





دانشکده : مهندسی مکانیک و مکاترونیک

گروه تبدیل انرژی

پایان نامه کارشناسی ارشد

شبیه سازی عددی تخلیه گاز طبیعی طی فرایند purging

نگارنده: محمد صادق پهلوانزاده

استاد راهنما

دکتر محمود فرزانه گرد

استاد مشاور

دکتر علی جباری مقدم

اردیبهشت ۱۳۹۶



شماره:

تاریخ:

باسمه تعالی

ویرایش:

مدیریت تحصیلات تکمیلی

دانشکده : مهندسی مکانیک

گروه : تبدیل انرژی

پایان نامه کارشناسی ارشد آقای محمد صادق پهلوان زاده به شماره دانشجویی: ۹۳۳۲۷۰۴

تحت عنوان: شبیه سازی عددی تخلیه گاز طبیعی طی فرایند purging

در تاریخ توسط کمیته تخصصی زیر جهت اخذ مدرک کارشناسی ارشد مورد ارزیابی و با درجه مورد پذیرش قرار گرفت.

امضاء	امضاء	استاد راهنما	اساتید مشاور
		نام و نام خانوادگی : دکتر محمود فرزانه گرد	نام و نام خانوادگی : دکتر علی جباری مقدم

امضاء	امضاء	اساتید داور	نماینده تحصیلات تکمیلی
		نام و نام خانوادگی : نام و نام خانوادگی :	نام و نام خانوادگی :

تقدیم بہ:

پرومادر کرامی و عزیزم

به نام حضرت دوست که هرچه هست از اوست

و بانشکر از اساتید ارجمندم:

جناب آقای دکتر محمود فرزانه کرد و جناب آقای دکتر علی جباری مقدم که خالصانه در تمام مراحل انجام و

تدوین این پژوهش مرا یاری نمودند.

و بانشکر از پدر و مادر بزرگوار و مهربانم:

که در تمام مراحل زندگی یار و یاور و پشتیبان و در دوران تحصیل همیشه مشوق من بوده اند.

این پایان نامه، با حمایت و پشتیبانی شرکت گاز استان سمنان اجرا شده است. بدین وسیله مراتب قدردانی خود

را ابراز داشته و از همکاری های جناب آقای سعید رستگار رئیس پژوهش شرکت گاز استان سمنان و آقای یثیم

فرنام ناظر پایان نامه حاضر در شرکت گاز استان سمنان، تشکر می نمایم.

تعهد نامه

اینجانب محمد صادق پهلوان زاده دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی مکانیک گرایش تبدیل انرژی دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه شبیه سازی عددی تخلیه گاز طبیعی طی فرایند purging تحت راهنمایی 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 پژوهشهای 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 بافتهای 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 اخلاق 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 افزار ها 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.

چکیده:

هدف از انجام این پژوهش، محاسبه‌ی میزان گاز هدر رفته طی عملیات purging که بر روی خطوط انتقال گاز واقع در ایستگاه‌های تقلیل فشار انجام می‌شود و همچنین ارائه‌ی روابطی برای تخمین هرچه بهتر میزان گاز تخلیه شده طی این عملیات می‌باشد. در این پژوهش با استفاده از شبیه سازی عددی به محاسبه میزان گاز تخلیه شده از شیرهای purging واقع بر خطوط لوله‌ی انتقال گاز طبیعی پرداخته شده است. هندسه‌ی مورد نظر توسط نرم افزار گمبیت طراحی و سپس شبکه بندی شده و سپس حل عددی توسط نرم افزار فلوئنت انجام گرفته است. سیال مورد نظر تراکم پذیر و با رفتار گاز واقعی در نظر گرفته شده و جریان بصورت آشفته و ناپایا می‌باشد. برای هرچه نزدیکتر کردن فرایند حل و نتایج حاصله به شرایط واقعی، در ابتدا که شیر بسته است جریان در خط لوله بصورت پایا برقرار شده و سپس در شرایط ناپایدار، شیر باز شده است. در این پژوهش که بصورت سه بعدی نیز انجام شده، عملیات تخلیه تحت شرایط مختلف از قبیل مقادیر مختلف فشار ورودی به خط لوله، قطر خط لوله و همچنین شیر با قطرهای متفاوت انجام شده است. نتایج حاصله نشان می‌دهند به دلیل اختلاف فشار بسیار زیاد بین خط لوله و محیط، سرعت گاز خروجی بیشتر از سرعت صوت شده و در مقطع خروجی، عدد ماخ بزرگتر از یک می‌شود. همچنین اطلاعات حاصل از برازش داده‌ها بیانگر این است که میزان جریان گاز خروجی از شیر با فشار خط لوله، توان دوم قطر شیر تخلیه کننده، و همچنین با توان چهارم نسبت قطر شیر به قطر خط لوله‌ای که عملیات تخلیه بر روی آن انجام می‌شود رابطه دارد. حل عددی در هر دو حالت پایدار و ناپایدار انجام شده است و در نهایت یک رابطه برای حالت گذرا و یک رابطه برای حالت پایدار که دبی جریان خروجی از شیر به یک مقدار ثابت رسیده است ارائه شده و این دو حالت باهم مقایسه شده‌اند.

واژگان کلیدی: گاز طبیعی، خطوط انتقال گاز، شیرهای تخلیه، شبیه سازی عددی، فلوئنت

لیست مقالات مستخرج از پایان نامه:

مقالات کنفرانس های معتبر خارجی

عنوان مقاله	مشخصات کنفرانس	نویسندگان
CALCULATING AND COMPERING THE AMOUNT OF DISCHARGED GAS DURING THE PURGING WITH VARIUSE EQUATIONS	International gas union research conference	حسن افتخاری محمد صادق پهلوان زاده محمود فرزانه گرد
شبیه سازی عددی فرآیند پرجینگ گاز طبیعی در خطوط انتقال گاز	هفدهمین کنفرانس دینامیک شاره ها	محمد صادق پهلوان زاده محمود فرزانه گرد امیر ابراهیمی مقدم

فهرست مطالب

فصل اول (دیباچه).....	۱
۱-۱- مقدمه.....	۲
۲-۱- خلاصه‌ای از مطالعات پیشین.....	۵
۳-۱- هدف پژوهش و فرایند حل.....	۶
فصل دوم (انتقال و توزیع گاز طبیعی و حوادث مرتبط با آن).....	۹
۱-۲- انتقال گاز طبیعی، حوادث و مشکلات.....	۱۰
۲-۲- گاز طبیعی، مصارف و ترکیبات آن.....	۱۰
۳-۲- انتقال و توزیع گاز طبیعی.....	۱۳
۲-۳-۱- خطوط لوله‌ی اصلی انتقال گاز.....	۱۴
۲-۳-۲- ایستگاه تقلیل فشار گاز برون شهری.....	۱۵
۲-۳-۳- ایستگاه تقلیل فشار گاز درون شهری.....	۱۷
۲-۳-۴- شبکه توزیع گاز شهری.....	۱۸
۲-۴- گاز های گمشده (محاسبه نشده).....	۱۹
۲-۴-۱- نشت گاز.....	۱۹
۲-۴-۲- دستگاه های اندازه گیری.....	۲۰

- ۲-۴-۳- آسیب های شخص ثالث..... ۲۱
- ۲-۴-۴- سرقت گاز..... ۲۱
- ۲-۴-۵- عملیات تخلیه (purging)..... ۲۱
- ۲-۴-۶- عدم دقت در کنتورهای خانگی و صنعتی..... ۲۲
- ۲-۴-۷- عدم اندازه گیری گاز طبیعی مصرفی توسط هیترها در ایستگاه های تقلیل فشار برون شهری..... ۲۲
- ۲-۵-۵- بررسی پدیده ی تخلیه خطوط لوله گاز طبیعی..... ۲۲
- ۲-۵-۱- بررسی پدیده ی خفگی..... ۲۴
- ۲-۵-۲- نازل های همگرا واگرا..... ۲۶
- ۲-۵-۳- حالت های مختلف تخلیه ی خط لوله گاز طبیعی..... ۲۷
- ۲-۵-۴- بررسی نظری فرایند تخلیه..... ۲۸
- ۲-۵-۵- علل انجام عملیات تخلیه..... ۳۰
- فصل سوم (مروری بر پژوهش های گذشته)..... ۳۳
- ۳-۱- تاریخچه..... ۳۴
- ۳-۲- رابطه ی هندبوک GPSA..... ۳۹
- ۳-۳- رابطه ی ارائه شده توسط شامحمدی و همکاران..... ۴۰

- ۴۰-۳-۴-رابطه‌ی دفتر پژوهش گاز استان خوزستان..... ۴۰
- ۴۳-فصل چهارم(معادلات حاکم و شیوه‌ی حل)..... ۴۳
- ۴۴-۱-۴-فرضیات..... ۴۴
- ۴۴-۲-۴-روابط حاکم..... ۴۴
- ۴۵-۲-۴-۱-روابط حاکم بر جریان درون لوله..... ۴۵
- ۴۷-۳-۴-مفهوم جریان آشفته و روابط مربوط به آن..... ۴۷
- ۴۸-۳-۴-۱-روش های مدل سازی آشفته‌گی..... ۴۸
- ۵۰-۳-۴-۱-۱-روابط حاکم بر لزجت گردابی..... ۵۰
- ۵۱-۳-۴-۲-۱-مدل های لزجت گردابی..... ۵۱
- ۵۳-۳-۴-۲-مدل سازی آشفته‌گی در این پژوهش..... ۵۳
- ۵۶-۴-۴-هندسه‌ی مورد بررسی و شبکه بندی..... ۵۶
- ۶۰-۴-۴-۱-اعتبار سنجی شبکه..... ۶۰
- ۶۱-۴-۵-شرایط مرزی و اولیه..... ۶۱
- ۶۳-۴-۶-فرایند حل عددی..... ۶۳
- ۶۴-۴-۷-کمیت‌های تاثیرگذار برمیزان دبی خروجی از شیر در هنگام عملیات تخلیه..... ۶۴
- ۶۵-۴-۷-۱-طول لوله، افت فشار و فشار در ابتدای ناحیه‌ی مورد بررسی..... ۶۵

۶۵.....	۴-۷-۲- قطر خط لوله و قطر شیر تخلیه.....
۶۵.....	۴-۷-۳- تاثیر دمای گاز.....
۶۷.....	فصل پنجم (نتایج).....
۶۸.....	۵-۱- معبر سازی حل.....
۷۰.....	۵-۲- بررسی کمیت‌های تاثیر گذار بر میزان دبی خروجی.....
۷۰.....	۵-۲-۱- تاثیر قطر لوله و قطر شیر بر میزان دبی خروجی.....
۷۴.....	۵-۲-۲- بررسی فشار نقطه‌ی ابتدایی بر میزان گاز خارج شده در هنگام عملیات تخلیه.....
۷۶.....	۵-۲-۳- بررسی توزیع کمیت‌ها در دامنه‌ی حل.....
۸۷.....	۵-۳- توسعه روابطی برای محاسبه‌ی میزان گاز تخلیه شده.....
۹۱.....	فصل ششم (نتیجه گیری و پیشنهادات).....
۹۲.....	۶-۱- نتیجه گیری.....
۹۳.....	۶-۲- پیشنهادهایی برای پژوهش‌های آینده.....
۹۵.....	فهرست مراجع.....

فهرست اشکال

- شکل ۱-۲ - شبکه‌ی توزیع گاز طبیعی [۶]..... ۱۴
- شکل ۲-۲ - خطوط لوله‌ی اصلی انتقال گاز [۷]..... ۱۵
- شکل ۳-۲ - بخشی از ایستگاه تقلیل فشار گاز برون شهری [۸]..... ۱۶
- شکل ۴-۲ - ایستگاه تقلیل فشار گاز درون شهری (الف کابینتی) از نوع مسطح [۹]..... ۱۷
- شکل ۵-۲ - تعدیل کننده‌ی فشار گاز قبل از درب منازل [۱۰]..... ۱۸
- شکل ۶-۲ - شیر تخلیه، قرار گرفته بر روی خط لوله‌ی اصلی انتقال گاز [۱۳]..... ۲۳
- شکل ۷-۲ - پروفیل، (الف فشار، (ب دبی جرمی، در نازل همگرا [۱۴]..... ۲۶
- شکل ۸-۲ - نازل‌های همگرا-واگرا و اتفاق افتادن عدد ماخ بزرگتر از یک، بعد از گلوگاه..... ۲۷
- شکل ۹-۲ - انفجار در خط لوله‌ی اصلی انتقال گاز [۹]..... ۳۱
- شکل ۱۰-۲ - خوردگی در قسمتی از خط لوله [۱۰]..... ۳۱
- شکل ۱-۳ - دبی حجمی نشت یافته بر حسب قطر سوراخ در تحقیق منتیل و همکاران [۱۹]..... ۳۵
- شکل ۱-۴ - مقایسه بین مدل‌های آشفته‌گی مختلف [۳۴]..... ۵۳
- شکل ۲-۴ - شبکه بندی محیط مورد بررسی در خط لوله و نواحی مختلف آن..... ۵۷
- شکل ۳-۴ - شبکه بندی محیط حل و نوع شبکه در هر ناحیه از آن..... ۵۸
- شکل ۴-۴ - شبکه بندی محیط حل و شبکه‌ی لایه مرزی در نزدیکی دیواره‌ها..... ۵۸
- شکل ۵-۴ - شبکه بندی در نزدیکی دیواره‌ی خط لوله ی اصلی..... ۵۹

- شکل ۴-۶ شبکه بندی در نزدیکی دیواره‌ی انشعاب شیر.....۵۹
- شکل ۵-۱ - توزیع فشار استاتیکی در خط لوله و انشعاب مربوط به شیر با مشخصات $D=8$ و $d=2$ و $p=1,7\text{MPa}$۷۷
- شکل ۵-۲ - توزیع فشار استاتیکی در خط لوله و انشعاب مربوط به شیر با مشخصات $D=8$ و $d=2$ و $p=2,5\text{MPa}$۷۸
- شکل ۵-۳ - توزیع فشار استاتیکی در خط لوله و انشعاب مربوط به شیر با مشخصات $D=8$ و $d=2$ و $p=3\text{MPa}$۷۸
- شکل ۵-۴ - توزیع فشار استاتیکی در خط لوله و انشعاب مربوط به شیر با مشخصات $D=8$ و $d=2$ و $p=3,5\text{MPa}$۷۹
- شکل ۵-۵ - توزیع فشار استاتیکی در خط لوله و انشعاب مربوط به شیر با مشخصات $D=6$ و $d=1$ و $p=1,7\text{MPa}$۷۹
- شکل ۵-۶ - توزیع فشار استاتیکی در خط لوله و انشعاب مربوط به شیر با مشخصات $D=6$ و $d=2$ و $p=1,7\text{MPa}$۸۰
- شکل ۵-۷ - توزیع فشار استاتیکی در خط لوله و انشعاب مربوط به شیر با مشخصات $D=10$ و $d=2$ و $p=1,7\text{MPa}$۸۰
- شکل ۵-۸ - توزیع فشار استاتیکی در خط لوله و انشعاب مربوط به شیر با مشخصات $D=12$ و $d=2$ و $p=1,7\text{MPa}$۸۱
- شکل ۵-۹ - توزیع سرعت در خط لوله و انشعاب مربوط به شیر با مشخصات $D=8$ و $d=2$ و $p=1,7\text{MPa}$۸۳
- شکل ۵-۱۰ - عدد ماخ در نواحی مختلف خط لوله و انشعاب مربوط به شیر با مشخصات $D=8$ و $d=2$ و $p=1,7\text{MPa}$۸۴
- شکل ۵-۱۱ - توزیع عدد ماخ در انشعاب و شیر برای خط لوله با مشخصات $D=8$ و $d=2$ و $p=1,7\text{MPa}$۸۴
- شکل ۵-۱۲ - توزیع سرعت در خط لوله و انشعاب مربوط به شیر با مشخصات $D=8$ و $d=2$ و $p=3,5\text{MPa}$۸۵
- شکل ۵-۱۳ - توزیع سرعت در خط لوله و انشعاب مربوط به شیر با مشخصات $D=10$ و $d=2$ و $p=1,7\text{MPa}$۸۶
- شکل ۵-۱۴ - توزیع سرعت در خط لوله و انشعاب مربوط به شیر با مشخصات $D=12$ و $d=2$ و $p=1,7\text{MPa}$۸۶
- شکل ۵-۱۵ - مسیر جریان در خط لوله و انشعاب مربوط به شیر با مشخصات $D=8$ و $d=2$ و $p=1,7\text{MPa}$۸۷

فهرست نمودارها

نمودار ۴-۱ - دبی خروجی از شیر در مراحل مختلف فرایند تخلیه..... ۶۴

نمودار ۵-۱ - مقایسه دبی جرمی خروجی بین پژوهش حاضر و مطالعات پیشین..... ۷۰

نمودار ۵-۲ - مقایسه میزان گاز خارج شده به ازای مقادیر مختلف فشار ورودی بر حسب قطر شیر (برای لوله به قطر ۶

اینچ)..... ۷۱

نمودار ۵-۳ - مقایسه میزان گاز خارج شده به ازای مقادیر مختلف فشار ورودی بر حسب قطر شیر (برای لوله به قطر ۸

اینچ)..... ۷۲

نمودار ۵-۴ - مقایسه میزان گاز خارج شده به ازای مقادیر مختلف فشار ورودی بر حسب قطر شیر (برای لوله به قطر

۱۰ اینچ)..... ۷۲

نمودار ۵-۵ - مقایسه میزان گاز خارج شده به ازای مقادیر مختلف فشار ورودی بر حسب قطر شیر (برای لوله به قطر

۱۲ اینچ)..... ۷۳

نمودار ۵-۶ - مقایسه میزان گاز خارج شده به ازای مقادیر مختلف قطر شیر بر حسب فشار ورودی (برای لوله به قطر ۶

اینچ)..... ۷۴

نمودار ۵-۷ - مقایسه میزان گاز خارج شده به ازای مقادیر مختلف قطر شیر بر حسب فشار ورودی (برای لوله به قطر ۸

اینچ)..... ۷۵

نمودار ۵-۸ - مقایسه میزان گاز خارج شده به ازای مقادیر مختلف قطر شیر بر حسب فشار ورودی (برای لوله به قطر ۱۰

اینچ)..... ۷۵

نمودار ۵-۹ - مقایسه میزان گاز خارج شده به ازای مقادیر مختلف قطر شیر بر حسب فشار ورودی (برای لوله به قطر ۱۲

اینچ)..... ۷۶

نمودار ۱۰-۵ -مقایسه میزان گاز تخلیه شده در دو حالت پایدار و ناپایدار به ازای مقادیر مختلف قطر شیر برای لوله به مشخصات $D=8$ و $p=1,7$ MPa..... ۸۹

نمودار ۱۱-۵ -مقایسه‌ی نتایج حاصل از روابط (۱-۵) و (۲-۵) و رابطه‌ی ارائه شده توسط شامحمدی و همکاران و همچنین رابطه‌ی دفتر پژوهش گاز استان خوزستان به ازای شیر با قطرهای مختلف و خط لوله با مشخصات $D=8$ و MPa $p=1,7$ ۹۰

فهرست جداول

- جدول ۱-۱ علل حوادث بوجود آمده در خطوط گاز طبیعی [۱]..... ۲
- جدول ۱-۲- پیامدهای بوجود آمده ناشی از آسیب دیدن خطوط گاز طبیعی [۱]..... ۲
- جدول ۱-۲- درصد مولی اجزاء تشکیل دهنده ی گاز ارسالی به خطوط انتقال گاز پالایشگاه گاز خانگیران [۴]..... ۹
- جدول ۱-۴- مدل های آشفته گی مختلف جهت حل جریان [۳۴]..... ۳۹
- جدول ۲-۴- تاثیر تعداد مش بر دبی گاز خروجی از شیر..... ۴۸
- جدول ۳-۴- نوع شرایط مرزی مورد استفاده در پژوهش..... ۴۹

فهرست علائم و اختصارات

ردیف	علامت	توضیح	ردیف	علامت	توضیح
علائم انگلیسی					
1	A	سطح مقطع (m^2)	29	t_f	زمان باز شدن شیر (s)
2	a	سرعت صوت (m/s)	30	t	زمان تخلیه (s)
3	C_D	ضریب تخلیه ی روزه	31	T	دما (K)
4	C_g	ضریب تصحیح وزن مخصوص گاز	32	u	سرعت (m/s)
5	C_p	ظرفیت حرارتی فشار ثابت (J/kgK)	33	v	حجم مخصوص (m^3/kg)
6	C_v	ظرفیت حرارتی حجم ثابت (J/kgK)	34	w	ضریب خروج از مرکز
7	CRP	نسبت فشار بحرانی	35	x	جابجایی بر حسب متر
8	D	قطر شیر تخلیه (in)	36	Z	ضریب تراکم پذیری گاز
9	D	قطر لوله (in)	زیروندها		
10	E	انرژی کل (J)	37	l	ابتدای لوله
11	f	ضریب اصطکاک	38	a	محیط (اتمسفر)
12	f_{tf}	ضریب تصحیح دما	39	b	پایه (مبنا)
13	g_c	ثابت گرانشی زمین ($N s^2/kg m$)	40	cr	بحرانی
14	g	شتاب جاذبه (m/s^2)	41	e	خروجی
15	G	وزن مخصوص	42	eff	موثر
16	H	انتالپی محسوس (J/kg)	43	ij و l	جهات دلخواه
17	K	ضریب هدایت حرارتی (W/mK)	44	s	ذرات جامد محیط متخلخل
18	L	طول لوله (m)	45	t	اشفتگی
19	Ma	عدد ماخ	علائم یونانی		
20	M	جرم مولی گاز (g/mol)	46	δ	تابع دلتای کرونیگر
21	M	گاز تخلیه شده (kg)	47	ε	نرخ اتلاف اشفتگی (j/kgs)
22	$\dot{m}$	دبی گاز خروجی ($\frac{kg}{s}$)	48	ϵ	زبری مطلق لوله (m)
23	P	فشار (Pa)	49	γ	نسبت ظرفیت حرارتی
24	Pr	عدد پرانتل	50	k	انرژی جنبشی اشفتگی (j/kg)
25	Q_d	دبی حجمی تخلیه (ft^3/day)	51	μ	ویسکوزیته (kg/ms)
26	Q_h	دبی جریان گاز در شرایط استاندارد (m^3/day)	52	ρ	چگالی (kg/m^3)
27	R	ثابت گاز (J/kgK)	53	$\bar{\tau}$	تانسور تنش
28	Re	عدد رینولتز	54	ϵ	ضریب انبساط
			55	α	ضریب جریان

فصل اول

دییاجه

۱-۱ مقدمه:

کشور ایران با داشتن ۱۴,۰۷ درصد 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 به عنوان ماده‌ی اولیه صنایع پتروشیمی رو به افزایش است و در نتیجه توجه به خطوط لوله‌ی انتقال گاز و حوادث مربوط به آن، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است [۱].

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

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

نوع حادثه	درصد فراوانی
برخورد اشیاء و تجهیزات به خط لوله	35%
خطای انسانی	30%
بهره برداری نادرست	30%
سایر عوامل	5%

و پیامدهای بوجود آمده از حوادث طبق EGIG مطابق جدول زیر می‌باشد.

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

نوع پیامد	درصد فراوانی
انتشار گاز های سمی	50%
انفجار	30%
آتش	20%

^۱ Natural gas

متان بخش عمده‌ای از گاز طبیعی را تشکیل می‌دهد و زمانیکه وارد اتمسفر شود، یک گاز گلخانه‌ای^۱ قوی محسوب می‌گردد. نشتی‌های متان می‌تواند از نظر اقتصادی به میزان قابل توجهی برسد و موجب خطرات ایمنی گردد پس با کاهش نشتی‌های متان می‌توان به منافع اقتصادی و زیست محیطی اساسی دست یافت. انجام فرصت‌های موثر موجود برای کاهش نشتی در صنعت نفت و گاز می‌تواند به کاهش گم شدن محصول، نشت کمتر متان و منافع بیشتر منجر شود. بنابراین اطلاع از میزان گازهای گمشده بنا به دلایل اقتصادی و زیست محیطی برای شرکتهای توزیع مهم است تا بتوانند هم میزان نشتی را محاسبه کنند و هم بدنبال راه‌حلهایی برای کاهش منظم نشتی‌ها باشند و همچنین در رابطه با نحوه‌ی استفاده از گازهای رها سازی شده تصمیم گیری کنند.

یکی از مباحث مهم و قابل توجه در صنعت گاز محاسبه‌ی گازهای تلف شده می‌باشد و این مسئله همواره بعنوان یک معضل مورد توجه بوده است. عوامل مختلفی در اتلاف گاز نقش دارند که در خیلی از موارد قابل اندازه گیری نیستند و باید روشهایی برای تخمین و محاسبه آن‌ها پیش بینی نمود، برای مثال گازهای نشت شده از رگلاتورها، گازهای خروجی از شیرهای ایمنی و گازهای تلف شده در اثر سوراخ شدن خطوط لوله بهنگام برخورد با یک وسیله مکانیکی و غیره.

با توجه به وسعت هر شهر، متراژ شبکه تغذیه و توزیع عوامل و پارامترهای تاثیرگذار در میزان گازهای گمشده را می‌توان به صورت زیر دسته‌بندی کرد:

۱. عدم دقت در کنتورهای خانگی و صنعتی
۲. سرقت گاز توسط مشترک
۳. عدم تاثیر و یا دخالت صحیح، ضرایب تصحیح دما، فشار و تراکم عالی
۴. عدم تعیین شاخص برای میزان مصرف در زمان خرابی کنتورها

^۱ Greenhouse gas

۵. عدم اندازه‌گیری گاز طبیعی مصرفی توسط هیترها در ایستگاه‌های تقلیل فشار برون شهری

۶. استفاده از گاز به جای هوا در تمیز کردن خطوط تغذیه و توزیع

۷. عدم اندازه‌گیری گازهای خروجی از شیرهای اطمینان

۸. عدم اندازه‌گیری گازهای تخلیه شده از خطوط

۹. ناهمگن بودن آمار و گزارشات مصرف

۱۰. نشت گاز و غیره

که یکی از مهمترین عوامل در میزان گازهای گمشده، تخلیه‌ی گاز از خطوط می‌باشد.

تخلیه‌ی گاز از خطوط لوله به دو شکل انجام می‌شود. یکی جهت تخلیه‌ی کامل خط لوله جهت انجام عملیات تمیز کاری کلی یا انجام تعمیرات که در این حالت گاز داخل خط لوله را به صورت کامل و از طریق تزریق یک گاز خنثی به داخل قسمت مورد نظر از خط لوله انجام می‌دهند، به این شکل که ابتدا و انتهای قسمت مورد نظر از خط لوله را مسدود کرده و از یک سمت لوله گاز خنثی را تزریق و از سمت دیگر گاز داخل خط لوله را تخلیه می‌کنند.

شکل دیگر تخلیه نیز با باز کردن ناگهانی شیرهای تخلیه انجام می‌شود. با باز کردن این شیرها به دلیل اختلاف فشار بالای خط لوله با محیط، گاز با سرعت زیادی که نزدیک به سرعت صوت می‌باشد وارد اتمسفر می‌شود و با خود ناخالصی‌ها را بیرون می‌کشد. که منظور از عملیات PURGING در این پایان نامه شکل دوم عملیات تخلیه است.

چنانچه مشخص است در زمینه محاسبه نشت گاز مجموعه عواملی همچون تراکم پذیر بودن گاز، سرعت بالای گاز هنگام خروج از خط لوله و فشار بالا باعث پیچیدگی حل و سختی پیش بینی متغیرهای مختلف در میدان جریان می‌گردد. با توجه به موارد مذکور، حل چنین فرایندی از یک سو نیازمند مدل-

های ترمودینامیکی کارآمد جهت پیش بینی خواص گاز تراکم پذیر در فشارهای بالاست و از سوی دیگر در گرو مدل‌های دینامیکی سیالات جهت پیش بینی سرعت و میدان حرکت می‌باشد.

حل کامل این فرایند از ترکیب این دو گروه عمده از مدل سازی که در طی زمان به یکدیگر مرتبط می‌باشد، حاصل خواهد شد.

مطالعات زیادی در زمینه‌ی محاسبه‌ی میزان نشت گاز صورت پذیرفته است که در سه گروه تجربی، تحلیلی و عددی تقسیم بندی می‌شوند. بیشتر مطالعات در حالت‌های تحلیلی و عددی صورت پذیرفته‌اند.

۱-۲- خلاصه ای از مطالعات پیشین:

در اکثر تحقیقات صورت گرفته، لوله‌ی مورد نظر جهت تخلیه را به صورت یک مخزن بزرگ در نظر گرفته‌اند. همچنین مدل سازی لوله را به صورت شبه یک بعدی انجام داده‌اند که جریان گاز بصورت محوری در مخزن جریان داشته و از دریچه‌ای در انتهای آن، به محیط بیرون تخلیه می‌شود. همچنین در این مدل‌ها فرض بر این است که تمام گاز داخل لوله از درچه خارج می‌شود. به عبارت دیگر در آن‌ها طولی برای لوله بعد از دریچه در نظر گرفته نشده است. در نظر نگرفتن طول لوله بعد از سوراخ باعث دور شدن این مدل‌ها از واقعیت می‌شود، این نقص باعث می‌شود برگشت جریان از مقاطع بعد از دریچه‌ی خروجی در نظر گرفته نشود.

همچنین اکثر شبیه سازی‌هایی که در این زمینه صورت گرفته با فرض جریان پایا، تراکم پذیر و یک بعدی بنا شده‌اند. که البته در حالت عادی و کاربردهای متداول منطقی است، اما در شرایطی مانند باز کردن شیر تخلیه و رها سازی گاز به اتمسفر و همچنین شکستن خط لوله، به دلیل اختلاف فشار بالایی که ایجاد می‌شود سرعت در خط لوله به شدت افزایش می‌یابد. در این حالت فرض جریان تراکم ناپذیر نتایج قابل قبولی ارائه نمی‌دهد.

به منظور محاسبه دبی گاز خروجی از شیر تخلیه برآورد خواص گاز ضروری است، برای دست یابی به این مهم، معادلات حاکم بر مسئله که شامل معادلات پیوستگی، مومنتموم^۱، انرژی و معادله حالت است، به طور همزمان در یک دستگاه چهار معادله-چهار مجهول غیر خطی و با استفاده از روش‌های عددی تکرار شونده حل می‌شوند.

۳-۱- هدف پژوهش و فرایند حل:

در مطالعه‌ی حاضر، هدف محاسبه‌ی دبی گاز نشت یافته از شیر تخلیه‌ی واقع بر یک لوله در خطوط انتقال گاز طبیعی و تعیین یک رابطه برای محاسبه‌ی آن می‌باشد. با در اختیار داشتن فرمولی برای محاسبه‌ی دبی گاز نشت یافته، به راحتی می‌توان میزان هدر رفت گاز از یک شیر در شرایط مورد نظر را تعیین نمود.

در این پژوهش فرضیات زیر اعمال شده است:

- جریان داخل لوله و شیر خروجی بی‌درو^۲ در نظر گرفته شده است. (از انتقال حرارت بین محیط و لوله صرف نظر شده است)

- با توجه به عدد رینولدز^۳ جریان داخل لوله، جریان سیال بصورت آشفته^۴ می‌باشد.

- گاز طبیعی بصورت متان طبیعی و بصورت گاز واقعی و تابع معادله پنگ-رابینسون^۵ در نظر گرفته شده

- جریان تراکم پذیر و فرایند در حالت گذرا فرض شده است

^۱ Momentume

^۲ Adiabatic

^۳ Reynolds Number(Re)

^۴ Turbulent

^۵ Peng-Robinson

جهت دست یابی به هدف مذکور، معادلات ذیل باید بصورت همزمان در کل دامنه ی حل (در سراسر لوله) حل گردد.

(۱) معادله ی بقای جرم (معادله پیوستگی)

(۲) معادله ی بقای اندازه حرکت (معادله مومنتوم)

(۳) معادله ی بقای انرژی (معادله انرژی)

(۴) معادله حالت گاز واقعی پنگ-رابینسون

جهت حل همزمان این چهار معادله از روش عددی حجم محدود توسط نرم افزار فلوئنت^۱ استفاده شده است. به این منظور دامنه ی حل بصورت گره های محاسباتی شبکه بندی شده و معادلات مذکور در تمامی این گره های محاسباتی حل شده است. جزئیات فرضیات و مراحل حل عددی در فصول بعدی کاملاً شرح داده خواهند شد.

^۱ Fluent

فصل دوم

انتقال و توزیع گاز طبیعی و حوادث
مرتبط با آن

۲-۱- انتقال گاز طبیعی، حوادث و مشکلات:

گاز طبیعی از اجزای متفاوتی تشکیل شده است اما بخش عمده‌ی آن را متان تشکیل می‌دهد. این گاز در زندگی امروز به عنوان یکی از مهم ترین سوخت‌ها، نقش بسیار مهمی در زندگی بشر ایفا می‌کند. گاز طبیعی از زمان استخراج تا زمانی که به دست مصرف کنندگان می‌رسد، مسافت طولانی را طی کرده و عملیات متفاوتی بر روی آن انجام می‌پذیرد تا قابل استفاده باشد. در این فصل ابتدا به معرفی اجزای تشکیل دهنده‌ی گاز طبیعی و سپس به معرفی شرایط خطوط انتقال و توزیع گاز و عملیاتی که بر روی آن انجام می‌شود پرداخته خواهد شد. همچنین حوادثی که ممکن است در خطوط انتقال گاز رخ دهند، تشریح خواهند شد.

۲-۲- گاز طبیعی، مصارف و ترکیبات آن:

گاز طبیعی یا همان گاز، نوعی سوخت فسیلی گازی شکل است که اثرات زیان بار آن نسبت به دیگر سوخت‌های فسیلی کمتر است و جزء منابع تجدید ناپذیر محسوب می‌شود [۲].

در حال حاضر ۲۰ درصد مصرف جهانی انرژی مربوط به گاز طبیعی است که این مصرف روند رو به رشد ۲,۴ درصدی دارد [۲].

برای این که موقعیت گاز را در بین دیگر منابع انرژی بهتر بشناسیم، منابع انرژی را بصورت زیر تقسیم بندی می‌کنیم:

۱. سوخت‌های فسیلی که تجدید ناپذیر هستند (مانند نفت و گاز و زغال سنگ و...)

۲. سوخت‌های غیر فسیلی که منابع تجدید پذیر دارند (مانند خورشید و باد و انرژی آب و...)

همانطور که در بالا قابل ملاحظه است، میتوان انرژی‌ها را در دو دسته‌ی تجدید پذیر و تجدید ناپذیر نیز قرار داد که خورشید و باد و انرژی آب در دسته‌ی منابع تجدید پذیر و مابقی در گروه انرژی‌های تجدید ناپذیر قرار می‌گیرند [۳].

ذخایر نفت و گاز، بزرگترین منابع تامین انرژی جهان هستند و ایران سهم عمده‌ای از این منابع را دارا است. ذخایر شناخته شده در ایران نسبت به کل منابع شناخته شده در جهان رقم قابل توجهی است. ایران با دارا بودن ۱۶ درصد منابع گاز جهان پس از روسیه که ۲۶ درصد این منابع را دارا است در جایگاه دوم بزرگترین دارندگان منابع گاز جهان ایستاده است [۳].

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

قسمت عمده‌ی گاز طبیعی را متان (CH_4) یعنی ساده ترین نوع هیدروکربن تشکیل داده است اما علاوه بر متان هیدروکربن‌های سنگین تر و پیچیده تر مانند اتان (C_2H_6) و پروپان (C_3H_8) و بوتان (C_4H_{10}) نیز در گاز طبیعی وجود دارند. همانطور که گفته شد، بیشتر گاز طبیعی از متان ساخته شده و پس از آن اتان عنصری است که بیشترین سهم را نسبت به سایر عناصر دارا می‌باشد. گازهای سنگین تر سهم بسیار جزئی در گاز طبیعی دارند. در گاز طبیعی ترکیبات دیگری نیز مانند N_2 و CO_2 و H_2S وجود دارد که درصد آن‌ها در مخازن متفاوت و قسمت‌های مختلف خط لوله های اصلی متفاوت است. همچنین آب نیز همیشه با گاز طبیعی استخراج شده از مخزن همراه است که در پالایشگاه‌ها در بخشی به نام واحد نم زدایی، آب و ترکیب های مزاحم که ارزش حرارتی گاز را پایین آورده و همچنین مشکلاتی در انتقال و مصرف گاز بوجود می‌آورند، از گاز طبیعی تفکیک شده و پس از آن گاز به خطوط انتقال تزریق و به

مصرف کنندگان تحویل داده می‌شود. در این خصوص نمونه‌ای از گاز ارسالی به خطوط انتقال گاز پالایشگاه گاز خانگیران که شامل ۹۸,۶۴ درصد متان می‌باشد آورده شده است. جدول ۱-۲ نشان دهنده‌ی اجزای تشکیل دهنده‌ی گاز در این ایستگاه و سهم هر کدام از اجزاء می‌باشد.

جدول ۱-۲ - درصد مولی اجزاء تشکیل دهنده‌ی گاز ارسالی به خطوط انتقال گاز پالایشگاه گاز خانگیران [۴]

جزء	فرمول شیمیایی	درصد مولی (%)
متان	CH ₄	98.64
اتان	C ₂ H ₆	0.593
پروپان	C ₃ H ₈	0.065
ایزو بوتان	I-C ₄	0.015
نرمال بوتان	n-C ₄	0.034
ایزو پنتان	I-C ₅	0.026
+C ₆	+C ₆	0.125
نیتروژن	N ₂	0.428
دی اکسید کربن	CO ₂	0.055
		در صد کل=۱۰۰%

سوخت‌های فسیلی از جمله نفت و گاز و زغال سنگ در سراسر دنیا به طور گسترده‌ای توزیع و مصرف می‌شوند و این در حالی است که منابع آن‌ها در حال کاهش است. این سوخت‌ها منابعی تجدید ناپذیر دارند و به همین دلیل کاهش منابع سوخت‌های فسیلی یکی از نگرانی‌های عمده محافل انرژی جهان است. این منابع روزی تمام می‌شوند و با تمام شدن آن‌ها مشکلات عدیده‌ای برای جهانیان پیش می‌آید. با ذکر این توضیحات اولین فکر و ایده‌ای که به ذهن مصرف کنندگان گاز می‌رسد، اصلاح الگوی مصرف است.

باید منابع انرژی و میزان آن‌ها، و انواع انرژی و مصارف آن‌ها و همچنین علل هدر رفت آن‌ها را بخوبی بشناسیم تا بتوانیم برای مصرف بهینه و صرفه جویی، برنامه ریزی کنیم. به عقیده‌ی کارشناسان مسائل انرژی تقاضای گاز طبیعی در جهان در سال‌های آینده چند برابر خواهد شد و گاز طبیعی پرمصرف ترین و

انرژی برتر قرن خواهد شد. پس ابتدا باید درباره مصارف گاز بحث شود تا بتوان در رابطه با سوخت‌های جایگزین احتمالی آن ابراز نظر نمود. امروزه گاز طبیعی در جهان دارای مصارف متعدد در چهار گروه زیر است:

۱. مصرف خانگی

۲. مصرف برای تامین انرژی مورد نیاز صنایع بزرگ و نیروگاه‌های تولید انرژی الکتریکی

۳. مصرف به عنوان سوخت اتومبیل

۴. مصرف به عنوان خوراک واحدهای پتروشیمی

سه گروه اول گاز را بعنوان سوخت و برای تامین انرژی و گروه چهارم را به عنوان خوراک استفاده می‌کنند [۳].

۲-۳- انتقال و توزیع گاز طبیعی:

گاز طبیعی به عنوان یک منبع نسبتاً پاک انرژی که اثرات سوء آن کمتر از بقیه‌ی انرژی‌های فسیلی است، هر روز بیشتر مورد توجه قرار می‌گیرد. کشور ما نیز به عنوان دومین دارنده‌ی منابع گاز جهان همواره جهت پالایش و استحصال تلاش‌های فراوانی نموده است. هم اکنون اکثر نقاط کشور از این نعمت برخوردارند و یکی از دغدغه‌های اصلی جلوگیری از هدر رفت آن در طی مسیر انتقال گاز است [۵].

گاز طبیعی از استخراج تا مصرف مسافت زیادی را طی کرده و فرایندهای زیادی بر روی آن انجام می‌شود.

شکل ۲-۱ نشان دهنده‌ی شبکه‌ی توزیع گاز طبیعی است. در این قسمت سعی شده است تا اتفاقاتی که در طول مسیر از خروجی پالایشگاه تا محل مصرف ممکن است به وقوع بپیوندد به اختصار شرح داده شود [۳].



شکل ۱-۲- شبکه‌ی توزیع گاز طبیعی [۶]

۲-۳-۱- خطوط لوله‌ی اصلی انتقال گاز:

بین مراکز تولید و مصرف کنندگان گاز طبیعی مسافت طولانی وجود دارد که خطوط اصلی گاز یا IGAT^۱ وظیفه‌ی انتقال آن را دارند. جمهوری اسلامی ایران هم اکنون دارای طولانی‌ترین شبکه خطوط لوله نفت و گاز در منطقه خاورمیانه و آسیای مرکزی می‌باشد. از سویی طرح‌های در دست طراحی و اجرای خط لوله در ایران (خطوط اصلی انتقال گاز و خطوط متعدد انتقال نفت خام و فرآورده‌های نفتی) جمهوری اسلامی ایران را به مهد صنعت لوله‌سازی و اجرای طرح‌های خط انتقال نفت و گاز در منطقه و یکی از مهم‌ترین بازارهای دنیا تبدیل کرده است. در شکل نمونه‌ای از این خطوط نشان داده شده است. برای کاهش قطر خط لوله و سهولت انتقال گاز باید فشار گاز داخل خط لوله را افزایش داد، به همین

^۱ Iranian GAs Transfer

دلیل در طول خطوط لوله‌ی اصلی انتقال گاز ایستگاه‌های افزایش فشار وجود دارند که با کمپرسورهای عظیم این وظیفه را انجام می‌دهند.

در گذشته فشار داخل خط لوله حدود 1100 psi بود که با طراحی‌های جدید این فشار تا 1400 psi افزایش یافته است [۳].



شکل ۲-۲ - خطوط لوله‌ی اصلی انتقال گاز [۷]

۲-۳-۲- ایستگاه تقلیل فشار گاز برون شهری:

وظیفه‌ی IGAT ها انتقال گاز از مراکز تولید به مراکز مصرف و مبادی صدور گاز است. فشار گاز در خطوط اصلی آنقدر بالا است که این خطوط نمی‌توانند عهده دار توزیع گاز در شهرها و صنایع باشند پس برای مصرف گاز، نخستین قدم آن است که فشار گاز کاهش یابد. از این رو از IGAT انشعاب گرفته شده و در مبادی ورودی شهرها ایستگاه‌های تقلیل فشار برون شهری (CGS)^۱ طراحی و ساخته می‌شوند. این

^۱ City Gate Station

ایستگاه‌ها به کمک تعدیل کننده‌های فشار^۱، فشار را تا ۲۵۰ psi کاهش می‌دهند و ظرفیت این تعدیل کننده‌ها بستگی به جمعیت شهرها دارد [۳]. در این ایستگاه‌ها قسمت‌های مختلفی وجود دارد که قسمت گرم کننده‌ی گاز (هیتر)، یکی از بخش‌های مهم و حیاتی آن بشمار می‌آید. اهمیت هیتر از آن جهت است که، گاز طبیعی در طی فرآیند کاهش فشار توسط شیر انبساط (رگلاتور)، دچار افت دما می‌گردد، حال اگر این میزان کاهش دما، از دمای هیدراته شدن گاز نیز بیشتر باشد، موجب میعان و حتی یخ زدگی بخار آب موجود در گاز شده و در نتیجه احتمال مسدود شدن مجرای عبور گاز وجود خواهد داشت؛ بنابراین برای جلوگیری از وقوع چنین اتفاقی دمای گاز قبل از کاهش فشار در ایستگاه، باید افزایش یابد. شکل ۲-۳ نشان دهنده‌ی قسمتی از یک ایستگاه تقلیل فشار گاز طبیعی برون شهری است.



شکل ۲-۳ - بخشی از ایستگاه تقلیل فشار گاز برون شهری [۸]

^۱ Regulator

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

گاز حاصل از خروجی CGS با فشار ۲۵۰ psi وارد شبکه‌ی توزیع شهری می‌شود، اما فشار گاز هنوز بالاست و مناسب مصرف شهری نمی‌باشد. به همین دلیل در خیابان‌ها و قبل از گرفتن انشعابات محله‌ای، بار دیگر باید فشار آن کاهش یابد. در این مرحله برای کاهش فشار گاز از ایستگاه تقلیل فشار درون شهری (TBS)^۱ استفاده می‌شود. این ایستگاه‌ها معمولاً به دو شکل کابینتی و مسطح اجرا می‌شوند که در دو شکل زیر هر دو مدل نشان داده شده‌اند. فشار ورودی به این ایستگاه‌ها ۲۵۰ psi و خروجی آن حدود ۶۰ psi می‌باشد.



(الف)



(ب)

شکل ۳-۲ - ایستگاه تقلیل فشار گاز درون شهری (الف کابینتی) از نوع مسطح [۹]

^۱ Town Border Station

۲-۳-۴- شبکه توزیع گاز شهری:

خروجی TBS ها با فشار حدود ۶۰ psi در شبکه‌ای مجزا در محله‌ها توزیع و انشعاب مصرف کنندگان تا درب منازل به ارتفاعی حدود ۱۵۰ cm نصب می‌شود [۳]. شکلی از تعدیل کننده‌ی گازی که قبل از ورود به منازل نصب می‌شود در شکل ۲-۵ نشان داده شده است.



شکل ۲-۵ - تعدیل کننده‌ی فشار گاز قبل از درب منازل [۱۰]

فشار در انشعابات‌ی که به درب منازل می‌رسد حدود ۶۰ psi است، در حالی که فشار مورد نیاز مصرف کنندگان و وسایل گاز سوز خانگی ۰٫۲۵ psi می‌باشد. به همین دلیل بعد از انشعاب پشت در منازل و قبل از کنتور گاز هر مصرف کننده، یک تعدیل کننده‌ی فشار نصب می‌شود. البته مصرف کنندگان گازی که در مجتمع‌های مسکونی و برج‌های بلند زندگی می‌کنند و همچنین مصرف کنندگان شهری غیر مسکونی به جای تعدیل کننده‌ی فشار مجبور هستند از ایستگاه‌های تقلیل فشار گاز اختصاصی استفاده کنند [۳].

۲-۴- گاز های گمشده (محاسبه نشده):

همواره مقدار زیادی گاز تحت عنوان گازهای گمشده یا محاسبه نشده (UAG)^۱ هدر می‌شود. این موضوع یکی از چالش‌های اصلی در مدیریت شبکه‌های انتقال و توزیع گاز طبیعی است. UAG عبارت است از اختلاف بین گاز وارد شده (خریداری شده) به شبکه‌ی گازرسانی و گاز خارج شده (فروخته شده) که مقدار آن هم می‌تواند مثبت و هم می‌تواند منفی باشد، مثبت یا منفی بودن مقدار UAG بیانگر آن است که مقدار گاز خریداری شده و فروخته شده با هم برابر نیستند و به معنی از بین رفتن سرمایه است. در هر دو حالت، شناسایی عوامل تاثیر گذار و برطرف کردن آن‌ها امری بسیار مهم است [۱۱]. در ادامه به بررسی برخی عوامل موثر در گم شدن گاز می‌پردازیم.

۲-۴-۱- نشت گاز:

نشت گاز طبق تعریف عبارت است از خروج ناخواسته گاز که به علل گوناگون و به طور ناگهانی روی می‌دهد. همواره امکان بروز پدیده نشت گاز در تاسیسات، خطوط لوله، شبکه های گاز رسانی و منازل وجود دارد و اگر در مکان‌های سربسته و محصور اتفاق بیفتد، می‌تواند به حوادث ناگوار و خسارات غیرقابل جبران منجر گردد. نشت گاز به علل مختلف در لوله‌های گاز و تاسیسات گازی روی می‌دهد که مهمترین آن‌ها عبارت است از:

أ. خوردگی و فرسودگی: 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. عوامل محیطی مثل

^۱ UnAccounted Gas

سرما، یخبندان، گرما و...، همچنین خسارت‌های عمدی و سهوی و عملیات خارج از محدوده‌ی طراحی نیز ممکن است به لوله‌ها و مخازن آسیب برساند. و فرسودگی لوله‌ها و مخازن همچنین یک عامل طبیعی به شمار می‌رود.

ب. سایش داخلی: در اثر وجود ناخالصی‌های همراه با گاز پدیده‌ی سایش اتفاق می‌افتد. به طور معمول در محل خم لوله‌ها و یا در شیرهای کاهش دهنده‌ی فشار به علت افزایش سرعت گاز، میزان سایش بیشتر است .

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 رزوه‌ای .

و. نقص در جوش لوله‌ها و اتصالات جوشی .

بنابراین با توجه به وسعت عواملی که می‌توانند نشتی را ایجاد کنند و همچنین هزینه‌ها و مخاطراتی که این پدیده دربر دارد، نشت یابی و جلوگیری از تداوم نشت، مساله‌ی بسیار مهمی است. که با توجه به وسعت و گستردگی این پدیده تشخیص نشتی به طور دقیق و سریع کار بسیار مشکلی است. حجم گاز هدررفته بر اثر نشت گاز از یک سوراخ، به اندازه‌ی سوراخ و فشار سیستم بستگی دارد، هرچه اندازه‌ی سوراخ بزرگتر و فشار سیستم بیشتر باشد، حجم گاز هدر رفته نیز بیشتر خواهد بود [۱۲].

۲-۴-۲- دستگاه‌های اندازه گیری:

دستگاه‌های اندازه گیری برای اندازه گیری گاز خشک و تمیز طراحی شده‌اند ولی در اکثر مواقع، گازی که در سیستم جریان دارد نه خشک است و نه تمیز. همین امر به مرور زمان بر روی این دستگاه‌ها تاثیر می‌گذارد و باعث می‌شود که نتوانند بطور دقیق مقادیر را اندازه گیری کنند. دلایلی مانند جمع شدن گرد

و غبار و کثیفی بر روی چرخ دنده‌های قسمت دوار کنتورهای گاز دیافراگمی، شکسته شدن صفحه‌ی اوریفیس و ...، باعث کاهش دقت اندازه گیری این دستگاه‌ها می‌شود، به همین دلیل این دستگاه‌ها باید بصورت دوره‌ای به هنگام کارکرد آزموده شوند [۱۲].

۲-۴-۳- آسیب‌های شخص ثالث:

برخی اتفاقات ناگهانی و اجنبی ناپذیر به هنگام عملیات تعمیر و نگهداری و همچنین اعمال تنش‌های اضافی به خط لوله و نیز برخورد اجسام خارجی مانند بیل مکانیکی و از این قبیل ماشین آلات هنگام عملیات حفاری با خط لوله می‌توانند باعث آسیب و شکستگی در آن شود [۱۲].

۲-۴-۴- سرقت گاز:

سرقت گاز یکی از نگرانی‌های بسیار مهم در زمینه‌ی گازهای گمشده است. سرقت گاز فقط به دلیل از بین رفتن سرمایه‌ی ملی مورد توجه قرار نگرفته بلکه علت اصلی نگرانی‌ها در این زمینه بحث ایمنی است، زیرا گرفتن انشعابات غیر مجاز و تغییر در خط لوله و همچنین تغییرات غیر قانونی در کنتورهای گاز می‌تواند بسیار خطرناک و حادثه آفرین باشد [۱۲].

۲-۴-۵- عملیات تخلیه (purging):

خطوط انتقال گاز در ایران بسیار گسترده است و در تمامی این خطوط برای تمیز کردن خط لوله از لجن و رسوبات از شیرهای تخلیه استفاده می‌شود. این شیرها معمولاً در نزدیکی ایستگاه‌های تقلیل فشار و قبل از رگلاتور و در زیر فیلتر نصب می‌شوند. یکی از دلایل گمشدگی گاز در صنعت گاز کشور طی فرایند تخلیه می‌باشد که در حال حاضر مقدار دقیق آن و روابط مشخصی برای محاسبه وجود ندارد. به دلیل فشار بسیار بالای موجود در خط لوله، با هر بار باز شدن این شیرها مقدار زیادی گاز با سرعت بسیار

بالا از آن خارج می‌شود که مومنتوم بالایی دارد و این فرایند به معنای هدر رفت فراوان انرژی و سوخت است

۲-۴-۶- عدم دقت در کنتورهای خانگی و صنعتی:

خرابی و یا عدم دقت کنتورهای خانگی و از آن مهمتر کنتورهای صنعتی یکی از مشکلات شایع است که با اینکه بسیار مورد توجه مسئولین قرار گرفته، اما هنوز سهم قابل توجهی در میزان گازهای گم شده دارد و نیازمند بازرسی و صحت سنجی های ادواری می‌باشند.

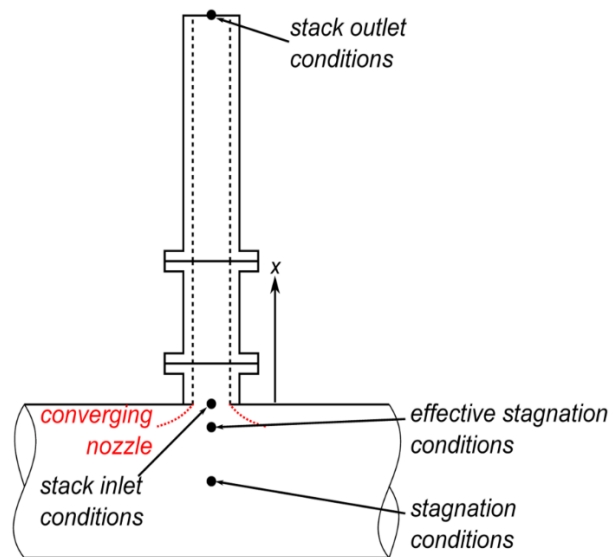
۲-۴-۷- عدم اندازه‌گیری گاز طبیعی مصرفی توسط هیترها در ایستگاه‌های تقلیل فشار برون شهری (C. G. S):

همانطور که گفته شد، در ایستگاه‌های تقلیل فشار برون شهری، به دلیل آنکه فشار گاز به میزان قابل توجهی کاهش می‌یابد، دمای گاز نیز افت شدیدی پیدا می‌کند و برای جلوگیری از یخ زدگی و مسدود شدن خط لوله، از هیترهایی جهت گرم کردن گاز استفاده می‌شود ولی مقدار این گاز مصرفی معمولاً محاسبه نمی‌شود.

۲-۵- بررسی پدیده‌ی تخلیه خطوط لوله گاز طبیعی:

در بالا، عوامل متعددی که باعث گم شدن گاز از زمان تزریق به خطوط انتقال تا مصرف آن توسط مشتریان و مصرف کنندگان می‌شود، ذکر شدند. تمامی این عوامل بر روی میزان گازهای گمشده تاثیر گذار هستند. یکی از عواملی که باعث گم شدن گاز در صنعت گاز کشور می‌شود عملیات purging است. کشور ایران جزء تولید کنندگان و صادر کنندگان بزرگ این محصول است و خطوط انتقال گاز در کشورمان بسیار گسترده است و در تمام این خطوط، برای زدودن ناخالصی‌ها و رسوبات و لجن‌های جمع

شده در خط لوله، از عملیات purging استفاده می‌شود. تخلیه‌ی خطوط لوله‌ی گاز جهت تمیز کاری انجام می‌شود. از افزایش سرعت ایجاد شده به هنگام باز کردن شیرهای purging، جهت زدودن ناخالصی‌هایی که در لوله جمع می‌شود می‌توان استفاده کرد. از این رو معمولاً از قسمت پایین لوله یک انشعاب گرفته می‌شود (چون در این حالت انشعاب به مواد ته نشین شده نزدیکتر است) و در انتهای آن یک شیر تخلیه نصب می‌شود و از این انشعاب جهت تخلیه و تمیز کردن خط لوله استفاده می‌شود. البته در موارد بسیاری هم دیده شده که این انشعاب از قسمت پایینی لوله گرفته نشده. هنگام باز شدن شیر، گاز با سرعت و دبی بالا به اتمسفر تخلیه می‌شود و همراه با خود رسوبات و لجن‌های موجود در خط لوله را بیرون می‌کشد. این گاز به اتمسفر تخلیه می‌شود و هم آلودگی محیط زیست و هم هدر رفت انرژی به همراه دارد. به همین جهت آگاهی از میزان گاز خارج شده می‌تواند اطلاعاتی در جهت امکان و نحوه‌ی استفاده از آن را به ما بدهد. شکل بیانگر نحوه‌ی قرار گرفتن انشعاب و شیر بر روی خط لوله می‌باشد.



شکل ۶-۲ - شیر تخلیه، قرار گرفته بر روی خط لوله‌ی اصلی انتقال گاز [۱۳]

۲-۵-۱- بررسی پدیده‌ی خفگی^۱:

یکی از مواردی که در پدیده‌ی نشت و تخلیه‌ی گاز باید به آن توجه نمود، پدیده‌ی خفگی است. این پدیده هنگامی در نازل‌ها رخ می‌دهد که سرعت سیال عبور کننده از نازل به سرعت صوت^۲ برسد، به عبارت دیگر هنگامی که عدد ماخ^۳ جریان به یک برسد پدیده‌ی خفگی در نازل اتفاق می‌افتد. در این حالت فشار خروجی نازل با فرض ثابت بودن فشار ورودی تغییر می‌کند تا دبی گاز خروجی افزایش یابد. هنگامی که به فشار بحرانی برسیم، سرعت در گلوگاه نازل به سرعت صوت می‌رسد و عدد ماخ جریان برابر یک می‌شود و از آن به بعد، تغییر در فشار خروجی نازل تاثیری بر دبی عبوری نخواهد داشت و در این حالت دبی عبوری حداکثر شده است. به این حالت که دبی خروجی به حداکثر مقدار خود رسیده و سیال با سرعت صوت از نازل خارج می‌شود، پدیده‌ی خفگی می‌گویند.

اگر نازلی مطابق شکل ۲-۷ در نظر بگیریم، اگر در ابتدا p_b برابر با p_0 باشد، جریانی در نازل برقرار نخواهد شد. با کاهش p_b جریان در نازل برقرار خواهد شد و فشار در ناحیه‌ی خروجی نازل (p_e) برابر با پس فشار (فشار در ناحیه‌ی تخلیه) می‌شود و عدد ماخ در ناحیه‌ی خروجی کمتر از یک خواهد بود. در این ناحیه‌ی کاری (ناحیه‌ی 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 یابد. معادله ۲-۱ میزان این فشار را برای گاز ایده‌آل با ظرفیت حرارتی γ بیان می‌کند.

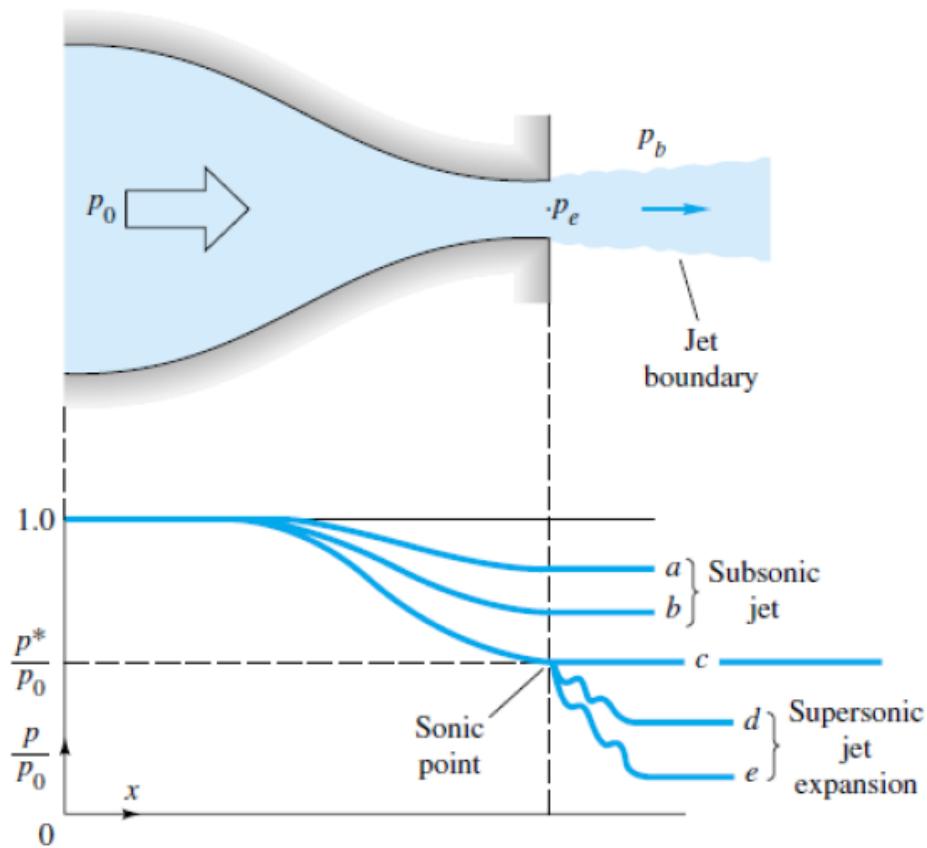
$$p^* = p_0 \left(\frac{2}{\gamma + 1} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma - 1}} \quad (۲-۱)$$

^۱ Choking

^۲ Sound Speed

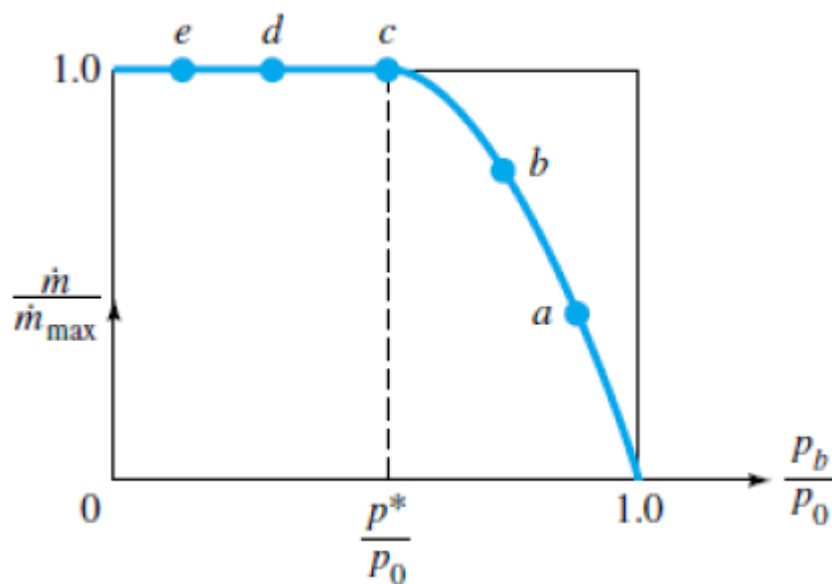
^۳ Mach number

هنگامی که p_b به این مقدار برسد، عدد ماخ در مقطع خروجی برابر یک خواهد شد و بعد از آن کاهش p_b دیگر تاثیری بر نرخ جریان داخل نازل نخواهد داشت و p_e برابر با p^* باقی می‌ماند. نرخ جریان جرمی ثابت مانده و عدد ماخ در مقطع خروجی برابر یک 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^۱ صورت می‌گیرد.



(الف)

^۱ Prandtl-Meyer



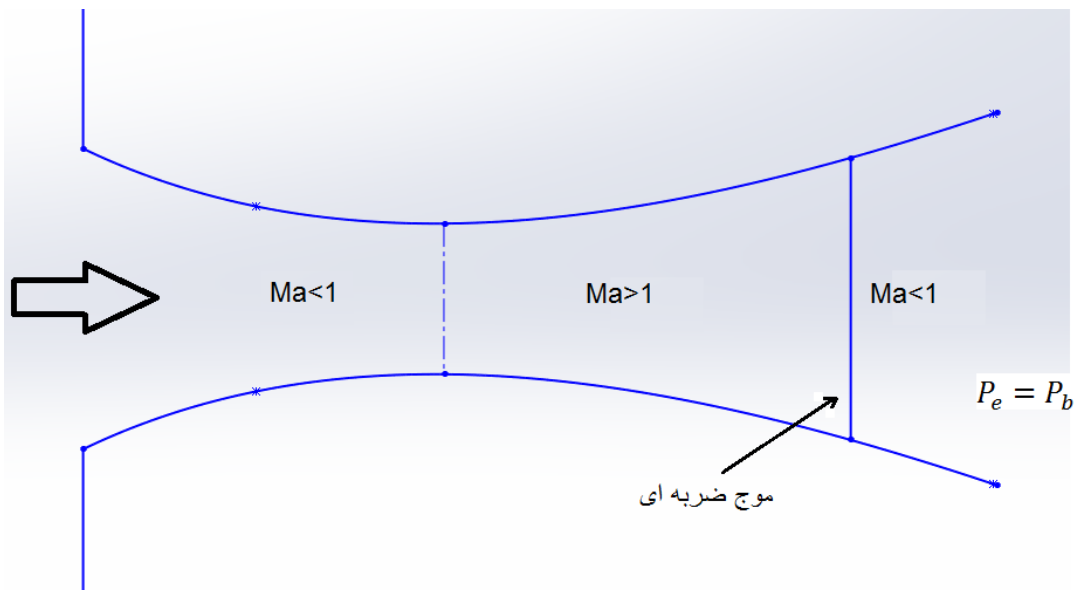
(ب)

شکل ۷-۲ - پروفیل، (الف) فشار، (ب) دبی جرمی، در نازل همگرا [۱۴]

۲-۵-۲- نازل‌های همگرا واگرا:

در این نوع نازل‌ها، هنگامی که پس‌فشار (P_b) تا مقدار بحرانی کاهش می‌یابد، فشار در گلوگاه بحرانی شده و عدد ماخ در آن ناحیه به یک می‌رسد. P_{bcrit} مقدار پس‌فشار بحرانی را نشان می‌دهد. حال اگر مقدار پس‌فشار (P_b) باز هم کاهش یابد و کمتر از P_{bcrit} شود، ناحیه‌ای از جریان مافوق صوت درست در پایین دست جریان گلوگاه رشد می‌کند. این ناحیه‌ی جریان مافوق صوت توسط یک موج ضربه‌ای عمودی به پایان می‌رسد که فشار را افزایش داده و سرعت را تا حد مقدار مادون صوت کاهش می‌دهد. سپس سرعت جریان به صورت مادون صوت کاهش یافته تا فشار در صفحه‌ی خروجی، P_e ، برابر با پس-فشار، P_b ، گردد. با کاهش پس‌فشار، ناحیه‌ی جریان مافوق صوت گسترش یافته و موج ضربه‌ای به سمت بیرون نازل حرکت می‌کند.

همانطور که در شکل ۸-۲ قابل مشاهده است، در پایین دست گلوگاه عدد ماخ بزرگتر از یک می‌باشد.



شکل ۲-۸ - نازل‌های همگرا-واگرا و اتفاق افتادن عدد ماخ بزرگتر از یک، بعد از گلوگاه

۲-۵-۳- حالت‌های مختلف تخلیه‌ی خط لوله گاز طبیعی:

تخلیه‌ی گاز از خطوط لوله به دو شکل انجام می‌شود. یکی جهت تخلیه‌ی کامل خط لوله جهت انجام عملیات تمیز کاری کلی یا انجام تعمیرات که در این حالت گاز داخل خط لوله را به صورت کامل و از طریق تزریق یک گاز خنثی به داخل قسمت مورد نظر از خط لوله انجام می‌دهند، به این شکل که ابتدا و انتهای قسمت مورد نظر از خط لوله را مسدود کرده و از یک سمت لوله گاز خنثی را تزریق و از سمت دیگر گاز داخل خط لوله را تخلیه می‌کنند.

شکل دیگر تخلیه نیز با باز کردن ناگهانی شیرهای تخلیه انجام می‌شود. با باز کردن این شیرها به دلیل اختلاف فشار بالای خط لوله با محیط، گاز با سرعت زیادی (نزدیک به سرعت صوت) وارد اتمسفر می‌شود و با خود ناخالصی‌ها را بیرون می‌کشد. در این مقاله منظور از عملیات تخلیه‌ی خطوط لوله گاز طبیعی (purging)، شکل دوم آن است.

۲-۵-۴- بررسی نظری فرایند تخلیه:

میزان دبی جرمی که در شیرهای تخلیه جریان پیدا می‌کند به عواملی از جمله شرایط فیزیکی حاکم بر مسئله بستگی دارد. اگر تخلیه توسط یک دریچه که مستقیماً بر روی خط لوله‌ی اصلی قرار گرفته است انجام شود شرایط مانند وقتی است که یک سوراخ بر روی خط لوله ایجاد شده، سرعت جریان در مقطع خروجی به سرعت صوت می‌رسد. به عبارت دیگر در مقطع خروجی عدد ماخ جریان به یک رسیده و پدیده‌ی خفگی اتفاق می‌افتد.

ملاک اینکه در مقطع خروجی چه نوع جریانی داریم و اینکه سرعت در این مقطع به چه اندازه است توسط کمیتی به نام نسبت فشار بحرانی^۱ مشخص می‌شود که بصورت زیر تعریف می‌شود:

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

در این رابطه p_a بیانگر فشار محیط بیرون و p_{cr} بیانگر فشار بحرانی نقطه ۲ می‌باشد. بر اساس این رابطه در صورتی که فشار نقطه‌ی ۲، بزرگتر از فشار بحرانی در این نقطه باشد ($p_2 > p_{cr}$)، در لوله خفگی رخ داده و سرعت تخلیه به سرعت صوت^۲ می‌رسد. اما در نقطه‌ی مقابل اگر $p_2 < p_{cr}$ باشد، یک جریان مادون صوت^۳ خواهیم داشت. به دلیل آنکه فشار داخل خطوط اصلی انتقال گاز بسیار بالا است و گاز تخلیه شده، مستقیماً به اتمسفر تخلیه می‌شود، فشار نقطه‌ی دوم در تمام موارد کوچکتر از فشار بحرانی بود. در تمام مطالعات پیشین نیز بر این موضوع صحت گذاشته شده. لذا پدیده‌ی خفگی اتفاق می‌افتد، یعنی عدد ماخ در خروجی شیر به یک رسیده و گاز با سرعت صوت از مقطع خروجی شیر خارج

^۱ Critical Pressure Ratio (CPR)

^۲ Sonic

^۳ Subsonic

می‌شود. در این حالت دبی خروجی آنقدر افزایش پیدا می‌کند که به یک مقدار ثابت می‌رسد و پس از آن جریان به شکل یک جریان پایا در می‌آید و دبی خروجی تغییر نمی‌کند.

در رابطه با پژوهش حاضر، از آنجا که شیر تخلیه مستقیماً به خط لوله‌ی اصلی متصل نیست و گاز خروجی توسط یک انشعاب از خط لوله‌ی اصلی به سمت شیر تخلیه هدایت می‌شود، به دلیل بوجود آمدن لایه مرزی در این انشعاب و کوچک شدن مقطع عبور جریان، این انشعاب به شکل یک نازل همگرا-واگرا عمل می‌کند. در این حالت یک ناحیه‌ی مافوق صوت ایجاد می‌شود و این ناحیه به سمت مقطع شیر حرکت می‌کند، پس گاز خروجی با سرعتی بیشتر از سرعت صوت از مقطع شیر عبور می‌کند.

بر اساس موارد ذکر شده می‌توان نتیجه گرفت که میزان جریان تخلیه شده از خط لوله به سه عامل زیر بستگی دارد:

(۱) سیال عامل و فاز آن:

با توجه به فاز ماده‌ی خروجی مدل‌های متفاوتی برای تخلیه وجود دارد. لذا فاز و نوع سیال خروجی از اهمیت زیادی برخوردار است. در این پژوهش جریان گازی مد نظر است.

(۲) فشار سیال داخل لوله:

این فشار نیز از عوامل مشخص کننده‌ی میزان دبی خروجی می‌باشد و همانطور که گفته شد از عوامل مشخص کننده‌ی آن است که پدیده‌ی خفگی اتفاق می‌افتد یا نه. همچنین سرعت گاز خروجی نیز به آن وابسته است

(۳) سطح مقطع خروج جریان:

مقدار ماده‌ی رها شده به قطر شیر رها کننده و در مسائل گذرا به مدت زمان باز بودن شیر یا همان زمان تخلیه وابسته است.

۲-۵-۵- علل انجام عملیات تخلیه:

عملیات تخلیه‌ی خطوط لوله‌ی اصلی گاز طبیعی به علل متفاوتی انجام می‌شوند که مهم‌ترین آن‌ها عبارتند از:

الف- از بین بردن ذرات ناخالصی و آلودگی‌های موجود در گاز طبیعی :

با هر بار انجام عملیات تخلیه، ناخالصی‌های موجود در گاز به همراه مقدار زیادی از گاز داخل لوله با سرعت زیاد از شیر خارج شده و از خط لوله زدوده می‌شوند.

ب- جداسازی ناخالصی‌های درون گازها از نقطه نظر ایمنی:

وجود ناخالصی در خط لوله می‌تواند آسیب‌های فراوانی به بار آورد که از جمله‌ی آن‌ها خرابی دستگاه-ها و تاسیسات می‌باشند. همچنین وجود ذرات بزرگتر مانند خرده سنگ حتی می‌تواند باعث انفجار و آسیب‌های غیر قابل جبرانی از این قبیل باشد.



شکل ۲-۹ - انفجار در خط لوله‌ی اصلی انتقال گاز [۹]

ج- کنترل خوردگی :

وجود ذرات و ناخالصی‌ها درون خطوط لوله‌ی انتقال گاز به مرور زمان باعث خوردگی و نهایتاً نشتی و ایجاد سوراخ در خط لوله شود. خوردگی در این خطوط همیشه وجود دارد اما وجود ناخالصی‌ها این فرایند را تسریع می‌کند.



شکل ۲-۱۰ - خوردگی در قسمتی از خط لوله [۱۰]

د- تنظیم ترکیب استاندارد محصولات گاز:

برای اینکه گاز طبیعی به بهترین نحو بسوزد و کمترین میزان آلاینده را تولید کند و همچنین برای مصرف کننده کمترین آسیب و برای دستگاه‌هایی که از آن استفاده می‌کنند، کمترین اصطحلاک و آسیب را داشته باشد، لازم است ترکیبی استاندارد داشته باشد که انجام عملیات تخلیه به این امر کمک می‌کند.

ه- پرهیز از تشکیل هیدرات در دماهای پایین

و- کاهش هزینه‌های تقویت فشار گاز

ز- جلوگیری از مسمومیت کاتالیزورهای کارخانجات دریافت کننده محصولات گاز

ح- در نهایت رعایت حد مجاز انتشار مواد آلاینده محیط زیست، الزامی می‌باشد

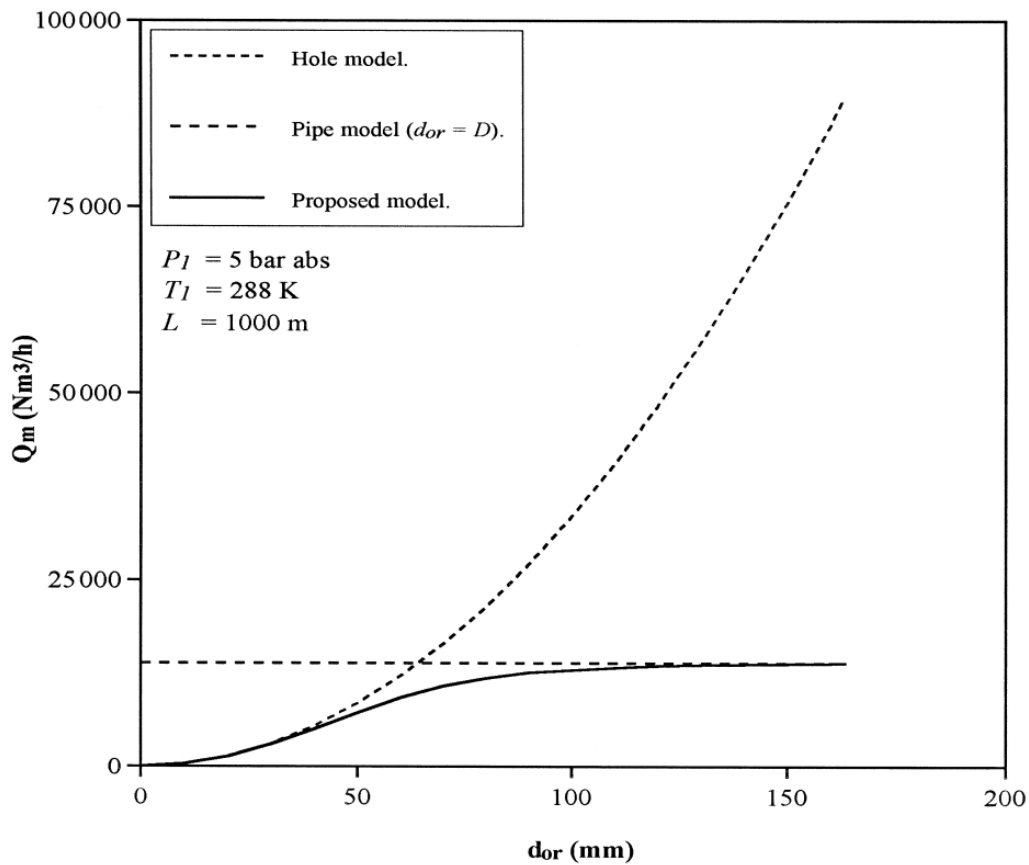
فصل سوم

مروری بر پژوهش‌های گذشته

۳-۱- تاریخچه:

در تمام مسیرهای خطوط لوله‌ی گاز، لوله‌های صاف وجود دارند، سطح مقطع این لوله‌ها بجز در اتصالات صاف و در جداره‌ی آن‌ها اصطکاک وجود دارد و جریان درون آن‌ها مغشوش در نظر گرفته می‌شود. در سال ۱۹۷۹ فینچام و گلدوارد [۱۵] به بررسی انواع روش‌های شبیه سازی جریان گاز درون این گونه لوله‌ها از جمله روش تفاضل محدود، پرداختند. همچنین لونسپیل [۱۶] در سال ۱۹۸۴ در کتابش که جریان مهندسی و تبادل حرارت نام دارد، به بررسی و مدل سازی ریاضی جریان درون لوله‌ها در دو حالت تراکم پذیر و تراکم ناپذیر پرداخته است. در سال ۱۹۹۱ وودوارد و مودان [۱۷] یکی از اولین بررسی‌ها بر روی تخلیه‌ی گاز از طریق وجود سوراخ بر روی خط لوله را انجام دادند. آن‌ها به بررسی نرخ کاهش فشار به عنوان تابعی از زمان به دلیل وجود سوراخ بر روی لوله و تخلیه‌ی آن پرداختند. الورونمی و ایماید [۱۸] نیز در سال ۱۹۹۳ یک مدل ریاضی برای جریان ناپایای نشتی از انتهای شکسته‌ی یک لوله ارائه دادند و مقدار نرخ جریان خروجی از انتهای شکسته‌ی این لوله را مورد بررسی قرار دادند. منتیل و همکارانش [۱۹] نشت گاز از خط لوله با سطح فشار پایین و متوسط را مورد بررسی قرار دادند. در این بررسی جریان گاز در محل نشتی بی‌دررو در نظر گرفته شد و مدل پیشنهادی خود را در دو حالت جریان پایا و ناپایا ارائه دادند. این تحقیق مشکلاتی نیز داشت، از جمله آن که آن‌ها گاز طبیعی را متان با فرض گاز ایده ال و همچنین لوله را به شکل یه مخزن که سوراخی در انتهای آن قرار گرفته، در نظر گرفتند.

نمودار شکل ۳-۱ مربوط به دبی حجمی نرمال شده‌ی نشتی بر حسب قطر سوراخ و مربوط به تحقیق منتیل و همکاران [۱۹] می‌باشد.



شکل ۱-۳- دبی حجمی نشت یافته بر حسب قطر سوراخ در تحقیق منتیل و همکاران [۱۹]

سأها [۲۰] در هندبوک piping design برای محاسبه‌ی دبی جرمی گاز خروجی از شیر فرمولی ارائه

داده است که به این صورت است:

$$\dot{m} = \alpha \epsilon A \sqrt{0.203944 g \rho (p_1 - p_a)} \quad (1-3)$$

همان طور که مشاهده می‌شود در این فرمول عوامل تاثیر گذار بر روی دبی جرمی خروجی از شیر

عبارتند از α ضریب جریان ، ϵ ضریب انبساط، A سطح مقطع m^2 ، g شتاب گرانش زمین $\left(\frac{m}{s^2}\right)$ ، ρ

چگالی گاز خروجی (kg/m^3) و اختلاف فشار بین محیط و لوله‌ای که عملیات تخلیه را از آن انجام می-

دهیم و به این ترتیب دبی جریان خروجی اندازه گیری می‌شود.

جهت تخلیه‌ی کامل خط لوله جهت انجام عملیات تمیز کاری کلی یا انجام تعمیرات، گاز داخل خط لوله را به صورت کامل و از طریق تزریق یک گاز خنثی به داخل قسمت مورد نظر از خط لوله انجام می‌دهند، به این شکل که ابتدا و انتهای قسمت مورد نظر از خط لوله را مسدود کرده و از یک سمت لوله گاز خنثی را تزریق و از سمت دیگر گاز داخل خط لوله را تخلیه می‌کنند. برای محاسبه‌ی میزان گاز تخلیه شده طی این فرایند هم تحقیق‌هایی انجام شده که در زیر به یک مورد از آن‌ها اشاره شده است.

در کتاب purging principles and practice [۲۱] که در سال ۲۰۰۱ منتشر شده است، فرمولی برای محاسبه‌ی حجم گاز خارج شده از خط لوله‌ی گاز جهت تخلیه‌ی کامل، ارائه شده است. نتایج حاصل از این فرمول حجم گاز تخلیه شده طی عملیات تخلیه‌ی کامل خط لوله را نشان می‌دهد. یوها و همکاران [۲۲] در سال ۲۰۰۲ یک مدل ریاضی از رها سازی تصادفی گاز درون خطوط لوله‌ی فشار بالا برای جریان‌های پایای یک بعدی و ادیاباتیک ارائه نمودند، که در این مدل گاز بصورت ناگهانی و تصادفی به اتمسفر تخلیه می‌شود. حل یک بعدی این مسئله توسط یوها و همکاران از نقاط ضعف این پژوهش است. جو و آهن [۲۳] در سال ۲۰۰۳ یک مدل ساده و صریح برای محاسبه‌ی گاز نشت یافته از یک سوراخ که بر روی یک لوله‌ی حاوی گاز با فشار بالا ایجاد شده، ارائه کردند. آن‌ها گاز را ایده آل و جریان در سوراخ را ایزنتروپیک و همچنین جریان در لوله را بی‌دررو فرض کردند، سپس نتایج حاصله را با نتایج واقعی و تجربی بدست آمده مقایسه کرده و اعتبار سنجی کردند.

همچنین در هندبوک مهندسی گاز (GPSA) [۲۴] منتشر شده در سال ۲۰۰۴، رابطه‌ای جهت تخمین دبی حجمی هدر رفت گاز از یک اوریفیس که در انتهای یک لوله‌ی عمودی نصب شده، ارائه گردیده است. در ادامه بیشتر به این رابطه پرداخته می‌شود.

شاید بتوان ادعا نمود که اولین اقدامات اساسی جهت دستیابی به مدلی برای محاسبه‌ی ضرایب افت فشار جریان گاز درون اتصالات با احتساب اثرات تراکم پذیری در سال ۲۰۰۶ و مربوط به گارسیا و همکاران [۲۵] می‌باشد. ایشان یک مطالعه عددی و آزمایشگاهی بر روی جریان‌های تراکم پذیر درون اتصالات T شکل انجام دادند و ضریب افت فشار موضعی درون اتصالات را محاسبه نمودند. لائو و همکارانش [۲۶] در سال ۲۰۰۶ یک فرمول ساده و صریح برای محاسبه نرخ خروج گاز از سوراخ ارائه کردند، آنها در معادله‌ی مومنتوم داخل لوله، با جایگذاری سرعت از معادله بقاء جرم و حذف جملات لگاریتمی در کمیت‌های بی بعد، فرمولی جدید برای محاسبه‌ی نرخ خروج گاز ارائه کردند. ماهود و همکاران [۲۷] نیز در سال ۲۰۱۱ یک راه حل تحلیلی و عددی برای تخلیه‌ی ناپایدار گاز به جو به وسیله‌ی شیرهای تخلیه و بر اساس یک مدل حجمی توسعه داده شده ارائه دادند و رابطه‌ی تغییرات فشار را با زمان بدست آوردند، البته در این پژوهش از اثرات اصطکاک صرف نظر شده است. همچنین ابراهیم شامحمدی و همکاران [۱] در سال ۲۰۱۱ فرمولی را برای محاسبه دبی جرمی گاز خروجی از یک سوراخ بر حسب فشار و دمای اولیه و همچنین سطح مقطع خروج گاز برای زمانی که خط لوله دچار شکست شده و یا در حال انجام عملیات تخلیه است ارائه کرده‌اند. نوری بروجردی [۵] در سال ۲۰۱۱ یک خط لوله طولانی گاز را در شرایط تراکم پذیر، گذرا و بی‌دررو، با استفاده از روش تفاضل محدود، شبیه سازی عددی کرده است. یک سوراخ در خط لوله ایجاد کرده و لوله را به دو قسمت فشار بالا و فشار پایین تقسیم کرده است. همچنین برای گسسته سازی معادله‌های حاکم بر مسئله، برای مشتقات شامل چگالی از روش تفاضل مرکزی، برای جملات شامل سرعت نیز روش تفاضل مرکزی و برای مشتقات شامل دما از روش تفاضل پیشرو مرتبه اول استفاده کرده است. نتایج تحقیقات او نیز نشان دهنده این است که در لحظات اولیه‌ی شکست، افت فشار شدیدی در خط لوله اتفاق افتاده و جریان در سوراخ دچار خفگی می-

شود و با گذشت زمان از سرعت گاز خروجی کاسته شده و جریان به شکل مادون صوت در می‌آید و سرانجام جریان به شکل یک جریان پایا درآمده و دبی گاز خروجی دیگر تغییر نمی‌کند.

کستوسکی و همکاران [۲۸] در سال ۲۰۱۲ جریان پایای گاز طبیعی را برای حالت‌هایی که خطوط لوله دچار آسیب دیدگی می‌شوند، بررسی نموده و از مدل‌های متداول آدیاباتیک و هم دما برای شبیه سازی گاز واقعی و ایده آل استفاده نمودند. آن‌ها همچنین یک مطالعه عددی مرتبط با شکستن خط لوله در خطوط فشار قوی و متوسط انجام دادند.

در سال ۲۰۱۲ در گزارش ماهیانه‌ی فعالیت‌های انجام شده توسط دفتر پژوهش گاز استان خوزستان ایران [۲۹] جهت محاسبه‌ی حجم گاز خارج شده به هنگام عملیات تخلیه (purging) بر حسب قطر لوله‌ی تخلیه کننده و فشار، قبل از انجام عملیات تخلیه رابطه‌ای ارائه شده است. در این پژوهش میزان دبی گاز خروجی در تمام مراحل تخلیه ثابت در نظر گرفته شده و از همین جهت می‌توان گفت نتایج دقیقی از آن بدست نمی‌آید.

چاوشی و محمدی [۳۰] در سال ۲۰۱۳ به بررسی بازیابی و استفاده از گاز تخلیه شده به هنگام انجام تعمیرات با استفاده از کمپرسورهای قابل حمل و با در نظر گرفتن مسائل اقتصادی پرداختند.

هارتلوپر و همکاران [۱۳] در سال ۲۰۱۶ در تحقیقی آزمایشگاهی به اندازه‌گیری انرژی و دمای گاز هنگام تخلیه و همچنین سرعت گاز خروجی و فشار در نقاط مختلف لوله‌ی تخلیه کننده پرداختند. این تحقیق بر روی لوله‌هایی کوچکتر از خطوط اصلی انتقال گاز و در فشارهایی پایین تر انجام شد و نشان داد در ابتدای عملیات تخلیه افت فشار در لوله شدید است.

ابراهیمی مقدم و همکاران [۳۱] در سال ۲۰۱۶ با استفاده از روش حل عددی به بررسی میزان نشتی از سوراخ‌های موجود بر روی خط لوله‌ی توزیع گاز طبیعی در دو حالت لوله‌های رو زمینی و لوله‌های

مدفون پرداختند. همچنین جهت تخمین دبی حجمی گاز خارج شده روابطی را در هر دو حالت ذکر شده توسعه دادند که تطابق نسبتاً خوبی با نتایج حاصل از تحقیقات گذشته داشت. و با توجه به این که تمام شرایط فیزیکی مربوط به خط لوله و تخلیه‌ی گاز در آن در نظر گرفته شده بود، نتایج حاصله به واقعیت نزدیکتر بودند.

۳-۲- رابطه‌ی هندبوک GPSA [۲۴]:

در هندبوک مهندسی گاز (GPSA) [۲۴]، رابطه‌ای برای تخمین دبی حجمی هدر رفت گاز از یک اریفیس که در انتهای یک لوله‌ی عمودی نصب شده، ارائه شده است. در انتهای یک لوله‌ی عمودی و بین دو فلنج، یک اریفیس قرار گرفته است که میزان گاز تخلیه شده به محیط اطراف را توسط یک دستگاه نگارنده اندازه گیری می‌کند. قابل به ذکر است که نتایج حاصل از این رابطه تقریبی بوده و فقط حدود گاز تخلیه شده را مشخص می‌کند.

$$Q = ۱۶۳۳۰ \cdot d^2 (1 + B^4) \sqrt{۲.۹۵۳۰ * ۱۰^{-۴} P_1 (۲۹.۳۲ + ۸.۸۵۹۲۲۶ * ۱۰^{-۵} P_1) F C_g} \quad (۲-۳)$$

$$F = \sqrt{\frac{۲۸۸}{۱.۸ * (T - ۲۷۳.۱۵) + ۳۲}} \quad (۳-۳)$$

$$B = \frac{d}{D} \quad (۴-۳)$$

$$C_g = \sqrt{\frac{۰.۶}{G}} \quad (۵-۳)$$

که در این رابطه، Q (ft³/day) دبی حجمی گاز خروجی، d (in) نشان دهنده ی قطر شیر تخلیه کننده، D (in) قطر لوله‌ای که عملیات تخلیه بر روی آن انجام می‌شود، p_1 (pa) فشار داخل لوله قبل از انجام تخلیه، T دمای گاز داخل خط لوله و G وزن مخصوص گاز است.

۳-۳- رابطه ی ارائه شده توسط شامحمدی و همکاران [۱]:

در این رابطه، با توجه به قانون بقای جرم و انرژی و همچنین موازنه‌ی انرژی دبی جرمی گاز خروجی از شیر تخلیه توسط فرمول زیر بدست می‌آید. طبق این پژوهش دبی گاز خارج شده به نوع گاز و سطح مقطع خروج آن و همچنین فشار گاز داخل لوله بستگی دارد.

$$\dot{m} = C_D A P_1 \sqrt{\frac{\gamma g_c}{R} \cdot \frac{M}{T_1} \cdot \left(\frac{2}{\gamma + 1}\right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma-1}}} \quad (۶-۳)$$

در این رابطه، C_D ضریب تخلیه‌ی روزنه است که برای مقاطع صاف و هموار مانند شیرهای تخلیه برابر با یک در نظر گرفته می‌شود، A (m^۲) نشان دهنده‌ی سطح مقطع شیر، p_1 (pa) فشار داخل خط لوله، γ نسبت ظرفیت گرمایی فشار ثابت به حجم ثابت، g_c ثابت گرانشی زمین (N.s²/kg.m)، R ثابت گازها (J/kgK)، M جرم مولی گاز (g/mol) و T (k) دمای گاز داخل لوله می‌باشد.

۳-۴- دفتر پژوهش گاز استان خوزستان [۲۹]:

برای بدست آوردن این رابطه نیز از روابط دینامیک گازها استفاده شده است و برای دقیق تر شدن جواب بدست آمده، با توجه به تعداد محدودی از نتایج تجربی ضریب تصحیح در معادله ضرب شده است و معادله‌ی نهایی به شکل زیر ارائه شده است.

$$\dot{m} = ۱.۳۸۱۴ * ۱۰^{-۳} A P_1 \quad (۷-۳)$$

در این رابطه $A(m^2)$ بیانگر سطح مقطع شیر و $P_1 (pa)$ فشار داخل خط لوله قبل از آغاز عملیات تخلیه می باشد.

فصل چهارم

معادلات حاکم و شیوهی حل

۴-۱- فرضیات:

جهت مدل سازی و بررسی تخلیه گاز طبیعی در این پژوهش، از فرضیات قابل قبول و نزدیک به شرایط واقعی به قرار زیر استفاده شده است.

۱- گاز طبیعی، متان خالص فرض شده است. همانطور که گفته شد، بیش از ۹۰ درصد گاز طبیعی را متان تشکیل می‌دهد، بنابراین اگر خواص گاز طبیعی را با متان خالص معادل در نظر بگیریم، نتایج حاصله دور از واقعیت نخواهند بود.

۲- خواص گاز متان با فرض گاز واقعی در نظر گرفته شده است زیرا برای خطوط با فشار بالا در نظر گرفتن گاز متان به شکل گاز ایده آل خطای محاسبات را بالا می‌برد و اختلاف مقادیر محاسبه شده با فرض گاز ایده آل نسبت به گاز واقعی حدود ۱۰ درصد می‌باشد.

۳- جریان تراکم پذیر و فرایند گذرا در نظر گرفته شده است زیرا با باز شدن شیر لحظاتی هرچند کوتاه طول می‌کشد تا جریان به حالت پایدار برسد.

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

۴-۲- روابط حاکم:

جهت بدست آوردن توزیع فشار و دما و سرعت، از اصول دینامیک سیالات محاسباتی استفاده می‌کنیم به این شکل که فضای محاسباتی را که شامل خط لوله و شیر می‌باشد به تعداد زیادی گره محاسباتی تقسیم کرده و به این ترتیب مدل شبکه بندی شده‌ی مورد نیاز برای انجام فرایند حل حاصل شده است.

جریان مورد نظر تراکم پذیر است بنابراین یک دستگاه معادلات در کل دامنه‌ی محاسباتی به طور همزمان باید حل شوند که این معادلات عبارتند از:

۱. معادله پیوستگی

۲. معادله انرژی

۳. معادله مومنتوم

۴. معادله حالت

با حل این دستگاه معادلات مجهولاتی از جمله فشار و سرعت و چگالی و ... بدست می‌آیند.

۴-۲-۱- روابط حاکم بر جریان درون لوله:

در پژوهش حاضر، مدل سازی به صورت سه بعدی انجام گرفته است. معادله‌ی مومنتوم در حالت سه بعدی به سه قسمت محوری، شعاعی و محیطی تقسیم می‌شود لذا یک دستگاه شش معادله و شش مجهول خواهیم داشت.

از اصل بقای جرم معادله‌ی پیوستگی به صورت معادله بدست می‌آید [۳۲، ۳۳].

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \quad (1-4)$$

معادله (۲-۴) نیز بیانگر فرم کلی معادله مومنتوم است [۳۲، ۳۳].

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \bar{\tau}_{ij}}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j}(-\rho \overline{u'_i u'_j}) + \rho g_i \quad (2-4)$$

نکته قابل به ذکر در رابطه‌ی بالا تنش رینولدز ($\rho \overline{u_i u_j}$) است که توسط مدل‌های آشفتگی بدست می‌آید.

با اعمال قانون پایستگی انرژی، معادله‌ی انرژی نیز به این صورت بدست می‌آید [۳۲، ۳۳].

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

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

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

در معادله ۳-۴، k_{eff} ضریب هدایت حرارتی موثر است که مقدار آن برابر $k_{eff} = k + k_t$ است که در این رابطه k_t ضریب هدایت حرارتی آشفته می‌باشد که بر اساس مدل آشفتگی استفاده شده، تعیین می‌شود و در مدل کا-اپسیلن^۱ که در این پژوهش از آن استفاده شده به صورت $k_t = \frac{c_p \mu_t}{pr_t}$ تعریف می‌شود که در آن pr_t معرف عدد بی بعد پرانتل آشفته^۲ است دو جمله‌ی سمت راست معادله نیز به ترتیب معرف انتقال انرژی به دلیل انتقال حرارت هدایتی و اتلاف گرانیوی^۳ سیال می‌باشد.

در رابطه‌ی ۵-۴ نیز h آنتالپی محسوس است که با استفاده از رابطه می‌توان آن را محاسبه کرد.

^۱ k-epsilon (k-ε)

^۲ Turbulent Prandtl Number

^۳ Viscous Dissipation

$$h = \int_{T_{ref}=298.15K}^T C_p dT \quad (6-4)$$

همانطور که قبلا نیز اشاره شد به دلیل تراکم پذیر بودن سیالی که در پژوهش حاضر مورد استفاده قرار گرفته است، معادله حالت نیز یکی از معادلات حاکم بر مسئله می باشد. در این پژوهش از معادله حالت گاز واقعی پنگ-رابینسون استفاده شده که به شکل رابطه ۷-۴ است.

$$P = \frac{RT}{v-b} - \frac{a(T)}{v(v+b) + b(v-b)} \quad (7-4)$$

$$a = 0.457235529 \frac{R^2 T_{cr}^2}{p_{cr}} \left[1 + m \left(1 - \sqrt{\frac{T}{T_{cr}}} \right) \right]^2 \quad (8-4)$$

$$b = 0.0777960739 \frac{RT_{cr}}{p_{cr}} \quad (9-4)$$

$$m = 0.37464 + 1.5422 W - 0.26992 W^2 \quad (10-4)$$

که در این روابط، W برای گاز متان برابر با ۰,۰۱۱ می باشد.

۳-۴- مفهوم جریان آشفته و روابط مربوط به آن:

در جریان آرام یا لایه ای ذرات سیال مسیرهایی منظم و همواری را طی می کنند به طوری که هر لایه به آرامی روی لایه مجاور خود می لغزد و به عبارت دیگر حرکت سیال لایه لایه است. این جریان از قانون

لزجت نیوتن و یا تعمیم آن یعنی قانون استوکس پیروی می‌کند. در این جریان هر گونه گرایش به آشفتگی، ناپایداری، اغتشاش و تلاطم توسط نیروی اصطکاک مستهلک می‌شود

در وضعیتی که ۱- لزجت کم ۲- سرعت جریان زیاد ۳- طول مشخصه زیاد (مثلا قطر لوله) باشد، جریان پایداری خودش را حفظ نکرده و به جریان آشفته تبدیل می‌شود. در این جریان ذرات سیال به علت انرژی جنبشی بالا مسیرهای نامنظمی را طی می‌کنند و با برخورد به یکدیگر سبب انتقال انرژی می‌شوند و تبادل اندازه حرکت به دلیل حرکت‌های متقاطع صورت می‌گیرد.

نوع جریان و به عبارت دیگر، آرام یا آشفته بودن آن توسط عدد رینولدز نشان داده می‌شود.

در طبیعت جریان آرام وجود ندارد و تمامی جریان‌ها آشفته هستند، مدل کردن این آشفتگی که بسیار پیچیده نیز می‌باشد توسط معادلات ریاضی انجام می‌شود.

آزمایش‌هایی که در گذشته انجام شده است نشان می‌دهد که در اعداد رینولدز پایین تر از عدد رینولدز بحرانی، جریان بصورت آرام و لایه‌ای می‌باشد ولی در جریان آشفته انتقال جرم بصورت میکروسکوپی از لایه‌ای به لایه دیگر خواهد بود.

۴-۳-۱- روش‌های مدل سازی آشفتگی:

تاکنون مدل‌های آشفتگی فراوانی ارائه شده که هرکدام برای نوع خاصی از جریان و یا حتی برای قسمت مشخصی از یک نوع جریان مناسب هستند اما می‌توان گفت هدف نهایی تمام مدل‌های آشفتگی، محاسبه‌ی تنش رینولدز $\overline{\rho u_i u_j}$ در تمام نقاط جریان است. جدول ۴-۱ مدل‌های مختلف آشفتگی را دسته بندی کرده است.

جدول ۴-۱ - مدل‌های آشفتگی مختلف جهت حل جریان [۳۴]

روابط اساسی	مدل ها بر پایه ی RANS			RSM	LES
	مدل های لزجت گردابی				
بوزینسک ^۱ لاندر ^۲ اسپزیال ^۳	مدل های صفر معادله ای	مدل های یک معادله ای	مدل های دو معادله ای	Reynolds Stress Models	Large Eddy simulation
	- طول اختلاط اتوماتیک ^۴ - طول اختلاط تعریف شده توسط کاربر ^۵	اسپالارت-آلماراس ^۶	کا-اپسیلون استاندارد ^۷ کا-اپسیلون بسط یافته ^۸ کا-اپسیلون RNG ^۹ کا-اپسیلون غیرایزنتروپیک ^{۱۰} کا-امگا ویکوکس ^{۱۱} کا-امگا SST ^{۱۲}		

مدل‌های آشفتگی را از دو جهت می‌توان مورد بررسی قرار داد:

۱. روابط حاکم بر لزجت گردابی^{۱۳}

۲. مدل‌های لزجت گردابی^{۱۴}

روابط اساسی حاکم بر لزجت گردابی از کمیتی که اصطلاحاً به آن لزجت آشفته μ_t گفته می‌شود برای بیان رابطه‌ی بین تنش‌های رینولدز موجود در در معادله‌های RANS و پروفیل‌های موجود در میدان جریان استفاده می‌کنند.

^۱ Boussinesq

^۲ Launder

^۳ Speziale

^۴ Automatic Mixing Length

^۵ User-specified Mixing Length

^۶ Spalart-Allmaras

^۷ Standard $k - \varepsilon$

^۸ Extended $k - \varepsilon$

^۹ RNG $k - \varepsilon$

^{۱۰} Anisotropic $k - \varepsilon$

^{۱۱} Wilcox $k - \omega$

^{۱۲} SST $k - \omega$

^{۱۳} Eddy-Viscosity Constitutive Relation

^{۱۴} Eddy-Viscosity Models

۴-۳-۱-۱- روابط حاکم بر لزجت گردابی:

۱. رابطه‌ی بوزینسک

۲. رابطه‌ی لاندِر

۳. رابطه‌ی اسپزیال

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

$$-\rho \overline{u_i u_j} = \mu_t S_{ij} - \frac{2}{3} \left(\rho k + \mu_t \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) \delta_{ij} \quad (۱۱-۴)$$

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (۱۲-۴)$$

قابل به ذکر است که مقادیر متوسط جریان و مشتقات مربوط به آن، از حل معادله‌های متوسط ناویر استوکس در داخل میدان جریان بدست می‌آید.

همچنین برای تخمین μ_t در معادله‌ی بالا از مدل‌های اغتشاشی استفاده می‌شود که در ادامه بیشتر به آن‌ها پرداخته خواهد شد.

۴-۳-۱-۲- مدل‌های لزجت گردابی:

سه رابطه‌ی اساسی را می‌توان با هر یک از شش مدل دو معادله‌ای ترکیب کرد و به مجموعه‌ای جامع برای مدل سازی جریان آشفته دست یافت. اما باید به این نکته توجه کرد که برای مدل کا-اِپسیلین غیر ایزنتروپیک فقط می‌توان از یکی از دو رابطه‌ی اساسی غیر ایزنتروپ (لاندِر و اسپزیال) استفاده کرد. شکل ۴-۱ دید بهتری نسبت به هر کدام از این مدل‌ها ارائه می‌کند.

همانگونه که قبلاً نیز اشاره شد، هدف هر مدل لزجت گردابی، بیان رابطه‌ی بین μ_t و سایر کمیت‌های قابل اندازه گیری جریان می‌باشد.

مدل‌های صفر معادله‌ای، تنها از روابط و معادله‌های جبری جهت توصیف رابطه‌ی بین μ_t و خواص محاسبه شده و یا قابل اندازه گیری استفاده می‌کنند. مدل‌های یک معادله‌ای از یک معادله انتقال با مشتقات جزئی (PDE) اضافی نیز در این بین استفاده می‌کنند. مدل‌های دو معادله‌ای نیز شامل دو معادله با مشتقات جزئی اضافی هستند.

هیچ مدل آشفتگی نمی‌تواند به تنهایی پاسخگوی تمامی مسائل مهندسی باشد. به عبارت دیگر، از یک مدل نمی‌توان برای تمامی مسائل استفاده کرد و برای انتخاب مدل مناسب برای حل یک مسئله باید به عواملی مانند فیزیک جریان مورد مطالعه، وجود یا عدم وجود رژیم‌های مختلف جریان، زمان مورد نیاز برای انجام محاسبات و رسیدن به جواب قابل قبول، امکانات سخت افزاری و نرم افزاری و همچنین میزان دقت مورد نیاز، بستگی دارد.

مدل‌های صفر معادله‌ای رفتاری شبیه به جریانات آرام دارند و در برخی موارد از آن‌ها به عنوان مدل جریان آرام یاد می‌شود. حل عددی در این معادله‌ها زودتر همگرا می‌شود و زودتر به جواب مورد نظر می‌-

رسیم.

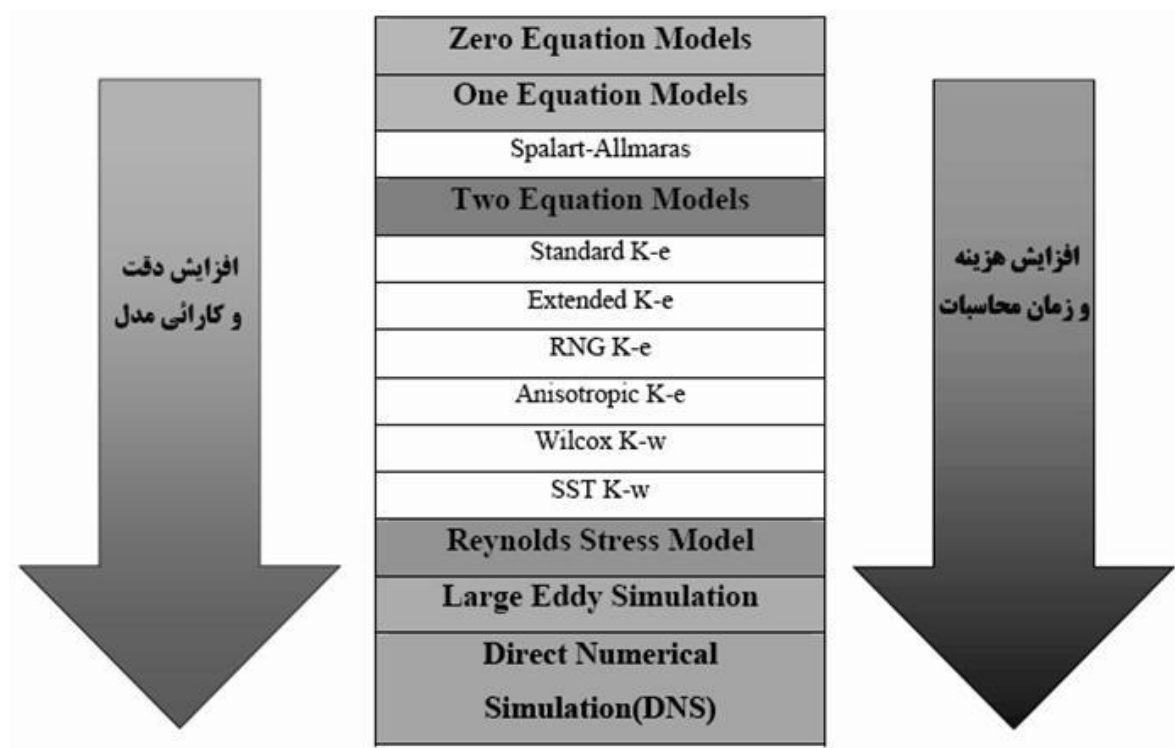
در مدل‌های یک معادله‌ای یکی از دو مقیاس مهم در جریان آشفته، از میان زمان مقیاس جریان آشفته و طول مقیاس جریان آشفته و یا ترکیبی از این دو با استفاده از یک معادله‌ی انتقالی بدست می‌آید. معمولاً برای انرژی جنبشی آشفته k ، از یک معادله انتقالی استفاده می‌شود. بعنوان مثال، مدل اسپالارت-آلماراس یک مدل تک معادله‌ای ساده است که یک معادله‌ی مدل شده‌ی انتقال را برای بدست آوردن μ_t حل می‌کند. از این مدل برای مسائلی که نمی‌توان از شبکه بسیار ریز استفاده کرد و همچنین در نزدیکی دیواره‌هایی که گرادیان فشار معکوس دارند استفاده می‌شود و نتایج بسیار خوبی ارائه می‌دهند.

مدل‌های دو معادله‌ای زیر بنای تحقیقات مربوط به جریان‌های آشفته می‌باشند. ساده ترین مدل‌های آشفتگی مدل‌های دو معادله‌ای هستند که توسط دو معادله انتقال جداگانه باعث تعیین مقیاس لزجت آشفتگی^۱ و مقیاس طول آشفتگی^۲ به صورت مستقل می‌شود. لازم به ذکر است که نقطه آغاز تمام این مدل‌های دو معادله‌ای، استفاده از تقریب بوزینسک و معادله انتقال برای انرژی جنبشی آشفتگی k می‌باشد [۳۴].

شکل بیانگر مقایسه بین مدل‌های آشفتگی مختلف از نظر دقت و هزینه‌ی محاسبات می‌باشد.

^۱ Turbulent Viscosity Scale

^۲ Turbulent Length Scale



شکل ۴-۱ مقایسه بین مدل‌های آشفتگی مختلف [۳۴]

۴-۳-۲- مدل سازی آشفتگی در این پژوهش:

در پژوهش حاضر برای مدل سازی آشفتگی از روش کا-اِپسِلین استاندارد که روشی مناسب برای جریان‌های با رینولدز بالا^۱ می‌باشد استفاده شده است [۳۵]. برای مدل سازی رفتار جریان در نزدیکی دیواره نیز از روش استاندارد^۲ بهره گرفته شده است. دو معادله انتقال اضافی (معادلات ϵ و k) در این مدل آشفتگی به ترتیب به صورت معادلات زیر می‌باشند [۳۶، ۳۲].

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_M \quad (۴-۱۳)$$

^۱ High-Reynolds

^۲ Standard

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{K} (G_K) - C_{\varepsilon 2} \rho \frac{\varepsilon^2}{K} \quad (14-4)$$

که در این روابط، G_K تولید انرژی جنبشی آشفتگی ناشی از گرادیان های سرعت متوسط می باشد و با استفاده از رابطه ۴-۱۵ بدست می آید [۳۲].

$$G_K = -\rho \overline{u_i' u_j'} \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \quad (15-4)$$

می توان از رابطه ۴-۱۶ که سازگار با فرضیه ی بوزینسک است برای محاسبه ی G_K استفاده کرد [۳۲].

$$G_K = \mu_t S^2 \quad (16-4)$$

$$S \equiv \sqrt{2 S_{ij} S_{ij}} \quad (17-4)$$

حال اگر S_{ij} را از رابطه ی ۴-۱۷ جایگزین کنیم رابطه ی ۴-۱۶ به صورت ۴-۱۸ بدست می آید که به عنوان رابطه ی نهایی برای محاسبه ی G_K مورد استفاده قرار می گیرد.

$$G_K = \mu_t \left[\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 \right] + \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 \quad (18-4)$$

سایر کمیت های موجود در معادلات ۴-۱۳ و ۴-۱۴، G_b و Y_M هستند که به ترتیب بیانگر تولید انرژی جنبشی آشفته ناشی از شناوری^۱ و سهم اتساع نوسانی^۲ در آشفته‌گی تراکم پذیر از نرخ اتلاف کل^۳ می‌باشد و با استفاده از روابط زیر تعیین می‌شوند.

$$G_b = -g_i \frac{\mu_t}{\rho Pr_t} \frac{\partial \rho}{\partial x_i} \quad (۱۹-۴)$$

$$Y_M = \gamma \rho \varepsilon M a_t^2 \quad (۲۰-۴)$$

$$Ma_t = \sqrt{\frac{k}{a^2}} \quad (۲۱-۴)$$

در معادله‌ی ۴-۲۱، a بیانگر سرعت صوت بوده و به صورت $a = \sqrt{\gamma RT}$ تعریف می‌شود.

لازم به ذکر است که در معادله‌ی ۴-۱۴، $C_{1\varepsilon} = ۱.۴۴$ و $C_{2\varepsilon} = ۱.۹۲$ می‌باشند. همچنین لزجت آشفته

نیز به صورت $\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$ تعریف می‌شود که در این رابطه $C_\mu = ۰.۰۹$ می‌باشد. همچنین $\sigma_k =$

۱ و $\sigma_\varepsilon = ۱.۳$ به ترتیب بیانگر اعداد پرانتل آشفته برای ε و K می‌باشند [۳۶، ۳۲].

لازم به ذکر است که تمام مدل‌های آشفته‌گی از معادلات حاکم بر جریانات تراکم ناپذیر استفاده می‌

کنند. دلیل آن را می‌توان در نظریه‌ی مارکوفین^۴ جست و جو کرد. طبق این نظریه تنها در جریان‌های

فراصوت با عدد ماخ بزرگتر از ۵ است که کمیت‌های آشفته‌گی از تراکم پذیری تاثیر می‌پذیرند و در سرعت

^۱ Buoyancy

^۲ Fluctuating Dilatation

^۳ Overall Dissipation Rate

^۴ Morkovin's hypothesis

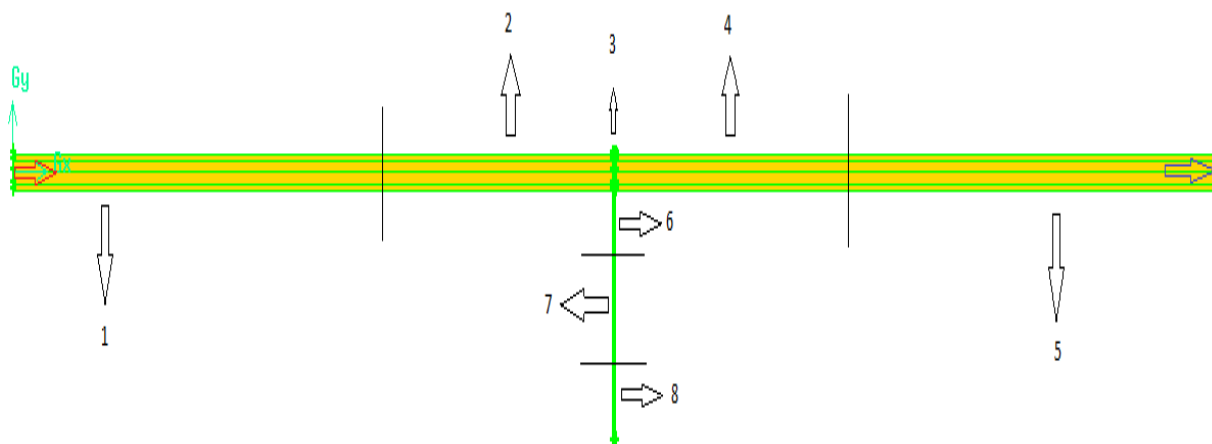
های پایین تر می توان در محاسبه ی کمیت های آشفتگی، از معادلات آشفتگی حاکم بر جریانات تراکم ناپذیر استفاده کرد [۳۷].

۴-۴- هندسه ی مورد بررسی و شبکه بندی:

در این پژوهش برای طراحی و شبکه بندی هندسه مورد نظر از نرم افزار گمبیت^۱ استفاده شده است. تمام طول خط لوله ی انتقال گاز را به دلیل طولانی بودن نمی توان مدل کرد، لذا قسمتی از خط لوله به طول ده متر که شیر تخلیه در فاصله ی پنج متری از شروع آن قرار گرفته، جهت مدل سازی انتخاب شده است. همچنین در این پژوهش لوله های پر کاربرد با قطر های ۶ و ۸ و ۱۰ و ۱۲ اینچ مدل سازی شده اند. در تمام موارد هندسه ی مورد نظر در حالت سه بعدی مدل سازی شده است. همچنین در این مدل سازی ها، شیر های تخلیه با قطرهای ۱ و ۱٫۵ و ۲ اینچ که شیرهای پر کاربرد در این رابطه هستند مدل سازی و مورد ارزیابی قرار گرفته اند. لازم به ذکر است، شیرهایی که طی این عملیات مورد استفاده قرار می گیرند غالباً از نوع شیرهای توپی^۲ هستند.

^۱ Gambit

^۲ Ball valve



شکل ۴-۲- شبکه بندی محیط مورد بررسی در خط لوله و نواحی مختلف آن

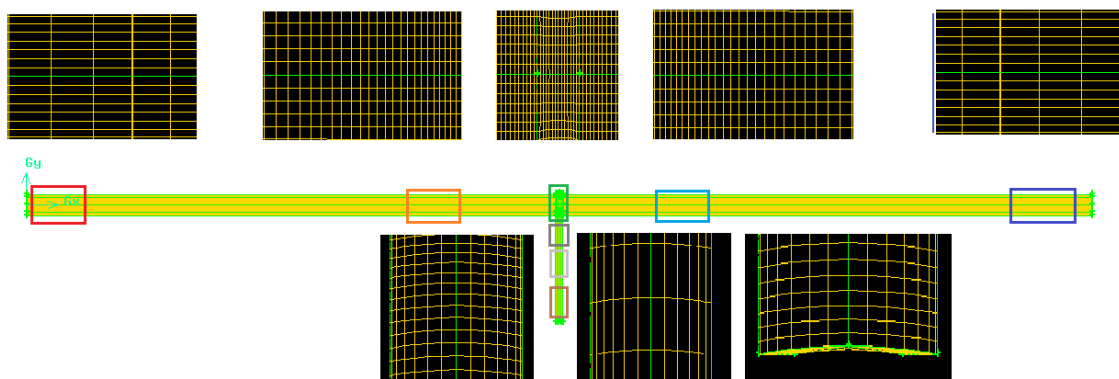
شبکه‌های مدل‌های مورد بررسی از نوع سازمان یافته^۱ است. چون دیوارها علت اصلی حرکت گردابی^۲ و آشفتگی^۳ در جریان هستند و همچنین کمیت‌هایی مانند سرعت در نزدیکی دیوارها دارای گرادیان‌های شدیدتری هستند، مدل‌سازی صحیح در این نواحی بسیار مهم و در حاصل شدن نتایج صحیح تر و منطقی تر بسیار تاثیر گذار است و تاثیر بسیاری در موفقیت آمیز بودن حل می‌گذارد. لذا در نواحی نزدیک به دیوارها و همچنین نواحی حساس در مدل مورد نظر که می‌دانیم سرعت سیال در این نواحی بیشتر از سایر نواحی می‌باشد، از شبکه بندی بسیار ریزتری استفاده شده است.

برای رسیدن به هدف مورد نظر، همانگونه که در شکل ۴-۲ نیز قابل مشاهده می‌باشد. محیط حل در مدل‌سازی به هشت ناحیه تقسیم شده است. شکل ۴-۳ نشان دهنده‌ی هندسه‌ی شبکه بندی شده می‌باشد.

^۱ Structured mesh

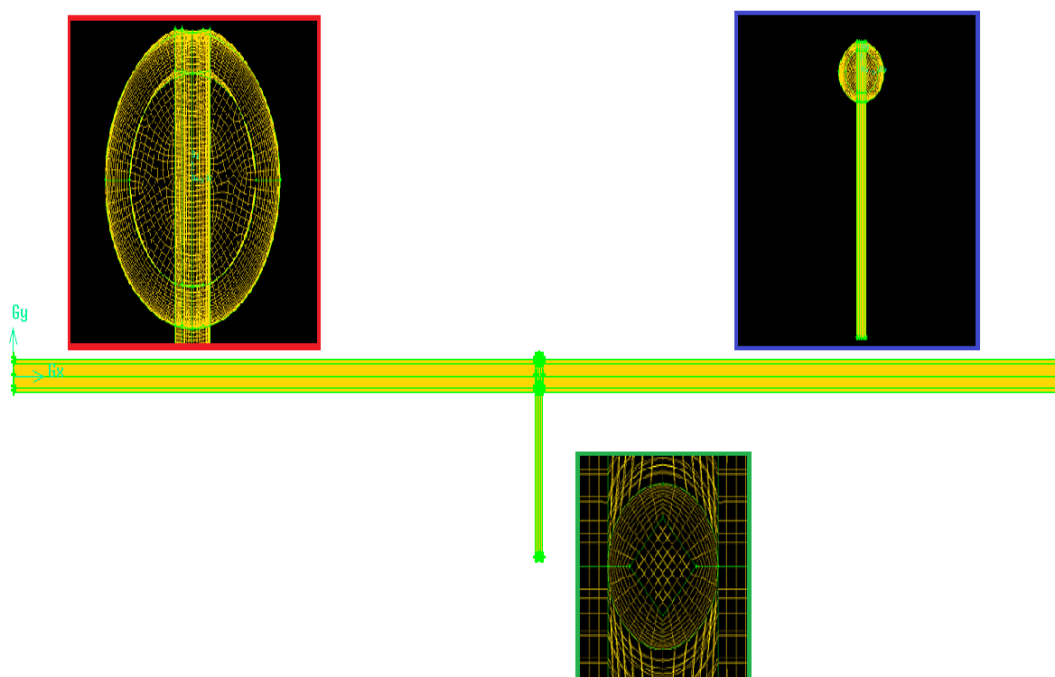
^۲ Vorticity

^۳ Turbulence



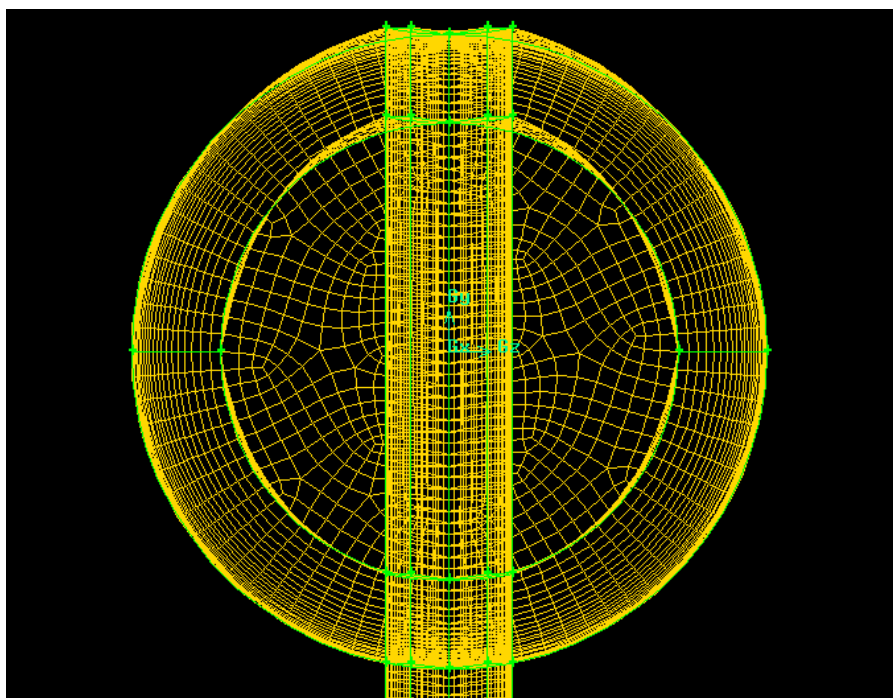
شکل ۳-۴ - شبکه بندی محیط حل و نوع شبکه در هر ناحیه از آن

شکل ۴-۴ نشان دهنده‌ی شبکه بندی حجم مورد نظر در نزدیکی دیواره‌ها می‌باشد.



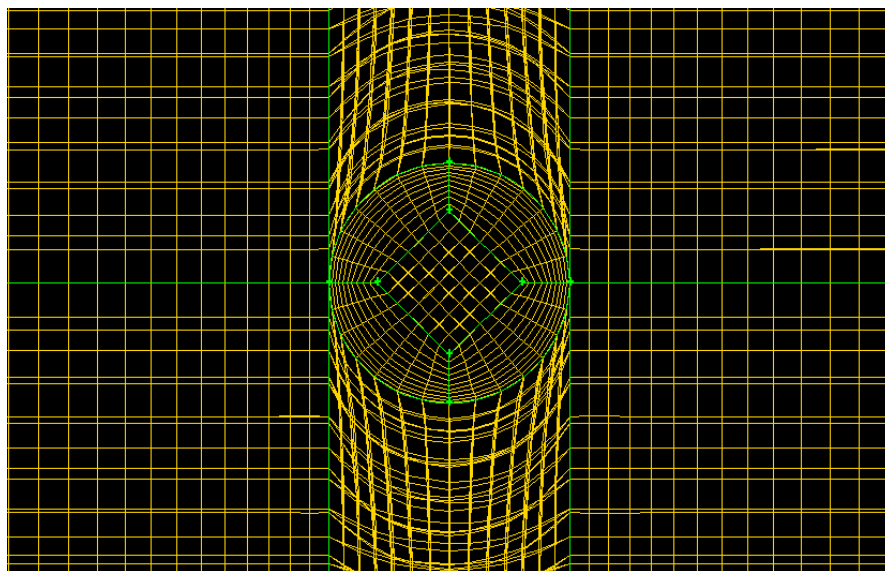
شکل ۴-۴ - شبکه بندی محیط حل و شبکه‌ی لایه مرزی در نزدیکی دیواره‌ها

شکل ۵-۴ نشان دهنده‌ی شبکه بندی در نزدیکی دیواره‌های خط لوله می‌باشد.



شکل ۴-۵ شبکه بندی در نزدیکی دیواره ی خط لوله ی اصلی

شکل ۴-۶ نشان دهنده ی شبکه بندی در لوله ی تخلیه و شیر است.



شکل ۴-۶ شبکه بندی در نزدیکی دیواره ی انشعاب شیر

۴-۴-۱- اعتبار سنجی شبکه:

جهت بررسی عدم وابستگی نتایج بدست آمده و تعداد سلول‌های بکار رفته در دامنه‌ی محاسباتی، چهار مدل مطالعاتی با تعداد سلول‌های مختلف برای یک نمونه با قطر خط لوله و قطر شیر مشابه بررسی شده است. نتایج حاصل از بررسی در جدول ۴-۲ آورده شده است. این جدول برای خط لوله‌ای با قطر هشت اینچ و با شیر تخلیه‌ای به قطر دو اینچ ایجاد شده است و نتایج حاصل از بررسی بر روی این خط لوله را نشان می‌دهد. همانطور که قابل مشاهده است، در صد اختلاف نتایج بین تعداد سلول‌های ۲۳۸۴۵۶ و ۳۶۲۶۹۸ حدود ۱۲ درصد، بین تعداد سلول ۳۶۲۶۹۸ و ۸۵۶۲۸۰ حدود ۵ درصد، و اختلاف نتایج بین سلول‌های ۸۵۶۲۸۰ و ۱۱۸۵۶۰۰ حدود ۰,۹ درصد می‌باشد که این اختلاف بسیار ناچیز بوده و نتایج قابل قبول هستند.

جدول ۴-۲ - تاثیر تعداد مش بر دبی گاز خروجی از شیر

تعداد سلول‌های محاسباتی در دامنه حل	دبی جرمی گاز نشت یافته (kg/s)
۲۳۸۴۵۶	۵.۸۶۴
۳۶۲۶۹۸	۵.۲۳۴
۸۵۶۲۸۰	۴.۹۸۲۳
۱۱۸۵۶۰۰	۴.۹۳۷۳

از آنجا که نتایج با تغییر تعداد سلول‌ها تغییر چندانی نمی‌کنند، پس همین تعداد سلول را مبنای کار قرار داده و مدل سازی‌ها را برای بررسی سایر عوامل تاثیر گذار، با حدود همین تعداد سلول انجام می‌دهیم.

۴-۵- شرایط مرزی و اولیه:

در مقطع ورودی لوله شرط مرزی را از نوع فشار ورودی^۱ و در مقطع انتهای لوله نیز از نوع فشار خروجی^۲ قرار داده‌ایم. برای جداره‌های لوله‌ی اصلی و همچنین لوله‌ی متصل کننده‌ی خط لوله‌ی اصلی و شیر تخلیه کننده نیز از شرط مرزی دیواره^۳ استفاده کرده‌ایم. از آنجا که هدف این پژوهش مدل کردن فرایند تخلیه در شرایط ناپایدار است، شرط مرزی شیر تخلیه کننده را پیش از باز کردن شیر به صورت دیواره و پس از باز کردن به صورت فشار خروجی قرار می‌دهیم. جدول ۳-۴ نوع شرایط مرزی استفاده شده برای مقاطع مختلف را نشان می‌دهد.

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

نوع شرط مرزی		مرز مورد نظر
فشار ورودی		ابتدای خط لوله
فشار خروجی		انتهای خط لوله
دیواره		سطح جانبی خط لوله و لوله‌ی رابط
دیواره	پیش از باز کردن شیر	مقطع شیر
فشار خروجی	پس از باز کردن شیر	

همچنین شرایط زیر در مسئله اعمال شده است.

- فشار گاز در ابتدای خط لوله در بازه‌ی ۱,۷ تا ۳,۵ مگا پاسکال مورد بررسی قرار گرفته است.
- دمای گاز در ابتدای خط لوله ۲۸۸ کلوین در نظر گرفته شده است.

^۱ Pressure Inlet
^۲ Pressure Outlet
^۳ Wall

- ضریب اصطکاک و افت فشار به ازای طول لوله نیز به ترتیب با استفاده از معادلات کولبروک-

وایت و معادله‌ی جریان عمومی بر حسب روابط ۴-۱۹ و ۴-۲۰ محاسبه شده‌اند. زبری لوله‌ی

مورد نظر نیز $\epsilon = 0.0015 \text{ mm}$ در نظر گرفته شده است.

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left(\frac{\epsilon}{3.7 D} + \frac{2.51}{Re \sqrt{f}} \right) \quad (22-4)$$

$$Q_b = 1.1494 * 10^{-3} \left(\frac{T_b}{p_b} \right) \sqrt{\frac{p_1^2 - p_2^2}{G T_f Z f}} \quad (23-4)$$

$$Re = \frac{\rho u D}{\mu} \quad (24-4)$$

در روابط بالا، $Re, Z, T_f, f, \epsilon, T_b, p_b$ به ترتیب، فشار پایه (kPa) دمای پایه (مبنا) (k)، ضریب اصطکاک، زبری مطلق (mm)، دمای جریان داخل لوله (دمای متوسط) (k)، ضریب تراکم پذیری گاز و عدد رینولدز می‌باشد. Q_b نیز معرف دبی جریان گاز در شرایط استاندارد (بر حسب m^3/day) بین دو نقطه‌ی ۱ و ۲ با فشارهای p_1 و p_2 (بر حسب kPa) می‌باشد.

۴-۶- فرایند حل عددی:

در این پژوهش، حل عددی این جریان تراکم پذیر و گذرا، با استفاده از روش رو^۱ بررسی شده است و همچنین برای گسسته‌سازی مکانی و محاسبه خواص اصلی جریان در مرز المان‌ها از روش بادسو^۲ استفاده شده است.

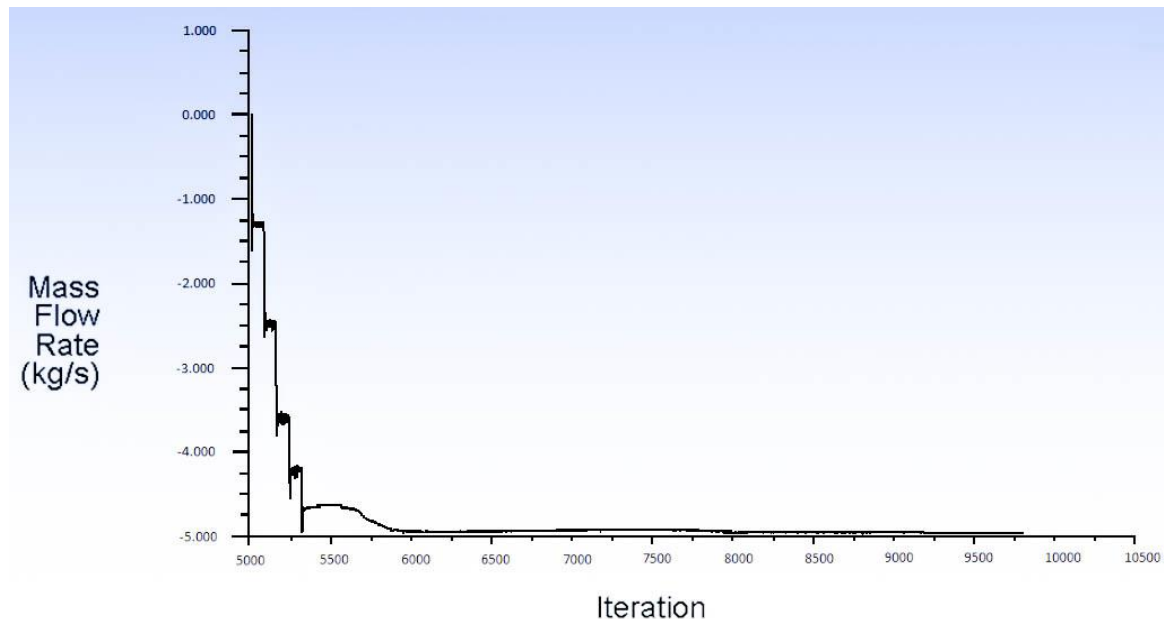
نمودار ۴-۱ دبی جرمی خروجی از شیر با قطر ۲ اینچ که به خط لوله‌ای با قطر ۱۰ اینچ متصل است را نشان می‌دهد. در این پژوهش جهت بدست آوردن نتایج دقیق‌تر و نزدیک کردن مراحل انجام کار به واقعیت ابتدا شیر را بسته فرض کرده و جریان را در لوله‌ی اصلی برقرار می‌کنیم، این حل در حالت پایدار انجام می‌شود و فقط به این دلیل است که پیش از باز شدن شیر، جریان داخل خط لوله وجود داشته باشد. واضح است که در این حالت دبی عبوری از شیر صفر است. سپس در حالت گذرا مراحل باز کردن شیر را انجام می‌دهیم. از آنجا که شیر به صورت ناگهانی باز نمی‌شود و باز شدن کامل شیر به زمان نیاز دارد. در این پژوهش نیز شیر به صورت مرحله‌ای باز می‌شود، در این راستا مقطع شیر به پنج قسمت تقسیم شده است. باز شدن هر کدام از این پنج قسمت دو ثانیه زمان نیاز دارد، پس باز شدن کامل شیر در مجموع در مدت هشت ثانیه انجام می‌شود. برای هر ثانیه باز بودن شیر، تعداد چهل تکرار در نظر گرفته شده است. پس از باز شدن کامل، شیر به مدت صد و دوازده ثانیه به طور کامل باز می‌ماند. برای حاصل نمودن نتایج دقیق‌تر، معادلات حاکم بر مسئله به صورت درجه دوم گسسته سازی شده‌اند.

در ابتدای کار و در حالت پایدار، با ۵۰۰۰ تکرار حل را انجام می‌دهیم تا جریان داخل خط لوله اصلی برقرار شود. سپس شیر را مرحله به مرحله باز می‌کنیم و پس از باز شدن شیر بصورت کامل، آن را به مدت صد و دوازده ثانیه بصورت کامل باز می‌گذاریم. مدت زمان لازم برای انجام این فرایند که شامل باز شدن

^۱ Roe

^۲ Upwind

شیر و تخلیه می‌باشد دو دقیقه در نظر گرفته شده است. همانگونه که قابل مشاهده است، دبی خروجی از شیر پس از گذشت ۷۵ ثانیه ثابت شده و تغییری نمی‌کند.



نمودار ۱-۴ - دبی خروجی از شیر در مراحل مختلف فرایند تخلیه

۷-۴ - کمیت‌های تاثیر گذار بر میزان دبی خروجی از شیر در هنگام عملیات

تخلیه:

کمیت‌هایی که می‌توانند بر میزان دبی خروجی از شیر در هنگام عملیات تخلیه تاثیر بگذارند شامل طول خط لوله، قطر خط لوله، قطر شیر تخلیه، فشار خط لوله و افت فشار در خط لوله که در ادامه به تمام این موارد پرداخته خواهد شد و بررسی می‌کنیم که هرکدام از این موارد تا چه اندازه می‌توانند بر میزان دبی خروجی تاثیر بگذارند.

۴-۷-۱- طول لوله، افت فشار و فشار در ابتدای ناحیه‌ی مورد بررسی:

طول خط لوله با توجه به زبری روی سطح داخلی لوله، باعث افت فشار می‌شود که در این پژوهش افت فشار ناشی از زبری در طول خط لوله، محاسبه و در نظر گرفته شده است. با توجه به اینکه فشار گاز در خطوط لوله‌ی مورد بررسی بالا است، افت فشار نیز نسبت به خطوط توزیع گاز بیشتر است، اما میزان این افت فشار نسبت به فشار گاز داخل لوله بسیار ناچیز است. همچنین برای اینکه فشار در نقطه‌ی ابتدایی بر تغییر کمیت‌ها که بر اثر باز شدن شیر ایجاد می‌شوند تاثیر نگذارد، طول خط لوله را ۱۰ متر در نظر گرفته‌ایم و فشار نقطه‌ی ابتدایی نیز در چهار حالت، ۱،۷، ۲،۵، ۳ و ۳،۵ مگاپاسکال مورد بررسی قرار گرفته‌اند.

۴-۷-۲- قطر خط لوله و قطر شیر تخلیه:

قطر خط لوله و قطر شیر تخلیه از عواملی هستند که تاثیر بسیاری بر دبی گاز خروجی می‌گذارند. از همین رو در این پژوهش جهت بررسی تاثیر قطر خط لوله‌ی انتقال گاز، چهار قطر پر کاربرد یعنی ۶، ۸، ۱۰ و ۱۲ اینچ مورد بررسی قرار گرفته‌اند. همچنین شیرها با قطرهای مختلفی را مورد بررسی قرار داده‌ایم تا نتایج حاصله جامع باشند.

۴-۷-۳- تاثیر دمای گاز:

با توجه به بررسی‌های انجام گرفته در این پژوهش و همچنین تحقیق‌های پیشین [۳۳]، تاثیر دمای گاز داخل خط لوله بر میزان گاز خروجی به هنگام عملیات تخلیه بسیار ناچیز است و می‌توان از آن صرف نظر کرد.

با توجه به مطالبی ذکر شد، عوامل تاثیر گذار بر میزان گاز تخلیه شده، قطر خط لوله، قطر سوراخ و فشار در نقطه‌ی ابتدایی است که در ادامه آن‌ها را بصورت کامل مورد بررسی قرار می‌دهیم و یک رابطه جهت محاسبه‌ی میزان گاز نشت یافته طی این عملیات نیز ارائه خواهد شد.

فصل پنجم

نتایج

۵-۱- معتبر سازی حل:

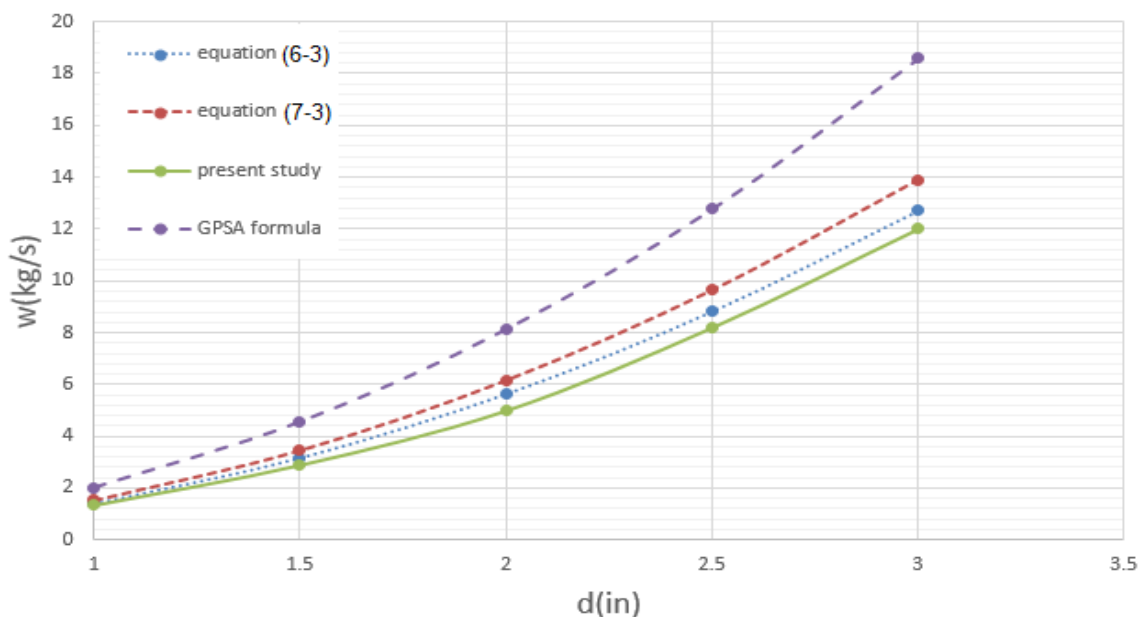
حل عددی مربوط به فرایند تخلیه‌ی گاز طبیعی مطابق با شرایط مرزی که در جدول ۴-۳ گفته شد در حالت سه بعدی انجام شده و نتایج حاصل از هریک از این مدل‌ها با تحقیقات و مطالعات پیشین مقایسه خواهد شد. در این پژوهش نتایج حاصله با نتایج معادله‌ی ارائه شده توسط شامحمدی و همکاران [۱] و همچنین معادله‌ای که توسط دفتر پژوهش گاز استان خوزستان [۲۹] ارائه شده و نیز رابطه‌ی هندبوک GPSA [۲۴] مقایسه شده و نتایج در نمودار ۵-۱ نشان داده شده‌اند.

هرسه‌ی این روابط بر اثر روابط حاکم بر دینامیک گاز بوده که بر حسب تجربه و برخی نتایج آزمایشگاهی، ضرایبی به آن‌ها اضافه شده است. همچنین در آن‌ها به جز رابطه‌ی هندبوک GPSA [۲۴]، از قطر لوله‌ای که عملیات تخلیه بر روی آن انجام می‌شود حرفی به میان نیامده است. قطر لوله‌ی اصلی هرچند کم، اما از جمله عوامل تاثیر گذار بر روی دبی خروجی از شیر می‌باشد. از بین دو فرمول ارائه شده، فرمول ارائه شده توسط دفتر پژوهش گاز استان خوزستان [۲۹] بسیار ساده‌تر است و دبی خروجی را تحت تاثیر سطح مقطع شیر و فشار گاز داخل خط لوله در نظر گرفته است.

در این پژوهش نتایج حاصل از حل عددی و تحت شرایط واقعی عملیات تخلیه، ارائه و با تحقیقات پیشین مقایسه شده است و بر این اساس مدل کاملی جهت اعتبار سنجی و همچنین رفع نواقص تحقیقات پیشین در نمودار ۵-۱ ارائه شده است.

همانطور که قابل مشاهده است، از آنجا که رابطه‌ی هندبوک GPSA [۲۴] در رابطه با نشتی‌های کوچک جواب‌های قابل قبولی می‌دهد و با بزرگ شدن سوراخ، نتایج حاصل از آن با واقعیت فاصله گرفته و تطابق ندارد، لذا نتایج حاصل از این فرمول در رابطه با شیرهای تخلیه که ابعاد آن‌ها در مقایسه با ابعاد سوراخ‌های ریز، بزرگتر است، قابل قبول نمی‌باشد و نتایج اختلاف دارند. همانطور که در نمودار ۵-۱ قابل

ملاحظه است، بیشترین درصد اختلاف بین نتایج حاصل از پژوهش حاضر و رابطه‌ی ارائه شده توسط هندبوک ۳۵ درصد است. بین نتایج حاصل از دو رابطه‌ی دیگر ارائه شده و نتایج حاصل از پژوهش حاضر تطابق قابل قبولی وجود دارد که این نشان دهنده‌ی این است که فرایند مدل سازی و حل عددی به درستی انجام شده است. بیشترین اختلاف بین نتایج حاصل از پژوهش حاضر با نتایج شامحمدی و همکاران [۱] ۱۳٪ و با نتایج حاصل از رابطه‌ی ارائه شده توسط شرکت گاز خوزستان [۲۹] ۵٪ می‌باشد. قابل به ذکر است که فرمول‌هایی که برای پیش بینی مقدار دبی خروجی از شیر به هنگام عملیات ارائه شده اند بر اساس قوانین حاکم بر دینامیک گازها بوده و بیشترین دبی خروجی ممکن از شیر را تخمین می‌زنند و عوامل فیزیکی تاثیر گذار بر جریان خروجی از جمله مدت زمان باز شدن شیر و همچنین مدت زمانی که طول می‌کشد تا جریان به مقدار حداکثر خود برسد را در نظر نمی‌گیرند، به همین دلیل مقادیری که توسط این روابط پیش‌بینی می‌شوند از مقدار واقعی گاز خروجی بیشتر است. همچنین در تحقیقات گذشته، محاسبه گاز خروجی طی فرایند هایی نظیر نشتی، تخلیه یا شکست در خط لوله با فرض‌هایی نظیر گاز ایده‌آل و همچنین پایدار بودن جریان خروجی انجام می‌گرفت که نتایجی دور از واقعیت ارائه می‌داد که در این پژوهش این خطاها نیز برطرف شده‌اند.



نمودار ۵-۱ - مقایسه دبی جرمی خروجی بین پژوهش حاضر و مطالعات پیشین

۵-۲- بررسی کمیت‌های تاثیر گذار بر میزان دبی خروجی:

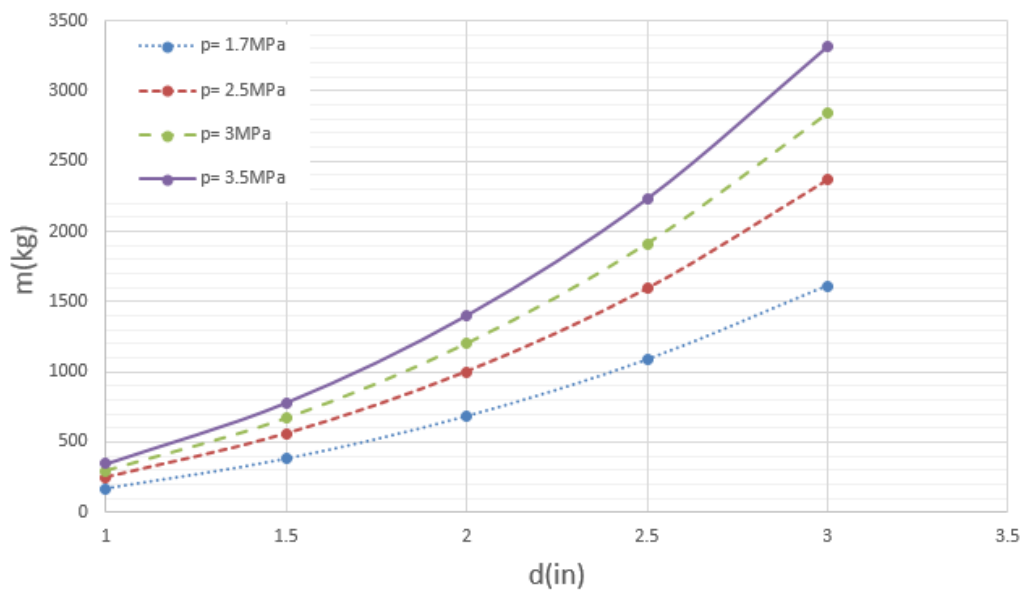
در فصل‌های قبل، فرضیات، روابط حاکم و کمیت‌های موثر بر میزان دبی خروجی از شیر به تفصیل شرح داده شد. در این فصل به بررسی کامل تمام کمیت‌های موثر اشاره شده در فصل‌های قبل می‌پردازیم و میزان و نحوه‌ی تاثیر هرکدام از این کمیت‌ها بررسی خواهد شد. نتایج تخلیه‌ی گاز برای لوله‌ها و همچنین شیرها با قطرهای مختلف و تحت فشارهای متفاوت در ادامه ارائه خواهد شد.

۵-۲-۱- تاثیر قطر لوله و قطر شیر بر میزان دبی خروجی:

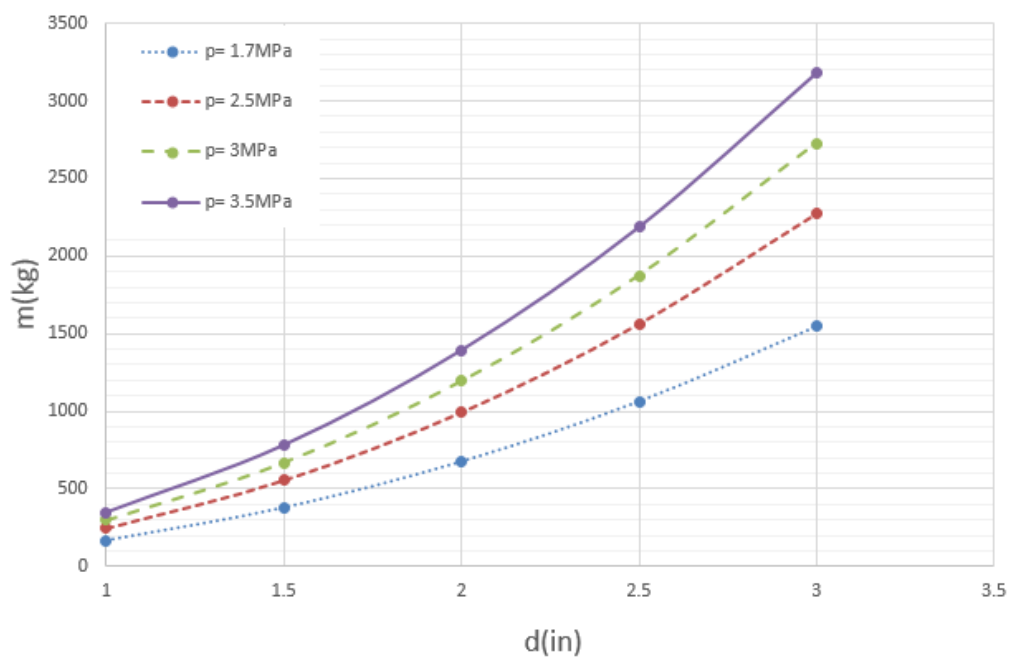
نمودارهای ۵-۲ و ۵-۳ و ۵-۴ و ۵-۵ به ترتیب نشان دهنده‌ی مقدار گاز خارج شده طی عملیات تخلیه، از شیر برای لوله‌هایی به قطر ۶ و ۸ و ۱۰ و ۱۲ اینچ می‌باشد. با مقایسه‌ی این نمودارها مشاهده می‌شود که مقدار گاز خروجی از شیر به ازای افزایش قطر شیر افزایش می‌یابد و با افزایش قطر لوله کاهش می‌یابد، در واقع با قطر شیر رابطه‌ی مستقیم و با قطر لوله رابطه‌ی وارونه دارد. اگر حداکثر مقدار

موجود در محور عمودی این نمودارها را با یکدیگر مقایسه کنیم، مشاهده می‌شود که این مقدار به ازای لوله به قطر ۱۲ اینچ برابر با ۳۱۳۲ و برای لوله به قطر ۶ اینچ به مقدار ۳۳۱۴,۴ افزایش می‌یابد که نشان می‌دهد افزایش قطر لوله با دبی خروجی از شیر رابطه‌ی وارونه دارد.

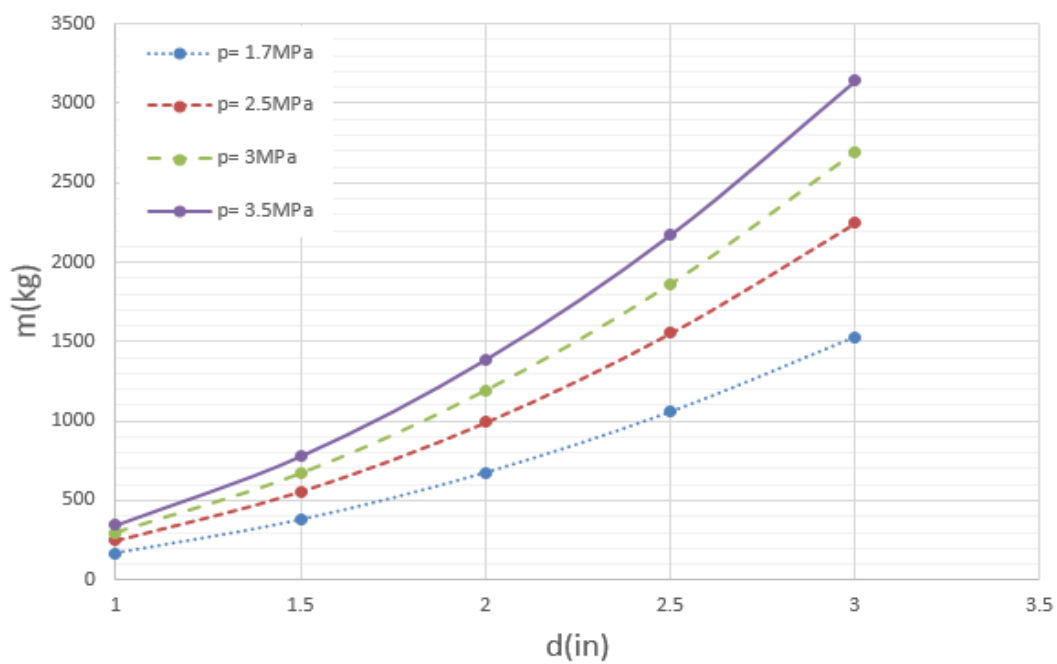
لازم به ذکر است که طبق بررسی‌های انجام شده، بهترین تابعی که می‌تواند این منحنی‌ها را با دقت مناسبی برازش کند، تابع درجه دوم است. همچنین بررسی‌ها نشان می‌دهد که دبی حجمی نشتی، با نسبت قطر سوراخ به قطر لوله نیز یک رابطه‌ی درجه چهار دارد. بر این اساس نحوه‌ی تغییرات کمیت‌های قطر لوله و قطر شیر در این پژوهش منطبق با مطالعات پیشین است که صحت نتایج را نشان می‌دهد.



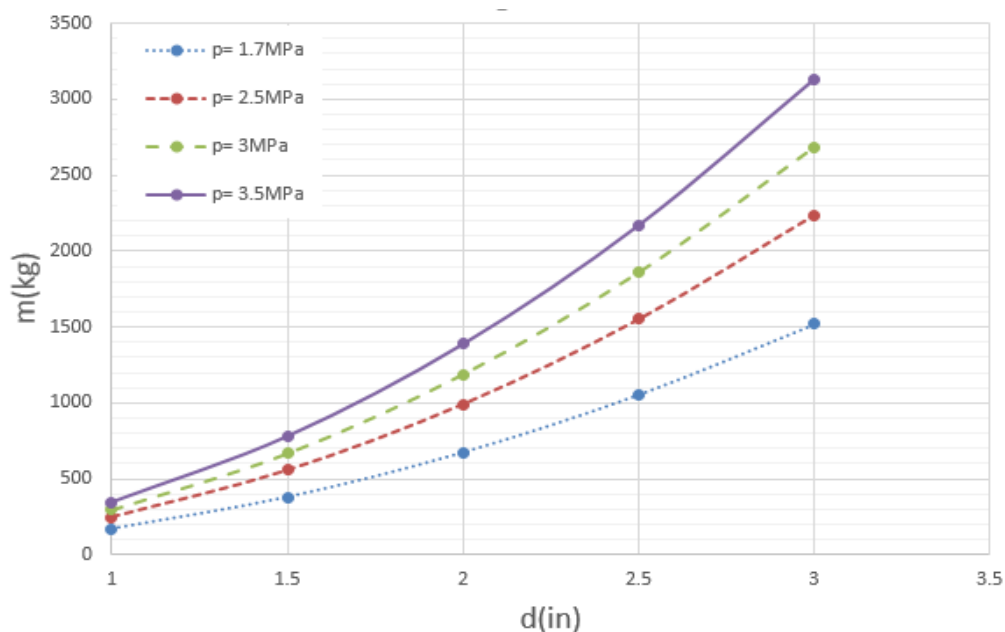
نمودار ۵-۲- مقایسه میزان گاز خارج شده به ازای مقادیر مختلف فشار ورودی بر حسب قطر شیر (برای لوله به قطر ۶ اینچ)



نمودار ۳-۵ - مقایسه میزان گاز خارج شده به ازای مقادیر مختلف فشار ورودی بر حسب قطر شیر (برای لوله به قطر ۸ اینچ)



نمودار ۴-۵ - مقایسه میزان گاز خارج شده به ازای مقادیر مختلف فشار ورودی بر حسب قطر شیر (برای لوله به قطر ۱۰ اینچ)



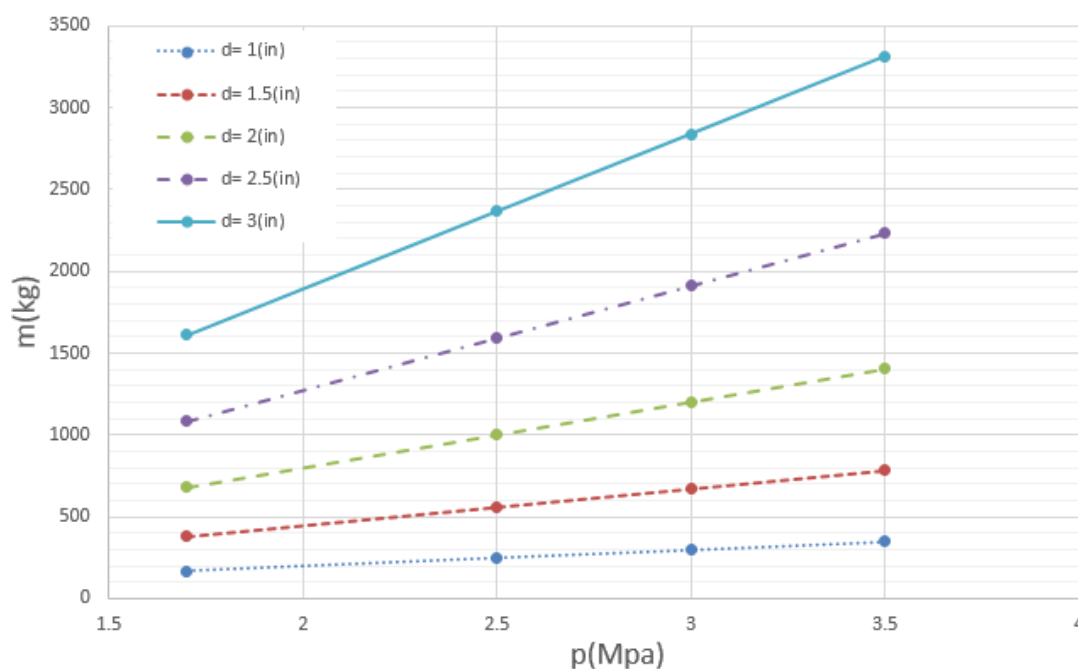
نمودار ۵-۵ - مقایسه میزان گاز خارج شده به ازای مقادیر مختلف فشار ورودی بر حسب قطر شیر (برای لوله به قطر ۱۲ اینچ)

همانطور که گفته شد با افزایش قطر شیر خروجی، میزان گاز خارج شده طی عملیات purging افزایش می‌یابد و با افزایش قطر خط لوله اصلی این مقدار کاهش می‌یابد. دلیل افزایش میزان گاز خارج شده با افزایش قطر شیر، بیشتر شدن سطح مقطع عبور جریان است، بعبارت دیگر هرچه سطح مقطع عبور جریان بیشتر شود با توجه به اینکه سرعت گاز خروجی تقریباً ثابت است، میزان گاز خارج شده افزایش می‌یابد و دلیل کاهش آن با افزایش قطر خط لوله اصلی را می‌توان در کاهش جریان‌های برگشتی از مقاطع بعد از انشعاب جستجو کرد در واقع، با افزایش قطر خط لوله اصلی، میزان گازی که در خط لوله اصلی جریان می‌یابد بیشتر می‌شود، بنابراین با باز شدن شیر، افت فشار در خط لوله اصلی نسبت به حالتی که قطر خط لوله کمتر است، کاهش می‌یابد و همین امر باعث کاهش جریان‌های برگشتی از مقاطع بعد از انشعاب و کاهش دبی عبوری از شیر می‌شود.

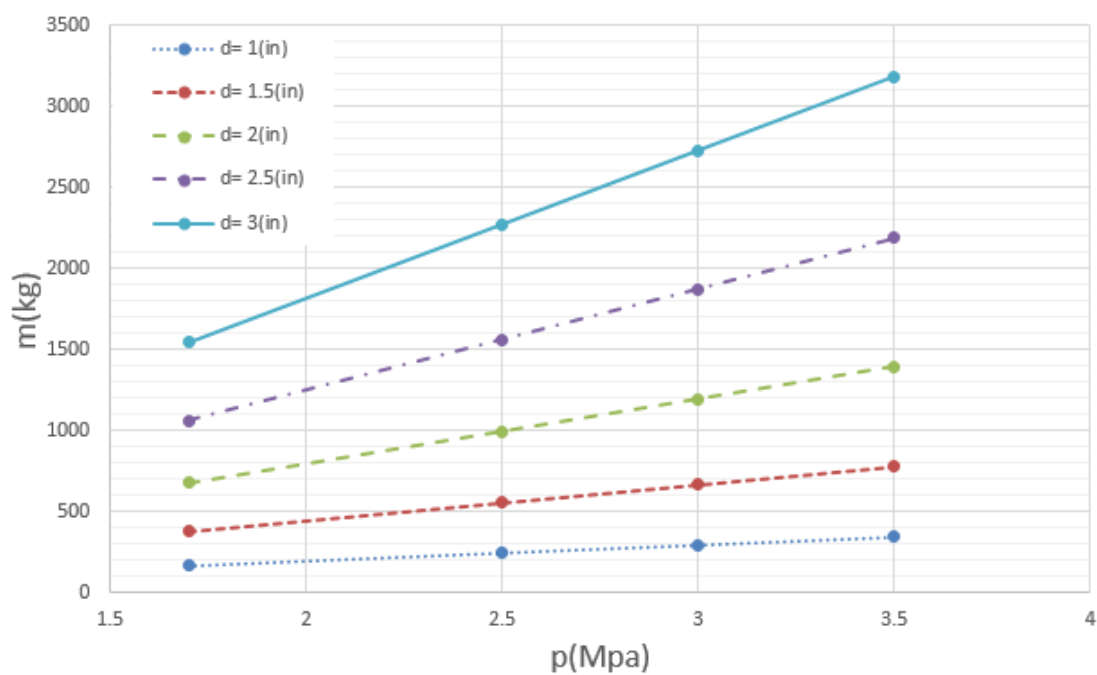
۵-۲-۲- بررسی تاثیر فشار نقطه‌ی ابتدایی بر میزان گاز خارج شده در هنگام عملیات

تخلیه:

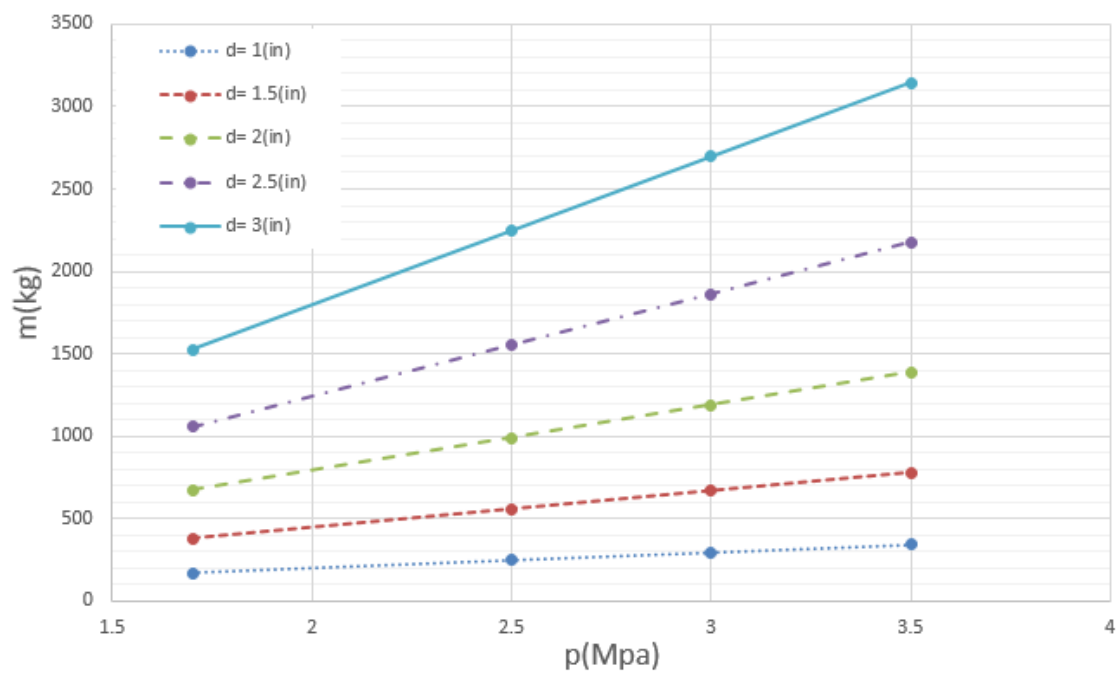
نمودارهای ۵-۶ و ۵-۷ و ۵-۸ و ۵-۹ نشان دهنده‌ی میزان گاز تخلیه شده به ازای فشارهای مختلف در ورودی و شیر با قطرهای متفاوت می‌باشد. این نمودارها بیانگر این نکته هستند که میزان گاز خروجی با فشار در نقطه‌ی ابتدایی رابطه‌ی مستقیم خطی دارد. همانگونه که در این نمودارها نیز قابل مشاهده است، میزان گاز خروجی با افزایش قطر خط لوله کاهش می‌یابد.



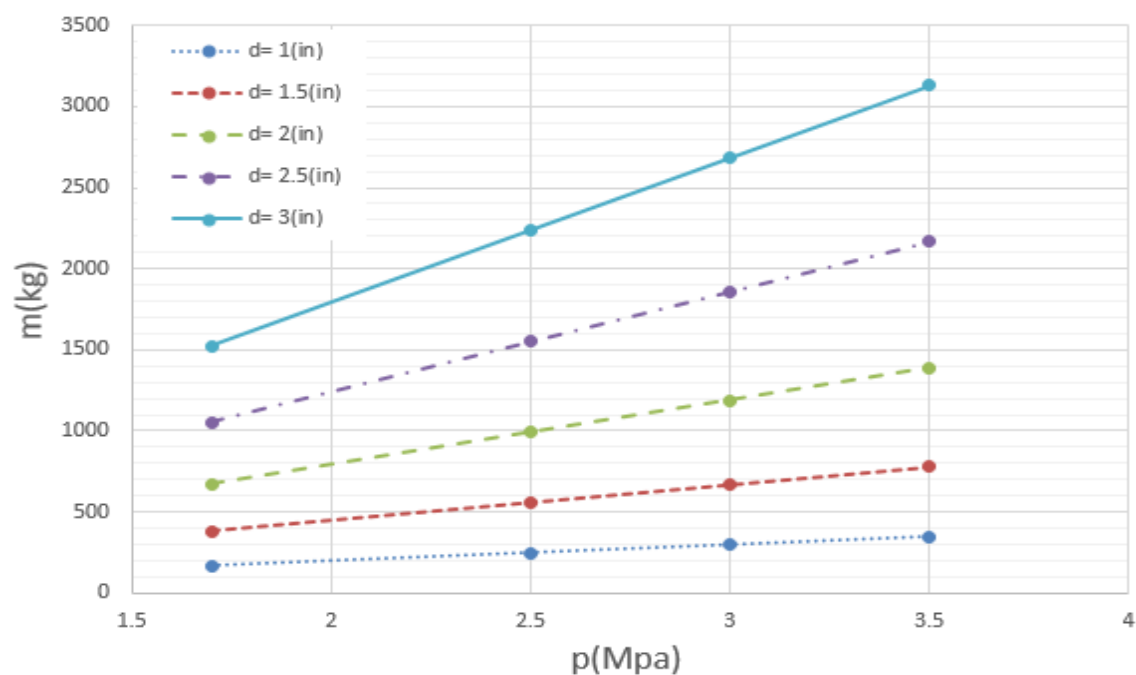
نمودار ۵-۶ - مقایسه میزان گاز خارج شده به ازای مقادیر مختلف قطر شیر بر حسب فشار ورودی (برای لوله به قطر ۶ اینچ)



نمودار ۵-۷ - مقایسه میزان گاز خارج شده به ازای مقادیر مختلف قطر شیر بر حسب فشار ورودی (برای لوله به قطر ۸ اینچ)



نمودار ۵-۸ - مقایسه میزان گاز خارج شده به ازای مقادیر مختلف قطر شیر بر حسب فشار ورودی (برای لوله به قطر ۱۰ اینچ)

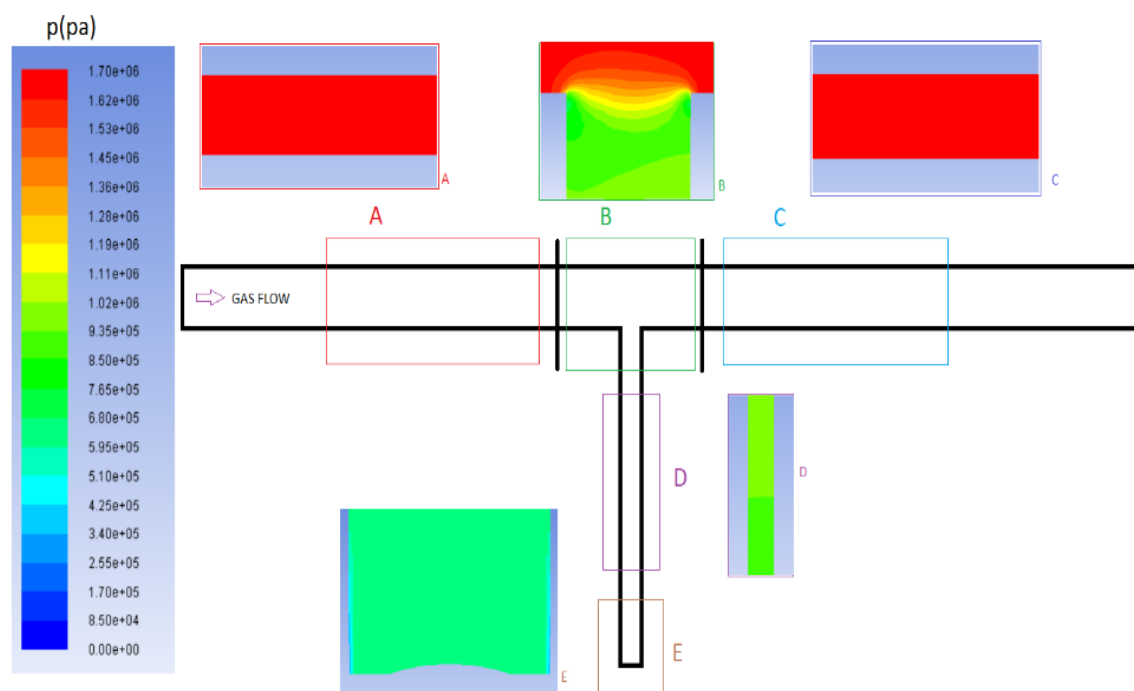


نمودار ۵-۹ - مقایسه میزان گاز خارج شده به ازای مقادیر مختلف قطر شیر بر حسب فشار ورودی (برای لوله به قطر ۱۲ اینچ)

۵-۲-۳- بررسی توزیع کمیت‌ها در دامنهی حل:

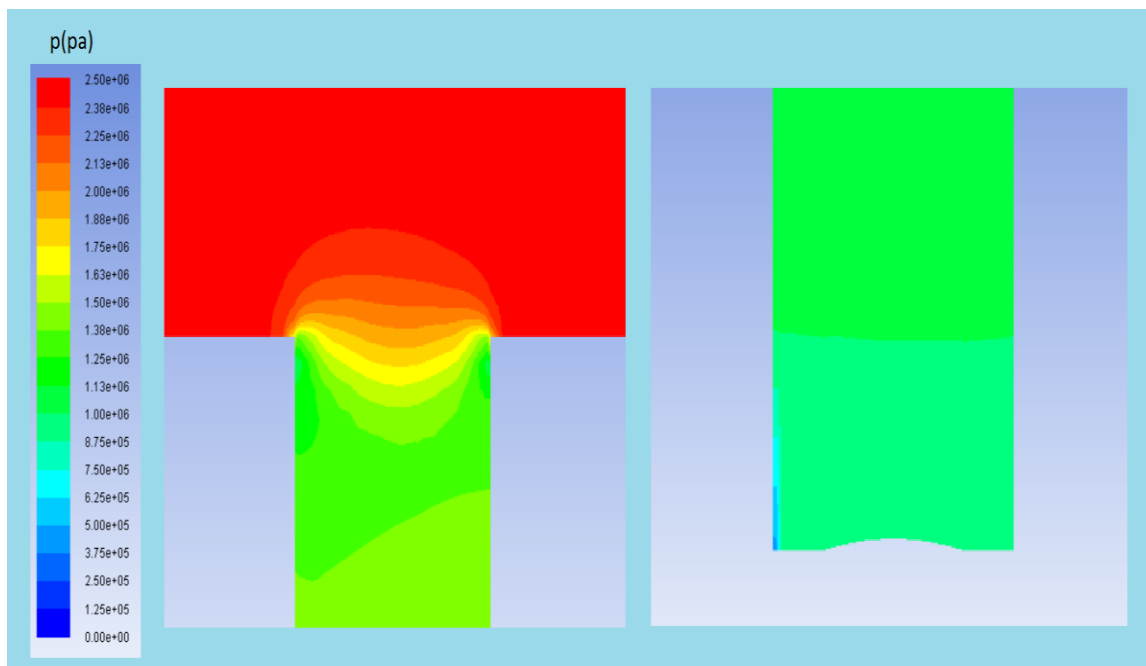
شکل ۵-۱ نشان دهنده‌ی توزیع فشار استاتیکی^۱ در لوله و پیرامون شیر تخلیه و لوله‌ی رابط، برای خط لوله‌ای به قطر ۸ اینچ و شیر به قطر ۲ اینچ و فشار استاتیکی ۱,۷ MPa می‌باشد. همانطور که در شکل قابل مشاهده است، افت فشار در طول لوله بسیار کم و قابل صرف‌نظر می‌باشد که دلیل این امر، کوچک بودن قطر شیر نسبت به قطر لوله و شرایط حاکم بر خطوط انتقال گاز (بالا بودن فشار استاتیکی و دینامیکی) است.

^۱ Static pressure

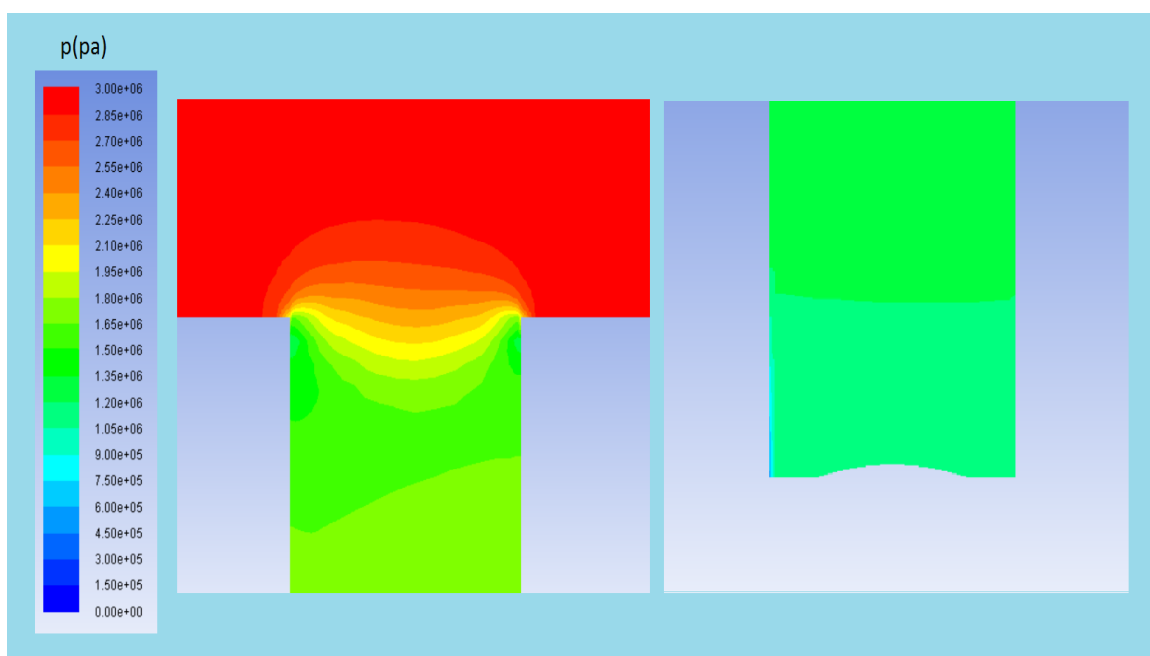


شکل ۵-۱ - توزیع فشار استاتیکی در خط لوله و انشعاب مربوط به شیر با مشخصات $D=8$ و $d=2$ و $p=1,7\text{MPa}$

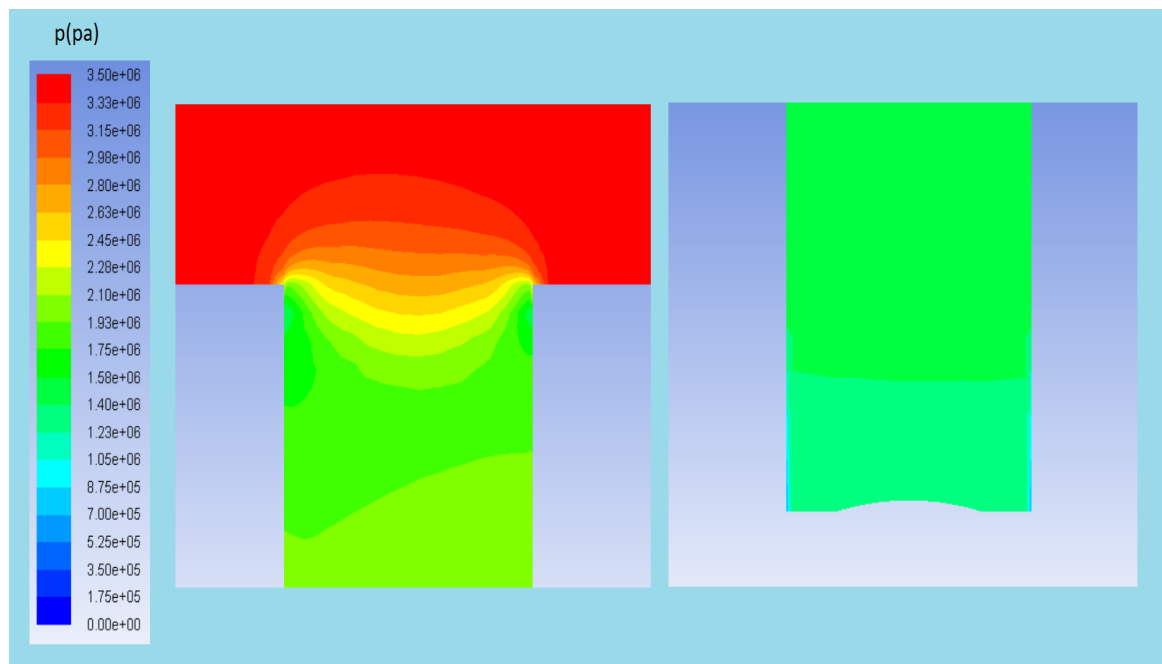
در شکل‌های ۵-۲ تا ۵-۸ نمونه‌هایی از توزیع فشار پیرامون شیر و محل اتصال آن به خط لوله‌ی اصلی به ازای مقادیر متفاوتی از کمیت‌های موثر بر پژوهش نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، تغییرات فشار در نزدیکی محل انشعاب قابل ملاحظه است، همچنین این تغییرات فشار در ناحیه‌ی نزدیک به شیر نیز دیده می‌شود و می‌توان ملاحظه کرد که به علت کوچک بودن مقطع شیر و بالا بودن فشار داخل خط لوله فشار در این ناحیه از فشار محیط بیشتر است.



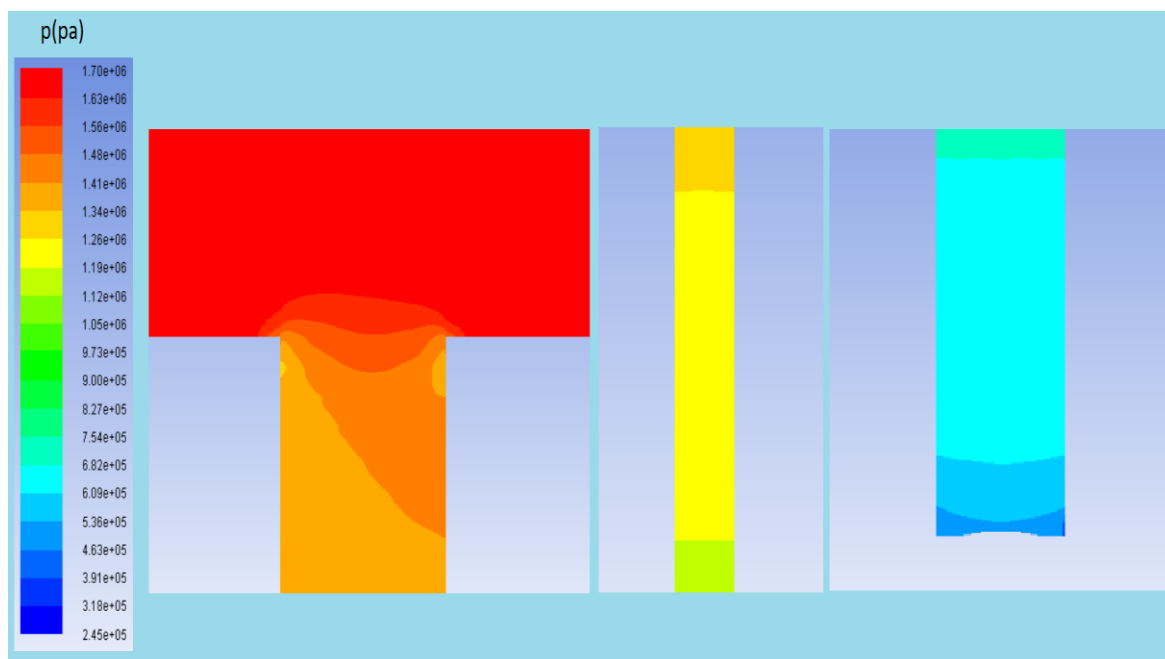
شکل ۵-۲ - توزیع فشار استاتیکی در خط لوله و انشعاب مربوط به شیر با مشخصات $D=8$ و $d=2$ و $p=2, \Delta \text{MPa}$



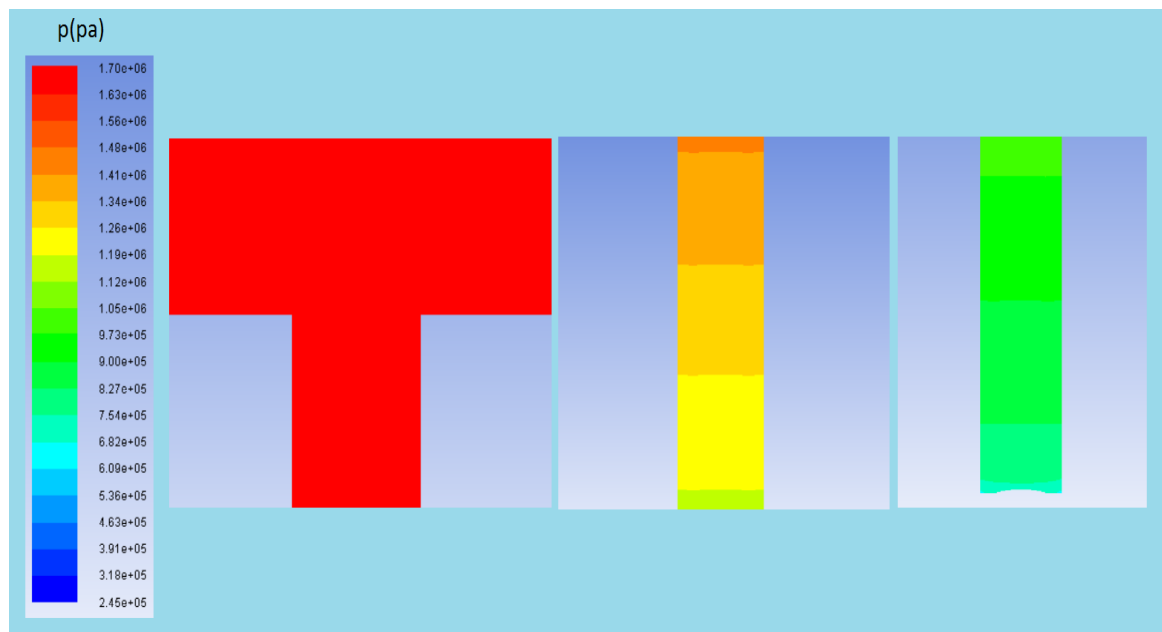
شکل ۵-۳ - توزیع فشار استاتیکی در خط لوله و انشعاب مربوط به شیر با مشخصات $D=8$ و $d=2$ و $p=3 \text{ MPa}$



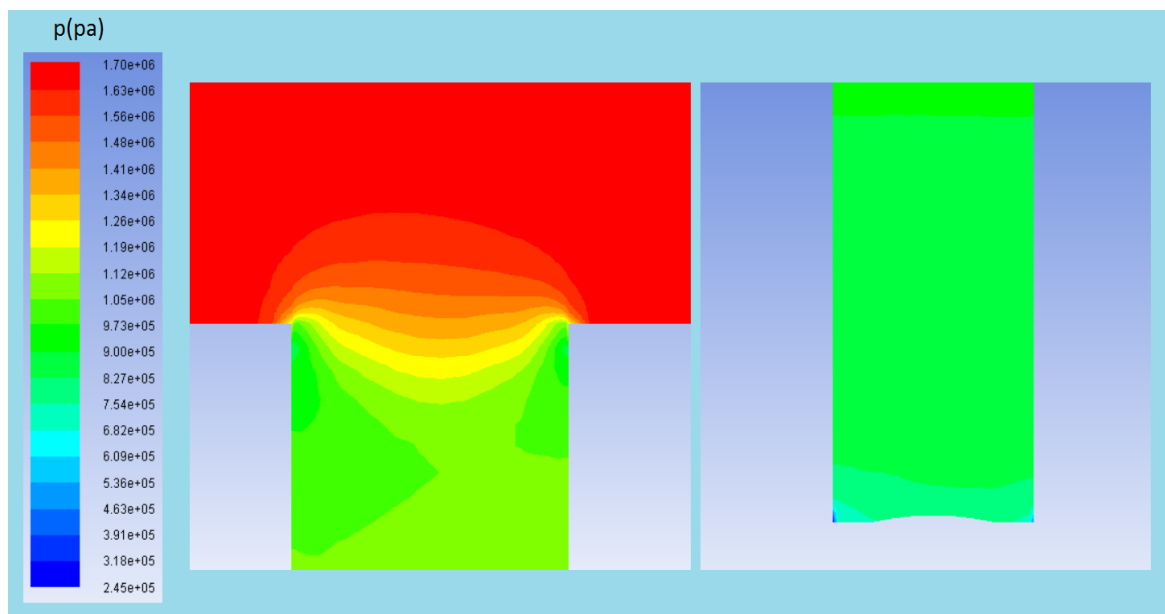
شکل ۴-۵ - توزیع فشار استاتیکی در خط لوله و انشعاب مربوط به شیر با مشخصات $D=8$ و $d=2$ و $p=3 \text{ MPa}$



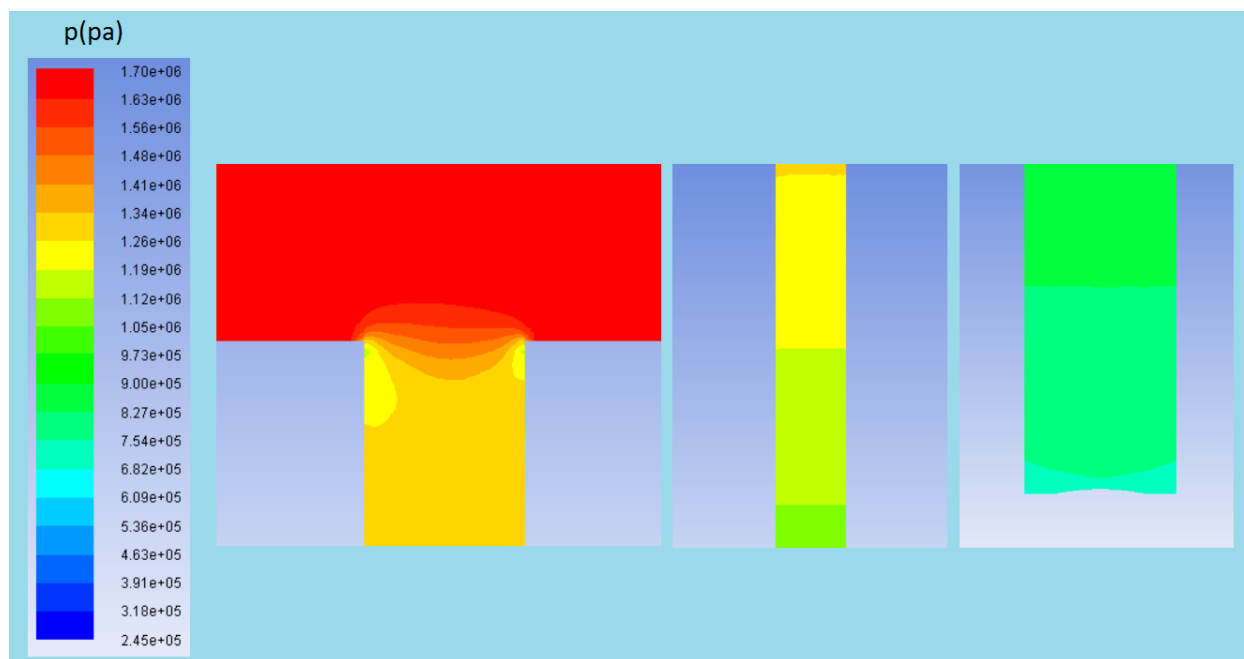
شکل ۵-۵ - توزیع فشار استاتیکی در خط لوله و انشعاب مربوط به شیر با مشخصات $D=6$ و $d=1$ و $p=1 \text{ MPa}$



شکل ۵-۶ - توزیع فشار استاتیکی در خط لوله و انشعاب مربوط به شیر با مشخصات $D=6$ و $d=2$ و $p=1,7\text{MPa}$



شکل ۵-۷ - توزیع فشار استاتیکی در خط لوله و انشعاب مربوط به شیر با مشخصات $D=10$ و $d=2$ و $p=1,7\text{MPa}$



شکل ۵-۸ - توزیع فشار استاتیکی در خط لوله و انشعاب مربوط به شیر با مشخصات $D=12$ و $d=2$ و $p=1,7\text{MPa}$

با مقایسه‌ی کلیه‌ی توزیع فشارهای موجود در شکل‌های ۵-۲ تا ۵-۸ مشاهده می‌شود که در قطرهای لوله و شیر بزرگتر، تغییرات و پراکندگی فشار در پیرامون شیر و انشعاب نسبت به فشار خط لوله کمتر می‌شود. یعنی محدوده‌ی پیرامون شیر که در آن شاهد تغییرات شدید فشار هستیم، با افزایش قطرهای لوله و شیر کمتر می‌شود.

همچنین بررسی نتایج نشان می‌دهد که با افزایش قطر شیر (به ازای مقادیر یکسانی از قطر لوله و فشار نقطه ابتدایی) اختلاف فشار مقطع شیر و فشار محیط، کمتر شده و اختلاف فشار نقطه‌ی ابتدایی و فشار انشعاب شیر بیشتر می‌شود.

دست‌آورد موارد اشاره شده در بالا، ایجاد یک موج انبساطی داخل لوله است که باعث می‌شود گاز با سرعت بیشتری به سمت شیر تخلیه حرکت کند. شکل ۵-۹ نشان دهنده‌ی توزیع سرعت برای لوله‌ای با قطر ۸ اینچ و فشار استاتیکی $1,7\text{ MPa}$ که شیری به قطر ۲ اینچ بر روی آن قرار گرفته است، می‌باشد.

همانگونه که در این شکل قابل مشاهده است، باز شدن شیر باعث افزایش سرعت گاز در خط لوله اصلی می‌شود که این افزایش سرعت تا سه متر قبل از انشعاب شیر را تحت تاثیر قرار داده است. همچنین وجود جریان برگشتی در مقاطع بعد از انشعاب می‌توان مشاهده کرد که علت این جریانات، افت فشار بوجود آمده در انشعاب، به دلیل باز شدن شیر می‌باشد و باعث افزایش دبی خروجی از شیر نسبت به حالتی که طولی برای خط لوله بعد از انشعاب شیر در نظر نمی‌گیریم می‌شود.

شکل ۵-۱۰ نیز عدد ماخ را در مقاطع مختلف مدل مورد نظر نشان می‌دهد. همانطور که در این شکل قابل مشاهده است، در نزدیکی مقطع شیر سرعت گاز خروجی از سرعت صوت بیشتر می‌شود. به دلیل وجود لایه مرزی و جریان برگشتی در انشعاب شیر و کم شدن سطح مقطع عبور جریان گاز، در این انشعاب گلوگاه شکل می‌گیرد و انشعاب، رفتاری مانند نازل‌های همگرا-واگرا از خود نشان می‌دهد. همانگونه که در قبل اشاره شد، هنگامی که فشار در خروجی نازل بسیار پایین است، ناحیه‌ای که سرعت جریان در آن مافوق صوت است به سمت پایین دست و خروجی نازل حرکت می‌کند. در این پژوهش، فشار در خروجی شیر را فشار اتمسفر در نظر گرفته‌ایم که بسیار کمتر از p_{bcrit} می‌باشد و همانطور که گفته شد این پدیده باعث بوجود آمدن ناحیه‌ای با سرعت مافوق صوت در پایین دست گلوگاه می‌شود و چون فشار اتمسفر نسبت به فشار گاز داخل لوله بسیار کم است، این ناحیه به سمت پایین دست انشعاب و خروجی لوله حرکت می‌کند. لازم به ذکر است که با توجه به کانتورهای فشار می‌توان مشاهده کرد که در خروجی شیر، فشار برابر با فشار اتمسفر نشده است، پس می‌توان ادامه‌ی نازل را پس از مقطع شیر و تا جایی که فشار، برابر با فشار اتمسفر می‌شود در نظر گرفت.

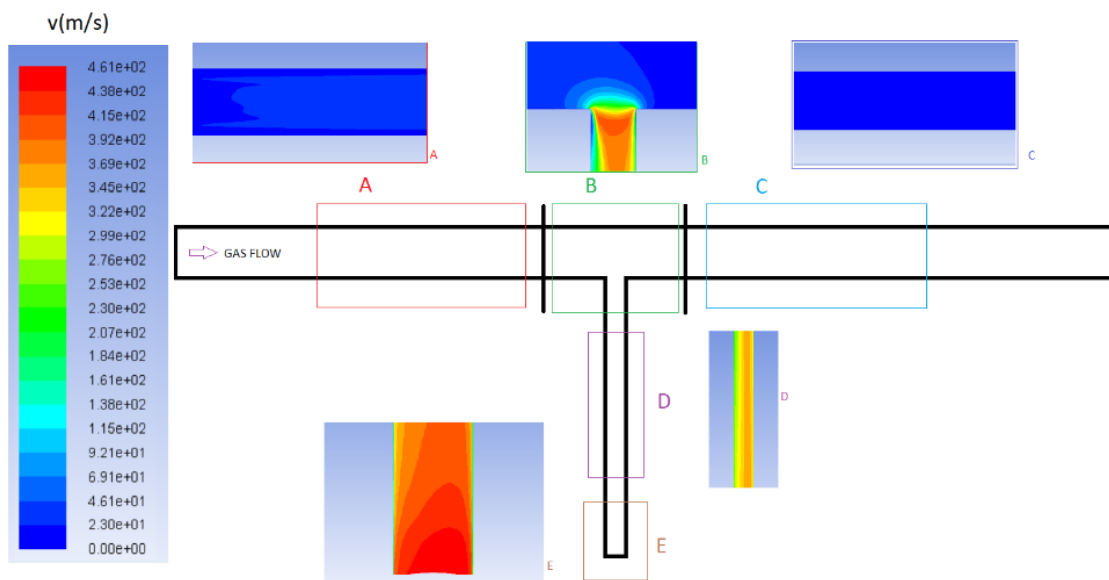
عدد ماخ در ناحیه‌ی مافوق صوت بزرگتر از یک است و همانطور که در شکل ۵-۱۰ دیده می‌شود، این ناحیه به مقطع شیر رسیده است.

رابطه‌ی ۱-۵ را بین هر دو مقطع از یک مجرا مانند یک نازل که دبی عبوری از آن‌ها برابر است می‌توان

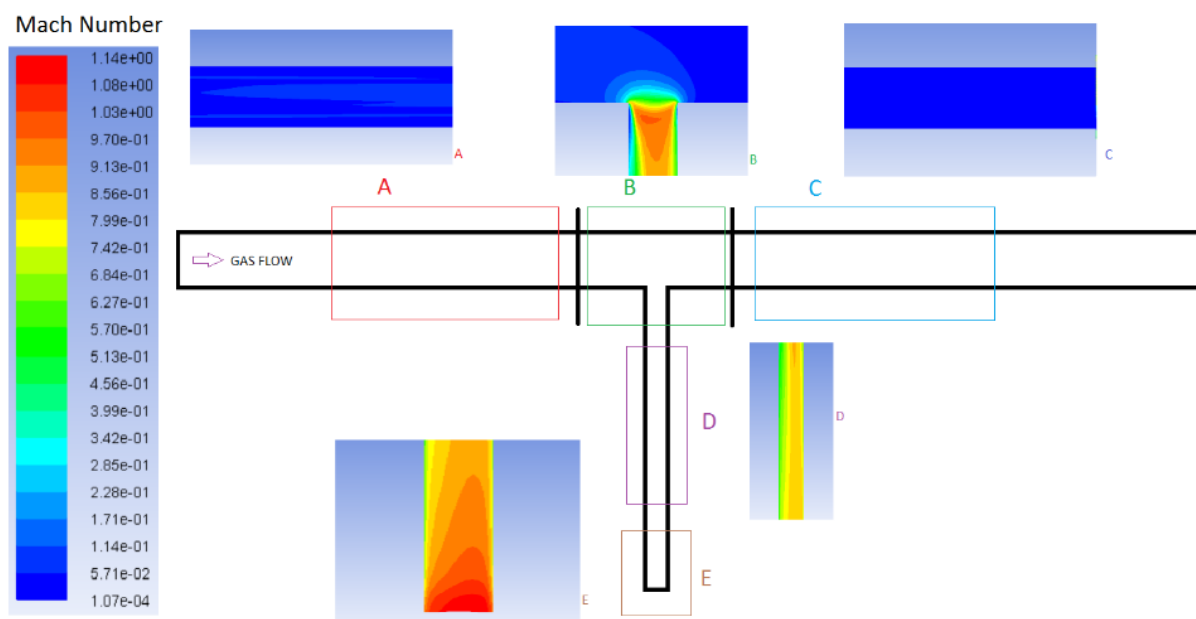
نوشت.

$$\frac{A}{A^*} = \left(\frac{1}{Ma} \right) \left[\frac{1 + \left(\frac{\gamma - 1}{2} \right) Ma^2}{1 + \left(\frac{\gamma - 1}{2} \right)} \right]^{\frac{\gamma + 1}{2(\gamma - 1)}} \quad (1-5)$$

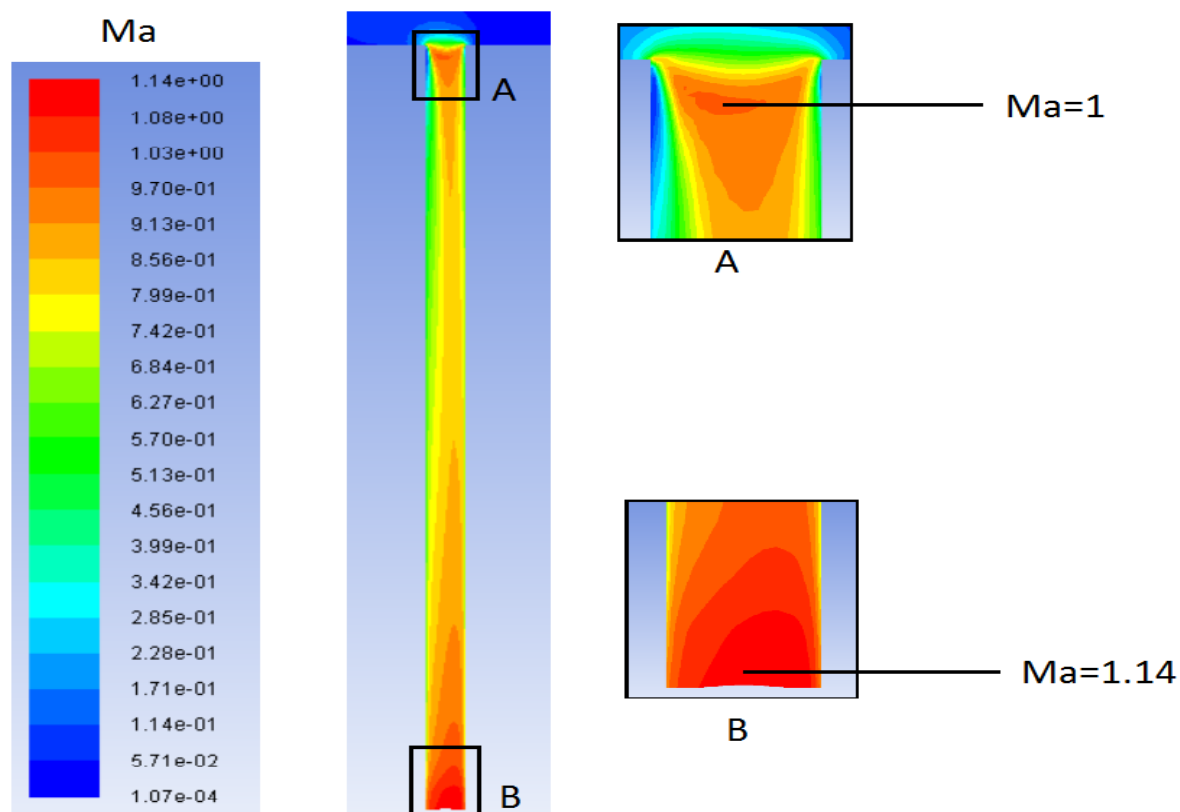
اگر رابطه‌ی ۱-۵ را بین گلوگاه و مقطع شیر بنویسیم، با توجه به اینکه قطر مقطع گلوگاه حدوداً برابر با ۱،۹۷ اینچ می‌باشد و همچنین عدد ماخ نیز در این مقطع برابر با یک است، عدد ماخ در مقطع شیر برابر با ۱،۱۷ بدست می‌آید. همانطور که در شکل ۵-۱۱ قابل مشاهده است، عدد ماخ در پژوهش حاضر در مقطع شیر برابر با ۱،۱۴ می‌باشد که این میزان خطا می‌تواند از خطا در برآورد قطر مقطع در گلوگاه و یا دیگر عوامل نشأت گرفته باشد. میزان تفاوت نتایج بدست آمده از این پژوهش و مقدار تئوری حدوداً ۳٪ است که بر درستی نتایج بدست آمده صحه می‌گذارد.



شکل ۵-۹ - توزیع سرعت در خط لوله و انشعاب مربوط به شیر با مشخصات $p=1.7\text{MPa}$ و $d=2$ و $D=8$

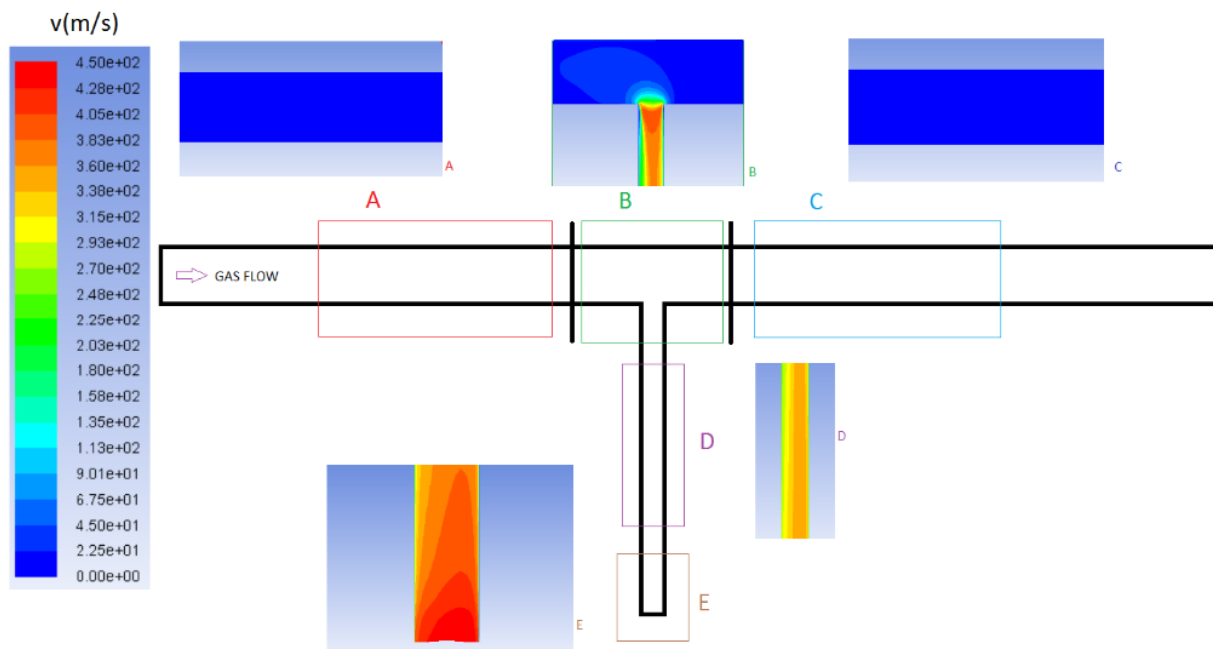


شکل ۵-۱۰ - عدد ماخ در نواحی مختلف خط لوله و انشعاب مربوط به شیر با مشخصات $D=8$ و $d=2$ و $p=1,7\text{MPa}$

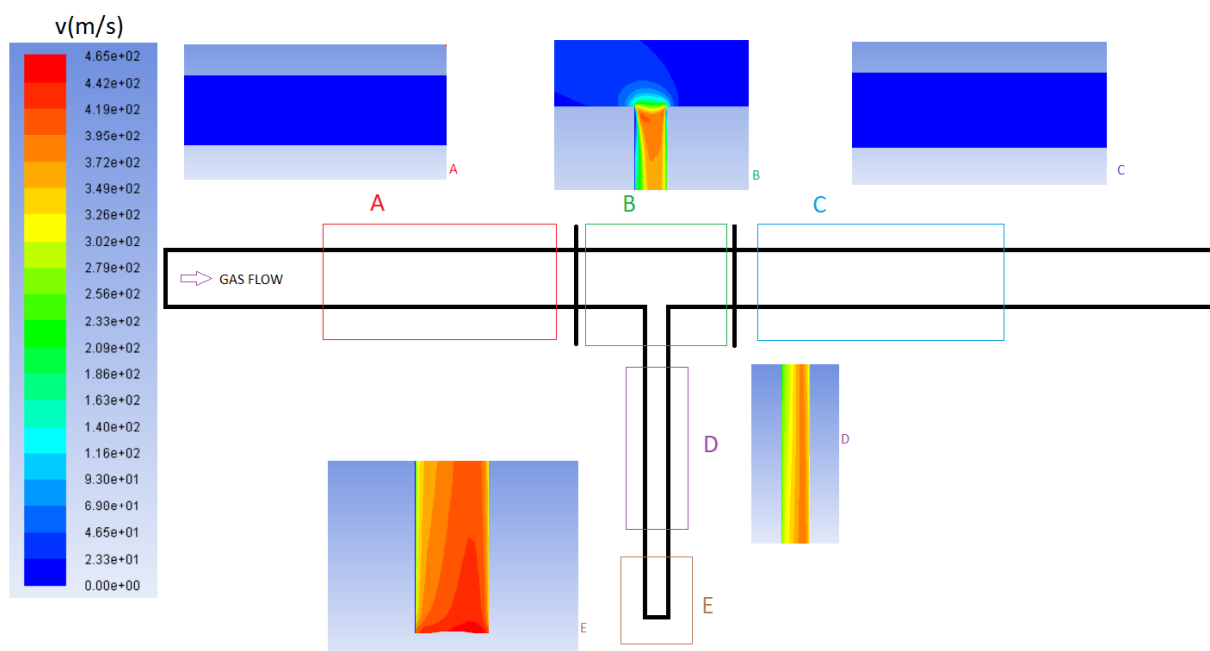


شکل ۵-۱۱ توزیع عدد ماخ در انشعاب و شیر برای خط لوله با مشخصات $D=8$ و $d=2$ و $p=1,7\text{MPa}$

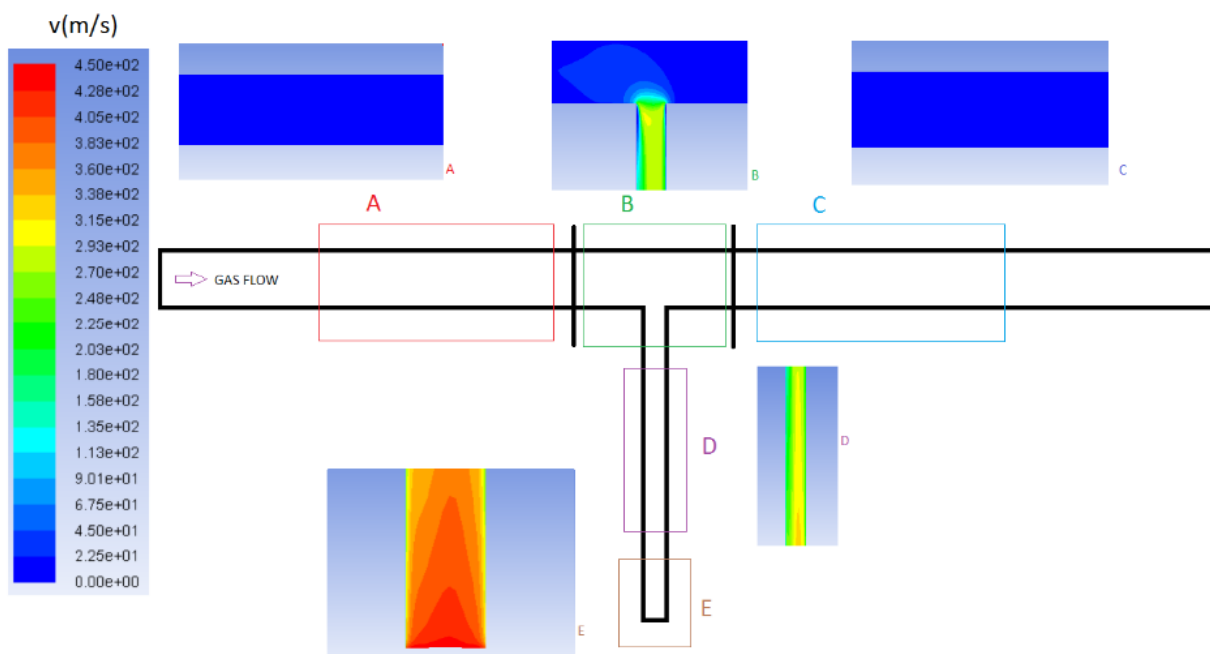
شکل‌های ۱۲-۵ تا ۱۴-۵ نیز نمونه‌هایی از توزیع سرعت پیرامون شیر و انشعاب آن، به ازای مقادیر متفاوتی از کمیت‌های موثر بر پژوهش را نشان می‌دهند.



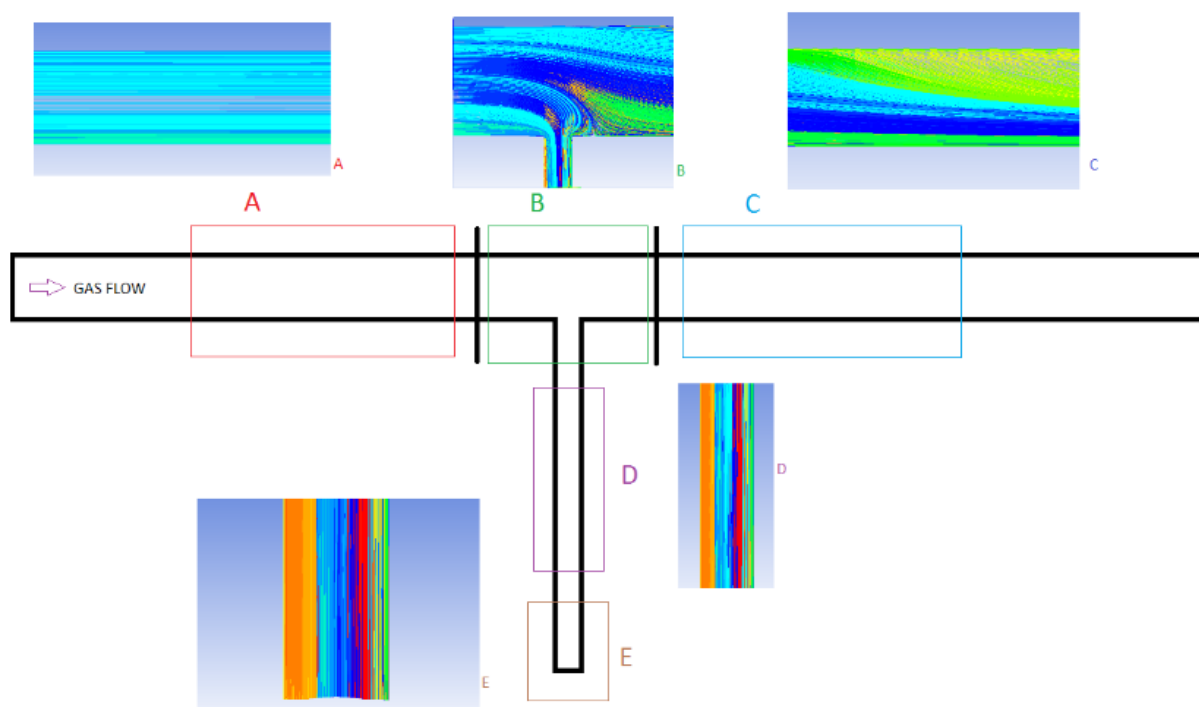
شکل ۱۲-۵ - توزیع سرعت در خط لوله و انشعاب مربوط به شیر با مشخصات $D=8$ و $d=2$ و $p=3.5\text{MPa}$



شکل ۵-۱۳ - توزیع سرعت در خط لوله و انشعاب مربوط به شیر با مشخصات $D=10$ و $d=2$ و $p=1,7\text{MPa}$



شکل ۵-۱۴ - توزیع سرعت در خط لوله و انشعاب مربوط به شیر با مشخصات $D=12$ و $d=2$ و $p=1,7\text{MPa}$



شکل ۵-۱۵ - مسیر جریان در خط لوله و انشعاب مربوط به شیر با مشخصات $D=8$ و $d=2$ و $p=1,7\text{MPa}$

در این شکل‌ها شاهد برگشت مقداری گاز از سمت پایین دست لوله به سمت انشعاب شیر هستیم که نشان دهنده‌ی تاثیر درنظر گرفتن طول لوله بعد از انشعاب شیر است. از طرفی با بزرگ شدن قطر شیر، میزان جریان برگشتی بیشتر می‌شود و میزان دبی خروجی از شیر افزایش می‌یابد. لذا، با در نظر گرفتن این شکل‌ها، بیشتر بودن دبی خروجی در این حالت نسبت به حالتی که برای بعد از انشعاب طولی در نظر گرفته نمی‌شود قابل درک است.

۵-۳- توسعه‌ی روابطی برای محاسبه‌ی میزان گاز تخلیه شده:

در بخش قبل، نتایج مربوط به شبیه سازی عددی انجام گرفته در این پژوهش بطور کامل تشریح شد و نمونه‌های متفاوتی از این نتایج ارائه گردید. با توجه به نتایج ارائه شده در بخش قبل، در این بخش به ارائه‌ی یک رابطه برای محاسبه‌ی میزان گاز تخلیه شده طی عملیات تخلیه پرداخته می‌شود.

با توجه به نمودارها و با بررسی تغییرات مربوط به قطر لوله، قطر شیر تخلیه کننده و فشار نقطه‌ای ابتدایی، مشاهده شد که میزان گاز خارج شده با قطر شیر، نسبت قطر شیر به قطر لوله و فشار نقطه‌ای ابتدایی، به ترتیب به صورت توابع درجه دوم، درجه چهارم و خطی تغییر پیدا می‌کند. همچنین با توجه به زمانی که برای باز کردن شیر صرف می‌شود، تا جریان به حالت پایدار برسد، جهت محاسبه‌ی میزان گاز خارج شده از شیر طی انجام عملیات تخلیه دو رابطه ارائه شده است که یکی مربوط به میزان گاز خارج شده در حالت ناپایدار، یعنی از لحظه‌ای که شیر شروع به باز شدن می‌کند تا زمانی که جریان خروجی از آن کاملاً پایدار می‌شود و دیگری مربوط به جریان پایدار گاز خروجی از شیر، یعنی از لحظه‌ای که جریان گاز خروجی پایدار می‌شود تا پایان فرایند تخلیه را برآورد می‌کند. روابط ۳-۵ و ۲-۵ به ترتیب میزان گاز خارج شده در دو حالت پایدار و ناپایدار را برآورد می‌کنند.

$$m = ۳.۵۳۹۵۵۷۷۵ \times ۱۰^{-۷} (1 + \beta^r) d^r p_1 t_f \quad (۲-۵)$$

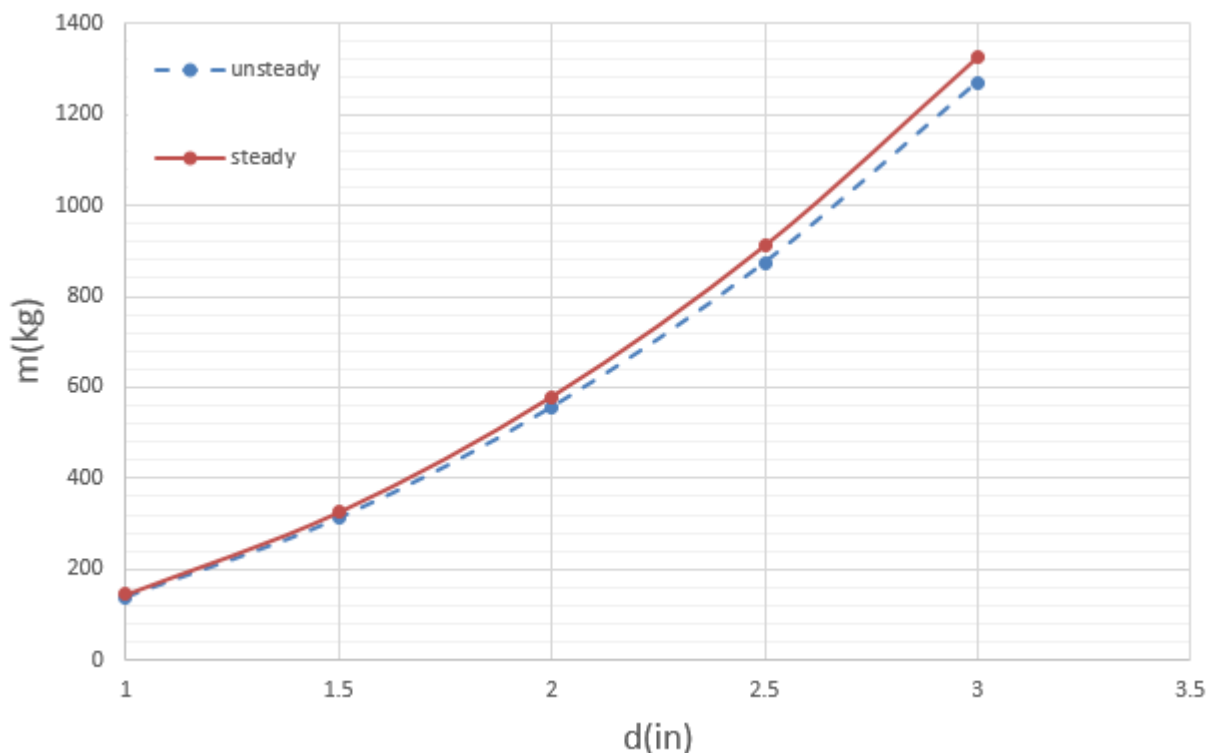
$$m = ۷.۰۷۹۱۱۵۵ \times ۱۰^{-۷} (1 + \beta^t) d^r p_1 t \quad (۳-۵)$$

$$\beta = \frac{d}{D} \quad (۴-۵)$$

که در این روابط، m میزان گاز خارج شده طی فرایند تخلیه (kg)، d قطر شیر تخلیه کننده (in)، D قطر خط لوله‌ای که عملیات تخلیه بر روی آن انجام می‌شود (in)، p فشار گاز داخل خط لوله (Pa)، t_f زمانی که طول می‌کشد تا شیر بصورت کامل باز شود (s) و t زمان مورد نیاز برای انجام عملیات تخلیه، پس از باز شدن شیر بصورت کامل می‌باشد (s).

لازم به ذکر است که این روابط بر اساس شرایط واقعی خطوط انتقال گاز بدست آمده‌اند و برای چهار لوله‌ی پر کاربرد در خطوط انتقال یعنی لوله‌های ۶، ۸، ۱۰ و ۱۲ اینچی و برای محدوده‌ی فشار ۱،۷ تا ۳،۵ مگاپاسکال و برای شیرهای تخلیه به قطرهای ۱، ۱،۵، ۲، ۲،۵ و ۳ اینچی محاسبه شده و دارای دقت مناسبی می‌باشد.

در نمودار ۵-۱۰ به مقایسه‌ی نتایج حاصله در دو حالت پرداخته‌ایم. حالت اول بدون در نظر گرفتن زمانی برای باز شدن شیر است، به این صورت که شیر را را از ابتدا باز و جریان را پایدار در نظر می‌گیریم. در حالت دوم نیز زمان مورد نیاز برای باز شدن شیر را ۱۰ ثانیه در نظر گرفته‌ایم. در هر دو حالت مدت زمان شروع فرایند تخلیه تا پایان آن، دو دقیقه در نظر گرفته شده است. نمودار ۵-۱۰ مربوط به خط لوله‌ی اصلی به قطر ۸ اینچ است که فشار در نقطه‌ی ابتدایی آن ۱،۷ مگاپاسکال می‌باشد.

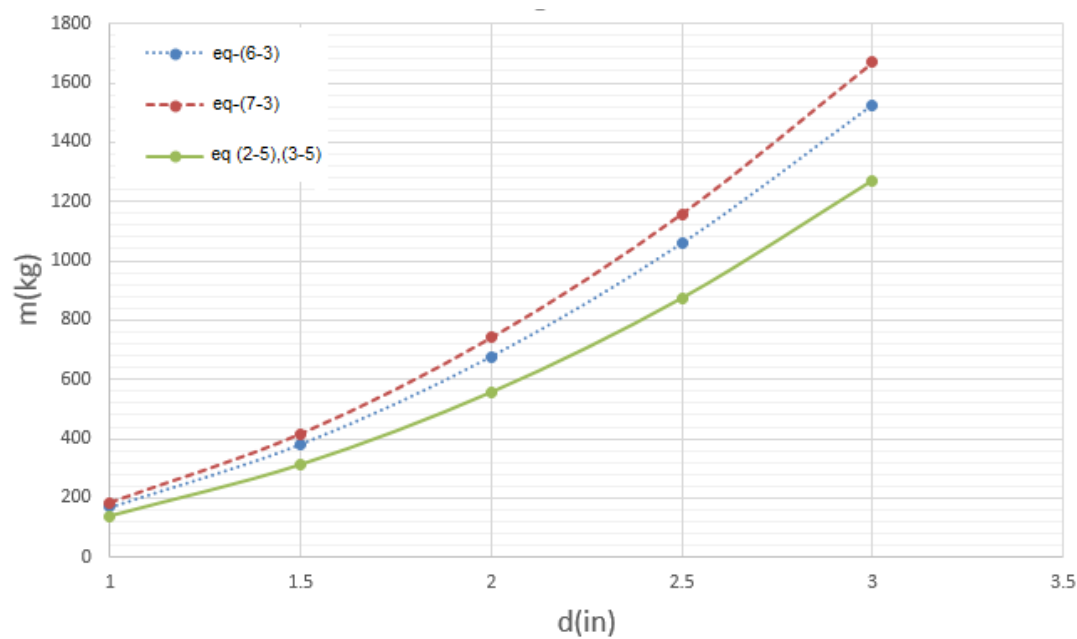


نمودار ۵-۱۰ -مقایسه میزان گاز تخلیه شده در دو حالت پایدار و ناپایدار به ازای مقادیر مختلف قطر شیر برای لوله به مشخصات $p=1.7 \text{ MPa}$ و $D=8$

همانطور که در نمودار بالا نیز قابل مشاهده است، بیشترین اختلاف بین مقادیر در دو حالت پایدار و ناپایدار ۳,۵٪ می باشد.

در ادامه به مقایسه نتایج حاصل از روابط ۲-۵ و ۳-۵ با نتایج پژوهش های گذشته و همچنین اعتبار سنجی آن پرداخته خواهد شد.

همانطور که در قبل نیز گفته شد، رابطه ی هندبوک GPSA [۲۴] در رابطه با شیرهای تخلیه و سوراخ های بزرگ روی سطح خط لوله، جواب های قابل قبولی ارائه نمی دهد. لذا جهت مقایسه و اعتبار سنجی، نتایج حاصل از فرمول ارائه شده را با نتایج حاصل از دو رابطه ی ارائه شده توسط شامحمدی و همکاران و همچنین رابطه ی ارائه شده توسط شرکت گاز استان خوزستان مقایسه می کنیم.



نمودار ۱۱-۵ مقایسه ی نتایج حاصل از روابط ۲-۵ و ۳-۵ و رابطه ی ارائه شده توسط شامحمدی و همکاران و همچنین رابطه ی دفتر پژوهش گاز استان خوزستان به ازای شیر با قطرهای مختلف و خط لوله با مشخصات $D=8$ و $p=1.7 \text{ MPa}$

فصل ششم

نتیجه گیری و پیشنهادات

۶-۱- نتیجه گیری:

در این پژوهش میزان گاز خارج شده از شیرهای تخلیه‌ای که بر روی خطوط لوله‌ای اصلی انتقال گاز قرار گرفته‌اند، توسط مدلسازی عددی بصورت کامل مورد بررسی و تحلیل قرار گرفت. هندسه‌ی مورد بررسی توسط نرم‌افزار گمبیت طراحی و شبکه بندی شد و سپس حل عددی توسط نرم‌افزار فلوئنت انجام گرفت. مطالعات انجام شده در زمینه‌ی خطوط انتقال گاز انجام شد که در آن‌ها فشار گاز بالا است. این پژوهش با فرض جریان آشفته و تراکم پذیر انجام شده و برای آن که نتایج به نتایج واقعی نزدیکتر باشد، گاز را بصورت گاز واقعی در نظر گرفته‌ایم.

الگوی تغییرات نتایج حاصل از این پژوهش با مطالعات مرتبط پیشین با هم تطابق دارند که صحت روش حل و نتایج حاصل از این پژوهش را نشان می‌دهد. همچنین حل عددی جهت هرچه نزدیکتر بودن نتایج حاصله به نتایج واقعی بصورت ناپایدار انجام شده و در آن زمانی برای باز شدن شیر نیز در نظر گرفته شده است که بر روی میزان کل گاز خارج شده از شیر تاثیر می‌گذارد.

همچنین بررسی نتایج حاصل، نشان دهنده‌ی ایجاد یک جریان مافوق صوت در مقطع شیر است. بررسی‌ها نشان می‌دهد که انشعاب شیر به شکل یک نازل همگرا-واگرا عمل می‌کند که علت آن رشد لایه مرزی در مقاطع نزدیک به انشعاب است که باعث کوچک شدن سطح مقطع عبور جریان گاز با سرعت بالا می‌شود. بدلیل کم بودن فشار در خروجی شیر تخلیه و اینکه این فشار خروجی، بسیار کمتر از فشار بحرانی خروجی نازل همگرا-واگرا است، با بوجود آمدن گلویی در ابتدای انشعاب گرفته شده جهت تخلیه-ی گاز، سرعت گاز در قسمت گلویی به سرعت صوت می‌رسد. به عبارت دیگر عدد ماخ در ناحیه‌ی گلویی به یک رسیده و با توجه به رابطه ۵-۱، عدد ماخ در خروجی شیر تخلیه، بزرگتر از یک می‌شود. مافوق صوت شدن جریان خروجی، میزان گاز خارج شده را افزایش می‌دهد که با توجه به هدف فرایند

PURGING که تخلیه گاز با سرعت بالا است، مطلوب است، اما باید توجه داشت که بوجود آمدن لایه مرزی، سطح مقطع خروج گاز و در نتیجه میزان گاز خارج شده را کاهش می‌دهد.

در نتایج ارائه شده، تلاش شده است که تمام اطلاعات مورد نیاز برای تحقیق و بررسی در ارتباط با این فرایند ارائه گردد، با این وجود یکی از مهم ترین نتایج ارائه شده در این پژوهش، مربوط به روابط همبسته جهت تخمین میزان گاز خارج شده طی فرایند تخلیه می‌باشد. از آنجا که برای استخراج این روابط، تمام کمیت‌های مهم تاثیرگذار در این فرایند لحاظ شده‌اند، لذا نتایج حاصل از این روابط به خوبی با شرایط مختلف سازگار می‌باشد و می‌تواند تخمین مناسب و دقیقی جهت محاسبه‌ی میزان گاز خارج شده طی این فرایند ارائه کند. البته توجه به این نکته ضروری است که از آنجا که این روابط برای تخمین میزان گاز تخلیه شده از خطوط اصلی انتقال گاز می‌باشد، طبیعتاً استفاده از این روابط در فرایندهای مشابه دیگر در شرایط خاص احتمالی آنان، نیازمند بررسی و اعمال وسواس بیشتر خواهد بود که این موضوع درباره‌ی هر رابطه‌ی جامعی صادق است.

۶-۲- پیشنهادهایی برای پژوهش‌های آینده:

با توجه به مطالب ارائه شده در این پژوهش و نتایج حاصل از آن، یکی از موضوعات مرتبط در خصوص مطالعات آینده، جلوگیری از هدررفت و نحوه‌ی استفاده از گاز خارج شده طی فرایند تخلیه است. نحوه‌ی جمع‌آوری گاز خارج شده از خط لوله نیز یکی دیگر از موضوعات در این راستا می‌باشد. از طرف دیگر بررسی مسائل ایمنی در رابطه با این عملیات مانند طول مورد نیاز برای انشعاب و دور کردن محل تخلیه از خط لوله‌ی اصلی انتقال گاز و قدرت و نفوذ انفجار در صورت بروز حادثه می‌تواند مورد توجه قرار گیرد.

همچنین بررسی شکستگی کامل در خطوط لوله انتقال و توزیع گاز و ارائه روابطی جهت محاسبه گاز هدر رفته طی این فرایند، یکی دیگر از جنبه‌های موضوع کنونی جهت بررسی در مطالعات آینده بشمار می‌آید.

فهرست مراجع:

- [۱] شامحمدی ا., لنگری م. و نادری فر ع.، (۱۳۸۹)، "محاسبه شدت جریان گاز خروجی از نشتی در لوله های گاز"، در نخستین همایش بین المللی بازرسی و ایمنی در صنایع نفت و انرژی، تهران، ایران.
- [2] گاز_طبیعی/ <http://fa.wikipedia.org/wiki/> "سایت اینترنتی ویکی پدیا"
- [۳] موحدی م.ح، (۱۳۸۷)، "گاز طبیعی(مروری بر فرایند استخراج تا مصرف)", "یادداشت فنی دریافت شده از سایت <http://fieldbus.ir>
- [۴] نور علیپور نهاوندی ن. و فرزانه گرد م.، (۱۳۹۰)، "کاهش مصرف انرژی در ایستگاه تقلیل فشار گاز شهری (C.G.S) شاهرود با استفاده از شبیه سازی ایستگاه در نرم افزار هایسیس (Hysys)", "در سومین کنفرانس لوله و خطوط انتقال نفت و گاز , تهران، ایران.
- [5] 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.
- [6] "igs.nigc", [http:// igs.nigc.ir/INDEX.asp](http://igs.nigc.ir/INDEX.asp) "سایت اینترنتی"
- [7] "qudsonline", [http:// qudsonline.ir/news/460025/](http://qudsonline.ir/news/460025/) "سایت اینترنتی"
- [8] "shana", <http://www.shana.ir/fa/newsagency/210973> "سایت اینترنتی"
- [9] "baminco", <http://baminco.com> "سایت اینترنتی"
- [10] "iran-gol", <http://iran-gol.ir/> "رگلاتور"
- [11] 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,
- [12] Hydell M.(2011), "Unaccounted-for Gas," *Proceedings of the American School of Gas Measurement Technology*, pp. 148-153,.
- [13] Hartloper C., Botros K. K. and de Vries J., "Measurements of the Stack Metal Temperature During a Natural Gas Blowdown Event Through a Full-Bore Blowdown Valve," **Pressure Vessel Technology**, vol. 138, p. 3,.
- [14] White F.,(1998), "**Viscous Fluid Mechanics**", Fourth Edittion, McGraw-Hill, New York.
- [15] 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.
- [16] Levenspeil O.,(1984)" **Engineering Flow and Heat Exchange**", Plenum Press ,New York,NY.

- [17] Woodward J. 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.
- [18] Olorunmaiye 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.
- [19] 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.
- [20] Sahu G. K., (1998), "**Handbook of Piping Design**", vol.1, New Age International, delhi, p. 67.
- [21] "**PURGING PRINCIPLES AND PRACTICE**", (2001), American Gas Association, Washington.
- [22] Yuhua D., Huilin G., Jing'en Z., Yaorong F., (2002), "Evaluation of Gas Release Rate through Holes in Pipelines," *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, vol. 15, no. 6, pp. 423-428.
- [23] 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.
- [24] "**Engineering Data Book**", (2004), Twelfth Edition, Gas Processors Suppliers Association (GPSA), Oklahoma.
- [25] Garcia J., Rojas E. and Viedma A., (2006) "Numerical and experimental investigations on internal compressible flow at T-type junctions," *Thermal Fluid Sci*, vol. 1, pp. 61-74.
- [26] Luo J. L., Zheng M., Zhao X., 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.
- [27] Mahood H. B., Rasheed F. L. and Abbas A. K., (2011), "Analytical and Numerical Investigation of Transient Gas Blow down," *Modern Applied Science*, vol. 5, no. 5, pp. 64-72.
- [28] Kostowski W. and Skorek J., (2012), "Real gas flow simulation in damaged distribution pipelines," *Journal of Energy*, vol. 45, no. 1, pp. 481-488.
- [29] بهبهانی نژاد م., غریبی خراجی ا., چنگیزیان م., سعیدیان ح. و فروزنده ع., (۱۳۹۱) "گزارش ماهیانه فعالیت‌های انجام شده توسط دفتر پژوهش گاز استان خوزستان," دانشگاه شهید چمران, اهواز.
- [30] چاوشی ن., محمدی خانقشلاقی ف., (۱۳۹۲) "بررسی پتانسیل موجود برای استفاده از گاز طبیعی تخلیه شده هنگام تعمیرات خطوط توزیع و انتقال," اولین همایش ملی فناوری‌های نوین در شیمی و مهندسی شیمی, تهران.
- [31] Ebrahimi-Moghadam A., Farzane-Gord M. and Deymi-Dashtebayaz M., (۲۰۱۶) "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.

- [32] Versteeg H. K. and Malalasekera W.,(2007) " **An introduction to computational fluid dynamics; the finite volume method**", Pearson: Essex,.
- [33] Lu J., Xu S., Deng J., Wu W., Wu H. and Yang Z., (۲۰۱۶) "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.
- [۳۴] توحیدی ا. و غفاری قهرودی ه.، (۱۳۹۲)، " راهنمای جامع **ANSYS FLUENT** (مقدماتی)"، چاپ اول،موسسه فرهنگی هنری دیباگران تهران.
- [35] Launder B. E. and Spalding D. B.,(1974), "The Numerical Computation of Turbulent Flows," *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, vol. 3, pp. 269-289.
- [36] FLUENT 6.3 User's Guide(2003), February.
- [37] Murthy S. N. B.,(1975)," **Turbulent Mixing in Nonreactive and Reactive Flows**", Plenum Press, New York .

Abstract

The main purpose of this project is to compute the wasted gas, which released during the purging operation. The operation is carried out regularly in natural gas pressure reducing stations. A numerical simulation has been used to compute the amount of wasted gas which evacuated from purging valves.

The simulation has been carried out using using Fluent package software. Natural gas as working fluid is assumed compressible real gas. Fluid is treated turbulent and unsteady flow. To make the solution and results more similar to actual condition, the valve is continuously opened during the simulation. Initial condition, is assumed steady flow in pipeline.

Three dimensional modeling is used to simulate the valve and connected pipe, and effects of various condition including, inlet pressure, pipeline diameter and valve diameter variation are studied.

The numerical results show that due to high pressure difference between inside the pipeline and atmosphere, discharging gas is supersonic at outlet section of valve and the Mach number is greater than one. This is due to a convergent-divergent nozzle creation in discharging pipe.

Also results show that outlet mass rate has linear relation with pipeline pressure, second degree relation with valve diameter and has fourth-degree relation with valve to pipeline diameter ratio.

Two correlations have been developed for or calculating the amount of wasted gas in steady state and unsteady state condition. Unsteady state correlation is valid for valve opening time and steady state correlation could be used while the valve is completely opened.

Key words: natural gas, gas transfer pipelines, purging valves, numerical simulation



Shahrood University of Technology

Faculty of Mechanical and Mechatronics Engineering

M.Sc. Thesis in Energy Conversion Engineering

numerical simulation of the discharge process natural gas during purging

By: Mohammad Sadegh Pahlavan Zade

Supervisor(s):

Dr Mahmood Farzane Gord

June 2017

