به سمت صفر کاهش می‌یابد؛ زیرا کل گاز در بخش فشار پایین تخلیه می‌شود. در زمان‌های اولیه پس از شکست، افت فشار قابل‌توجهی در نقطه شکست رخ می‌دهد و جریان به‌صورت خفه شده (Choked) (سرعت جریان خروج گاز به سرعت صوت رسیده) خواهد بود. بعد از مدتی

فشار گاز در سوراخ به فشار محیط رسیده و دیگر افت فشاری روی نمی‌دهد. در این حالت جریان به‌صورت پایا در می‌آید و دبی جریان نشت یافته نیز به یک مقدار ثابت می‌رسد. نتایج نشان می‌دهد که تأثیر ضریب تراکم‌پذیری بر روی سرعت گاز بیشتر از فشار آن بوده در حالی که این ضریب تأثیری بر روی دما ندارد.

کوستووسکی و اسکورک [9] به بررسی یک بعدی جریان در لوله‌های آسیب‌دیده شبکه توزیع گاز طبیعی پرداخته‌اند و در مدل پیشنهادی خود، لوله آسیب‌دیده را به‌صورت شکست کامل در نظر گرفتند. آن‌ها جریان داخل لوله را در حالت‌های جریان دما ثابت و جریان بی‌دررو شبیه‌سازی کرده و هر یک از این دو حالت را برای گاز کامل و گاز واقعی بررسی کردند. آن‌ها همچنین اثر ضریب تخلیه را بر روی دبی خروجی گاز مورد تحلیل قرار دادند. آن‌ها برای به‌دست آوردن خواص گاز واقعی از معادله حالت بندیکت - وب - رویین استفاده کردند. نتایج حاصل از مقایسه بین مدل‌های جریان گاز واقعی و ایده‌آل نشان می‌دهد که تفاوت بین این مدل‌ها در فشار متوسط قابل‌اغماض است ولی باید برای خطوط لوله فشار بالا در نظر گرفته شود.

مولودی و ابوالفضل‌اصفهانی [10] به بررسی عددی جریان گذرای، تراکم پذیر و شبه یک بعدی در لوله‌های گاز غیر مدفون شکسته شده پرداختند. در کار آن‌ها تأثیر پارامترهای فیزیکی بدون بعد بر روی نرخ نشت از خطوط لوله گاز مورد بررسی قرار گرفته و روابط همبسته (Correlation) بدون بعدی برای تخمین دبی گاز نشت یافته پیشنهاد شده است. آن‌ها این پژوهش را در طیف گسترده‌ای از فشارهای عملیاتی و برای مدل حفره و مدل شکست کامل انجام دادند. نتایج مطالعه آن‌ها نشان می‌دهد که برای نرخ انتشار در مدل حفره تنها پارامتر مؤثر، نسبت قطر بی‌بعد شده (نسبت قطر سوراخ به قطر لوله) است، درحالی‌که مدل گسیختگی کامل لوله، تابعی از عبارت اصطکاک بی‌بعد شده (نسبت

حاصل ضرب ضریب اصطکاک در طول لوله به قطر لوله) و نسبت قطر بی بعد شده است.

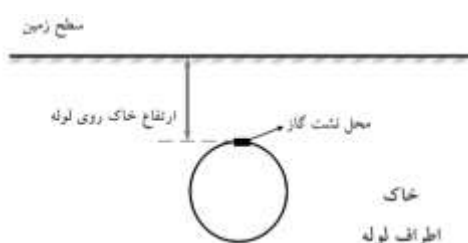
اوکاموتو و گومی [11] به بررسی تجربی و عددی رفتار نفوذی گاز نشت یافته از خطوط لوله مدفون به درون خاک پرداختند. این مطالعات در مقیاس کامل و به صورت سه بعدی انجام گرفت. آن‌ها مشاهده کردند بعد از گذشت ۲۴۰ ساعت از شروع نشت گاز، در شعاع ۰/۵ متری از نقطه نشتی غلظت گاز حدود ۸۰ درصد بوده و هر چه فاصله از نقطه نشتی بیشتر شود، غلظت گاز رفته رفته کاهش می‌یابد؛ به طوری که در شعاع ۱ متری غلظت گاز به حدود ۳۰ درصد می‌رسد. در مقایسه بین دو گاز متان و پروپان مشاهده شد که در ناحیه غلظت بالا، متان که دارای وزن مخصوص کمتری نسبت به هوا است عمدتاً از نقطه نشتی به سمت بالا نفوذ کرده در حالی که پروپان که دارای وزن مخصوص بیشتری نسبت به هوا است عمدتاً به سمت پائین نفوذ می‌کند. البته در ناحیه غلظت پائین وزن مخصوص تاثیر کمی دارد. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که مدل عددی ارائه شده توسط آن‌ها غلظت گاز درون خاک را با تطابق خوبی نسبت به نتایج تجربی پیش‌بینی می‌کند.

ابراهیمی مقدم و همکاران [12,13] به بررسی عددی نشت گاز طبیعی از یک سوراخ کوچک واقع بر سطح لوله‌های فشار پایین رو زمینی و مدفون پرداخته‌اند. جریان گاز درون لوله به صورت دو بعدی، تراکم‌پذیر، آشفته، پایا و با فرض گاز ایده‌آل تحلیل شده است. آن‌ها خاک را به صورت یک محیط متخلخل در نظر گرفتند. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که با بزرگتر شدن قطر سوراخ، فشار مقطع آسیب دیده کاهش یافته و به دنبال آن اختلاف فشار مقطع ابتدایی و مقطع آسیب دیده بیشتر می‌شود که نتیجه آن افزایش دبی نشتی است. در سوراخ‌هایی با قطر بزرگ‌تر، به علت افزایش جریان برگشتی از سمت پایین دست به سمت سوراخ، در نظر گرفتن طول لوله بعد از سوراخ تاثیر قابل توجهی در نتایج خواهد داشت. همچنین برای لوله‌های مدفون پس

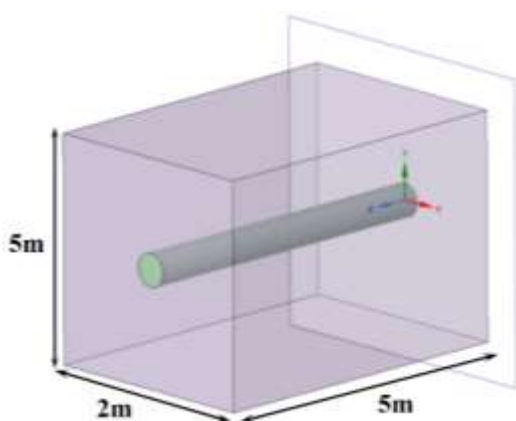
از ورود جریان گاز طبیعی به داخل خاک و برخورد آن با ذرات خاک و همچنین هوای موجود بین این ذرات، یک جفت گردابه در طرفین جت گاز ورودی به داخل خاک ایجاد می‌شود. بر اساس نتایج عددی، روابط همبسته‌ای برای پیش‌بینی دبی حجمی گاز نشت یافته ارائه شد. ابراهیمی مقدم و همکاران [14] در ادامه مطالعات خود به بررسی سه بعدی نشت گاز طبیعی از یک سوراخ کوچک واقع بر سطح لوله‌های فشار پایین رو زمینی و مدفون پرداخته‌اند. دامنه فشار مورد بررسی ۳-۵ bar می‌باشد. نتایج آن‌ها نشان داد که برای لوله‌های رو زمینی تفاوت نتایج دویعدی و سه بعدی تنها ۷٪ است؛ اما برای لوله‌های مدفون تفاوت فاحشی وجود دارد؛ به طوری که استفاده از شبیه‌سازی‌های دویعدی برای مدل‌سازی نشتی لوله‌های مدفون اصلاً گزینه مناسبی نبوده و نتایج اشتباهی را به همراه دارد. روابط همبسته‌ای ارائه شده برای پیش‌بینی دبی حجمی گاز نشت یافته در این کار دارای ۷٪ خطا نسبت به مقادیر عددی می‌باشند. در اغلب مطالعات انجام گرفته بر روی نشتی گاز از خطوط مدفون محیط خاک به صورت یک ناحیه متخلخل در نظر گرفته شده است. اگر چه در زمینه تاثیر محیط متخلخل بر روی نرخ انتقال حرارت مطالعات مفصلی در ادبیات علمی یافت می‌شود (برای نمونه [15-24])، مطالعات بسیار کمی به بررسی تاثیر محیط متخلخل و پارامترهای مربوطه بر روی نرخ انتقال جرم پرداخته‌اند.

خطوط لوله و مخازن مواد شیمیایی که در بسیاری از موارد در آن‌ها مواد آلاینده‌ی محیط زیست، مواد آتش‌زا و حتی مواد سمی وجود دارد از اهمیت به سزایی در صنعت برخوردارند. بدیهی است که وجود نشتی از این خطوط، به ویژه در مناطقی که از لحاظ زیست محیطی دارای حساسیت هستند می‌تواند خطرات زیادی برای موجوداتی که روی زمین زندگی می‌کنند فراهم آورد. از طرفی هدر رفتن بخشی از مواد ارزشمند که جزء محصولات و یا مواد اولیه‌ی ما هستند، از لحاظ

[14]. ارتفاع خاک بالای لوله برابر 1.5 m در نظر گرفته شده و خاک به صورت یک ناحیه متخلخل در اطراف لوله تعریف شده است. در این پژوهش برای مدل‌سازی خطوط لوله تغذیه از سه لوله پر کاربرد با قطرهای ۴، ۶ و ۸ اینچ (۱۰/۱۶، ۱۵/۲۴ و ۲۰/۳۲ سانتی‌متر) و برای خطوط لوله انتقال از دو لوله با قطرهای ۸ و ۱۰ اینچ (۲۰/۳۲ و ۲۵/۴ سانتی‌متر) استفاده شده است. در شکل (۱) محیط حل نشان داده شده است. به دلیل متقارن بودن مسئله و برای کاهش هزینه محاسباتی نیمی از محیط حل مورد بررسی قرار می‌گیرد.



شکل ۱ شماتی از خط لوله مدفون در خاک



شکل ۲ نمای کلی دامنه حل محاسباتی

معادلات حاکم بر جریان درون لوله

همان‌طور که پیش‌تر اشاره شد از آنجایی که در خط لوله‌ای که دچار نشتی شده فشار بالا است، سیال در کل ناحیه محاسباتی به صورت تراکم‌پذیر در نظر گرفته می‌شود؛ همچنین جریان در لوله به صورت پایا و آشفته است. بر این اساس معادلات حاکم بر مساله شامل

اقتصادی نیز ناخوشایند است. بنابراین و با توجه به تاریخچه، محاسبه میزان گاز نشت شده از خطوط لوله گاز طبیعی موضوع بسیار مهم و کاربردی است. اکثر تحقیقات گذشته در این حیطه در زمینه خطوط لوله روزمینی بوده است. در زمینه خطوط مدفون مطالعات بسیار کمی در دسترس می‌باشد که در مواردی حتی به صورت دوبعدی و با دقت پائین انجام شده‌اند. همچنین برای خطوط لوله انتقال و توزیع مدفون در خاک که فشار گاز در آن‌ها در محدوده $1050-1500\text{ psi}$ (bar) قرار دارد تا به حال مطالعه‌ای برای محاسبه میزان نشت گاز انجام نشده است. با توجه به اهمیت این موضوع برای شرکت‌های توزیع گاز، در این مطالعه به محاسبه میزان نشت گاز از خطوط لوله انتقال و تغذیه پرداخته شده و روابطی با دقت بسیار بالا برای محاسبه نشت گاز از این خطوط بر حسب قطر لوله، قطر سوراخ و فشار خطوط ارائه می‌شود.

مدل‌سازی مسئله

هنگامی که خط لوله دچار آسیب می‌شود حالت‌های مختلف مانند ایجاد حفره یا سوراخ و شکست کامل می‌تواند ایجاد شود. در حالت اول سوراخی بر سطح لوله ایجاد می‌شود که قطر آن از قطر لوله کوچک‌تر است و جریان از این سوراخ به محیط بیرون نشت می‌کند. این حالت را مدل سوراخ می‌نامند. در حالت دوم قطر سوراخ بزرگ‌تر یا مساوی قطر لوله است و برای مدل شکست کامل لوله به کار می‌رود [2]. در این مقاله مدل مورد استفاده حالت سوراخ می‌باشد. به دلیل طولانی بودن خط لوله گاز مدل‌سازی کل طول خط لوله تغذیه و انتقال گاز امکان‌پذیر نمی‌باشد. لذا لوله‌ای به طول m به عنوان محیط حل در این پژوهش انتخاب شده است. در فاصله‌ی ۳ متری از ابتدای لوله یک سوراخ دایره‌ای در قسمت بالای لوله برای شبیه‌سازی نشت گاز در نظر گرفته شده است. برای مدل کردن خاک اطراف لوله مکعبی به ابعاد $5 \times 5 \times 2\text{ m}$ در نظر گرفته شده است

در رابطه (۴) ضریب هدایت حرارتی مولکولی و k_t ضریب هدایت حرارتی آشفته می‌باشد که براساس مدل آشفته‌گی استفاده شده تعیین می‌شود. همچنین معادله انتقال گونه‌های شیمیایی به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\bar{\rho} \tilde{u}_i \tilde{Y}_k) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\bar{\rho} D_{k,m} \frac{\partial \tilde{Y}_k}{\partial x_i} + \tilde{u}_i \tilde{Y}_k \right), \quad (6)$$

در این معادله، Y_k کسر جرمی گونه k ام و $D_{k,m}$ ضریب نفوذ گونه k در مخلوط می‌باشد.

معادله حالت گاز واقعی

مطالعات مختلفی (برای نمونه [9,27]) نشان داده‌اند که برای خطوط انتقال گاز بین شهری که دارای فشار بالایی هستند (بازه فشار مورد استفاده در کار حاضر) باید از خواص گاز واقعی برای شبیه‌سازی جریان در لوله آسیب دیده استفاده کرد. معادله (۷)، معادله حالت گاز می‌باشد که در آن P, Z, ρ, R, T به ترتیب بیانگر فشار، ضریب تراکم پذیری، چگالی، ثابت گاز و دما می‌باشند:

$$P = Z\rho RT, \quad (7)$$

زمانی که گاز کامل فرض شود، ضریب تراکم پذیری برابر عدد ثابت یک است ولی برای حالت گاز واقعی، انجمن گاز آمریکا یک روش دقیق به نام آجی آ (AGA) برای محاسبه ضریب تراکم پذیری گاز طبیعی مورد استفاده در خطوط انتقال و توزیع گاز ارائه کرده است. برای محاسبه ضریب تراکم‌پذیری گاز طبیعی با استفاده از استاندارد آجی آ از روش مشخصه جزئی (D.C.M) استفاده شده است. این روش در حال حاضر روش پذیرفته شده جهانی برای تعیین دقیق حجم استاندارد گاز عبوری در مبادی خرید و فروش محسوب می‌شود. درصد خطای این روش برای محدوده قابل قبول اجزاء مولی گاز، در محدوده دمایی بین ۲۶۳ تا ۳۵۰

معادله بقای جرم (پیوستگی)، بقای اندازه حرکت (مومنتوم)، بقای انرژی و بقای گونه‌های شیمیایی می‌باشد. این معادله‌ها برای سیال تراکم‌پذیر و در حالت پایا به ترتیب به صورت رابطه‌های متوسط‌گیری شده زیر بیان می‌شوند [25,26].

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\bar{\rho} \tilde{u}_i) = 0, \quad (1)$$

در معادله فوق ρ ، چگالی و u_i بردار سرعت می‌باشد. معادله انتقال مومنتوم متوسط‌گیری شده به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\bar{\rho} \tilde{u}_i \tilde{u}_j) = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial \bar{\tau}_{ij}}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_i} (-\bar{\rho} \tilde{u}_i \tilde{u}_j) + \bar{p} g_i, \quad (2)$$

در این معادله p ، نشان دهنده فشار استاتیکی، $\bar{\tau}_{ij}$ تانسور تنش، ρg_i نیروی جاذبه و عبارت $\tilde{u}_i \tilde{u}_j$ به عنوان مولفه‌های تنش رینولدز شناخته می‌شود که با استفاده از مدل آشفته‌گی تخمین زده می‌شود. با اعمال قانون پایستگی انرژی، معادله انرژی متوسط‌گیری شده به صورت معادله (۳) به دست می‌آید:

$$\frac{\partial}{\partial x_i} [\tilde{u}_i (\bar{\rho} \tilde{E} + \bar{p})] = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[k_{\text{eff}} \frac{\partial \bar{T}}{\partial x_j} + \tilde{u}_i (\bar{\tau}_{ij})_{\text{eff}} \right], \quad (3)$$

در معادله (۳)، E انرژی کل و k_{eff} ضریب هدایت حرارتی موثر می‌باشد که از رابطه (۴) محاسبه می‌شود. T دما و $(\bar{\tau}_{ij})_{\text{eff}}$ تانسور تنش موثر است که از رابطه (۵) به دست می‌آید. دو جمله سمت راست معادله (۳) به ترتیب بیانگر انتقال انرژی به دلیل انتقال حرارت هدایتی و گرمایش لزجی سیال می‌باشد.

$$k_{\text{eff}} = k + k_t, \quad (4)$$

$$(\bar{\tau}_{ij})_{\text{eff}} = \mu_{\text{eff}} \left[\left(\frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \tilde{u}_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_i} \right], \quad (5)$$

یا مساوی ۱)، فشار اولیه یا فشار ورودی (kPa)، فشار ثانویه یا فشار خروجی (kPa)، نرخ جریان حجمی گاز در شرایط استاندارد (۱۰۱,۳۵۲ kPa و ۲۸۸ K) برحسب m^3/day می‌باشد [30].

معادلات حاکم درون خاک

همان‌طور که اشاره شد، برای شبیه‌سازی خاک، یک ناحیه متخلخل در اطراف لوله تعریف شده است. در یک محیط متخلخل طبیعی توزیع منفذها از نظر شکل و اندازه به صورت بی‌قاعده و نامنظم می‌باشند و هیچ قانون خاصی بر نحوه پراکندگی آن‌ها حاکم نیست [31]. تخلخل یک محیط متخلخل به صورت کسری از حجم کل محیط که توسط سیال اشغال می‌شود، تعریف شده و با نماد (γ) نمایش داده می‌شود که عددی بین ۰ تا ۱ است [32]. معادله‌های جریان در ناحیه متخلخل به صورت مستقل از ناحیه درون لوله تعریف می‌شوند. معادله‌های حاکم بر ناحیه متخلخل شامل معادله‌های پیوستگی، مومنتوم و انرژی است که در ادامه معرفی می‌شوند [33,34]:

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\gamma \rho u_i u_j) = 0, \quad (10)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\gamma \rho u_i u_j) = -\gamma \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial (\gamma \bar{\tau}_{ij})}{\partial x_j} + \gamma \rho g_i - \gamma \rho g_i - \left(\frac{\mu}{\alpha} + \frac{c_2 \rho}{2} |u_i| \right) u_i, \quad (11)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i} [u_i (\rho_f E_f + \rho)] = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[k_{eff} \frac{\partial T}{\partial x_i} + u_i (\bar{\tau}_{ij})_{eff} \right] + s_f^h, \quad (12)$$

در روابط فوق γ میزان تخلخل و برابر ۳۵ درصد، α ضریب نفوذپذیری و C_2 ضریب مقاومت اینرسی می‌باشند که برای مدل کردن مقاومت محیط متخلخل در برابر حرکت سیال در نظر گرفته می‌شوند. در این

کلوین و محدوده فشار بین ۰ تا ۱۲ MPa، ± 0.1 می‌باشد [28]. با توجه به آن‌که این روش در محدوده وسیعی از دما، چگالی و فشار گاز طبیعی، قابل به‌کارگیری است در این مطالعه از این روش استفاده خواهد شد. ضریب تراکم‌پذیری در معادله آجی‌آ به صورت رابطه (۸) تعریف می‌شود [29]:

$$z = 1 + B \rho_m - \rho_r \sum_{n=13}^{18} c_n^* + \sum_{n=13}^{58} c_n^* (b_n - c_n k_n \rho_r^{k_n}) \rho_r^{b_n} \exp(-c_n \rho_r^{b_n}), \quad (8)$$

در این رابطه B ضریب دوم ویریا، ρ_m چگالی مولار، ρ_r چگالی کاهیده، k_n ، c_n و b_n ضرایب ثابت پارامتری و c_n^* یک ضریب تابع ترکیبات تشکیل دهنده گاز طبیعی و دمای گاز می‌باشد.

تخمین افت فشار درون لوله

فشار گاز در لوله به تدریج در جهت جریان کاهش می‌یابد. این مقدار کاهش یا افت فشار به گذر حجمی جریان، طول لوله، قطر داخلی، زبری سطح داخلی لوله و همچنین خواص فیزیکی گاز، فشار و دمای متوسط گاز بستگی دارد. برای محاسبه افت فشار در طول خط لوله معادله ویموث (Weymouth) (۹) استفاده می‌شود که معادله آن به صورت زیر است [30]:

$$Q = 3.7435 \times 10^{-3} E \left(\frac{T_b}{P_b} \right) \sqrt{\frac{P_1^2 - P_2^2}{G T_f L_e Z}} D^{2.667}, \quad (9)$$

در رابطه فوق، P_1 ، E ، D ، Z ، L_e ، T_f ، G ، P_b ، T_b ، Q ، P_2 به ترتیب بیانگر دمای پایه یا دمای محیط بر حسب کلوین، فشار پایه یا فشار محیط بر حسب کیلو پاسکال، چگالی گاز (بدون واحد) دمای متوسط جریان گاز، طول هم‌ارز خط لوله (km)، ضریب تراکم‌پذیری گاز، قطر داخلی لوله، بازدهی خط لوله (یک مقدار اعشاری کمتر

۸۸/۸۶٪ متان، ۴/۹٪ اتان، ۱/۷۴٪ پروپان، ۰/۶۹٪ ایزوبوتان، ۰/۶۹٪ بوتان نرمال، ۰/۶۹٪ ایزو پنتان، ۰/۳۱٪ پنتان نرمال، ۰/۳۱٪ هگزان، ۳/۶۹٪ نیتروژن و ۱/۲۹ دی اکسید کربن در نظر گرفته شده است. همچنین برای دیواره لوله نیز از شرط مرزی عدم لغزش و شرط بی دررو استفاده شده است. سطح خاک که در تماس با محیط اطراف می باشد دارای شرط مرزی فشار خروجی است.

بررسی استقلال حل از شبکه محاسباتی

در این پژوهش شبکه بندی مدل مورد بررسی با استفاده از شبکه های سازمان یافته انجام شده است. از آنجایی که دیواره ها به عنوان منبع اصلی تشکیل آشفتگی می باشند و در نزدیکی دیواره ها کمیت هایی چون سرعت دارای گرادینان شدیدی هستند، مدل کردن صحیح جریان در نزدیکی دیواره اثر بسیار مهمی بر حل دقیق دارد. لذا در نزدیکی دیواره ها و همچنین سوراخ، شبکه بندی بسیار ریزتر از نواحی دیگر انتخاب شده است. شکل (۳) نشان دهنده ی هندسه شبکه بندی شده می باشد.

برای بررسی عدم وابستگی نتایج به تعداد سلول های به کار رفته در دامنه محاسباتی و اعتبارسنجی شبکه، یک مدل با مشخصات ثابت (قطر لوله، قطر سوراخ و فشار ورودی به لوله) و تعداد سلول های متفاوت در چهار حالت مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل در جدول (۲) آورده شده است. این جدول برای لوله ای با فشار ۲۵۰ psi (۱۷/۲ bar) و قطر ۴ in (۱۰/۱۶ cm) که سوراخی به قطر ۳۰ mm بر روی آن ایجاد شده می باشد. مقادیر درصد اختلاف در جدول (۲) بر اساس اختلاف میزان نشتی گاز بین دو ردیف متوالی جدول محاسبه شده است.

پژوهش از فرمول های تجربی ارائه شده توسط ارگان [35] برای محاسبه این ضرایب استفاده شده است که به صورت روابط (۱۳) و (۱۴) می باشند.

$$\alpha = \frac{d_p^2}{150} \times \frac{\gamma^3}{(1-\gamma)^2}, \quad (13)$$

$$C_2 = \frac{3/5}{d_p} \times \frac{(1-\gamma)}{\gamma^3}, \quad (14)$$

در این روابط d_p قطر ذرات متخلخل است. خواص خاک مورد استفاده برای شبیه سازی در این پژوهش در جدول (۱) ارائه شده است [36].

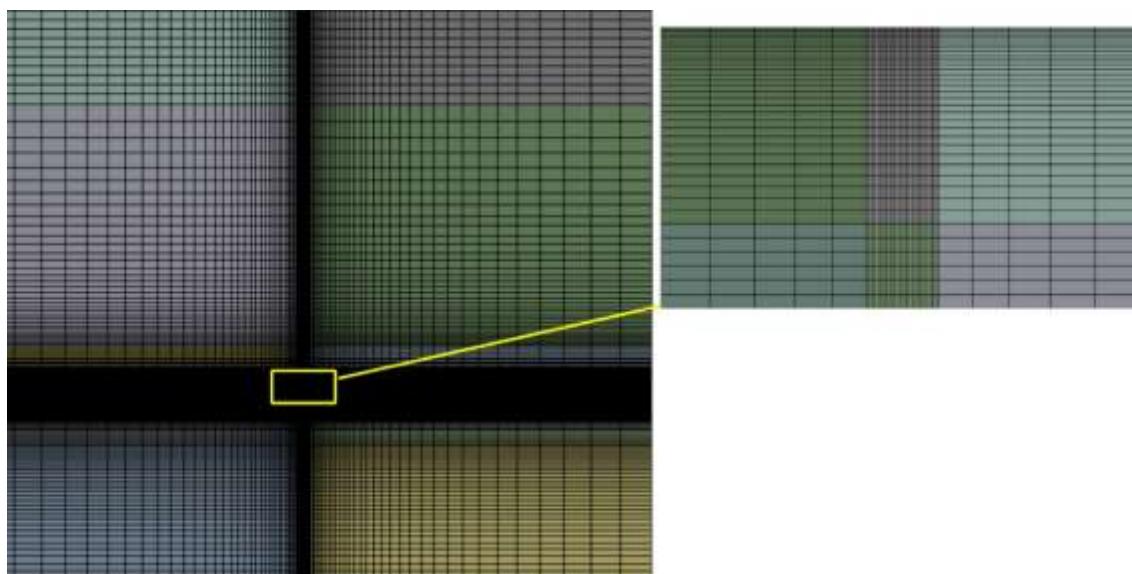
جدول ۱ خواص خاک مورد استفاده در این پژوهش [36]

خواص خاک	میزان تنظیم شده
نفوذ پذیری (m^2/s)	$1/6 \times 10^{-6}$
رسانائی گرمائی (W/mK)	۲/۹
ظرفیت گرمایی (J/kgK)	۷۳۲/۶۹
چگالی (kg/m^3)	۲۶۵۰

روش حل عددی و شرایط مرزی

در کار حاضر از مدل اغتشاشی کی-اوسیلون تحقق پذیر (k-ε Realizable) استفاده شده است. برای شبیه سازی رفتار نزدیک دیواره از تابع دیواره استاندارد بهره گرفته شده است. حل گر مسئله از نوع مبتنی بر فشار انتخاب شده و الگوریتم کویپلینگ فشار-سرعت نیز از نوع سیمپل (SIMPLE) می باشد. کلیه جمله های جابه جایی در معادلات حاکم بر مسئله به کمک روش بالادستی مرتبه دوم گسسته سازی شده اند.

در این پژوهش در مقطع ورودی لوله شرط مرزی از نوع فشار ورودی و در مقطع خروجی در انتهای لوله شرط مرزی از نوع فشار خروجی انتخاب شده است. در ورودی گاز طبیعی با ترکیبات واقعی آن و بر اساس آنالیز گاز استان چهار محال و بختیاری به صورت ترکیبی از



شکل ۳ شبکه‌بندی دامنه حل محاسباتی

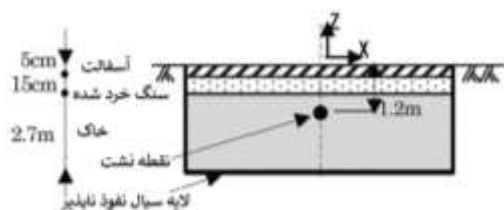
جدول ۲ تاثیر تعداد سلول محاسباتی بر میزان گاز نشت شده

تعداد سلول‌های محاسباتی	دبی جرمی جریان گاز نشت یافته (kg/s)	% اختلاف
۳۲۳۱۴۵	۰٫۲۸۸۸۹۶۲	-
۶۳۴۸۲۸	۰٫۲۸۳۰۸۹۶	۲٫۵
۱۰۹۳۷۲۰	۰٫۲۸۳۹۶۶	۰٫۳
۲۱۳۴۵۳۲	۰٫۲۸۳۸۴۶	۰٫۰۴

راستی‌آزمایی نتایج

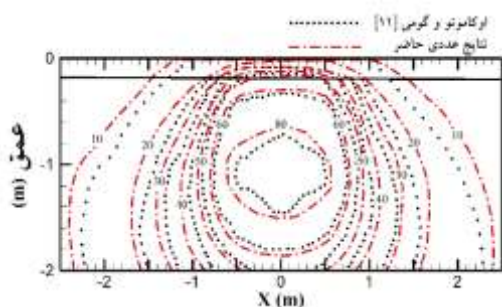
برای صحت‌سنجی مدل عددی به کار برده شده در این پژوهش، نتایج حاصل از شبیه‌سازی حاضر با نتایج تجربی مرجع [11] مقایسه شده است. اوکاموتو و گومی [11] نحوه توزیع غلظت گاز متان درون زمین را برای مقدار مشخصی نشتی به صورت تجربی بررسی کردند. در این کار محفظه‌ای به حجم 300 m^3 با ابعاد $3 \times 10 \times 10 \text{ m}$ به وسیله‌ی خاکی با میزان تخلخل مشخص پر شد. نشتی در فاصله 120 cm از سطح زمین رخ می‌دهد. محیط متخلخل در نظر گرفته شده از سه لایه مختلف با میزان تخلخل و ضخامت متفاوت تشکیل شده که شامل 5 cm آسفالت با تخلخل 5% درصد، 15 cm سنگ خرد شده با تخلخل 23.5% درصد و یک لایه 5 cm

270 خاک با تخلخل 17% درصد است. طرح‌واره محفظه در نظر گرفته شده در پژوهش اوکاموتو و گومی در شکل (۴) نشان داده شده است. دیواره‌های مخزن به صورت نفوذ ناپذیر در نظر گرفته شده‌اند و در فاصله سه متری از سطح زمین یک لایه سیال نفوذ ناپذیر نیز قرار دارد.



شکل ۴ طرح‌واره‌ای از ست‌آپ آزمایشگاهی به منظور اندازه‌گیری غلظت متان نشت شده در زمین [11]

[37] به دلیل تغییرات ناچیز دما در طول خط لوله گاز طبیعی، تاثیر دمای ورودی بر میزان نشست گاز قابل صرف نظر می‌باشد. در ادامه میزان تاثیر هر یک از پارامترهای فوق بر میزان دبی گاز نشست یافته و میدان جریان حاصل از نشستی مورد بررسی قرار می‌گیرد.

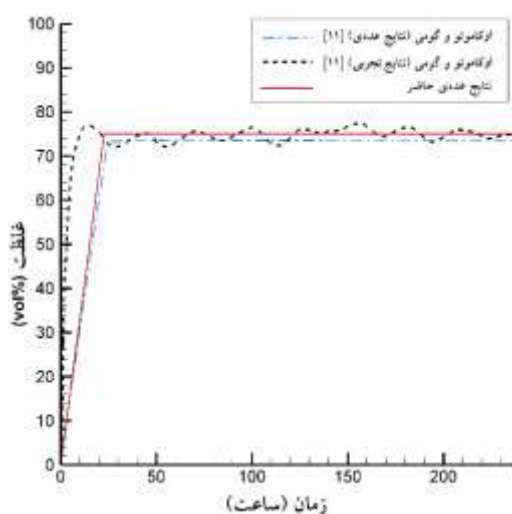


شکل ۶ مقایسه درصد توزیع غلظت گاز متان در پژوهش حاضر و پژوهش اوکاموتو و گومی [11] بعد از ۲۴۰ ساعت نشست گاز

بررسی تاثیر قطر لوله و قطر سوراخ بر میزان نشست گاز

قطر لوله و قطر سوراخ از موثرترین پارامترهای نشست گاز در خطوط لوله می‌باشند. به همین علت در این پژوهش، لوله‌هایی با قطرهای مختلف مورد بررسی قرار گرفته‌اند. برای خطوط تغذیه، لوله‌هایی با قطر ۴، ۶ و ۸ اینچ (۱۰، ۱۶، ۲۰، ۲۴، ۲۰، ۳۲ سانتی‌متر) و برای خطوط انتقال، لوله‌هایی با قطر ۸ و ۱۰ اینچ (۲۰، ۲۵، ۲۵، ۳۲ سانتی‌متر) که از پر کاربردترین سایزهای لوله در خطوط تغذیه و انتقال می‌باشند، در نظر گرفته شده است. همچنین قطر سوراخ به ازای مقادیر مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. به دلیل زبری سطح داخلی لوله، طول لوله تاثیر خود را در قالب افت فشار نشان می‌دهد. در این پژوهش زبری سطح داخلی لوله نیز در نظر گرفته شده است و افت فشار در طول لوله محاسبه شده است. فشار ابتدای خط لوله برای خطوط لوله تغذیه به ازای مقادیر ۱۵۰، ۱۷۵، ۲۰۰، ۲۲۵، ۲۵۰ psi و برای خطوط

آن‌ها میزان معینی از گاز متان را از نقطه مشخصی از محفظه نشست دادند و توزیع غلظت گاز را پس از گذشت ۲۴۰ ساعت در اطراف نقطه نشستی اندازه‌گیری کردند. برای بررسی صحت مدل مورد استفاده در پژوهش حاضر، با در نظر گرفتن شرایط و فرضیات مورد استفاده توسط اوکاموتو و گومی [11] این مسئله در نرم افزار فلونت شبیه‌سازی شد. نتایج به دست آمده با نتایج مرجع [11] مقایسه شد که در شکل (۵) آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود نتایج شبیه‌سازی حاضر، تطابق خوبی با نتایج کار تجربی اوکاموتو و گومی دارد. در شکل (۶) نیز میزان پراکندگی گاز نشست شده درون زمین بعد از مدت زمان ۲۴۰ ساعت با نتایج تجربی مقایسه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود رفتار گاز نشست شده و میزان غلظت آن در شبیه‌سازی انجام شده نیز تطابق خوبی با نتایج تجربی دارد.



شکل ۵ مقایسه توزیع غلظت گاز متان در پژوهش حاضر و پژوهش اوکاموتو و گومی [11]

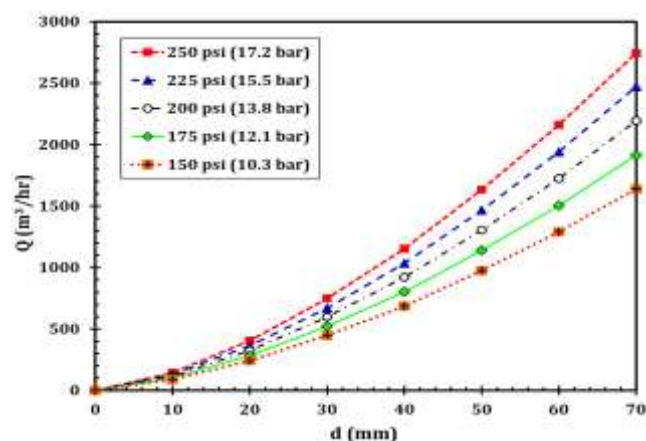
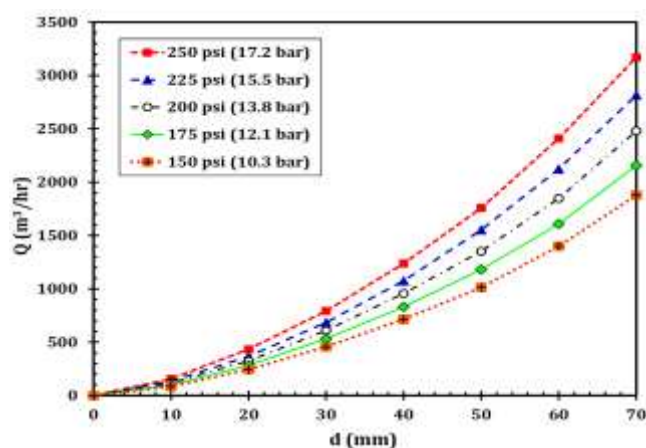
تفسیر و تحلیل نتایج

کمیت‌هایی مانند قطر لوله، قطر سوراخ، فشار خط لوله، دمای خط لوله، طول لوله، افت فشار درون لوله و خواص خاک می‌توانند بر نشست گاز طبیعی از خط لوله تاثیر داشته باشند. البته بر اساس نتایج لو و همکاران

انتقال به ازای مقادیر ۹۰۰، ۸۰۰، ۷۰۰، ۶۰۰، ۵۰۰، ۴۰۰ و ۱۰۵۰ psi مورد بررسی قرار گرفته است. در شکل (۷) تغییرات دبی حجمی گاز نشت شده از خطوط تغذیه به ازای مقادیر مختلف قطر سوراخ و فشارهای ورودی متفاوت برای لوله‌هایی با قطرهای ۴ و ۸ اینچ (۱۰/۱۶ و ۲۰/۳۲ سانتی‌متر) نشان داده شده است. با بررسی حالت‌های مختلف در این دو نمودار مشاهده می‌شود که مطابق انتظار با افزایش قطر سوراخ میزان نشت گاز افزایش یافته است و با کاهش قطر سوراخ کاهش می‌یابد. بر اساس این شکل‌ها مشاهده می‌شود که دبی گاز نشت شده با قطر سوراخ رابطه‌ی مستقیم و از مرتبه دو دارد؛ به طوری که مثلاً برای تخمین دبی گاز نشت شده از یک خط لوله تغذیه با قطر ۴ in (۱۰/۱۶ cm)

$$Q = 0.4753d^2 + 11.772d + 0.4747. \quad (15)$$

مقایسه‌ی منحنی‌های مختلف نشان می‌دهد دبی گاز نشت شده با افزایش قطر لوله کاهش پیدا کرده است، یعنی با قطر لوله رابطه عکس دارد و هر مقدار که قطر لوله افزایش پیدا کرده است میزان نشت گاز کمتر شده است. برای نمونه دبی نشتی برای خط لوله تغذیه با قطر ۴ in (۱۰/۱۶ cm)، فشار خط ۲۵۰ psi (۱۷/۲ bar) و سوراخی با قطر ۵۰ mm برابر $1755.7 \text{ Nm}^3/\text{hr}$ است؛ در حالی که برای لوله‌ای با همان مشخصات و قطر ۸ in (۲۰/۳۲ cm) به $1632.2 \text{ Nm}^3/\text{hr}$ کاهش می‌یابد.

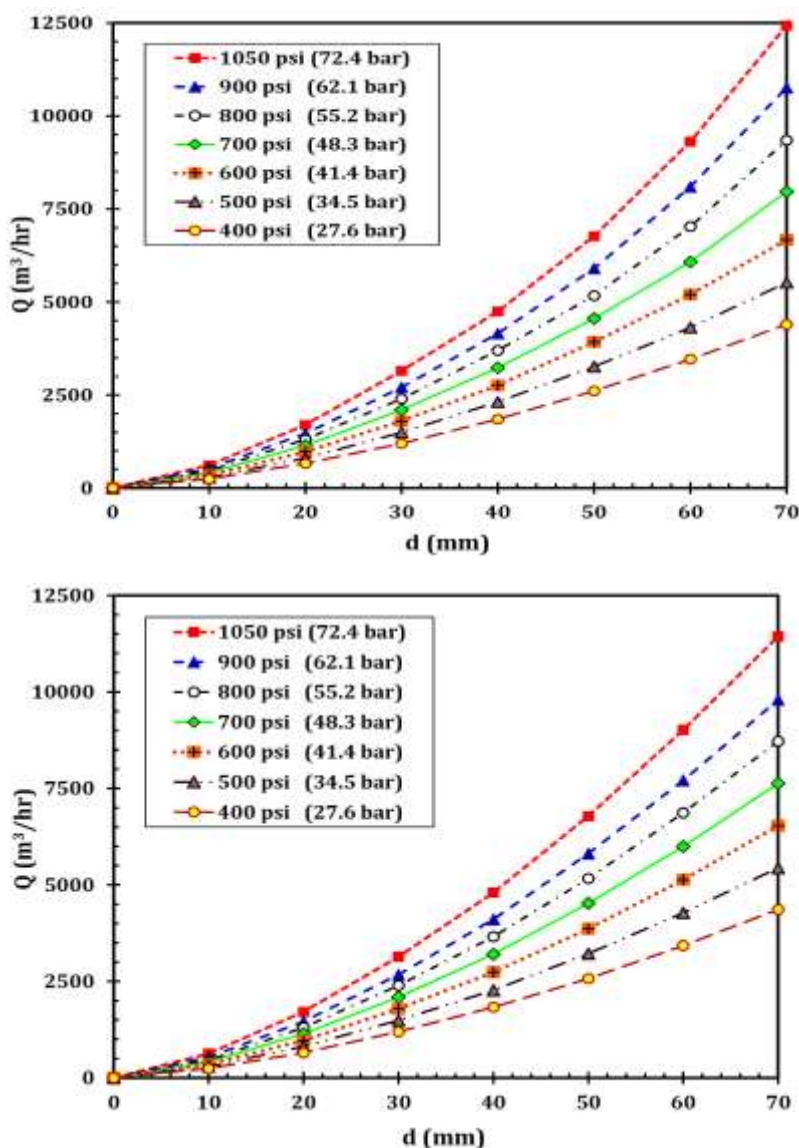


شکل ۷ تغییرات دبی حجمی گاز نشت شده از خطوط لوله تغذیه برحسب قطر سوراخ در فشارهای ورودی مختلف. تصویر بالایی متعلق

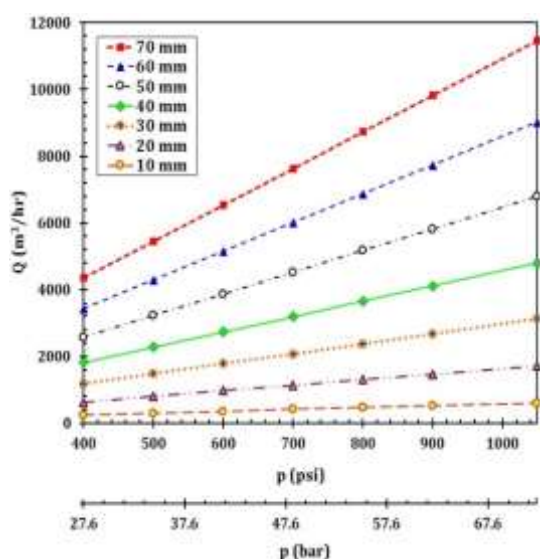
به لوله تغذیه ۴ in (۱۰/۱۶ cm) و تصویر پائینی متعلق به لوله انتقال ۸ in (۲۰/۳۲ cm) است

سوراخ ۷۰ mm و فشار ابتدای خط لوله ۱۰۵۰ psi (۷۲/۴ بار) فرض شود، میزان دبی گاز نشت شده برای لوله‌ی ۸ اینچی (۲۰/۳۲ سانتی متری)، ۱۲۴۳۰ Nm^3/hr است؛ در حالی که برای لوله‌ی ۱۰ اینچی (۲۵/۴ سانتی متری) میزان نشتی تا مقدار ۱۱۴۳۵ Nm^3/hr کاهش می‌یابد. این موضوع نشان دهنده‌ی رابطه معکوس قطر لوله و دبی حجمی گاز نشت شده است.

تغییرات دبی حجمی گاز نشت شده از خطوط لوله انتقال به ازای مقادیر مختلف قطر سوراخ و فشارهای متفاوت ورودی خط لوله برای لوله‌های ۸ و ۱۰ اینچی (۲۰/۳۲ و ۲۵/۴ سانتی متری) در شکل (۸) نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود تاثیر قطر سوراخ و قطر لوله بر میزان دبی حجمی گاز نشت شده مشابه با خطوط لوله تغذیه است. به‌طور مثال اگر قطر



شکل ۸ تغییرات دبی حجمی گاز نشت شده از خطوط لوله انتقال برحسب قطر سوراخ در فشارهای ورودی مختلف. تصویر بالائی متعلق به لوله تغذیه ۸ in (۲۰/۳۲ cm) و تصویر پائینی متعلق به لوله انتقال ۱۰ in (۲۵/۴ cm) است



شکل ۹ تغییرات دبی حجمی گاز نشت شده بر حسب فشار ابتدای خط لوله برای قطرهای مختلف سوراخ. تصویر بالایی متعلق به لوله تغذیه ۴ in (۱۰٫۱۶ cm) و تصویر پائینی متعلق به لوله انتقال ۸ in (۲۰٫۳۲ cm) است

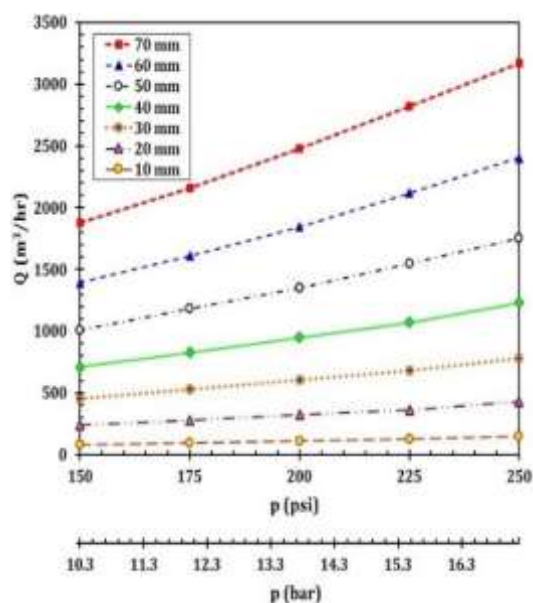
مطابق شکل (۹) برای خط لوله انتقال ۸ اینچی (۲۰٫۳۲ سانتی‌متری)، با قطر سوراخ ۷۰ mm میزان گاز نشت شده برای فشار ابتدای خط ۴۰۰ psi (۲۷٫۶ bar)، $4399.2 \text{ Nm}^3/\text{hr}$ می‌باشد؛ در صورتی‌که برای فشار ۱۰۵۰ psi (۷۲٫۴ bar) میزان نشتی به $12827.1 \text{ Nm}^3/\text{hr}$ افزایش می‌یابد.

بررسی توزیع کمیت‌ها در دامنه حل

برای بررسی توزیع کمیت‌ها در دامنه‌ی حل، توزیع سرعت در ناحیه پیرامون سوراخ در خط لوله تغذیه با قطر ۴ in (۱۰٫۱۶ cm)، فشار ابتدای خط ۲۵۰ psi (۱۷٫۲ bar) و قطر سوراخ ۴۰ mm در شکل (۱۰) و توزیع سرعت در ناحیه پیرامون سوراخ در خط لوله انتقال با قطر ۸ in (۲۰٫۳۲ cm)، فشار ابتدای خط ۱۰۵۰ psi (۷۲٫۴ bar) و قطر سوراخ ۴۰ mm در شکل (۱۱) نشان داده شده است. این شکل‌ها نشان دهنده توزیع سرعت کل ناحیه حل (خاک و لوله) و مقطع آسیب دیده می‌باشد. همان‌طور که مشاهده می‌شود در هر دو شکل بیشینه

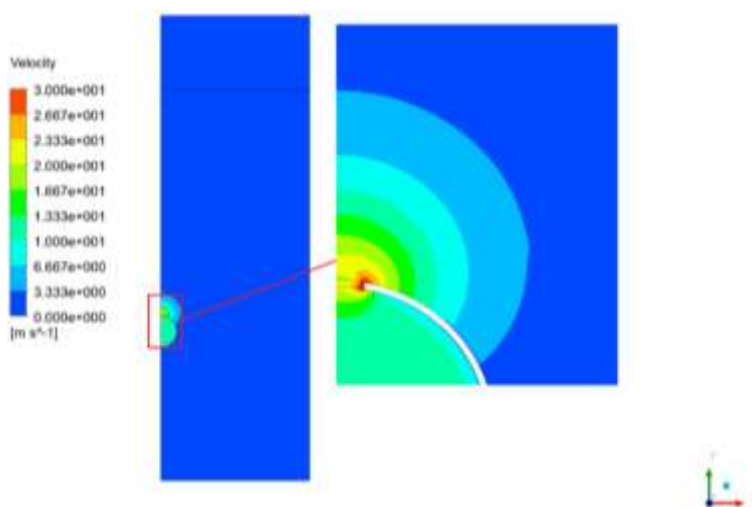
بررسی تاثیر فشار ابتدای خط لوله بر میزان نشت گاز

همان‌طور که از شکل‌های (۷) و (۸) نیز مشخص است، با افزایش فشار خط لوله، میزان نشتی افزایش می‌یابد. به‌منظور بررسی کمی تاثیر فشار ابتدای خط لوله بر تغییرات دبی حجمی گاز نشت شده، در شکل (۹) این وابستگی برای یک خط لوله تغذیه با قطر ۴ اینچ (تصویر بالایی) و یک خط لوله انتقال با قطر ۸ اینچ (تصویر پائینی) نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود دبی گاز نشت شده با فشار ابتدای خط لوله رابطه مستقیم خطی دارد؛ به‌طوری‌که می‌توان از یک برازش خطی با ضریب همبستگی بسیار نزدیک به یک برای توصیف این وابستگی استفاده کرد. در خط لوله تغذیه ۴ اینچی (۱۰٫۱۶ سانتی‌متر) با قطر سوراخ ۷۰ mm در حالی‌که فشار ابتدای خط لوله ۱۵۰ psi (۱۰٫۳ bar) باشد، میزان نشتی $1902 \text{ Nm}^3/\text{hr}$ تخمین زده می‌شود. در حالی‌که با افزایش فشار ابتدای خط لوله به ۲۵۰ psi (۱۷٫۲ bar) میزان نشتی به $3170 \text{ Nm}^3/\text{hr}$ افزایش می‌یابد. برای خطوط انتقال نیز شرایط به‌صورت مشابه می‌باشد.

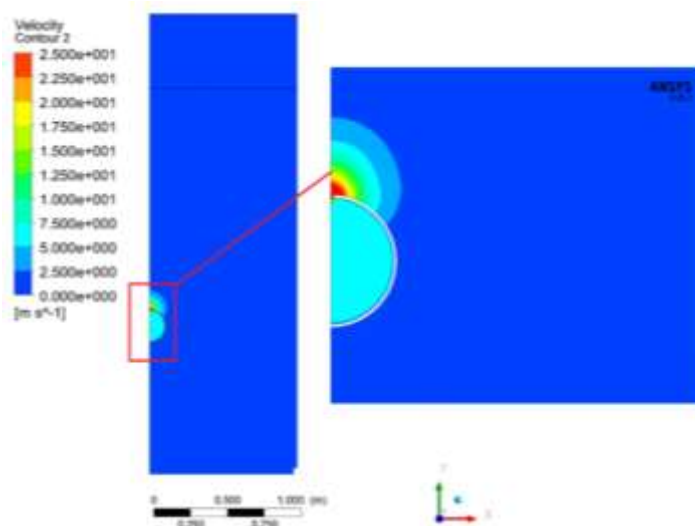


عددی صورت گرفته بر روی خطوط مدفون که به صورت دوبعدی انجام شده‌اند [12,13] خفگی جریان در خزوج از سوراخ را گزارش کرده‌اند؛ در حالی که شبیه‌سازی‌های سه بعدی این موضوع را مردود دانسته‌اند [14]. مطالعه حاضر نشان می‌دهد که سرعت نشتی گاز از خطوط مدفون حتی در فشارهای بالا نیز از سرعت صوت فاصله قابل توجهی داشته و رژیم جریان کاملاً مادون صوت باقی می‌ماند.

سرعت در کنار دیواره سوراخ (محل نشتی) اتفاق می‌افتد. با عبور جریان از سوراخ به دلیل مقاومت خاک روی لوله سرعت گاز پس از خروج به شدت کاهش می‌یابد. این نتایج نشان می‌دهد که برخلاف لوله‌های رو زمینی، در لوله‌های مدفون نشتی گاز در رژیم مادون صوت باقی می‌ماند و فرآیندهای دینامیک گازی مانند خفگی جریان در مقطع آسیب دیده روی نمی‌دهد. تاکید بر روی این موضوع از آنجایی اهمیت دارد که مطالعات



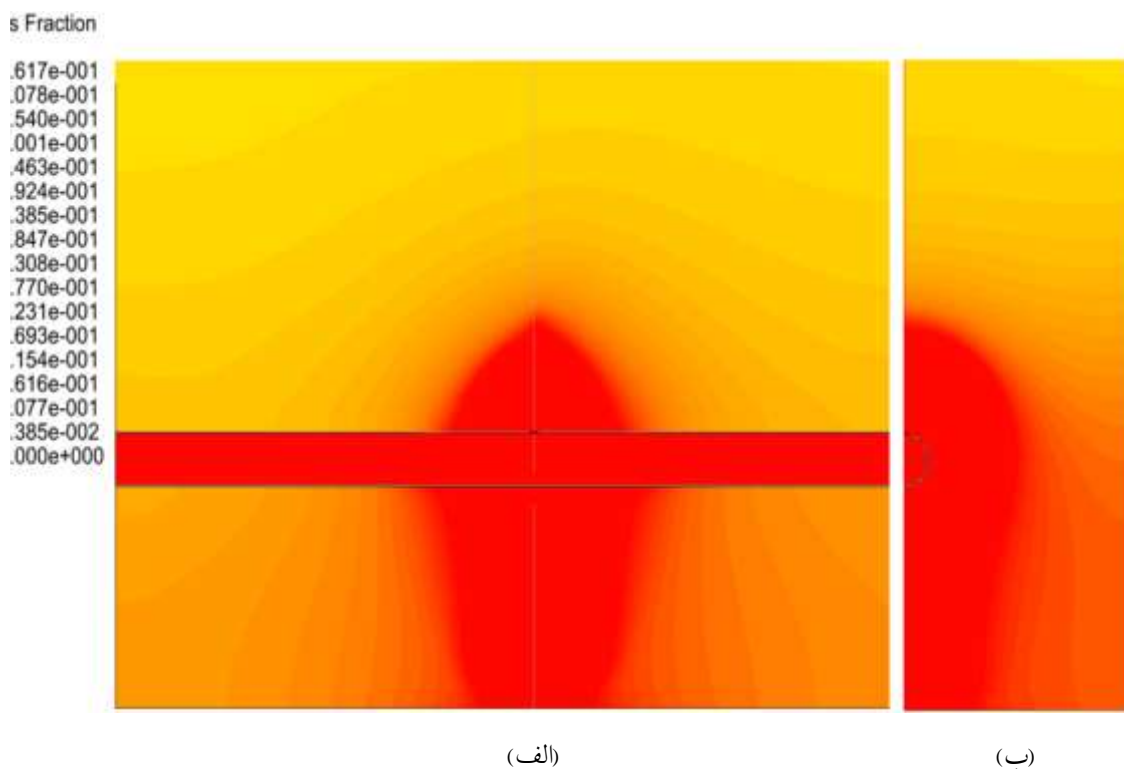
شکل ۱۰ توزیع سرعت در نمای جانبی برای لوله‌ای به قطر ۴ in (۱۰٫۱۶ cm)، فشار ابتدایی ۲۵۰ psi (۱۷٫۲ bar) و قطر سوراخ ۴۰ mm



شکل ۱۱ توزیع سرعت در نمای جانبی برای لوله‌ای به قطر ۸ in (۲۰٫۳۲ cm)، فشار ابتدایی ۱۰۵۰ psi (۷۲٫۴ bar) و قطر سوراخ ۴۰ mm

جریان ورودی به خاک پس از برخورد با ذرات خاک به سمت ناحیه زیرین لوله حرکت می‌کند. با توجه به مسیرهای عبور جریان گاز درون خاک و با توجه به آن که گاز در حالت واقعی در سه جهت (z, y, x) حرکت می‌کند، مدل سازی نشست گاز باید به صورت سه بعدی انجام شود؛ در غیر این صورت خطای محاسباتی زیادی در نتایج به وجود خواهد آمد. انتقال متان در اثر مکانیزم‌های جابه‌جائی و نفوذ به سمت سطح خاک و همچنین به سمت عمق خاک، نواحی با تجمع بالای متان در اطراف سوراخ لوله شکل داده است. گازی که به سمت سطح خاک حرکت می‌کند وارد هوای اتمسفر شده اما گازی که به عمق خاک منتقل می‌شود با توجه به شرایط مرزی میدان حل در قسمت پائینی، تجمع پیدا می‌کند. از این رو مطابق شکل (۱۲) ناحیه غلظت بالا در پائین لوله گستردگی بیشتری دارد.

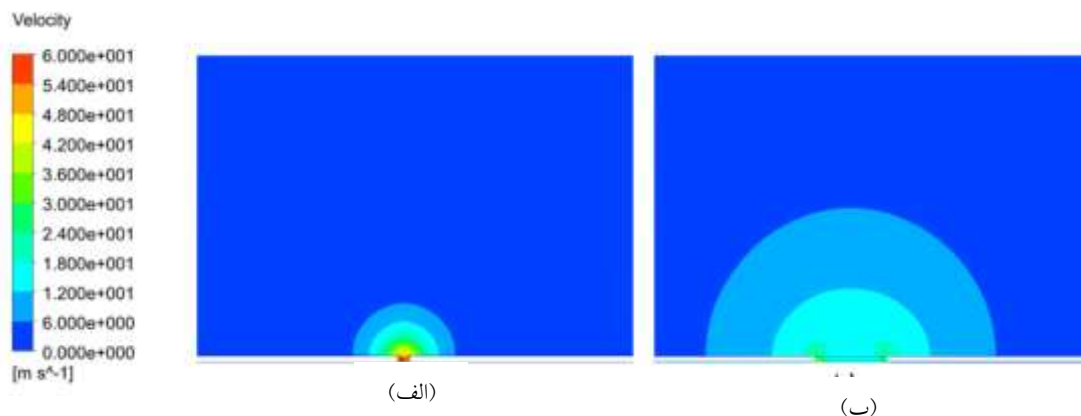
پیش از آن که گاز طبیعی به درون خاک نشست کند درون منافذ خاک تنها هوا وجود دارد. با نشست گاز به درون منافذ خاک، گاز طبیعی با هوا ترکیب می‌شود. شکل (۱۲) نشان دهنده توزیع غلظت گاز متان درون خاک اطراف لوله است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در اطراف نقطه نشتی غلظت گاز متان بسیار بالا می‌باشد و با دور شدن از نقطه نشست، رفته رفته میزان غلظت آن کاهش می‌یابد و در مقابل غلظت هوا افزایش می‌یابد. در این ناحیه سیال موجود در خاک ترکیبی از گاز طبیعی و هوا می‌باشد که در مجاورت نشتی به دلیل بالا بودن فشار گاز غلظت گاز طبیعی بسیار بیشتر از هوا می‌باشد. مطابق این شکل غلظت متان علاوه بر ناحیه بالایی مجاور سوراخ در پائین لوله نیز مقدار قابل توجهی دارد. این موضوع نشان می‌دهد که گاز طبیعی پس از خروج از سوراخ به درون منافذ خاک نفوذ می‌کند و در جهات مختلف پخش می‌شود. بخشی از



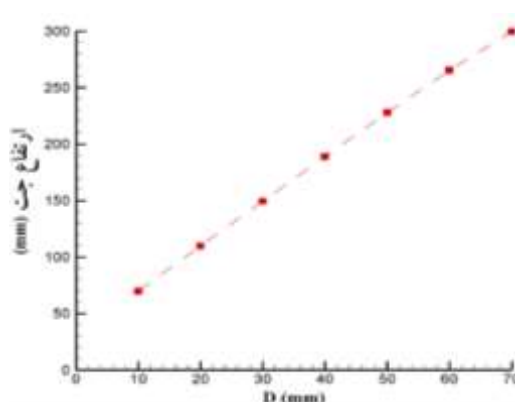
شکل ۱۲ توزیع غلظت گاز متان نشست شده درون خاک در صفحه (الف) YZ ، (ب) YX برای لوله‌ای به قطر 4 in (10.16 cm)، فشار ابتدایی 250 psi (17.2 bar) و قطر سوراخ 40 mm

سوراخی با قطر کوچکتر بیشتر است؛ اما طول نفوذ جت کمتر است. با توجه به اینکه مساله حاضر، تخمین گاز نشت شده از لوله های زیر زمینی است و سرعت گاز خروجی بسیار کم می باشد، بنابراین برخلاف لوله های رو زمینی پدیده دینامیک گازی خاصی اتفاق نمی افتد. برای درک بهتر مساله نمودار ارتفاع جت گاز نشت شده (طول نفوذ جت) بر حسب قطر سوراخ برای خطوط لوله تغذیه ۸ in (۲۰٫۳۲ cm) با فشار ابتدایی psi ۲۵۰ (۱۷٫۲ bar) در شکل (۱۴) رسم شده است. همان طور که مشاهده می شود تغییرات ارتفاع جت گاز ناشی از نشتی با قطر سوراخ رابطه خطی دارد و مشاهده می شود با افزایش قطر سوراخ طول جت گاز افزایش می یابد.

یکی از عوامل تاثیر گذار بر توزیع غلظت متان نشت شده در خاک مجاور سوراخ، طول جت نشتی یا به عبارت دیگر عمق نفوذ گاز می باشد. با بررسی نتایج به دست آمده مشاهده می شود که با افزایش قطر سوراخ برای مقادیر ثابت قطر لوله و فشار ابتدای خط، طول جت گاز نشت شده بزرگتر می شود و میزان نفوذ سیال به محیط متخلخل خاک افزایش می یابد. این مشاهده نیز درست بر عکس نتایج حاصل از شبیه سازی های دو بعدی جریان نشتی گاز از لوله های مدفون [12] است. در شکل (۱۳) جت گاز برای لوله ای به قطر ۸ in (۲۰٫۳۲ cm)، فشار ابتدایی psi ۲۵۰ (۱۷٫۲ bar) و قطر سوراخ ۱۰ mm با لوله ای با فشار اولیه و قطر لوله ثابت و قطر سوراخ ۷۰ mm مقایسه شده است. اگر چه مطابق انتظار، سرعت خروجی از مقطع آسیب دیده برای



شکل ۱۳ جت گاز برای لوله ای به قطر ۸ in (۲۰٫۳۲ cm)، فشار ابتدایی psi ۲۵۰ (۱۷٫۲ bar) و (الف) قطر سوراخ ۱۰ mm و (ب) قطر سوراخ ۷۰ mm



شکل ۱۴ ارتفاع جت گاز نشت شده بر حسب قطر سوراخ برای خطوط لوله تغذیه ۸ in (۲۰٫۳۲ cm) با فشار ابتدایی psi ۲۵۰ (۱۷٫۲ bar)

$$Q = 383 - 2.346 p - 23.11 d + 0.0009417 p^2 + 0.1808 pd + 0.2835 d^2, \\ 10 \leq d \leq 70 \text{ mm} \quad (19)$$

روابط (۲۰) و (۲۱) برای محاسبه دبی گاز نشت شده از خط لوله تغذیه با قطر ۸ in (۲۰٫۳۲ cm) ارائه شده است:

$$Q = 1.789 - 0.01849 p - 0.014 d + 4.62 e^{-5} p^2 + 0.05758 pd + 0.00061 d^2, \\ 1 \leq d \leq 10 \text{ mm} \quad (20)$$

$$Q = 313.2 - 1.843 p - 21.03 d - 4.139 e^{-5} p^2 + 0.1758 pd + 0.2583 d^2, \\ 10 \leq d \leq 70 \text{ mm} \quad (21)$$

روابط (۲۲) و (۲۳) برای محاسبه دبی گاز نشت شده از خط لوله انتقال با قطر ۸ in (۲۰٫۳۲ cm) ارائه شده است:

$$Q = -0.225 - 0.1659 p + 0.00074 d + 0.0128 p^2 + 0.057 pd - 5.56 e^{-7} d^2, \\ 1 \leq d \leq 10 \text{ mm} \quad (22)$$

$$Q = 1672 - 102 p - 2.464 d + 1.152 p^2 + 0.194 pd + 5.38 e^{-5} d^2, \\ 10 \leq d \leq 70 \text{ mm} \quad (23)$$

روابط (۲۴) و (۲۵) برای محاسبه دبی گاز نشت شده از خط لوله انتقال با قطر ۱۰ in (۲۵٫۴ cm) ارائه شده است.

$$Q = -0.167 - 0.217 p + 0.000804 d + 0.01835 p^2 + 0.0584 pd - 7.37 e^{-7} d^2, \\ 1 \leq d \leq 10 \text{ mm} \quad (24)$$

ارائه روابطی برای محاسبه دبی گاز نشت شده

شبیه‌سازی عددی برای بررسی نشت گاز از خطوط لوله تغذیه و انتقال گاز مدفون در خاک در این پژوهش انجام شد که در بخش قبل به بررسی نتایج حاصل از این شبیه‌سازی پرداختیم و تاثیرگذاری پارامترهای موثر بر مقدار دبی حجمی گاز نشت شده از خط لوله را مورد بررسی قرار دادیم. حال بر اساس نتایج ارائه شده در بخش قبل روابط همبسته‌ای برای تعیین میزان دبی گاز نشت شده از هر یک از خطوط تغذیه و انتقال ارائه می‌شود. با توجه به نمودارها و با بررسی تغییرات مربوط به پارامترهای تاثیرگذار بر میزان نشتی، روابط ارائه شده بر حسب قطر سوراخ، قطر لوله و فشار ابتدای لوله می‌باشند که با استفاده از نرم افزار متلب به‌دست آمده‌اند. اگر چه معمولاً روابط همبسته در علوم مهندسی به‌صورت روابطی از اعداد بی‌بعد بیان می‌شوند؛ اما از آنجایی که در پژوهش حاضر اولویت با دقت روابط همبسته و سادگی کاربرد آنها بوده است، روابط ارائه شده در بازه‌های مختلف و بر حسب قطر سوراخ، قطر لوله و فشار ابتدای لوله می‌باشند.

روابط (۱۶) و (۱۷) برای محاسبه دبی گاز نشت شده از خط لوله تغذیه با قطر ۴ in (۱۰٫۱۶ cm) ارائه شده است:

$$Q = 33.05 - 0.3419 p - 1.449 d + 0.0008563 p^2 + 0.0667 pd + 0.001948 d^2, \quad (16)$$

$$Q = 871.4 - 6.442 p - 33.12 d + 0.01035 p^2 + 0.2054 pd + 0.3912 d^2, \quad (17)$$

روابط (۱۸) و (۱۹) برای محاسبه دبی گاز نشت شده از خط لوله تغذیه با قطر ۶ in (۱۵٫۲۴ cm) ارائه شده است:

$$Q = -25.68 + 0.2433 p + 1.637 d - 0.000554 p^2 + 0.05779 pd - 0.1656 d^2, \\ 1 \leq d \leq 10 \text{ mm} \quad (18)$$

شبه‌سازی عددی مورد تحلیل قرار گرفت. خاک به صورت یک محیط متخلخل در نظر گرفته شد. تاثیر عواملی نظیر قطر لوله، قطر سوراخ و فشار خط لوله بر میزان نشت گاز طبیعی از خط لوله آسیب دیده مورد بررسی قرار گرفت و روابط همبسته‌ی بسیار دقیقی برای تخمین میزان نشت گاز از خطوط تغذیه و انتقال که دارای فشار کاری بالایی هستند، استخراج شد. نتایج مستخرج از مطالعه حاضر را می‌توان به صورت زیر بیان کرد:

۱. رابطه‌ی دبی گاز نشت شده با قطر سوراخ از مرتبه دو و با فشار لوله از مرتبه یک است.

۲. در لوله‌های مدفون، بر خلاف لوله‌های رو زمینی، نشتی گاز در رژیم مادون صوت باقی می‌ماند و فرآیندهای دینامیک گازی مانند خفگی جریان در مقطع آسیب دیده روی نمی‌دهد. خفگی جریان خروجی حتی در خطوط فشار بالا نیز مشاهده نشد.

۳. بخشی از جریان خروجی از مقطع سوراخ پس از برخورد با ذرات خاک به سمت ناحیه زیرین لوله حرکت می‌کند. این موضوع نشان می‌دهد که نفوذ گاز در خاک در حالت واقعی در هر سه جهت روی می‌دهد.

۴. اگر چه سرعت خروجی از مقطع آسیب‌دیده برای سوراخی با قطر کوچک‌تر بیشتر است؛ اما طول نفوذ جت در این حالت کمتر خواهد بود.

از آنجایی که خطوط انتقال و تغذیه گاز طبیعی در شرایط محیطی متنوعی به کار گرفته می‌شوند به عنوان پیشنهاد تاثیر دمای گاز بر میزان نشتی در مطالعات آینده می‌تواند بررسی شود. همچنین با توجه به ویژگی‌های متفاوت انواع خاک در اقلیم سرزمینی ایران بررسی تاثیر خواص مختلف خاک بر روی میزان نشت گاز ضروری به نظر می‌رسد.

سپاسگزاری

نویسندگان بر خود لازم می‌دانند از شرکت گاز منطقه‌ای استان چهارمحال و بختیاری و به ویژه آقای دکتر ابراهیم

$$Q = 1091 - 73.17 p - 1.791 d + 0.9126p^2 + 0.1727 pd + 1.066 e^{-5}d^2.$$

$$10 \leq d \leq 70 \text{ mm}$$

(۲۵)

در این روابط Q دبی حجمی نرمال شده گاز بر حسب Nm^3/hr ، d قطر سوراخ بر حسب mm و p فشار ابتدای خط بر حسب psi می‌باشد. این روابط برای خطوط تغذیه در محدوده فشار $150 \leq p \leq 250 \text{ psi}$ (bar) و برای خطوط انتقال در محدوده فشار $10.3 \leq p \leq 17.2 \text{ psi}$ (bar) و $40.0 \leq p \leq 72.4 \text{ bar}$ و قطر سوراخ $1 \leq p \leq 70 \text{ mm}$ مناسب می‌باشند.

نتایج حاصل از شبه‌سازی و نتایج به دست آمده از طریق روابط همبسته‌ی فوق با یکدیگر مقایسه شده و ضریب همبستگی (۴) مربوط به روابط فوق در جدول (۳) آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، اگرچه دامنه تغییرات فشار لوله و قطر سوراخ‌ها دارای گستره وسیعی است، اما با این حال روابط برازش شده در این پژوهش از دقت مناسبی برخوردار هستند.

جدول ۳ ضریب همبستگی روابط ارائه شده برای تخمین

دبی نشتی گاز

شماره معادله	ضریب همبستگی	شماره معادله	ضریب همبستگی
معادله (۱۶)	۰,۹۹۸۹	معادله (۲۱)	۱,۰۰۰۰
معادله (۱۷)	۰,۹۹۹۷	معادله (۲۲)	۰,۹۹۶۰
معادله (۱۸)	۰,۹۹۹۳	معادله (۲۳)	۱,۰۰۰۰
معادله (۱۹)	۰,۹۹۸۵	معادله (۲۴)	۱,۰۰۰۰
معادله (۲۰)	۰,۹۹۹۵	معادله (۲۵)	۰,۹۹۸۸

نتیجه‌گیری

با توجه به اهمیت بررسی مسئله نشت در صنعت گاز، در این مقاله نشت گاز طبیعی از خطوط لوله تغذیه و انتقال مدفون در زمین مورد بررسی قرار گرفت. برای این منظور لوله‌ای مدفون در خاک که سوراخی در قسمت فوقانی آن در نظر گرفته شده با استفاده از

Transmission pipeline	خط لوله انتقال	خلیلی جهت همکاری در زمینه انجام این تحقیق	
Leakage	نشتی	قدردانی به عمل آورند.	
Flow rate	نرخ جریان		
Correlation	رابطه همبسته	واژه نامه	
Porous media	محیط متخلخل	Pipeline	خط لوله
		Buried pipe	لوله مدفون
		Supply pipeline	خط لوله تغذیه

مراجع

1. Parvini, M., Gharagouzlou, E., "Gas leakage consequence modeling for buried gas pipelines", *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, Vol. 37, pp. 110-8, (2015).
2. Montiel, H., Vílchez, J. A., Casal, J., Arnaldos, J., "Mathematical modelling of accidental gas releases", *Journal of Hazardous Materials*, Vol. 59, pp. 211-33, (1998).
3. Yuhu, D., Gao, H., Zhou, J., Yaorong, F., "Mathematical modeling of gas release through holes in pipelines", *Chemical Engineering Journal*, Apr 15, Vol. 92, pp. 237-41, (2003).
4. Jo, Y. D., Ahn, B. J., "A Simple Model for the Release Rate of Hazardous Gas from a Hole on High-Pressure Pipelines", *Journal of Hazardous Materials*, Feb 28, Vol. 97(1-3), pp. 31-46, (2003).
5. Oke, A., Mahgerefteh, H., Economou, I., Rykov, Y., "A transient outflow model for pipeline puncture", *Chemical Engineering Science*, Oct, Vol. 58(20), pp. 4591-604, (2003).
6. Zhao, Y., Xihong, L., Jianbo, L., "Analysis on the diffusion hazards of dynamic leakage of gas pipeline", *Reliability Engineering & System Safety*, Jan, Vol. 92(1), pp. 47-53, (2007).
7. Safitri, A., Xiaodan, G., Mannan, M. S., "Dispersion modeling approach for quantification of methane emission rates from natural gas fugitive leaks detected by infrared imaging technique", *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, Mar, Vol. 24(2), pp. 138-45, (2011).
8. Nouri-Borujerdi, A., "Transient modeling of gas flow in pipelines following catastrophic failure", *Mathematical and Computer Modelling*, Dec, Vol. 54(11-12), pp. 3037-45, (2011).
9. Kostowski, W. J., Skorek, J., "Real gas flow simulation in damaged distribution pipelines", *Energy*, Sep, Vol. 45(1), pp. 481-88, (2012).
10. Moloudi, R., Abolfazli Esfahani, J., "Modeling of gas release following pipeline rupture: proposing non-dimensional correlation", *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, Nov, Vol. 32, pp. 207-17, (2014).
11. Okamoto, H., Gomi, Y., "Empirical research on diffusion behavior of leaked gas in the ground", *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, Sep, Vol. 24(5), pp. 531-40, (2011).
12. Ebrahimi-Moghadam, A., Farzaneh-Gord, M., Deymi-Dashtebayaz, M., "Correlations for estimating

- natural gas leakage from above-ground and buried urban distribution pipelines", *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, *Agu*, Vol. 34, pp.185-96, (2016).
13. Ebrahimi-Moghadam, A., Farzaneh-Gord, M., Deymi-Dashtebayaz, M., "Calculation the amount of natural gas loss from a hole in buried distribution gas pipelines", *Journal of Mechanical Engineering*, Vol. 47(3), pp. 1-10, Persian, (2017).
 14. Ebrahimi-Moghadam, A., Farzaneh-Gord, M., Arabkoohsar, A., Jabari Moghadam, A., "CFD analysis of natural gas emission from damaged pipelines: Correlation development for leakage estimation", *Journal of Cleaner Production*, Oct 20, Vol. 119, pp. 257-71, (2018).
 15. Barnoon, P., Toghraie, D., Rostami, S., "Optimization of heating-cooling generators with porous components/cryogenic conductors on natural convection in a porous enclosure: Using different two-phase models and single-phase model and using different designs", *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Feb 1, Vol. 111, pp. 104472, (2020).
 16. Mirzaeyan, M., Toghraie, D., "Numerical investigation of laminar heat transfer and nanofluid flow between two porous horizontal concentric cylinders", *Journal of Central South University*, Jul 1, Vol. 26(7), pp. 1976-99, (2019).
 17. Jourabian, M., Rabienataj Darzi, A. A., Toghraie, D., Akbari, O. A., "Melting process in porous media around two hot cylinders: Numerical study using the lattice Boltzmann method", *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, Nov 1, Vol. 509, pp. 316-35, (2018).
 18. Barnoon, P., Toghraie, D., "Numerical investigation of laminar flow and heat transfer of non-Newtonian nanofluid within a porous medium", *Powder Technology*, Feb 1, Vol. 325, pp. 78-91, (2018).
 19. Nazari, S., Toghraie, D., "Numerical simulation of heat transfer and fluid flow of Water-CuO Nanofluid in a sinusoidal channel with a porous medium. *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*", Mar 1, Vol. 87, pp. 134-40, (2017).
 20. Moradi, A., Toghraie, D., Isfahani, A. H., Hosseini, A., "An experimental study on MWCNT–water nanofluids flow and heat transfer in double-pipe heat exchanger using porous media", *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, Sep 15, Vol. 137(5), pp. 1797-807, (2019).
 21. Arasteh, H., Mashayekhi, R., Toghraie, D., Karimipour, A., Bahiraei, M., Rahbari, A., "Optimal arrangements of a heat sink partially filled with multilayered porous media employing hybrid nanofluid", *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, Aug 15, Vol. 137(3), pp. 1045-58, (2019).
 22. Toghraie, D., Mahmoudi, M., Akbari, O. A., Pourfattah, F., Heydari, M., "The effect of using water/CuO nanofluid and L-shaped porous ribs on the performance evaluation criterion of microchannels", *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, Jan 14, Vol. 135(1), pp. 145-59, (2019).
 23. Jourabian, M., Rabienataj, Darzi, A. A., Toghraie, D., Akbari, O. A., "Melting process in porous media

- around two hot cylinders: Numerical study using the lattice Boltzmann method", *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, Nov 1, Vol. 509, pp. 316-35, (2018).
24. Li ,Y., Hosseini, M., Arasteh, H., Toghraie, D., Rostami, S., "Transition simulation of two-phase intermittent slug flow characteristics in oil and gas pipelines", *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Apr 1, Vol. 113, pp. 104534, (2020).
 25. Versteeg, H. K., Malalasekera, W., "An introduction to computational fluid dynamics: the finite volume method", 2nd ed. Pearson publication, New York, (2007).
 26. ANSYS Fluent Tutorial Guide. Release 18.0. ANSYS, Inc. January, (2017).
 27. Jaberı Khosroshahi, A., Hossainpour, S., Noorolahi Bastam, N., "Determination of gas leakage rate from damaged pipeline considering AGA equation of state", *Journal of Mechanical Engineering*, Vol. 46(3), pp. 67-77. Persian, (2016).
 28. Marić, I., Galović, A., Šmuc, T., "Calculation of natural gas isentropic exponent", *Flow Measurement and Instrumentation*, Mar, Vol. 16(1), pp. 13-20, (2005).
 29. British Standard Institution, Calculation of natural gas compression factor, BS EN ISO 12213-2, Sep. 32 p, (2009).
 30. Menon, E. S., "Gas pipeline hydraulics", Crc Press publication, New York, (2005).
 31. Nield, D. A., Bejan, A., "Convection in porous media", 4th ed, Springer, New York, (2006).
 32. Heinemann, Z. E., "Fluid flow in porous media [dissertation]", University of Leoben, (2005).
 33. Ewing, R. E., Wang, J., Weekes, S. L., "On the simulation of multicomponent gas flow in porous media", *Applied Numerical Mathematics*, Dec, Vol. 31(4), pp. 405-27, , (1999).
 34. Esfe, M. H., Bahiraei, M., Hajbarati, H., Valadkhani, M., "A comprehensive review on convective heat transfer of nanofluids in porous media: Energy-related and thermohydraulic characteristics", *Applied Thermal Engineering*, May, Vol. 20, pp. 115487, (2020).
 35. Ergun, S., "Fluid flow through packed columns", *Chemical Engineering Progress*, Vol. 48(2), pp. 89-94, (1952).
 36. Farouki, O. T., "Thermal properties of soils", Series on Rock and Soil Mechanics, Trans Tech Publication, Switzerland, (1986).
 37. 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*, Jul, Vol. 1(2), pp. 71-86, (2014).

Presenting a Correlation to Obtain Natural Gas Leakage Rate from a Buried High-Pressure Pipeline in a Porous Media

Reza Sabzian¹ Ali Abdollahi²
Sobhan Emami³

1. Introduction

Gas leakage from the transmission, supply, and urban distribution network pipelines, in addition to triggering the loss of a large volume of gas and, sometimes, gas-flow shut off, can result in human and environmental damages. Thus, the non-controlled leakage will bring annually expensive losses to the National Iranian Gas Company. Unlike the exertion of all technical conservations and predictions in the design, implementation, and exploitation from the distribution networks and gas transmission lines, we can never estimate the gas leakage emergence possibility at zero. Hence, the calculation of the gas leaked from natural gas pipelines is an extensively important and most demanded issue. Majority of the previous studies in this regard have addressed gas leakage from above-ground pipelines. However, few investigations on buried or under-ground pipelines are available. Furthermore, in some cases, the numerical studies have been conducted using two-dimensional simulation and with low accuracy. Likewise, no study has so far examined the buried supply and transmission pipelines, whose gas pressure is between 150 and 1050 psi (10.3-72.4 bar), to calculate the volumetric flow rate of leaked gas. Concerning the importance of this topic in the natural gas distribution companies, this research estimates the rate of gas release from supply and transmission pipelines and presents high-accurate correlational relationships for the estimation of gas leakage from these lines according to pipe diameter, hole diameter, and line pressure.

2. Problem Modeling and Numerical Solution Method

To model the problem, the researchers used a hole, whose diameter is smaller than the pipe diameter, over the pipe surface. The gas flow leaked from

this hole to the outer ambient. This condition is called the hole model. Figure 1 illustrates the computational domain inside and outside of the pipe.

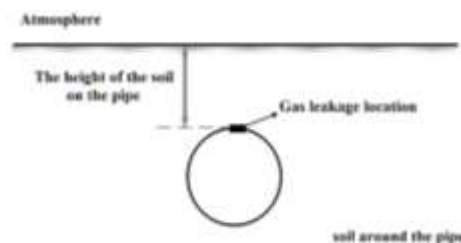


Figure 1. Schematic view of buried pipe

In this study, the flow inside the pipe is steady and turbulent. Accordingly, the problem governed by equations include the conservation of mass, momentum, conservation of energy, and conservation of chemical species. These equations are solved for the compressible fluid and in steady and three-dimensional conditions. Regarding the high pressure of the natural gas in the damaged pipe, the study employed the real gas equation, and the compressibility factor of the natural gas is obtained by the AGA method. Moreover, the turbulent flow is modeled by the use of $k-\epsilon$ realizable turbulence model.

For soil simulation, a porous medium is defined around the buried pipe. The distribution of the pores is irregular and disordered. The flow equations in the porous medium are defined independently from the inner side of the pipe. The governing equations consist of conservation of mass, momentum, and energy depended on the porosity as well as the permeability and inertial resistance coefficients of the soil. In this research, the porosity of the soil equals 35%, and other coefficients were calculated by the empirical formulas presented by Ergun.

3. Results and Discussion

Parameters such as pipe diameter, hole diameter, pipeline pressure, pipeline temperature, pipe length, loss of pressure within the pipe, and thermal properties of soil can affect the amount of gas leakage from the pipe. However, due to insignificant temperature changes along the

¹. MSc Student, Department of Mechanical Engineering, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran.

². Corresponding author. Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran. Email: abdollahi@pmc.iaun.ac.ir

³. Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran.

natural gas pipe, the effect of inlet temperature on the amount of gas leakage can be disregarded.

Evaluation of the pipe radius and hole radius' effect on the amount of gas leakage . Pipe and hole diameters are two of the most effective parameters on the amount of gas leak in pipelines. Therefore, in this research, pipes with different diameters are evaluated. For supply lines, pipes with 4, 6, and 8 inch diameters and for transmission lines, pipes with 8 and 10 inch diameters, which are the most commonly used sizes for supply and transmission lines, were used. Moreover, the hole diameter was evaluated with respect to different quantities. In Figure 2 the changes in the volumetric flow rate of the gas leaked from supply lines are shown with respect to the hole diameter and different pressures on the four-inch-diameter pipe. As expected, as the hole diameter increases, gas leakage also increases. According to this figure, the volumetric flow rate of leaked gas has a direct and second-order relation with the hole diameter.

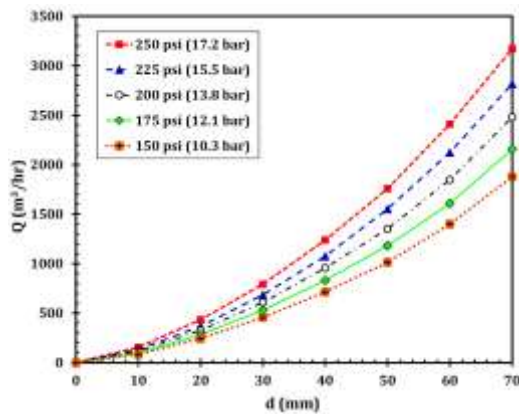


Figure 2. The volumetric flow rate of the gas leaked from supply lines, with respect to hole radius in different pressures on the four-inch-diameter supply line

Evaluation of the effect of pipeline inlet pressure on the amount of gas leakage. In Figure 3 the changes in the volumetric flow rate of the gas leaked from transmission lines are shown with respect to different hole diameters and different pressures on the eight-inch-diameter pipe. According to this figure, the volumetric flow rate of the leaked gas has a direct and first-order relation with pipe inlet pressure.

According to the results from the numerical simulations, correlational relationships are introduced for determining the volumetric flow rate of the leaked gas, Q (m^3/hr), from supply and transmission lines. The fitted equations are in different ranges and with respect to hole diameter, $d(mm)$, pipe diameter, and pressure at the inlet of

the pipeline, $p(psi)$. For example, for a ten-inch-diameter transmission line in the $400 \leq p \leq 1050$ psi pressure range and $10 \leq d \leq 70$ mm hole diameter, the following correlational relationship is achieved:

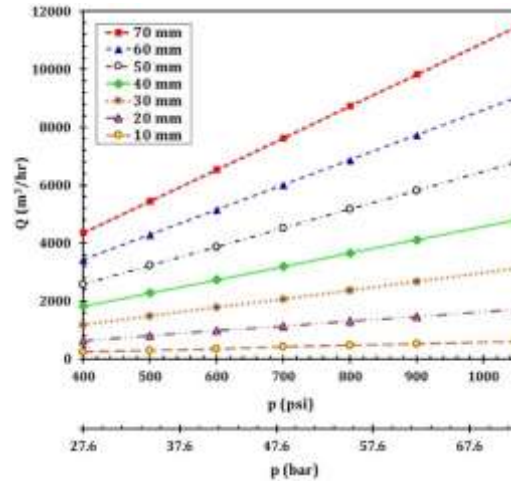


Figure 3. The volumetric flow rate of the gas leaked from transmission lines, with respect to different hole diameters and pressures on the eight-inch-diameter transmission line

Introducing the correlations to measure the flow rate of the leaked gas

$$Q = 1091 - 73.17 p - 1.791 d + 0.9126 p^2 + 0.1727 pd + 1.066e^{-5} d^2 \quad (1)$$

This fitted equation has a 0.9988 correlation coefficient and is highly precise.

4. Conclusion

The effect of factors, such as pipe diameter, hole diameter, and pipeline pressure on the amount of natural gas leakage from a damaged pipeline, was evaluated and highly precise correlations were extracted for estimating the amount of gas leaked from high-pressure supply and transmission pipelines. The results show that the relations between the volumetric flow rate of leaked gas and hole diameter and pipe pressure, respectively, are of the second and first order. Unlike above-ground pipes, in under-ground pipes, the choked outflow from the damaged section is not seen, even in high pressures. According to the results, parts of the released gas from the pipe move towards the lower area of the pipe, after colliding with soil particles, which shows that the leakage flow has a three-dimensional character and it is not possible to provide precise correlations for estimating the leakage through two-dimensional simulation.