

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده مهندسی مکانیک و مکاترونیک
پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی تبدیل انرژی

تعیین میزان نشتی از خطوط توزیع گاز طبیعی مدفون با استفاده از شبیه سازی عددی

نگارنده: امیر ابراهیمی مقدم

استاد راهنما:

دکتر محمود فرزانه گرد

استاد مشاور:

دکتر مهدی دیمی دشت بیاض

شهریور ۱۳۹۵



باسمه تعالی

شماره:

تاریخ:

ویرایش:

مدیریت تحصیلات تکمیلی

فرم شماره ۷: صورتجلسه نهایی دفاع از پایان نامه دوره کارشناسی ارشد

با تأییدات خداوند متعال و با استعانت از حضرت ولی عصر (عج) ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد آقای امیر ابراهیمی مقدم به شماره دانشجویی ۹۲۰۱۵۰۴ رشته مهندسی مکانیک گرایش تبدیل انرژی تحت عنوان "تعیین میزان نشتی از خطوط توزیع گاز طبیعی مدفون با استفاده از شبیه سازی عددی" که در تاریخ ۱۳۹۵/۰۶/۱۴ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می گردد:

قبول (با درجه: <u>خوب</u> امتیاز <u>۱۷/۰۰</u>)	☐ مردود	☐ دفاع مجدد
نوع تحقیق: نظری ☐ عملی ☐		

۱- عالی (۳۰ - ۱۹)

۲- بسیار خوب (۱۸/۹۹ - ۱۸)

۳- خوب (۱۶ - ۱۷/۹۹)

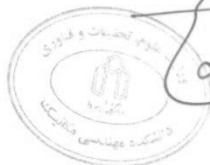
۴- قابل قبول (۱۴ - ۱۵/۹۹)

۵- نمره کمتر از ۱۴ غیر قابل قبول

عضو هیأت داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبه علمی	امضاء
۱- استاد راهنمای اول	دکتر محمود فرزانه گرد	استاد	
۲- استاد راهنمای دوم	-	-	-
۳- استاد مشاور	دکتر مهدی دیمی دشت بیاض	استادیار	
۴- نماینده شورای تحصیلات تکمیلی	دکتر محسن نظری	دانشیار	
۵- استاد ممتحن اول	دکتر علی عباس نژاد	استادیار	
۶- استاد ممتحن دوم	دکتر علی خالقی	استادیار	

نام و نام خانوادگی رئیس دانشکده: دکتر محمد محسن شاه مردان

تاریخ و امضاء و مهر دانشکده:



تقدیم بہ :

پدر و مادر گرامی و عزیزم

با یاد و نام خداوندی که نام او کلیه گنجینه‌هاست تمام در بخت است.

و با تشکر از اساتید ارجمندم:

جناب آقای دکتر محمود فرزانه‌گرد و جناب آقای دکتر مهدی دیمی دشت‌پیاض که خالصانه

در تمام مراحل انجام و تدوین این پژوهش مرا یاری نمودند.

و با تشکر از پدر و مادر بزرگوارم:

که در تمام مراحل زندگی و تحصیل همیشه پشتیبان و مشوقم بوده و پایه‌های مرا یاری می‌نمایند و کاری

بزرگوتاهی برایشان انجام ندادم.

این پایان‌نامه با حمایت و پشتیبانی شرکت گاز استان سمنان اجرا شده است. بدین وسیله

مراتب قدردانی خود را ابراز داشته و از همکاری‌های جناب آقای سعید رسنگار رئیس پژوهش

شرکت گاز استان سمنان و آقای سید کیوان دانشور ناظر پایان‌نامه حاضر در شرکت گاز استان

سمنان، تشکر می‌نمایم.

تعهدنامه

اینجانب امیر ابراهیمی مقدم دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی مکانیک گرایش تبدیل انرژی دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه تعیین میزان نشتی از خطوط توزیع گاز طبیعی مدفون با استفاده از شبیه سازی عددی تحت راهنمایی آقای دکتر محمود فرزانه گرد متعهد می شوم:

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهش های محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد و مقالات مستخرج با نام «دانشگاه صنعتی شاهرود» و یا «Shahrood University of Technology» به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه ، در مواردی که از موجود زنده (یا بافت های آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری، ضوابط و اصول اخلاقی انسانی رعایت شده است.

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه های رایانه ای، نرم افزارها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

* متن این صفحه نیز باید در ابتدای نسخه های تکثیر شده پایان نامه وجود داشته باشد

چکیده

هدف اصلی از انجام پژوهش حاضر، توسعه روابطی جهت محاسبه نرخ نشت گاز طبیعی از خطوط لوله روزمینی و مدفون واقع در شبکه توزیع گاز می‌باشد. با استفاده از شبیه‌سازی عددی به محاسبه میزان نشتی گاز طبیعی از یک سوراخ کوچک واقع بر قسمت فوقانی سطح جانبی لوله‌ای در خطوط توزیع گاز طبیعی روزمینی و مدفون در خاک پرداخته شده است. هندسه مورد بررسی توسط نرم‌افزار گمبیت طراحی و شبکه‌بندی شده و سپس حل عددی توسط نرم‌افزار فلوئنت انجام شده است. سیال موردنظر، تراکم‌پذیر با رفتار گاز ایده‌آل و جریان به‌صورت آشفته و پایا می‌باشد و خاک، به‌صورت یک ناحیه متخلخل در نظر گرفته شده است. نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهد که در حالت لوله روزمینی، در سوراخ‌های با قطر کوچک سرعت تخلیه به سرعت صوت رسیده و به‌اصطلاح خفگی در جریان رخ می‌دهد. همچنین نتایج حاصل از برازش داده‌ها نشان دهنده این است که دبی حجمی گاز نشت‌یافته، یک رابطه خطی با فشار، رابطه درجه دو با قطر سوراخ و رابطه درجه چهار با نسبت قطر سوراخ به قطر لوله دارد. برای لوله‌های زیرزمینی، در سوراخ‌های با قطر کوچک به نسبت سوراخ‌های بزرگ، عمق نفوذ گاز در داخل خاک بیش‌تر اما دبی حجمی گاز نشت‌یافته کم‌تر می‌باشد. در انتها دو رابطه هم‌بسته مفید برای محاسبه نشت گاز طبیعی از یک سوراخ کوچک ایجاد شده بر سطح خارجی لوله-های روزمینی و زیرزمینی ارائه شده است.

واژگان کلیدی: گاز طبیعی، خطوط لوله توزیع گاز، نشتی، سوراخ، لوله مدفون، شبیه‌سازی عددی، فلوئنت

لیست مقالات مستخرج از پایان نامه

الف - مقالات پذیرفته/چاپ شده در مجلات علمی معتبر داخلی و بین‌المللی

عنوان مقاله	نام مجله، سال انتشار	نویسندگان
Correlations for Estimating Natural Gas Leakage from Above-Ground and Buried Urban Distribution Pipelines	Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2016	¹ A. Ebrahimi-Moghadam ² M. Farzaneh-Gord ³ M. Deymi-Dashtebayaz
توسعه یک رابطه برای محاسبه نشت گاز طبیعی از خطوط توزیع گاز مدفون	نشریه پژوهشی مهندسی مکانیک-انجمن مهندسان مکانیک ایران (ISME)، ۱۳۹۵	^۱ امیر ابراهیمی مقدم ^۲ محمود فرزانه گرد ^۳ مهدی دیمی دشت بیاض
شبیه‌سازی دوبعدی نشت گاز طبیعی از خطوط توزیع گاز درون‌شهری	نشریه علمی-ترویجی مهندسی شیمی ایران، ۱۳۹۵	^۱ امیر ابراهیمی مقدم ^۲ محمود فرزانه گرد ^۳ مهدی دیمی دشت بیاض

ب - مقالات ارائه شده در کنفرانس‌های علمی معتبر داخلی

عنوان مقاله	مشخصات کنفرانس	نویسندگان
تحلیل عددی جریان نشتی گاز طبیعی از خطوط توزیع گاز روزمینی با نرم‌افزار فلوئنت	سومین کنفرانس ملی و اولین کنفرانس بین‌المللی پژوهش‌های کاربردی در مهندسی برق، مکانیک و مکاترونیک - تهران ۱۳۹۴ -	^۱ امیر ابراهیمی مقدم ^۲ محمود فرزانه گرد ^۳ مهدی دیمی دشت بیاض ^۴ سید کیوان دانشور ^۵ سعید رستگار

فهرست مطالب

فصل اول: دیباچه	۱
۱-۱- مقدمه	۲
۲-۱- خلاصه‌ای از مطالعات پیشین	۳
۳-۱- هدف پژوهش و فرآیند حل	۴
فصل دوم: انتقال و توزیع گاز طبیعی و حوادث مرتبط با آن	۷
۱-۲- مقدمه	۸
۲-۲- گاز طبیعی؛ ترکیبات و مصارف آن	۸
۳-۲- انتقال و توزیع گاز طبیعی	۱۱
۱-۳-۲- خطوط لوله اصلی گاز	۱۲
۲-۳-۲- ایستگاه تقلیل فشار گاز برون‌شهری	۱۳
۳-۳-۲- ایستگاه تقلیل فشار گاز درون‌شهری	۱۴
۴-۳-۲- شبکه توزیع گاز شهری	۱۵
۴-۲- گازهای گمشده (به حساب نیامده)	۱۶
۱-۴-۲- نشت گاز	۱۷

۱۷	۲-۴-۲- دستگاه‌های اندازه‌گیری
۱۸	۳-۴-۲- آسیب‌های شخص ثالث
۱۸	۴-۴-۲- سرقت گاز
۱۸	۵-۲- بررسی پدیده نشت گاز
۱۹	۱-۵-۲- پدیده خفگی
۲۱	۲-۵-۲- حالت‌های مختلف نشت گاز
۲۳	۳-۵-۲- بررسی نظری نشت گاز
۲۵	۴-۵-۲- علت‌های نشت گاز
۲۷	۵-۵-۲- روش‌های نشت‌یابی گاز
۳۱	فصل سوم: مروری بر پژوهش‌های گذشته
۳۲	۱-۳- تاریخچه
۳۹	۲-۳- رابطه هندبوک GPSA
۴۱	فصل چهارم: معادله‌های حاکم و شیوه حل
۴۲	۱-۴- کلیات
۴۲	۲-۴- فرضیات

- ۴۳-۳-۴ روابط حاکم ۴۳
- ۴۴-۱-۳-۴ روابط حاکم بر جریان درون لوله ۴۴
- ۴۶-۲-۳-۴ روابط حاکم بر جریان درون خاک ۴۶
- ۴۷-۴-۴ مفهوم جریان آشفته و معادله‌های مربوط به آن ۴۷
- ۴۸-۱-۴-۴ روش‌های مدل‌سازی آشفته‌گی ۴۸
- ۴۹-۱-۱-۴-۴ روابط حاکم بر لزجت گردابی ۴۹
- ۵۰-۲-۱-۴-۴ مدل‌های لزجت گردابی ۵۰
- ۵۲-۲-۴-۴ مدل‌سازی آشفته‌گی در پژوهش حاضر ۵۲
- ۵۴-۵-۴ هندسه مورد بررسی و شبکه‌بندی ۵۴
- ۵۷-۱-۵-۴ اعتبارسنجی شبکه ۵۷
- ۵۸-۶-۴ شرایط مرزی و اولیه ۵۸
- ۶۰-۷-۴ شبیه‌سازی خاک ۶۰
- ۶۲-۸-۴ فرآیند حل عددی ۶۲
- ۶۴-۹-۴ کمیت‌های مهم تأثیرگذار بر میزان نشت گاز طبیعی از خطوط توزیع گاز ۶۴
- ۶۵-۱-۹-۴ طول لوله، افت فشار و فشار نقطه ابتدایی ۶۵
- ۶۵-۲-۹-۴ قطر لوله و سوراخ ۶۵

۴-۹-۳- دمای خط لوله ۶۶

فصل پنجم: نتایج ۶۷

۵-۱- معترسازی حل ۶۸

۵-۲- بررسی کمیت‌های تأثیرگذار بر میزان نشت گاز طبیعی ۶۹

۵-۲-۱- بررسی تأثیر قطر لوله و قطر سوراخ بر میزان نشتی ۷۰

۵-۲-۲- بررسی تأثیر فشار نقطه ابتدایی بر میزان نشتی ۷۴

۵-۲-۳- بررسی توزیع کمیت‌ها در دامنه حل ۷۸

۵-۳- ارائه روابطی جهت محاسبه دبی حجمی نشتی ۹۲

فصل ششم: نتیجه‌گیری و پیشنهادات ۹۷

۶-۱- نتیجه‌گیری ۹۸

۶-۲- پیشنهادهایی برای پژوهش‌های آینده ۹۹

فهرست مراجع ۱۰۰

فهرست اشکال

- شکل ۱-۲- طرح‌واره شبکه توزیع گاز طبیعی [۸] ۱۲
- شکل ۲-۲- خطوط لوله اصلی انتقال گاز [۹] ۱۳
- شکل ۳-۲- بخشی از ایستگاه تقلیل فشار گاز برون‌شهری [۱۰] ۱۴
- شکل ۴-۲- الف- ایستگاه تقلیل فشار گاز درون‌شهری از نوع کابینتی [۱۱] ۱۵
- شکل ۴-۲- ب- ایستگاه تقلیل فشار گاز درون‌شهری از نوع مسطح [۱۱] ۱۵
- شکل ۵-۲- طرح‌واره انشعاب لوله گاز قبل از درب منازل به همراه تعدیل‌کننده فشار آن [۱۲] ۱۶
- شکل ۶-۲- طرح‌واره نشت گاز طبیعی [۱۴] ۱۹
- شکل ۷-۲- الف- پروفیل فشار در نازل همگرا [۱۷] ۲۱
- شکل ۷-۲- ب- پروفیل دبی جرمی در نازل همگرا [۱۷] ۲۱
- شکل ۸-۲- الف- طرح‌واره مدل سوراخ در نشت گاز ۲۲
- شکل ۸-۲- ب- طرح‌واره مدل لوله در نشت گاز ۲۲
- شکل ۹-۲- ایجاد خوردگی بر سطح لوله [۲۲] ۲۵
- شکل ۱۰-۲- الف- تأثیر سرعت جریان درون لوله بر میزان سایش داخلی [۲۳] ۲۶

- شکل ۲-۱۰-ب- تأثیر خم لوله بر میزان سایش داخلی [۲۳] ۲۶
- شکل ۲-۱۱- نشت‌یابی بر اساس صدای گاز [۲۵] ۲۷
- شکل ۲-۱۲- نشت‌یابی به‌وسیله کف صابون [۲۶] ۲۸
- شکل ۳-۱- مدل مورد بررسی در هندبوک GPSA جهت ارائه رابطه دبی حجمی تخلیه شده به محیط [۴۹] ۴۰
- شکل ۴-۱- مقایسه بین مدل‌های آشفته‌گی مختلف [۵۸] ۵۲
- شکل ۴-۲- محیط حل در حالت لوله روزمینی ۵۵
- شکل ۴-۳- محیط حل در حالت لوله مدفون در خاک ۵۵
- شکل ۴-۴ - شبکه‌بندی محیط حل در حالت لوله روزمینی ۵۶
- شکل ۴-۵- شبکه‌بندی محیط حل در حالت لوله مدفون در خاک ۵۷
- شکل ۵-۱- توزیع فشار مطلق پیرامون سوراخ برای لوله روزمینی با $D = 163/6 \text{ mm}$ و $d = 10 \text{ mm}$ و $p_1 = 5 \text{ bar}$ ۷۹
- شکل ۵-۲- توزیع فشار مطلق پیرامون سوراخ برای لوله روزمینی با $D = 163/6 \text{ mm}$ و $d = 30 \text{ mm}$ و $p_1 = 5 \text{ bar}$ ۷۹
- شکل ۵-۳- توزیع سرعت پیرامون سوراخ برای لوله روزمینی با $D = 163/6 \text{ mm}$ و $d = 10 \text{ mm}$ و $p_1 = 5 \text{ bar}$ ۸۰
- شکل ۵-۴- توزیع عدد ماخ پیرامون سوراخ برای لوله روزمینی با $D = 163/6 \text{ mm}$ و $d = 10 \text{ mm}$ و $p_1 = 5 \text{ bar}$ ۸۱

شکل ۵-۵- توزیع سرعت پیرامون سوراخ برای لوله روزمینی با $D = ۱۶۳/۶ \text{ mm}$ و $d = ۳۰ \text{ mm}$ و $p_1 = ۵ \text{ bar}$ ۸۱

شکل ۵-۶- بردارهای سرعت پیرامون سوراخ برای لوله روزمینی با $D = ۱۶۳/۶ \text{ mm}$ و $d = ۱۰ \text{ mm}$ و $p_1 = ۵ \text{ bar}$ ۸۲

شکل ۵-۷- بردارهای سرعت پیرامون سوراخ برای لوله روزمینی با $D = ۱۶۳/۶ \text{ mm}$ و $d = ۳۰ \text{ mm}$ و $p_1 = ۵ \text{ bar}$ ۸۲

شکل ۵-۸-الف- توزیع فشار مطلق در لوله مدفون و بزرگنمایی آن در پیرامون سوراخ در صفحه xy گذرنده از مرکز سوراخ ($D = ۱۶۳/۶ \text{ mm}$ ، $d = ۱۰ \text{ mm}$ و $p_1 = ۵ \text{ bar}$) ۸۳

شکل ۵-۸-ب- توزیع فشار مطلق در لوله مدفون و بزرگنمایی آن در پیرامون سوراخ در صفحه yz گذرنده از مرکز سوراخ ($D = ۱۶۳/۶ \text{ mm}$ ، $d = ۱۰ \text{ mm}$ و $p_1 = ۵ \text{ bar}$) ۸۴

شکل ۵-۹-الف- توزیع فشار مطلق در لوله مدفون و بزرگنمایی آن در پیرامون سوراخ در صفحه xy گذرنده از مرکز سوراخ ($D = ۱۶۳/۶ \text{ mm}$ ، $d = ۳۰ \text{ mm}$ و $p_1 = ۵ \text{ bar}$) ۸۵

شکل ۵-۹-ب- توزیع فشار مطلق در لوله مدفون و بزرگنمایی آن در پیرامون سوراخ در صفحه yz گذرنده از مرکز سوراخ ($D = ۱۶۳/۶ \text{ mm}$ ، $d = ۳۰ \text{ mm}$ و $p_1 = ۵ \text{ bar}$) ۸۵

شکل ۵-۱۰-الف- توزیع سرعت در لوله مدفون و بزرگنمایی آن در پیرامون سوراخ در صفحه xy گذرنده از مرکز سوراخ ($D = ۱۶۳/۶ \text{ mm}$ ، $d = ۱۰ \text{ mm}$ و $p_1 = ۵ \text{ bar}$) ۸۶

شکل ۵-۱۰-ب- توزیع سرعت در لوله مدفون و بزرگنمایی آن در پیرامون سوراخ در صفحه yz گذرنده از مرکز سوراخ ($D = ۱۶۳/۶ \text{ mm}$ ، $d = ۱۰ \text{ mm}$ و $p_1 = ۵ \text{ bar}$) ۸۷

شکل ۵-۱۱-الف- توزیع سرعت در لوله مدفون و بزرگنمایی آن در پیرامون سوراخ در صفحه xy گذرنده از مرکز سوراخ ($D = ۱۶۳/۶ \text{ mm}$ ، $d = ۳۰ \text{ mm}$ و $p_1 = ۵ \text{ bar}$) ۸۸

شکل ۵-۱۱-ب- توزیع سرعت در لوله مدفون و بزرگنمایی آن در پیرامون سوراخ در صفحه yz گذرنده از مرکز سوراخ ($D = ۱۶۳/۶ \text{ mm}$ ، $d = ۳۰ \text{ mm}$ و $p_1 = ۵ \text{ bar}$) ۸۸

شکل ۵-۱۲-الف- توزیع عدد ماخ در لوله مدفون و بزرگنمایی آن در پیرامون سوراخ در صفحه xy گذرنده از مرکز سوراخ ($D = ۱۶۳/۶ \text{ mm}$ ، $d = ۳۰ \text{ mm}$ و $p_1 = ۵ \text{ bar}$) ۸۹

شکل ۵-۱۲-ب- توزیع عدد ماخ در لوله مدفون و بزرگنمایی آن در پیرامون سوراخ در صفحه yz گذرنده از مرکز سوراخ ($D = 163/6 \text{ mm}$, $d = 30 \text{ mm}$ و $p_1 = 5 \text{ bar}$) ۸۹

شکل ۵-۱۳-الف- مسیر جریان خروجی از سوراخ برای لوله مدفون در نمای سه‌بعدی ($D = 163/6 \text{ mm}$, $d = 30 \text{ mm}$ و $p_1 = 3 \text{ bar}$) ۹۰

شکل ۵-۱۳-ب- مسیر جریان خروجی از سوراخ برای لوله مدفون در نمای صفحه xy ($D = 163/6 \text{ mm}$, $d = 30 \text{ mm}$ و $p_1 = 3 \text{ bar}$) ۹۱

شکل ۵-۱۳-پ- مسیر جریان خروجی از سوراخ برای لوله مدفون در نمای صفحه yz ($D = 163/6 \text{ mm}$, $d = 30 \text{ mm}$ و $p_1 = 3 \text{ bar}$) ۹۱

فهرست نمودارها

نمودار ۱-۳- دبی حجمی نشت یافته بر حسب قطر سوراخ در تحقیق منتیل و همکاران
[۳۸] ۳۴

نمودار ۲-۳- دبی حجمی نشت یافته بر حسب قطر سوراخ و فشار در تحقیق لو و همکاران
[۴۲] ۳۶

نمودار ۱-۴-الف- همگرایی دبی جرمی خروجی از سوراخ برای لوله روزمینی ۶۳

نمودار ۱-۴-ب- همگرایی دبی جرمی خروجی از سوراخ برای لوله مدفون ۶۴

نمودار ۱-۵- مقایسه دبی حجمی نشتی بین پژوهش حاضر (در حالت روزمینی)، پژوهش
منتیل و فرمول GPSA ۶۹

نمودار ۲-۵- تغییرات دبی حجمی نشتی بر حسب قطر سوراخ به ازای مقادیر مختلف
فشار ورودی (لوله روزمینی به قطر ۱۱۴/۶ میلی متر) ۷۱

نمودار ۳-۵- تغییرات دبی حجمی نشتی بر حسب قطر سوراخ به ازای مقادیر مختلف
فشار ورودی (لوله روزمینی به قطر ۱۶۳/۶ میلی متر) ۷۱

نمودار ۴-۵- تغییرات دبی حجمی نشتی بر حسب قطر سوراخ به ازای مقادیر مختلف
فشار ورودی (لوله روزمینی به قطر ۲۰۴/۶ میلی متر) ۷۲

نمودار ۵-۵- تغییرات دبی حجمی نشتی بر حسب قطر سوراخ به ازای مقادیر مختلف
فشار ورودی (لوله مدفون به قطر ۱۱۴/۶ میلی متر) ۷۳

نمودار ۶-۵- تغییرات دبی حجمی نشتی بر حسب قطر سوراخ به ازای مقادیر مختلف
فشار ورودی (لوله مدفون به قطر ۱۶۳/۶ میلی متر) ۷۳

نمودار ۷-۵- تغییرات دبی حجمی نشتی بر حسب قطر سوراخ به ازای مقادیر مختلف
فشار ورودی (لوله مدفون به قطر ۲۰۴/۶ میلی متر) ۷۴

- نمودار ۵-۸- تغییرات دبی حجمی نشتی بر حسب فشار ورودی به‌ازای مقادیر مختلف قطر سوراخ (لوله روزمینی به قطر ۱۱۴/۶ میلی‌متر) ۷۵
- نمودار ۵-۹- تغییرات دبی حجمی نشتی بر حسب فشار ورودی به‌ازای مقادیر مختلف قطر سوراخ (لوله روزمینی به قطر ۱۶۳/۶ میلی‌متر) ۷۵
- نمودار ۵-۱۰- تغییرات دبی حجمی نشتی بر حسب فشار ورودی به‌ازای مقادیر مختلف قطر سوراخ (لوله روزمینی به قطر ۲۰۴/۶ میلی‌متر) ۷۶
- نمودار ۵-۱۱- تغییرات دبی حجمی نشتی بر حسب فشار ورودی به‌ازای مقادیر مختلف قطر سوراخ (لوله مدفون به قطر ۱۱۴/۶ میلی‌متر) ۷۷
- نمودار ۵-۱۲- تغییرات دبی حجمی نشتی بر حسب فشار ورودی به‌ازای مقادیر مختلف قطر سوراخ (لوله مدفون به قطر ۱۶۳/۶ میلی‌متر) ۷۷
- نمودار ۵-۱۳- تغییرات دبی حجمی نشتی بر حسب فشار ورودی به‌ازای مقادیر مختلف قطر سوراخ (لوله مدفون به قطر ۲۰۴/۶ میلی‌متر) ۷۸
- نمودار ۵-۱۴- مقایسه بین نتایج حاصل از رابطه (۵-۱) و پژوهش منتیل و همکاران ... ۹۳
- نمودار ۵-۱۵- مقایسه بین نتایج حاصل از رابطه (۵-۱) و فرمول (برای $D=114/6 \text{ mm}$ و $p_1=4 \text{ bar}$) ۹۴
- نمودار ۵-۱۶- مقایسه بین نتایج حاصل از رابطه (۵-۲) و شبیه‌سازی عددی (برای $D=204/6 \text{ mm}$) ۹۵
- نمودار ۵-۱۷- مقایسه بین نتایج حاصل از رابطه (۵-۱) و شبیه‌سازی عددی (برای $D=204/6 \text{ mm}$) ۹۵

فهرست جداول

- جدول ۱-۱- علل حوادث به وجود آمده در خطوط گاز طبیعی [۱] ۲
- جدول ۱-۲- پیامدهای به وجود آمده ناشی از آسیب دیدن خطوط گاز طبیعی [۱] ۲
- جدول ۱-۲- درصد مولی اجزاء تشکیل دهنده گاز ارسالی به خطوط انتقال گاز پالایشگاه
خانگیان [۶] ۱۰
- جدول ۱-۴- مدل‌های آشفته‌گی مختلف جهت حل جریان [۵۸] ۴۸
- جدول ۲-۴- تأثیر تعداد مش بر دبی جرمی گاز نشت یافته (برای حالت روزمینی) ۵۸
- جدول ۳-۴- نوع شرایط مرزی مورد استفاده در پژوهش ۵۹
- جدول ۴-۴- خواص خاک مورد استفاده در پژوهش حاضر [۶۲] ۶۱

فهرست علائم و اختصارات

توضیح	علامت	ردیف	توضیح	علامت	ردیف
سرعت (m/s)	u	۲۷	علائم انگلیسی		
حجم مخصوص (m ³ /kg)	v	۲۸	سرعت صوت (m/s)	a	۱
جابجایی (m)	x	۲۹	ضریب تصحیح وزن مخصوص گاز	C_g	۲
ضریب تراکم پذیری گاز	Z	۳۰	ظرفیت حرارتی فشار ثابت (J/kgK)	c_p	۳
زیروندها			ظرفیت حرارتی حجم ثابت (J/kgK)	c_v	۴
ابتدای لوله	1	۳۱	نسبت فشار بحرانی	CPR	۵
محیط (اتمافر)	a	۳۲	قطر سوراخ (mm)	d	۶
پایه (مبنا)	b	۳۳	قطر سوراخ (in)	d_{orf}	۷
بحرانی	cr	۳۴	قطر لوله (mm)	D	۸
خروجی	e	۳۵	قطر لوله (in)	D_p	۹
مؤثر	eff	۳۶	انرژی کل (J)	E	۱۰
سیال عبوری از بین ذرات جامد محیط متخلخل	f	۳۷	ضریب اصطکاک	f	۱۱
جهات دلخواه	i, j, l	۳۸	ضریب تصحیح دما	F_{tf}	۱۲
ذرات جامد محیط متخلخل	s	۳۹	شتاب جاذبه (m/s ²)	g	۱۳
آشفتگی	t	۴۰	وزن مخصوص	G	۱۴
علائم یونانی			آنتالپی محسوس (J/kg)	h	۱۵
نفوذپذیری (m ² /s)	α	۴۱	فشار (in Hg)	H	۱۶
ثابت اوریفیس	$\beta = d/D$	۴۲	ضریب هدایت حرارتی (W/mK)	k	۱۷
تابع دلتای کرونیگر	δ	۴۳	طول لوله (m)	L	۱۸
نرخ اتلاف آشفتگی (J/kg)	ε	۴۴	عدد ماخ	Ma	۱۹
زبری مطلق لوله (m)	ϵ	۴۵	فشار (bar)	p	۲۰
نسبت ظرفیت حرارتی	$\gamma = c_p/c_v$	۴۶	عدد پرانتل	Pr	۲۱
میزان تخلخل	γ	۴۷	دبی حجمی نشتی (Nm ³ /hr)	Q	۲۲
انرژی جنبشی آشفتگی (J/kg)	k	۴۸	دبی حجمی نشتی (ft ³ /day)	Q_d	۲۳
ویسکوزیته (kg/ms)	μ	۴۹	ثابت گاز (J/kgK)	R	۲۴
چگالی (kg/m ³)	ρ	۵۰	عدد رینولدز	Re	۲۵
تانسور تنش	$\bar{t}$	۵۱	دما (K)	T	۲۶

فصل اول

دیباچه

۱-۱- مقدمه

کشور ایران با داشتن تقریباً ۱۵ درصد از منابع گاز طبیعی^۱ جهان، از نظر حجم منابع گاز طبیعی در سطح جهان مقام دوم را دارا می‌باشد. امروز با توجه به محدودیت منابع نفتی در مقایسه با گاز طبیعی، استفاده از گاز طبیعی برای مصارف سوختی و همچنین به‌عنوان 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].

هر جا مواد سمی یا قابل اشتعال وجود داشته باشد، آنجا احتمال حادثه و یا آزاد شدن ماده سمی است. حتی آزاد شدن مقدار کمی ماده سمی می‌تواند باعث آسیب به افراد و یا محیط اطراف شود [۱]. طبق آمار خطوط لوله گاز اروپا (EGIG)، علت حوادث به‌وجود آمده به شرح جدول (۱-۱) می‌باشد.

جدول ۱-۱- علل حوادث به‌وجود آمده در خطوط گاز طبیعی [۱]

درصد فراوانی	نوع حادثه
۳۵٪	برخورد اشیاء و تجهیزات به خطوط لوله
۳۰٪	خطای انسانی
۳۰٪	بهره‌برداری نادرست
۵٪	سایر عوامل

و پیامدهای به‌وجود آمده از حوادث طبق EGIG مطابق جدول (۲-۱) می‌باشد.

جدول ۲-۱- پیامدهای به‌وجود آمده ناشی از آسیب دیدن خطوط گاز طبیعی [۱]

درصد فراوانی	نوع پیامد
۵۰٪	انتشار گازهای سمی
۳۰٪	انفجار
۲۰٪	آتش

^۱ Natural Gas

سالانه میزان قابل توجهی گاز به دلایل متفاوتی هدر می‌رود. از جمله عواملی که باعث هدر رفتن و گم شدن گاز می‌شود می‌توان به خطاهای اندازه‌گیری (شامل خطای ناشی از اوپراتور و دستگاه‌های اندازه‌گیری)، نشت گاز و سرقت گاز نام برد [۲]. از بین عوامل مذکور، نشت گاز به دلیل این که بالاترین درصد را به خود اختصاص می‌دهد مهم‌ترین عامل در بین این عوامل می‌باشد. بر این اساس تحقیق - های زیادی تا کنون در زمینه شناسایی محل و محاسبه مقدار گاز نشت یافته از خطوط انتقال و توزیع گاز انجام شده است.

چنانچه مشخص است، در زمینه محاسبه نشت گاز مجموعه عواملی همچون تراکم‌پذیر بودن گاز، سرعت بالای گاز هنگام خروج از خط لوله و فشار بالا باعث پیچیدگی حل و سختی پیش‌بینی متغیر - های مختلف در میدان جریان می‌گردد. با توجه به موارد مذکور، حل چنین فرآیندی از یک سو نیازمند مدل‌های ترمودینامیکی کارآمد جهت پیش‌بینی خواص گاز تراکم‌پذیر در فشارهای بالاست و از سوی دیگر در گرو مدل‌های دینامیکی سیالات جهت پیش‌بینی سرعت و میدان حرکت می‌باشد. حل کامل این فرآیند از ترکیب این دو گروه عمده از مدل‌سازی که در طی زمان به یکدیگر مرتبط می‌باشد، حاصل خواهد شد.

مطالعات زیادی در زمینه محاسبه میزان نشت گاز صورت پذیرفته است که در سه گروه تجربی، تحلیلی و عددی تقسیم‌بندی می‌شوند. بیش‌تر مطالعات در حالت‌های تحلیلی و عددی صورت پذیرفته است.

۲-۱- خلاصه‌ای از مطالعات پیشین

اکثر تحقیقات صورت گرفته لوله آسیب‌دیده حاوی گاز را به‌صورت یک مخزن بزرگ در نظر گرفته‌اند. هم‌چنین مدل‌سازی لوله را به‌صورت شبه یک‌بعدی انجام داده‌اند که جریان گاز فقط به‌صورت محوری در مخزن جریان داشته و از سوراخی در انتهای آن به محیط بیرون تخلیه می‌شود. هم‌چنین در این

مدل‌ها فرض بر این است که تمام گاز داخل لوله از سوراخ خارج می‌شود؛ به عبارت دیگر در آن‌ها، طولی برای لوله بعد از مقطع آسیب‌دیده در نظر گرفته نشده است. در نظر نگرفتن طول لوله بعد از سوراخ، باعث دور شدن این مدل‌ها از واقعیت می‌گردد. به طوری که تأثیر این مورد در سوراخ‌های با قطر بزرگ بسیار محسوس‌تر می‌باشد؛ زیرا در صورتی که قطر سوراخ تقریباً بزرگ باشد، برگشت جریان از سمت پایین‌دست سوراخ بیش‌تر می‌گردد. علاوه بر این، تا کنون هیچ تحقیقی در زمینه محاسبه نشت گاز در خطوط لوله گاز مدفون در خاک انجام نشده است. در این میان، نیاز به رابطه‌ای بر حسب تمام متغیرهای مؤثر بر نشت گاز که بتوان با استفاده از آن نرخ نشت گاز را محاسبه نمود نیز احساس می‌گردد؛ زیرا در هیچ یک از تحقیق‌های گذشته رابطه‌ای بر حسب تمام متغیرهای مؤثر، ارائه نشده است.

بر اساس موارد یاد شده، در ابتدای این پژوهش به شبیه‌سازی عددی جریان گاز نشت‌یافته از خطوط توزیع گاز طبیعی در دو حالت لوله روزمینی و لوله مدفون در خاک پرداخته خواهد شد و هر یک از این دو حالت نیز به صورت دوبعدی و سه‌بعدی مدل‌سازی می‌شوند. در انتها نیز به ارائه یک رابطه هم‌بسته برای محاسبه نشت گاز در حالت‌های روزمینی و مدفون پرداخته خواهد شد.

۱-۳- هدف پژوهش و فرآیند حل

در مطالعه حاضر، هدف محاسبه میزان دبی گاز نشت‌یافته از سوراخی واقع بر یک لوله در خطوط توزیع گاز طبیعی و تعیین یک رابطه ساده برای محاسبه آن می‌باشد. با در اختیار داشتن فرمولی برای محاسبه دبی گاز نشت‌یافته، به راحتی می‌توان میزان هدر رفت گاز از یک سوراخ در شرایط مورد نظر را تعیین نمود. قابل توجه است که بررسی‌های انجام شده، برای دو حالت لوله‌های رو زمینی و لوله‌های مدفون صورت گرفته است.

در این پژوهش فرضیات عمده ذیل لحاظ شده است:

- جریان داخل لوله به صورت بی دررو^۲ در نظر گرفته شده است (از انتقال حرارت بین محیط و لوله صرف نظر شده است).

- با توجه به عدد رینولدز بحرانی^۳ در جریان داخل لوله، جریان سیال به صورت آشفته^۴ می باشد.

- گاز طبیعی، متان خالص فرض شده و رفتار گاز به صورت ایده آل در نظر گرفته شده است.

- جریان تراکم پذیر در نظر گرفته شده و فرآیند پایا فرض شده است.

به منظور محاسبه دبی گاز نشت یافته از سوراخ، برآورد خواص گاز در مقطع آسیب دیده ضروری می - نماید. برای دستیابی به این مهم معادلات حاکم بر مسئله به طور همزمان در یک دستگاه چهار معادله - چهار مجهول غیرخطی و با استفاده از روش های عددی تکرارشونده حل می شوند. برای دستیابی به هدف مذکور، معادلات ذیل باید به صورت همزمان در کل دامنه حل (در سراسر لوله) حل گردد:

(۱) معادله بقای جرم (معادله پیوستگی)؛

(۲) معادله بقای اندازه حرکت (معادله مومنتوم^۵)؛

(۳) معادله بقای انرژی (معادله انرژی)؛

(۴) معادله حالت گاز ایده آل.

جهت حل همزمان این چهار معادله از روش عددی حجم محدود توسط نرم افزار فلوئنت^۶ استفاده شده است. به این منظور دامنه حل به صورت گره های محاسباتی شبکه بندی شده (مش بندی^۷) و معادلات مذکور گسسته سازی شده و در تمامی این گره های محاسباتی حل شده است. جهت ارتباط بین فشار

^۲ Adiabatic

^۳ Critical Reynolds Number (Re_c)

^۴ Turbulent

^۵ Momentum

^۶ Fluent

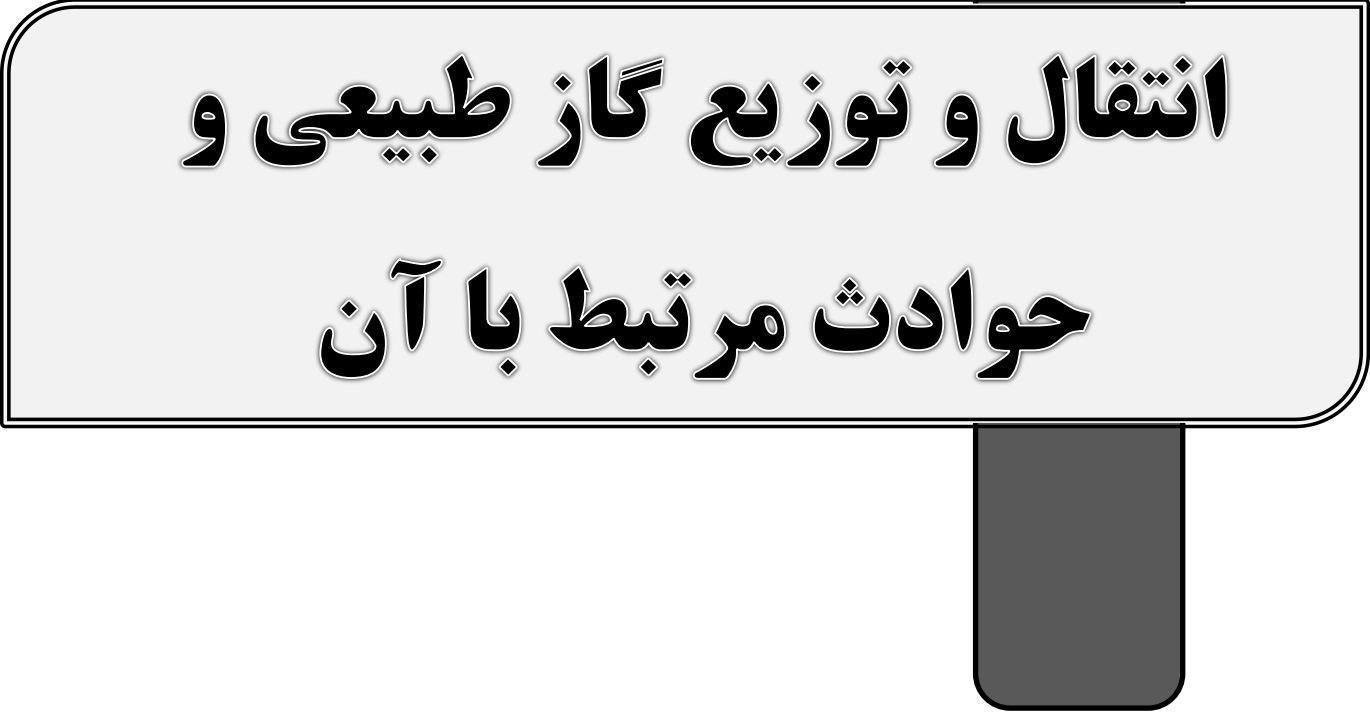
^۷ Mesh

و سرعت (کوپلینگ) از الگوریتم سیمپل^۸ استفاده شده است. جزئیات بیش‌تر و دقیق‌تر فرضیات و مراحل حل عددی در فصول بعدی به تفصیل شرح داده خواهد شد.

^۸ Simple



فصل دوم



انتقال و توزیع گاز طبیعی و حوادث مرتبط با آن

۲-۱- مقدمه

گاز طبیعی از ترکیب اجزاء مختلفی تشکیل شده و در زندگی امروز به عنوان یکی از مهم ترین سوخت ها نقش بسیار مهمی در زندگی بشر داشته و از زمانی که مورد استخراج قرار می گیرد تا زمانی که به دست مصرف کنندگان می رسد مسافت بسیار طولانی را پیموده و جهت قابل استفاده بودن توسط مصرف کنندگان شهری، عملیات مختلفی روی آن انجام می پذیرد. در این فصل ابتدا به معرفی اجزاء تشکیل دهنده گاز طبیعی و سپس به معرفی شرایط خطوط انتقال و توزیع گاز و عملیاتی که روی آن انجام می پذیرد پرداخته خواهد شد. در انتها نیز حوادثی که ممکن است در خطوط لوله گاز رخ دهد، تشریح خواهد شد.

۲-۲- گاز طبیعی؛ ترکیبات و مصارف آن

گاز طبیعی که معمولاً گاز گفته می شود نوعی سوخت فسیلی گازی شکل است. گاز طبیعی سوختی است که معمولاً اثرات زیان آور کمتری نسبت به سوخت های فسیلی دارد و جزء منابع تجدیدناپذیر می باشد [۳].

در حال حاضر ۲۰ درصد مصرف جهانی انرژی را گاز طبیعی تشکیل می دهد که با آهنگ ۲/۴ درصد در حال رشد است [۳].

برای شناسایی موقعیت گاز در بین دیگر منابع انرژی، ابتدا منابع انرژی را به صورت زیر دسته بندی می کنیم:

الف- منابع انرژی فسیلی (همچون انرژی نفت، گاز، زغال سنگ و ...)

ب- منابع انرژی غیر فسیلی (همچون انرژی خورشیدی، انرژی هسته ای، انرژی باد، انرژی آب و ...)

دسته‌بندی دیگری از نظر تجدیدپذیری و تجدیدنپذیری انرژی‌ها وجود دارد که انرژی‌های خورشید، باد و آب را در گروه انرژی‌های تجدیدپذیر و مابقی را در گروه انرژی‌های تجدیدنپذیر دسته‌بندی می‌کند [۴].

ذخایر نفت و گاز از مهم‌ترین منابع تأمین انرژی در جهان هستند. یکی از کشورهایی که سهم عمده‌ای از ذخایر نفت و گاز جهان را داراست، ایران است. ذخایر شناخته‌شده ایران در برابر کل ذخایر جهان رقم قابل‌توجهی است و از جانب دیگر ایران با حدود ۱۵٪ از منابع گاز جهان، پس از روسیه با حدود ۲۶٪ از کل منابع گازی دنیا، رتبه دوم جغرافیای گاز جهانی را دارد [۴].

میلیون‌ها سال قبل، گاز طبیعی و نفت خام در اثر تجزیه و فاسد شدن گیاهان و اجساد حیوانات در ته دریاها و اقیانوس‌های قدیمی به‌وجود آمد. بخش اعظم این مواد ارگانیک در هوا تجزیه (اکسیده) و وارد جو شد. ولی بخشی دیگر قبل از تجزیه، مدفون و یا وارد آب‌های راکد و فاقد اکسیژن شده و از اکسیده شدن آن‌ها جلوگیری به‌عمل آمد.

گاز طبیعی عمدتاً از متان (CH_4) - یعنی ساده‌ترین نوع هیدروکربن - و هیدروکربن‌های پیچیده‌تر و سنگین‌تری چون اتان (C_2H_6) پروپان (C_3H_8) و بوتان (C_4H_{10}) تشکیل شده است. همان‌طور که اشاره شد بخش عمده گاز طبیعی را متان تشکیل می‌دهد و پس از آن اتان سهم بیش‌تری را نسبت به سایر عناصر تشکیل‌دهنده دارا می‌باشد [۵]. حال آن‌که گازهای سنگین‌تر، اجزای بسیار کوچکی را در ترکیب گاز طبیعی شامل می‌شوند. همچنین ترکیباتی از قبیل N_2 ، CO_2 و H_2S نیز همراه گاز طبیعی یافت می‌شوند که درصد آن‌ها در مخازن مختلف و حتی در قسمت‌های مختلف از یک مخزن، با یکدیگر متفاوت است. همچنین آب نیز همیشه با گاز طبیعی استخراج‌شده از مخازن همراه است که در پالایشگاه‌ها در بخشی به‌نام واحد نم‌زدائی، آب و ترکیب‌های مزاحم که سبب پایین آوردن ارزش حرارتی گاز شده و همچنین مشکلاتی در انتقال و مصرف گاز به‌وجود می‌آورند، از گاز طبیعی تفکیک می‌شوند و پس از آن، گاز به خطوط انتقال و در نهایت به مصرف‌کنندگان تحویل می‌شود. در این

خصوص به عنوان مثال نمونه‌ای از گاز پالایشگاه‌های ایران همچون خانگیران شامل تقریباً ۹۸٪ متان می‌باشد. جدول (۱-۲) نشان دهنده درصد اجزاء تشکیل دهنده گاز طبیعی پالایشگاه خانگیران می‌باشد.

جدول ۱-۲- درصد مولی اجزاء تشکیل دهنده گاز ارسالی به خطوط انتقال گاز پالایشگاه گاز خانگیران [۶]

جزء	فرمول شیمیایی	درصد مولی (%)
متان	CH_4	۹۸/۶۴۰
اتان	C_2H_6	۰/۵۹۳
پروپان	C_3H_8	۰/۰۶۵
ایزو-بوتان	C_4H_{10}	۰/۰۱۵
n-بوتان	C_4H_{10}	۰/۰۳۴
ایزو-پنتان	C_5H_{12}	۰/۰۲۶
C_6 +	C_6 +	۰/۱۲۵
نیتروژن	N_2	۰/۴۲۸
کربن دی اکسید	CO_2	۰/۰۵۵
درصد کل = ۱۰۰٪		

عرضه و مصرف جهانی سوخت‌های فسیلی اعم از نفت، زغال سنگ و گاز طبیعی، همچنین روند کاهش ذخایر سوخت‌های زوال‌پذیر به دلیل استفاده دائمی از آن‌ها، همواره مورد بحث و نگرانی محافل انرژی در جهان بوده است. سوخت‌های فسیلی تجدیدپذیر نیستند، به عبارت دیگر آن‌ها را نمی‌توان مجدداً تولید نمود و اگر ذخایر هر کدام به اتمام برسد، جهانیان با مشکلات عدیده‌ای روبه‌رو خواهند شد. لذا همواره این نگرانی وجود داشته است که با کاهش یا اتمام ذخایر انرژی‌های فسیلی، آیندگان ما چه منابعی را برای تأمین انرژی خود در اختیار خواهند داشت؟ اولین ایده‌ای که به ذهن مصرف‌کنندگان سوخت‌های فسیلی می‌رسد، اصلاح الگوی مصرف است. به بیانی ما باید منابع انرژی و میزان موجود هر کدام، انواع انرژی و مصارف آن‌ها را به خوبی بشناسیم تا بتوانیم برنامه‌ریزی قابل قبولی برای

مصرف بهینه و صرفه‌جویی آن داشته باشیم. به عقیده کارشناسان مسائل انرژی، تقاضای گاز طبیعی در جهان در سال‌های آینده چند برابر خواهد شد و گاز طبیعی، انرژی برتر قرن خواهد بود. بدین لحاظ ابتدا و قبل از هر چیز باید روی مصارف گاز بحث شود تا بتوان برای سوخت‌های جایگزین احتمالی آن بحث نمود. امروزه در جهان، گاز طبیعی دارای مصارف متعدد در چهار گروه زیر است:

- مصرف خانگی گاز طبیعی؛
 - مصرف گاز طبیعی برای تأمین انرژی مورد نیاز صنایع بزرگ و نیروگاه‌های تولید انرژی الکتریکی؛
 - مصرف گاز طبیعی به‌عنوان سوخت اتومبیل؛
 - مصرف گاز طبیعی به‌عنوان خوراک واحدهای فرآیندی پتروشیمی.
- از چهار گروه بالا، سه گروه اول گاز را به‌عنوان سوخت و برای تأمین انرژی نیاز دارند و تنها گروه چهارم از گاز به‌عنوان خوراک و مواد اولیه استفاده می‌کند [۴].

۲-۳- انتقال و توزیع گاز طبیعی

گاز طبیعی به‌عنوان منبع پاک انرژی هر روزه مورد توجه بیشتری در سطح جهان قرار می‌گیرد و کشور ما به‌عنوان دومین کشور دارای منابع این نعمت الهی همواره تلاش بسیاری جهت استحصال و پالایش آن نموده است. خطوط لوله حاوی این گاز هم اکنون اکثر نقاط کشور را پوشش داده است و یکی از دغدغه‌های همیشگی، جلوگیری از هدر رفتن آن در طی این مسیر می‌باشد [۷].

گاز طبیعی از استخراج تا مصرف، مسافت‌های طولانی را می‌پیماید و فرآیندهای زیادی روی آن انجام می‌پذیرد. شکل (۱-۲) نشان دهنده طرح‌واره شبکه توزیع گاز طبیعی می‌باشد. در این بخش سعی

شده است اتفاقاتی را که در طول مسیر از خروجی پالایشگاه تا مصرف می‌افتد به اختصار تشریح شود [۴].



شکل ۲-۱- طرح‌واره شبکه توزیع گاز طبیعی [۸]

۲-۳-۱- خطوط لوله اصلی گاز

به‌دلیل وجود مسافت طولانی بین مراکز تولید و مصرف‌کنندگان گاز طبیعی، خطوط لوله اصلی گاز یا IGAT^۹ عهده‌دار انتقال می‌باشد که در شکل (۲-۲) نمونه‌ای از این خطوط مشاهده می‌شود. برای کاهش قطر لوله خطوط انتقال و سهولت انتقال، مجبور به افزایش فشار گاز هستیم. لذا در مسیر خطوط اصلی انتقال، ایستگاه‌های تقویت فشار گاز با کمپرسورهای عظیم گازی طراحی شده و این وظیفه به عهده این ایستگاه‌ها گذاشته می‌شود. در گذشته فشار خطوط اصلی انتقال حدود ۱۱۰۰ psi در نظر گرفته می‌شد اما امروزه و در طراحی خطوط جدید، فشار ۱۴۰۰ psi در نظر گرفته شده است [۴].

^۹ Iranian GAs Transfer



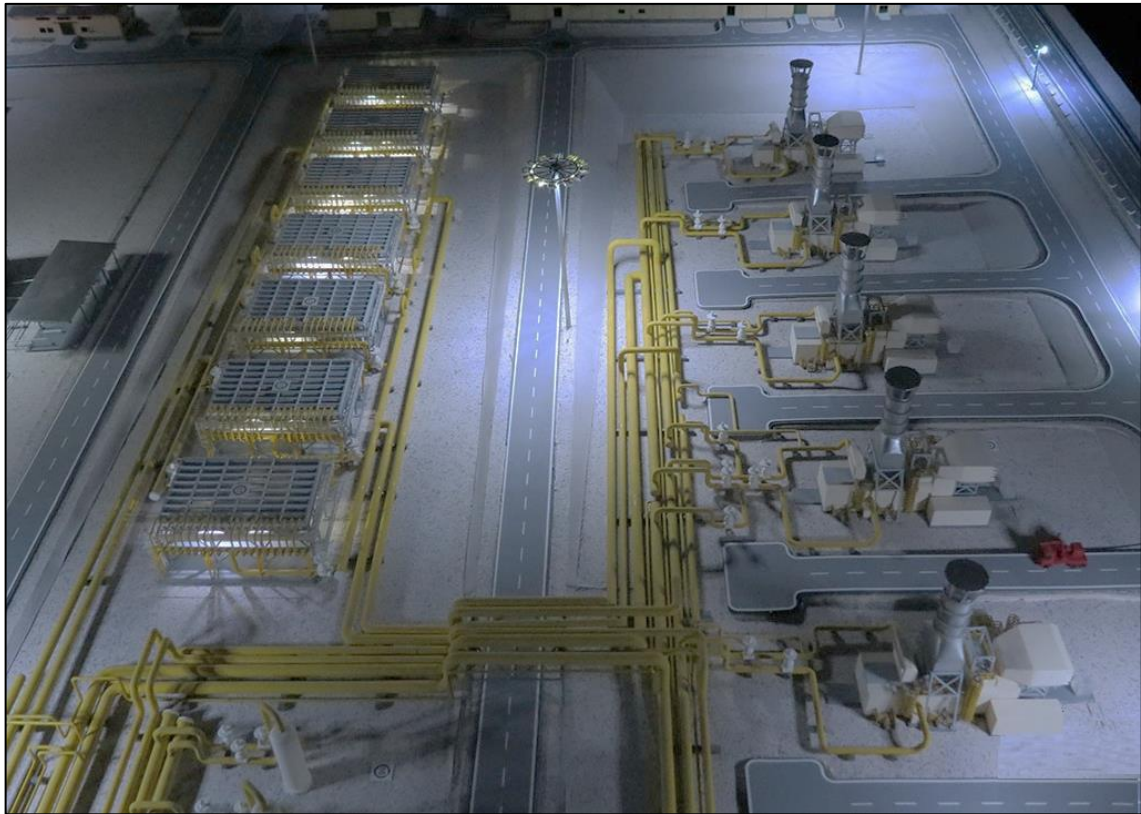
شکل ۲-۲- خطوط لوله اصلی انتقال گاز [۹]

۲-۳-۲- ایستگاه تقلیل فشار گاز برون‌شهری

وظیفه IGAT، تنها انتقال گاز از مراکز تولید به مراکز مصرف از جمله شهرها و حتی مبادی صدور گاز است. به بیان دیگر خطوط IGAT با فشار بسیار بالا نمی‌تواند عهده‌دار توزیع در شهرها و صنایع باشد. لذا به‌عنوان اولین اقدام بایستی فشار گاز شکسته شود. بدین منظور بعد از گرفتن انشعاب از IGAT، ایستگاه تقلیل فشار برون‌شهری (CGS)^{۱۰} در مبادی شهرها طراحی و ساخته می‌شود. CGS توسط تعدیل‌کننده فشار^{۱۱}، فشار خط را به حدود ۲۵۰ psi کاهش می‌دهد و ظرفیت CGS‌ها بستگی به جمعیت شهرها دارد [۴]. شکل (۳-۲) نشان دهنده قسمتی از یک ایستگاه تقلیل فشار گاز طبیعی برون‌شهری است.

¹⁰ City Gate Station

¹¹ Regulator

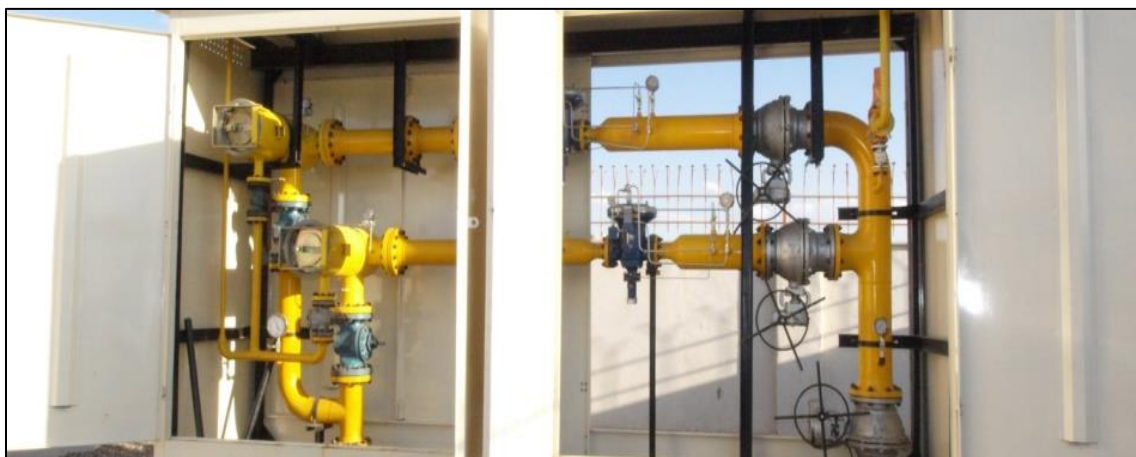


شکل ۲-۳- بخشی از ایستگاه تقلیل فشار گاز برون شهری [۱۰]

۲-۳-۳- ایستگاه تقلیل فشار گاز درون شهری

گاز حاصل از خروجی CGS با فشار ۲۵۰ psi وارد شبکه توزیع شهری می‌شود، اما این گاز به لحاظ فشار بالا هنوز مناسب مصرف شهری نیست. لذا بعد از توزیع گاز در کوچه و خیابان‌های شهر و قبل از گرفتن انشعابات محله‌ای بایستی یک‌بار دیگر فشار آن را کاهش داد. در اینجا ضرورت ایستگاه‌های تقلیل فشار درون شهری (TBS)^{۱۲} احساس می‌شود. در شکل‌های (۲-۴-الف) و (۲-۴-ب) به ترتیب تصویری از یک ایستگاه تقلیل فشار گاز طبیعی درون شهری کابینتی و مسطح نشان داده شده است که فشار ورودی این ایستگاه‌ها حدود ۲۵۰ psi و فشار خروجی آن حدود ۶۰ psi است [۴].

¹² Town Border Station



(الف)

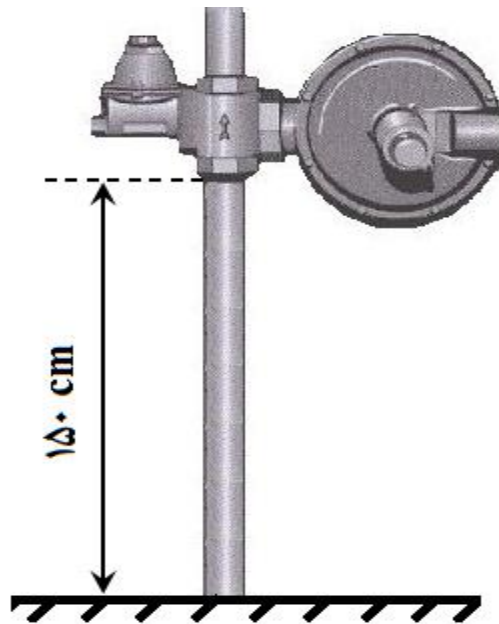


(ب)

شکل ۲-۴- ایستگاه تقلیل فشار گاز درون شهری از نوع، (الف کابینتی) مسطح [۱۱]

۲-۳-۴- شبکه توزیع گاز شهری

خروجی TBS ها با فشاری در حد ۶۰ psi در شبکه‌ای مجزا در محله‌ها توزیع و انشعاب مصرف‌کنندگان تا درب منازل به ارتفاعی حدود ۱۵۰ cm نصب می‌شود [۴]. طرح‌واره‌ای از تعدیل-کننده گازی که قبل از ورودی منازل نصب می‌شود، در شکل (۲-۵) رسم شده است.



شکل ۲-۵- طرح‌واره انشعاب لوله گاز قبل از درب منازل به همراه تعدیل‌کننده فشار آن [۱۲]

همان‌گونه که پیش‌تر نیز بیان شد، فشار این انشعابات حدود ۶۰ psi است اما نیاز مصرف‌کنندگان و دستگاه‌های گازسوز خانگی اغلب بر اساس ۰/۲۵ psi است. لذا بعد از انشعاب پشت درب منزل و قبل از کنتور گاز هر مصرف‌کننده، یک تعدیل‌کننده فشار نصب می‌شود. البته مصرف‌کنندگان گازی که در مجتمع‌های مسکونی و برج‌های آپارتمانی بلند زندگی می‌کنند و همچنین مصرف‌کننده‌های شهری غیرمسکونی (از جمله بیمارستان‌ها، ساختمان‌های عظیم دولتی و ...) به‌جای تعدیل‌کننده فشار مجبور هستند از ایستگاه‌های تقلیل فشار گاز اختصاصی که در فضایی آزاد و زیر سقف و در مجاورت این ساختمان‌ها تعبیه می‌شود استفاده نمایند [۴].

۲-۴- گازهای گمشده (به حساب نیامده)

سالانه مقدار زیادی گاز تحت عنوان گازهای گمشده یا گازهای محاسبه نشده (UAG)^{۱۳}، تلف می‌شود که همین موضوع یکی از مسائل اصلی در مدیریت و کنترل شبکه‌های انتقال و توزیع گاز طبیعی می‌-

¹³ UnAccounted Gas

باشد. طبق تعریف، UAG عبارت است از: اختلاف بین مقدار گاز واردشده به نقاط ورودی شبکه گاز رسانی (گاز خریداری شده) و گاز فروخته شده. UAG هم می تواند مقداری مثبت و هم مقداری منفی باشد. مثبت بودن مقدار UAG بیانگر این است که مقدار گاز خریداری شده از مقدار گاز فروخته شده بیش تر می باشد و در نقطه مقابل، مقدار منفی نشان دهنده این است که مقدار گاز فروخته شده از مقدار گاز خریداری شده بیش تر است. از نظر اقتصادی، UAG بیانگر از بین رفتن سرمایه ای است که بازیافتنی نیست؛ که این عبارت است از گازی که از یک تولیدکننده خریداری می شود اما همان اندازه به مصرف کننده فروخته نمی شود (UAG مثبت). در هر دو حالت، شناسایی عواملی که در UAG دخالت دارند و همچنین برطرف کردن این عوامل، امری بسیار مهم می باشد [۱۳]. در ادامه به بررسی برخی از عواملی که در گم شدن گازها دخالت دارند پرداخته خواهد شد.

۲-۴-۱- نشت گاز

طبق تعریف، هرگونه خروج ناخواسته گاز از خطوط لوله گاز و یا تأسیسات گازرسانی، نشت گاز نامیده می شود. نشت گاز می تواند در سطح (جداره) لوله ها، در محل های جوشکاری شده، فلنچ ها، محل اتصالات و شیرها اتفاق بیافتد. از علل ایجاد نشتی می توان به مونتاژ نامناسب تجهیزات و یا نگهداری نامناسب از آن ها، نقص در تجهیزات و اتصالات لوله ها، خوردگی و سایش اشاره کرد. حجم گاز هدررفته بر اثر نشت گاز از یک سوراخ بستگی به اندازه سوراخ و فشار سیستم بستگی دارد. هر چه اندازه سوراخ بزرگ تر باشد و یا فشار بیشتر باشد، حجم گاز هدررفته نیز بیشتر خواهد بود [۱۴].

۲-۴-۲- دستگاه های اندازه گیری

دستگاه هایی اندازه گیری برای اندازه گیری دقیق گاز طبیعی خشک و تمیز طراحی و در سیستم گاز- رسانی نصب گردیده اند. با این وجود گازی که در سیستم های ما در جریان است همیشه خشک یا

تمیز نیست. با گذشت زمان شرایط گاز می‌تواند بر دستگاه‌های اندازه‌گیری تأثیر بگذارد تا آن‌ها نتوانند به‌طور دقیق اندازه‌گیری کنند. دلایلی چون جمع شدن گرد و غبار و کثیفی بر روی چرخ‌دنده‌های قسمت دوار کنتورهای گاز دیافراگمی، شکسته شدن صفحه اوریفیس (Orifice Plate) و ... باعث کاهش دقت دستگاه‌های اندازه‌گیری می‌شوند. لذا دستگاه‌های اندازه‌گیری باید به‌صورت دوره‌ای در هنگام کارکرد آزموده شوند [۱۴].

۲-۴-۳- آسیب‌های شخص ثالث

اتفاقات ناگهانی و اجتناب‌ناپذیر در حین عملیات تعمیر و نگهداری، اعمال تنش‌های اضافی، برخورد اجسام خارجی همچون بیل مکانیکی با لوله از جمله حوادثی هستند که می‌توانند باعث آسیب دیدن خط لوله و رهایی گاز از لوله به محیط شوند [۱۴].

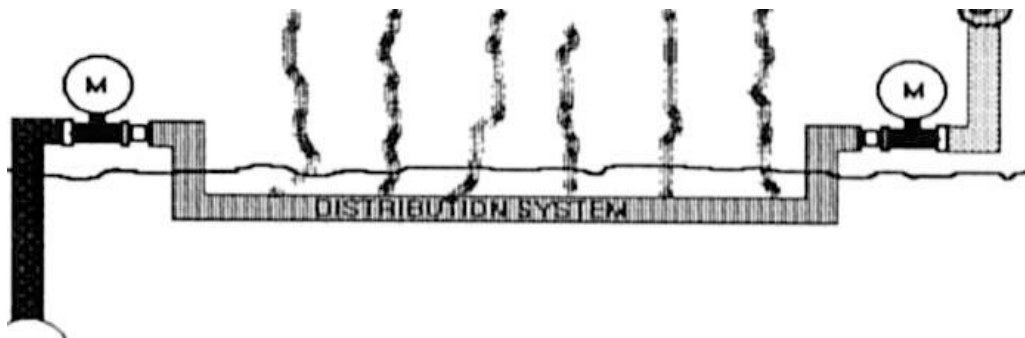
۲-۴-۴- سرقت گاز

سرقت گاز یکی از نگرانی‌های اقتصادی و ایمنی صنعت گاز در زمینه گازهای گمشده می‌باشد. این نگرانی فقط به‌علت از بین رفتن سرمایه مالی نمی‌باشد؛ بلکه شامل فعالیت‌های خطرناکی همچون گرفتن اتصالات و انشعابات غیرمجاز یا ایجاد تغییرات غیرقانونی در کنتورها است که برخی مصرف‌کنندگان انجام می‌دهند [۱۴].

۲-۵- بررسی پدیده نشت گاز

یکی از مهم‌ترین عوامل در میزان گازهای گمشده، نشتی گاز می‌باشد که حدود ۷۹ درصد کل گازهای گمشده را شامل می‌شود. این نشتی‌ها از کارهای عملیاتی عادی، امور تأسیساتی، توزیع‌کننده‌های

سیستم و غیره نتیجه می‌شود. به‌طور خلاصه در شبکه‌های گازرسانی، نشت گاز یا به‌صورت ناپایدار و تدریجی و کم رخ می‌دهد و یا به‌صورت غیرمترقبه با حجم زیاد اتفاق می‌افتد [۱۵]. شکل (۲-۶) نشان دهنده طرح‌واره نشت گاز طبیعی از یک لوله واقع در شبکه توزیع گاز می‌باشد.



شکل ۲-۶- طرح‌واره نشت گاز طبیعی [۱۴]

ضرورت و لزوم نظارت بر نشت گاز بر دو اصل زیر مبتنی است:

الف) به رغم تمام پیشگیری‌ها و پیش‌بینی‌هایی که برای جلوگیری از بروز نشت در سیستم مشخص شده و اعمال می‌گردد، باز هم امکان وقوع آن غیرممکن نیست و به عبارت دیگر همواره احتمال وقوع نشت وجود دارد.

ب) با توجه به آن‌که هم به لحاظ ایمنی و هم به دلایل اقتصادی نشت گاز پدیده مطلوبی نیست لذا برای حصول اطمینان از نبود نشتی و یا رفع نشتی‌های ایجادشده لازم است به‌طور جدی و مرتب سیستم‌های گازی تحت نظارت قرار گیرند [۱۶].

۲-۵-۱- پدیده خفگی^{۱۴}

یکی از مواردی که در بررسی نشت گاز باید به آن توجه نمود، پدیده خفگی است. پدیده خفگی پدیده‌ای است که در نازل‌ها هنگامی رخ می‌دهد که سرعت جریان در آن‌ها به سرعت صوت برسد

¹⁴ Choking

(عدد ماخ برابر یک شود). در این حالت فشار خروجی نازل با فرض ثابت بودن فشار ورودی، تغییر می‌یابد تا دبی جرمی افزایش یابد. هنگامی که به فشار بحرانی برسیم، سرعت در گلوگاه نازل به سرعت صوت^{۱۵} می‌رسد و از آن به بعد تغییر در فشار خروجی نازل تأثیری بر دبی عبوری از نازل نخواهد داشت و دبی جرمی حداکثر شده است. به چنین حالتی پدیده خفگی گفته می‌شود.

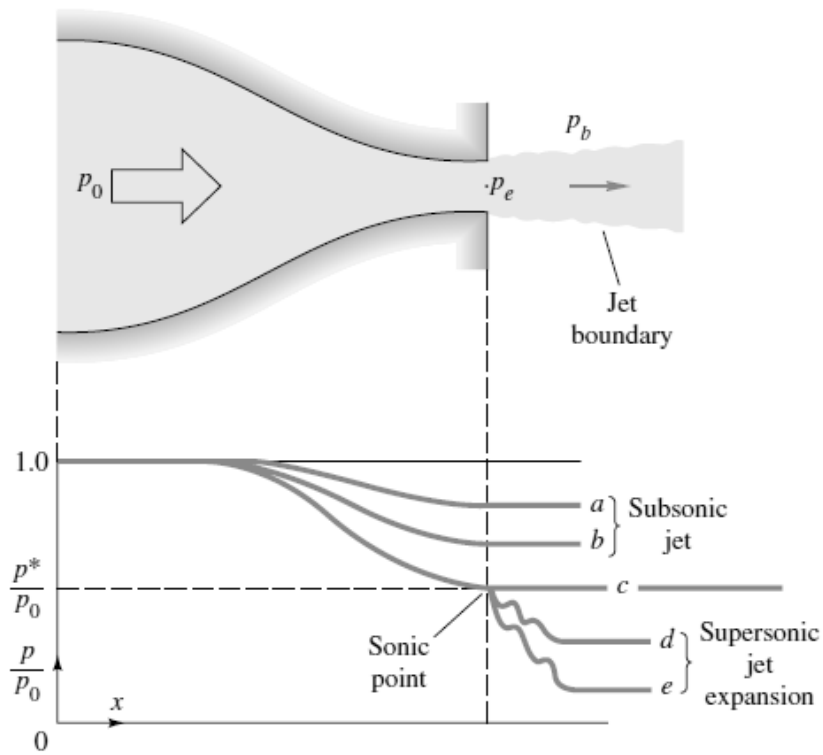
اگر نازلی مطابق با شکل (۷-۲) در نظر بگیریم، چنانچه در ابتدا p_b برابر p_0 باشد، هیچ جریانی وجود نخواهد داشت (دبی جرمی صفر خواهد بود). هنگامی که p_b کاهش یابد سیال جریان می‌یابد و فشار در ناحیه خروجی نازل (p_e)، برابر با پس‌فشار (فشار در ناحیه تخلیه) می‌شود و عدد ماخ در ناحیه خروجی کمتر از یک خواهد بود. در این ناحیه کاری (ناحیه a و b در شکل) کاهش p_b سبب افزایش نرخ جریان جرمی می‌شود. این وضعیت تا هنگامی ادامه می‌یابد که p_b تا مقدار فشار بحرانی متناظر با p_0 کاهش بیابد. معادله (۱-۲) میزان این فشار را برای گاز ایده‌آل با ظرفیت حرارتی γ بیان می‌کند.

$$p^* = p_0 \left(\frac{2}{\gamma + 1} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma - 1}} \quad (۱-۲)$$

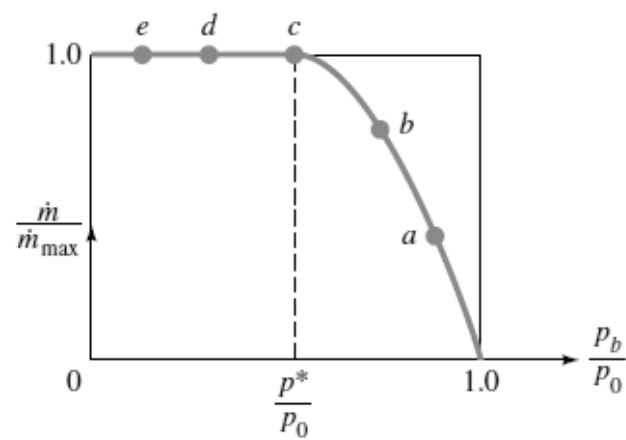
هنگامی که p_b به این مقدار برسد، عدد ماخ در مقطع خروجی برابر یک خواهد شد. بعد از رسیدن به این مقدار دیگر کاهش p_b هیچ تأثیری بر جریان داخل نازل ندارد؛ p_e برابر با p^* باقی می‌ماند، نرخ جریان جرمی ثابت مانده و عدد ماخ در مقطع خروجی برابر ۱ می‌ماند. هنگامی که در این حالت p_b کمتر از p_e باشد انبساط از p_e به p_b در خارج از نازل و از طریق امواج انبساطی پرانتل-مایر^{۱۶} صورت می‌گیرد.

¹⁵ Sound Speed

¹⁶ Prandtl-Meyer



(الف)



(ب)

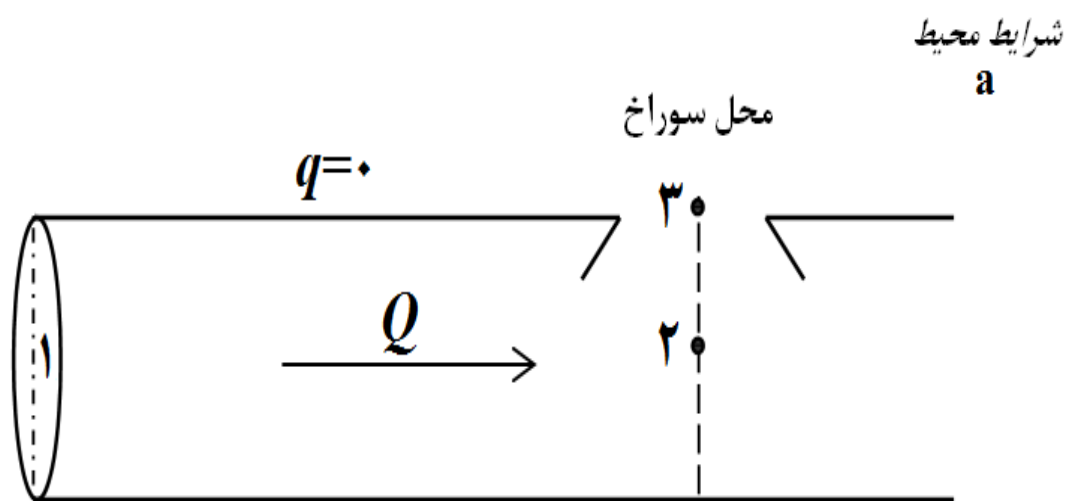
شکل ۲-۷- پروفیل؛ (الف) فشار، (ب) دبی جرمی، در نازل همگرا [۱۷]

۲-۵-۲- حالت‌های مختلف نشت گاز

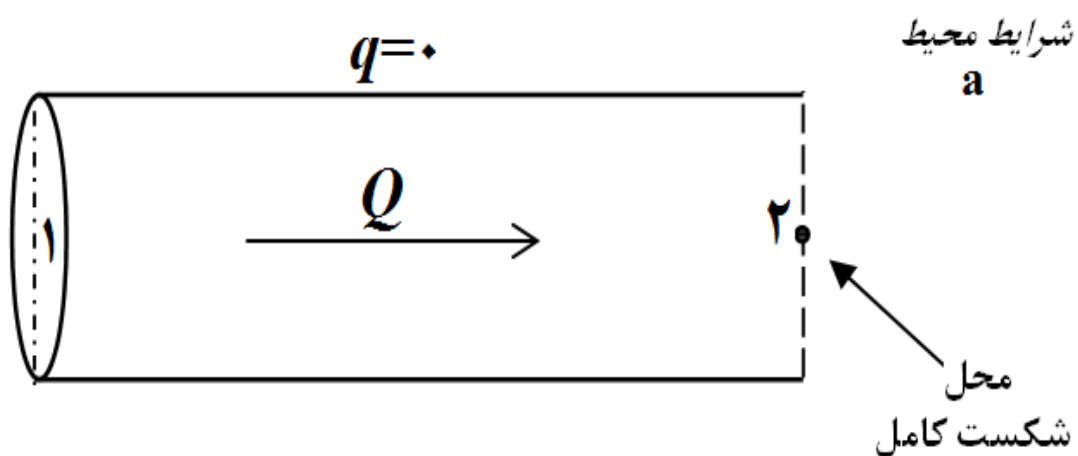
نشت گاز در خطوط لوله گاز، به دو صورت ممکن است رخ دهد. در حالت اول، سوراخی بر سطح جانبی لوله وجود دارد که جریان گاز از این سوراخ به محیط بیرون نشت پیدا می‌کند به‌طوری که قطر

سوراخ از قطر لوله کوچک‌تر می‌باشد. به عبارت دیگر این حالت برای شکستگی‌ها و سوراخ‌های جزئی کاربرد دارد و اصطلاحاً مدل «سوراخ» نامیده می‌شود.

اما حالت دوم، حالتی است که قطر سوراخ بزرگ‌تر یا مساوی قطر لوله می‌باشد. به عبارت دیگر حالت دوم برای مدل‌سازی شکست کامل لوله کاربرد دارد و اصطلاحاً مدل «لوله» نامیده می‌شود. شکل‌های (۸-۲-الف) و (۸-۲-ب)، به ترتیب نشان‌دهنده طرح‌واره مدل‌های سوراخ و لوله می‌باشند [۱۸].



(الف)



(ب)

شکل ۸-۲- طرح‌واره؛ (الف) مدل سوراخ، (ب) مدل لوله، در نشت گاز

۲-۵-۳- بررسی نظری نشت گاز

میزان جریان نشت یافته از سوراخ به نوع جریان خروجی بستگی دارد. بدین صورت که دو حالت ممکن است اتفاق بیافتد. حالت اول حالتی است که مقدار سرعت در هنگام خروج برابر سرعت صوت شده است که در این حالت عدد ماخ در مقطع خروجی برابر با یک بوده و این حالت به اصطلاح جریان خفه شده (چوک شده)^{۱۷} گفته می شود. در حالت دوم، مقدار سرعت در مقطع خروجی از سرعت صوت کمتر می باشد و به عبارت دیگر جریان خروجی از نوع جریان مادون صوت^{۱۸} می باشد. بر این اساس در مقطع خروجی، یا سرعت برابر صوت می شود و یا فشار برابر فشار اتمسفر خواهد بود. یعنی در حالت اول، یک جریان صوتی^{۱۹} با فشاری بیش تر از فشار اتمسفر در سوراخ خواهیم داشت و در حالت دوم یک جریان مادون صوت با فشاری معادل فشار اتمسفر در محل نشت جریان داریم.

ملاک تشخیص اینکه در مقطع خروجی چه نوع جریانی وجود خواهد داشت، بر اساس کمیتی به نام نسبت فشار بحرانی^{۲۰} می باشد که به صورت زیر تعریف می شود:

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

در این رابطه p_a بیانگر محیط بیرون و p_{cr} فشار بحرانی نقطه ۲ می باشد. بر اساس این رابطه، در صورتی که فشار نقطه ۲، بزرگ تر از فشار بحرانی در این نقطه باشد ($p_2 > p_{cr}$)، در لوله خفگی رخ داده و سرعت تخلیه به سرعت صوت می رسد؛ اما در نقطه مقابل، اگر $p_2 < p_{cr}$ باشد، یک جریان مادون صوت خواهیم داشت. به عبارت دیگر:

$$\begin{cases} p_2 > p_{cr} \Rightarrow \text{جریان صوتی} \\ p_2 < p_{cr} \Rightarrow \text{جریان مادون صوت} \end{cases}$$

¹⁷ Choked Flow

¹⁸ Subsonic

¹⁹ Sonic

²⁰ Critical Pressure Ratio (CPR)

طبق مطالعات و بررسی‌های انجام‌شده، در سوراخ‌های با قطر کوچک، جریان خروجی به‌صورت جریان صوتی می‌باشد و در این حالت مقدار دبی آن قدر افزایش پیدا می‌کند که به یک مقدار حداکثر می‌رسد و از آن به بعد ثابت شده و به یک حالت پایا می‌رسد [۱۹].

با افزایش میزان قطر سوراخ، بسته به شرایط مرزی موجود در نقطه ابتدای خط لوله، اگر قطر سوراخ از یک مقدار معین بیشتر شود، جریان از حالت صوتی به جریان مادون‌صوت تبدیل می‌گردد. به این مقدار قطر سوراخ که از آن به بعد جریان به‌صورت مادون‌صوت در می‌آید، قطر بحرانی^{۲۱} گفته می‌شود [۲۰].

بر اساس موارد ذکرشده می‌توان به این نتیجه رسید که میزان جریان تخلیه‌شده در یک خط لوله با شرایط مرزی معین در نقطه ابتدایی، به دو عامل بستگی دارد که عبارتند از:

۱- سیال عامل و فاز آن: با توجه به فاز ماده خروجی، مدل‌های مختلفی برای تخلیه وجود دارد. لذا فاز و نوع سیال خروجی از اهمیت زیادی برخوردار است. در این پژوهش جریان گازی مدنظر می‌باشد.

۲- سطح مقطع خروج جریان: مقدار ماده رها شده به قطر سوراخ ایجاد شده در سطح لوله - و در مسائل گذرا، علاوه بر آن به مدت زمان نشتی - بستگی دارد. دبی گاز خروجی از سوراخ رابطه مستقیم با اندازه نشتی - و مدت زمان نشتی - دارد. در این پژوهش مسأله نشت گاز به‌ازای مقادیر مختلفی از قطر لوله و قطر سوراخ بررسی می‌گردد.

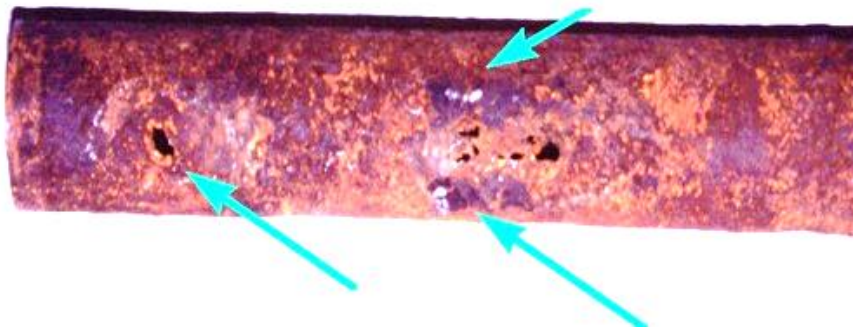
۳- فشار خط لوله: دبی حجمی گاز نشت‌یافته از سوراخ، با افزایش فشار نیز افزایش یافته و به‌عبارت دیگر یک رابطه مستقیم با فشار دارد. تأثیر فشار خط لوله در پژوهش حاضر، برای مقادیر مختلفی از فشار نقطه ابتدایی مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

²¹ Critical Diameter

۲-۵-۴- علت‌های نشت گاز

نشت گاز به علت‌های مختلف در لوله‌ها و تأسیسات گازی روی می‌دهد که مهم‌ترین آن‌ها عبارت است از:

الف- خوردگی: در اثر نقص در عایق کاری و یا اجرا نکردن حفاظت کاتدی صحیح سطوح خارجی لوله‌ها، امکان بروز خوردگی وجود دارد. گرچه خوردگی‌ها به طور عمده در سطوح خارجی لوله‌ها اتفاق می‌افتد ولی امکان بروز خوردگی داخلی چه در لوله‌ها و چه در ظروف عملیاتی به علت وجود ترکیبات خورنده‌ای مانند ئیدروژن سولفور و آب نیز وجود دارد. در شکل (۲-۹) خوردگی‌های ایجاد شده بر سطح خارجی یک لوله با علامت پیکان مشخص شده است [۲۱].



شکل ۲-۹- ایجاد خوردگی بر سطح لوله [۲۲]

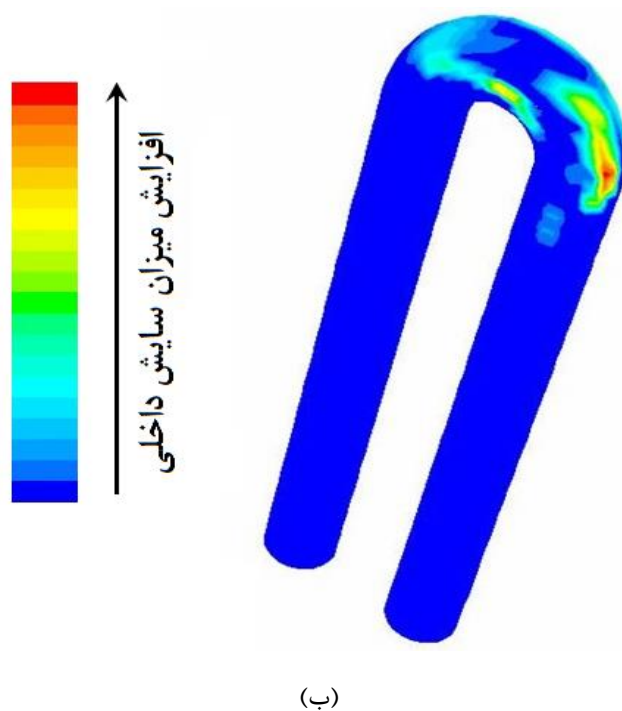
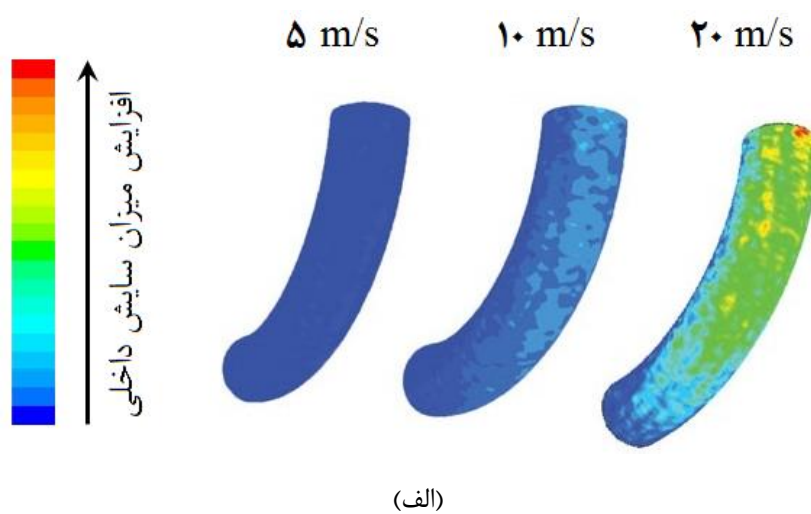
ب- سایش داخلی: در اثر وجود ناخالصی‌های همراه با گاز پدیده‌ی سایش اتفاق می‌افتد. به‌طور معمول در محل خم لوله‌ها و یا در شیرهای کاهش‌دهنده فشار به علت افزایش سرعت گاز، میزان سایش بیش‌تر است. شکل‌های (۲-۱۰-الف) و (۲-۱۰-ب) به ترتیب نشان‌دهنده تأثیر سرعت جریان داخل لوله و میزان خم لوله بر سایش داخلی می‌باشد.

ج- عوامل خارجی: مانند ضربه‌های مکانیکی، تماس با کابل برق و یا جریان‌ات القایی.

د- نقص در ساختار متالورژیکی لوله، اتصالات، شیرها و سایر متعلقات.

ه- نقص در اجرا و نصب شیرها و سایر اتصالات فلنجی و همچنین رزودای.

و- نقص در جوش لوله‌ها و اتصالات جوشی [۲۱].



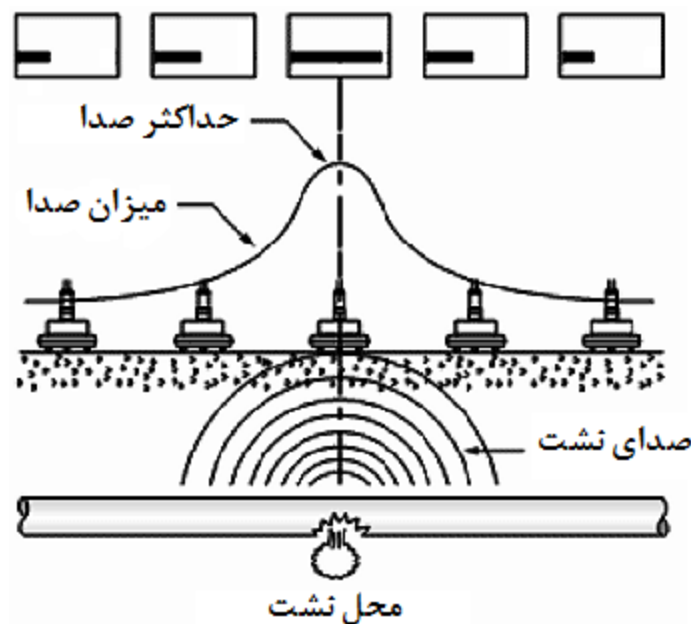
شکل ۲-۱۰- تأثیر؛ (الف) سرعت جریان درون لوله، (ب) خم لوله، بر میزان سایش داخلی [۲۳]

۲-۵-۵- روش‌های نشت‌یابی گاز

الف- نشت‌یابی در لوله‌ها و اتصالات (روکار)

برای پیش‌گیری از وقوع نشت‌های احتمالی در لوله و اتصالات روکار اقدامات زیر باید به‌طور مرتب انجام شود:

- ۱- مسیر خطوط لوله گاز به‌صورت عینی بازرسی و با توجه به بو و صدای گاز، تحت نظارت همیشگی قرار گیرد. شکل (۲-۱۱) نشان‌دهنده نشت‌یابی بر اساس صدای نشت می‌باشد که با نزدیک شدن به محل نشت، صدای نشت به سمت حداکثر مقدار خود می‌رود [۲۴].



شکل ۲-۱۱- نشت‌یابی بر اساس صدای گاز [۲۵]

- ۲- هر شش ماه یک‌بار تمام مسیرها از نزدیک بازرسی و سرجوش‌ها و اتصالات و شیرها به‌وسیله کف صابون نشت‌یابی شوند. در تأسیسات گازی نشت‌یابی به کمک دستگاه‌های گازسنج انجام می‌شود. در شکل (۲-۱۲)، نشت‌یابی توسط کف صابون به تصویر کشیده شده است.

۳- هر دو سال یکبار کلیه خطوط روکار گاز به وسیله بستن شیرها و جدا کردن قسمت‌های مختلف از یکدیگر از نظر افت فشار بازبینی شود [۲۴].



شکل ۲-۱۲- نشت یابی به وسیله کف صابون [۲۶]

ب- نشت یابی در لوله‌های مدفون

۱- بازدید مسیر لوله کشی: مسیر لوله‌های گاز باید به طور متناوب بازرسی شود و به محض احساس بوی گاز یا علائم نشان‌دهنده نشت گاز نسبت به بررسی دقیق‌تر آن اقدام کرده و در صورت اطمینان از وجود نشتی رفع شود.

۲- نشت یابی دوره‌ای: در این گونه نشت یابی که در خطوط لوله کوتاه مانند لوله‌های زیرزمینی گاز مربوط به کارخانه‌ها و مصرف‌کننده‌های تجاری توصیه می‌گردد، هر دو سال یکبار تمام شیرهای مصرف‌کننده بسته و فشار محبوس داخل شبکه به دقت اندازه‌گیری و برای مدت چند ساعت امتحان شود و در صورت وجود افت فشار برای تعیین محل نشتی اقدام شود.

۳- نشت‌یابی خطوط انتقال گاز: خطوط لوله سراسری انتقال گاز و شبکه‌های گازرسانی به‌وسیله دستگاه‌ها نشت‌یاب «اف.آی.دی» نشت‌یابی می‌شوند.

ج- دستگاه‌های نشت‌یاب «اف.آی.دی»

این دستگاه‌ها وسایل بسیار حساسی هستند که برای تشخیص نشت گاز در لوله‌های توکار استفاده می‌شود و انواع مختلفی از آن‌ها وجود دارند. «اف.آی.دی» نوعی نشت‌یاب مورد استفاده در شرکت ملی گاز است که بر اساس یونیزاسیون شعله ئیدروژن کار می‌کند؛ به این صورت که در داخل دستگاه یک محفظه احتراق با سوخت ئیدروژن وجود دارد که هوای لازم را از محیط اطراف جذب می‌کند و به محض ورود کم‌ترین مقادیر ئیدروکربن‌های گازی به داخل محفظه، یونیزاسیون محیط اطراف شعله تغییر می‌کند و نتیجه به صورت علائم بصری و صوتی دیده می‌شود.

میزان نشت گاز هر قدر جزئی باشد سرانجام به سطح زمین خواهد رسید؛ لذا این دستگاه‌ها با دقت بالایی که دارند قادر به تشخیص آن خواهند بود. دقت دستگاه‌های نشت‌یاب در حد جزء در میلیون «پی.پی.ام» بوده و از حساسیت بالایی برخوردارند، به‌طوری‌که هنگام استفاده در شهرها و یا محوطه‌های صنعتی باید قبل از آن برای میزان ئیدروکربن‌های موجود در هوای آن محیط، کالیبره شوند [۲۷].



فصل سوم

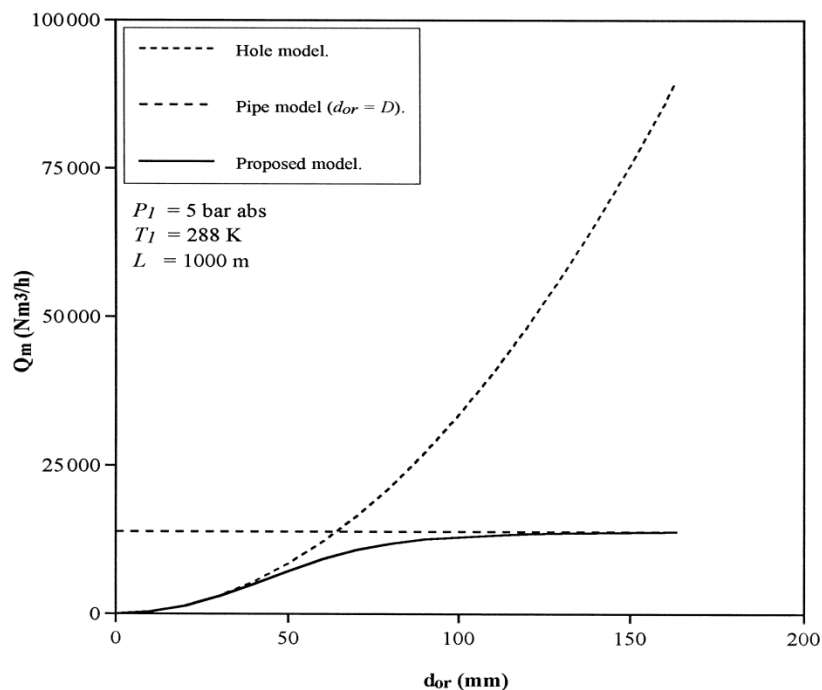
مروری بر پژوهش‌های گذشته

۳-۱- تاریخچه

از جمله مهم‌ترین المان‌های موجود در مسیر جریان گاز می‌توان به لوله‌های مستقیم اشاره نمود. سطح مقطع این لوله‌ها به جز در نقاطی که از تبدیل‌ها و اتصالات استفاده می‌شود، معمولاً ثابت بوده و جریان درون این لوله‌ها را می‌توان به صورت جریان مغشوش با اصطکاک در نظر گرفت. در سال ۱۹۷۹ تحقیقی توسط فینچام و گلدواتر [۲۸] انجام شد که در آن به مرور انواع روش‌های شبیه‌سازی جریان گاز درون لوله (همانند روش‌هایی چون تفاضل محدود، مشخصه‌ها و گلرکین) پرداخته شده است. همچنین لونسپیل [۲۹] در سال ۱۹۸۴ در کتاب خود با عنوان جریان مهندسی و تبادل حرارت، به بررسی و مدل‌سازی ریاضی جریان گاز درون لوله در حالت‌های تراکم‌پذیر و تراکم‌ناپذیر پرداخته است. تحقیق‌های انجام گرفته در زمینه‌های مرتبط با نشت گاز را می‌توان به دو دسته‌ی تعیین محل وقوع نشت (نشت‌یابی) و محاسبه میزان نشت تقسیم نمود. جهت تعیین محل نشت، روش‌های مختلفی توسط محققین توسعه داده شده است. تحقیق‌های صورت گرفته توسط بیورک و همکاران [۳۰]، باتریاس و همکاران [۳۱]، منگ و همکاران [۳۲]، موروی و همکاران [۳۳] و ژنگ و همکاران [۳۴] از جمله مهم‌ترین تحقیق‌هایی می‌باشند که در سال‌های اخیر در زمینه نشت‌یابی انجام شده است.

آسیب‌های وارد شده به لوله‌های گاز را می‌توان به دو نوع شکستگی جزئی و شکستگی کامل تقسیم نمود. از آنجایی که اکثر آسیب‌دیدگی‌های خطوط لوله گاز به صورت ایجاد سوراخی با قطر کوچک‌تر از قطر لوله می‌باشد، تحقیق‌های انجام گرفته در زمینه محاسبه نشت گاز نیز غالباً در حوزه شکستگی-های جزئی انجام گرفته‌اند. یکی از نخستین تحقیق‌های انجام گرفته در زمینه مدل‌سازی نشت گاز توسط وودوارد و مودان [۳۵] در سال ۱۹۹۱ به صورت یک مدل برای محاسبه نرخ تخلیه مایع و گاز از سوراخ در مجراهای فرآیند، توسعه داده شده که در آن به محاسبه کاهش فشار به عنوان تابعی از زمان پرداخته شده است. در تحقیقی دیگر، آلورونمی و ایماید [۳۶] در سال ۱۹۹۳ یک مدل ریاضی از مسئله شکستگی لوله ارائه داده‌اند. مدل مورد بررسی در تحقیق آن‌ها شامل جریان ناپایای نشتی از

انتهای شکسته‌ی یک لوله آسیب‌دیده با فرض جریان هم‌دما، می‌باشد. مقادیر نرخ جریان خروجی از شکستگی انتهای لوله در تحقیق آن‌ها، تقریباً ۱۸ درصد کمتر از نتایجی است که با فرض جریان بی‌دررو با همان شرایط به‌دست می‌آید؛ اما نتایج تحقیق آن‌ها تطابق خوبی با تحقیق صورت گرفته توسط لانگ و فَنلوپ [۳۷] در شرایط هم‌دما دارد. منتیل و همکارانش [۳۸] در تحقیقی به مدل‌سازی جریان نشت گاز از خط لوله‌ای با قطر ۱۶۳/۶ mm واقع در محدودهٔ سطوح فشار پایین و متوسط (فشار ۵ bar) پرداخته‌اند. آن‌ها جریان درون لوله را به‌صورت جریان بی‌دررو در نظر گرفته و مدل پیشنهادی خود را برای هر دو حالت جریان پایا و ناپایا بررسی کرده و گاز متان با معادله حالت گاز ایده‌آل (با c_p ثابت) را به‌عنوان گاز طبیعی فرض نموده‌اند. بررسی‌های آن‌ها نشان داد که فرض گاز ایده‌آل با c_p ثابت برای خطوط گاز با سطح فشار پایین و متوسط نتایج مناسبی را در بر خواهد داشت. مدل ارائه‌شده توسط منتیل و همکاران [۳۸] با وجود اینکه یکی از مدل‌های پایه در جریان نشت گاز طبیعی می‌باشد اما نواقصی نیز دارد که هنوز نیز برخی از این نواقص در اکثر مدل‌های ارائه‌شده برای جریان نشت گاز به چشم می‌خورد. مهم‌ترین این نواقص در نظر نگرفتن طول لوله بعد از سوراخ می‌باشد. به عبارت دیگر در مدل ارائه‌شده توسط منتیل و همکاران [۳۸]، لوله به‌صورت یک مخزن بسته در نظر گرفته شده است که سوراخی در انتهای مخزن وجود دارد و جریان گاز از این سوراخ به اتمسفر تخلیه می‌شود. در نظر نگرفتن طول لوله بعد از سوراخ باعث در نظر گرفته نشدن جریان برگشتی از سمت پایین‌دست لوله به سمت سوراخ و به‌دنبال آن دور شدن نتایج از حالت واقعی می‌گردد. نقص دیگر مدل آن‌ها مدل‌سازی لوله به‌صورت یک‌بعدی می‌باشد که در واقع فقط جریان محوری در آن مدل در نظر گرفته شده است. نمودار (۳-۱) نشان‌دهندهٔ نمودار مربوط به دبی حجمی نرمال شدهٔ نشتی برحسب قطر سوراخ بوده و مربوط به تحقیق منتیل و همکاران [۳۸] می‌باشد. همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود، در محدودهٔ سوراخ‌های با قطر کوچک، دبی حجمی گاز نشت‌یافته تقریباً به‌صورت یک تابع درجه دوم با قطر سوراخ تغییر پیدا می‌کند.



نمودار ۳-۱- دبی حجمی نشت یافته بر حسب قطر سوراخ در تحقیق منتیل و همکاران [۳۸]

یوها و همکارانش [۳۹] در سال ۲۰۰۳ مدل و فرضیه‌های پیشنهادی توسط منتیل [۳۸] را با اعمال ضریب تراکم‌پذیری ثابت ۰/۹ در معادله حالت برای فشارهای بالا بررسی کرده‌اند. آن‌ها علاوه بر نتایج به‌دست آمده در تحقیق منتیل و همکاران [۳۸]، به این نتیجه دست یافتند که نشت گاز از سوراخ‌های کوچک را می‌توان به‌صورت یک فرآیند حالت پایدار در نظر گرفت.

جو و اهن [۴۰] در سال ۲۰۰۳ یک مدل ساده صریح برای محاسبه گاز نشت یافته از سوراخ در یک لوله حاوی گاز خطرناک پرفشار با استفاده از معادله حالت گاز ایده‌آل ارائه کرده و با مدل تجربی به-دست آمده از حادثه واقعی، آن را اعتبارسنجی کرده‌اند. آن‌ها سوراخ را در یک لوله بسته که توسط یک نازل همگرا به یک مخزن متصل می‌باشد در نظر گرفته و جریان را در نازل و سوراخ به‌صورت جریان آیزنتروپیک و جریان در لوله را به‌صورت بی‌دررو 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 نشت یافته از سوراخ، از تغییرات انرژی جنبشی گاز در معادله مومنوم صرف‌نظر کرده و به این نتیجه

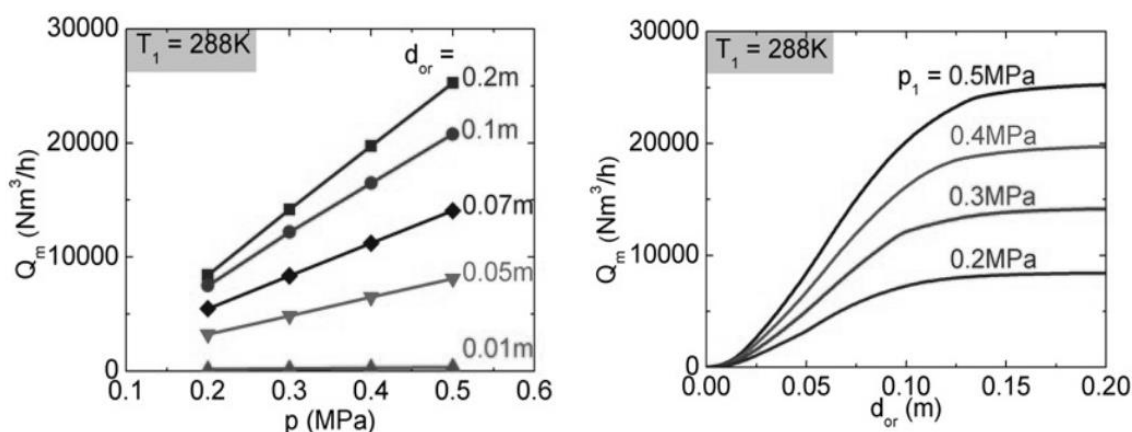
رسیده‌اند که مدل ساده صریح پیشنهادی، از مدل تئوری نرخ تخلیه گاز را کمی بیش‌تر نشان می‌دهد که برای نسبت گرمای ویژه $1/42$ ، مقدار این انحراف از ۰ تا ۲۰٪ متغیر می‌باشد.

لائو و همکارانش [۴۱] در سال ۲۰۰۶ با تغییراتی در مدل پیشنهادی جو و همکارش [۴۰]، یک فرمول ساده صریح جدید با خطای کم‌تر برای محاسبه نرخ خروج گاز از سوراخ ارائه کرده‌اند. آن‌ها در معادله مومنتوم داخل لوله با جای‌گذاری سرعت از معادله بقاء جرم و حذف جملات لگاریتمی در کمیت‌های بی‌بعد، فرمولی جدید برای تعیین نرخ خروجی گاز ارائه کرده و به این نتیجه رسیده‌اند که انحراف مدل از مدل تئوری برای نسبت گرمای ویژه برابر $1/42$ کمتر از ۷٪ می‌باشد.

در سال ۲۰۱۴، لو و همکارانش [۴۲] 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. به دلیل اینکه فشار سیستم مورد بررسی آن‌ها در محدوده فشار متوسط بود، آن‌ها از فرض گاز ایده‌آل برای سیال مدل خود استفاده کردند و جریان درون لوله را به‌صورت آدیاباتیک و جریان در سوراخ را به‌صورت آیزنتروپیک در نظر گرفته‌اند. همچنین شبیه‌سازی جریان را به‌صورت یک‌بعدی انجام داده‌اند. نتایج تحقیق آن‌ها در حالت جریان پایا، به‌دلیل مشابه بودن مدل با تحقیق منتیل و همکارانش [۳۸]، تقریباً مشابه می‌باشد و نمودار (۲-۳) نشان‌دهنده نتایج پژوهش آن‌ها در حالت پایا است؛ اما در حالت ناپایا به بررسی نحوه تغییرات فشار، دما و چگالی با گذشت زمان پرداخته‌اند. در فشار ورودی 0.3 Mpa و قطر سوراخ 0.5 m ، نتیجه کار آن‌ها بدین صورت است که در ابتدا جریان به‌صورت جریان صوتی می‌باشد و با گذشت زمان، تقریباً پس از گذشت 20 sec ، جریان از حالت صوتی به جریان مادون صوت تبدیل می‌گردد. با بررسی تغییرات فشار بر حسب زمان، مشاهده می‌شود که در لحظه آغاز، فشار نقطه ۳ (محل سوراخ)^{۲۲} بزرگ‌تر از فشار اتمسفر است و با گذشت زمان فشار کاهش می‌یابد تا در نهایت فشار نقطه ۳ به فشار اتمسفر می‌رسد که از این لحظه به بعد، جریان

هندسه و شماره نقاط اشاره شده در این قسمت از متن، مطابق با شکل (۲-۸-الف) می‌باشد^{۲۲}

از حالت صوتی به مادون صوت تبدیل می‌شود. زمانی که فشار نقطه ۲ هم به فشار اتمسفر می‌رسد، هنوز فشار نقطه ۱ بزرگ‌تر از فشار اتمسفر است و در این لحظه، هنوز تخلیه جریان وجود دارد. همچنین در لحظه اتمام جریان نشتی، دمای نقاط ۱، ۲ و ۳ تقریباً به یک مقدار یکسان می‌رسند.



نمودار ۳-۲- دبی حجمی نشت یافته بر حسب قطر سوراخ و فشار در تحقیق لو و همکاران [۴۲]

برخی از محققین برای گسسته‌سازی معادله‌های حاکم بر مسئله از روش مشخصه‌ها استفاده نموده‌اند. اوکه و همکارانش [۴۳] در تحقیقی به محاسبه جریان نشتی گاز از یک لوله در یک فرآیند گذرا پرداخته‌اند و مدل خود را برای گاز طبیعی واقعی و به‌صورت مخلوطی از چندین هیدروکربن ارائه داده و از روش عددی مشخصه‌ها برای حل معادله‌های حاکم بر مسئله استفاده کرده‌اند و جریان در محل سوراخ را به‌صورت جریان آیزنتروپیک در نظر گرفته‌اند. آن‌ها با بررسی‌هایی که انجام داده‌اند به این نتیجه رسیده بودند که مدل‌سازی لوله به‌صورت یک مخزن بسته که جریان گاز از انتهای آن به بیرون تخلیه می‌شود، به‌دلیل ایجاد جریان‌های برگشتی در قسمت پایین‌دست لوله، مدل مناسبی نمی‌باشد. لذا در مدل‌سازی خود، لوله را به‌صورت یک مخزن در نظر نگرفته و طول لوله بعد از سوراخ را نیز در نظر گرفته و لوله را به سه بخش (قسمت بالادست لوله، قسمت پایین‌دست لوله و یک حجم کنترل پیرامون سوراخ و در عرض قطر لوله؛ که این حجم کنترل مشترک بین قسمت‌های بالادست و پایین‌دست می‌باشد) تقسیم‌بندی کرده‌اند. علاوه بر این، شبیه‌سازی جریان درون لوله در قسمت‌های بالا-

دست و پایین دست را به صورت یک بعدی محوری انجام داده و شبیه سازی جریان در قسمت حجم کنترل پیرامون سوراخ را به صورت دوبعدی در دستگاه مختصات کارتزین انجام داده اند و در حجم کنترل علاوه بر جریان محوری، جریان شعاعی را نیز در نظر گرفته اند. همچنین مدل خود را در دو حالت باز بودن و بسته بودن انتهای لوله بررسی نموده اند.

در سال ۱۳۸۸، تحقیقی در زمینه شبیه سازی نشتی خطوط لوله گاز با استفاده از روش مشخصه ها توسط نورالهی و همکاران [۴۴] انجام شد. در این تحقیق از روش یک بعدی مشخصه ها برای شبیه سازی جریان گاز تراکم پذیر 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 آنتروپی صفر برای مجموع نقاط آن باشد ولی ممکن است در هر نقطه تغییر آنتروپی داشته باشیم) بوده و لذا حل معادله بقاء جرم و بقاء مومنتوم به اضافه فرض آنتروپی ثابت در کل جریان، برای شبیه سازی جریان کافی می باشند. مدل مورد بررسی در این تحقیق لوله ای به طول ۲۵۰ متر می باشد که در وسط آن سوراخی با سطح مقطع ۱ سانتی متر مربع وجود دارد و فشار و سرعت اولیه به ترتیب ۳۰ بار و ۴۱ فوت بر ثانیه می باشد. همچنین شرط مرزی بالادست، مخزن با فشار ثابت در نظر گرفته شده است و شرط مرزی پایین دست در سه حالت مختلف، انتهای باز، شیر با ضریب افت فشار ثابت، انتهای بسته بررسی شده است.

کوستووسکی و اسگرک [۴۵] در سال ۲۰۱۲ به بررسی جریان در لوله های آسیب دیده شبکه توزیع گاز طبیعی پرداخته اند و در مدل پیشنهادی خود، لوله آسیب دیده را به صورت باز بودن دیوار کناری در نظر گرفته اند. آن ها جریان داخل لوله را در حالت های جریان دما ثابت و جریان بی دررو شبیه سازی کرده و هر یک از این دو حالت را برای گاز کامل و گاز واقعی بررسی کرده و اثر ضریب تخلیه را در دبی خروجی گاز مورد تحلیل قرار داده اند. آن ها برای به دست آوردن خواص گاز واقعی، از معادله حالت بندیکت-وب-روبین استفاده کرده و به این نتیجه رسیده اند که در فشار متوسط، تفاوت بین

مدل گاز کامل و گاز واقعی قابل صرف نظر کردن می باشد و می توان برای سادگی در این حالت از مدل گاز کامل استفاده کرد ولی برای فشارهای بالا این تقریب صحیح نمی باشد.

نوری بروجردی در سال [۴۶] ۲۰۱۱ به شبیه سازی عددی جریان تراکم پذیر، گذرا و بی دررو گاز در یک خط لوله طولانی با انتهای بسته و با استفاده از روش تفاضل محدود پرداخته است. یک سوراخ در فاصله ای معین از نقطه خط لوله ایجاد شده و باعث می شود که خط لوله به دو بخش فشار بالا و فشار پایین تقسیم شود. او برای گسسته سازی معادله های حاکم بر مسئله، برای مشتقات شامل چگالی از روش تفاضل مرکزی، برای جملات سرعت تفاضل مرکزی و برای مشتقات شامل عبارات های دما از روش تفاضل پیش رو مرتبه اول استفاده کرده است. نتایج تحقیق وی بیانگر این است که در لحظات اولیه پس از شکستگی، افت فشار قابل توجهی در محل سوراخ رخ می دهد و جریان به صورت جریان چوک شده خواهد بود و سرعت خروجی به سرعت صوت می رسد. با گذشت زمان این روند کاهش فشار ادامه پیدا کرده و جریان خروجی به یک جریان مادون صوت می رسد و در نهایت فشار سوراخ به فشار محیط رسیده و از این لحظه به بعد دیگر افت فشاری نخواهیم داشت و جریان به صورت یک جریان پایا در می آید و دبی جریان نشت یافته نیز به یک مقدار ثابت می رسد.

مولودی و ابوالفضلی اصفهانی [۴۷] به ارائه روابط بی بعد برای محاسبه دبی جرمی گاز نشت یافته در حالت های شکست جزئی و کامل، پرداخته اند. آن ها مدل پیشنهادی خود را برای خطوط لوله گاز با سطوح فشار مختلف بررسی نموده اند و معادلات حاکم بر مسئله را به صورت عددی و با استفاده از روش مک کورمک^{۲۳} حل نموده اند. معادله پیشنهادی آن ها برای شکست جزئی، فقط بر حسب کمیت نسبت قطر بی بعد شده (نسبت قطر سوراخ به قطر لوله) بوده و به صورت یک تابع چند جمله ای درجه دوم می باشد. برای شکست کامل نیز یک رابطه هم بسته^{۲۴} دو متغیره، بر حسب کمیت های نسبت قطر

²³ MacCormack's method

²⁴ Correlation

بی‌بعد شده و همچنین عبارت اصطکاک بی‌بعد شده (نسبت حاصل‌ضرب ضریب اصطکاک در طول لوله به قطر لوله)، توسعه داده‌اند.

در حالت لوله مدفون در خاک، تحقیق‌های انجام‌گرفته بسیار محدود می‌باشد. در این زمینه، یک مدل دوبعدی نشت یک سیال از یک منبع گرما (لوله) به درون یک ناحیه متخلخل بر اساس روش المان محدود، توسط نیتیاراسو [۴۸] ارائه شده است. در این تحقیق، آب به‌عنوان سیال عبوری از بین ذرات جامد ناحیه متخلخل در نظر گرفته شده است و لوله به‌عنوان یک منبع گرم و محیط متخلخل اطراف منبع، سرد فرض شده است. برای ساده‌سازی مدل مورد بررسی، یک سوراخ دیگر به‌صورت قرینه نسبت به محور عمودی (محور y) فرض شده است و لذا مدل‌سازی به‌صورت تقارن نسبت به محور عمودی انجام شده است. نتایج این تحقیق نشان‌دهنده آن است که علاوه بر عدد بی‌بعد ریلی^{۲۵}، اندازه سوراخ تأثیر قابل‌توجهی در انتقال جرم از سوراخ دارد.

۳-۲- رابطه هندبوک GPSA

در هندبوک مهندسی گاز (GPSA) [۴۹] رابطه‌ای برای تخمین دبی حجمی هدر رفت گاز از یک اوریفیس (سوراخ) که در انتهای یک لوله عمودی نصب شده، ارائه گردیده است. شکل (۳-۱) نشان‌دهنده طرح‌واره دستگاه اندازه‌گیری دبی خروجی از اوریفیس می‌باشد. همان‌طور که مشاهده می‌شود بر انتهای یک لوله عمودی و بین دو عدد فلنج، یک اوریفیس نصب شده است که میزان گاز تخلیه‌شده به محیط اطراف را توسط یک دستگاه نگارنده قابل حمل اندازه‌گیری می‌کند.

تنها رابطه‌ای که تا کنون کمیت‌های مختلف را برای محاسبه هدررفت گاز از یک سوراخ شامل می‌شود، رابطه (۳-۱) می‌باشد که بر اساس آزمایش‌های مربوط به این دستگاه می‌باشد. بر اساس شرایطی که در این آزمایش حاکم است (نظیر عمودی بودن لوله و استفاده از اوریفیس به جای سوراخ در انتهای

²⁵ Rayleigh number

لوله)، نتایج حاصل از رابطه (۱-۳) به صورت تقریبی بوده و فقط جهت تخمین حدود هدررفت می تواند مورد استفاده قرار گیرد. لذا نتایج آن از دقت مناسبی برخوردار نبوده و با حادثه واقعی نشت گاز اختلاف دارد.

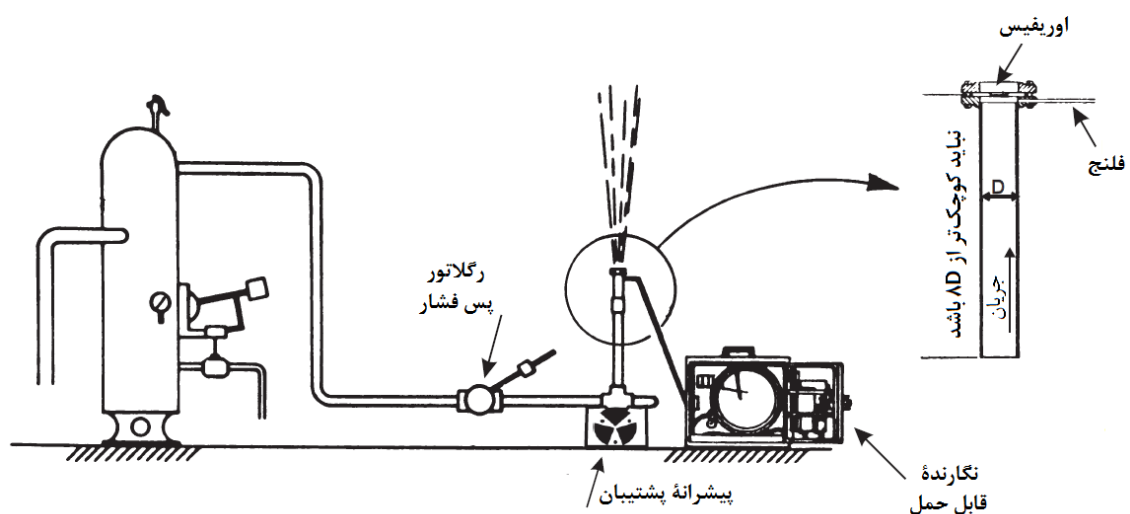
$$Q_d = 16330 \cdot (d_{orf}^3) (1 + \beta^4) \sqrt{H(29/32 + 0.3H)} \cdot F_{tf} \cdot C_g \quad (1-3)$$

$$\beta = \frac{d_{orf}}{D_p} \quad (2-3)$$

$$F_{tf} = \sqrt{\frac{520}{460 + T_f}} \quad (3-3)$$

$$C_g = \sqrt{\frac{0.6}{G}} \quad (4-3)$$

در این روابط، $Q_d(\frac{ft^3}{day})$ دبی حجمی گاز نشت یافته، $d_{orf}(in)$ قطر سوراخ، $D_p(in)$ قطر لوله، β ثابت اوریفیس، $H(inHg)$ فشار ابتدای خط، F_{tf} ضریب تصحیح دما، C_g ضریب تصحیح وزن مخصوص گاز، $T_f(^{\circ}F)$ دمای متوسط گاز و G وزن مخصوص گاز می باشد.



شکل ۳-۱- مدل مورد بررسی در هندبوک GPSA جهت ارائه رابطه دبی حجمی گاز تخلیه شده به محیط [۴۹]

فصل چهارم

معادله‌های حاکم و

شیوه حل

۴-۱- کلیات

حرکت سیال و خصوصیات آن در مکانیک سیالات توسط معادلات دیفرانسیل با مشتقات جزئی بیان می‌شود. بسیاری از قوانین طبیعت (در فیزیک، شیمی و نجوم) طبیعی‌ترین بیان خود را در زبان معادلات دیفرانسیل می‌یابند. در هر روند طبیعی، متغیرهای مربوطه و میزان تغییرات آن‌ها به وسیله اصول علمی اساسی حاکم بر آن روند به یکدیگر مربوط می‌شوند.

لذا برای بررسی هر نوع حرکتی ابتدا باید معادلات حاکم بر آن را مشخص کرد. معادله کلی حاکم بر حرکت، قانون دوم نیوتن می‌باشد. حالت خاص این معادله برای حرکت سیال، معادلات ناویر-استوکس^{۲۶} نام دارد.

۴-۲- فرضیات

جهت بررسی و مدل‌سازی نشت گاز طبیعی در مطالعه حاضر از فرضیات قابل قبول و نزدیک به فرآیند واقعی به شرح ذیل استفاده شده است.

۱- گاز طبیعی به صورت متان خالص فرض شده است. همان‌طور که در فصل دوم نیز اشاره شد، همواره درصد متان در گاز طبیعی بسیار بالا می‌باشد به‌طوری‌که تقریباً بیش از ۹۰٪ وزنی گاز طبیعی را تشکیل می‌دهد؛ بنابراین معادل نمودن خواص گاز طبیعی با متان قابل قبول بوده و دور از واقعیت نمی‌باشد.

۲- خواص گاز متان با فرض گاز ایده‌آل محاسبه شده است. در این خصوص باید توجه نمود که خط لوله مورد بررسی در این پژوهش در خطوط توزیع گاز درون شهری با سطح فشار پایین و متوسط واقع بوده و قطر لوله نسبتاً کوچک می‌باشد و به همین جهت فرض گاز ایده‌آل (c_p ثابت) جوابگوی شرایط

²⁶ Navier-Stokes

کاری مسئله می‌باشد [۳۸، ۳۹ و ۴۲]؛ بنابراین این مسئله متفاوت از لوله‌های طویل با سطح فشار بالا [۳۶ و ۵۰] می‌باشد که در آن‌ها افت فشار در طول خط لوله قابل توجه است. برای اعتباربخشی به مطالب یادشده، بر اساس نتایج پژوهش انجام‌گرفته توسط جابری [۵۱]، اختلاف بین فرض گاز ایده‌آل نسبت به گاز واقعی در مسئله محاسبه نشت گاز در خطوط انتقال بین‌شهری (سطح فشار بالا)، خطوط شبکه تغذیه (سطح فشار متوسط) و خطوط توزیع گاز درون‌شهری (سطح فشار پایین) به ترتیب معادل ۹/۲۶٪، ۱/۶۷٪ و ۰/۴۱٪ می‌باشد.

۳- فرآیند پایا بوده و جریان تراکم‌پذیر است. به دلیل کوچک بودن قطر سوراخ در برابر قطر لوله، نشت گاز تأثیر چندانی بر فشار گاز درون لوله ندارد و نرخ نشت گاز را نسبت به زمان می‌توان ثابت فرض نمود [۳۹].

۴- به دلیل بالا بودن سرعت گاز و بر اساس عدد رینولدز، جریان به صورت آشفته می‌باشد.

۵- در حالت لوله مدفون، خاک به صورت یک ناحیه متخلخل در نظر گرفته شده است.

۴-۳- روابط حاکم

جهت یافتن توزیع سرعت، فشار و دما در محیط حل، از اصول دینامیک سیالات محاسباتی استفاده شده است. بر این اساس فضای درون لوله و فضای درون خاک به تعداد زیادی گره محاسباتی تقسیم شده و به این ترتیب مدل شبکه‌بندی شده مورد نیاز حاصل گردیده است. به دلیل تراکم‌پذیر بودن سیال مورد نظر، جهت دستیابی به هدف مذکور یک دستگاه معادلات به‌طور هم‌زمان در کل دامنه محاسباتی حل می‌گردد که این معادلات عبارتند از:

(۱) معادله پیوستگی (پایستگی جرم)؛

(۲) معادله مومنتوم (پایستگی اندازه حرکت)؛

(۳) معادله انرژی (پایستگی انرژی)؛

(۴) معادله حالت.

لازم به ذکر است که نتیجه حل این دستگاه معادلات، دستیابی به مجهول‌های زیر می‌باشد:

(۱) سرعت؛

(۲) دما؛

(۳) فشار؛

(۴) چگالی.

۴-۳-۱- روابط حاکم بر جریان درون لوله

در این پژوهش هندسه موردنظر در دو حالت دوبعدی و سه‌بعدی بررسی خواهد شد. معادله مومنتوم در حالت دوبعدی به دو معادله (معادله مومنتوم در جهت‌های محوری و شعاعی) و در حالت سه‌بعدی به سه معادله (معادله مومنتوم در جهت‌های محوری، شعاعی و محیطی) تقسیم می‌شود. لذا در حالت دوبعدی یک دستگاه پنج معادله-پنج مجهول و در حالت سه‌بعدی یک دستگاه شش معادله-شش مجهول خواهیم داشت.

از اصل بقای جرم، معادله پیوستگی به صورت معادله (۴-۱) به دست می‌آید [۵۲ و ۵۳]:

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \quad (۴-۱)$$

معادله (۴-۲) بیانگر فرم کلی معادله مومنتوم می‌باشد [۵۲ و ۵۳].

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \bar{\tau}_{ij}}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j}(-\rho \overline{u'_i u'_j}) + \rho g_i \quad (۴-۲)$$

در این معادله، عبارت $(-\rho \overline{u_i u_j})$ به عنوان مؤلفه‌های تنش رینولدز شناخته می‌شود که با استفاده از یکی از مدل‌های آشفتگی که در ادامه اشاره خواهد شد، به دست می‌آید.

با اعمال قانون پایستگی انرژی، معادله انرژی به صورت زیر به دست می‌آید [۵۲ و ۵۳]:

$$\frac{\partial}{\partial x_i} [u_i (\rho E + p)] = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[k_{eff} \frac{\partial T}{\partial x_j} + u_i (\bar{\tau}_{ij})_{eff} \right] \quad (۳-۴)$$

$$(\bar{\tau}_{ij})_{eff} = \mu_{eff} \left[\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_l}{\partial x_l} \right] \quad (۴-۴)$$

$$E = h - \frac{p}{\rho} + \frac{u^2}{2} \quad (۵-۴)$$

در معادله (۳-۴)، k_{eff} ضریب هدایت حرارتی موثر بوده و مقدار این ضریب برابر $k_{eff} = k + k_t$ می‌باشد؛ که در آن k_t ضریب هدایت حرارتی آشفته می‌باشد و بر اساس مدل آشفتگی استفاده شده، تعیین می‌گردد و در مدل‌های آشفتگی کا-اپسیلون^{۲۷} به صورت $k_t = \frac{c_p \mu_t}{Pr_t}$ تعریف می‌شود که در آن Pr_t معرف عدد بی بعد پرانتل آشفته^{۲۸} می‌باشد. دو جمله سمت راست معادله (۳-۴) نیز به ترتیب معرف انتقال انرژی به دلیل انتقال حرارت هدایتی و اتلاف گرانی^{۲۹} سیال می‌باشد.

در معادله (۵-۴)، h آنتالپی محسوس می‌باشد که با استفاده از رابطه (۶-۴) قابل محاسبه می‌باشد [۵۴].

$$h_j = c_p (T - T_{ref}) = c_p (T - 298.15) \quad (۶-۴)$$

همان‌طور که اشاره شد، به دلیل تراکم‌پذیر بودن سیال مورد بررسی در پژوهش حاضر، معادله حالت نیز یکی از معادلات حاکم بر مسئله می‌باشد که رابطه (۷-۴) نشان‌دهنده معادله حالت گاز ایده‌آل می‌باشد [۵۵].

²⁷ k-epsilon (k-ε)

²⁸ Turbulent Prandtl Number

²⁹ Viscous Dissipation

$$pv = RT \quad (۷-۴)$$

۴-۳-۲- روابط حاکم بر جریان درون خاک

برای شبیه‌سازی خاک، یک ناحیه متخلخل در اطراف لوله تعریف شده است. به‌طور کلی معادله‌های جریان در ناحیه متخلخل به‌صورت مستقل از ناحیه درون لوله تعریف و حل می‌شوند. معادله‌های حاکم بر ناحیه متخلخل (معادله‌های پیوستگی، مومنتوم و انرژی) به‌ترتیب به‌صورت معادله‌های (۴-۸)، (۴-۹) و (۴-۱۰) می‌باشند [۵۴ و ۵۶].

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\gamma \rho u_i) = 0 \quad (۸-۴)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\gamma \rho u_i u_j) = -\gamma \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial(\gamma \bar{\tau}_{ij})}{\partial x_j} + \gamma \rho g_i - \left(\frac{\mu}{\alpha} + \frac{C_p \rho}{\gamma} |u_i| \right) u_i \quad (۹-۴)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i} [u_i (\rho_f E_f + p)] = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[k_{eff} \frac{\partial T}{\partial x_j} + u_i (\bar{\tau}_{ij})_{eff} \right] \quad (۱۰-۴)$$

که در این معادله‌ها، γ میزان تخلخل^{۳۰} می‌باشد که عبارت‌است از سهم سیال عبوری از میان ماده متخلخل نسبت به کل ناحیه 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 $\gamma = 0.2$ در نظر بگیریم.

در آخرین جمله سمت راست معادله (۴-۹)، عبارت اول $\left(\frac{\mu}{\alpha}\right)$ و دوم $\left(\frac{C_p \rho}{\gamma}\right)$ به‌ترتیب بیان‌گر نیروی پسای ویسکوز و نیروی پسای اینرسی می‌باشند و α نفوذپذیری ماده متخلخل می‌باشد. هم‌چنین در معادله (۴-۱۰)، ضریب هدایت حرارتی موثر k_{eff} به‌صورت زیر تعریف می‌شود.

$$k_{eff} = \gamma k_f + (1 - \gamma) k_s \quad (۱۱-۴)$$

³⁰ Porosity

۴-۴- مفهوم جریان آشفته و معادله‌های مربوط به آن

در این بخش ابتدا به بیان مقدمه‌ای در مورد مفهوم جریان آشفته پرداخته می‌شود و در قسمت‌های بعدی این بخش نیز به معرفی انواع روش‌های مدل‌سازی جریان آشفته پرداخته خواهد شد.

جریان آرام به عنوان جریانی تعریف می‌شود که در آن سیال به صورت لایه لایه حرکت می‌کند و هر لایه به آرامی بر لایه مجاور خود فقط به دلیل تبادل مولکولی اندازه حرکت می‌لغزد و هرگونه تمایل جهت ناپایداری، اغتشاش و تلاطم به وسیله نیروهای برشی ناشی از لزجت که در مقابل حرکت نسبی لایه-های سیال مقاومت می‌کنند خنثی و تضعیف خواهد شد. در مقابل جریان آرام، در جریان آشفته حرکت سیال آشفته و درهم بوده و تبادل اندازه حرکت به دلیل حرکت‌های متقاطع صورت می‌گیرد. ماهیت جریان یا به عبارت دیگر آرام یا آشفته بودن آن و موقعیت نسبی آن در یک مقیاس که نشان‌دهنده اهمیت نسبی جریان آشفته به آرام است، توسط عدد رینولدز^{۳۱} نشان داده می‌شود.

در طبیعت، جریان به صورت آرام وجود ندارد و در حقیقت تمامی جریان‌ها در مهندسی، آشفته می‌باشند و مدل کردن این آشفتگی که بسیار پیچیده می‌باشد توسط معادلات ریاضی انجام می‌شود. آزمایش‌هایی که در گذشته انجام شده است نشان می‌دهد که در اعداد رینولدز پایین‌تر از عدد رینولدز بحرانی، جریان به صورت آرام یا لایه‌ای می‌باشد ولی در جریان آشفته انتقال جرم به صورت ماکروسکوپی از لایه به لایه دیگر خواهد بود. به عنوان مثال برای جریان درون لوله، هنگامی که عدد رینولدز جریان کوچک‌تر از ۲۳۰۰ باشد ($Re_D < 2300$)، جریان به صورت کاملاً توسعه‌یافته خواهد بود و جریان آشفته هنگامی رخ می‌دهد که عدد رینولدز بزرگ‌تر از ۴۰۰۰ باشد ($Re_D > 4000$). در حد فاصل اعداد رینولدز ۲۳۰۰ تا ۴۰۰۰ ($2300 < Re_D < 4000$)، بسته به کمیت‌های مختلفی هم‌چون زبری لوله و یکنواختی جریان، هریک از انواع جریان آرام و یا آشفته می‌تواند رخ دهد. جریان‌هایی که عدد رینولدز آن‌ها خیلی بزرگ باشد ($Re_D \approx 10000$) جریان‌های کاملاً آشفته نامیده می‌شوند [۵۷].

³¹ Reynolds Number (Re)

۴-۴-۱- روش‌های مدل‌سازی آشفتگی

تاکنون مدل‌های آشفتگی مختلفی ارائه شده‌اند که هر یک برای رژیم خاص جریانی و حتی در ناحیه‌ای خاص از میدان جریان معتبر و دقیق می‌باشند. هدف نهایی تمام مدل‌های اغتشاشی، محاسبه اندازه تنش رینولدز $-\rho \overline{u_i u_j}$ در نقاط مختلف جریان است. در جدول (۴-۱) به دسته‌بندی مدل‌های آشفتگی پرداخته شده است.

جدول ۴-۱- مدل‌های آشفتگی مختلف جهت حل جریان [۵۸]

روابط اساسی	مدل‌های بر پایهٔ RANS			RSM	LES
	مدل‌های لزجت گردابی				
	مدل‌های صفر معادله‌ای	مدل‌های یک معادله‌ای	مدل‌های دو معادله‌ای	Reynolds Stress Models	Large Eddy Simulation
- بوزینسک ^{۳۲} - لاندنر ^{۳۳} - اسپیزال ^{۳۴}	- طول اختلاط اتوماتیک ^{۴۲} - طول اختلاط تعریف شده توسط کاربر ^{۴۳}	- اسپالارت-آلماراس ^{۴۱}	- کا-ا-پسیلون استاندارد ^{۳۵} - کا-ا-پسیلون بسط یافته ^{۳۶} - کا-ا-پسیلون RNG ^{۳۷} - کا-ا-پسیلون غیرایزوتروپیک ^{۳۸} - کا-اُمگا ویلکوکس ^{۳۹} - کا-اُمگا SST ^{۴۰}		

مدل‌های آشفتگی موجود را می‌توان از دو منظر نگریست:

الف) روابط حاکم بر لزجت گردابی^{۴۴}

ب) مدل‌های لزجت گردابی^{۴۵}

³² Boussinesq

³³ Launder

³⁴ Speziale

³⁵ Standard $k - \varepsilon$

³⁶ Extended $k - \varepsilon$

³⁷ RNG $k - \varepsilon$

³⁸ Anisotropic $k - \varepsilon$

³⁹ Wilcox $k - \omega$

⁴⁰ SST $k - \omega$

⁴¹ Spalart-Allmaras

⁴² Automatic Mixing Length

⁴³ User-specified Mixing Length

⁴⁴ Eddy-Viscosity Constitutive Relation

⁴⁵ Eddy-Viscosity Models

روابط اساسی حاکم بر لزجت گردابی از یک کمیت منفرد که اصطلاحاً لزجت آشفته μ_t نامیده می‌شود، برای بیان رابطه بین تنش‌های رینولدز موجود در معادله‌های RANS و پروفیل‌های موجود در میدان جریان متوسط استفاده می‌کنند. از سویی دیگر مدل‌های لزجت گردابی نیز برای محاسبه μ_t معرفی شده در روابط اساسی لزجت گردابی استفاده می‌شود.

۴-۱-۱- روابط حاکم بر لزجت گردابی

روابط اساسی حاکم بر لزجت گردابی شامل سه رابطه است که عبارت‌اند از:

(۱) رابطه بوزینسک

(۲) رابطه لاندِر

(۳) رابطه اسپِزیال

در این پژوهش از رابطه بوزینسک که رابطه پایه و مبنا در مفهوم لزجت گردابی می‌باشد، استفاده شده است. این رابطه بر پایه این اصل بنا شده است که مؤلفه‌های تنش‌های رینولدز متناسب با گرادیان‌های سرعت متوسط می‌باشند؛ یعنی:

$$-\rho \overline{u_i u_j} = \mu_t S_{ij} - \frac{2}{3} \left(\rho k + \mu_t \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) \delta_{ij} \quad (۴-۸)$$

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (۴-۹)$$

روابط لاندِر و اسپِزیال نیز در حقیقت بسط رابطه بوزینسک برای پیش‌بینی رفتارهای غیرایزوتروپی آشفته هستند.

مقادیر متوسط جریان و مشتقات مربوط به آن، از حل معادله‌های متوسط ناویر-استوکس در داخل میدان جریان به دست می‌آید.

برای تخمین μ_t در معادله بالا از مدل‌های اغتشاشی استفاده می‌شود که در ادامه به هر یک از آن‌ها خواهیم پرداخت.

۴-۱-۲-۴- مدل‌های لزجت گردابی

می‌توان هر یک از سه رابطه اساسی را با هر یک از شش مدل دو معادله‌ای ترکیب نمود تا به ترکیب جامعی برای مدل‌سازی جریان آشفته دست یافت. تنها محدودیتی در این باره وجود دارد این است که برای مدل کا-اِپسیلون غیرایزوتروپیک فقط اجازه استفاده از یکی از دو رابطه اساسی غیرایزوتروپ (یعنی روابط لاندر و یا اسپزیال) را خواهیم داشت. با توجه به شکل (۴-۱) می‌توان دید بهتری در مورد کارایی هر یک از مدل‌ها پیدا کرد.

همانطور که اشاره شد هدف هر مدل لزجت گردابی، توصیف رابطه بین μ_t و کمیت‌های قابل اندازه‌گیری جریان و یا کمیت‌های محاسبه‌شده میدان جریان است.

مدل‌های صفر معادله‌ای، تنها از روابط و معادله‌های جبری جهت توصیف رابطه بین μ_t و خواص محاسبه‌شده و یا قابل‌اندازه‌گیری استفاده می‌کنند. مدل‌های یک معادله‌ای از یک معادله انتقال با مشتقات جزئی (PDE) اضافی نیز در این بین استفاده می‌کنند. مدل‌های دومعادله‌ای نیز شامل دو معادله با مشتقات جزئی اضافی هستند.

واضح است که هیچ مدل آشفتگی وجود ندارد که برای تمامی مسائل مهندسی جوابگو باشد. انتخاب مدل از بین مدل‌های موجود، به فیزیک جریان مورد مطالعه، وجود یا عدم وجود رژیم‌های مختلف جریان، میزان دقت مورد نیاز، امکانات محاسباتی سخت‌افزاری و نرم‌افزاری، زمان موردنیاز برای رسیدن به جواب معقول و ... بستگی دارد.

از لحاظ محاسبات و خواص همگرایی می‌توان انتظار داشت که در استفاده از مدل‌های صفر معادله‌ای، رفتاری شبیه به رفتار جریان‌ات آرام را شاهد باشیم به‌طوری‌که در برخی موارد این مدل‌ها به نام مدل جریان آرام نیز خوانده می‌شوند. حل عددی با استفاده از این مدل‌ها با سرعت بیشتری همگرا می‌شود و در تکرارهای کمتری به جواب می‌رسیم.

در مدل‌های یک معادله‌ای یکی از دو مقیاس مهم در جریان آشفته، از میان زمان مقیاس جریان آشفته و طول مقیاس جریان آشفته و یا ترکیبی از این دو با استفاده از یک معادله انتقالی به دست می‌آید. معمولاً برای انرژی جنبشی آشفته k ، از یک معادله انتقالی استفاده می‌شود.

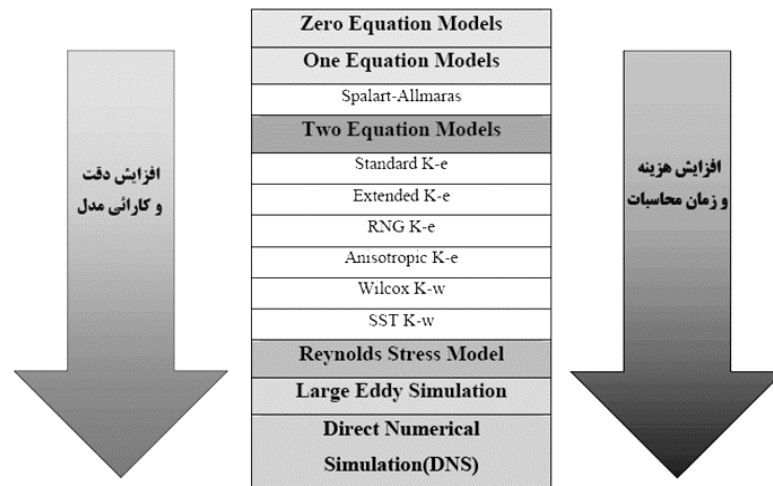
مدل اسپالارت-آلماراس یک مدل تک معادله‌ای ساده است که یک معادله مدل شده انتقال را برای به دست آوردن μ_t حل می‌کند. این مدل در مسائلی که نمی‌توان از شبکه بسیار ریز استفاده کرد و همچنین در نزدیکی دیوارهایی که گرادیان فشار معکوس دارند، نتایج خوبی ارائه می‌دهد. این مدل در ابتدا برای جریان‌هایی با اعداد رینولدز پایین ارائه شد، یعنی استفاده مؤثر از این مدل تنها محدود به نواحی متأثر از لزجت در داخل لایه مرزی و نواحی مشابه است.

مدل‌های دو معادله‌ای به عنوان زیربنای بسیاری از تحقیق‌ها مربوط به مدل‌سازی جریان آشفته، مخصوصاً در سال‌های اخیر مورد توجه قرار گرفته‌اند. ساده‌ترین مدل‌های کامل آشفتگی، مدل‌های دو معادله‌ای هستند که در آن‌ها حل دو معادله انتقال جداگانه باعث تعیین مقیاس لزجت آشفتگی^{۴۶} و مقیاس طول آشفتگی^{۴۷} به صورت مستقل می‌شود. نقطه آغاز تمام مدل‌های دو معادله‌ای، استفاده از تقریب بوزینسک و معادله انتقال برای انرژی جنبشی آشفتگی k می‌باشد. انتخاب متغیر دوم دلخواه بوده و تاکنون پیشنهادهای بسیاری برای این متغیر ارائه شده است [۵۸].

⁴⁶ Turbulent Viscosity Scale

⁴⁷ Turbulent Length Scale

شکل (۱-۴) نشان دهنده خلاصه‌ای از مقایسه بین مدل‌های آشفتگی مختلف از نظر دقت و هزینه محاسباتی می‌باشد.



شکل ۴-۱- مقایسه بین مدل‌های آشفتگی مختلف [۵۸]

۴-۴-۲- مدل‌سازی آشفتگی در پژوهش حاضر

در این پژوهش برای شبیه‌سازی آشفتگی از مدل آشفتگی کا-اِپسیلون استاندارد استفاده شده است که یک مدل بسیار مناسب برای جریان‌های رینولدز بالا^{۴۸} می‌باشد [۵۹]. برای شبیه‌سازی رفتار نزدیک دیواره نیز از تابع دیواره استاندارد^{۴۹} بهره گرفته شده است. دو معادله انتقال اضافی (معادلات k و ε) در این مدل آشفتگی به ترتیب به صورت معادلات زیر هستند [۵۲ و ۵۴]:

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M \quad (۱۰-۴)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (۱۱-۴)$$

در این معادله‌ها، G_k تولید انرژی جنبشی ناشی از گرادیان‌های سرعت متوسط می‌باشد و با استفاده از رابطه (۱۲-۴) به دست می‌آید [۵۲].

⁴⁸ High-Reynolds

⁴⁹ Standard Wall Function

$$G_k = -\rho \overline{u_i u_j} \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \quad (12-4)$$

برای محاسبه G_k در یک روش سازگار با فرضیه بوزینسک، می‌توان از رابطه (۱۳-۴) استفاده کرد [۵۲].

$$G_k = \mu_t S^2 \quad (13-4)$$

$$S \equiv \sqrt{2 S_{ij} S_{ij}} \quad (14-4)$$

با جایگذاری S_{ij} از رابطه (۹-۴)، رابطه (۱۳-۴) به صورت (۱۵-۴) درمی‌آید که به عنوان رابطه نهایی جهت محاسبه G_k مورد استفاده قرار می‌گیرد. لازم به ذکر است که برای حالت جریان دوبعدی، رابطه (۱۵-۴) به صورت رابطه (۱۶-۴) ساده می‌گردد.

$$G_k = \mu_t \left[\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 \right] + \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 \quad (15-4)$$

$$G_k = \mu_t \left[\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 \right] + \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 \quad (16-4)$$

سایر کمیت‌های موجود در معادلات (۱۰-۴) و (۱۱-۴)، G_b و Y_M هستند که به ترتیب بیانگر تولید انرژی جنبشی آشفتگی ناشی از شناوری^{۵۰} و سهم اتساع نوسانی^{۵۱} در آشفتگی تراکم‌پذیر از نرخ اتلاف کل^{۵۲} می‌باشند و با استفاده از روابط زیر تعیین می‌شوند [۵۴].

$$G_b = -g_i \frac{\mu_t}{\rho \text{Pr}_t} \frac{\partial \rho}{\partial x_i} \quad (17-4)$$

$$Y_M = \mu_t \rho \varepsilon \text{Ma}_t^2 \quad (18-4)$$

$$\text{Ma}_t = \sqrt{\frac{k}{a^2}} \quad (19-4)$$

در معادله (۱۹-۴)، a بیانگر سرعت صوت بوده و به صورت $a = \sqrt{\gamma RT}$ تعریف می‌شود.

⁵⁰ Buoyancy

⁵¹ Fluctuating Dilatation

⁵² Overall Dissipation Rate

در معادله‌های (۴-۱۰) و (۴-۱۱)، $C_{\mu} = 1/44$ ، $C_{\nu\varepsilon} = 1/92$ ، عددهای ثابتی هستند. لزجت آشفته نیز به صورت $\mu_t = \rho C_{\mu} \frac{k^2}{\varepsilon}$ تعریف می‌شود که در آن $C_{\mu} = 0.09$ می‌باشد. همچنین $\sigma_k = 1$ و $\sigma_\varepsilon = 1/3$ به ترتیب بیان گر اعداد پرانتل آشفته برای k و ε می‌باشند [۵۲ و ۵۴].

نکته بسیار مهمی که بایستی در نظر گرفته شود، آن است که تمام مدل‌های آشفته‌گی از معادلات حاکم بر جریان‌ات تراکم‌ناپذیر در محاسبه کمیت‌های آشفته استفاده می‌نمایند. زیرا بر طبق نظریه مارکوفین^{۵۳}، تنها در جریان‌های فراصوت (Hyper-Sonic) با عدد ماخ بزرگ‌تر از ۵ است که کمیت‌های آشفته‌گی از تراکم‌پذیری تأثیر می‌پذیرند و در سرعت‌های پایین‌تر می‌توان در محاسبه کمیت‌های آشفته‌گی (نظیر مدل‌سازی تنش‌های رینولدز)، از معادلات آشفته‌گی حاکم بر جریان‌ات تراکم‌ناپذیر استفاده نمود [۶۰].

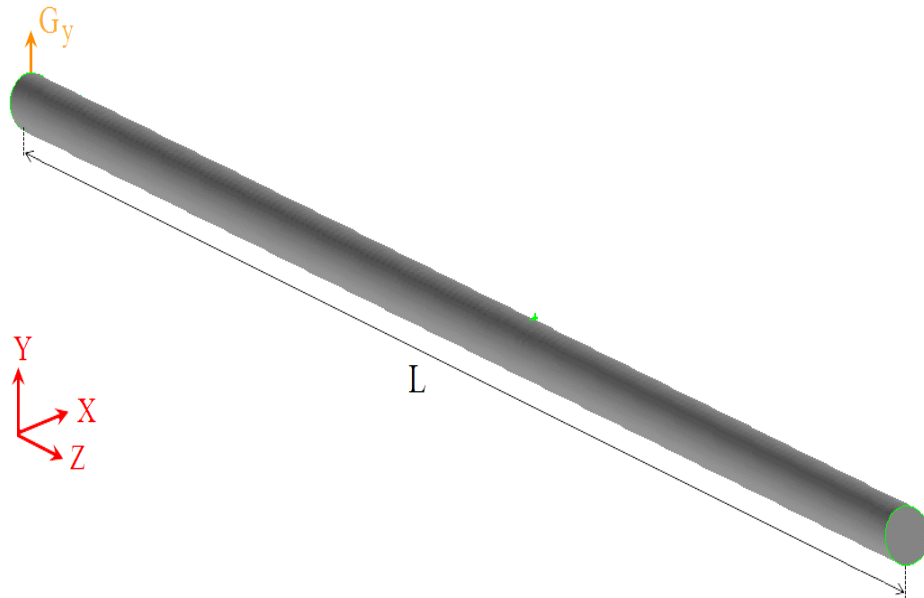
۴-۵- هندسه مورد بررسی و شبکه‌بندی

برای طراحی و شبکه‌بندی هندسه مورد بررسی در این پژوهش از نرم‌افزار گمبیت^{۵۴} استفاده شده است. به دلیل طولانی بودن خطوط لوله گاز مدل‌سازی کل طول خطوط توزیع گاز مقدور نمی‌باشد. لذا لوله‌ای به طول ۵ متر به عنوان محیط حل این تحقیق انتخاب شده است که در فاصله ۳ متری از نقطه ابتدایی هندسه، یک سوراخ در بالای سطح جانبی آن ایجاد شده است. در این پژوهش سه لوله پر کاربرد موجود در خطوط توزیع گاز با قطرهای نامی ۱۱۴/۶، ۱۶۳/۶ و ۲۰۴/۶ میلی‌متر مدل‌سازی شده‌اند. هندسه موردنظر در حالت سه‌بعدی و برای لوله روزمینی و لوله مدفون در خاک طراحی شده و در حالت مدفون، ارتفاع خاک بالای لوله برابر ۱/۵ متر در نظر گرفته شده و میزان تخلخل خاک نیز

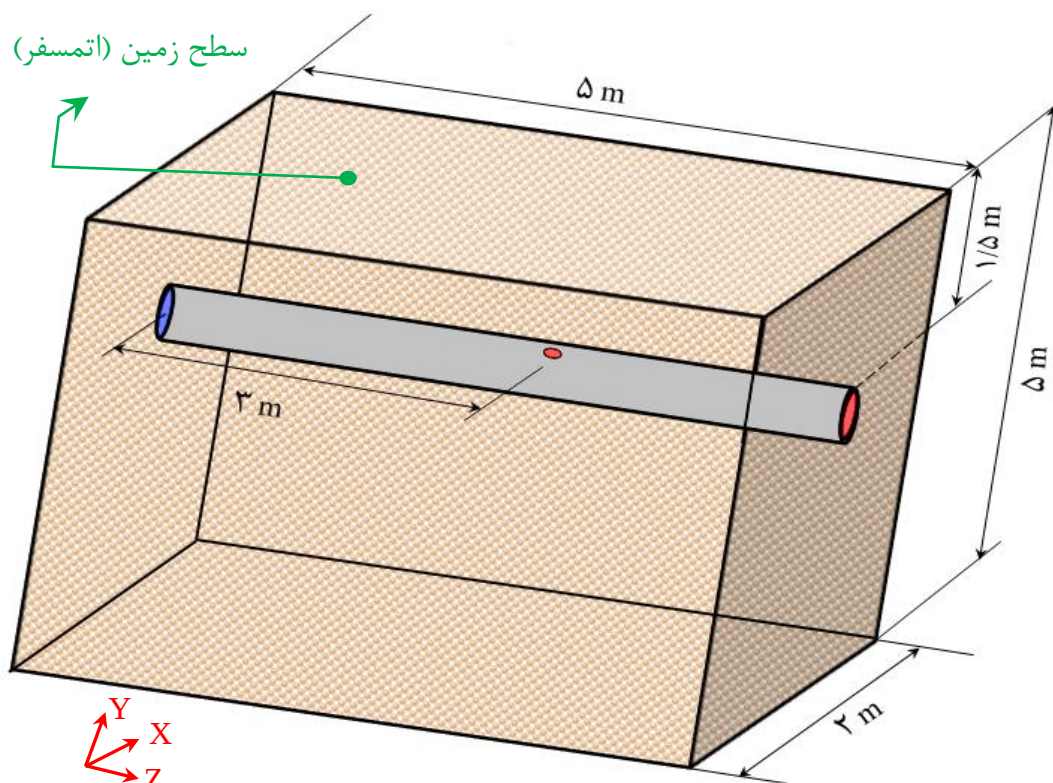
⁵³ Morkovin's hypothesis

⁵⁴ Gambit

برابر $\gamma = 0.35$ فرض شده است. در شکل‌های (۲-۴) و (۳-۴) به ترتیب محیط حل سه‌بعدی در حالت‌های لوله روزمینی و مدفون در خاک نشان داده شده است.

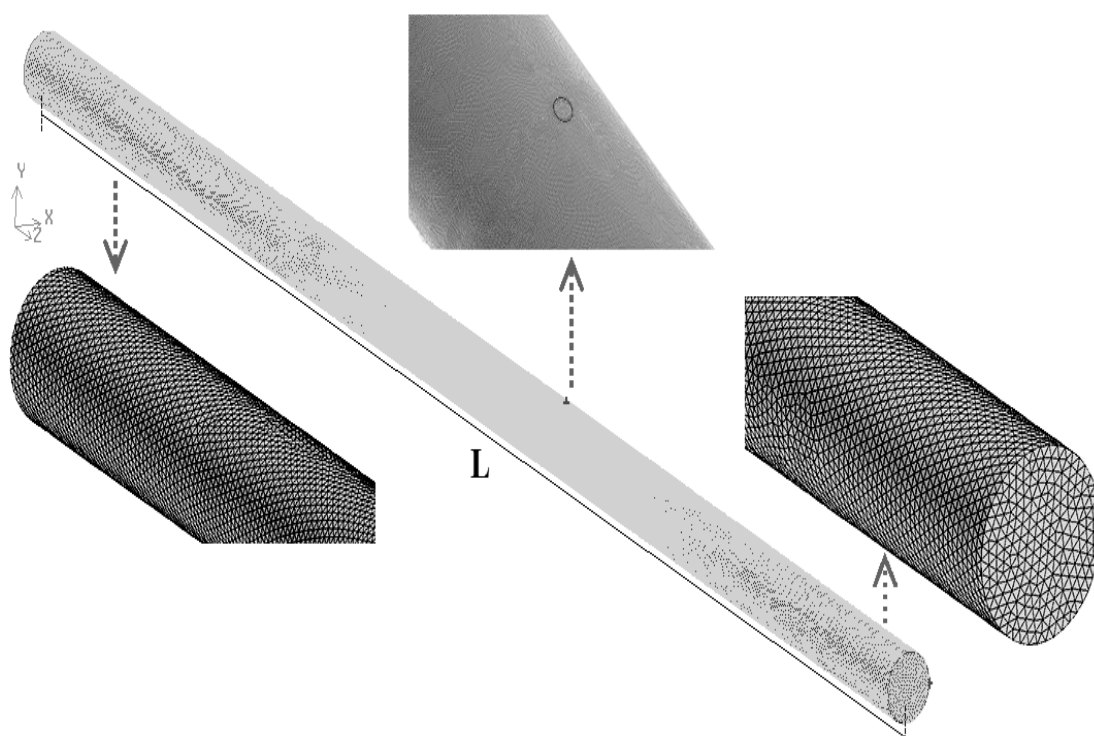


شکل ۴-۲- محیط حل در حالت لوله روزمینی



شکل ۴-۳- محیط حل در حالت لوله مدفون در خاک

شبکه‌بندی مدل‌های مورد بررسی با استفاده از شبکه‌های بی‌سازمان^{۵۵} (سلول‌های مثلثی) انجام شده است. از آنجا که دیواره‌ها به‌عنوان منبع اصلی تشکیل حالت گردابی^{۵۶} و آشفتگی^{۵۷} 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. شکل‌های (۴-۴) و (۵-۴) به‌ترتیب نشان‌دهنده هندسه شبکه‌بندی شده در حالت‌های لوله روزمینی و لوله مدفون می‌باشند.

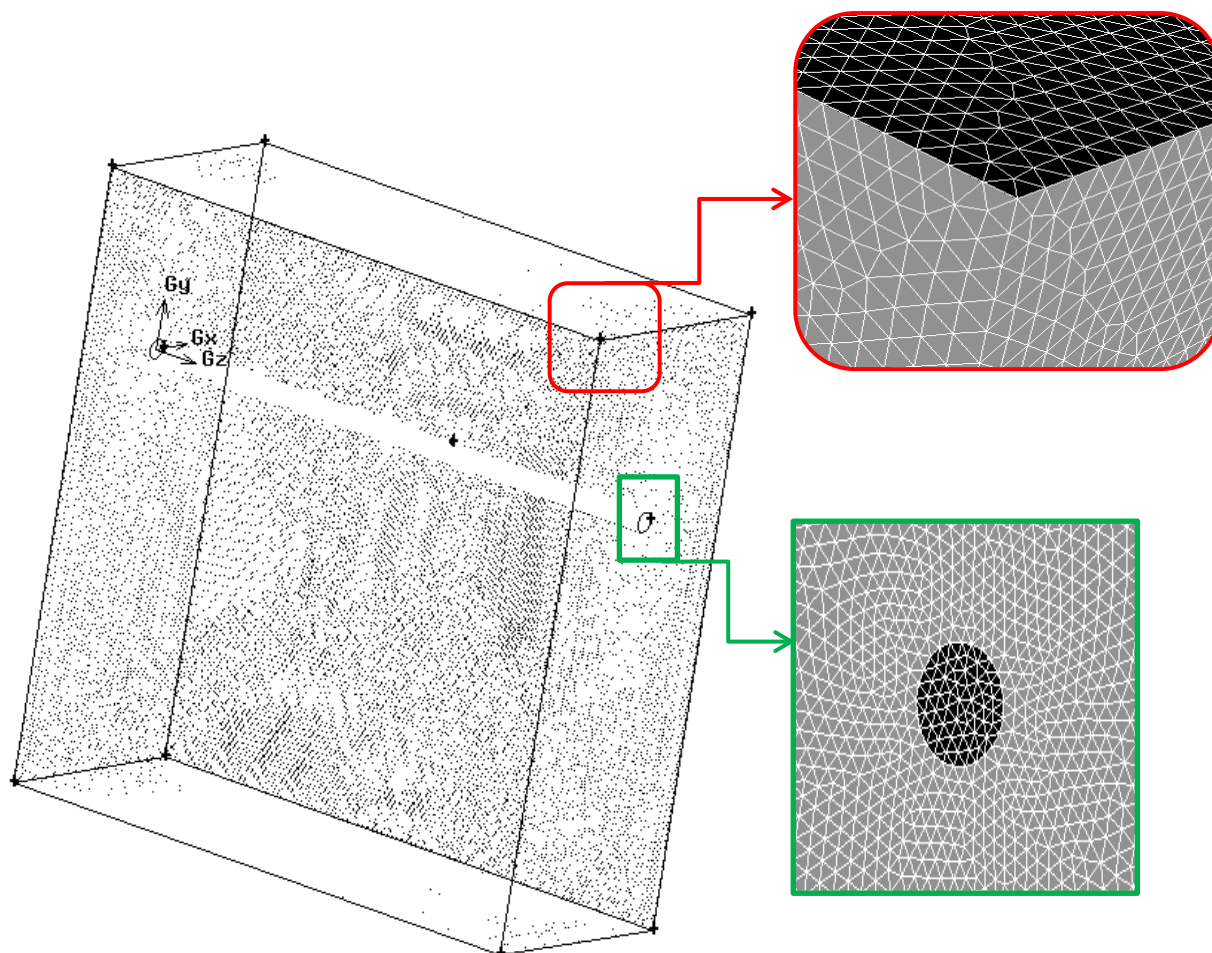


شکل ۴-۴- شبکه‌بندی محیط حل در حالت لوله روزمینی

^{۵۵} Unstructured mesh

^{۵۶} Vorticity

^{۵۷} Turbulence



شکل ۴-۵- شبکه‌بندی محیط حل در حالت لوله مدفون در خاک

۴-۵-۱- اعتبارسنجی شبکه

برای بررسی عدم وابستگی نتایج به تعداد سلول‌های به‌کاررفته در دامنه محاسباتی، چهار مدل مطالعاتی با تعداد سلول‌های متفاوت برای یک نمونه با قطر لوله و قطر سوراخ مشابه، بررسی شده است. نتایج حاصل از این بررسی در جدول (۴-۲) برای حالت لوله روزمینی آورده شده است. این جدول برای لوله‌ای با قطر $163/6$ میلی‌متر می‌باشد که سوراخی به قطر 30 میلی‌متر بر روی آن ایجاد شده و فشار ابتدای خط لوله 5 بار است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، درصد اختلاف نسبی بین نتایج حاصل از هندسه‌های با تعداد 599493 سلول و 1601839 سلول، حدود $3/2\%$ بوده و این اختلاف بین هندسه‌های با تعداد 1601839 سلول و 1909518 سلول، تقریباً $0/27\%$ می‌باشد که

این مقدار اختلاف بسیار ناچیز و قابل قبول می‌باشد. بنابراین به دلیل قابل صرف نظر بودن اختلاف، جهت کاهش هزینه‌های محاسباتی شبکه‌ای با تعداد سلول ۱۶۰۱۸۳۹ برای نمونه با مشخصات مذکور انتخاب شده است. لازم به ذکر است که به دلیل کوچک بودن قطر سوراخ و قطر لوله در مقایسه با طول لوله، می‌توان این الگوی شبکه‌بندی برای سایر نمونه‌های مورد بررسی در پژوهش حاضر نیز گسترش داد و حدود تعداد سلول‌های به کاررفته در نمونه‌های مختلف پژوهش، تفاوت قابل توجهی ندارند.

جدول ۴-۲- تأثیر تعداد مش بر دبی جرمی گاز نشت یافته (برای حالت روزمینی)

تعداد سلول‌های محاسباتی در دامنه حل	دبی جرمی گاز نشت یافته (kg/s)
۲۴۰۲۰۵	۰/۶۴۳۳۰
۵۹۹۴۹۳	۰/۶۰۴۸۰
۱۶۰۱۸۳۹	۰/۵۸۵۳۲
۱۹۰۹۵۱۸	۰/۵۸۳۶۹

در مورد مدل مدفون نیز پس از انجام روند فوق، شبکه نهایی مورد بررسی برای لوله با قطر ۱۶۳/۶ میلی‌متر و قطر سوراخ ۳۰ میلی‌متر دارای تعداد ۲۹۱۸۳۷۷ سلول محاسباتی می‌باشد که دبی جرمی خروجی از سوراخ برای هندسه مذکور و با فشار ۵ بار، برابر ۰/۰۵۴۶۲ کیلوگرم بر ثانیه می‌باشد.

۴-۶- شرایط مرزی و اولیه

در مقطع ورودی لوله، شرط مرزی از نوع فشار ورودی^{۵۸} و در مقطع انتهای لوله از نوع فشار خروجی^{۵۹} استفاده شده است. برای جداره‌های لوله نیز شرط مرزی از نوع دیواره^{۶۰} در نظر گرفته شده است. در

^{۵۸} Pressure Inlet

^{۵۹} Pressure Outlet

^{۶۰} Wall

حالت لوله مدفون در خاک، سطح خاک که در تماس با محیط اطراف می‌باشد، دارای شرط مرزی فشار خروجی می‌باشد. شرط مرزی سوراخ نیز در حالت لوله روزمینی از نوع فشار خروجی می‌باشد؛ اما در حالت لوله مدفون، از آنجایی که سوراخ یک مرز مشترک برای لوله و خاک می‌باشد، از شرط مرزی داخلی^{۶۱} استفاده شده است. نوع شرایط مرزی استفاده‌شده در جدول (۳-۴) آورده شده است.

جدول ۴-۳- نوع شرایط مرزی مورد استفاده در پژوهش

نوع شرط مرزی		مرز مورد نظر
فشار ورودی		ابتدای لوله
فشار خروجی		انتهای لوله
دیواره		سطح جانبی لوله
فشار خروجی	در حالت لوله رو زمینی	سوراخ
مرز داخلی	در حالت لوله مدفون	
فشار خروجی		سطح زمین (در حالت مدفون)

هم‌چنین شرایط زیر در مسئله اعمال شده است:

- فشار گاز در ابتدای لوله به ازای مقادیر مختلفی در بازه ۳ الی ۵ بار بررسی شده است.
- دمای گاز در ابتدای لوله ۲۸۸ کلوین در نظر گرفته شده است.
- ضریب اصطکاک و افت فشار به ازای طول لوله به‌ترتیب بر اساس معادله کولبروک-وایت و معادله جریان عمومی بر حسب روابط (۴-۲۰) و (۴-۲۱) محاسبه گردیده‌اند. لوله مورد نظر نیز دارای زبری مطلق $\epsilon = 0.015 \text{ mm}$ می‌باشد [۶۱].

⁶¹ Interior

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -\epsilon \log \left(\frac{\epsilon}{\epsilon/\gamma D} + \frac{\epsilon/\gamma D}{Re \sqrt{f}} \right) \quad (20-4)$$

$$Q_b = 1/1494 \times 10^{-\epsilon} \left(\frac{T_b}{p_b} \right) \sqrt{\frac{p_1^2 - p_2^2}{GT_f Z L f}} D^{\epsilon/5} \quad (21-4)$$

$$Re = \frac{\rho u D}{\mu} \quad (22-4)$$

در روابط فوق، f ، ϵ ، D ، G ، T_f ، Z ، L و Re به ترتیب بیانگر ضریب اصطکاک، زبری مطلق لوله (mm)، قطر لوله (mm)، وزن مخصوص گاز (در این پژوهش برابر ۰/۶ در نظر گرفته شده است)، دمای جریان داخل لوله (دمای متوسط) (K)، ضریب تراکم پذیری گاز، طول لوله (km) و عدد رینولدز می باشد. $T_b = 288 \text{ K}$ و $p_b = 101 \text{ kPa}$ به ترتیب دمای پایه (مبنا) (K) و فشار پایه (kPa) بوده و Q_b نیز معرف دبی جریان گاز نرمال شده در شرایط استاندارد (۱ atm = 101 kPa و ۱۵ °C = 288 K) ^{۶۲}، بر حسب m^3/day و بین دو نقطه دلخواه ۱ (نقطه ابتدایی) و ۲ (نقطه انتهایی) از یک لوله صاف با فشارهای p_1 و p_2 (بر حسب kPa) می باشد.

۴-۷- شبیه سازی خاک

همان طور که قبلاً اشاره شد، برای شبیه سازی خاک، از تعریف یک ناحیه متخلخل استفاده شده است که خواص خاک مورد مطالعه در این پژوهش در جدول (۴-۴) ارائه شده است. همچنین سیال عبوری از بین ذرات خاک، هوا در نظر گرفته شده است.

$$^{62} Q_b = Q \times \frac{\rho(T, p)}{\rho(15^\circ\text{C}, 1 \text{ atm})} = \frac{\dot{m}}{\rho(15^\circ\text{C}, 1 \text{ atm})}$$

جدول ۴-۴- خواص خاک مورد استفاده در پژوهش حاضر [۶۲]

مقدار	خاصیت (واحد)
$1/6 \times 10^{-9}$	نفوذپذیری (m^2/s)
۲/۹	ضریب هدایت حرارتی (W/mK)
۷۳۲/۶۹	ظرفیت حرارتی (J/kgK)
۲۶۵۰	چگالی (kg/m^3)

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^{۶۳} و مقاومت اینرسی^{۶۴} ضرایبی هستند که از خواص ماده متخلخل مورد استفاده به دست می‌آیند. مقاومت ویسکوز به صورت معکوس نفوذ-پذیری 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_1 و C_2 که از داده‌های آزمایشگاهی به دست می‌آیند، استفاده کرد.

یک روش دیگر برای تعیین ضرایب مقاومت‌های ویسکوز و اینرسی، استفاده از فرمول‌های تجربی می‌باشد. به عنوان نمونه، یک فرمول تجربی توسط ارگان [۶۳] 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 بوده و به صورت روابط (۴-۲۳) و (۴-۲۴) می‌باشد. لازم به ذکر است که در این روابط α نفوذپذیری، γ میزان تخلخل و d_p قطر ذرات متخلخل بوده و مقدار مقاومت‌های ویسکوز و اینرسی به ترتیب معادل $\frac{1}{\alpha}$ و C_p می‌باشند.

⁶³ Viscous Resistance

⁶⁴ Inertial Resistance

$$\alpha = \frac{d_p^2}{150} \cdot \frac{\gamma^3}{(1 - \gamma)^2} \quad (23-4)$$

$$C_r = \frac{3/5}{d_p} \cdot \frac{(1 - \gamma)}{\gamma^3} \quad (24-4)$$

پس از جایگذاری مقادیر مربوط به مشخصات خاک مورد بررسی در پژوهش (که در قسمت‌های قبل اشاره گردید) و استفاده از روابط فوق، مقادیر مقاومت‌های ویسکوز و اینرسی مورد استفاده در پژوهش حاضر به ترتیب $6/25 \times 10^{-8} \text{ m}^{-2}$ و 3450.3 m^{-1} خواهد بود.

۴-۸- فرآیند حل عددی

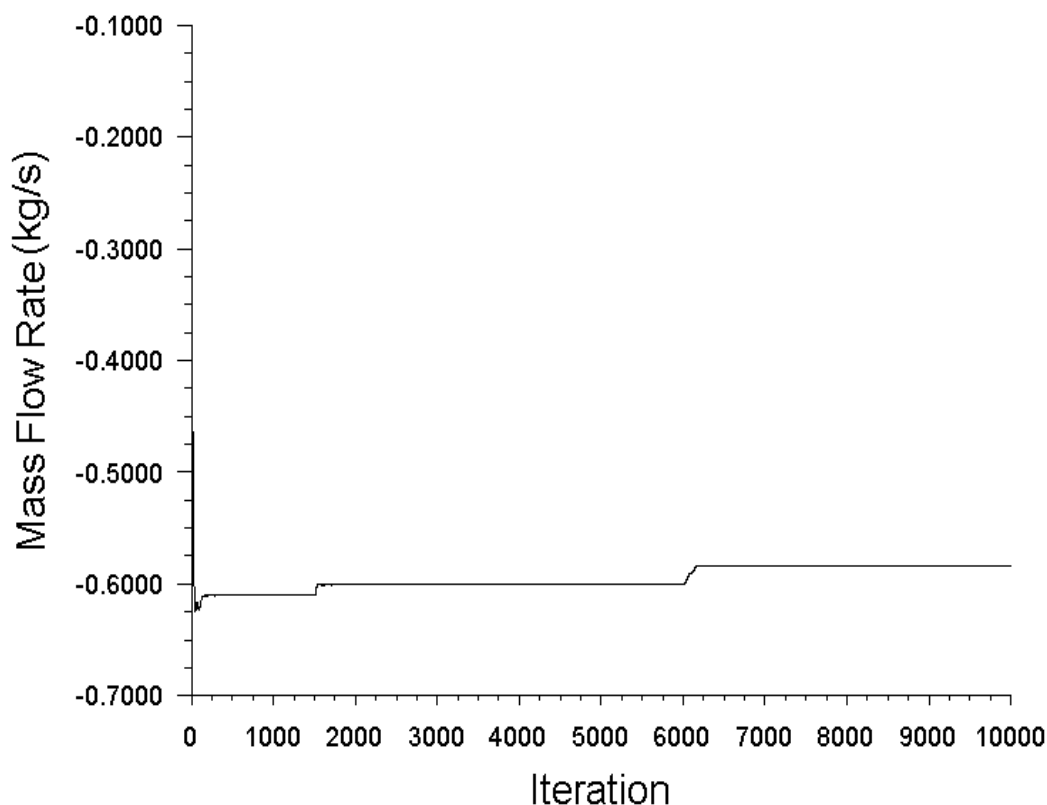
معادلات حاکم بر مسئله با استفاده از روش بادسو^{۶۵} گسسته‌سازی شده‌اند. ارتباط بین جملات سرعت و فشار نیز از طریق الگوریتم سیمپل صورت گرفته است. حل گر مسئله نیز از نوع مبتنی بر فشار^{۶۶} انتخاب شده است. نمودار (۴-۱) همگرایی دبی جرمی خروجی از سوراخی با قطر ۳۰ mm در لوله با قطر ۱۶۳/۶ mm و فشار ۵ bar در حالت‌های روزمینی و مدفون را نشان می‌دهد. با بررسی حالت‌های مختلف گسسته‌سازی روش بادسو مشاهده شد که در مواردی که سیال تراکم‌پذیر می‌باشد و یا فشار کاری بالا می‌باشد، جهت همگرایی بهتر و صحیح بودن جواب‌ها، بهتر است ابتدا معادلات حاکم بر مسئله به صورت مرتبه اول گسسته‌سازی شده و پس از این که حل مسئله با گسسته‌سازی مرتبه اول به همگرایی رسید، در ادامه کار از گسسته‌سازی مرتبه دوم استفاده نمود. همان‌طور که در نمودار (۴-۱-الف) مشاهده می‌شود، در ابتدای کار، کلیه معادلات حاکم بر مسئله، با روش بادسو مرتبه اول گسسته‌سازی و به تعداد ۱۵۰۰ تکرار با این روش حل شده‌اند. با اینکه پس از ۱۵۰۰ تکرار به روش مرتبه اول، جواب به همگرایی رسیده است، اما این جواب صحت کافی ندارد. در ادامه کار، از تکرار ۱۵۰۰ تا ۶۰۰۰، جملات شامل عبارت‌های چگالی با استفاده از روش بادسو مرتبه دوم گسسته‌سازی

^{۶۵} Upwind

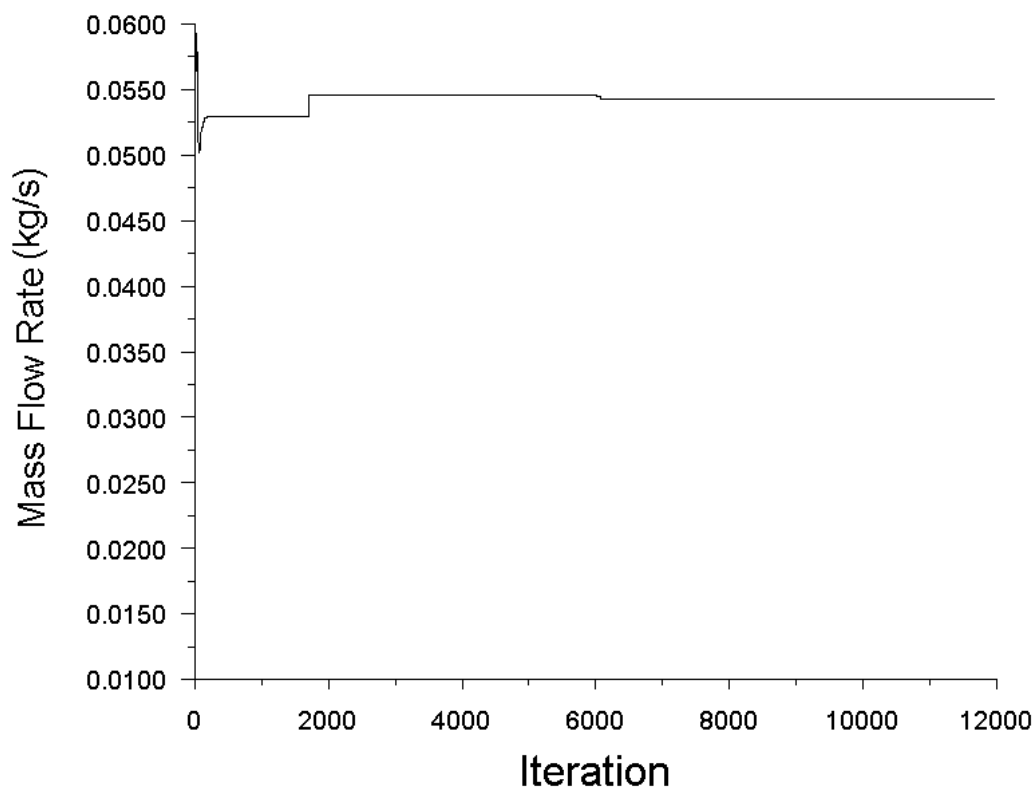
^{۶۶} Pressure Based

شده و از تکرار ۶۰۰۰ تا ۹۰۰۰ معادله مومنتوم نیز به صورت مرتبه دوم گسسته سازی شده است. در انتها نیز از تکرار ۹۰۰۰ الی ۱۰۰۰۰، معادله انرژی با روش بادسو مرتبه دوم گسسته سازی شده است. این روش گسسته سازی به خاطر تراکم پذیر بودن سیال مورد نظر و تغییرات ناگهانی متغیرها در نزدیکی سوراخ، مورد استفاده قرار گرفته و باعث می شود نتایج به صورت واقعی همگرا شوند.

موارد اشاره شده در فوق، برای لوله مدفون در نمودار (۴-۱-ب) مشاهده می شود به طوریکه برای نمونه با قطر لوله ۱۶۳/۶ mm، قطر سوراخ ۳۰ mm و فشار ۵ bar دبی جرمی گاز نشت یافته از سوراخ برابر 0.054624666 kg/s و دبی جرمی گاز خروجی از سطح خاک (زمین) برابر 0.054624572 kg/s می باشد که نشان دهنده این است که بالانس دبی جرمی با دقت بسیار بالایی برقرار می باشد.



(الف)



(ب)

نمودار ۴-۱- همگرایی دبی جرمی خروجی از سوراخ برای، (الف) لوله روزمینی، (ب) لوله مدفون

۴-۹- کمیت‌های مهم تأثیرگذار بر میزان نشت گاز طبیعی از خطوط

توزیع گاز

کلیه کمیت‌هایی که می‌توانند در مسئله نشت گاز طبیعی دخالت داشته باشند شامل طول خط لوله، قطر لوله، قطر سوراخ، فشار خط لوله، افت فشار و دمای خط لوله می‌باشد که در ادامه بررسی می‌گردد که این عوامل در نشت گاز از خطوط لوله توزیع گاز تا چه میزان می‌توانند مؤثر باشند. در انتهای فصل بعد نیز یک رابطه هم‌بسته برای محاسبه نشت گاز طبیعی بر اساس کمیت‌های مختلف تأثیرگذار بر پژوهش، ارائه خواهد شد.

۴-۹-۱- طول لوله، افت فشار و فشار نقطه ابتدایی

طول خط لوله تأثیر خود را در قالب افت فشار نشان می‌دهد. در این پژوهش زبری سطح داخلی لوله نیز در نظر گرفته شده است و به دنبال آن افت فشار در طول خط لوله نیز در محاسبات لحاظ شده است.

از طرفی دیگر پژوهش حاضر به بررسی میزان نشت گاز در خطوط توزیع گاز می‌پردازد و سطح فشار در این خطوط پایین می‌باشد و همچنین این خطوط گاز متفاوت از خطوط طویل انتقال گاز با لوله‌های با قطر بزرگ می‌باشد [۳۸]. لذا افت فشار در طول خط لوله ناچیز بوده و فقط شاهد تغییرات ناگهانی خواص در نزدیکی سوراخ هستیم و لذا می‌توان جهت کاهش هزینه‌های محاسباتی یک لوله با طول کمتر را به عنوان دامنه حل در نظر گرفت. بر اساس مطالب فوق، مدل محاسباتی این پژوهش لوله‌ای به طول ۵ متر انتخاب شده است و فشار نقطه ابتدایی به‌ازای مقادیر مختلف شامل ۳، ۳/۵، ۴، ۴/۵ و ۵ بار مورد بررسی قرار گرفته است.

۴-۹-۲- قطر لوله و سوراخ

قطر لوله و سوراخ از تأثیرگذارترین کمیت‌های مسئله نشت گاز در تمام خطوط انتقال و توزیع گاز می‌باشد و به دلیل اهمیت فراوان آن‌ها، مسئله به‌ازای مقادیر مختلفی از آن‌ها مدل‌سازی شده است. همان‌طور که پیش‌تر نیز بیان گردید، در این پژوهش مسئله به‌ازای لوله‌هایی با قطر ۱۱۴/۶، ۱۶۳/۶ و ۲۰۴/۶ میلی‌متر بررسی شده است که اصلی‌ترین و پرکاربردترین سایزهای لوله به‌کار رفته در خطوط توزیع گاز طبیعی می‌باشند. قطر سوراخ نیز سعی شده است به‌ازای مقادیر مختلفی بررسی گردد تا پژوهش حاضر کامل و جامع باشد.

۴-۹-۳- دمای خط لوله

بر اساس نتایج تحقیق لو و همکاران [۴۲]، به دلیل تغییرات ناچیز دما در طول خطوط لوله توزیع گاز طبیعی، تأثیر دمای نقطه ابتدایی در میزان نشت گاز قابل صرف نظر می باشد.

بر اساس مطالب فوق، کمیت های مؤثر بر میزان نشت گاز طبیعی در خطوط توزیع گاز شامل قطر لوله، قطر سوراخ و فشار نقطه ابتدایی می باشد که در فصل بعدی نحوه تأثیر این کمیت ها به صورت کامل مورد بررسی قرار گرفته و یک رابطه همبسته کاربردی جهت محاسبه آن ارائه خواهد شد.

فصل پنجم

نتایج

۵-۱- معبرسازی حل

حل عددی مربوط به فرآیند نشت گاز با شرایط مرزی اشاره شده در جدول (۴-۳)، صورت پذیرفته شده است و در این بخش به مقایسه نتایج حاصل از این شبیه سازی با مطالعات پیشین پرداخته خواهد شد.

جهت اعتبارسنجی مدل موردنظر، نتایج حاصل از این پژوهش با نتایج حاصل از مطالعات منتیل و همکاران [۳۸] و همچنین نتایج حاصل از رابطه (۳-۱) مقایسه شده است. بر این اساس در این بخش شرایط مرزی و اولیه کاملاً مشابه با پژوهش مذکور (منتیل) انتخاب شده اند.

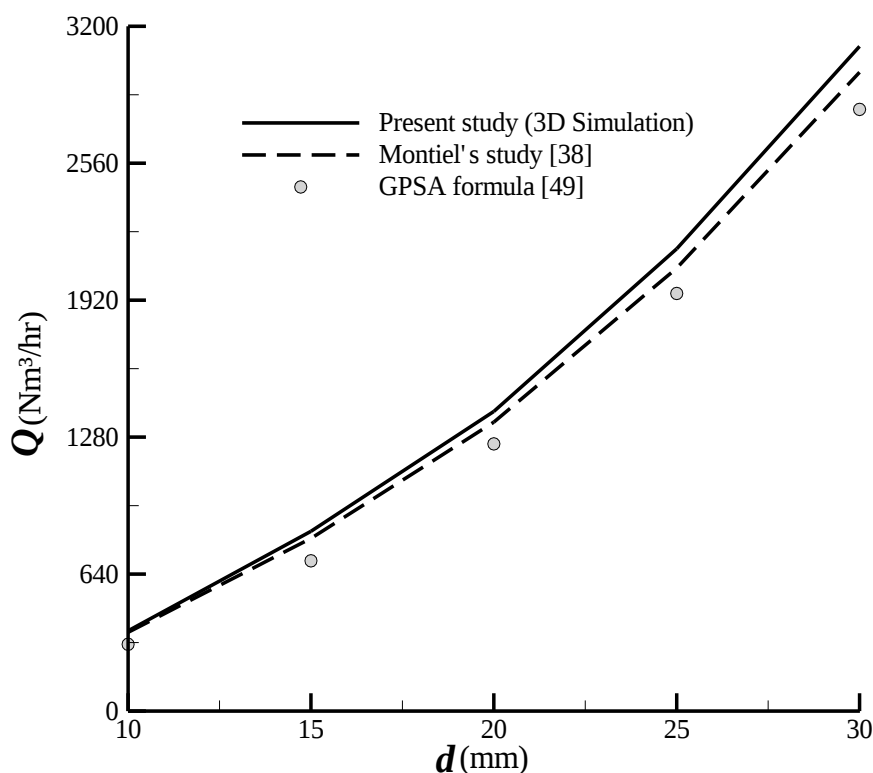
همان طور که در پیشینه تحقیق نیز اشاره گردید، در تحقیق منتیل و همکاران [۳۸] طولی برای لوله بعد از سوراخ در نظر گرفته نشده و در واقع لوله گاز همانند یک مخزن مدل سازی شده بود.

در نمودار (۵-۱) به مقایسه نتایج مربوط به دبی حجمی نرمال شده خروجی از سوراخ بین این تحقیق و تحقیق انجام شده توسط منتیل و همکاران [۳۸] و همچنین رابطه (۳-۱) پرداخته شده است. همان طور که مشاهده می شود نحوه تغییرات دبی نشتی مطابق با پژوهش های پیشین می باشد که نشان دهنده صحت مدل سازی انجام شده می باشد. از سوی دیگر با مقایسه حالت های مختلف موجود در نمودار (۵-۱) مشخص می گردد که در نظر گرفتن طول لوله بعد از سوراخ باعث افزایش میزان دبی حجمی گاز نشت یافته از سوراخ نسبت به تحقیق منتیل [۳۸] می گردد که علت آن را می توان در برگشت جریان از طول لوله بعد از سوراخ دانست. از طرفی، با افزایش قطر سوراخ، فشار سوراخ افزایش یافته و به دنبال آن برگشت جریان از سمت پایین دست بیش تر خواهد شد و اختلاف نتیجه های دو تحقیق کمی بیش تر می شود؛ به طوری که کم ترین و بیش ترین مقدار قدر مطلق درصد اختلاف نسبی^{۶۷} بین نتایج پژوهش حاضر نسبت به نتایج تحقیق منتیل و همکاران [۳۸] به ترتیب برابر ۲٪ و ۵٪ بوده

۱۰۰× |نتیجه پژوهش منتیل / (اختلاف نتایج بین دو پژوهش)|^{۶۷}

و در حالتی که این مقادیر با نتایج حاصل از فرمول GPSA [۴۹] مقایسه شود، کمترین و بیشترین درصد اختلاف نسبی برابر ۱۱٪ و ۲۰٪ خواهد بود.

در بخش (۲-۳) اشاره گردید که مدل و فرضیاتی که در رابطه (۱-۳) اعمال شده است، باعث می‌گردد که نتایج حاصل از این رابطه از حادثه واقعی نشت گاز به دور باشد. با مقایسه نتایج مربوط به رابطه (۱-۳) با نتایج پژوهش کنونی و مطالعات پیشین، مشاهده می‌شود که درصد اختلاف نسبی قابل توجه است و مطالب اشاره شده در بخش (۲-۳) تأیید می‌گردد.



نمودار ۵-۱- مقایسه دبی حجمی نشتی بین پژوهش حاضر (در حالت روزمینی)، پژوهش منتیل و فرمول GPSA

۵-۲- بررسی کمیت‌های تأثیرگذار بر میزان نشت گاز طبیعی

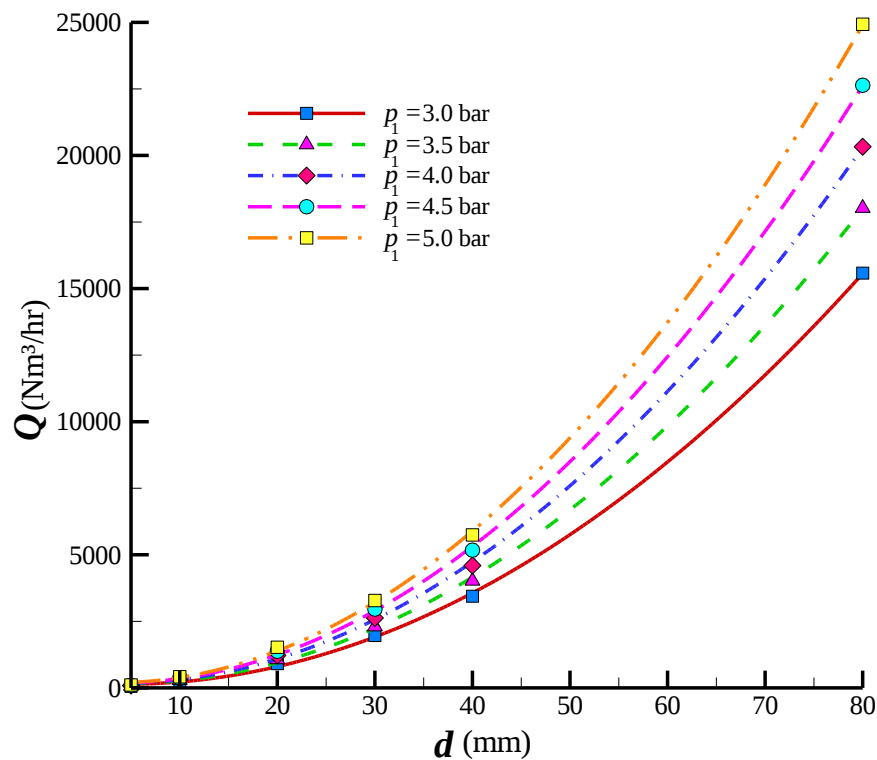
در فصل‌های پیشین فرضیات، روابط حاکم و کمیت‌های مؤثر بر میزان نشت گاز به تفصیل تشریح گردید. حال در این بخش به بررسی کامل تمام کمیت‌های مؤثر اشاره شده در فصل‌های قبل پرداخته

شده و میزان و نحوه تأثیر هر یک از این کمیت‌ها بررسی خواهد شد. نتایج نشتی برای سه لوله مختلف در خطوط توزیع گاز، به‌ازای فشارها و قطرهای سوراخ مختلف و در دو حالت لوله روزمینی و لوله مدفون در خاک ارائه خواهد شد.

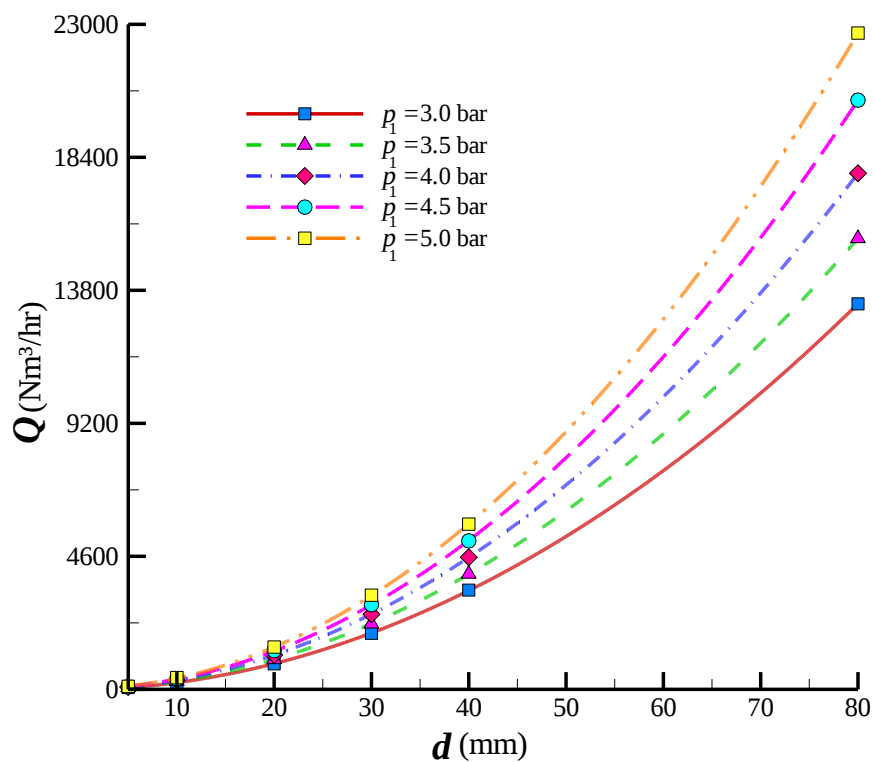
۵-۲-۱- بررسی تأثیر قطر لوله و قطر سوراخ بر میزان نشتی

نمودارهای (۲-۵)، (۳-۵) و (۴-۵) به‌ترتیب نشان‌دهنده نحوه تغییرات دبی حجمی نرمال شده گاز نشت‌یافته از سوراخ برای لوله‌های با قطر ۱۱۴/۶، ۱۶۳/۶ و ۲۰۴/۶ میلی‌متر در حالت لوله گاز رو-زمینی هستند. با مقایسه منحنی‌های مختلف موجود در این سه نمودار مشاهده می‌شود که دبی حجمی گاز نشت‌یافته از سوراخ با افزایش قطر سوراخ افزایش یافته و با افزایش قطر لوله کاهش می‌یابد؛ یعنی دبی نشتی با قطر سوراخ رابطه مستقیم و با قطر لوله رابطه وارونه دارد. اگر حداکثر مقدار موجود در محور عمودی این سه نمودار را با یکدیگر مقایسه نماییم، مشاهده می‌شود که این مقدار به-ازای لوله با قطر ۱۱۴/۶ میلی‌متر برابر $24928/1 \text{ Nm}^3/\text{hr}$ بوده و برای لوله با قطر ۲۰۴/۶ میلی‌متر به $22339/8 \text{ Nm}^3/\text{hr}$ کاهش می‌یابد که دلالت بر وارونه بودن رابطه دبی نشتی با قطر لوله دارد.

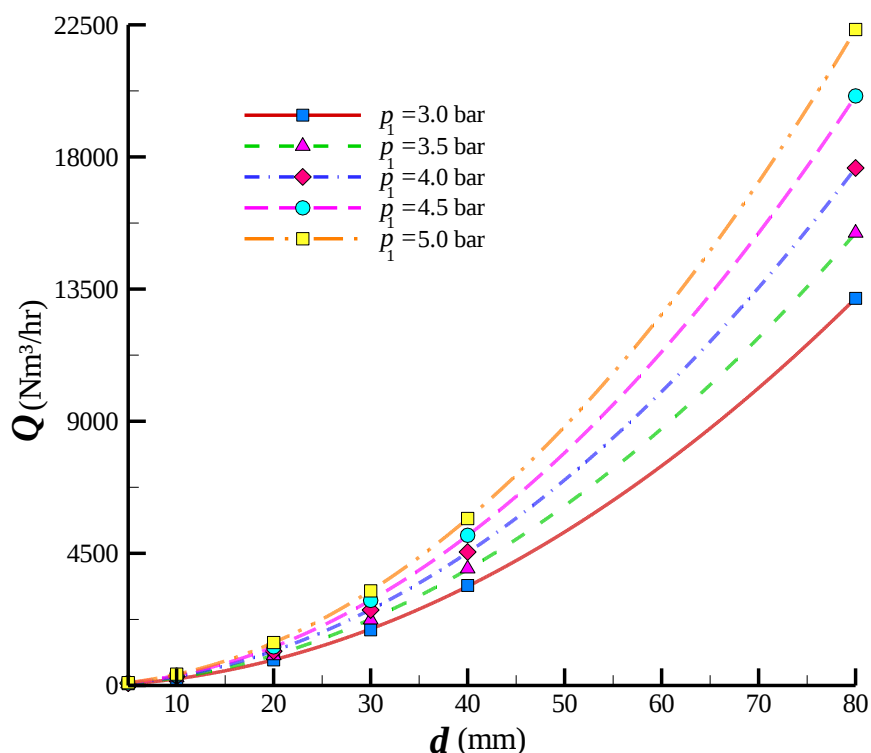
در مورد نحوه تأثیر این دو کمیت باید اشاره نمود که بررسی داده‌ها نشان می‌دهد که بهترین تابعی که می‌تواند با دقت مناسب این منحنی‌ها را برازش نماید، تابع درجه دوم می‌باشد. همچنین بررسی‌ها نشان می‌دهد که دبی حجمی نشتی، با نسبت قطر سوراخ به قطر لوله نیز یک رابطه درجه چهار دارد. بر این اساس نحوه تغییرات کمیت‌های قطر لوله و قطر سوراخ در پژوهش کنونی نیز کاملاً منطبق با پژوهش‌های پیشین می‌باشد که صحت نتایج و بررسی‌ها را تأیید می‌نماید.



نمودار ۵-۲- تغییرات دبی حجمی ناشی بر حسب قطر سوراخ به‌ازای مقادیر مختلف فشار ورودی (لوله روزمینی به قطر ۱۱۴/۶ میلی‌متر)

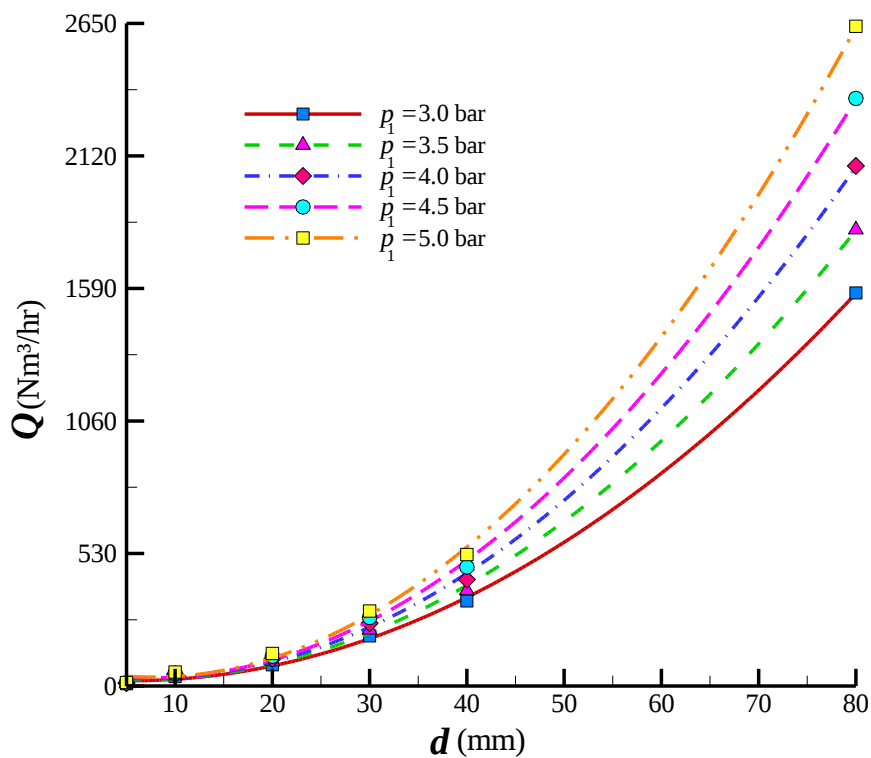


نمودار ۵-۳- تغییرات دبی حجمی ناشی بر حسب قطر سوراخ به‌ازای مقادیر مختلف فشار ورودی (لوله روزمینی به قطر ۱۶۳/۶ میلی‌متر)

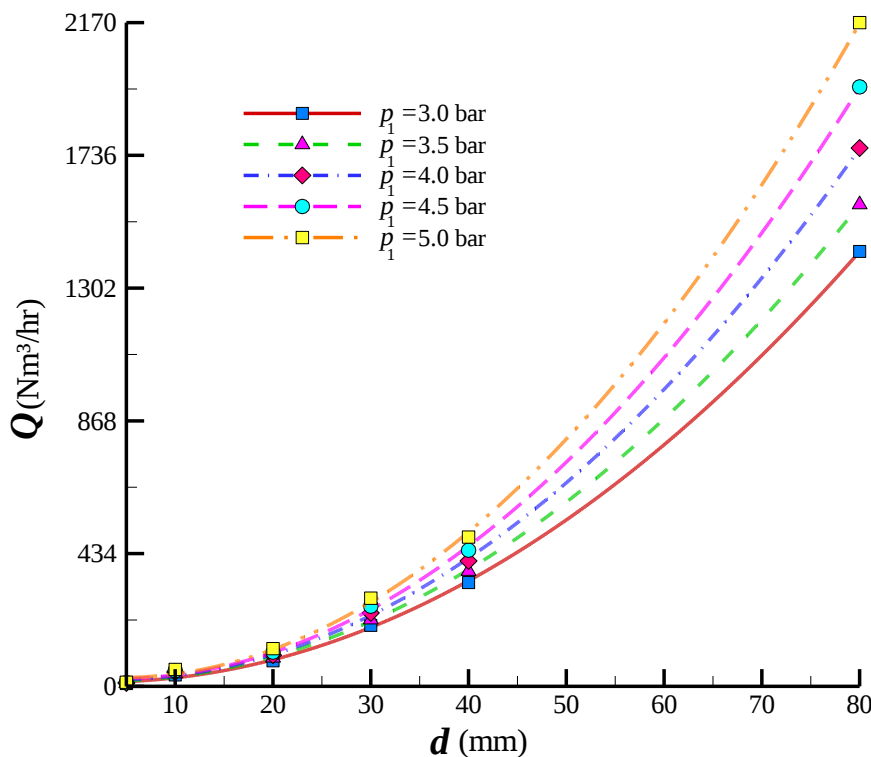


نمودار ۵-۴- تغییرات دبی حجمی ناشی بر حسب قطر سوراخ به ازای مقادیر مختلف فشار ورودی (لوله روزمینی به قطر ۲۰۴/۶ میلی متر)

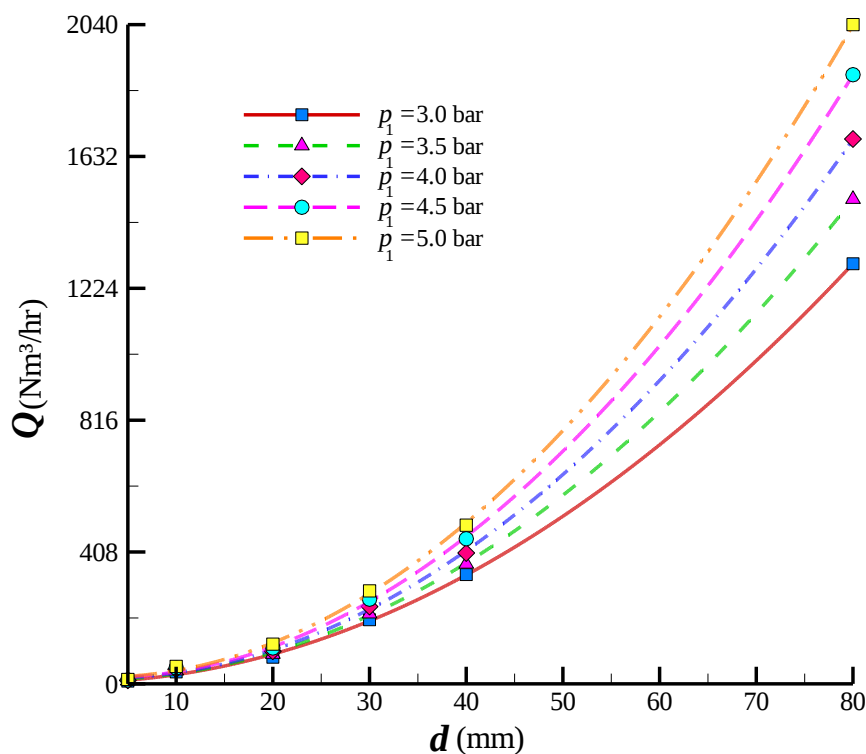
در نمودارهای (۵-۵)، (۵-۶) و (۵-۷) نیز به ترتیب نحوه تغییر دبی حجمی نرمال شده گاز نشت یافته از سوراخ بر حسب قطر سوراخ و برای حالت لوله های مدفون در خاک با قطرهای ۱۱۴/۶، ۱۶۳/۶ و ۲۰۴/۶ میلی متر، رسم شده است. به عنوان نمونه، همان طور که در نمودار (۷-۵) مشاهده می شود، میزان دبی ناشی برای لوله ای با قطر ۲۰۴/۶ میلی متر به ازای سوراخ با قطر ۸۰ میلی متر و فشار ۵ بار در حالت لوله مدفون برابر $2040 \text{ Nm}^3/\text{hr}$ می باشد در حالی که این مقدار برای همین لوله اما در حالت روزمینی برابر $22339/8 \text{ Nm}^3/\text{hr}$ بود که نشان دهنده کاهش چشم گیر مقدار دبی حجمی ناشی در حالت مدفون نسبت به حالت روزمینی بوده و علت آن نیز مقاومت خاک بالای لوله در حالت مدفون می باشد.



نمودار ۵-۵- تغییرات دبی حجمی ناشی بر حسب قطر سوراخ به ازای مقادیر مختلف فشار ورودی (لوله مدفون به قطر ۱۱۴/۶ میلی متر)



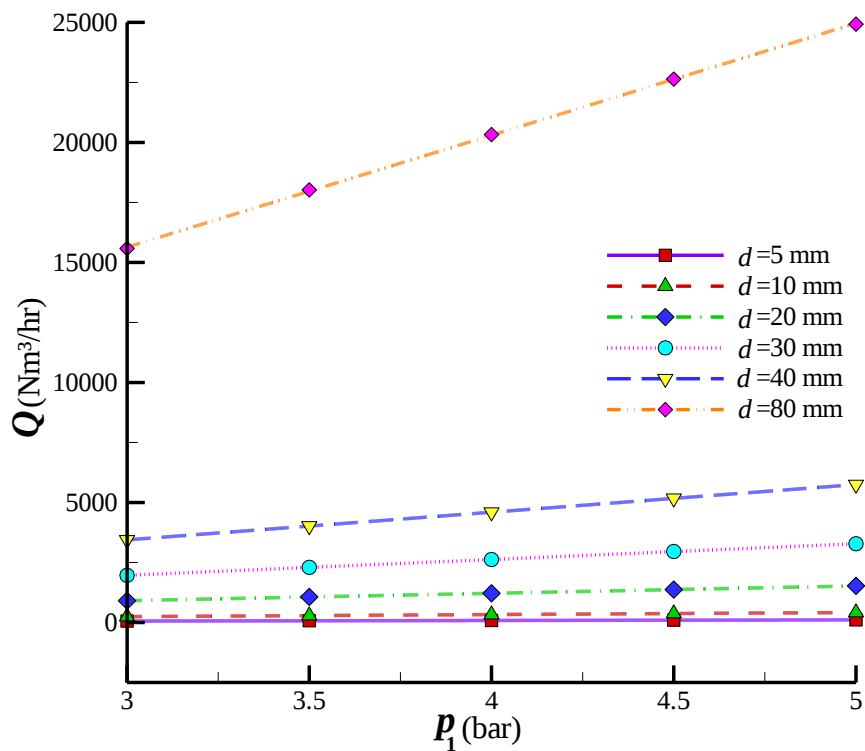
نمودار ۵-۶- تغییرات دبی حجمی ناشی بر حسب قطر سوراخ به ازای مقادیر مختلف فشار ورودی (لوله مدفون به قطر ۱۶۳/۶ میلی متر)



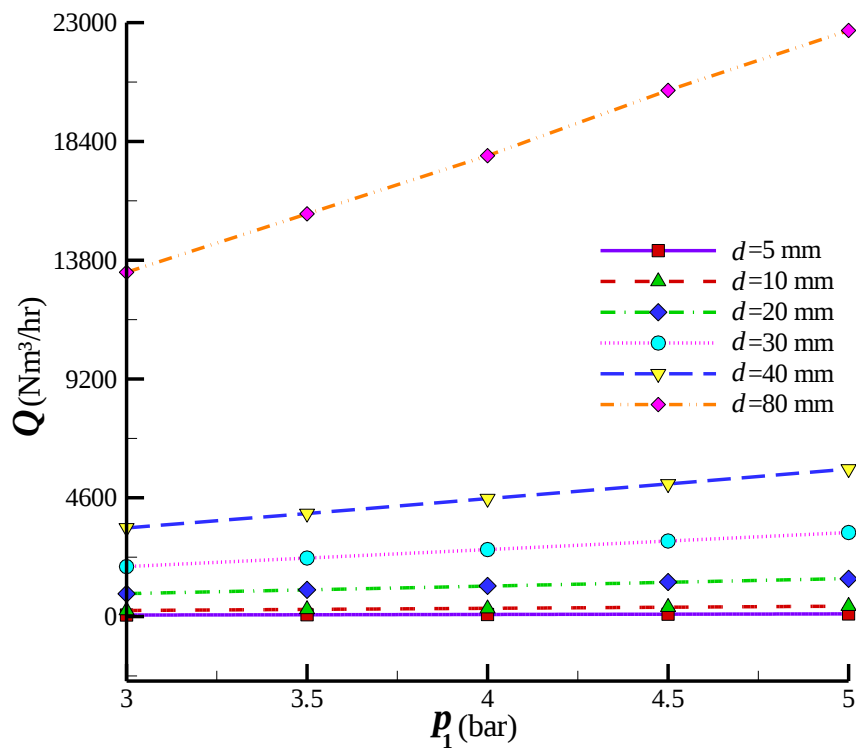
نمودار ۵-۷- تغییرات دبی حجمی ناشی بر حسب قطر سوراخ به‌ازای مقادیر مختلف فشار ورودی (لوله مدفون به قطر ۲۰۴/۶ میلی‌متر)

۵-۲-۲- بررسی تأثیر فشار نقطه ابتدایی بر میزان ناشی

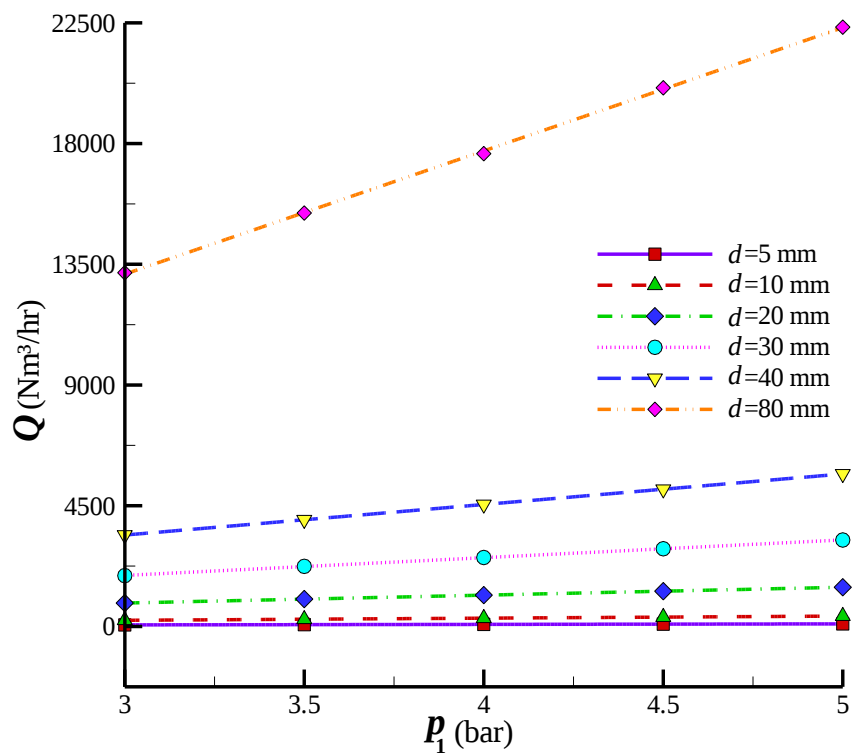
نمودارهای (۵-۸)، (۵-۹) و (۵-۱۰) نشان‌دهنده تغییرات دبی حجمی ناشی نرمال شده بر حسب فشار نقطه ابتدایی به‌ازای سوراخ‌های با قطر مختلف در حالت لوله روزمینی می‌باشد. نمودارها نشان‌دهنده این است که دبی حجمی گاز نشت‌یافته از سوراخ با فشار نقطه ابتدایی یک رابطه مستقیم خطی دارد. همان‌طور که در این نمودارها نیز مشاهده می‌شود، با بزرگ‌تر شدن قطر لوله، دبی حجمی ناشی کاهش پیدا می‌کند.



نمودار ۵-۸- تغییرات دبی حجمی ناشی بر حسب فشار ورودی به‌ازای مقادیر مختلف قطر سوراخ (لوله روزمینی به قطر ۱۱۴/۶ میلی‌متر)

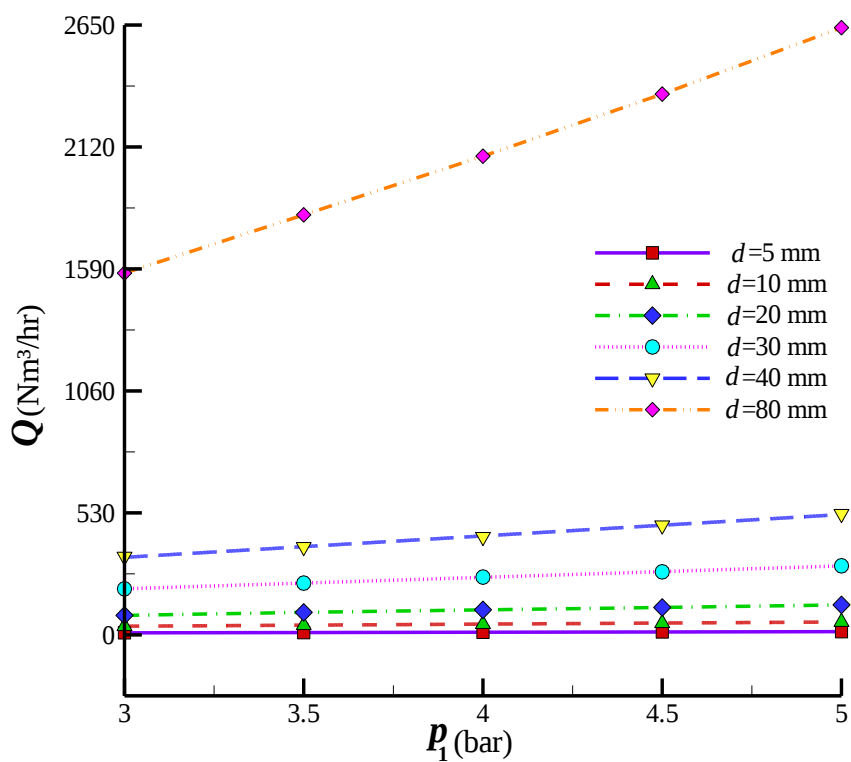


نمودار ۵-۹- تغییرات دبی حجمی ناشی بر حسب فشار ورودی به‌ازای مقادیر مختلف قطر سوراخ (لوله روزمینی به قطر ۱۶۳/۶ میلی‌متر)

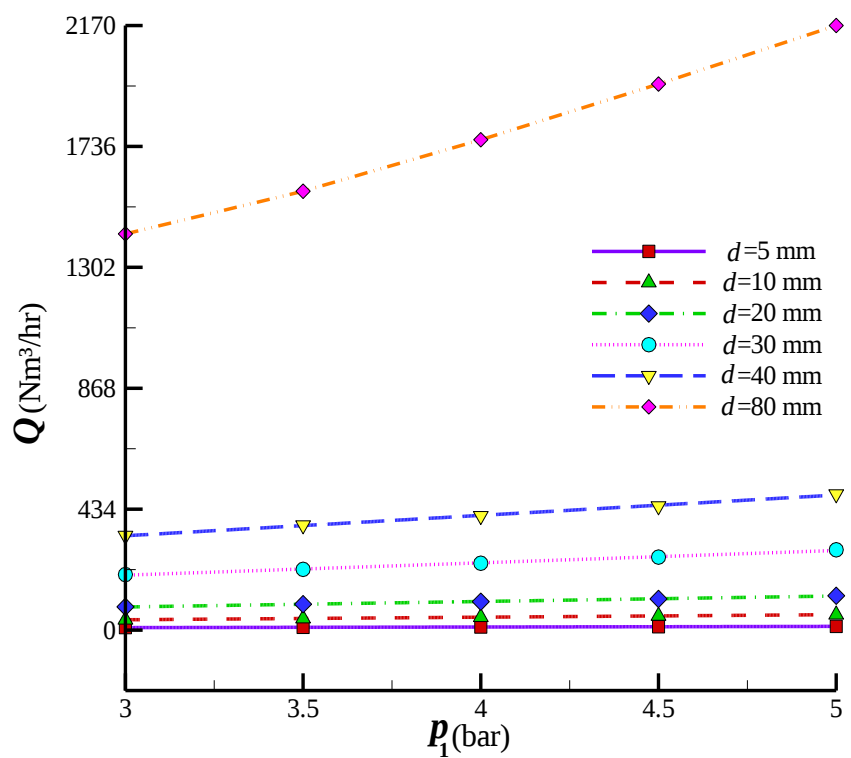


نمودار ۵-۱۰- تغییرات دبی حجمی نشتی بر حسب فشار ورودی به‌ازای مقادیر مختلف قطر سوراخ (لوله روزمینی به قطر ۲۰۴/۶ میلی‌متر)

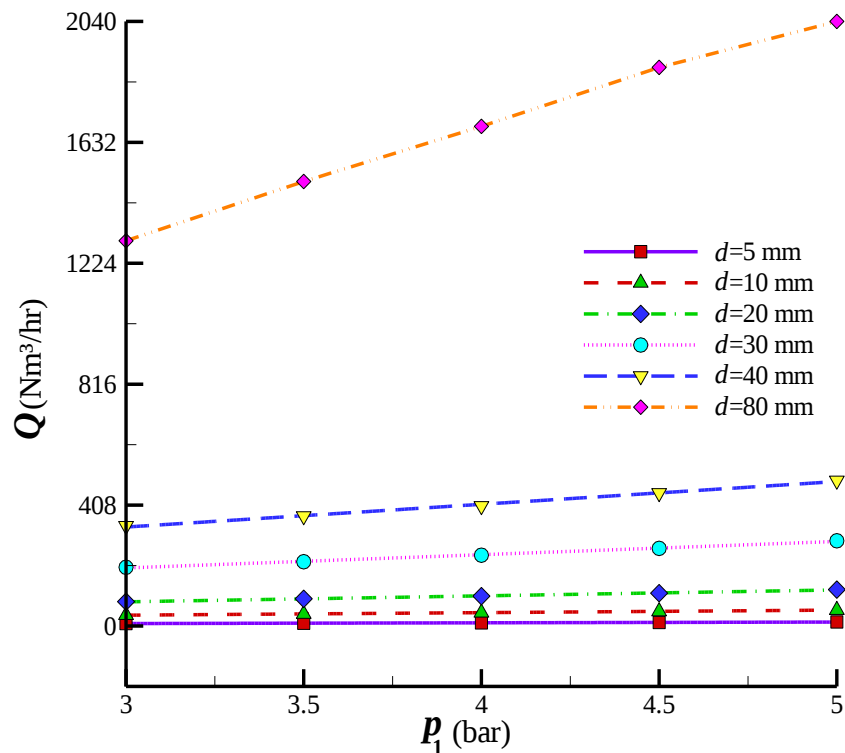
تغییرات دبی حجمی نرمال شده گاز نشت‌یافته از سوراخ بر حسب فشار نقطه ابتدایی در حالت لوله مدفون در خاک در نمودارهای (۵-۱۱)، (۵-۱۲) و (۵-۱۳) رسم شده است. در این نمودارها نیز با کاهش شدید دبی حجمی نشتی نسبت به حالت‌های مشابه لوله روزمینی روبه‌رو هستیم که ناشی از مقاومت خاک می‌باشد. الگوی تغییرات نمودارهای نیز کاملاً منطبق با حالت لوله روزمینی بوده و به-صورت رابطه خطی بوده و با افزایش فشار افزایش می‌یابد.



نمودار ۵-۱۱- تغییرات دبی حجمی ناشی بر حسب فشار ورودی به‌ازای مقادیر مختلف قطر سوراخ (لوله مدفون به قطر ۱۱۴/۶ میلی‌متر)



نمودار ۵-۱۲- تغییرات دبی حجمی ناشی بر حسب فشار ورودی به‌ازای مقادیر مختلف قطر سوراخ (لوله مدفون به قطر ۱۶۳/۶ میلی‌متر)



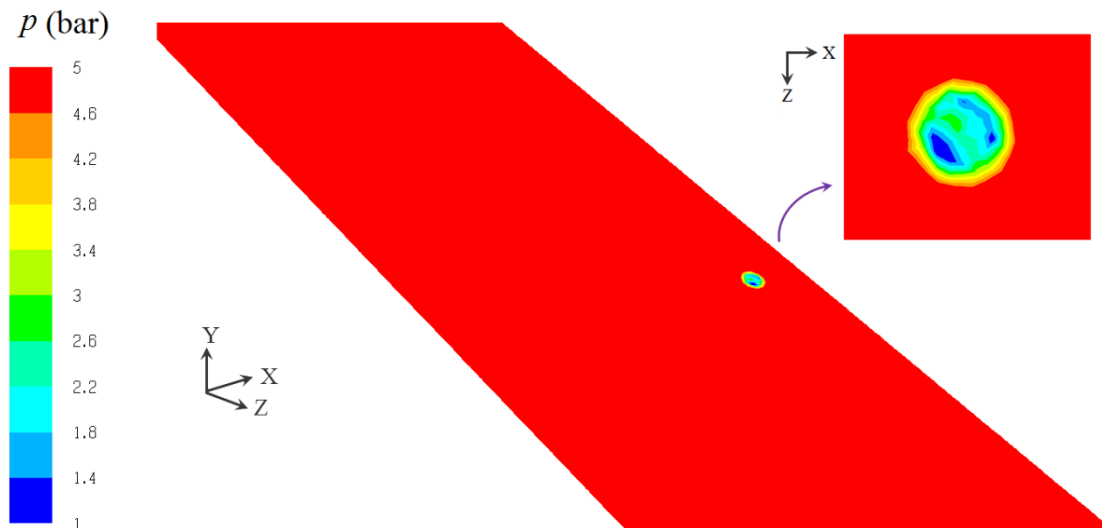
نمودار ۵-۱۳- تغییرات دبی حجمی نشتی بر حسب فشار ورودی به‌ازای مقادیر مختلف قطر سوراخ (لوله مدفون به قطر ۲۰۴/۶ میلی‌متر)

۵-۲-۳- بررسی توزیع کمیت‌ها در دامنه حل

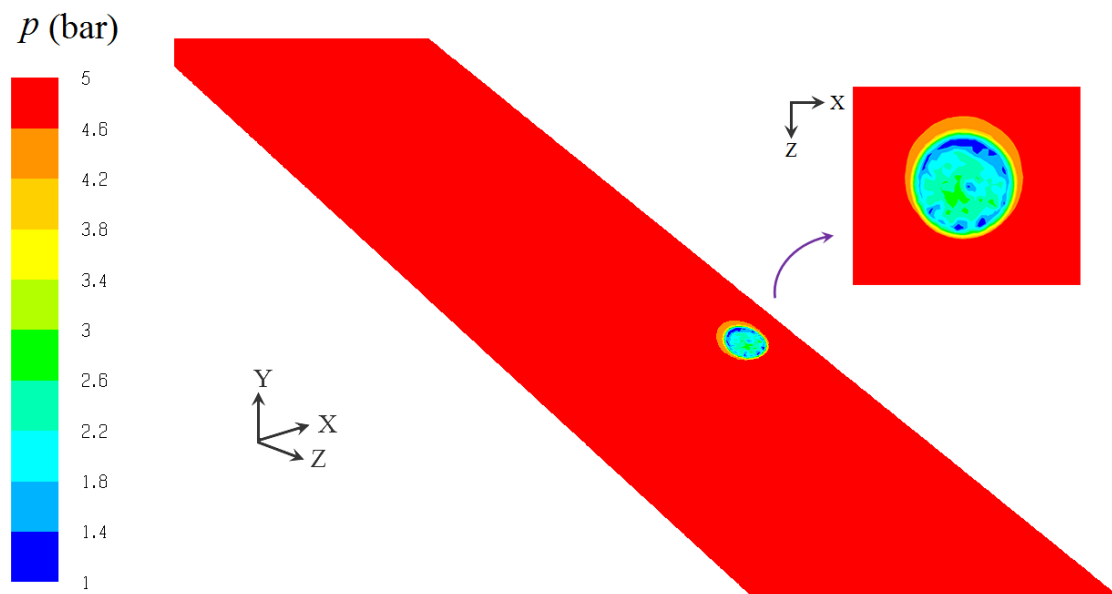
شکل‌های (۵-۱) و (۵-۲)، نشان‌دهنده توزیع فشار مطلق (کانتور فشار مطلق^{۶۸}) در بخشی از طول لوله و هم‌چنین پیرامون سوراخ برای نمونه‌هایی با قطر لوله ۱۶۳/۶ میلی‌متر، فشار نقطه ابتدایی ۵ بار مطلق و سوراخ‌هایی با قطر ۱۰ میلی‌متر تا ۳۰ میلی‌متر می‌باشد. همان‌طور که در بخش‌های قبل اشاره گردید، افت فشار در طول لوله بسیار کم و قابل صرف‌نظر می‌باشد که به‌علت کوچک بودن قطر سوراخ نسبت به قطر لوله و هم‌چنین شرایط حاکم بر خطوط توزیع گاز طبیعی (پایین بودن سطح فشار و کوچک بودن قطر لوله) می‌باشد.

⁶⁸ Contour of absolute pressure

همان‌طور که مشاهده می‌شود، در نزدیکی مقطع آسیب‌دیده تغییرات ناگهانی فشار قابل ملاحظه می‌باشد -
 باشد که علت آن تغییر ناگهانی سطح مقطع در مقطع آسیب‌دیده می‌باشد. همین زیاد کوچک بودن
 سوراخ، باعث می‌شود که در مقطع آسیب‌دیده فشار از فشار محیط بزرگ‌تر باشد.



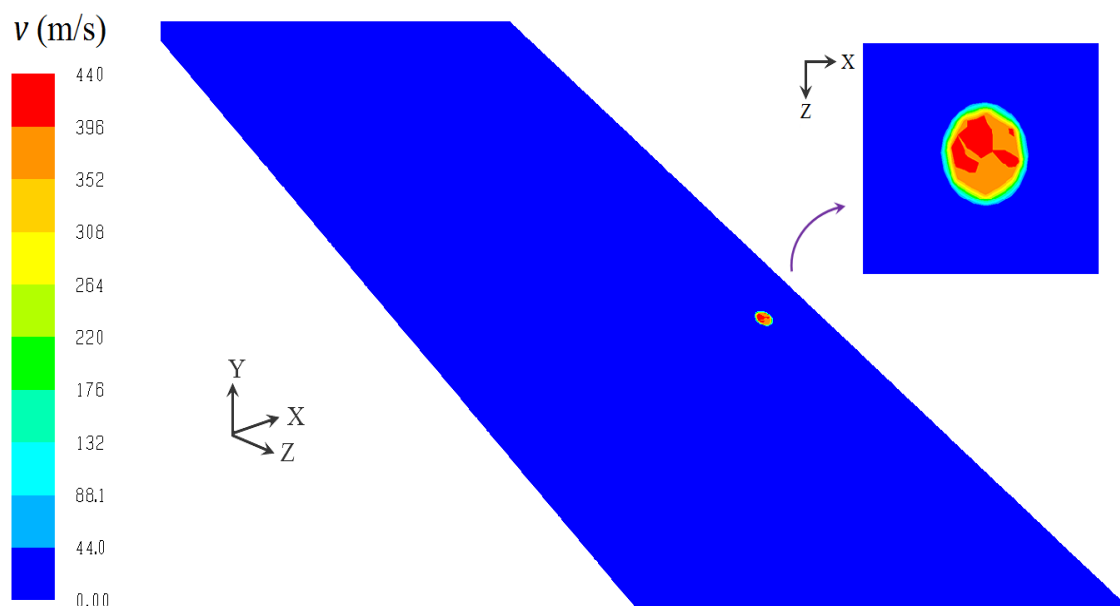
شکل ۵-۱- توزیع فشار مطلق پیرامون سوراخ برای لوله روزمینی با $D = 163/6$ mm، $d = 10$ mm و $p_1 = 5$ bar



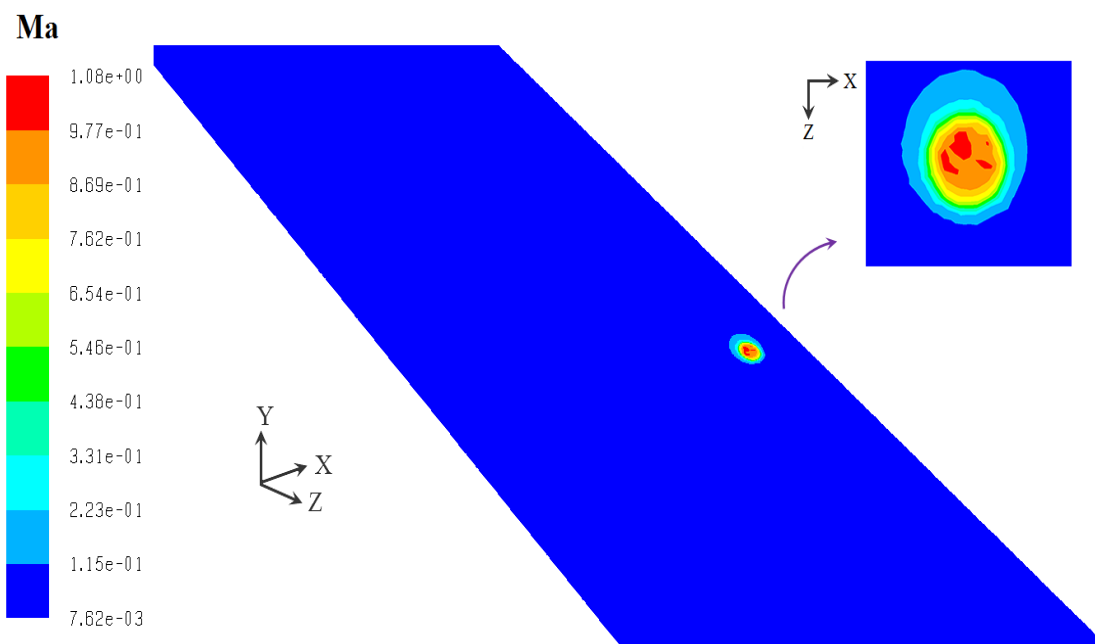
شکل ۵-۲- توزیع فشار مطلق پیرامون سوراخ برای لوله روزمینی با $D = 163/6$ mm، $d = 30$ mm و $p_1 = 5$ bar

با بررسی کلیه توزیع فشارهای مورد بررسی در پژوهش و مقایسه آن‌ها بایکدیگر، مشاهده شد که در قطرهای لوله و سوراخ بزرگ‌تر تغییرات و پراکندگی فشار در پیرامون سوراخ نسبت فشار خط لوله کم‌تر می‌شود؛ یعنی محدوده پیرامون سوراخ که در آن شاهد تغییرات شدید فشار هستیم، با افزایش قطرهای لوله و سوراخ کوچک‌تر می‌شود. همچنین بررسی نتایج نشان می‌دهد که با افزایش قطر سوراخ (به‌ازای مقادیر یکسانی برای قطر لوله و فشار نقطه ابتدایی)، اختلاف فشار مقطع آسیب‌دیده و فشار محیط بیش‌تر شده و اختلاف فشار نقطه ابتدایی و فشار مقطع آسیب‌دیده کم‌تر می‌شود.

دست‌آورد موارد اشاره‌شده در فوق، ایجاد یک موج انبساطی در داخل لوله است که باعث می‌شود که جریان گاز را به سمت سوراخ به حرکت درآورد. شکل (۵-۳)، نشان‌دهنده توزیع سرعت برای لوله‌ای روزمینی با قطر ۱۶۳/۶ میلی‌متر بوده که فشار نقطه ابتدای آن برابر ۵ بار مطلق است و سوراخی به قطر ۱۰ میلی‌متر بر سطح جانبی آن ایجاد شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، در مقطع آسیب‌دیده برآیند (میانگین وزنی یا Mass-Weighted Average) سرعت جریان گاز تمام سلول‌های واقع بر روی مقطع تقریباً برابر سرعت صوت شده و مطابق شکل (۵-۴) عدد ماخ در مقطع آسیب‌دیده تقریباً برابر یک خواهد شد.

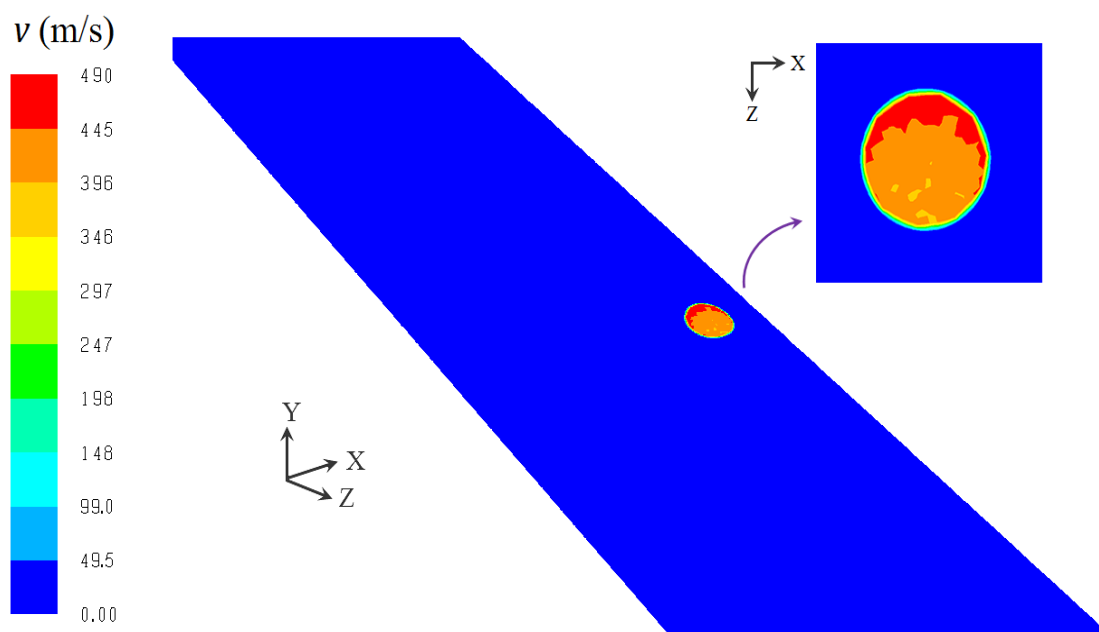


شکل ۵-۳- توزیع سرعت پیرامون سوراخ برای لوله روزمینی با $D = 163/6$ mm، $d = 10$ mm و $p_1 = 5$ bar



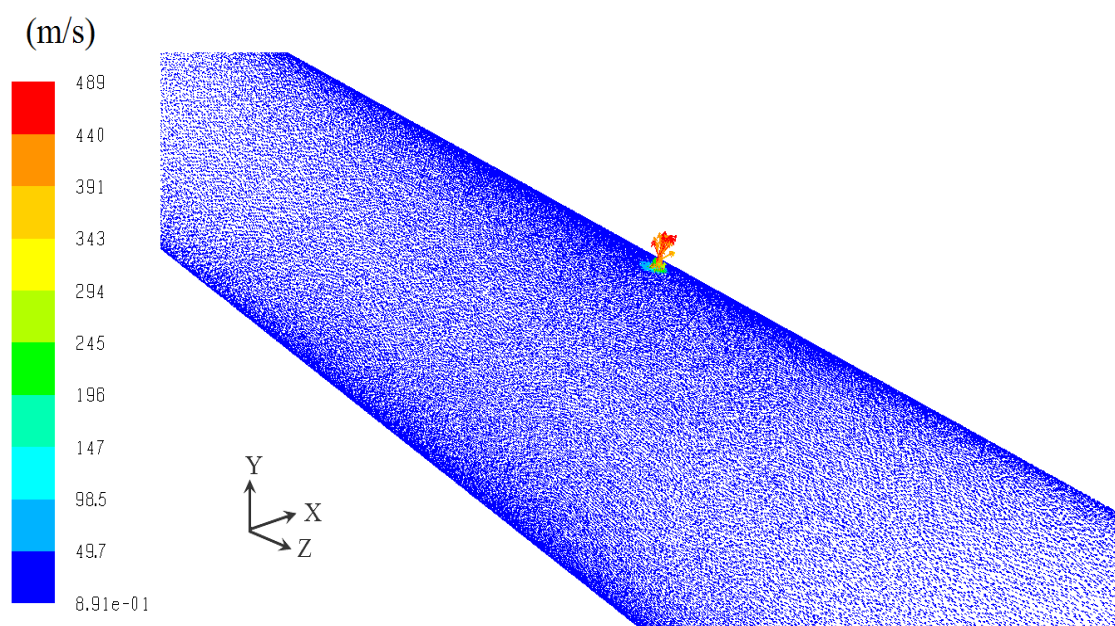
شکل ۵-۴- توزیع عدد ماخ پیرامون سوراخ برای لوله روزمینی با $D = 163/6$ mm، $d = 10$ mm و $p_1 = 5$ bar

شکل (۵-۵) نیز نشان‌دهنده توزیع سرعت درون لوله و حول سوراخ برای لوله‌ای با قطر $163/6$ mm و فشار نقطه ابتدایی 5 bar است که سوراخی به قطر 30 mm بر سطح آن ایجاد شده است. با مقایسه شکل‌های (۵-۵) و (۳-۵) مشاهده می‌شود که سرعت جریان خروجی از مقطع آسیب‌دیده با افزایش قطر سوراخ افزایش می‌یابد که همین امر با افزایش دبی ناشی می‌گردد.

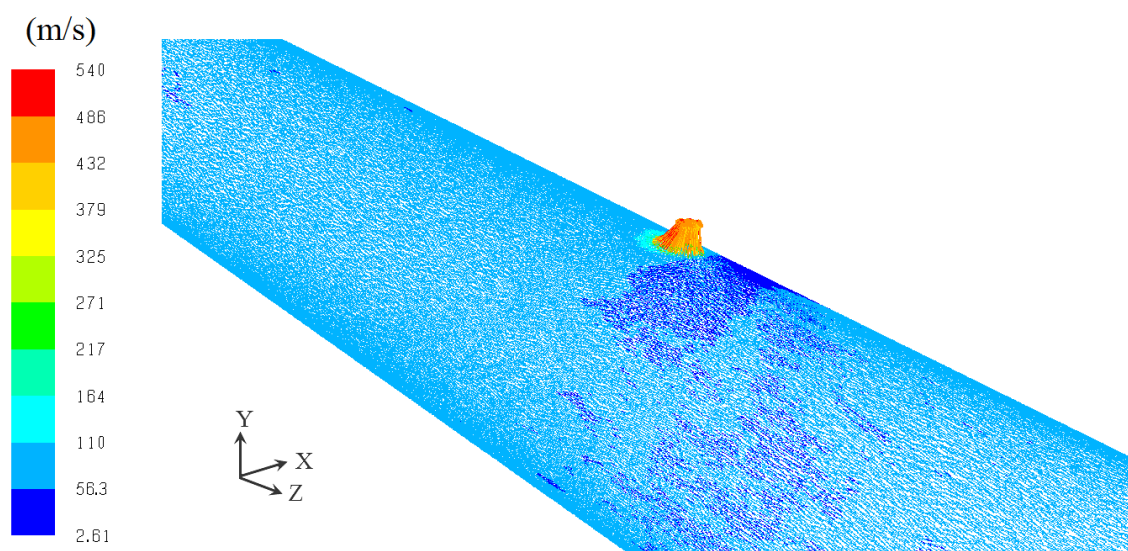


شکل ۵-۵- توزیع سرعت پیرامون سوراخ برای لوله روزمینی با $D = 163/6$ mm، $d = 30$ mm و $p_1 = 5$ bar

در شکل‌های (۵-۶) و (۵-۷) نمونه‌هایی از بردار سرعت در مجاورت مقطع آسیب‌دیده رسم شده است.



شکل ۵-۶- بردارهای سرعت پیرامون سوراخ برای لوله روزمینی با $D = 163/6$ mm، $d = 10$ mm و $p_1 = 5$ bar

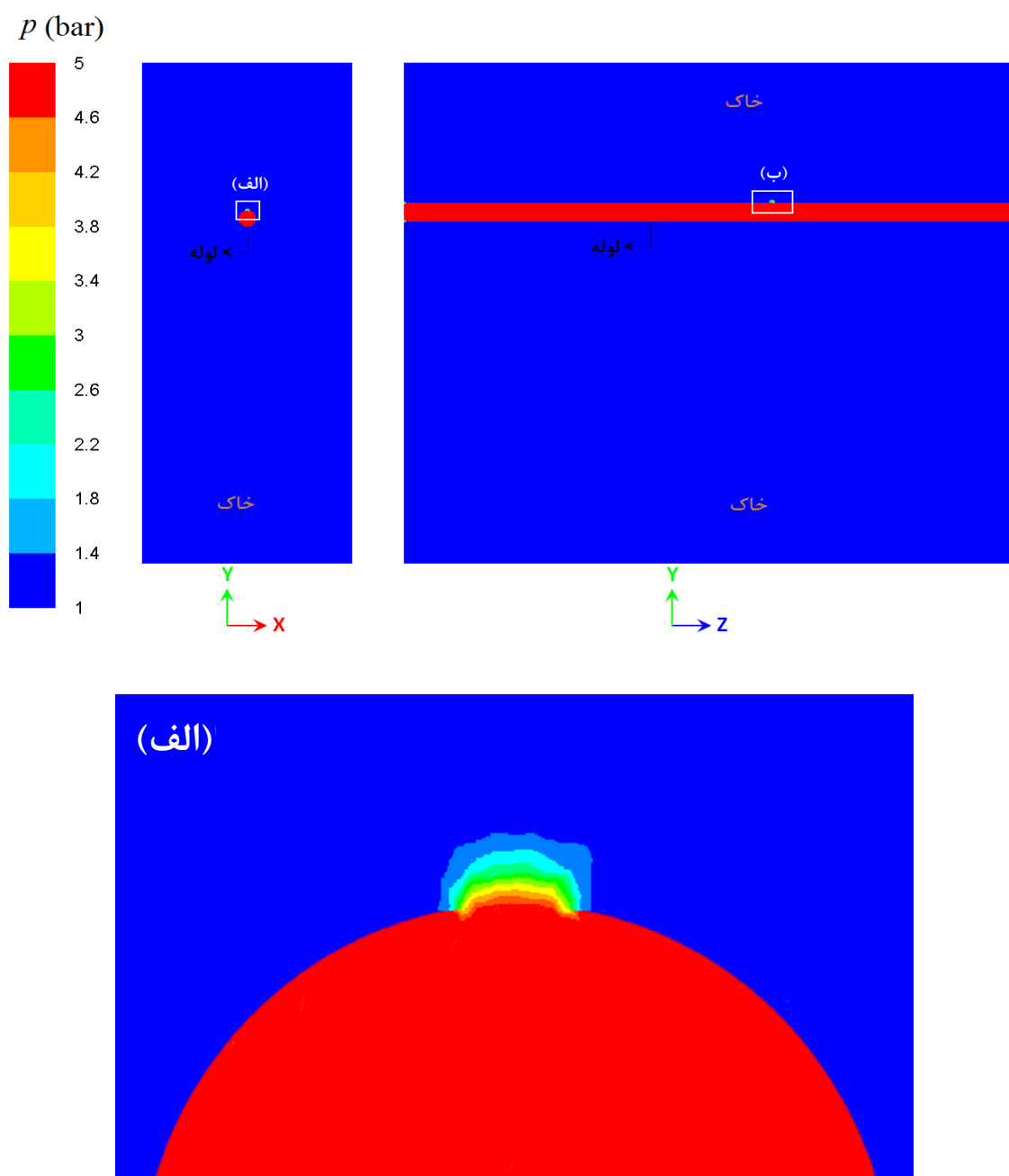


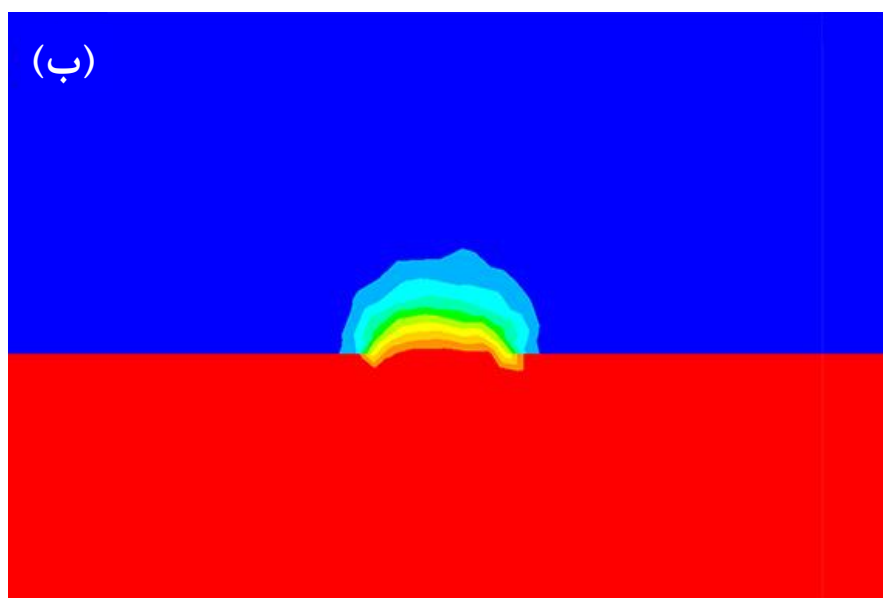
شکل ۵-۷- بردارهای سرعت پیرامون سوراخ برای لوله روزمینی با $D = 163/6$ mm، $d = 30$ mm و $p_1 = 5$ bar

در این شکل‌ها شاهد برگشت مقداری گاز از سمت پایین‌دست لوله به سمت مقطع آسیب‌دیده هستیم که نشان‌دهنده تأثیر در نظر گرفتن طول لوله بعد از سوراخ هستند. از طرفی با مقایسه این شکل‌ها

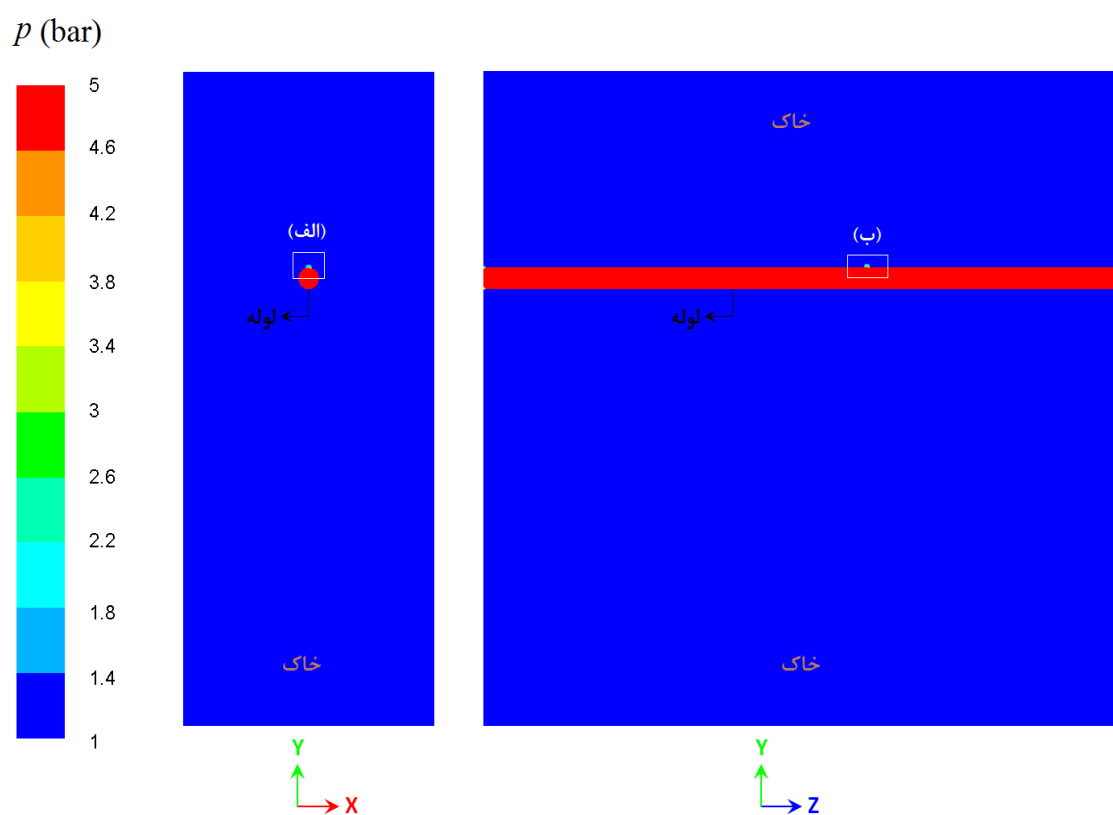
مشخص می‌شود که با افزایش قطر سوراخ میزان جریان برگشتی از سمت پایین‌دست افزایش می‌یابد. لذا با در نظر گرفتن این شکل‌ها، بزرگ‌تر بودن مقادیر دبی ناشی نسبت به حالتی که طول لوله بعد از سوراخ در نظر گرفته نشده است، کاملاً قابل درک و مشاهده است.

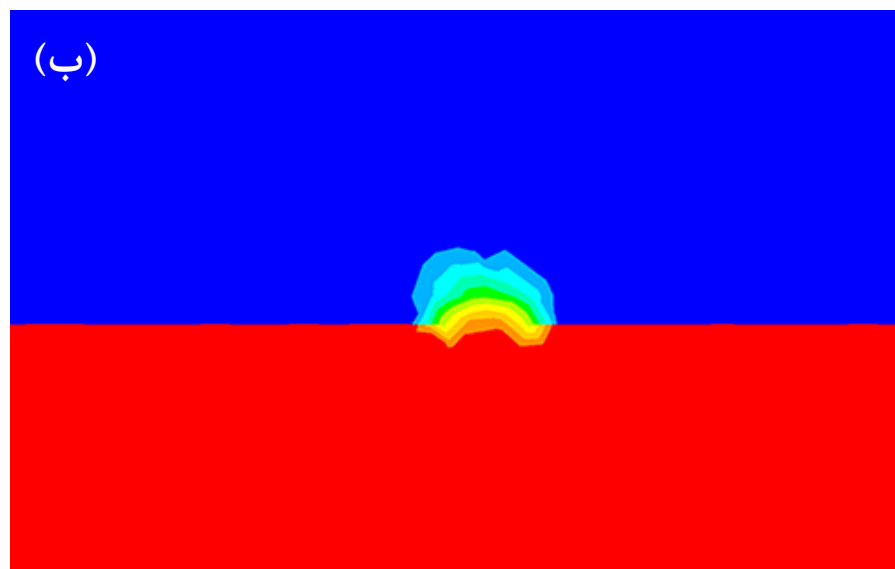
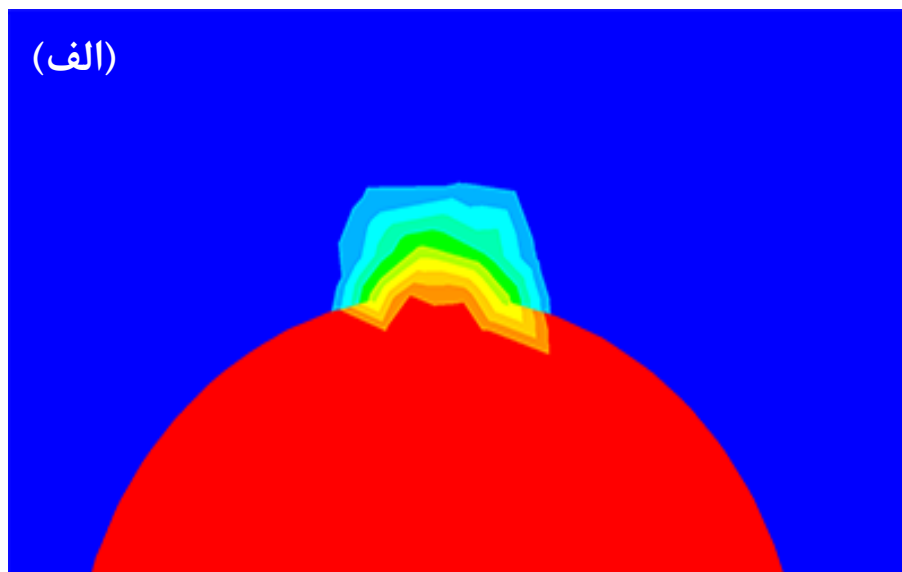
توزیع فشار مطلق درون لوله و خاک و در پیرامون سوراخ برای حالت لوله مدفون در شکل‌های (۵-۸) و (۵-۹) به‌عنوان نمونه رسم شده است. فشار ناشی از خاک بالای مقطع آسیب‌دیده، باعث می‌شود تا فشار در ورودی و خروجی مقطع آسیب‌دیده متفاوت باشد.





شکل ۵-۸- توزیع فشار مطلق در لوله مدفون و بزرگنمایی آن در پیرامون سوراخ در صفحه، (الف) xy ، (ب) yz ،
گذرنده از مرکز سوراخ ($D = 163/6$ mm, $d = 10$ mm و $p_1 = 5$ bar)

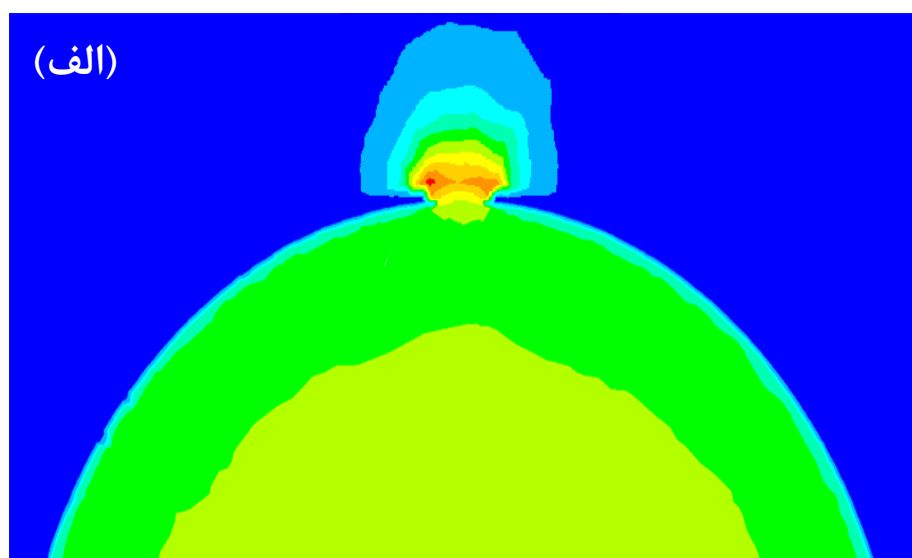
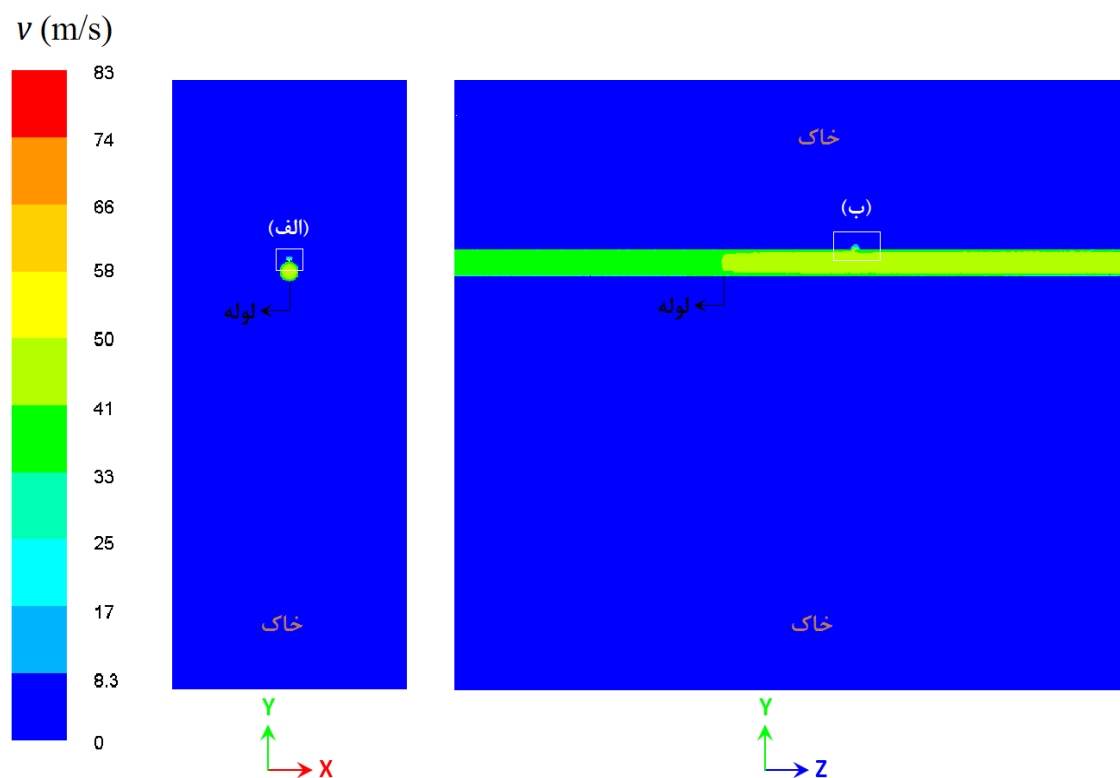


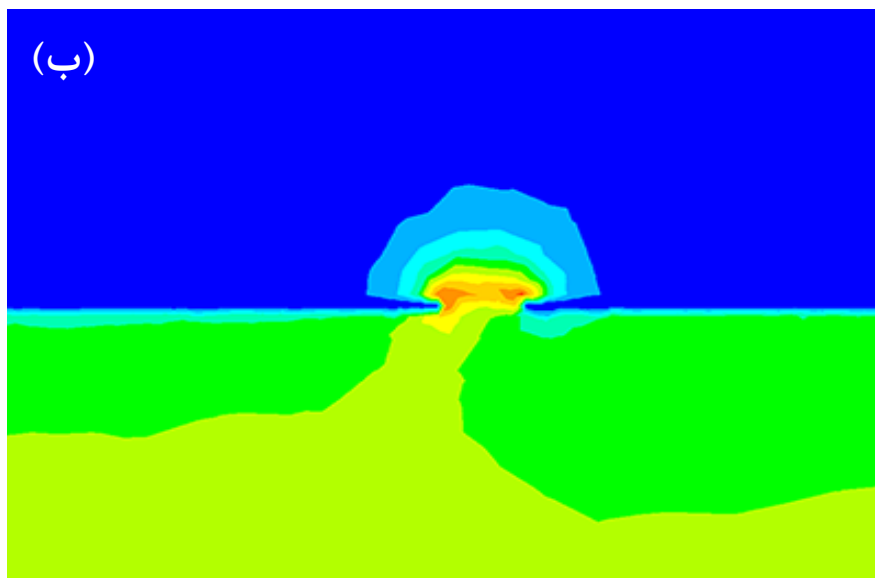


شکل ۵-۹- توزیع فشار مطلق در لوله مدفون و بزرگنمایی آن در پیرامون سوراخ در صفحه، (الف) xy، (ب) yz، گذرنده از مرکز سوراخ ($D = 163/6 \text{ mm}$ ، $d = 30 \text{ mm}$ و $p_1 = 5 \text{ bar}$)

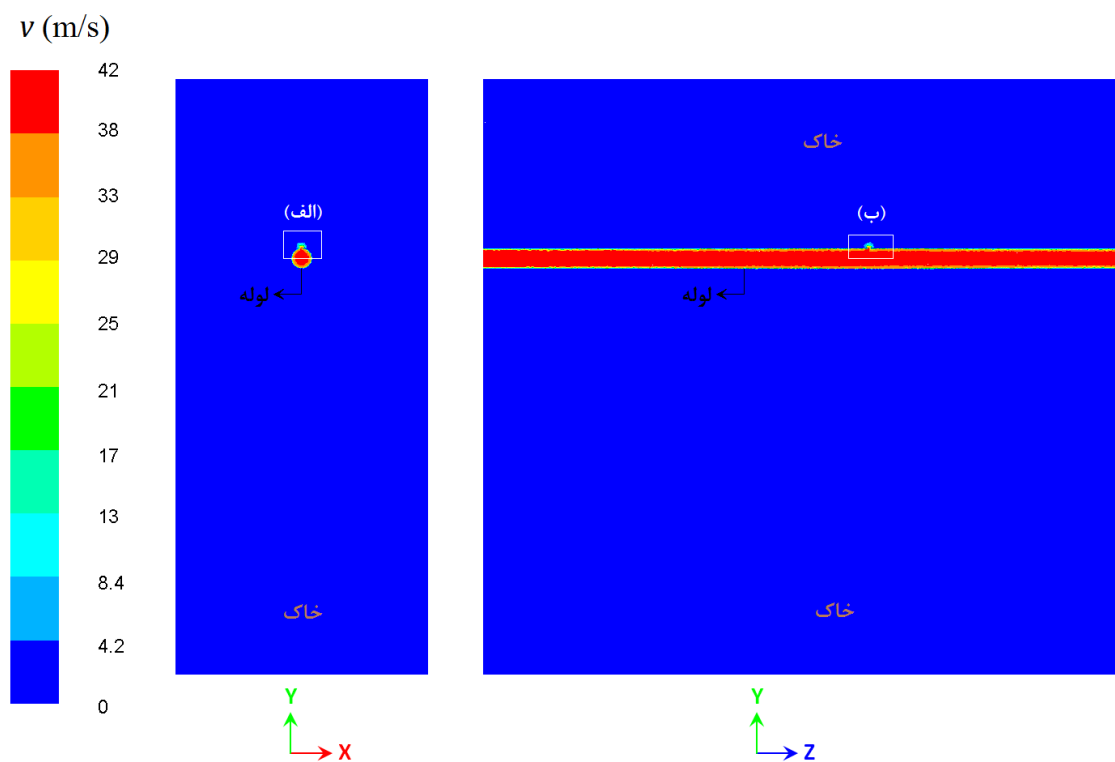
در حالت لوله مدفون در خاک، مقطع آسیب‌دیده یک مقطع مشترک بین لوله و خاک می‌باشد. شکل- های (۵-۱۰) و (۵-۱۱) مربوط به توزیع سرعت درون لوله و خاک در نزدیکی سوراخ برای لوله مدفون در خاک می‌باشد. مطابق این شکل‌ها، در حالت لوله مدفون در خاک، گاز خروجی از سوراخ به هنگام

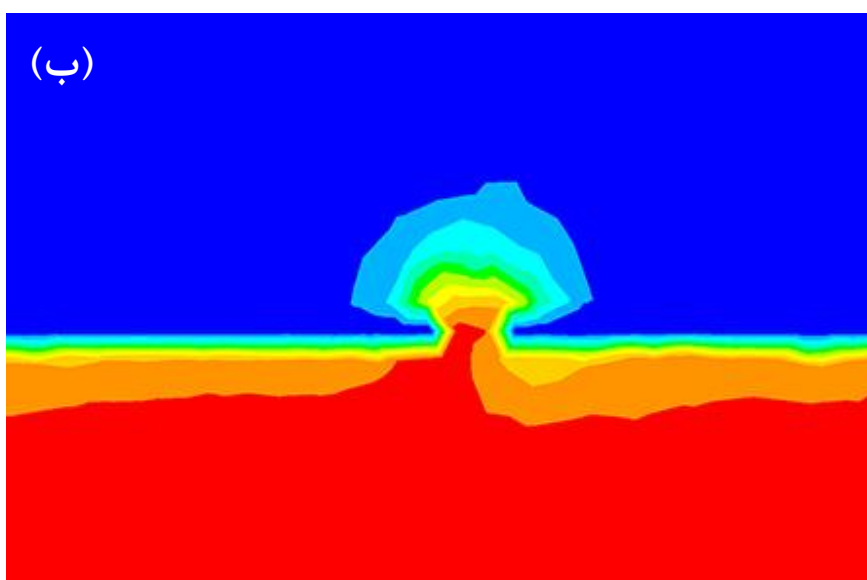
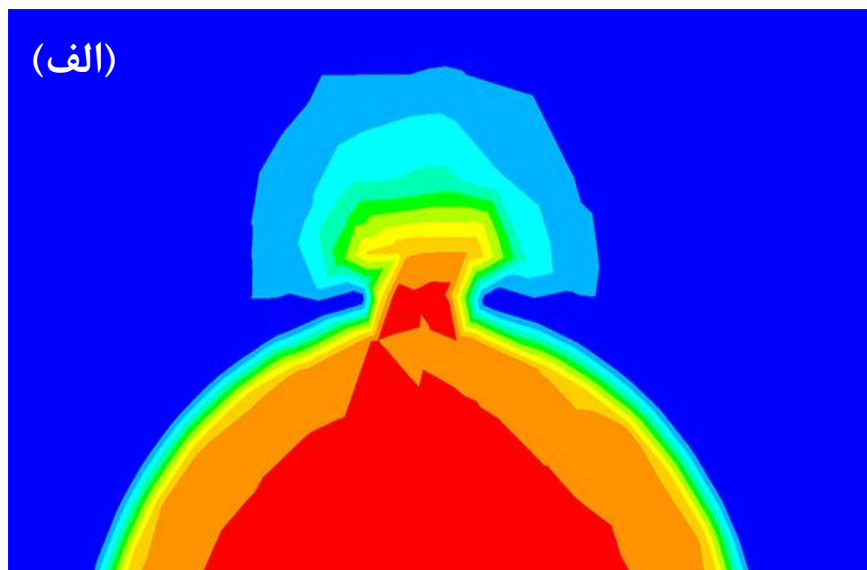
خروج از آن با مقاومت خاک روبرو شده و سرعت گاز در سوراخ به مقدار قابل توجهی نسبت به لوله روزمینی کاهش می‌یابد و شاهد یک جریان مادون صوت هستیم.





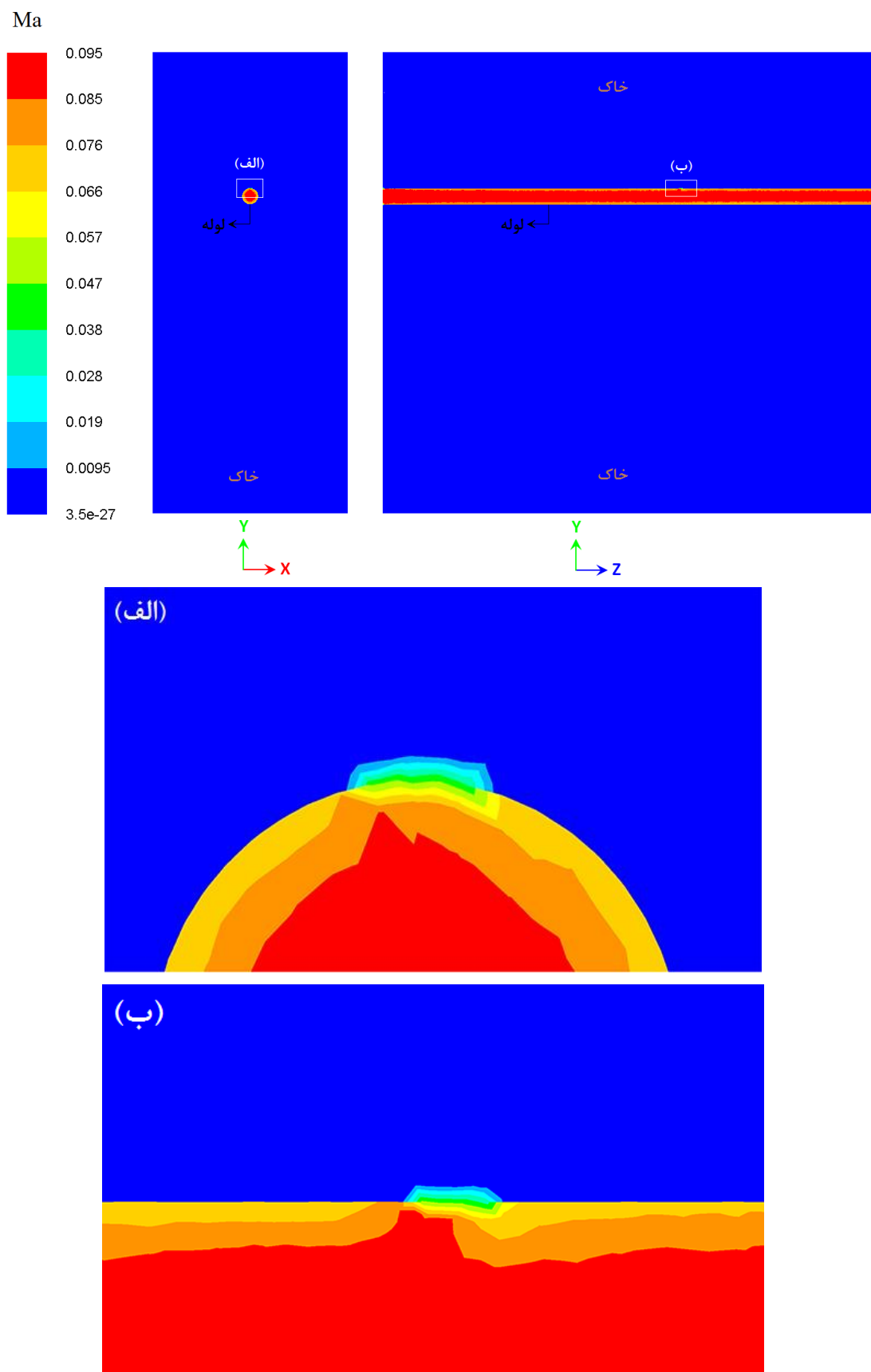
شکل ۵-۱۰- توزیع سرعت در لوله مدفون و بزرگنمایی آن در پیرامون سوراخ در صفحه، (الف) xy، (ب) yz، گذرنده از مرکز سوراخ ($p_1 = 5 \text{ bar}$ و $d = 10 \text{ mm}$, $D = 163/6 \text{ mm}$)





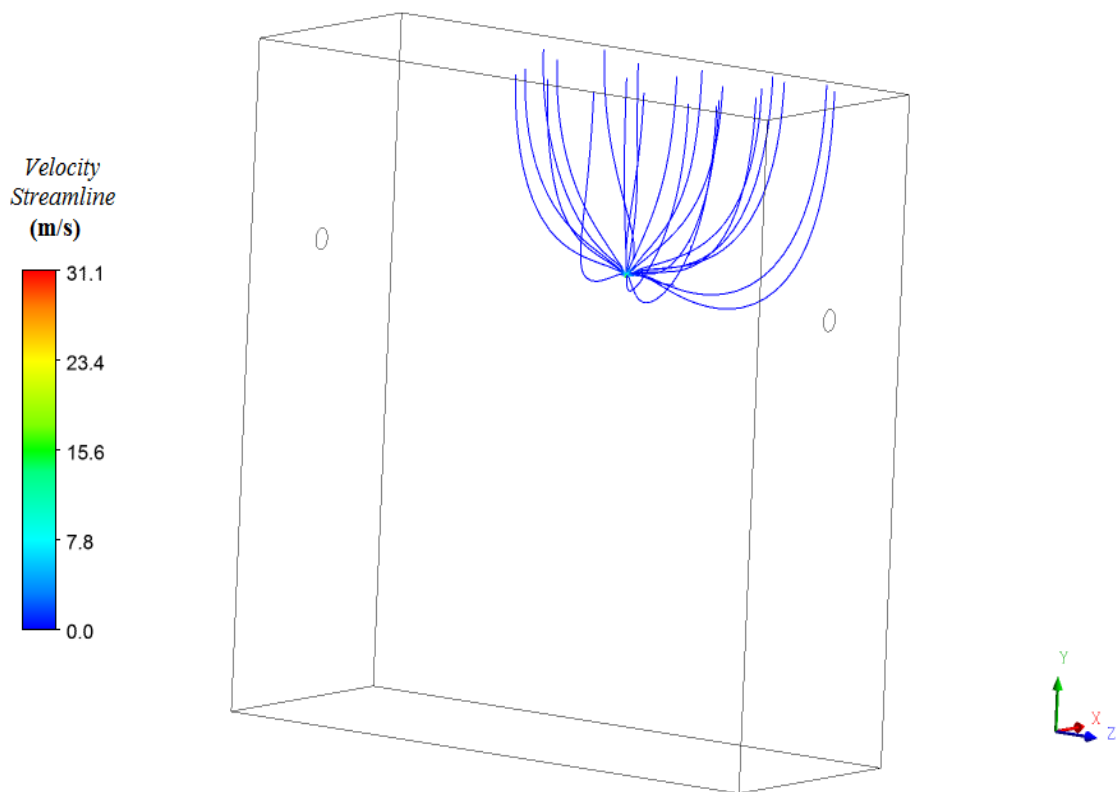
شکل ۵-۱۱- توزیع سرعت در لوله مدفون و بزرگنمایی آن در پیرامون سوراخ در صفحه، (الف) xy ، (ب) yz ، گذرنده از مرکز سوراخ ($D = 163/6 \text{ mm}$ ، $d = 30 \text{ mm}$ و $p_1 = 5 \text{ bar}$)

مطالب اشاره شده در فوق، در شکل (۵-۱۲) که نشان دهنده توزیع عدد ماخ در لوله و خاک می باشد قابل مشاهده است. مطابق شکل (۵-۱۲) برآیند وزنی عدد ماخ در مقطع آسیب دیده و همچنین در داخل خاک، کوچک تر از یک می باشد.



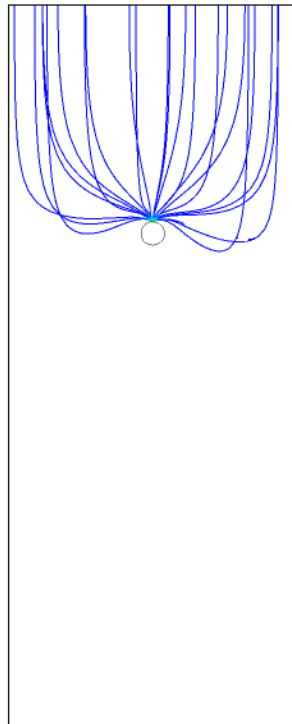
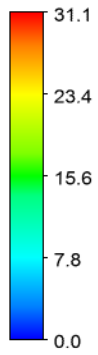
شکل ۵-۱۲- توزیع عدد ماخ در لوله مدفون و بزرگنمایی آن در پیرامون سوراخ در صفحه، (الف) xy ، (ب) yz ، گذرنده از مرکز سوراخ ($D = 163/6 \text{ mm}$ ، $d = 30 \text{ mm}$ و $p_1 = 5 \text{ bar}$)

شکل (۵-۱۳) نشان دهنده مسیر جریان (برحسب سرعت) برای لوله مدفون با قطر ۱۶۳/۶ mm می باشد. همانطور که در این شکل مشاهده می شود، جریان خروجی از سوراخ در جهات مختلف درون خاک پخش می گردد؛ به طوریکه این جریان ورودی به خاک، پس از برخورد با ذرات خاک از مسیر حرکت خود منحرف شده و بخشی از آن به خاک موجود در زیر لوله نفوذ کرده و پس از آن مجدداً به سمت سطح زمین باز می گردد. بر اساس مسیرهای عبور جریان گاز طبیعی داخل خاک و با توجه به این که جریان گاز در حالت واقعی با مقاومت خاک در سه جهت (X, Y و Z) روبه رو است، مدل سازی پدیده نشت گاز در حالت مدفون بایستی حتماً به صورت سه بعدی انجام پذیرد و در غیر این صورت از حالت واقعی به دور است و خطای محاسباتی زیادی در نتایج وجود خواهد داشت.



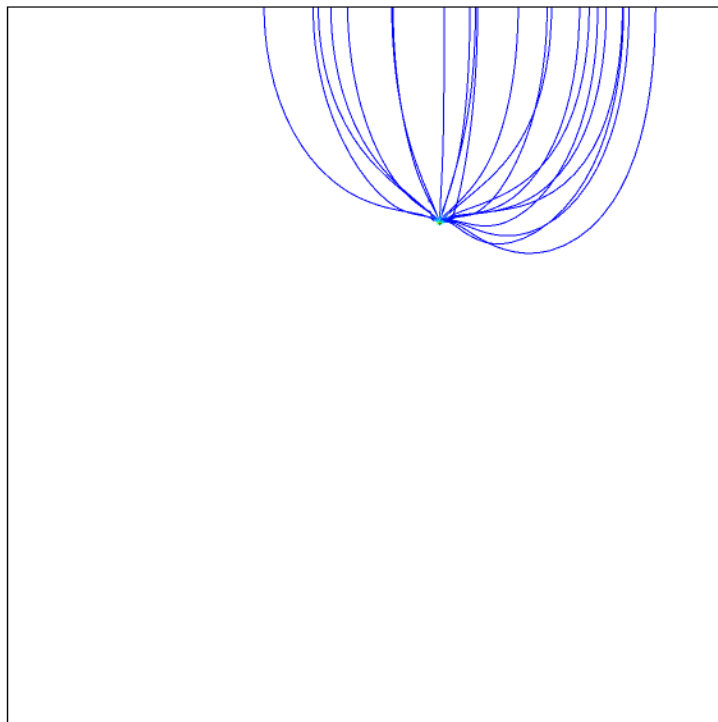
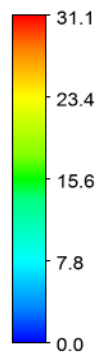
(الف)

Velocity
Streamline
(m/s)



(ب)

Velocity
Streamline
(m/s)



(پ)

شکل ۵-۱۳- مسیر جریان خروجی از سوراخ برای لوله مدفون، در نمای (الف) سه‌بعدی، (ب) صفحه XY ،
(پ) صفحه YZ ، ($D = 163/6$ mm، $d = 30$ mm و $p_1 = 3$ bar)

۵-۳- ارائه روابطی جهت محاسبه دبی حجمی نشتی

در بخش قبل، نتایج مربوط به شبیه‌سازی عددی انجام‌گرفته در این پژوهش به‌طور کامل تشریح گردید و نمونه‌های مختلفی از این نتایج ارائه گردید. بر اساس نتایج حاصل از بخش قبل، در این بخش به ارائه یک رابطه هم‌بسته برای هر یک از حالت‌های لوله روزمینی و مدفون پرداخته می‌شود.

با توجه به نمودارها و با بررسی تغییرات مربوط به قطر سوراخ، قطر لوله و فشار نقطه ابتدایی مشاهده شد که دبی حجمی نشتی با قطر سوراخ، نسبت قطر سوراخ به قطر لوله و فشار نقطه ابتدایی، به‌ترتیب به‌صورت توابع درجه دو، درجه چهار و خطی تغییر پیدا می‌کند. بر این اساس، جهت محاسبه دبی حجمی نرمال شده گاز نشت‌یافته از سوراخ روابط هم‌بسته (۵-۱) و (۵-۲) ارائه شده است که به‌ترتیب مربوط به لوله روزمینی و لوله مدفون در خاک می‌باشند.

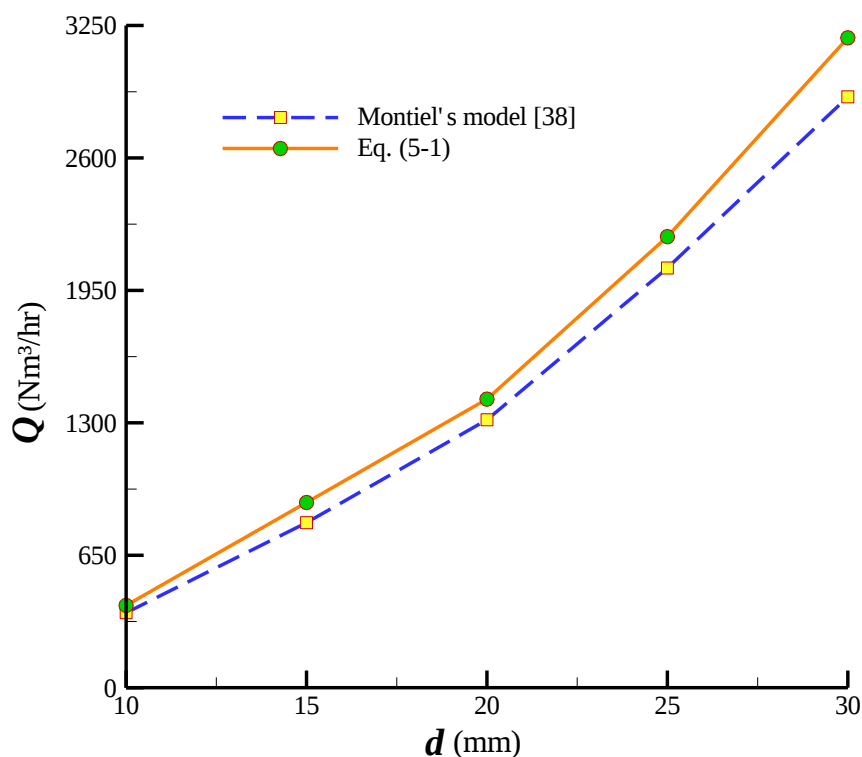
$$Q = \begin{cases} 0.108(1 + \beta^4) d^2 p_1 ; & d \leq 15 \text{ mm} \\ 0.1708(1 + \beta^4) d^2 p_1 ; & 15 < d \leq 80 \text{ mm} \end{cases} \quad (1-5)$$

$$Q = \begin{cases} 0.117(1 + \beta^4) d^2 p_1 ; & d \leq 15 \text{ mm} \\ 0.0677(1 + \beta^4) d^2 p_1 ; & 15 < d \leq 80 \text{ mm} \end{cases} \quad (2-5)$$

در این روابط، Q دبی حجمی نرمال‌شده گاز (Nm^3/hr)، d قطر سوراخ (mm)، $\beta = d/D$ نسبت قطر سوراخ به قطر لوله و p_1 فشار نقطه ابتدایی (bar abs) می‌باشد. لازم به‌ذکر است که این روابط بر اساس شرایط کاری خطوط توزیع گاز به‌دست آمده‌اند و برای سه لوله پر کاربرد مورد استفاده در خطوط توزیع گاز درون‌شهری (لوله‌های ۴، ۶ و ۸ اینچ)، در محدوده فشار $5 \leq p_1 \leq 3$ بار مطلق و برای سوراخ‌های کوچک با قطری در بازه $5 \leq d \leq 80$ میلی‌متر دارای دقت مناسبی می‌باشند. ضمناً همان‌طور که در مدل هندسی مورد بررسی نیز نشان داده شده بود، سوراخ ایجاد شده در قسمت

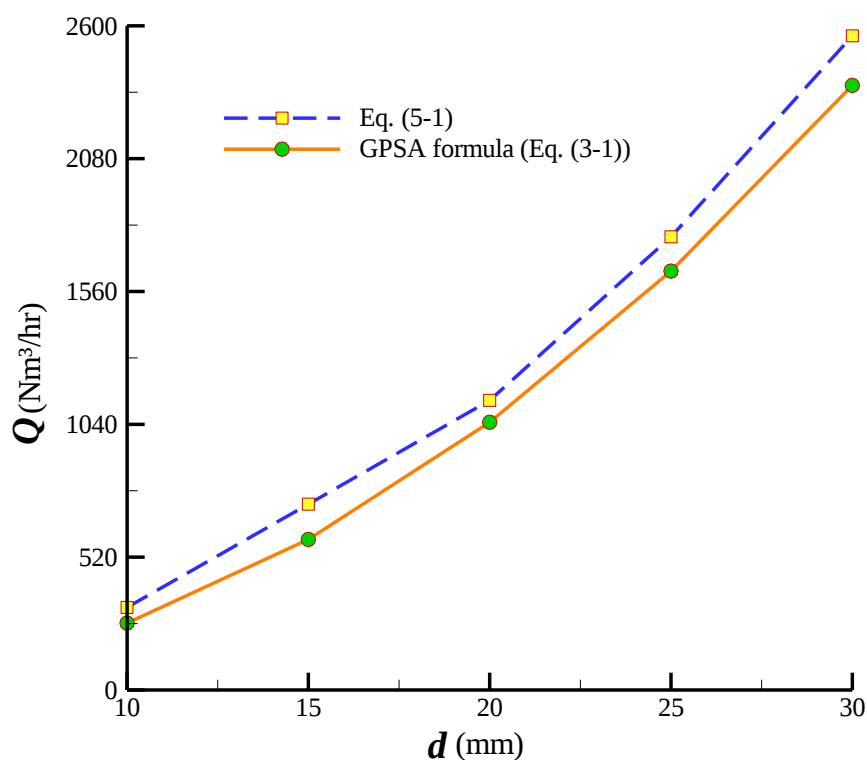
فوقانی لوله (در بالای سطح جانبی) قرار دارد. همان طور که در دو رابطه فوق مشاهده می شود الگوی تغییرات کمیت ها در روابط ارائه شده منطبق با فرمول GPSA می باشد.

در ادامه به مقایسه نتایج حاصل از رابطه (۵-۱) با نتایج پژوهش های گذشته و همچنین اعتبارسنجی آن پرداخته می شود. در نمودار (۵-۱۴) نتایج حاصل رابطه (۵-۱) و نتایج مدل منتیل و همکاران [۳۸] با یکدیگر مقایسه شده اند. لذا این نمودار مربوط به لوله روزمینی با قطر ۱۶۳/۶ میلی متر و فشار ۵ بار مطلق می باشد. همان طور که در بخش های گذشته نیز بیان گردید، به دلیل جریان های برگشتی از سمت پایین دست، بایستی شاهد بزرگ تر بودن مقادیر دبی حجمی نسبت به تحقیق منتیل و همکاران [۳۸] باشیم؛ به طوری که مطابق نمودار (۵-۱۴)، بیشترین و کمترین مقادیر درصد اختلاف نسبی نتایج نسبت به تحقیق منتیل و همکاران [۳۸] به ترتیب برابر ۷/۴۷٪ و ۱۲/۲۵٪ می باشد.



نمودار ۵-۱۴- مقایسه بین نتایج حاصل از رابطه (۵-۱) و پژوهش منتیل و همکاران

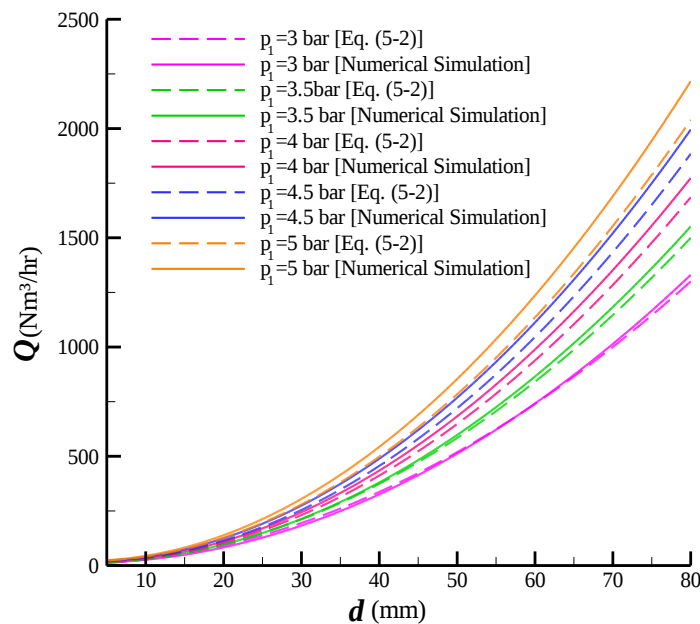
در نمودار (۵-۱۵)، به عنوان یک نمونه، به مقایسه نتایج حاصل از رابطه (۵-۱) و نتایج حاصل از فرمول GPSA، برای لوله با قطر ۱۱۴/۶ میلی متر با فشار نقطه ابتدایی ۴ بار مطلق پرداخته شده است. همان طور که پیش تر نیز بیان گردید نحوه تغییرات کمیت ها بین دو رابطه مشابه می باشد و دو رابطه، در ضریب ثابت موجود در رابطه با یکدیگر اختلاف دارند؛ لذا در این نمودار، درصد اختلاف نسبی نتایج نسبت به نتایج فرمول GPSA برای سوراخ هایی تا قطر ۱۵ میلی متر برابر ۲۳/۴۷٪ و برای سوراخ های بزرگ تر از ۱۵ میلی متر برابر ۸/۱۹٪ می باشد.



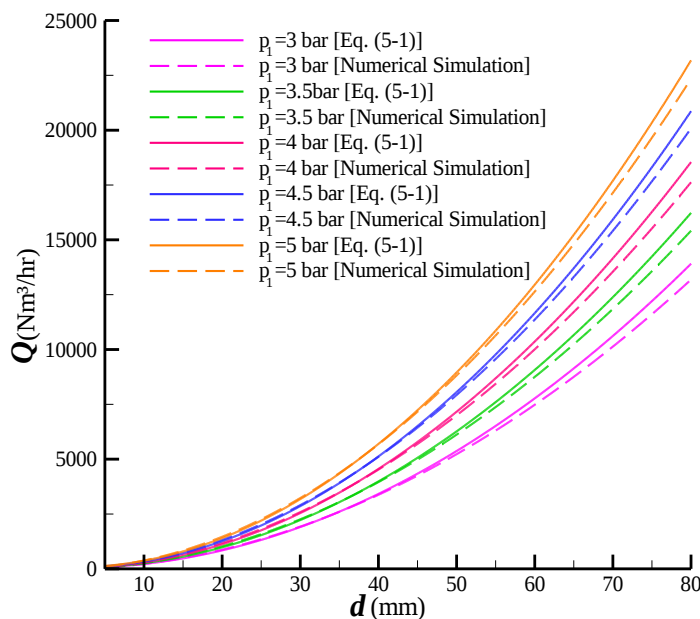
نمودار ۵-۱۵- مقایسه بین نتایج حاصل از رابطه (۵-۱) و فرمول GPSA (برای $D = 114.6$ mm و $p_1 = 4$ bar)

در حالت لوله مدفون در خاک پژوهش های صورت گرفته بسیار محدود بوده و جهت مقایسه نتایج حاصل از رابطه هم بسته (۵-۲) منبع معتبر مشابهی با پژوهش حاضر وجود ندارد. لذا در مورد لوله های مدفون، در نمودار (۵-۱۶) به مقایسه نتایج حاصل از شبیه سازی عددی و نتایج حاصل از رابطه (۵-۲)

پرداخته شده است. با توجه به گسترده بودن تعداد و دامنه متغیرهایی که در این پژوهش بررسی شده‌اند، رابطه (۲-۵) با دقت مناسبی توانسته است تمام نقاط مورد بررسی در پژوهش را پوشش دهد. نمودار (۱۷-۵) نیز نشان‌دهنده نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی در مقایسه با نتایج حاصل از رابطه (۱-۵) می‌باشد.



نمودار ۵-۱۶- مقایسه بین نتایج حاصل از رابطه (۲-۵) و شبیه‌سازی عددی (برای $D = 20.4/6$ mm)



نمودار ۵-۱۷- مقایسه بین نتایج حاصل از رابطه (۱-۵) و شبیه‌سازی عددی (برای $D = 20.4/6$ mm)

فصل ششم

نتیجه‌گیری و

پیشنهادهای

۶-۱- نتیجه گیری

در مطالعه حاضر، جریان گاز طبیعی نشت یافته از یک سوراخ کوچک که بر سطح جانبی لوله ای در خطوط توزیع گاز ایجاد شده است، توسط شبیه سازی عددی به صورت کامل مورد بررسی و تحلیل قرار گرفت. هندسه مورد بررسی توسط نرم افزار گمبیت طراحی و شبکه بندی شده و سپس حل عددی توسط نرم افزار فلوئنت انجام شده است. مطالعات انجام شده در شبکه توزیع گاز قرار دارد که در این خطوط لوله، سطح فشار پایین است و لذا فرض گاز ایده آل کاملاً جوابگوی شرایط کاری مسئله می باشد و جریان گاز نیز به صورت تراکم پذیر و آشفته در نظر گرفته شده است.

تطابق الگوی تغییرات نتایج حاصل شده از این پژوهش و مطالعات مرتبط پیشین که صحت آن مورد تأیید است، گواه بر معتبر بودن روش حل و نتایج ارائه شده در مطالعات حاضر می باشد. از طرف دیگر، مدل عددی حاضر بر پایه در نظر گرفتن طول لوله بعد از سوراخ می باشد که دستاورد آن بزرگ تر بودن مقادیر نشتی نسبت به مطالعات پیشین - که در اکثر آن ها طولی برای لوله در نظر گرفته نشده است - می باشد.

در ادامه، بررسی نتایج نشان دهنده وجود یک جریان صوتی در مقطع آسیب دیده در حالت لوله روزمینی می باشد. علاوه بر این، در حالت لوله مدفون در خاک، جریان خروجی از سوراخ به هنگام ورود به درون خاک با مقاومت خاک مواجه شده و باعث می شود که در داخل لوله، مقطع آسیب دیده و خاک، یک جریان مادون صوت داشته باشیم.

در نتایج ارائه شده تلاش گردیده است هر آنچه جهت واکاوی در ارتباط فرآیند مذکور مورد نیاز است ارائه گردد؛ با این وجود یکی از مهم ترین نتایج ارائه شده در این مطالعات، مربوط به روابط هم بسته جهت تخمین دبی حجمی نرمال شده نشتی می باشد. با توجه به این که در استخراج روابط مذکور تمامی کمیت های مهم تأثیرگذار در این فرآیند لحاظ شده اند، لذا نتایج حاصل از این روابط به خوبی با شرایط مختلف سازگار می باشد و می تواند تخمین مناسب و دقیقی جهت محاسبه دبی حجمی نشتی ارائه نماید. البته توجه به این نکته ضروری می نماید که روابط ارائه شده در پژوهش حاضر جهت استفاده در خطوط توزیع گاز درون شهری مناسب می باشد و سوراخ ایجاد شده در قسمت فوقانی لوله قرار دارد. با توجه به این که این روابط جهت تخمین دبی حجمی نشتی از خطوط توزیع گاز (که دارای سطح فشار به مراتب پایین تری نسبت به خطوط انتقال گاز هستند) استخراج شده اند، طبیعتاً استفاده

از این روابط در فرآیندهای مشابه دیگر در شرایط خاص احتمالی آنان نیازمند بررسی و اعمال وسواس بیش‌تر خواهد داشت که این موضوع جزء جدانشدنی هر رابطه عام و جامعی می‌باشد.

۶-۲- پیشنهادهایی برای پژوهش‌های آینده

با توجه به مطالب عنوان شده، یکی از موضوعات مرتبط در خصوص مطالعات آینده، توسعه روابطی جهت تخمین میزان نشتی در سایر خطوط لوله گاز (نظیر خطوط اصلی انتقال گاز) می‌باشد.

علاوه بر این، بررسی حادثه شکست کامل لوله در خطوط توزیع و انتقال گاز و ارائه روابطی مختص این فرآیند، یکی از دیگر جنبه‌های ادامه موضوع کنونی در مطالعات آینده به‌شمار می‌آید. همچنین موضوع جالب توجه دیگری که می‌تواند در پژوهش‌های آتی بررسی گردد، تأثیر میزان تخلخل خاک بر مقدار گاز نشت‌یافته از سوراخ می‌باشد.

فهرست مراجع

- [۱] شامحمدی ا.، لنگری م. و نادری فر ع.، (۱۳۸۹)، "محاسبه شدت جریان گاز خروجی از نشتی در لوله‌های گاز"، نخستین همایش بین‌المللی بازرسی و ایمنی در صنایع نفت و انرژی، تهران، ایران.
- [2] Costello K., (2014), "Lost and Unaccounted-for Gas: Challenges for Public Utility Regulators", **Utilities Policy**, vol. 29, no. 1, pp. 17-24.
- [۳] سایت اینترنتی ویکی پدیا: [http:// fa.wikipedia.org](http://fa.wikipedia.org)
- [۴] موحدی م. ح.، (۱۳۸۷)، "گاز طبیعی (مروری بر فرآیند استخراج تا مصرف"، (یادداشت فنی، دریافت شده از سایت اینترنتی: <http://fieldbus.ir>)
- [5] Jarrahan A., Aghel B. and Heidaryan E., (2015), "On the viscosity of natural gas", **Fuel**, vol. 150, pp. 609-618.
- [۶] نورعلی‌پور نهاوندی ن. و فرزانه‌گرد م.، (۱۳۹۰)، "کاهش مصرف انرژی در ایستگاه تقلیل فشار گاز شهری (C.G.S) شاهرود با استفاده از شبیه‌سازی ایستگاه در نرم‌افزار هایسیس (Hysys)", سومین کنفرانس لوله و خطوط انتقال نفت و گاز، تهران، ایران.
- [۷] نوری بروجردی ع. و میرزائی ع.، (۱۳۸۵)، "اندازه‌گیری میزان نشت گاز از خطوط لوله مدفون در زمین و تأثیر آن بر محیط‌زیست"، اولین همایش تخصصی مهندسی محیط‌زیست، تهران، ایران.
- [۸] سایت اینترنتی: <http://www.centralhudson.com>
- [۹] سایت اینترنتی: <http://www.shana.ir>
- [۱۰] سایت اینترنتی: <http://mehregantarh.com>
- [۱۱] سایت اینترنتی: <http://baminco.com>
- [۱۲] سایت اینترنتی: <http://nigc-kd.ir>
- [13] Arpino F., Dell'Isola M., Ficco G. and Vigo P., (2014), "Unaccounted for Gas in Natural Gas Transmission Networks: Prediction Model and Analysis of the Solutions", **Journal of Natural Gas Science and Engineering**, vol. 17, pp. 58–70.

[14] Haydell M., (2011), "Unaccounted-for Gas", Proceedings of the American School of Gas Measurement Technology, pp. 148-153, (Accessed 26 February 2016; <http://asgmt.com/wp-content/uploads/pdf-docs/2001/1/34.pdf>).

[۱۵] حسینی ح., (۱۳۸۶), "مبانی و اصول انتقال گاز", شرکت انتقال گاز منطقه ۷.

[۱۶] نورالهی ا., (۱۳۸۸), پایان نامه کارشناسی ارشد: "مدلسازی عددی یک بعدی جریان تراکم پذیر در خط لوله دارای حفره", دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد.

[17] White F. M., (1998), "**Viscous Fluid Mechanics**", Fourth Edition, McGraw-Hill, New York.

[18] Ebrahimi-Moghadam A., Farzaneh-Gord M. and Deymi-Dashtebayaz M., (2016), "Correlations for Estimating Natural Gas Leakage from Above-Ground and Buried Urban Distribution Pipelines", **Journal of Natural Gas Science and Engineering**, vol. 34, pp. 185-196.

[۱۹] جابری خسروشاهی ع., حسین پور س. و نورالهی بسطام ن., (۱۳۹۳), "شبیه سازی جریان و تعیین دبی گاز خروجی هنگام شکست کامل لوله با در نظر گرفتن خواص گاز واقعی", نخستین کنفرانس بین المللی نفت، گاز و پتروشیمی با رویکرد توسعه پایدار (ارتباط دانشگاه با صنعت)، تهران، ایران.

[۲۰] ابوالفضلی اصفهانی ج. و مولودی ر., (۱۳۹۱), "بررسی جریان تراکم پذیر به همراه نشتی در خط لوله گاز", بیستمین همایش سالانه بین المللی مهندسی مکانیک ایران، شیراز، ایران.

[۲۱] تفنگچی ها م., (۱۳۸۸), "تخمین گازهای نشت شده در اثر شکست کامل و یا ایجاد حفره در خطوط لوله بهنگام برخورد با یک وسیله مکانیکی", دومین کنفرانس لوله و خطوط انتقال نفت و گاز، تهران، ایران.

[۲۲] سایت اینترنتی: <http://members.questline.com>

[23] Mazumder Q. H., (2012), "Effect of Liquid and Gas Velocities on Magnitude and Location of Maximum Erosion in U-Bend", **Open Journal of Fluid Dynamics**, vol. 2, no. 2, pp. 29-34.

[۲۴] آهنگری ب.، (۱۳۸۶)، "شناسایی و مقابله با پدیده خوردگی در خطوط لوله فولادی

انتقال و شبکه‌های توزیع نفت و گاز"، چاپ اول، نشر اندیشه ناقوس.

[۲۵] سایت اینترنتی: <http://fap-company.com>

[۲۶] سایت اینترنتی: <http://theoverallplumber.com>

[۲۷] بدری ن. و عبدالحمیدزاده ب.، (۱۳۸۹)، "ارزیابی کمی و کیفی ریسک در صنایع

فرآیندی"، چاپ اول، انتشارات اندیشه‌سرا.

[28] Fincham A. E. and Goldwater M. H., (1979), "Simulation Models for Gas Transmission Networks", **Transactions of the Institute of Measurement and Control**, vol 1, no. 1, pp. 3-13.

[29] Levenspeil O., (1984), "**Engineering Flow and Heat Exchange**", Plenum Press, New York, NY.

[30] Buerck J., Roth S., Kraemer K. and Mathieu H., (2003), "OTDR Fiber-optical Chemical Sensor System for Detection and Location of Hydrocarbon Leakage", **Journal of Hazardous Materials**, vol. 102, pp. 13–28.

[31] Batzias F., Siontorou C. and Spanidis P., (2011), "Designing a Reliable Leak Bio-detection System for Natural Gas Pipelines", **Journal of Hazardous Materials**, vol. 186, pp. 35–58.

[32] Meng L., Yuxing L., Wuchang W. and Juntao F., (2012), "Experimental Study on Leak Detection and Location for Gas Pipeline Based on Acoustic Method", **Journal of Loss Prevention in the Process Industries**, vol. 25, pp. 90–102.

[33] Murvay P. S. and Silea I., (2012), "A Survey on Gas Leak Detection and Localization Techniques", **Journal of Loss Prevention in the Process Industries**, vol. 25, pp. 966–973.

[34] Zhang T., Tan Y., Zhang X. and Zhao J., (2015), "A Novel Hybrid Technique for Leak Detection and Location in Straight Pipelines", **Journal of Loss Prevention in the Process Industries**, vol. 35, pp. 157–168.

[35] Woodward J. L. and Mudan K. S., (1991), "Liquid and Gas Discharge Rates through Holes in Process Vessels", **Journal of Loss Prevention in the Process Industries**, vol. 4, no. 9, pp. 161-165.

- [36] Olorunmaiyeat J. and Imideb N. E., (1993), "Computation of Natural Gas Pipeline Using the Method of Characteristics", **Journal of Hazardous Materials**, vol. 34, pp. 81-98.
- [37] Lang E. and Fannelop T.K., (1987), "Efficient Computation of the Pipeline Break Problem", 3rd Symposium on Fluid Transients in Fluid Structure Interaction, AJME, vol. 56, pp. 115-123.
- [38] Montiel H., Vilchez J., Casal J. and Arnaldos J., (1998), "Mathematical Modelling of Accidental Gas Releases", **Journal of Hazardous Materials**, vol. 59, no. 2-3, pp. 211-233.
- [39] Yuhu D., Huilin G., Jing'en Z. and Yaorong F., (2003), "Mathematical Modelling of Gas Releases through Holes in Pipelines", **Chemical Engineering Journal**, vol. 92, no. 1-3, pp. 237-241.
- [40] Jo Y. and Ahn B., (2003), "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.
- [41] Luo J. L., Zheng M., Zhao X. W., Huo C. Y. and Yang L., (2006), "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.
- [42] Lu L., Zhang X., Yan Y., Li J. M. and Zhao X., (2014), "Theoretical Analysis of Natural-Gas Leakage in Urban Medium-Pressure Pipelines", **Journal of Environment and Human**, vol. 1, no. 2, pp. 71-86.
- [43] Oke A., Mahgerefteh H., Economou I. and Rykov Y., (2003), "A Transient Outflow Model for Pipeline Puncture", **Chemical Engineering Science**, vol. 58, no. 20, pp. 4591-4604.
- [۴۴] نورالهی ا.، داورپناه س. ا. و برادران رحیمی ا.، (۱۳۸۸)، "شبیه‌سازی نشتی خطوط لوله گاز با استفاده از روش مشخصه‌ها"، دوازدهمین کنفرانس دینامیک شاره‌ها، بابل، ایران.
- [45] Kostowski W. J. and Skorek J., (2012), "Real Gas Flow Simulation in Damaged Distribution Pipelines", **Energy**, vol. 45, no. 1, pp. 481-488.
- [46] Nouri-Borujerdi A., (2011), "Transient Modeling of Gas Flow in Pipeline Following Catastrophic Failure", **Mathematical and Computer Modelling**, vol. 54, no. 11-12, pp. 3037-3045.

[47] Moloudi R. and Abolfazli Esfahani J., (2014), "Modeling of Gas Release Following Pipeline Rupture: Proposing Non-Dimensional Correlation", **Journal of Loss Prevention in the Process Industries**, vol. 32, pp. 207-217.

[48] Nithiarasu P., (1999), "Finite Element Modeling of a Leaking Third Component Migration from a Heat Source Buried into a Fluid Saturated Porous Medium", **Mathematical and Computer Modeling**, vol. 29, no. 4, pp. 27-39.

[49] "Engineering Data Book", (2004), Twelfth Edition, Gas Processors Suppliers Association (GPSA), Oklahoma.

[50] Flatt R., (1986), "Unsteady Compressible Flow in Long Pipelines Following a Rupture", **International Journal for Numerical Methods in Fluids**, vol. 6, pp. 83-100.

[۵۱] جابری خسروشاهی ع.، (۱۳۹۳)، پایان‌نامه کارشناسی ارشد: "ارزیابی و تحلیل مقدار گاز طبیعی تخلیه شده از لوله به محیط"، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی سهند.

[52] Versteeg H. K. and Malalasekera W., (2007), "An introduction to computational fluid dynamics; the finite volume method", Pearson, Essex.

[53] Lu J., Xu S., Deng J., Wu W., Wu H. and Yang Z., (2016), "Numerical Prediction of Temperature Field for Cargo Containment System (CCS) of LNG Carriers During Pre-cooling Operations", **Journal of Natural Gas Science and Engineering**, vol. 29, pp. 382-391.

[54] FLUENT 6.3 User's Guide, February 2003.

[55] Moean M. J., Shapiro H. N., Boettner D. D. and Bailey M. B., (2011), "Fundamentals of Engineering Thermodynamics", Seventh Edition, Wiley, United States.

[56] Ewing R. E., Wang J. and Weekes S., (1999), "On the Simulation of Multicomponent Gas Flow in Porous Media", **Applied Numerical Mathematics**, vol. 31, no. 4, pp. 405-427.

[57] Streeter V. L. and Wylie E. B., (1971), "Fluid Mechanics", Fifth Edition, McGraw-Hill, New York.

[۵۸] توحیدی ا. و غفاری قهرودی ه.، (۱۳۹۲)، "راهنمای جامع ANSYS FLUENT

(مقدماتی)"، چاپ اول، مؤسسه فرهنگی هنری دیباگران تهران.

- [59] Launder B. E. and Spalding D. B., (1974), “The Numerical Computation of Turbulent Flowss”, **Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering**, vol. 3, pp. 269-289.
- [60] Murthy S. N. B., (1975), “**Turbulent Mixing in Nonreactive and Reactive Flows**”, Plenum Press., New York.
- [61] Nayyar M. L., (2000), “**Piping Handbook**”, 7th Edittion, McGraw-Hill, New York.
- [62] Itoh O. T., (1981), “**Thermal Properties of Soils**”, CRREL, United States.
- [63] Ergun S., (1952), “Fluid Flow through Packed Columns”, **Chemical Engineering Progress**, vol. 48, no. 2, pp. 89-94.

Abstract

The main aim of the present investigation is to develop correlations to calculate natural gas leakage rate from above-ground and buried urban distribution gas pipelines. By using numerical simulation, has been paid to calculate the amount of natural gas leakage from a small hole located on top of the lateral surface of the above-ground and buried distribution gas pipe lines. The geometry is designed and meshed by Gambit software and then numerical solution is done by using Fluent software. The intended fluid is considered as compressible with ideal gas behavior, flow is turbulent and steady and soil is considered as a porous zone. The results indicate that in the above-ground pipe state, for holes with small diameters, discharge speed reaches to the sound speed and at the so-called, choking occurs in the flow. Also based on the result, the volumetric flow rate of leaked gas have a linear relation, second order relation and fourth order relation with pressure of initial point, diameter of hole and ratio of the hole diameter to the pipe diameter, respectively. In the case of buried pipes, permeation depth of gas into soil at the small diameter holes is more than large holes but volumetric rate of leaked gas is lower. Finally two useful correlations have been proposed to calculate the natural gas leakage from a small hole located on the lateral surface of the above-ground and buried distribution gas pipelines.

Keywords: Natural gas, Distribution gas pipelines, Leakage, Hole, Buried pipe, Numerical simulation, Fluent.



Faculty of Mechanical and Mechatronics Engineering

M.Sc. Thesis in Energy Conversion Engineering

**Computing the Amount of Gas Release from Buried Natural Gas
Distribution Pipelines by Using Numerical Simulation**

By: Amir Ebrahimi-Moghadam

Supervisor:
Dr. Mahmood Farzaneh-Gord

Adviser:
Dr. Mahdi Deymi-Dashtebayaz

September 2016