

سید محمد



دانشکده مهندسی مکانیک و مکاترونیک

رساله دکتری مهندسی تبدیل انرژی

تحلیل شبکه های توزیع گاز طبیعی در

شرایط بحرانی

نگارنده : حمید رضا رهبری

استاد راهنما :

دکتر محمود فرزانه گرد

شهریورماه ۱۳۹۷

شماره: ۳۵/۹۷/۱۴۲۰
تاریخ: ۹۷/۸/۲۹
ویرایش:

باسمه تعالی



مدیریت تحصیلات تکمیلی

فرم شماره ۱۲: صورت جلسه نهایی دفاع از رساله دکتری (Ph.D)
(ویژه دانشجویان ورودی های ۹۴ و ما قبل)

بدینوسیله گواهی می شود آقای حمید رضا رهبری دانشجوی دکتری رشته مهندسی مکانیک به شماره دانشجویی ۹۱۲۵۴۲۵ ورودی مهر ماه سال ۱۳۹۱ در تاریخ ۱۳۹۷/۰۶/۲۱ از رساله نظری/ [X] عملی خود با عنوان: تحلیل شبکه های توزیع گاز طبیعی در شرایط بحرانی دفاع و با اخذ نمره ۱۵.۹۳ به درجه: ... حسنیه نائل گردید.

☐ الف) درجه عالی: نمره ۱۹-۲۰	☐ ب) درجه بسیار خوب: نمره ۱۸/۹۹ - ۱۷
☒ ج) درجه خوب: نمره ۱۶/۹۹ - ۱۵	☐ د) غیر قابل قبول و نیاز به دفاع مجدد دارد
☐ ه) رساله نیاز به اصلاحات دارد	

ردیف	هیئت داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبه علمی	امضاء
۱	دکتر محمود فرزانه گرد	استاد/ اساتید راهنما	استاد	
۲	دکتر محمد محسن شاه مردان	استاد مدعو داخلی	دانشیار	
۳	دکتر محسن نظری	استاد مدعو داخلی	دانشیار	
۴	دکتر محمد حسن سعیدی	استاد مدعو خارجی	استاد	
۵	دکتر فرشاد ورامینیان	استاد مدعو خارجی	استاد	
۶	دکتر علی خالقی	سرپرست (نماینده) تحصیلات تکمیلی دانشکده	استاد یار	

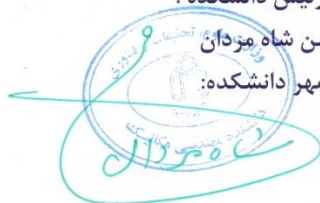
مدیر محترم تحصیلات تکمیلی دانشگاه:

ضمن تأیید مراتب فوق مقرر فرمائید اقدامات لازم در خصوص انجام مراحل دانش آموختگی آقای/خانم حمید رضا رهبری بعمل آید.

نام و نام خانوادگی رئیس دانشکده:

دکتر محمد محسن شاه مردان

تاریخ و امضاء و مهر دانشکده:



تقدیم به ...

پدر و مادر عزیزم

به پاس آنچه از وصف ایشان است در کلام من ننگذ

به پاس آنکه مویشان سپید شد تا روی من سپید شود

به پاس آنکه وجودشان مایه آرامش و دلگرمی من است

تشکر و سپاس

بدینوسیله بر خود لازم می دانم از زحمات بی دریغ و راهنمایی های دلسوزانه استاد ارجمند جناب آقای دکتر

محمود فرزانه گرد که در انجام مراحل مختلف این رساله همواره تحقیر را مورد لطف و راهنمایی قرار دادند، تشکر

و قدردانی نمایم.

این رساله از حمایت مالی شرکت گاز استان سمنان برخوردار بوده است که بدینوسیله محقق مراتب تشکر و

قدردانی خود را ابراز می دارد.

تعهد نامه

اینجانب حمید رضا رهبری دانشجوی دوره دکتری رشته مهندسی مکانیک گرایش مهندسی تبدیل انرژی دانشکده مهندسی مکانیک و مکاترونیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده رساله تحلیل شبکه های توزیع گاز طبیعی در شرایط بحرانی تحت راهنمایی جناب آقای دکتر محمود فرزانه گرد متعهد می شوم.

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج 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.

چکیده

گاز طبیعی برای رسیدن به دست مصرف کنندگان از شبکه های گازرسانی مختلفی عبور می کند. گاز طبیعی توسط خطوط اصلی که شبکه انتقال را تشکیل داده به دروازه شهر رسیده، سپس با استفاده از شبکه توزیع به مصرف کنندگان که شامل مصارف خانگی، صنعتی و مصرف کنندگان ویژه می باشند، منتقل می گردد. شبکه توزیع از اجزای گوناگونی شامل: مصارف، گره ها، خطوط لوله و ایستگاه های تقلیل فشار درون شهری، تشکیل شده است. شبکه توزیع در حالت پایا طراحی شده اما شرایط شبکه توزیع در حالت گذرا برای شرکت های توزیع کننده گاز طبیعی بسیار مهم بوده و این شرایط باید مورد توجه قرار گیرند. در حالت گذرا برای شبکه توزیع و در زمان های خاص، حالتی اتفاق می افتد که در این حالت مصارف گره های شبکه توزیع افزایش چشمگیری خواهند داشت. این حالت در شبکه های توزیع به شرایط بحرانی معروف می باشد. کاهش شدید دمای محیط و پارگی خطوط لوله شبکه از مهمترین عوامل افزایش مصرف در شبکه های توزیع و در نتیجه از مهمترین عوامل ایجاد شرایط بحرانی در این نوع شبکه ها می باشند.

هدف از این پژوهش، تحلیل شبکه های توزیع و تغذیه گاز طبیعی در شرایط بحرانی هیدرودینامیک و حرارتی می باشد. برای این منظور، ابتدا شبکه ها در حالت پایا مورد بررسی قرار گرفته و توزیع دما، فشار و دبی در کلیه گره ها و خطوط لوله شبکه، محاسبه می گردد. سپس روشی برای مدلسازی شبکه ها در حالت گذرا ارائه شده است. روش ارائه شده برای مدلسازی با استفاده از دو شبکه حلقوی و شاخه ای مهم، معتبرسازی شده که نتایج معتبرسازی نشان می دهد دقت روش پیشنهادی در این پژوهش در مقایسه با

مطالعات گذشته برای شبکه حلقوی ۰/۶۵٪ و برای شبکه شاخه ای ۰/۳۷٪ بوده است. همچنین، دو شبکه توزیع و تغذیه گاز طبیعی در حالت گذرا مورد مطالعه قرار گرفته است. برای شرایط مرزی شبکه ها از اطلاعات مطالعه موردی (شهر سمنان) استفاده شده و مصرف گاز طبیعی با استفاده از مدل های شبکه عصبی مصنوعی، پیش بینی گردیده است. نتایج پیش بینی مصرف گاز طبیعی با استفاده از شبکه عصبی طراحی شده در مقایسه با داده های اندازه گیری شده خطایی کمتر از ۱٪ را گزارش کرده است. در نهایت پاسخ شبکه به شرایط بحرانی افزایش مصرف ناگهانی شامل کاهش دما و پارگی خطوط لوله، محاسبه گردیده و مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان می دهد، با کاهش ناگهانی دمای محیط تا ۳- درجه سانتیگراد، میزان مصرف در گره ها ۴ برابر شده و فشار در گره ها نسبت به حالت پایا بین ۲۰ تا ۲۵٪ افت می کند. در نتیجه سرعت در خطوط لوله شبکه های توزیع و تغذیه به بالاتر از حد استاندارد یعنی ۱۸ متر بر ثانیه می رسد.

افزایش سرعت گاز طبیعی در خطوط لوله شبکه باعث فرسایش خطوط لوله و کاهش ایمنی در فرآیند گازرسانی به مشترکین می گردد. همچنین افت فشار ناگهانی در بعضی موارد باعث مختل شدن فرآیند فشارشکنی در رگولاتورهای گاز طبیعی شده و باعث قطعی گاز می گردد. با استفاده از نتایج حاصل از این پژوهش، راهکارهایی برای شبکه های توزیع در شرایط بحرانی ارائه گردیده تا شرکت های گاز برای گازرسانی از این راهکارها استفاده نمایند.

کلمات کلیدی: گاز طبیعی، شبکه خطوط لوله، شبکه توزیع و تغذیه، مصرف گاز طبیعی، شبکه عصبی،

شرایط بحرانی

فهرست مطالب

فهرست اشکال.....	س
فهرست جداول.....	ش
فهرست علائم و نشانه ها.....	ث
۱- فصل اول : مقدمه	۱
۱-۱ کلیات	۲
۲-۱ انتقال و توزیع گاز طبیعی	۲
۱-۲-۱ شبکه های انتقال گاز طبیعی	۵
۳-۱ ضرورت انجام تحقیق	۱۰
۴-۱ مطالب مطالعه شده در این پژوهش	۱۱
۲- فصل دوم: اصول طراحی شبکه های توزیع و تغذیه گاز طبیعی در حالت پایا	۱۳
۱-۲ مقدمه	۱۴
۲-۲ توزیع گاز طبیعی	۱۴
۳-۲ مصرف کنندگان گاز در شبکه های توزیع	۱۷
۴-۲ طراحی شبکه های توزیع و تغذیه گاز طبیعی [۳]	۱۷

۱۸.....	پارامترهای مهم در شبکه های توزیع و تغذیه	۱-۴-۲
۲۱.....	انواع شبکه های توزیع و تغذیه گاز طبیعی	۲-۴-۲
۲۵.....	تعیین مسیر و طراحی خطوط لوله شبکه تغذیه گاز طبیعی	۳-۴-۲
۲۷.....	تعیین مسیر خطوط لوله شبکه توزیع	۴-۴-۲
۲۸.....	نقشه های گره های شبکه گازرسانی	۵-۴-۲
۳۰.....	محاسبات مربوط به شبکه تغذیه گاز طبیعی	۶-۴-۲
۳۲.....	تعیین قطر لوله شبکه تغذیه گاز طبیعی	۷-۴-۲
۳۲.....	تعیین قطر لوله ها در شبکه توزیع گاز طبیعی	۸-۴-۲
۳۵.....	فصل سوم : مروری بر مطالعات گذشته	۳-
۳۶.....	مقدمه	۱-۳
۳۶.....	جریان گاز طبیعی درون خطوط لوله	۲-۳
۳۶.....	جریان داخل لوله در حالت پایا	۱-۲-۳
۳۹.....	جریان داخل لوله در حالت گذرا	۲-۲-۳
۴۵.....	جریان گاز طبیعی در شبکه های انتقال و توزیع	۳-۳
۴۵.....	شبکه های گاز طبیعی در حالت پایا	۱-۳-۳
۴۷.....	شبکه های گاز طبیعی در حالت گذرا	۲-۳-۳
۴۹.....	مطالعات مربوط به پیش بینی مصرف گاز طبیعی	۴-۳

۵-۳	نتیجه گیری	۵۰
۴-	فصل چهارم : مدلسازی شبکه های توزیع و تغذیه گاز طبیعی	۵۳
۱-۴	مقدمه	۵۴
۲-۴	مدلسازی جریان گاز طبیعی درون خطوط لوله	۵۴
۱-۲-۴	معادله پیوستگی	۵۴
۲-۲-۴	معادله مومنتوم	۵۵
۳-۲-۴	معادله انرژی	۵۷
۴-۲-۴	بازنویسی معادلات حاکم بر حسب پارامترهای وابسته	۵۸
۵-۲-۴	روابط مربوط به ضریب اصطکاک	۶۰
۶-۲-۴	مدل سازی انتقال حرارت	۶۴
۷-۲-۴	تاثیرات گاز واقعی	۷۰
۸-۲-۴	روش حل معادلات حاکم	۷۴
۹-۲-۴	گسسته سازی معادلات حاکم	۷۵
۱۰-۲-۴	بررسی پایداری روش حل عددی معادلات حاکم	۷۹
۳-۴	مدلسازی شبکه های توزیع و تغذیه گاز طبیعی در حالت پایا	۸۳
۱-۳-۴	فرمول های طراحی شبکه (روش هاردی -کراس)	۸۴
۴-۴	مدلسازی شبکه توزیع و تغذیه گاز طبیعی در حالت گذرا	۸۵

۱-۴-۴	مدلسازی بر مبنای اصول کلی در شبکه های گاز طبیعی.....	۸۶
۲-۴-۴	مدلسازی بر مبنای انباشتگی جریان گاز طبیعی.....	۸۷
۵-۴	پیش بینی مصرف گاز طبیعی در شبکه توزیع و تغذیه.....	۹۱
۱-۵-۴	شبکه های عصبی مصنوعی.....	۹۲
۵-	فصل پنجم: نتایج.....	۹۹
۱-۵	مقدمه.....	۱۰۰
۲-۵	جریان گذاری گاز طبیعی درون خطوط لوله.....	۱۰۰
۱-۲-۵	جریان همدما با صرف نظر از ترم اینرسی.....	۱۰۰
۲-۲-۵	جریان همدما با در نظر گرفتن ترم اینرسی.....	۱۰۲
۳-۲-۵	جریان غیرهمدمای گاز طبیعی.....	۱۰۶
۴-۲-۵	مقایسه جریان گذرای گاز طبیعی در حالت همدما و غیرهمدما.....	۱۰۹
۳-۵	جریان گذرا در شبکه های گاز طبیعی.....	۱۱۱
۱-۳-۵	معتبرسازی یک شبکه حلقوی گاز طبیعی.....	۱۱۲
۲-۳-۵	معتبرسازی یک شبکه شاخه ای گاز طبیعی.....	۱۲۰
۳-۳-۵	بررسی شبکه تغذیه گاز طبیعی در حالت گذرا و شرایط بحرانی.....	۱۳۱
۱-۳-۵	بررسی شبکه توزیع گاز طبیعی در حالت گذرا و شرایط بحرانی.....	۱۵۲
۶-	فصل ششم: جمع بندی و ارائه پیشنهادات.....	۱۷۳

۱-۶	جمع بندی	۱۷۴
۲-۶	پیشنهادهات	۱۷۶
۷-	منابع	۱۷۹
۸-	پیوست الف) معادلات حاکم برای جریان درون خطوط لوله	۱۹۰
۱-۸	معادله پیوستگی	۱۹۱
۲-۸	معادله مومنتوم	۱۹۲
۳-۸	معادله انرژی	۱۹۳
۴-۸	استفاده از معادله حالت برای بازنویسی معادلات حاکم	۱۹۶
۵-۸	تعریف سرعت موج در معادلات حاکم	۱۹۹
۶-۸	بازنویسی معادلات حاکم	۲۰۲
۹-	پیوست ب) معادله حالت AGA8	۲۰۵
۱-۹	مقدمه	۲۰۵
۲-۹	شرح و بسط روش AGA8	۲۰۶
۳-۹	عدم قطعیت	۲۰۸
۱-۳-۹	عدم قطعیت روش D.C.M	۲۰۸
۲-۳-۹	عدم قطعیت روش G.C.M	۲۰۹
۴-۹	محاسبه ضریب تراکم پذیری با استفاده از D.C.M	۲۰۹

۱-۴-۹	روابط ریاضی و معادلات مربوط به روش D.C.M.....	۲۱۰
۲-۴-۹	روش حل معادلات مربوط به روش D.C.M.....	۲۱۳
۵-۹	محاسبه خواص ترمودینامیکی.....	۲۱۴
۱-۵-۹	محاسبه چگالی.....	۲۱۴
۲-۵-۹	محاسبه ظرفیت گرمایی در حجم ثابت.....	۲۱۵
۳-۵-۹	محاسبه ظرفیت گرمایی در فشار ثابت.....	۲۱۷
۴-۵-۹	محاسبه آنتالپی.....	۲۱۸

فهرست اشکال

- شکل ۱-۱ سیستم انتقال گاز طبیعی [۱] ۳
- شکل ۲-۱ دیاگرام استخراج، تصفیه، انتقال و توزیع گاز طبیعی [۲] ۴
- شکل ۳-۱ فشار کاری گاز طبیعی در سیستم انتقال و توزیع [۲] ۵
- شکل ۱-۲ سیستم توزیع گاز طبیعی [۳] ۱۶
- شکل ۲-۲ نمایی از یک شبکه شاخه ای ۲۲
- شکل ۳-۲ نمایی از یک شبکه حلقوی ۲۳
- شکل ۴-۲ یک نمونه از شبکه مختلط ۲۳
- شکل ۵-۲ بخشی از شبکه توزیع شهرستان سمنان ۲۴
- شکل ۶-۲ نمایی از تقسیم بار در گره حلقه ها ۲۹
- شکل ۷-۲ نقشه گره های حلقه کمربندی ۳۱
- شکل ۸-۲ نقشه گره های حلقه کمربندی با مصارف صنعتی ۳۱
- شکل ۱-۴ حجم کنترل برای معادله پیوستگی [۷۵] ۵۵
- شکل ۲-۴ حجم کنترل برای معادله مومنتوم [۷۵] ۵۶
- شکل ۳-۴ حجم کنترل برای معادله انرژی [۷۵] ۵۷
- شکل ۴-۴ شماتیکی از خط لوله مدفون در عمق H از سطح زمین ۶۸
- شکل ۵-۴ شبکه مکان-زمان برای روش تفاضل محدود ۷۵
- شکل ۶-۴ فرآیند مدلسازی شبکه های گاز طبیعی در حالت گذرا بر مبنای اصول کلی ۸۷
- شکل ۷-۴ حجم کنترل برای گره ها در یک شبکه نمونه ۸۸
- شکل ۸-۴ دیاگرام مدلسازی شبکه های توزیع و تغذیه گاز طبیعی در حالت گذرا بر مبنای انباشتگی ۹۱

- شکل ۹-۴ ساختار یک شبکه عصبی ۹۴
- شکل ۱۰-۴ ساختار شبکه های عصبی چند لایه [۹۸] ۹۶
- شکل ۱۱-۴ شبکه عصبی چند لایه مورد استفاده در این پژوهش ۹۷
- شکل ۱-۵ شرایط مسئله Kiuchi [۲۵] ۱۰۱
- شکل ۲-۵ تغییرات دبی در ورودی لوله برای شرایط مسئله Kiuchi [۲۵] ۱۰۲
- شکل ۳-۵ تغییرات دبی در ورودی لوله برای جریان همدم با در نظر گرفتن اینرسی برای $\Delta t = 1\text{min}$ ۱۰۳
- شکل ۴-۵ تغییرات فشار برای جریان همدم با در نظر گرفتن اینرسی برای $\Delta t = 1\text{min}$ ۱۰۴
- شکل ۵-۵ تغییرات دبی در ورودی لوله برای جریان همدم با در نظر گرفتن اینرسی برای $\Delta t = 0.1\text{min}$ ۱۰۴
- شکل ۶-۵ تغییرات فشار برای جریان همدم با در نظر گرفتن اینرسی برای $\Delta t = 0.1\text{min}$ ۱۰۵
- شکل ۷-۵ تغییرات دبی در ورودی لوله برای جریان همدم با در نظر گرفتن اینرسی برای $\Delta t = 0.01\text{min}$ ۱۰۵
- شکل ۸-۵ تغییرات فشار برای جریان همدم با در نظر گرفتن اینرسی برای $\Delta t = 0.01\text{min}$ ۱۰۶
- شکل ۹-۵ تغییرات دبی برای جریان غیرهمدم ۱۰۸
- شکل ۱۰-۵ تغییرات فشار برای جریان غیرهمدم ۱۰۸
- شکل ۱۱-۵ تغییرات دما برای جریان غیرهمدم ۱۰۹
- شکل ۱۲-۵ مقایسه منحنی تغییرات دبی در ابتدای لوله برای دو حالت جریان همدم و جریان غیر همدم ۱۱۰
- شکل ۱۳-۵ مقایسه منحنی تغییرات فشار در انتهای لوله برای دو حالت جریان همدم و جریان غیر همدم ۱۱۱
- شکل ۱۴-۵ شبکه خطوط لوله حلقوی گاز طبیعی ۱۱۲
- شکل ۱۵-۵ مصارف در گره های ۲ و ۳ بر حسب زمان ۱۱۳

- شکل ۵-۱۶ فشار در گره ۲ بر حسب زمان، مطالعه حاضر و مطالعات گذشته..... ۱۱۴
- شکل ۵-۱۷ فشار در گره ۳ بر حسب زمان، مطالعه حاضر و مطالعات گذشته..... ۱۱۵
- شکل ۵-۱۸ فشار در گره ۲ بر حسب زمان و برای ضرایب اصطکاک متفاوت..... ۱۱۶
- شکل ۵-۱۹ فشار در گره ۳ بر حسب زمان و برای ضرایب اصطکاک متفاوت..... ۱۱۷
- شکل ۵-۲۰ فشار در گره ۲ بر حسب زمان و برای گازهای طبیعی مختلف..... ۱۱۹
- شکل ۵-۲۱ فشار در گره ۳ بر حسب زمان و برای گازهای طبیعی مختلف..... ۱۲۰
- شکل ۵-۲۲ شبکه خطوط لوله شاخه ای گاز طبیعی مورد مطالعه..... ۱۲۲
- شکل ۵-۲۳ دبی گره ها بر حسب زمان مورد مطالعه..... ۱۲۴
- شکل ۵-۲۴ فشار در نقاط مختلف شبکه در حالت پایا..... ۱۲۵
- شکل ۵-۲۵ فشار در گره های ۱ تا ۱۰ توسط این مطالعه و مطالعه کیوچی [۲۵]..... ۱۲۶
- شکل ۵-۲۶ درصد خطا در محاسبه فشار گره ها نسبت به مطالعه کیوچی [۲۵]..... ۱۲۶
- شکل ۵-۲۷ فشار در گره های مختلف شبکه در بازه های نیم ساعته از حالت پایا تا ۳/۵ ساعت..... ۱۲۷
- شکل ۵-۲۸ فشار در گره مبنا بر حسب زمان در حالت بحرانی..... ۱۲۸
- شکل ۵-۲۹ فشار در گره مبنا بر حسب زمان برای ضرایب اصطکاک مختلف و در حالت بحرانی..... ۱۲۹
- شکل ۵-۳۰ فشار در گره مبنا بر حسب زمان برای گازهای طبیعی مناطق مختلف در حالت بحرانی..... ۱۳۱
- شکل ۵-۳۱ شماتیک شبکه تغذیه مورد مطالعه..... ۱۳۲
- شکل ۵-۳۲ متوسط دمای محیط برای ماه های مختلف..... ۱۳۴
- شکل ۵-۳۳ مصرف گاز طبیعی برای ماه های مختلف..... ۱۳۵
- شکل ۵-۳۴ الگوی مصرف گاز طبیعی بر حسب دمای محیط..... ۱۳۶
- شکل ۵-۳۵ مصرف گاز طبیعی بر حسب در ماه های مختلف یک سال..... ۱۳۷

- شکل ۳۶-۵ حجم های کنترل در شبکه تغذیه مورد مطالعه..... ۱۳۸
- شکل ۳۷-۵ مصرف گاز طبیعی در گره ها بر حسب ساعت و در چهار روز مختلف ۱۴۰
- شکل ۳۸-۵ تغییرات ساعتی فشار گره ۲۰۲ شبکه تغذیه برای چهار روز مختلف..... ۱۴۱
- شکل ۳۹-۵ تغییرات ساعتی فشار کلیه گره های شبکه تغذیه در روز سوم در سال ۲۰۱۳..... ۱۴۱
- شکل ۴۰-۵ ماکزیمم مصرف بر حسب ساعت و برای روزهای مختلف در شبکه تغذیه ۱۴۲
- شکل ۴۱-۵ محاسبه سرعت گاز طبیعی بر حسب زمان در شبکه توزیع برای روزهای مختلف ۱۴۳
- شکل ۴۲-۵ تغییرات فشار گره ۲۰۲ بر حسب زمان برای گازهای طبیعی مناطق مختلف ۱۴۴
- شکل ۴۳-۵ تغییرات دبی خط لوله اصلی بر حسب زمان برای گازهای طبیعی مناطق مختلف ۱۴۴
- شکل ۴۴-۵ تغییرات فشار در گره های شبکه بر حسب قطر خط لوله اصلی شبکه تغذیه مورد مطالعه..... ۱۴۵
- شکل ۴۵-۵ تغییرات دبی بر حسب قطر در خط لوله اصلی شبکه تغذیه مورد مطالعه ۱۴۶
- شکل ۴۶-۵ فشار در گره ۱۰۲ بر حسب زمان و دبی های مختلف ۱۴۷
- شکل ۴۷-۵ فشار در گره ۲۰۲ بر حسب زمان و دبی های مختلف ۱۴۸
- شکل ۴۸-۵ فشار در گره ۳۰۲ بر حسب زمان و دبی های مختلف ۱۴۸
- شکل ۴۹-۵ فشار در گره ۴۰۲ بر حسب زمان و دبی های مختلف ۱۴۹
- شکل ۵۰-۵ فشار در گره ۱۰۲ بر حسب زمان و دبی های مختلف ۱۵۰
- شکل ۵۱-۵ فشار در گره ۲۰۲ بر حسب زمان و دبی های مختلف ۱۵۰
- شکل ۵۲-۵ فشار در گره ۳۰۲ بر حسب زمان و دبی های مختلف ۱۵۱
- شکل ۵۳-۵ فشار در گره ۴۰۲ بر حسب زمان و دبی های مختلف ۱۵۱
- شکل ۵۴-۵ بخشی از شبکه توزیع گاز طبیعی مورد مطالعه ۱۵۳
- شکل ۵۵-۵ تغییرات دمای محیط بر حسب زمان برای سردترین روز سال (مطالعه موردی شهر سمنان) ۱۵۴

- شکل ۵-۵۶ تغییرات فشار برای گره های انتخابی در شبکه توزیع مورد مطالعه ۱۵۴
- شکل ۵-۵۷ تغییرات فشار برای گره ۱۲۰ در حالت گذرا و پایا در شبکه توزیع ۱۵۵
- شکل ۵-۵۸ تاثیر دمای محیط بر مصرف گره شماره ۱۲۰ در شبکه توزیع مورد مطالعه ۱۵۷
- شکل ۵-۵۹ تاثیر دمای محیط بر فشار گره شماره ۱۲۰ در شبکه توزیع مورد مطالعه ۱۵۸
- شکل ۵-۶۰ خط لوله بین گره های ۱۱۸ و ۱۲۰ برای محاسبه سرعت در شبکه توزیع مورد مطالعه ۱۵۹
- شکل ۵-۶۱ تاثیر دمای محیط بر سرعت گاز طبیعی درون خطوط لوله در شبکه توزیع مورد مطالعه ۱۵۹
- شکل ۵-۶۲ تاثیر فشار بر حسب زمان در حالت افزایش ناگهانی مصرف بر اثر پارگی خطوط لوله ۱۶۰
- شکل ۵-۶۳ سرعت گاز طبیعی در حالت افزایش ناگهانی مصرف بر اثر پارگی خطوط لوله ۱۶۲
- شکل ۵-۶۴ بررسی شبکه توزیع مورد مطالعه در حالت افزایش مصرف ناگهانی و قطع گاز یک یا چند شاخه ۱۶۳
- شکل ۵-۶۵ تاثیر قطع گاز یک یا چند شاخه بر روی فشار گره های شبکه توزیع (مصرف گره ها دو برابر حالت پایا) ۱۶۴
- شکل ۵-۶۶ تاثیر قطع گاز یک یا چند شاخه بر روی فشار گره ۱۲۰ و سرعت خط لوله (مصرف گره ها دو برابر حالت پایا) ۱۶۵
- شکل ۵-۶۷ تاثیر قطع گاز یک یا چند شاخه بر روی فشار گره های شبکه توزیع (مصرف گره ها سه برابر حالت پایا) ۱۶۶
- شکل ۵-۶۸ تاثیر قطع گاز یک یا چند شاخه بر روی فشار گره ۱۲۰ و سرعت خط لوله (مصرف گره ها سه برابر حالت پایا) ۱۶۷
- شکل ۵-۶۹ تاثیر قطع گاز یک یا چند شاخه بر روی فشار گره های شبکه توزیع (مصرف گره ها چهار برابر حالت پایا) ۱۶۸

- شکل ۵-۷۰ تاثیر قطع گاز یک یا چند شاخه بر روی فشار گره ۱۲۰ و سرعت خط لوله (مصرف گره ها
چهار برابر حالت پایا)..... ۱۶۹
- شکل ۵-۷۱ تاثیر قطع گاز یک یا چند شاخه بر روی فشار گره های شبکه توزیع (مصرف گره ها پنج برابر
حالت پایا)..... ۱۷۰
- شکل ۵-۷۲ تاثیر قطع گاز یک یا چند شاخه بر روی فشار گره ۱۲۰ و سرعت خط لوله (مصرف گره ها
پنج برابر حالت پایا)..... ۱۷۱
- شکل ۸-۱ حجم کنترل برای معادله پیوستگی [۷۵]..... ۱۹۱
- شکل ۸-۲ حجم کنترل برای معادله مومنتوم [۷۵]..... ۱۹۲
- شکل ۸-۳ حجم کنترل برای معادله انرژی [۷۵]..... ۱۹۴
- شکل ۹-۱ محدوده خطا برای محاسبه ضریب تراکم پذیری با استفاده از روش AGA8 [۷۷]..... ۲۰۹

فهرست جداول

- جدول ۱-۱ ایستگاههای تقویت فشار خطوط لوله ایران [۲] ۶
- جدول ۲-۱ مشخصات خطوط لوله خطوط سراسری پنجم تا دهم کشور [۲] ۹
- جدول ۱-۳ خلاصه ای از مطالعات گذشته، نقاط ضعف و اقدامات صورت گرفته در این پژوهش ۵۱
- جدول ۱-۴ ضرایب معادله (۲۱-۴) برای محاسبه ضریب اصطکاک در لوله های صاف ۶۲
- جدول ۲-۴ روابط ضریب اصطکاک برای لوله های زبر ۶۲
- جدول ۳-۴ روابط ضریب اصطکاک استفاده شده در صنایع گاز طبیعی [۸۶] ۶۳
- جدول ۴-۴ رابطه عدد ناسلت برای گاز درون لوله ۶۵
- جدول ۵-۴ ضریب انتقال حرارت بر حسب جنس لوله [۷۵] ۶۶
- جدول ۶-۴ ضریب هدایت حرارتی انواع خاک [۹۲] ۶۷
- جدول ۷-۴ محدوده مجاز مورد استفاده برای معادله حالت AGA8 ۷۰
- جدول ۱-۵ تغییرات دبی خروجی بر حسب زمان و برای دمای ورودی مختلف ۱۰۷
- جدول ۲-۵ مشخصات لوله ها در شبکه مورد بررسی ۱۱۳
- جدول ۳-۵ درصد خطای محاسبات فشار گره ها در مقایسه با مطالعات گذشته ۱۱۵
- جدول ۴-۵ درصد مولی اجزای تشکیل دهنده گاز طبیعی در مناطق مختلف گازی ایران [۲] ۱۱۸
- جدول ۵-۵ مشخصات شبکه خطوط لوله شاخه ای گاز طبیعی مورد مطالعه ۱۲۱
- جدول ۶-۵ مشخصات لوله های شبکه مورد مطالعه ۱۳۲
- جدول ۷-۵ مقدار مصرف گره ها در حالت پایا برای شبکه مورد مطالعه ۱۳۳
- جدول ۸-۵ تغییرات ساعتی دمای محیط برای چهار روز سرد سال ۱۳۹
- جدول ۱-۹ محدوده مجاز مورد استفاده برای روش AGA8 ۲۰۶

فهرست علائم و نشانه ها

ضریب تراکم پذیری	Z	مساحت (m^2)	A
ضریب انتقال حرارت ($w/m^2.K$)	U	بردار بایاس	b
سرعت (m/s)	v	عدد بایوت	Bi
حجم (m^3)	V	قطر داخلی لوله (mm)	D
ماتریس وزنی	W	ضریب اصطکاک مودی	f
حروف یونانی		ضریب انتقال حرارت جابه جایی ($w/m^2.K$)	h
چگالی (kg/m^3)	ρ	فاصله مرکز لوله تا سطح زمین (m)	H
زبری نسبی	ε	ضریب هدایت حرارتی ($w/m.K$)	k
پارامتر پانل		طول لوله (km)	L
ضخامت لوله (mm)		دبی جرمی (kg/s)	$\dot{m}$
پارامترهای معادله حالت AGA8		وزن مولکولی ($kg/kmol$)	Mw
ضریب دوم ویریا	B	تعداد تقسیمات مکانی	N
ظرفیت حرارتی در فشار ثابت ($kJ/kmol.K$)		تعداد تقسیمات زمانی	n
ظرفیت حرارتی در حجم ثابت ($kJ/kmol.K$)		عدد ناسلت	Nu
آنتالپی ($kJ/kmol$)		فشار (kPa or MPa)	P
پارامتر اندازه		دبی حجمی (m^3/s)	Q_h

انتقال حرارت (w)	Q	پارامتر برهمکنش اجزاء
ثابت جهانی گازها (kJ/kmol.K)	R	کسر مولی اجزاء
عدد رینولدز	Re	چگالی مولار (kmol/m^3)
پارامتر رگرسیون	R^2	چگالی کاهیده (kmol/m^3)
درجه حرارت ($^{\circ}\text{C}$ or K)	T	
زمان (s)	t	

فهرست اختصارات

City Gate Station	TBS
Town Border Station	CGS

۱- فصل اول : مقدمه

۱-۱ کلیات

در این فصل، توضیحات کلی در مورد شبکه های گازرسانی گاز طبیعی ارائه شده است. بدین منظور، ابتدا فرآیندهای انتقال و توزیع گاز طبیعی توضیح داده شده و کلیاتی در مورد شبکه های انتقال گاز طبیعی بیان شده است. سپس به ضرورت انجام تحقیق اشاره شده و در انتها، مطالب ارائه شده در فصول مختلف این پژوهش به صورت خلاصه بیان گردیده است.

۱-۲ انتقال و توزیع گاز طبیعی

گاز طبیعی پس از استخراج از چاه های تولید^۱ توسط شبکه جمع آوری به واحد تصفیه گاز^۲ هدایت می شود. طبیعی است که در صورت نیاز به افزایش فشار در مسیر خود از کمپرسورهای گاز که سبب افزایش فشار گاز می گردد بهره مند خواهد شد. بعد از عملیات تصفیه، گاز شیرین^۳ به داخل شبکه های گاز تزریق می گردد. برای رساندن گاز طبیعی به دست مشترکین، از شبکه های گاز طبیعی استفاده می شود. شبکه های گاز طبیعی شامل شبکه های انتقال و توزیع می باشند. در شبکه های انتقال فشار گاز طبیعی بالا^۴ بوده و این نوع شبکه ها معروف به شبکه های فشار بالا می باشند. با توجه به طولانی بودن مسیر و وجود پستی و بلندی ها در مسیر، در فواصل مشخص ایستگاه های تقویت فشار برای بالا بردن فشار گاز تعبیه می گردد. شبکه های انتقال، گاز طبیعی را تا ورودی شهر منتقل کرده و با توجه به اینکه مشترکین جزء به فشار کاری کمتری برای کارکرد نیاز دارند، باید فشار گاز طبیعی توسط ایستگاه های مخصوصی کاهش یابد. ابتدا فشار گاز طبیعی در ایستگاه ورودی گاز شهری^۵ کاهش یافته و گاز توسط شبکه های تغذیه و توزیع در داخل شهر پخش می گردد. با توجه به میزان فشار کاری وسایل گازسوز و میزان گاز

^۱ Producing Wells

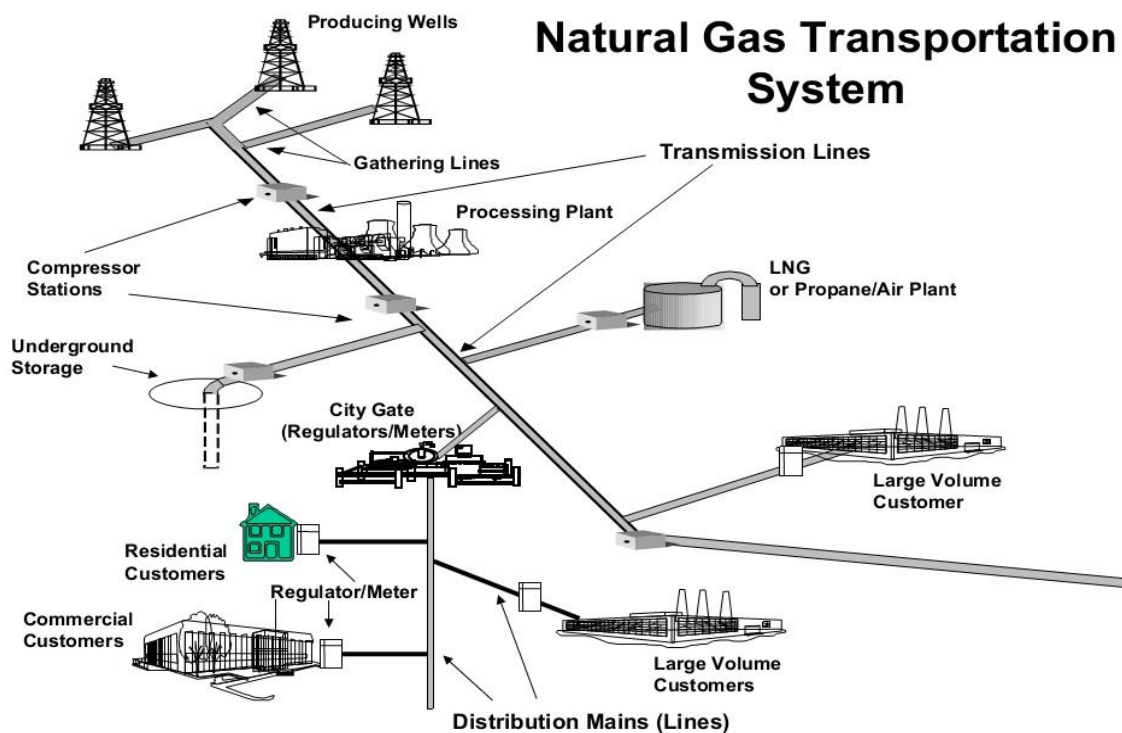
^۲ Processing Plant

^۳ Sweet Gas

^۴ 1000 psig

^۵ City Gate Station (CGS)

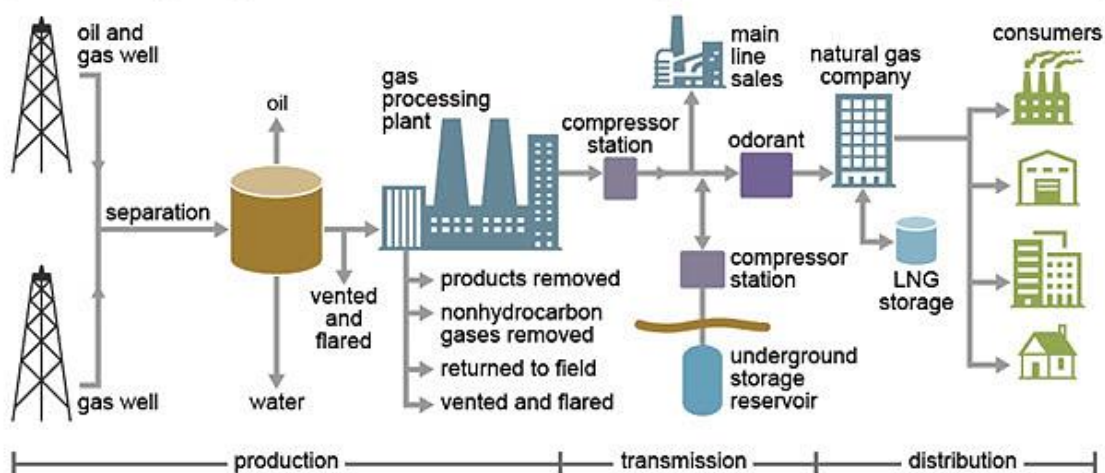
عبوری از مصرف کنندگان، فشار گاز طبیعی در ایستگاه داخل شهر^۱ کاهش پیدا می کند. شکل ۱-۱ سیستم انتقال گاز طبیعی را نشان می دهد. شکل ۲-۱ دیاگرام استخراج، تصفیه، انتقال و توزیع گاز طبیعی را نشان می دهد. در این شکل، شبکه های انتقال و توزیع گاز طبیعی به عنوان فرآیندهای اصلی در رساندن گاز به مشترکین جزء، معرفی شده اند.



شکل ۱-۱ سیستم انتقال گاز طبیعی [۱]

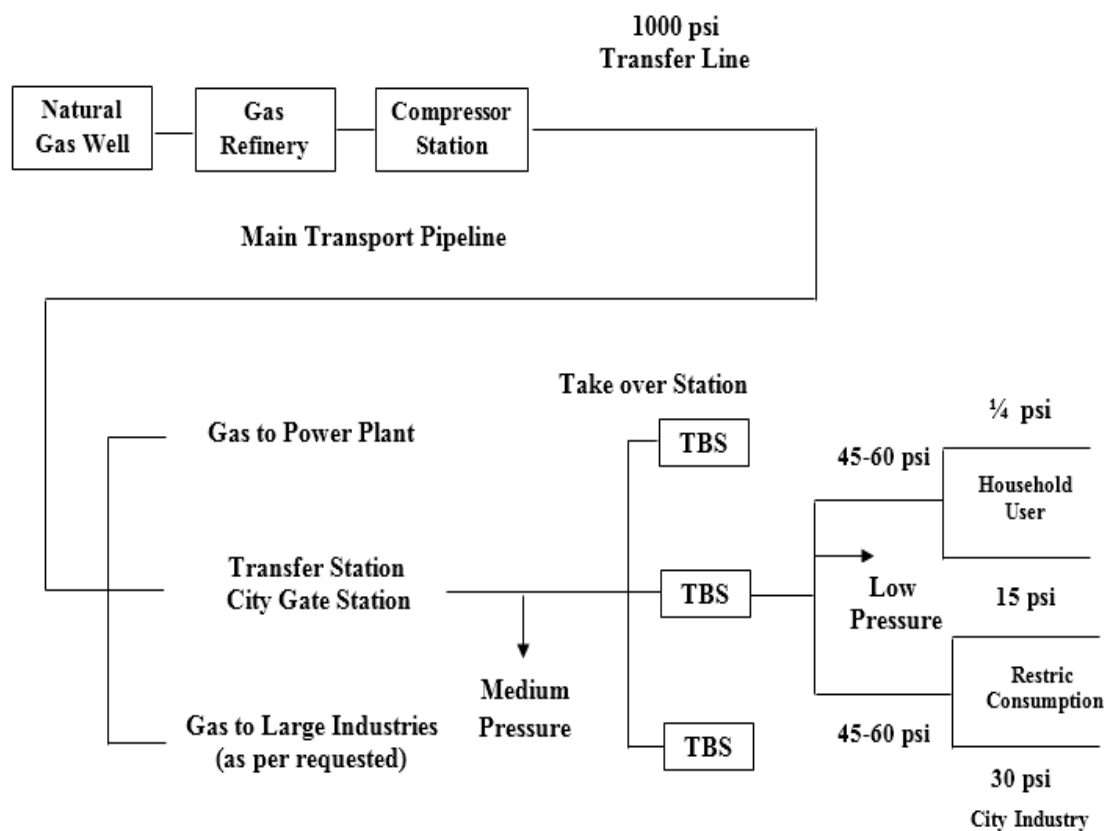
¹ Town Border Station (TBS)

Natural gas production and delivery



شکل ۲-۱ دیاگرام استخراج، تصفیه، انتقال و توزیع گاز طبیعی [۲]

شکل ۳-۱ فشار کاری در سیستم انتقال و توزیع گاز طبیعی را نشان می دهد. با توجه به شکل ۳-۱، در شبکه توزیع گاز طبیعی و بعد از ایستگاه های داخل شهر، مشترکین با فشار کاری متفاوت وجود دارند. وظیفه تنظیم فشار کاری این مشترکین بر عهده رگولاتورهای گاز طبیعی بوده که بسته به نوع مشترک، فشار کاری مورد نظر را تأمین می کنند. ذکر این نکته ضروری است که کلیه فشارهای استفاده شده در شکل ۳-۱، در حالت نسبی می باشند.



شکل ۱-۳ فشار کاری گاز طبیعی در سیستم انتقال و توزیع [۲]

۱-۲-۱ شبکه های انتقال گاز طبیعی

گاز طبیعی پس از پالایش و تصفیه از طریق شبکه خطوط لوله انتقال به محل مصرف هدایت می شود. شبکه های انتقال گاز طبیعی، شبکه های فشار بالا بوده و فشار گاز طبیعی در این شبکه ها تا ۱۳۰۰ پوند بر اینچ مربع نیز می رسد. شبکه های خطوط انتقال گاز طبیعی در طی مسیر خود از مناطق کوهستانی که دارای پستی و بلندیهای زیادی هستند، عبور می کند. عبور از این مناطق نیازمند غلبه بر عواملی همچون افزایش ارتفاع، اصطکاک گاز درون لوله و اتصالات آن، می باشد. علاوه بر این، انشعابات و مصارفی که در طول مسیر از خطوط لوله سراسری گرفته می شوند باعث افت فشار گاز طبیعی در خطوط

لوله شبکه های انتقال می گردد. به همین منظور، باید افت فشار گاز طبیعی در خطوط لوله شبکه های انتقال جبران گردد. این وظیفه بر عهده ایستگاه های تقویت فشار گاز طبیعی می باشد. این ایستگاه ها همچنانکه از نامشان پیداست، افت فشارها را در طول مسیر جبران خواهند نمود. محل احداث ایستگاه های تقویت فشار براساس پارامترهای مختلفی تعیین می گردد. در عمل، بطور متوسط در هر ۱۰۰ کیلومتر خط لوله، یک ایستگاه روی خطوط لوله ساخته می شود. جدول ۱-۱ ایستگاههای تقویت فشار خطوط لوله ایران را نشان می دهد.

جدول ۱-۱ ایستگاههای تقویت فشار خطوط لوله ایران [۲]

ایستگاه- های خط لوله صادراتی	ایستگاه- های منطقه ۴ انتقال گاز	ایستگاه- های خط لوله قشم- کرمان	ایستگاه‌های ادامه خط لوله اول برای مناطق شمال غربی کشور	ایستگاه- های خط لوله آذربایجان	ایستگاه‌های خط لوله چهارم (در دست ساخت)	ایستگاه- های خط لوله سوم	ایستگاه- های خط لوله دوم	ایستگاه- های خط لوله اول
مرند	رضوی	سرخون	چلونند	قزوین	پارسیان- لامرد	کنگان	کنگان	آغاجاری
مرگنر	فاروج	آب شیرین	اردبیل	خرمده	خیرگو- بوشهر	فراشبند	فراشبند	تنگه پیرزال
	قلعه جیق- گلستان	حاجی آباد	سراب	زنجان	خنج- بوشهر	نورآباد	نورآباد	پتاوه
	نکا	سیرجان	تبریز	هشتروند	جهرم- فارس	پتاوه	پتاوه	دوراها
	نور				خاوران-	دوراها	دوراها	پل کله

					فارس			
	رامسر				ارسنجان	پل کله	پل کله	دهق
					صفاشهر	دهق	دهق	نیزار
					آبادیه	نیزار	نیزار	ساوه
					شهرضا	اراک	ساوه	قزوین
					تیران			رشت

با توجه به اینکه درصد بالایی از مصرف گاز در کشور ما مربوط به مصارف خانگی و صنعتی از قبیل نیروگاه‌ها و صنایع فولاد می‌باشد، همچنین صادرات گاز به کشورهای همسایه، لازم است گاز تولیدی با استفاده از شبکه‌های انتقال به مناطق مصرف ارسال گردد. گاز تولیدی از طریق خطوط سراسری و انشعابات فرعی به قطب‌های صنعتی، شهرهای پرجمعیت از جمله تهران و نقاط مرزی جهت صادرات ارسال می‌گردد. براساس توافقنامه‌هایی که در سال ۱۳۴۴ شمسی بین ایران و اتحاد جماهیر شوروی به امضاء رسید، ایران در مقابل ساخت کارخانه ذوب آهن اصفهان و ماشین‌سازی اراک توسط شوروی، تعهد کرد که به آن کشور گاز صادر کند. اجرایی شدن این پروتکل به ایجاد شرکت ملی گاز ایران در همان سال منجر شد و قرارداد فروش سالانه ده میلیارد مترمکعب گاز به شوروی در سال ۱۳۴۹ به امضای طرفین رسیده و صدور گاز آغاز شد.

پس از پیروزی انقلاب اسلامی، در سال ۱۳۵۸ به دلیل عدم توافق ایران و شوروی بر سر قیمت، صادرات گاز قطع شد. براساس گزارش شرکت ملی گاز، در مدت اجرای قرارداد ۷۱ میلیارد مترمکعب گاز طبیعی به شوروی صادر شده بود. پس از یک وقفه طولانی و توافق بر سر قیمت، دو کشور در سال ۱۳۶۹ قرارداد پانزده ساله‌ای برای صادرات گاز امضاء کردند و صادرات گاز به شوروی دوباره از سر گرفته شد و تا زمان

فروپاشی اتحاد جماهیر شوروی در سال ۱۹۹۱ (۱۳۷۰ شمسی) ادامه یافت، اما از آن زمان این خط لوله برای انتقال گاز به مناطق غربی و مصارف داخلی به کار گرفته شده است. نخستین خط لوله سراسری گاز به طول ۱۱۰۰ کیلومتر، قطر ۴۲ اینچ و ظرفیت ۴۶ میلیون مترمکعب در روز احداث گردید تا گاز پالایشگاه بیدبلند را به آستارا در مرز شوروی سابق برساند. خط لوله دوم سراسری گاز به طول ۱۸۰۰ کیلومتر، قطر ۵۶ اینچ و ظرفیت ۱۱۰ میلیون مترمکعب در روز از پالایشگاه کنگان به خطوط قزوین جهت مصرف منتقل می‌گردد.

خط لوله سوم سراسری گاز به طول ۸۷۰ کیلومتر، قطر ۵۶ اینچ و ظرفیت ۱۱۰ میلیون مترمکعب در روز جهت انتقال گاز از فازهای ۱ تا ۵ پارس جنوبی از عسلویه و پالایشگاه کنگان به استان‌های مرکزی و غرب کشور برای تأمین گاز مصرفی مورد نیاز کشور ایجاد شده است.

خط لوله چهارم سراسری گاز به طول ۱۲۵۰ کیلومتر، قطر ۵۶ اینچ و ظرفیت ۱۱۰ میلیون مترمکعب در روز از فازهای ۱ تا ۵ پارس جنوبی و پالایشگاه گاز پارسیان تغذیه نموده و پس از عبور از استان‌های فارس و اصفهان به شهرهای ساوه و قزوین می‌رسد و در آینده به خطوط صادراتی آستارا متصل می‌شود. در حال حاضر طول کل خطوط سراسری انتقال گاز به ۲۶۰۰۰ کیلومتر رسیده است و برنامه‌ریزی برای توسعه تا ۱۰ خط سراسری در دستور کار شرکت ملی گاز ایران قرار دارد.

جدول ۱-۲ مشخصات خطوط لوله خطوط سراسری پنجم تا دهم کشور را معرفی می‌کند.

جدول ۲-۱ مشخصات خطوط لوله خطوط سراسری پنجم تا دهم کشور [۲]

ظرفیت اسمی (MMSCM/D)	مسیر و مقصد	طول خط km	قطر	خط لوله
۹۵	از فازهای ۷ و ۸ پارس جنوبی به پالایشگاه گاز فجر و سپس به مقصد خوزستان و همچنین جهت تزریق گازهای ترش در چاه‌های نفت مناطق نفت خیز جنوب	۵۰۵	56"	پنجم
۱۱۰	از فازهای ۹ و ۱۰ پارس جنوبی برای صادرات به کویت و شاخه‌ای جهت مصارف داخلی در استان‌های غربی کشور	۶۰۷	56"	ششم (سراسری و فرامرزی)
۱۱۰	از عسلویه تا ایرانشهر با عبور از شهر بندرعباس جهت صدور به هند و پاکستان و مصارف داخلی استان سیستان و بلوچستان. ضمناً شاخه‌ای از این خط لوله جهت مصارف داخلی به استان کرمان وارد میگردد.	۲۲۰۰	56"	هفتم
۱۱۰	از عسلویه آغاز می‌شود و با گذر از کنار پالایشگاه پارسیان، گاز آنجا را نیز برداشت کرده و از سمت شرق استان فارس به اصفهان و مناطق مرکزی خواهد رفت	۱۲۶۰	56"	هشتم
۱۱۰	در ادامه خط ششم سراسری برای انتقال گاز عسلویه به مرز بازرگان احداث خواهد شد این خط مسئولیت تامین گاز استان‌های لرستان، کرمانشاه و کردستان و در نهایت تزریق گاز به مبادی صادراتی را برعهده دارد	۱۸۶۳	56"	نهم
۹۰	این خط از پالایشگاه فجر آغاز می‌شود و به پتاهو، استان کهگیلویه و بویراحمد و در نهایت به سمت شمال ادامه می‌یابد	۵۰۰۰	56"	دهم

۳-۱ ضرورت انجام تحقیق

هدف اصلی شرکتهای گاز استانی عرضه ایمن و پیوسته گاز به مشترکین می باشد. این هدف باید در شرایط عملیاتی مختلف از جمله شرایط بحرانی نیز تأمین گردد. با توجه به افزایش مداوم تعهدات در زمینه اجرای خطوط انتقال و فشارهای خارجی وارد بر آنها در زمینه توسعه شبکه های گازرسانی در شهرها، روستاها و مراکز صنعتی، این هدف مشکل تر شده است. تأمین گاز خصوصاً در شرایط بحرانی و کمبود گاز بدلیل عدم تدوین و بکارگیری دستورالعملهای عملیاتی- اضطراری بنظر دور از دسترس می باشد. بنابراین، با درک وضعیت موجود میتوان پی برد که تحقق اهداف واقعی این شرکتها در شرایط اضطراری غیر ممکن و مشکلاتی را در مدیریت آتی شبکه ها بدنبال خواهد داشت.

یکی از مهمترین بخشهای گازرسانی به مصرف کننده ها، شبکه توزیع می باشد. آشنایی با خطوط لوله این شبکه ها، مدلسازی آنها، پیدا کردن مشکلات احتمالی کارکرد آنها و تدوین یک دستورالعمل جامع برای مدیریت بحران، میتواند کمک شایانی در انتقال هر چه بهتر و مطمئن تر گاز به مصرف کننده ها بخصوص در شرایط بحرانی نماید. اهمیت شبکه های توزیع در شرایط بحرانی علی الخصوص افت فشار در ماه های سرد سال بیشتر میگردد. این مهم در سال ۱۳۸۶ بعد از شرایط بحرانی افت فشار و سرمای بیش از حد هوا، نمود بیشتری پیدا کرده است. بعد از این بحران بود که مشخص شد بررسی شبکه های توزیع و تغذیه، یافتن مشکلات خطوط لوله و گره های شبکه و همچنین توسعه یک دستورالعمل جامع برای شرایط بحرانی اهمیت بسزایی دارد. با توجه به چالش های ایجاد شده در سال ۱۳۸۶ بررسی خطوط تغذیه و توزیع، همچنین توسعه یک دستورالعمل جامع برای مدیریت بحران ضروری بنظر می رسد.

با توجه به مطالب بیان گردیده، ضرورت تحلیل و بررسی شبکه های توزیع در حالت بحرانی یکی از نیازهای اصلی برای گازرسانی بهتر به مشترکین می باشد که متأسفانه در ایران حتی شرکت های گاز

استانی نیز توجه چندانی به اهمیت این موضوع نداشته و با افت فشارهای زیاد و بعضاً با قطعی گاز مناطق مختلف، شرایط بحرانی را طی می نمایند. از این رو در این پژوهش سعی شده است که شبکه های توزیع به صورت کامل مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته و نتایج حاصله در شرایط بحرانی برای شبکه های توزیع، مورد استفاده قرار بگیرند.

۴-۱ مطالب مطالعه شده در این پژوهش

مطالبی که در این پایان نامه مورد بررسی قرار خواهد گرفت به ترتیب فصول به شرح زیر می باشند:

در فصل اول مقدمه ای در مورد شبکه های انتقال و توزیع گاز طبیعی ارائه گردیده است. در این فصل مراحل رسیدن گاز طبیعی از مراکز تولید (چاه های نفت و گاز) به مشترکان عمده و جزء، ارائه شده است. در فصل دوم، با توجه به اهمیت شبکه های توزیع و تغذیه، اصول طراحی این نوع شبکه های گاز طبیعی در حالت پایا مورد بررسی قرار گرفته شده است. هدف در این فصل نشان دادن طراحی اولیه شبکه های توزیع و تغذیه گاز طبیعی می باشد. در فصل سوم، مروری بر مطالعات گذشته در زمینه موضوع این پژوهش، ارائه گردیده شده است. مطالعات مربوط به جریان گاز طبیعی درون خطوط لوله در شرایط گذار و مطالعات مختلف در مورد مدلسازی آنها، مطالعات مربوط به شبکه های گاز طبیعی در حالت پایا و گذرا و همچنین ضعف مطالعات گذشته، از مباحث مطرح شده در این فصل می باشند. در فصل چهارم مدلسازی خطوط لوله و شبکه های گاز طبیعی در حالت گذرا بیان شده است. با توجه به روش های مدلسازی، در فصل پنجم نتایج حاصل از مدلسازی برای جریان داخل لوله و شبکه های گاز طبیعی در حالت گذرا، ارائه شده است. برای شبکه های گاز طبیعی، روش مدلسازی با استفاده از دو شبکه نمونه معتبرسازی شده و سپس دو شبکه تغذیه و توزیع گاز طبیعی

به صورت موردی و برای شهر سمنان، مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته و پاسخ شبکه در شرایط بحرانی برای شبکه های مورد مطالعه، تحلیل و بررسی شده است. در نهایت در فصل ششم، با توجه به نتایج بدست آمده، نتیجه گیری کلی این پژوهش ارائه گردیده و در ادامه پیشنهاداتی برای کارهای آینده ارائه شده است.

۲- فصل دوم: اصول طراحی شبکه های توزیع و

تغذیه گاز طبیعی در حالت پایا

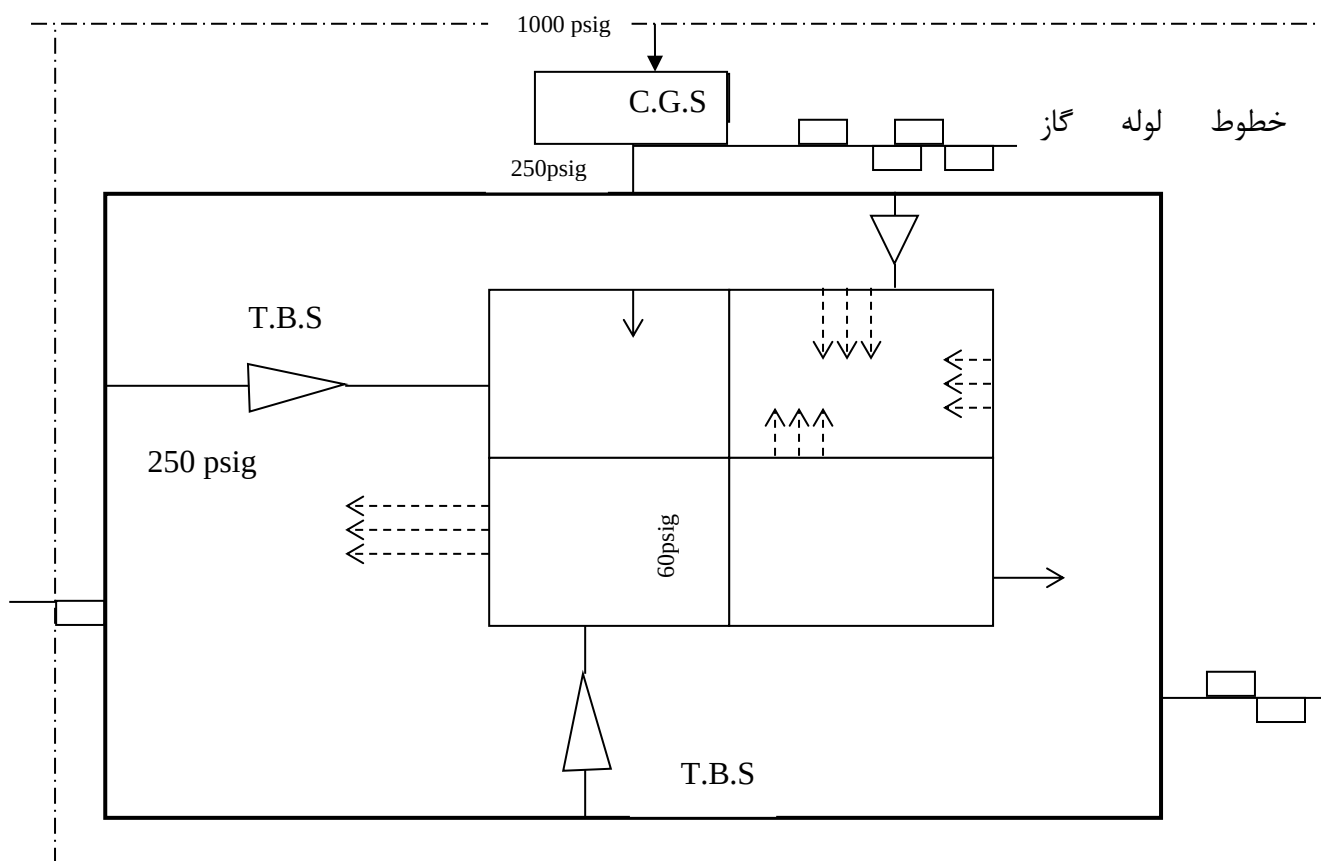
۱-۲ مقدمه

در این فصل، در مورد شبکه های توزیع و تغذیه گاز طبیعی توضیحاتی بیان شده است. انواع شبکه های توزیع و تغذیه و همچنین طراحی این شبکه ها در حالت پایا از جمله مهمترین مباحث مطرح شده در این فصل می باشند. شرکت های گازرسانی با استفاده از استانداردهای مشخص شرکت ملی گاز، نسبت به طراحی و اجرای شبکه های توزیع و تغذیه گاز طبیعی اقدام می نمایند. طراحی شبکه های توزیع و تغذیه در حالت پایا انجام گرفته و اثرات شرایط گذرا بر روی شبکه های توزیع و تغذیه، مورد توجه قرار نمی گیرد.

۲-۲ توزیع گاز طبیعی

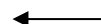
گاز طبیعی توسط خطوط لوله انتقال با حداکثر فشار ۱۰۰۰ پوند بر اینچ مربع و حداقل فشار ۳۵۰-۳۰۰ پوند بر اینچ مربع، وارد ایستگاه ورودی گاز شهری شده و پس از تقلیل فشار به ۲۵۰ پوند بر اینچ مربع، توسط خطوط اصلی شبکه تغذیه و یا حلقه کمربندی، وارد ایستگاه های تقلیل فشار داخل شهر می گردد. گاز طبیعی پس از عبور از این ایستگاه ها با فشار ۶۰ پوند بر اینچ مربع وارد شبکه توزیع شده و سپس وارد خطوط شاخه ای که در کوچه ها و خیابان های فرعی با قطر ۲ اینچ و یا ۶۳ میلی متر لوله گذاری شده است، می شود. از طریق خطوط انشعاب، گاز مصرف کنندگان پس از تقلیل فشار توسط رگولاتور بر حسب نوع و میزان مصرف، تأمین می گردد. رگولاتور یکی از مهم ترین اجزا سیستم گازرسانی بوده و می توان آن را به منزله قلب تاسیسات گازی دانست. وظیفه رگولاتور، کاهش فشار و ثابت کننده فشار در یک مقدار دلخواه می باشد. فشار گاز در هنگام ورود به رگولاتور برابر ۶۰ پوند بر اینچ مربع می باشد که توسط رگولاتور به فشار ۰/۲۵ پوند بر اینچ مربع برای مشترکین خانگی، می رسد. تغذیه مصرف کنندگان عمده و تجاری داخل شهرها از طریق خطوط شبکه تغذیه ۲۵۰ پوند بر اینچ مربع و یا خطوط شبکه اصلی توزیع،

می باشد که با نصب یک ایستگاه تقلیل فشار در محل بر اساس میزان مصرف حداکثر ساعتی، گاز آنان را تأمین می کند [۳]. سیستم توزیع گاز شبکه گازرسانی به طور شماتیک در شکل ۱-۲، نشان داده شده است:

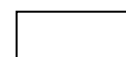


شکل ۱-۲ سیستم توزیع گاز طبیعی [۳]

خطوط لوله فشار قوی انتقال گاز به شهر



ایستگاه ورودی گاز به شهر C.G.S



ایستگاه تقلیل فشار T.B.S یا D.R.S



محدوده ۲۵ ساله شهر یا خدمات قانونی



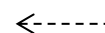
خطوط شبکه تغذیه گاز یا حلقه کمربندی ۲۵۰ psig



خطوط شبکه اصلی یا توزیع با فشار ۶۰ psig



خطوط شاخه ای ۲ اینچی با فشار ۶۰ psig



مصرف کننده ویژه عمده



۳-۲ مصرف کنندگان گاز در شبکه های توزیع

سه دسته اصلی مصرف کنندگان گاز در شبکه های توزیع، عبارتند از:

۱. مصرف کنندگان خانگی (مصرف منازل)
۲. مصرف کنندگان تجاری : مصرف کنندگان عمده این طبقه گرمابه های عمومی، نانوائیها، ساختمان های بزرگ اداری، سفارتخانه ها ، هتل ها، بیمارستان ها، رستوران ها، سینماها و غیره می باشند.
۳. مصرف کنندگان صنعتی: این دسته از مصرف کنندگان شامل تمامی کارخانجات برق و سیمان، کوره های آجر پزی و گچ پزی، کارخانه های کوچک شیشه سازی و ریخته گری، کارخانه های قند و غیره می باشند.

۴-۲ طراحی شبکه های توزیع و تغذیه گاز طبیعی [۳]

اصول کلی طراحی شبکه های توزیع و تغذیه به منظور گازرسانی به مصرف کنندگان، به قرار زیر می باشند:

- ۱- شبکه گازرسانی بایستی توانایی انتقال گاز را برای سردترین روزهای سال در زمانی که توسعه شهر و مصرف آن به حد اشباع رسیده است را دارا باشد.
- ۲- شبکه گازرسانی بایستی ایمن بوده به طوریکه با رعایت مسایل فنی مانند انتخاب اجناس استاندارد، محل قرار گرفتن خطوط اصلی، حفاظت لوله ها در برابر تکان، لرزش، خوردگی توسط

خاک و باکتریها و نحوه اتصال لوله ها، مانع از نشستی گاز، انفجار، آتش سوزی و صدمات جانبی در آینده نگردد.

۳- شبکه گازرسانی بایستی اقتصادی و مقرون به صرفه باشد و جوابگوی احتیاجات باشد.

۴- شبکه گازرسانی باید به نحوی باشد که در صورت بروز حادثه سریعاً قابل کنترل باشد. بدین منظور طراحی و محل نصب شیرها روی خطوط شبکه باید به گونه ای باشد که با بستن حداقل یک شیر برای لوله های ۲ اینچی و یا ۲ شیر روی خطوط اصلی، منطقه مربوطه را از سایر نقاط شبکه جدا نماید.

۵- شبکه گازرسانی باید طوری طراحی شوند که در زمان تعمیرات شبکه (مانند لوله و شیر و اتصالات) تعداد مصرف کنندگان که از گاز محروم می گردند حداقل باشند. برای این منظور طراح بایستی در گذاشتن شیر بر روی شبکه ی اصلی و همچنین تعداد مصرف کننده بر روی هر انشعاب ۲ اینچی، دقت لازم را به عمل آورد، به طوریکه با بستن یک شیر ۲ اینچی حداکثر بین ۱۵۰-۱۰۰ مصرف کننده از سیستم خارج شوند و با بستن ۲ شیر اصلی روی خطوط اصلی شبکه توزیع، حداکثر ۶۰۰-۳۰۰ مصرف کننده از سیستم خارج شوند.

۲-۴-۱ پارامترهای مهم در شبکه های توزیع و تغذیه

۲-۴-۱-۱ فشار

- ✓ حداکثر فشار در خطوط شبکه تغذیه یا حلقه کمربندی، ۲۵۰ پوند بر اینچ مربع
- ✓ حداقل فشار گاز در خطوط شبکه تغذیه یا حلقه کمربندی در دورترین نقطه از ورود به ایستگاه
- تقلیل فشار مرزی شهر در حداکثر مصرف ساعتی، ۱۵۰ پوند بر اینچ مربع

- ✓ حداکثر فشار گاز در خطوط اصلی شبکه توزیع، ۶۰ پوند بر اینچ مربع
- ✓ حداقل فشار گاز در خطوط اصلی شبکه توزیع در دورترین نقطه از شبکه، ۴۵ پوند بر اینچ مربع
- ✓ حداکثر فشار گاز در خطوط لوله شاخه ای ۲ اینچی، ۶۰ پوند بر اینچ مربع
- ✓ حداقل فشار گاز در خطوط لوله شاخه ای ۲ اینچی در دورترین نقطه در موقع حداکثر مصرف ساعتی، ۳۰ پوند بر اینچ مربع

۲-۴-۱-۲ سرعت

حداکثر سرعت گاز در کلیه خطوط شبکه تغذیه ۲۵۰ پوند بر اینچ مربع و یا شبکه توزیع ۶۰ پوند بر اینچ مربع، نباید از ۱۸ متر بر ثانیه (۷۰ فوت بر ثانیه) بیشتر باشد.

۲-۴-۱-۳ درجه حرارت

درجه ی حرارت گاز در شرایط پایه ۱۵ درجه سانتیگراد (۶۰ درجه فارنهایت) می باشد.

۲-۴-۱-۴ چگالی

چگالی مخصوص گاز ۰/۵۵ در نظر گرفته می شود.

۲-۴-۱-۵ ضریب تراکم پذیری

ضریب تراکم پذیری گاز طبیعی در خطوط لوله شبکه های توزیع و تغذیه، برابر ۱_ است (فرض گاز ایده آل).

۶-۱-۴-۲ ضریب راندمان

ضریب راندمان تجربی معادل ۸۵-۱۰۰٪ برای شبکه های توزیع و تغذیه می باشد. در مورد شبکه ها منظور از ضریب راندمان، بهره برداری از شبکه گازرسانی با کمترین تلفات و بیشترین ضریب امنیت می باشد.

۷-۱-۴-۲ ضریب همزمانی

ضریب همزمانی عبارت است از نسبت حجم مصرف عملی یک گروه مصرف کننده در یک زمان معین به مقداری که همان گروه در همان زمان همه وسایل گاز سوز خود را مورد بهره برداری قرار دهند. ضریب همزمانی به عوامل زیر بستگی دارد:

الف- تعداد واحدهای مصرف کننده: هر چه تعداد مصرف کنندگان افزایش یابد این ضریب کاهش می یابد.

ب- نوع گروه مصرف کننده: از جمله خانگی، تجاری و صنعتی.

ج- نوع مصرف: مصارف مختلف از قبیل مصارف تهیه آب گرم، پخت و پز و گرمایش که هر یک ضریبی مختص خود دارند.

ضریب همزمانی با تغییر عوامل دیگری از جمله شرایط اقتصادی، اجتماعی و فرهنگی تغییر می کند لذا این ضریب در مناطق مختلف فرق می نماید و با آمارگیری و استفاده از تجربیات گذشته در هر منطقه، تعیین می گردد.

نظر به اینکه ضریب همزمانی در لحظه برابر حاصل تقسیم جمع مصارف در حال جریان به جمع ظرفیت وسایل گاز سوز متصل به سیستم می باشد، بنابراین مورد صحیح کاربرد این ضریب در مواردی است که

در تعیین ظرفیت شبکه از روش آمارگیری از ظرفیت های وسایل گاز سوز متصل به سیستم استفاده شده باشد. تجربه گذشته طراحی شبکه های گازرسانی در کشورمان نشان داده است که در نظر گرفتن ضریب همزمانی به مقدار یک از اطمینان بیشتری برخوردار است و دلایل عمده آن گسترش بی رویه شهرها در آینده، سرمای شدید، طولانی بودن فصل زمستان، عمومیت نداشتن استفاده از سیستم حرارت مرکزی در سطح شهر و استفاده نکردن از ترموستات برای سیستم حرارت مرکزی، می باشند. اخیراً امور بررسی و برنامه ریزی اقدام به تجزیه و تحلیل اطلاعات نموده و در صدد است که روش و سیستمی برای بررسی این موضوع پیاده نماید، به طوریکه ضریب همزمانی هر شهر به طور جداگانه بررسی گردد و قبل از شروع طراحی به مهندس طراح اطلاع داده شود.

۲-۴-۲ انواع شبکه های توزیع و تغذیه گاز طبیعی

از نظر سیستم گازرسانی می توان شبکه های توزیع و تغذیه را به سه گونه طرح کرد [۳]:

۱-۲-۴-۲ شبکه های آنتی یا شاخه ای

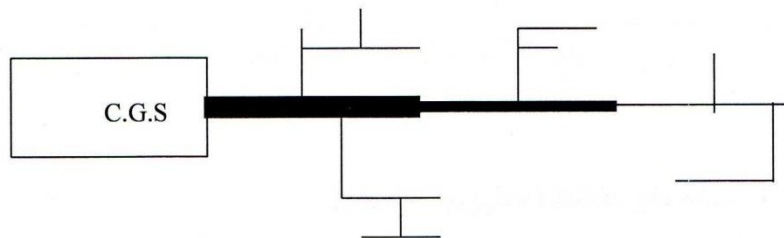
این شبکه ها مانند درخت بوده و ساده ترین نوع شبکه ها را تشکیل می دهند. جریان گاز در آنها همیشه یک طرفه و از سوی شاخه بزرگتر به شاخه کوچکتر متوجه می باشد. محاسبه این شبکه ها ساده بوده به طوریکه به راحتی می توان در هر نقطه فشار و مقدار جریان و سرعت گاز را با دقت بالا تعیین نمود. شبکه های شاخه ای دارای عیوبی به شرح زیر هستند:

۱- افزایش قابل توجه قطر لوله ها و هزینه به منظور تامین فشار کافی در نقاط انتهایی؛ این فرآیند باعث افزایش چشمگیر هزینه شبکه خواهد بود.

۲- قطع گاز یک قسمت عمده از شبکه در ضرورت بروز پیشامدی بر روی خطوط اصلی شبکه.

۳- یک طرفه بودن جریان.

شکل ۲-۲ نمایی از یک شبکه شاخه ای را نشان می دهد.



شکل ۲-۲ نمایی از یک شبکه شاخه ای

۲-۲-۴-۲ شبکه های حلقوی

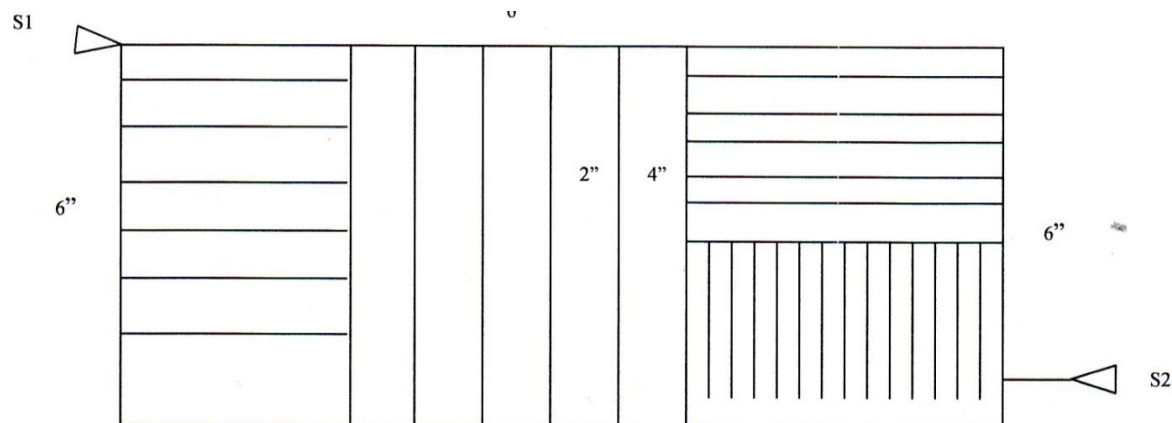
اگر انتهای شاخه های شبکه های شاخه ای را به همدیگر وصل نماییم، شبکه حلقوی به دست می آید. در این شبکه ها گاز در حلقه های بسته به محل مصرف، تغییر جهت می دهند. در هر ناحیه، دو یا چند مسیر جهت امکان گازرسانی دارند. این خاصیت، حسن بزرگ شبکه های حلقوی می باشد.

این شبکه ها معایب شبکه های شاخه ای را ندارند ولی عیب های مختص به خود را دارند به طوریکه کاربرد آنها را تا حدودی محدود می نماید. این معایب عبارتند از:

۱- افزایش هزینه طراحی به دلیل پیچیدگی جریان گاز؛ به طوریکه حتی با استفاده از روش های نوین محاسباتی نمی توان فشار و سرعت و مقدار جریان گاز را با دقت جریان شاخه ای، تعیین نمود.

۲- افزایش هزینه ساختمان و هزینه ی نگهداری و تعمیرات به دلیل افزایش تعداد شیرها.

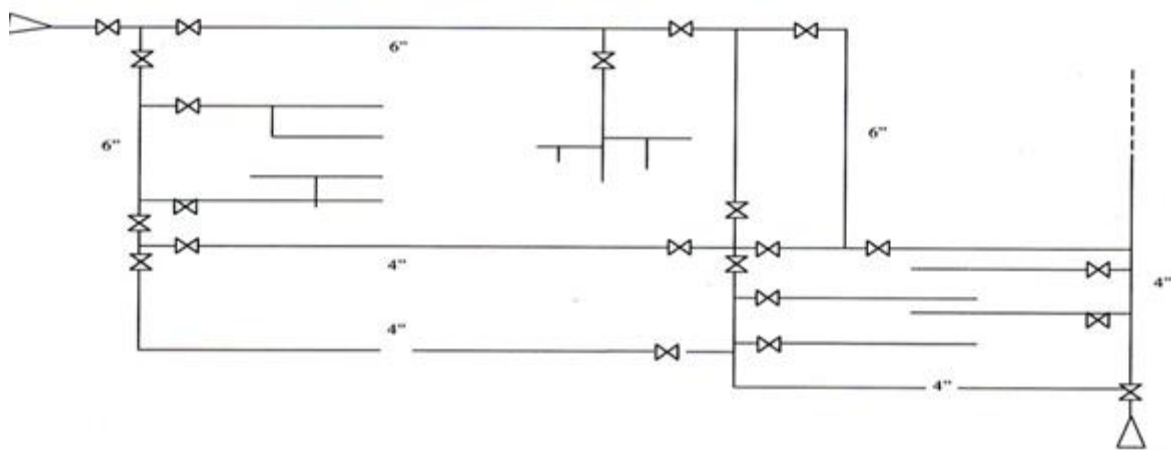
شکل ۳-۲ نمایی از یک شبکه حلقوی را نشان می دهد.



شکل ۳-۲ نمایی از یک شبکه حلقوی

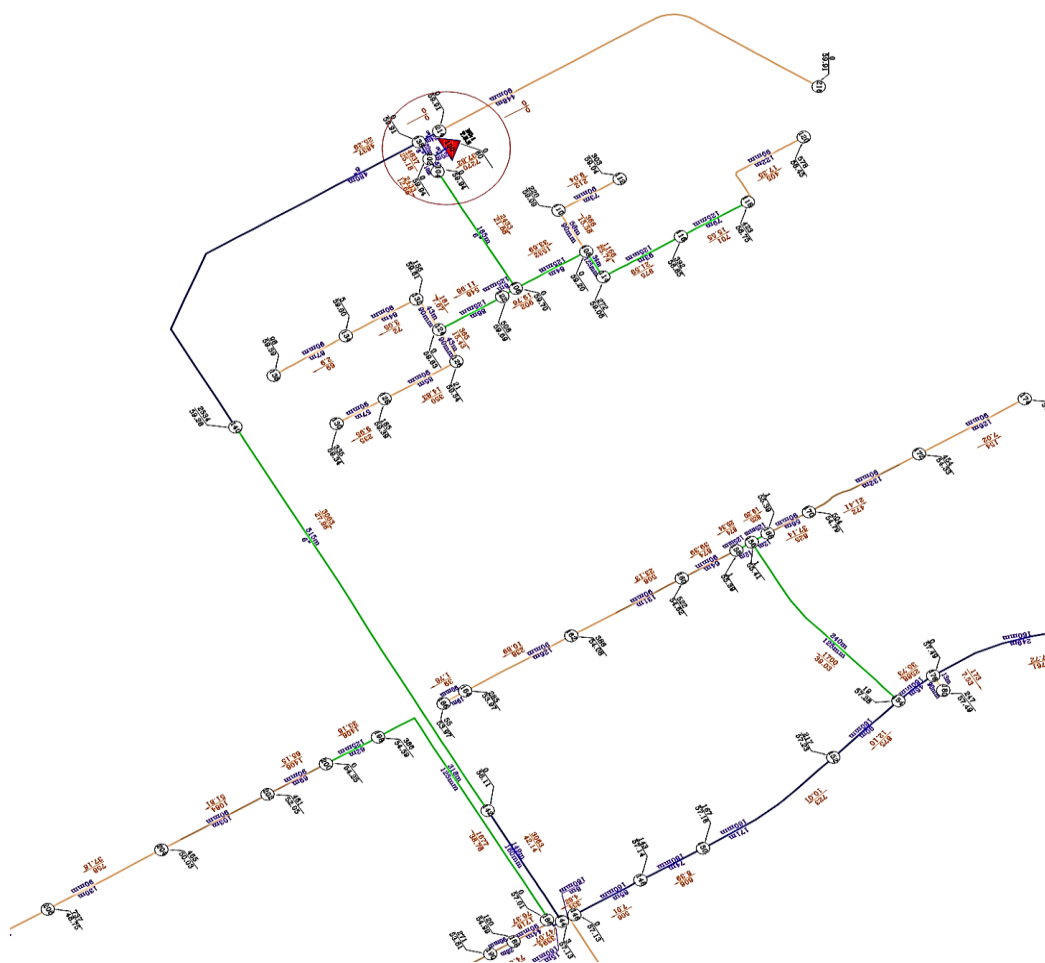
۳-۲-۴-۲ شبکه های مختلط (حلقوی و شاخه ای)

چون نصب و اجرای شبکه های حلقوی هزینه بالایی دارد، همچنین به دلیل معایب دیگر این نوع شبکه ها، این شبکه ها همیشه مقرون به صرفه نیستند. لذا در عمل برای شبکه های گازرسانی شهر از ادغام هر دو نوع شبکه های شاخه ای و حلقوی، استفاده می شود. هدف این کار به حداقل رساندن معایب هر یک و افزایش محاسن مجموع آنها و در نهایت طرح یک شبکه بهینه است. شکل ۴-۲ یک نمونه از شبکه مختلط را نشان می دهد.



شکل ۴-۲ یک نمونه از شبکه مختلط

شکل ۵-۲ بخشی از شبکه توزیع گازرسانی شهرستان سمنان را نشان میدهد. با توجه به مطالب گفته شده، شبکه توزیع مورد مطالعه در این پژوهش (شکل ۵-۲) از ترکیب شبکه های شاخه ای و حلقوی تشکیل شده، یا به عبارت دیگر یک شبکه مختلط می باشد.



شکل ۵-۲ بخشی از شبکه توزیع شهرستان سمنان

۲-۴-۳ تعیین مسیر و طراحی خطوط لوله شبکه تغذیه گاز طبیعی

یکی از مسائل مهمی که در امر طراحی شبکه تغذیه (فشار ۲۵۰ پوند بر اینچ مربع) حائز اهمیت است، ایمنی شبکه و اقتصادی بودن آن می باشد. در گذشته به علت قدیمی بودن بافت شهرها سعی می شد مسیرهایی برای خطوط تغذیه انتخاب گردد که در اطراف جاده های کمربندی، کنار اتوبان ها و دور از خیابان های اصلی و پر ترافیک شهرها باشند. این نوع طراحی باعث می گردد که قطر لوله و در نتیجه اندازه شیرهای مورد نیاز بزرگتر شود که باعث مشکلاتی در عملیات اجرایی می گردد. با توجه به مسایل ذکر شده، از لحاظ اقتصادی هزینه پروژه افزایش می یابد. با توجه به پیشرفت های چشمگیر در امر طراحی سیستم حفاظت کاتدی و ایستگاه های تقلیل فشار و با در نظر گرفتن تمامی جوانب امر و پیشرفت های انجام شده در امور مهندسی، این نتیجه حاصل شده است که در شهرهای بزرگ مانند تهران، شیراز، تبریز، مشهد، اصفهان و غیره، خطوط لوله ۲۵۰ پوند بر اینچ به صورت یک شبکه تغذیه طراحی گردد، نه اینکه حلقه کمربندی و لوله ها در خیابان های اصلی و عریض شهر کار گذاشته شوند. این فرآیند باعث کاهش قطر لوله ها، شیرها و هم چنین سهولت در امر عملیات اجرایی و پایین آمدن کل هزینه پروژه شبکه گازرسانی خواهد شد [۳].

۲-۴-۳-۱ معیارهای انتخاب مسیر خطوط لوله شبکه تغذیه در درون شهرهای بزرگ

۱. خیابانهای اصلی و عریض انتخاب شوند.
۲. حتی امکان سعی شود مسیرهایی انتخاب شود که به ایستگاههای تقلیل فشار داخل شهر نزدیک باشند.
۳. حتی امکان سعی شود از خیابان هایی که دارای کابلهای زیر زمینی برق (kv 63) می باشند، لوله عبور داده نشود.

۴. بدلیل سنگین بودن مصارف صنعتی، مسیر بایستی طوری انتخاب شود که مصارف صنعتی حتی امکان از نیمه اول خطوط اصلی شبکه تغذیه منشعب گردند. در صورت دور بودن صنایع از این خطوط و نزدیک بودن محل ایستگاه ورودی گاز به محل مصرف صنایع بزرگ، بهتر است مستقیماً از ایستگاه ورودی گاز خط لوله جداگانه ای برای صنایع در نظر گرفته شود که این خود باعث کاهش قطر لوله های شبکه تغذیه می شود.

۲-۴-۳-۲ طراحی حلقه کمربندی در اطراف شهرها

حلقه کمربندی عمدتاً در شهرستانهای کوچک به دلیل بافت قدیمی و پیچیدگی خیابان و همچنین کوچکی سطح شهر به کار می رود. در این حالت بدلیل اینکه خطوط لوله حلقه کمربندی با فشار ۲۵۰ پوند بر اینچ مربع وارد شهر نمی شود، از نظر عملیات اجرائی و ایمنی با مشکلات کمتری روبرو هستیم ولی هزینه به طور کلی نسبت به حالت قبل به دلیل اضافه شدن قطر لوله های شبکه ۶۰ پوند بر اینچ مربع، بالاتر می رود. در طراحی هایی که جدیداً در خدمات مهندسی شبکه های گازرسانی انجام می شود سعی می گردد حلقه کمربندی در یکی از خیابانهای اصلی و عریض داخل شهر که متعلق به شهرداری ها است لوله گذاری شود این خود باعث کاهش طول لوله ها و در نتیجه کاهش قطر لوله حلقه کمربندی می شود [۳].

۲-۴-۳-۳ معیار های انتخاب مسیر حلقه کمربندی

۱. چنانچه جاده کمربندی در دست طراحی باشد، می توان حاشیه آن را با توجه به حریم جاده ها جهت لوله گذاری حلقه کمربندی انتخاب کرد.
۲. در صورتیکه جاده کمربندی وجود نداشته باشد، می توان از جاده های فرعی دیگر در حاشیه شهر که مناسب این کار تشخیص داده می شود، استفاده نمود.

۳. در صورتیکه جاده مناسبی در مسیرهای دلخواه وجود نداشته باشد باید از زمینهای مزروعی و یا

اطراف شهر جهت مسیر خط لوله حلقه کمربندی استفاده کرده و اقدام به تحصیل اراضی^۱ حریم

اختصاصی بر طبق مشخصات داده شده بیان نمود.

در هر سه حالت فوق الذکر بایستی محدوده خدمات قانونی شهر را در نظر گرفت و حتی امکان مسیرها را

به نحوی انتخاب نمود که حداقل تقاطع با راه آهن، جاده ها، رودخانه ها و نهرها را دارا بوده و نیز حریم

اماکن عمومی ساخته شده و یا در دست ساخت رعایت شده و حداقل تخریب در مزارع و ابنیه صورت

گیرد [۳].

۲-۴-۴ تعیین مسیر خطوط لوله شبکه توزیع

مسیر خطوط شبکه توزیع بر اساس اطلاعات بازاریابی و نقشه های به روز آورده شده ۱:۲۰۰۰ و یا

۱:۵۰۰۰ شهر که توسط امور بررسی و برنامه ریزی انجام گرفته و با توجه به مسائل زیر انتخاب می

گردد [۳]:

۱. انتخاب خیابانهای اصلی و عریض شهر جهت عبور لوله های اصلی

۲. امکان پذیری عملیات اجرایی گازرسانی

۳. امکان پذیری طراحی تفصیلی خطوط لوله شاخه ایی ۱۲ اینچی، به طوریکه حداکثر فاصله دو

خط اصلی در یک حلقه از یکدیگر حداقل ۵۰۰ متر و مصرف هر حلقه ایجاد شده حدود ۴۰۰ متر

مکعب باشد.

۴. حداقل برخورد خطوط اصلی شبکه توزیع با موانع مهم؛ مانند نزدیکی خطوط اصلی شبکه توزیع

با مصرف کنندگان عمده

¹ Right of Way

۵. حداکثر تداوم عرضه گاز در شرایط اضطراری

۶. عبور لوله های اصلی گاز از خیابان هایی که محل استقرار ایستگاههای تقلیل فشار می باشند.

لازم به یادآوری است که هر چه نواحی از نظر ساختمان و جمعیت متراکم تر باشند، حلقه ها کوچکتر و هر چه نواحی بازتر و تراکم جمعیت و ساختمان کمتر باشد، حلقه ها بزرگتر خواهند بود.

۲-۴-۵ نقشه های گره های شبکه گازرسانی

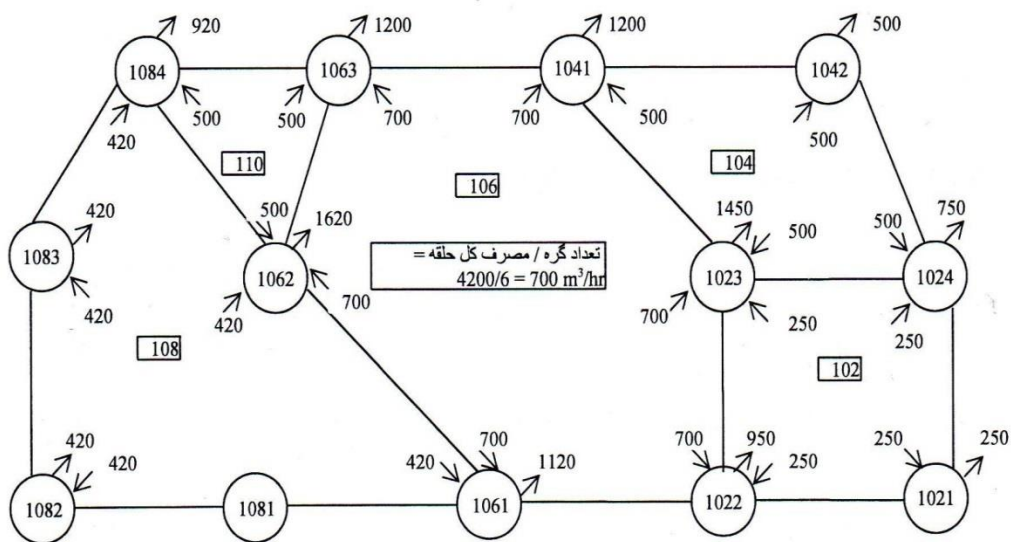
نقشه گره های یک شبکه در حقیقت شکل مدل ریاضی شبکه است که شامل اطلاعات فنی راجع به شبکه می باشد. این اطلاعات عبارتند از: طرح شبکه شامل کلیه لوله ها و محل تقاطع این قطعات، شماره هر گره که با شماره دو سر لوله آن شناخته می شود. این اطلاعات شامل: میزان مصرف بار در هر گره، طول هر لوله، قطر هر لوله، محل ایستگاه های تقلیل فشار و فشار آن، می باشند.

۲-۴-۵-۱ تقسیم بار حلقه بر روی گره ها

نحوه تقسیم مصارف بر روی گره ها حالت های مختلفی می تواند داشته باشد که در این قسمت به توضیح دو حالت اکتفا می شود [۳]:

حالت اول:

بار هر حلقه را به تعداد گره های اطراف آن حلقه تقسیم کرده و به همین ترتیب برای حلقه های مجاور عمل می کنیم. سپس مقدار بار مربوط به یک گره مشترک بین حلقه های مختلف را با یکدیگر جمع کرده و بار کلی آن گره را به دست آورده و بر روی نقشه های ۱:۵۰۰۰ یا ۱:۱۰۰۰ شبکه در بالای علامت مربوط به آن گره می نویسیم. همانند شکل زیر:



شکل ۲-۶ نمایی از تقسیم بار در گره حلقه ها

حالت دوم:

تقسیم بار روی گره ها از طریق طراحی تفصیلی خطوط ۲ اینچی به نحوی است که ابتدا می بایست قبل از تهیه نقشه گره ها، اقدام به طراحی تفصیلی نمود. سپس بر اساس تعداد محل شیرهای ۲ اینچی اقدام به تهیه نقشه گره ها نمود.

هر دو حالت فوق مورد تایید خدمات مهندسی بوده و از لحاظ ایمنی و تامین گاز از دقت عمل بالایی برخوردار است زیرا در هر ۳۰۰ متر یک گره مصرف در نقشه های محاسباتی علاوه بر تقاطع ها، منظور شده است. لذا در اکثر مواقع از حالت اول برای نحوه تقسیم بار استفاده می شود. لازم به تذکر است که در موقع تقسیم بار هر حلقه، آن دسته از مصرف کنندگان تجاری ویژه و عمده و یا صنایع بزرگ داخل شهر که دارای مصارف بالا هستند و می بایست روی شبکه تغذیه ۲۵۰ پوند بر اینچ مربع

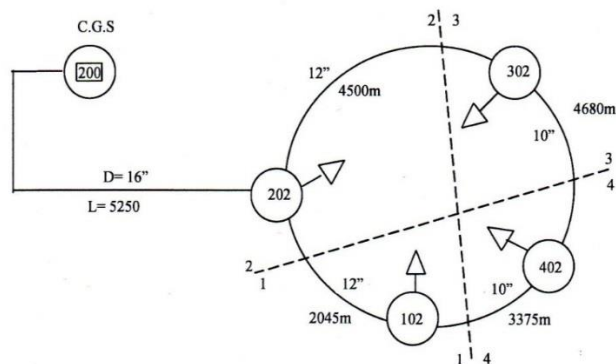
منظور شوند، مشخص و از مصرف آن حلقه که روی گره های شبکه ۶۰ پوند بر اینچ مربع منظور می شود، کسر گردد [۳].

۶-۴-۲ محاسبات مربوط به شبکه تغذیه گاز طبیعی

پس از بالانس شبکه توزیع (۶۰ پوند بر اینچ مربع) مسیر خطوط لوله اصلی شبکه توزیع در خیابان ها و موقعیت و محل دقیق ایستگاه های تقلیل فشار مشخص می گردد. در این مقطع بر اساس برنامه زمان بندی، طراحی تفصیلی شروع شده و سپس تعیین قطر حلقه کمربندی و مسیر نهایی عبور لوله ها آغاز می شود. جهت محاسبات و تعیین قطر لوله حلقه کمربندی نیاز به یک نقشه محاسباتی می باشد. بدین منظور مسیرهای پیش بینی شده از قبل را بر اساس موقعیت و محل دقیق ایستگاه که در محاسبات شبکه تغذیه بدست آمده بود، مورد بررسی قرار گرفته و بهترین مسیر با توجه به محل خروجی ایستگاه ورودی گاز شهری و نزدیک بودن مسیر عبور لوله به ایستگاه های تقلیل فشار، انتخاب شده و بر روی نقشه ۱:۵۰۰۰ یا ۱:۱۰۰۰۰ مشخص می شود [۳].

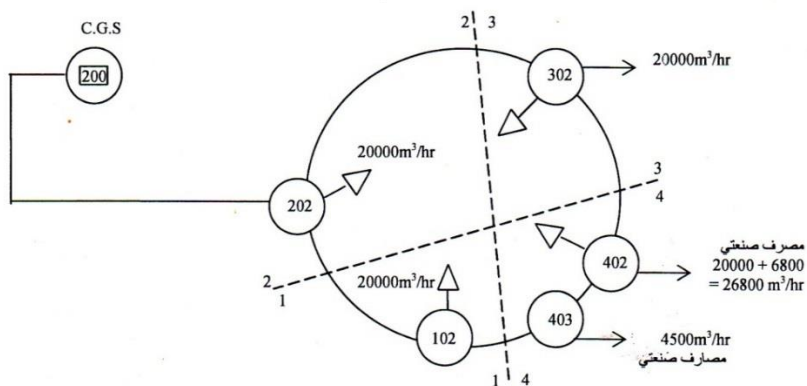
در تهیه نقشه های گره تغذیه نکات زیر در نظر گرفته می شود [۳]:

✓ محل هر ایستگاه به صورت یک گره مصرف مشخص می شود و شماره ایستگاه ها که قبلا در شبکه توزیع تعیین شده بود در اینجا به عنوان شماره گره مصرفی با سه رقم معرفی می شود. شکل ۲-۷ نقشه گره های حلقه کمربندی را نشان می دهد.



شکل ۷-۲ نقشه گره های حلقه کمربندی

✓ مصرف صنایع جاده ای اطراف شهر در محل تقاطع لوله ۲۵۰ پوندی با این جاده ها مشخص می شود و در بعضی مواقع که محل ایستگاه تقلیل فشار در ابتدای جاده صنعتی واقع است، مجموع مصارف صنعتی آن جاده و مصارف شهرها با یکدیگر جمع شده و روی آن گره منظور می گردد. شکل ۸-۲ نقشه گره های حلقه کمربندی با مصارف صنعتی را نشان می دهد.



شکل ۸-۲ نقشه گره های حلقه کمربندی با مصارف صنعتی

۷-۴-۲ تعیین قطر لوله شبکه تغذیه گاز طبیعی

پس از تهیه نقشه گره ها که در آن محل ایستگاه های تقلیل فشار و محل مصارف جاده های صنعتی و همچنین فواصل گره ها مشخص شده است، قطر های اولیه با توجه به کل دبی خروجی از ایستگاه گاز تعیین می شود. اطلاعات موجود از روی نقشه گره ها استخراج و جهت بالانس شبکه تغذیه ارسال می گردد در نهایت با بالانس شبکه و تجزیه و تحلیل محاسبات یک شبکه تغذیه بهینه به دست می آید. حداقل فشار بر روی حلقه کمربندی در نقاطی که مصارف جاده های صنعتی متمرکز است در ابتدای جاده بستگی به طول آن باید بین ۱۸۰ تا ۲۰۰ پوند بر اینچ مربع باشد که پس از طراحی خطوط صنعتی آن جاده، فشار در انتهای خط از ۱۵۰ پوند بر اینچ مربع، پایین تر نرود. همچنین حداقل فشار گاز در خطوط شبکه تغذیه یا حلقه کمربندی در دورترین نقطه قبل از ورود به ایستگاه های داخل شهری و در زمان حداکثر مصرف از ۱۵۰ پوند بر اینچ مربع، کمتر نباشد. با در نظر گرفتن کلیه موارد فوق و نیز سرعت گاز در لوله ها، قطر مناسبی برای لوله های شبکه تغذیه در نظر گرفته می شود [۳].

۸-۴-۲ تعیین قطر لوله ها در شبکه توزیع گاز طبیعی

پس از آماده شدن نقشه گره ها بایستی برای تمام قطعه لوله های شبکه یک قطر اولیه با توجه به شرایط زیر و در نظر گرفتن فرمول های طراحی و سرعت گاز، محاسبه و تعیین نمود [۳]:

۱. حجم گاز انتقالی از ایستگاه به نقاط مصرف

۲. سرعت گاز در هیچ نقطه نباید از ۱۸ متر بر ثانیه بیشتر باشد.

۳. افت فشار نسبت به جریان گاز؛ فشار گاز در هیچ نقطه نباید از ۴۵ پوند بر اینچ مربع در شبکه اصلی کمتر باشد.

۴. طول لوله

۵. قطر لوله در خروجی ایستگاه تقلیل فشار گاز با توجه به شرایط زیر تعیین می گردد:

✓ جهت خروجی ایستگاههای تقلیل فشار با فشار خروجی ۶۰ پوند بر اینچ مربع و ظرفیت ۵۰۰۰ متر مکعب در ساعت، قطر ۵ اینچ در نظر گرفته می شود.

✓ جهت خروجی ایستگاههای تقلیل فشار با فشار خروجی ۶۰ پوند بر اینچ مربع و ظرفیت ۱۰۰۰۰ متر مکعب در ساعت، قطر ۶ اینچ در نظر گرفته می شود.

✓ جهت خروجی ایستگاههای تقلیل فشار با فشار خروجی ۶۰ پوند بر اینچ مربع و ظرفیت ۲۰۰۰۰ متر مکعب در ساعت، قطر ۱۰ اینچ در نظر گرفته می شود.

✓ جهت خروجی ایستگاههای تقلیل فشار با فشار خروجی ۶۰ پوند بر اینچ مربع و ظرفیت ۳۰۰۰۰ متر مکعب در ساعت، قطر ۱۲ اینچ در نظر گرفته می شود.

۳- فصل سوم : مروری بر مطالعات گذشته

۳-۱ مقدمه

در این فصل به بررسی مطالعات گذشته در زمینه جریان گاز طبیعی در داخل لوله و در شبکه های انتقال و توزیع، پرداخته شده است. با توجه به اهمیت جریان درون خطوط لوله ابتدا مطالعات صورت گرفته در این زمینه بررسی شده و سپس مطالعات صورت گرفته در شبکه های گاز طبیعی شامل شبکه های انتقال و توزیع مورد بررسی قرار گرفته است. برای هر دو مورد اشاره شده ابتدا جریان گاز طبیعی در حالت پایا مورد بررسی قرار گرفته شده سپس جریان در حالت گذرا^۱ (ناپایا) مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته شده است. با توجه به اهمیت دبی گاز طبیعی در شبکه های توزیع و تغذیه، مطالعات مربوط به پیش بینی مصرف گاز طبیعی در شبکه های توزیع و تغذیه، مطالعات مربوط به پیش بینی مصرف گاز طبیعی در شبکه های توزیع و تغذیه گاز طبیعی نیز در این فصل مورد بررسی قرار گرفته اند.

۳-۲ جریان گاز طبیعی درون خطوط لوله

مطالعات گذشته مربوط به جریان گاز طبیعی درون خطوط لوله به دو دسته تقسیم می شوند:

۳-۲-۱ جریان داخل لوله در حالت پایا

در مدلسازی جریان درون خطوط لوله به صورت پایا، حذف ترم های زمانی باعث پایین آمدن حجم محاسبات و سهولت در فرآیند شبیه سازی می شود. مطالعات انجام گرفته در این زمینه به شرح زیر می باشند:

رادوز^۲ [۴]، ایانگ و عزیز^۱ [۵] و اسکرودر^۲ [۶] به بررسی و شرح معادلات تعادل در جریان تراکم پذیر گاز طبیعی داخل لوله پرداخته اند. آنها با استفاده از شکل ساده و رایج معادلات تعادل، افت فشار ناشی از

^۱ Transient (unsteady)

^۲ Rhoads

اصطکاک، ارتفاع و انرژی جنبشی را محاسبه نموده اند. تیان و آدومی^۳ [۷] برای بررسی جریان گاز درون سیستم خطوط لوله، از یک معادله یک بعدی تراکم پذیر جریان سیال با در نظر گرفتن ترم انرژی جنبشی استفاده کرده اند. این معادله، بین نرخ جریان گاز و فشار ورودی و خروجی هر مقطع از لوله یک رابطه برقرار کرده و با فرض ثابت بودن دما و ضریب تراکم پذیری، جریان پایای تراکم پذیر را توصیف می کند. مارتینز و همکاران^۴ [۸] جریان تراکم پذیر پایا، درون یک خط لوله را بررسی نموده و تحلیلی قابل قبول برای معادلات مهمی که بیانگر پارامترهای کلیدی در فرآیند بهینه سازی می باشند، ارائه کرده اند. آنها از نرم افزار گازنت^۵ که بر مبنای روش استونر کار می کند در جهت حل معادلات سیستم، استفاده کرده اند. دونان و همکارانش^۶ [۹] جهت شبیه سازی سیستم خط لوله از برنامه سیمولینک^۷ استفاده کرده اند. در این شبیه سازی، بررسی پارامترها توسط یک سیستم کنترلی انجام گردیده که از ایستگاه تنظیم فشار اصلی، جریان های با فواصل زیاد در پایین دست جریان را کنترل می کند. اجزاء استفاده شده در این مدل خیلی محدود بوده به این دلیل که سیمولینک در زمینه علوم مرتبط با قابلیت ها و کارایی خطوط لوله، بسیار محدود می باشد. فائر^۸ [۱۰] برای بررسی جریان خطوط لوله معادله ای پیشنهاد کرده و پیش بینی هایی نیز انجام داده است. برای انجام پیش بینی های درست، دانستن جزئیاتی در مورد خط لوله، سیال در حال انتقال و محیط کاری آن، لازم می باشند.

¹ Oyang and Aziz

² Schroeder

³ Tian & Adwumi

⁴ Martinz-Romero et al.

⁵ Gas net

⁶ Doonan et al.

⁷ Simulink

⁸ Fauer

گرستن و همکاران^۱ [۱۱] خطوط لوله گاز طبیعی را در شرایط ساحل^۲ و دریا^۳ و در حالتی که جریان گاز در شرایط پایا و غیر هم دما^۴ است، مدلسازی نموده اند. مطالعات آنها نشان داده است که با در نظر گرفتن انتقال حرارت، میزان انتقال جرم و افت فشار در طول خطوط لوله کاهش می یابند. دونان و همکاران^۵ [۱۲] برای جریان گاز طبیعی درون خطوط لوله نفت و گاز در شرایط پایا و غیر هم دما، پروفیل افت دما را با استفاده از روشهای عددی محاسبه کرده اند. مطالعه آنها نشان می دهد که پارامترهایی از قبیل اثر ژول-تامسون^۶ و افت فشار بر اثر اصطکاک بر روی پروفیل دما تاثیر فراوانی خواهند داشت. نوری بروجردی و ضیائی راد [۱۳] جریان گاز طبیعی پرفشار در خطوط لوله مدفون^۷ را در حالت پایا و غیر هم دما مورد بررسی قرار داده اند. در مطالعه آنها خطوط لوله بین دو ایستگاه تقویت فشار، در نظر گرفته شده و گاز طبیعی به صورت گاز ایده آل مدلسازی گردیده است. فدورف^۸ [۱۴] برای جریان گاز طبیعی تراکم پذیر درون لوله در حالت پایا یک رابطه تحلیلی ارائه کرده است. در مطالعه فدروف فرض جریان غیر هم دما با استفاده از شار حرارتی ثابت روی دیواره لوله مورد بررسی قرار گرفته شده است. با استفاده از این معادله تحلیلی می توان در شرایط مورد نظر، مقدار افت دما و فشار را برای جریان داخل لوله محاسبه نمود. صنایع و محمودی مهر [۱۵] جریان گاز طبیعی در حالت پایا و برای شرایط هم دما و غیر هم دما را با در نظر گرفتن تجهیزات مربوط به خطوط لوله مدلسازی نموده اند. نتایج مطالعات آنها نشان می دهد که هر چه دمای زمین بالاتر باشد میزان دمای گاز، دبی حجمی و افت فشار افزایش پیدا می کنند. همچنین بالا رفتن توان کمپرسورها و افزایش مصرف سوخت از دیگر تاثیرات این عامل می باشند. فرزانه گرد و همکاران [۱۶] با استفاده از روشهای عددی تاثیر تشکیل هیدراتهای گازی را درون خطوط لوله در شبکه

¹ Gersten et al.

² onshore

³ offshore

⁴ Non-isothermal

⁵ Duan et al.

⁶ JouleeThomson effect

⁷ buried gas pipelines

⁸ Fedorov

انتقال گاز مورد بررسی قرار داده اند. آنها خطوط لوله را در حالت پایا مورد تحلیل قرار داده و با فرض خطوط در حالت غیر هم دما محاسبات خود را انجام داده اند. نتایج آنها برای توزیع دما و فشار در طول لوله با مطالعات قبلی خطایی کمتر از ۳٪ داشته و نتایج منطقی تری نسبت به مطالعات قبلی داشته است. لویز-بنیتو و همکاران^۱ [۱۷] جریان گاز طبیعی در خطوط انتقال را با فرض جریان پایا و غیر هم دما مدلسازی نموده اند. روش پیشنهادی آنها نسبت به روش های موجود از سادگی و دقت بالایی برخوردار بوده است. همچنین با استفاده از روش پیشنهادی آنها به راحتی پروفیل های سرعت، فشار و دما در خطوط لوله محاسبه می گردند.

۲-۲-۳ جریان داخل لوله در حالت گذرا

مدلسازی جریان گاز درون خطوط لوله به صورت جریان گذرا نسبت به مدلسازی به صورت پایا، از نتایج منطقی تر و دقیقتری برخوردار می باشد. مطالعات انجام گرفته در این زمینه به شرح زیر می باشند:

وایلی و همکارانش^۲ [۱۸] یک روش تفاضل محدود اختلاف مرکزی ضمنی ارائه داده اند و آن را با روش های دیگر مقایسه نمودند. آنها نشان دادند که روش ضمنی برای گامهای زمانی بزرگ بسیار دقیق می باشد. راجفورد و داپونت^۳ [۱۹] برای شبیه سازی جریان گاز طبیعی در حالت گذار و در شرایط هم دما، از روش اجزاء محدود گالرکین^۴ با اجزاء دو بعدی در مکان - زمان استفاده کرده اند. آنها با استفاده از این روش یک خط لوله انتقال گاز طبیعی را مدلسازی نموده اند. سانتوس^۵ [۲۰] به اهمیت شبیه سازی گذرای گاز طبیعی و فواید پرداختن به این موضوع اشاره نموده است. او خاطر نشان ساخته که این امر نه

¹ López-Benito et al.

² Wylie et al.

³ Rachford&Dupont

⁴ Galerkin Finite Element

⁵ Santos

تنها در بحث آموزش، بلکه به عنوان ابزاری سودمند در شبکه های انتقال گاز طبیعی مورد استفاده قرار گرفته و کاربرد آن در طراحی خطوط لوله گاز را یادآور شده است. درنهایت این محقق جریان گذرای گاز طبیعی در یک خط لوله انتقال را بررسی کرده است. تاناکا^۱ [۲۱] به قسمتهای مهم و موثر یک خط لوله شامل قستهای بیرونی و درونی، از دیدگاه شرایط مرزی بهتر و کاربردی تر، در ورودی و خروجی لوله اشاره نموده است. لونگو^۲ [۲۲] با استفاده از روش کرانک نیکلسن یک حل همدمای برای جریان گذرای گاز طبیعی درون خطوط لوله ارائه کرده است. در این روش با حذف ترم اینرسی در معادلات حاکم و با استفاده از تقریبات خطی، معادلات حاکم مدلسازی شده اند. مطالعات این محقق نسبت به مطالعات گذشته دارای نتایج صحیحی بوده ضمن اینکه ۲۵ درصد کاهش زمان محاسبات را به همراه داشته است.

اسیاداکز^۳ [۲۳] با استفاده از روش رانگ کوتای چیشف^۴ معادلات دیفرانسیل معمولی را حل کرده که از معادلات دیفرانسیل جزئی پارابولیک و روش خط ها بدست آمده بودند. اسیاداکز [۲۴] به شرح بهینه سازی دینامیکی شبکه گاز فشار بالا، با استفاده از تئوری سیستم های سلسله مراتبی پرداخته است. نتایج این مطالعات نشان می دهد که بهینه سازی سیستمهای گاز طبیعی در حالت گذرا، از لحاظ ریاضی بسیار دشوارتر از شبیه سازی آنها در حالت پایا می باشد اما مزیت های شبیه سازی دینامیکی، به مراتب بیشتر است. همچنین این محقق اشاره نموده است که توصیف سیستم های بزرگ با معادلات دیفرانسیل جزئی با سرعتی بالا که امکان بهینه سازی لحظه ای را فراهم آورد بسیار مهم می باشد. کیوچی^۵ [۲۵] از یک روش تفاضل محدود ضمنی، برای حل معادلات جریان تراکم پذیر گاز طبیعی در شرایط گذرا و همدمای استفاده نموده است. او ترم اینرسی را در معادله مومنتوم نادیده گرفته و سپس با در نظر گرفتن تحلیل پایداری نیومن بر معادلات تفاضل محدود، نشان داد که معادلات همواره پایدار هستند. او این روش را با

¹ Tanaka

² Loungo

³ Osiadacz

⁴ Runge-Kutta Chebyshev

⁵ Kiuchi

سایر روشها نظیر روش مشخصه ها، روش لاکس - وندروف^۱ و روش کرانک- نیکلسون، مقایسه و نشان داد که روش ضمنی برای گام های زمانی بزرگ و تعداد قسمتهای کم، دقت بالایی دارد که به علت کاهش زمان محاسبات، در صنایع خطوط لوله گاز بسیار مفید می باشد.

ژو و آدومی^۲ [۲۶] روش جدیدی برای حل جریان گذرای یک بعدی گاز طبیعی در خطوط لوله بدون صرف نظر کردن از ترم اینرسی در معادلات حاکم، ارائه نموده اند. در شبیه سازی جریان گذرای تک فاز در خطوط لوله گاز طبیعی، اغلب مطالعات گذشته ترم اینرسی را در معادله مومنتوم نادیده گرفته اند که نتایج معادلات دیفرانسیل جزئی را خطی نشان می دهد. نتایج مطالعات آنها نشان می دهد نادیده گرفتن ترم اینرسی در معادله مومنتوم، از دقت نتایج شبیه سازی می کاهد. پریس و همکاران^۳ [۲۷] جهت تعیین تاثیر ضریب اصطکاک و ضریب انتقال حرارت کلی جریان در خطوط لوله روشی ارائه نموده اند. مدل ارائه شده در مطالعه آنها بر پایه حل عددی معادلات جریان گذرای یک بعدی بوده که با روش تفاضل محدود با دقت بالا گسسته سازی شده بودند. همچنین مدلسازی بدون لحاظ کردن اثرات آشفتگی در مطالعه آنها انجام گردیده است.

اسیاداکز [۲۸] انواع مدل های جریان گذرای گاز طبیعی درون خطوط لوله در مطالعات گذشته را مقایسه کرده است. حل عددی معادلات دیفرانسیل جزئی که شبکه را دینامیکی مدل می کنند، نیازمند محاسبات ویژه ای است. در مطالعه آنها هدف یافتن یک روش عددی صحیح برای حل مدل ریاضی در بازه زمانی کوتاه می باشد. همچنین، معرفی مدل های گذرای متفاوت و تکنیک های عددی موجود برای حل معادلات گذرا در مطالعه آنها مورد بررسی قرار گرفته است. محیط پور و همکاران^۴ [۲۹] بر اهمیت شبیه سازی در طراحی و بهینه سازی خطوط لوله گاز طبیعی تاکید نموده اند. در مطالعه آنها بیان گردیده است که در

¹ Lax-wendroff

² Zhou&Adwumi

³ Price et al.

⁴ Mohitpour et al.

حالت کلی شبیه سازی های حالت پایا برای بهینه سازی خطوط لوله، نتایج خوبی را به همراه دارند به شرطی که تغییرات شدیدی در دبی جریان رخ دهد. همچنین مطالعات آنها نشان می دهد که شبیه سازی های حالت پایا زمانی برای بهینه سازی خطوط لوله کافی هستند که مشخصه های جریان پایدار باشند. در غیر اینصورت شبیه سازی حالت گذرا بسیار مفید خواهد بود. تورلی و تایللی^۱ [۳۰] قوانین بقا را برای جریان گذرای همدم و تراکم پذیر یک بعدی توسعه داده اند. آنها همچنین چندین روش حل شناخته شده برای تحلیل گذرای خطوط لوله مانند روش مشخصه ها، تفاضلات محدود ضمنی و صریح و روش اجزاء محدود را بررسی نموده اند. مقاله مورد نظر مروری فوق العاده بر روش های حل دارد.

محققان بسیاری جریان گذرای گاز طبیعی درون خطوط لوله را با در نظر گرفتن انتقال حرارت و در شرایط غیر همدم مورد بررسی و تحلیل قرار داده اند. این مطالعات به شرح زیر می باشند:

عیسی و اسپالدینگ^۲ [۳۱] و دین و رینتسما^۳ [۳۲]، معادلات پایه در جریان گذرای یک بعدی تراکم پذیر را با در نظر گرفتن اثرات اصطکاک دیواره و انتقال حرارت توسعه داده اند. عیسی و اسپالدینگ از روش هیبرید^۴ که روش مشخصه ها را با شبکه مستطیلی ترکیب می کند، استفاده کرده اند. مطالعه آنها نشان میدهد که در جریانهای متلاطم در خط لوله، عدد استانتون^۵ و ضریب اصطکاک لوله را می توان ثابت در نظر گرفت. دخنونایا و آدومی^۶ [۳۳] با استفاده از روش کاهش تغییرات کل^۷ جریان گاز طبیعی در حالت گذرا و شرایط غیر همدم را مدلسازی نموده اند. روش ارائه شده در مطالعه آنها نسبت به روش های عددی مرسوم از سادگی بیشتر و دقت قابل قبول برخوردار می باشد. اسیاداکز و چازیکوفسکی^۸ [۳۴]

¹ Thorley&Tiley

² Issa&Spalding

³ Deen&Rrintsema

⁴ Hybrid

⁵ Stanton

⁶ Dukhovnaya and Adewumi

⁷ total variation diminishing (TVD)

⁸ Osiadacz&Chazykowski

جریان گاز طبیعی درون خطوط لوله در حالت گذرا و در شرایط همدما و غیرهمدما را بررسی نموده اند. جریان همدمای گاز با تغییرات سریع دینامیکی و جریان غیر همدما با تغییرات آهسته دینامیکی بررسی گردیده اند. نتایج مطالعه آنها نشان می دهد که تغییرات دمای گاز در اثر رسانش گرمایی بین لوله و خاک آنقدر آهسته هستند که می توان از آن صرف نظر نمود.

هاتی و همکارانش^۱ [۳۵] پروفیل های گذرای فشار و شارجرمی گازطبیعی درون یک خط لوله افقی را بررسی نموده اند. در مطالعه آنها از هشت شرط مرزی متفاوت استفاده شده است. تنتیس و همکاران^۲ [۳۶] جریان گذرای گاز طبیعی را درون خط لوله در شرایط غیر همدما با استفاده از یک روش جدید بر مبنای افت فشار گاز، نرخ دبی جرمی و توزیع دمای گاز درون لوله، بررسی نموده اند. نتایج مطالعه آنها دقت بالا و قابل قبولی برای حالت تغییرات گذاری آهسته و سریع گزارش نموده است. گاتو و هنریکوئز^۳ [۳۷] برای مدلسازی جریان گاز طبیعی در حالت گذرا و در شرایط غیر همدما از ترکیب روش گالرکین و رانچ - کوتا استفاده نموده اند. نتایج مطالعه آنها نشان می دهد که روش پیشنهادی از دقت قابل قبولی نسبت به سایر روش های عددی برخوردار می باشد. عباسپور و چاپمن^۴ [۳۸] با استفاده از روش ضمنی تفاضل محدود جریان گاز طبیعی درون خط لوله را در حالت گذرا و در شرایط غیر همدما مورد بحث و بررسی قرار داده اند. نتایج مطالعات آنها نشان می دهد بررسی حالت غیر همدما درون لوله اطلاعات درست و دقیقتری از شرایط خط لوله گزارش می کند. چازیکوفسکی [۳۹] جریان گاز طبیعی درون خط لوله در حالت گذرا و در شرایط غیر همدما را با استفاده از معادلات حالت مختلف بررسی کرده است. تاثیر معادله حالت مختلف بر افت فشار، توزیع دما و انتقال حرارت در مطالعه اشاره شده، مورد بحث و بررسی قرار گرفته است. همچنین چازیکوفسکی [۴۰] جریان گاز طبیعی درون خطوط لوله در حالت گذرا و در

¹ Hati et al.

² Tentis et al.

³ Gato and Henriques

⁴ Abbaspour and Chapman

شرایط غیر همدم را با در نظر گرفتن تاثیر مدلسازی حرارتی بر توزیع دما و فشار مورد بررسی قرار داده است. نتایج مطالعه مورد نظر نشان می دهد تاثیر انتقال حرارت حتما باید در جریان گذرای داخل لوله در نظر گرفته شود. دورا و فرناندینو^۱ [۴۱] جریان گذرای گاز طبیعی درون خطوط لوله را با استفاده از یک روش جدید بر پایه روش حداقل مربعات خطا مورد بحث و بررسی قرار داده اند. در مدلسازی آنها پارامترهای زمانی و مکانی با یکدیگر کوپل شده و در نهایت با یکدیگر حل شده اند. آنها همچنین تاثیرات حالت گذرای سریع را نیز بررسی نموده اند. ابراهیم زاده و همکاران [۴۲] جریان گاز طبیعی درون خطوط لوله را با استفاده از یک روش جدید^۲ در حالت گذرا و در شرایط همدم و غیر همدم مدلسازی نموده اند. در مطالعه آنها معادلات دیفرانسیل جزئی خط لوله به معادلات دیفرانسل معمولی تبدیل شده و با استفاده از روشهای عددی مدلسازی شده اند. نتایج مطالعه آنها دقت قابل قبولی نسبت به کارهای گذشته داشته و در زمان کمتری نسبت به روشهای دیگر به جواب مطلوب می رسند. نوربهرشتی و قاسمی نژاد [۴۳] معادلات جریان گذرای گاز طبیعی درون خطوط لوله را با استفاده از روشهای دینامیک سیالات محاسباتی مورد بحث و بررسی قرار داده اند. نتایج معتبرسازی مطالعه آنها دقتی در حدود ۴٪ را نسبت به مطالعات گذشته و داده های آزمایشگاهی گزارش کرده است. هلگاکر و همکاران^۳ [۴۴] جریان فشار بالای گاز طبیعی در حالت گذرا را با استفاده از روش تفاضل محدود ضمنی مدلسازی نموده اند. نتایج مطالعه آنها با مطالعات گذشته معتبرسازی شده و نتایج برای محاسبه توزیع افت فشار و دما محاسبه گردیده اند. نتایج نشان دهنده دقت قابل قبول نتایج تحقیقات آنها نسبت به سایر روش ها می باشد. وانگ و همکاران^۴ [۴۵] چهار روش مدلسازی معادلات حاکم برای جریان گذرای درون خطوط لوله گاز طبیعی را معرفی نموده و آنها را از نقطه نظر دقت و کارایی با یکدیگر مقایسه نموده است.

¹ Dorao and Fernandino

² orthogonal collocation method

³ Helgaker et al.

⁴ Wang et al.

۳-۳ جریان گاز طبیعی در شبکه های انتقال و توزیع

مطالعات گذشته مربوط به جریان گاز طبیعی در شبکه های انتقال و توزیع گاز طبیعی، به دو دسته تقسیم شده است:

۳-۳-۱ شبکه های گاز طبیعی در حالت پایا

استونر^۱ [۴۶]، [۴۷] یک روش جدید برای شبیه سازی و حل پایای یک سیستم گاز، شامل خطوط لوله، کمپرسور و شیرهای کنترل ارائه نموده اند. این محقق از روش نیوتن - رافسون^۲ برای حل معادلات غیرخطی استفاده نموده است. برارد و الیاسون^۳ [۴۸] برنامه ای کامپیوتری را توسعه دادند که شبکه انتقال گاز طبیعی را در حالت پایا شبیه سازی کرده و معادلات غیر خطی حاصل را با استفاده از روش نیوتن - رافسون حل نموده است. برنامه آنها چند مزیت دارد: (۱) انتخاب تعداد گره مناسب برای تحلیل جریان (۲) محاسبات ضمنی مصرف گاز کمپرسور (۳) محاسبات تغییرات دمای گاز. هوون و گازونی^۴ [۴۹] به تشریح چند روش رایج در شبیه سازی شبکه گاز طبیعی با استفاده از تکنیک های خطی سازی پرداخته اند. از نتایج مطالعه آنها می توان به سرعت بالای محاسبات و دقت قابل قبول نسبت به دیگر روش ها اشاره نمود. کاستا و همکاران^۵ [۵۰] شبیه سازی شبکه گاز طبیعی را در حالت پایا انجام داده اند. در این شبیه سازی، کمپرسورها و خطوط لوله به عنوان اجزای تشکیل دهنده یک شبکه تراکم پذیر در نظر گرفته شده اند. در مطالعه آنها رابطه ای میان فشار و دمای گاز در طول لوله با نرخ جریان درون لوله بیان گردیده اند. همچنین معادلات جریان و بقای انرژی به طور همزمان حل شده و تفاوت های جریان های

¹ Stoner

² Newton-Raphson

³ Berard and Eliason

⁴ Hoeven&Gasunie

⁵ Costa et al.

آدیاباتیک، همدما و پلی تروپیک بررسی شده اند. کمپرسور نیز به راحتی، با استفاده از رابطه ای میان افزایش فشار و نرخ جرمی جریان گاز مدل گردیده است.

سونگ و همکاران^۱ [۵۱] یک مدل جدید برای شبکه خطوط لوله گاز طبیعی در حالت پایا ارائه داده اند. در شبیه سازی آنها، یک مطالعه پارامتری انجام شده است تا نقش هریک از پارامترها مانند فشار، نرخ جریان و قطر خط لوله، در بهینه سازی شبکه به تنهایی مورد بررسی قرار گیرد. از نتایج مطالعه آنها می توان به رابطه مناسبی بین فشار و قطر لوله اشاره نمود. مرکادو و همکارانش^۲ [۵۲] تکنیکی برای بهینه سازی شبکه انتقال گاز طبیعی ارائه داده اند. نتایج حاصل از مطالعه آنها، برای جریان پایای تراکم پذیر خطوط لوله معتبر می باشند. متغیرهای مورد بررسی در این مطالعه، نرخ جرم عبوری و فشار گاز در هر گره می باشند. لوری و گریونتین^۳ [۵۳] از روش حل عددی و الگوریتم شناخته شده سیمپل^۴ در روش پاتانکار^۵، استفاده نموده تا مسائل مربوط به جریان گاز طبیعی در شبکه های خطوط لوله را مدلسازی نمایند. آنها در این مطالعه به معادله تصحیح فشار، پایداری الگوریتم و پارامترهای همگرایی نیز توجه داشته اند. اسزوپلیک^۶ [۵۴] با استفاده از مدل های ریاضی شبکه توزیع گاز طبیعی یک شهر در لهستان را شبیه سازی کرده است. اطلاعاتی از قبیل سرعت، افت فشار و شبیه سازی جریان گاز در شبکه مورد مطالعه از نتایج ارائه شده در مطالعه مورد نظر می باشند.

¹ Sung et al.

² Rios-Mercado et al.

³ Greyventein&Lauri

⁴ Simple

⁵ Patankar

⁶ Szoplik

۳-۳-۲ شبکه های گاز طبیعی در حالت گذرا

لواندوفسکی^۱ [۵۵] روشی را برای مدل سازی شبکه انتقال گاز طبیعی در حالت گذرا ارائه داده است که با استفاده از کتابخانه C^{++} به مدل سازی ترکیبات و شبیه سازی سیستم های دینامیکی می پردازد. این محقق نشان داده که مدل یک شبکه خطوط لوله گاز را می توان با یک گراف مستقیم نشان داد. هر قسمت از این گراف قسمتی از خطوط لوله را نشان می دهد و با معادله دیفرانسیلی که بیانگر جریان گاز از آن قسمت است، نمایش داده می شود. گره های روی گراف بر گره های شبکه خطوط لوله گاز منطبق می باشند. تائو و تی^۲ [۵۶] و کی و تی^۳ [۵۷] شبکه خطوط لوله گاز در حالت گذرا را با مدارهای الکتریکی مقایسه نموده اند. ایده اصلی این رویکرد این است که قسمت های مختلف شبکه خطوط لوله گاز، با استفاده از مقاومت های الکتریکی شبیه سازی می شوند. در شبکه های خطوط لوله، هندسه لوله با اجزاء مقاومتی و اثرات تراکم پذیری سیال از طریق اجزاء خازنی مدل میشوند. آنها با استفاده از روش اسیداکز معادلات دیفرانسیل جزئی را به معادلات دیفرانسیل معمولی تبدیل کرده اند که کاهش زمان محاسبات را به همراه داشته است. ردی و همکاران^۴ [۵۸] برای مدلسازی شبکه های گاز طبیعی در حالت گذرا یک روش ریاضی را پیشنهاد داده اند. روش پیشنهادی در مطالعه آنها با روش تفاضلات محدود مقایسه شده که نسبت به این روش از سادگی بیشتری برخوردار می باشد. گونزالز و همکاران^۵ [۵۹] با استفاده از سیمولینک نرم افزار متلب^۶ شبکه توزیع گاز طبیعی را در حالت گذرا و همدمای بررسی کرده اند. نتایج کار آنها در مقایسه با کار کی و تی خطای کمتری نسبت به داده های آزمایشگاهی داشته است. های و همکاران^۷ [۶۰] با استفاده از روش حجم محدود روشی برای شبکه توزیع گاز طبیعی را مورد

¹ Lewandowski

² Tao and Ti

³ Ke and Ti

⁴ Reddy et al.

⁵ Gonza ´lez et al.

⁶ MATLAB Simulink

⁷ Hai et al.

بررسی و تحلیل قرار داده اند. آنها با گسسته سازی معادلات حاکم مانند پیوستگی و مومنتم برای شبکه های گاز، این شبکه را تحلیل و نتایج بدست آمده را با نتایج داده های آزمایشگاهی موجود مقایسه نموده اند. نتایج آنها نشان می دهد محاسبات و روش پیشنهادی آنها خطایی حدود ۱/۱۵٪ نسبت به داده های آزمایشگاهی دارند. بهبهانی نژاد و باقری [۶۱] با استفاده از سیمولینک نرم افزار متلب، جریان گذرا و همدمای گاز طبیعی درون خطوط لوله و شبکه های انتقال را مدلسازی نموده اند. روش ارائه شده در مطالعه آنها با روشهای تفاضل محدود مورد مقایسه قرار گرفته است. نتایج مطالعه آنها نشان از دقیقتر و کارآمدتر بودن روش ارائه شده نسبت به سایر روش های تفاضل محدود می باشد. بهبهانی نژاد و شکاری [۶۲] با استفاده از روش کاهش درجه^۱، جریان در شبکه های گاز طبیعی در حالت گذرا را مدلسازی نموده اند. روش ارائه شده در مطالعه آنها از نظر دقت با سایر روشهای عددی برابری کرده و در بعضی از موارد کارایی بهتری نسبت به سایر روش ها دارد. علامیان و همکاران^۲ [۶۳] با استفاده از یک روش فضای حالت^۳ خطوط لوله و شبکه توزیع گاز طبیعی را در حالت گذرا مورد تحلیل و بررسی قرار داده اند. در حقیقت روش مورد مطالعه آنها، یک روش سیمولینک و یک روش کنترلی برای محاسبه حالت گذرا می باشد. همچنین آنها از دو روش سعی و خطا و روش مستقیم شبکه مورد نظر را مورد بررسی قرار داده اند. نتایج بدست آمده از روش آنها نشان دهنده مطابقت خوب روش ارائه شده نسبت به مطالعات گذشته می باشد. احمدیان بهروز و بزرگمهری [۶۴] جریان در شبکه های انتقال گاز طبیعی را در حالت گذرا و شرایط غیر هم دما با استفاده از یک روش جدید و کارآمد مدلسازی نموده اند. نتایج مطالعه آنها نشان می دهد که روش پیشنهادی، دارای سادگی بیشتر نسبت به سایر روش های عددی برخوردار بوده و از دقت قابل قبولی برخوردار می باشد.

¹ reduced-order model

² Alamian et al.

³ State space model

۳-۴ مطالعات مربوط به پیش بینی مصرف گاز طبیعی

بررسی در مطالعات گذشته نشان می دهد که برای پیش بینی تقاضای انرژی و گاز طبیعی سه مدل وجود دارد: مدل سری های زمانی^۱، مدل رگرسیون^۲ و مدل شبکه عصبی مصنوعی^۳ [۶۵]، [۶۶]. با توجه به استفاده از مدل شبکه های عصبی در پژوهش پیش رو، مطالعاتی که در این زمینه انجام گردیده اند به شرح زیر ارائه شده است:

خانزاد و همکاران^۴ [۶۷] یک شبکه عصبی مصنوعی دو مرحله ای را با یکدیگر ترکیب نموده و با استفاده از آن مصرف گاز طبیعی را پیش بینی نموده اند. پتکنیک و همکاران^۵ [۶۸] به بررسی انواع مدل های شبکه عصبی برای پیش بینی مصرف گاز طبیعی در کراوسی پرداخته اند. نتایج مطالعات آنها نشان می دهد که مدل خطی تطبیقی^۶ نسبت به سایر روش ها در این زمینه نتایج بهتری ارائه می کند. یو و ژائو^۷ [۶۹] با استفاده از الگوریتم ژنتیک^۸ و مدل شبکه عصبی با الگوریتم پس انتشار خطا^۹، مصرف گاز طبیعی را پیش بینی نموده اند. تعدادی از محققین مصرف گاز طبیعی را با استفاده از شبکه های عصبی در کشور ترکیه برای شهرهای آنکارا [۷۰] و استانبول [۷۱] و [۷۲] پیش بینی نموده اند. کواچیچ و سارلر^{۱۰} [۷۳] با استفاده از ترکیب الگوریتم ژنتیک و شبکه های عصبی مصرف گاز طبیعی برای یک نیروگاه را پیش بینی کرده اند. اسزوپلیک [۷۴] با استفاده از شبکه های عصبی چند لایه، مصرف گاز طبیعی در یک شهر کشور

¹ time series (TS)

² regression model (RM)

³ artificial neural network (ANN)

⁴ Khotanzad et al.

⁵ Potočník et al.

⁶ Adaptive linear model

⁷ Yu and Xu

⁸ genetic algorithm

⁹ back propagation (BP)

¹⁰ Kovačić and Šarler

لهستان را پیش بینی نموده است. جزئیات شبکه عصبی از جمله تعداد لایه های مخفی در شبکه با استفاده از روش سعی و خطا محاسبه گردیده اند.

۳-۵ نتیجه گیری

در این فصل مطالعات گذشته در مورد جریان درون خطوط لوله گاز طبیعی، جریان گاز طبیعی در شبکه های توزیع و تغذیه و مطالعات مربوط به پیش بینی مصرف گاز طبیعی در شبکه های گاز طبیعی مورد بحث و بررسی قرار گرفته است. با توجه به بررسی های صورت گرفته، مطالعات مربوطه در زمینه شبکه های گاز طبیعی در حالت گذرا تنها محدود به یک شبکه ساده خاص بوده و محققین سعی کرده اند شبکه مورد نظر را با ارائه روشهای مختلف مورد تحلیل قرار دهند. همچنین مطالعات شبکه های گاز طبیعی منحصرأ مربوط به شبکه های انتقال گاز طبیعی با فشار بالای جریان گاز طبیعی بوده است که با افزایش مصرف گاز طبیعی و کاهش فشار گاز طبیعی در این نوع شبکه ها، حالت بحرانی افت فشار برای این دست از شبکه ها به ندرت اتفاق می افتد. مصرف گاز طبیعی در بسیاری از مطالعات گذشته صرفأ حالت تئوری داشته و از واقعیت بسیار دور می باشد. با توجه به اهمیت مصرف گاز طبیعی در تحلیل شبکه ها (شرایط مرزی شبکه)، این مورد نیز در مطالعات گذشته به طور دقیق مورد بررسی قرار نگرفته است. موارد اشاره شده می توانند به عنوان ضعف مطالعات گذشته، بر شمرده شوند. با توجه به مطالب مطرح شده، در این پژوهش سعی بر آن است که ضعف های مطالعات قبلی پوشانده شوند، براین اساس نوآوری های کارهای پیش رو در این پژوهش را می توان به صورت زیر بیان نمود:

تحلیل شبکه های توزیع و تغذیه گاز طبیعی در حالت گذرا با یک روش پیشنهادی به منظور مدلسازی شبکه با در نظر گرفتن نرخ جریان گاز انباشته شده در خطوط لوله، در این پژوهش ارائه گردیده است. مدلسازی و پیش بینی مصرف گاز طبیعی به عنوان شرط مرزی برای مدلسازی شبکه در این پژوهش با

استفاده از روش شبکه های عصبی انجام گردیده و پیش بینی مصرف گاز طبیعی با در نظر گرفتن پارامترهای موثر، بسیار نزدیک به واقعیت می باشد. مدلسازی و تحلیل شبکه های توزیع و تغذیه واقعی برای یک شهر نمونه نیز در این پژوهش مورد بررسی قرار گرفته شده است. شبکه های مورد نظر شامل شبکه های شاخه ای، حلقوی و مختلط می باشند. همچنین تاثیرات دمایی و شرایط بحرانی در شبکه های توزیع و تغذیه مورد بحث و بررسی قرار گرفته است.

جدول ۱-۳ خلاصه ای از مطالعات گذشته، نقاط ضعف و اقدامات صورت گرفته در این پژوهش

نام مرجع	مطالعات انجام شده در این مرجع	نقاط ضعف این مرجع	اقدامات صورت گرفته در پژوهش حاضر
اسیاداکز [۲۸]	مطالعات اولیه در مورد شبکه های گاز طبیعی	تحلیل خیلی ساده	تحلیل شبکه ها با حل معادلات حاکم و ارائه روشی کلی برای تحلیل این نوع شبکه ها
تائو و تی [۵۶]، کی و تی [۵۷]	استفاده از مدارهای الکتریکی برای تحلیل شبکه های گاز طبیعی	خطایی حدود ۲٪ در تحلیل محاسبات، شبیه سازی تنها یک شبکه،	خطایی کمتر از ۱٪ نسبت به داده های آزمایشگاهی، تحلیل چند شبکه توزیع و تغذیه
گونزالز و همکاران [۵۹]	استفاده از سیمولینک نرم افزار متلب برای تحلیل شبکه های گاز طبیعی	شبیه سازی یک شبکه، فرض شرایط هم دما برای خطوط و شبکه خطوط، تحلیل شبکه های فشار بالا	تحلیل چند شبکه توزیع و تغذیه، حل معادلات حاکم در حالت غیر هم دما، تحلیل شبکه های کم فشار
های و همکاران [۶۰]	استفاده از روش حجم محدود برای تحلیل خطوط	شبیه سازی یک شبکه، فرض شرایط هم دما برای خطوط و شبکه خطوط، تحلیل شبکه های فشار بالا	استفاده از روش عددی ساده و دقیق، تحلیل چند شبکه توزیع و تغذیه، حل معادلات حاکم در حالت غیر هم دما، تحلیل شبکه های کم فشار
علامیان و همکاران [۶۳]	استفاده از یک روش فضای حالت	استفاده از یک روش ریاضی پیچیده، تحلیل یک شبکه ساده، فرض جریان هم دما، تحلیل شبکه های فشار بالا	استفاده از روش عددی ساده و دقیق، تحلیل چند شبکه توزیع و تغذیه، حل معادلات حاکم در حالت غیر هم دما،

تحلیل شبکه های کم فشار			
استفاده از روش عددی ساده و دقیق، تحلیل چند شبکه توزیع و تغذیه، حل معادلات حاکم در حالت غیر هم دما، تحلیل شبکه های کم فشار	تحلیل یک شبکه ساده با یک راه حل پیچیده، فرض جریان هم دما، تحلیل شبکه های فشار بالا	روش کاهش درجه و سیمولینک نرم افزار متلب برای تحلیل شبکه های گاز طبیعی	بهبهانی نژاد و باقری [۶۱]، بهبهانی نژاد و شکاری [۶۲]
استفاده از روش عددی ساده و دقیق، تحلیل چند شبکه توزیع و تغذیه، حل معادلات حاکم در حالت غیر هم دما، تحلیل شبکه های کم فشار	تحلیل یک شبکه ساده، فرض جریان هم دما، تحلیل شبکه های فشار بالا	استفاده از یک روش جدید و کارآمد برای تحلیل شبکه های گاز طبیعی	احمدیان بهروز و بزرگمهری [۶۴]
در نظر گرفتن تمامی جمله های معادلات حاکم، فرض جریان غیر هم دما برای خطوط لوله، تحلیل شبکه های کم فشار	صرف نظر کردن از چند جمله معادلات حاکم، فرض جریان هم دما برای خطوط لوله، تحلیل یک شبکه فشار بالا	حل معادلات حاکم برای تحلیل شبکه شاخه ای	کیوچی [۲۵]

۴- فصل چهارم: مدلسازی شبکه های توزیع و

تغذیه گاز طبیعی

۴-۱ مقدمه

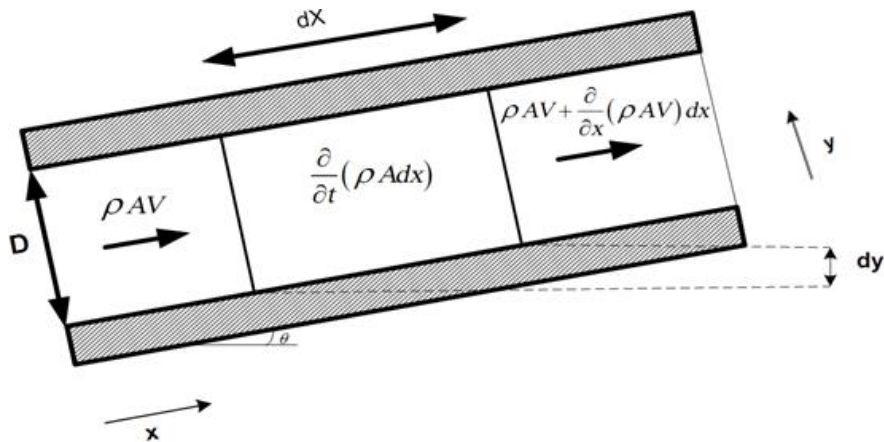
برای مدلسازی شبکه های توزیع و تغذیه گاز طبیعی ابتدا لازم است گاز طبیعی را درون خطوط لوله مدلسازی کرده و توزیع فشار، دبی و دمای گاز طبیعی را درون خطوط لوله محاسبه نماییم. در این فصل ابتدا با استفاده از مدلسازی معادلات حاکم مانند: پیوستگی، مومنتوم و انرژی، جریان گاز طبیعی درون خطوط لوله مدلسازی شده است. در نهایت با استفاده از نتایج مدلسازی خطوط لوله، روش مدلسازی شبکه های توزیع و تغذیه گاز طبیعی ارائه گردیده است.

۴-۲ مدلسازی جریان گاز طبیعی درون خطوط لوله

در این بخش مدلسازی جریان گاز طبیعی درون خطوط لوله ارائه گردیده است. معادلات حاکم برای جریان یک بعدی گذرای تراکم پذیر گاز طبیعی درون خطوط لوله با در نظر گرفتن اثرات اصطکاک دیواره و انتقال حرارت به شرح زیر می باشند:

۴-۲-۱ معادله پیوستگی

مطابق با حجم کنترل نشان داده شده در شکل ۴-۱، معادله پیوستگی برای جریان درون لوله به صورت زیر بیان می گردد:



شکل ۱-۴ حجم کنترل برای معادله پیوستگی [۷۵]

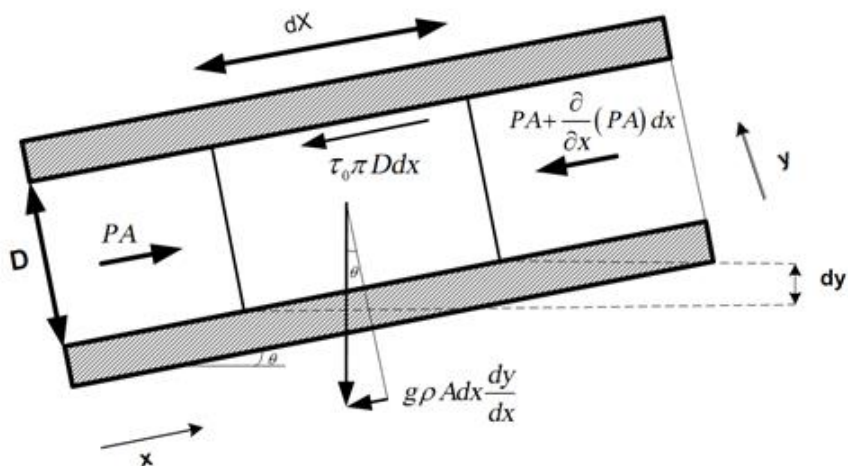
$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho v) = 0 \quad (۱-۴)$$

که در آن، ρ چگالی و v نیز سرعت سیال در جهت محور لوله می باشند.

۲-۲-۴ معادله مومنتوم

با در نظر گرفتن نیروهای وارد بر حجم کنترل نشان داده در شکل ۲-۴، معادله مومنتوم بدین صورت نوشته می شود:

$$PA - PA - \frac{\partial}{\partial x}(PA)dx - \tau_0 \pi D dx - \rho g A \left(\frac{dy}{dx} \right) dx = \rho A \left(v \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial t} \right) dx \quad (۲-۴)$$



شکل ۲-۴ حجم کنترل برای معادله مومنوم [۷۵]

پارامتر τ_0 تنش برشی بین سیال و دیواره لوله می باشد که به صورت زیر تعریف می گردد :

$$\tau_0 = \frac{f \rho v |v|}{8} \quad (۳-۴)$$

متغیر f ضریب اصطکاک مودی می باشد. با استفاده از تعریف $\frac{dy}{dx} = \sin \theta$ خواهیم داشت:

$$-A \frac{\partial P}{\partial x} - \frac{f \rho v |v|}{8} \pi D - \rho g A \sin \theta = \rho A \left(v \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial t} \right) \quad (۴-۴)$$

و همچنین با تعریف:

$$w = \frac{f \rho v |v|}{8} \pi D \quad (۵-۴)$$

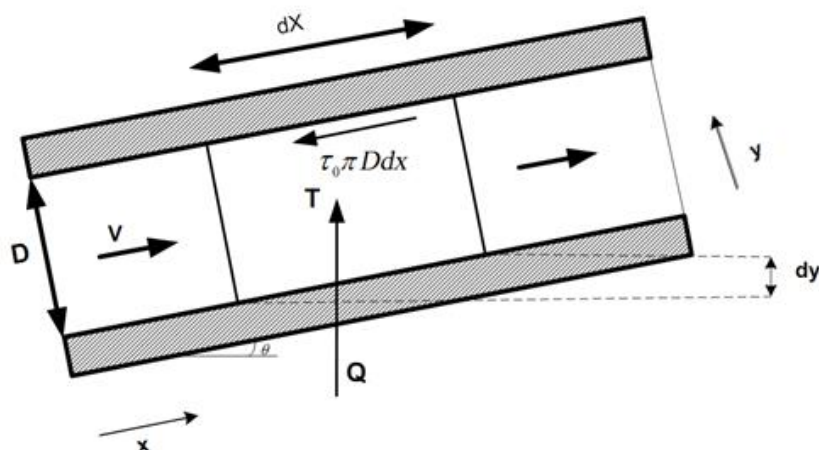
در نهایت فرم نهایی معادله مومنوم به صورت زیر ارائه می شود:

$$\rho \frac{\partial v}{\partial t} + \rho v \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial P}{\partial x} = -\frac{w}{A} - \rho g \sin \theta \quad (۶-۴)$$

۳-۲-۴ معادله انرژی

فرم پایه معادله انرژی برای شکل ۳-۴، از قانون اول ترمودینامیک [۷۶] نوشته می شود:

$$Q = q\rho A dx = \frac{\partial}{\partial t} \left[\rho A dx \left(u + \frac{v^2}{2} + gy \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x} \left[\rho v A \left(u + \frac{v^2}{2} + \frac{P}{\rho} + gy \right) \right] dx \quad (۷-۴)$$



شکل ۳-۴ حجم کنترل برای معادله انرژی [۷۵]

با استفاده از معادله مومنتوم و معادله پیوستگی و با تعریف h به عنوان آنتالپی، معادله انرژی به صورت زیر تبدیل می گردد:

$$\rho \frac{Dh}{Dt} + \rho v \frac{\partial h}{\partial x} - \frac{\partial P}{\partial x} - v \frac{\partial P}{\partial x} = \frac{\Omega + wv}{A} \quad (۸-۴)$$

که در این معادله h آنتالپی ویژه، $\Omega = q\rho A$ گرمای وارده به لوله در واحد طول و در واحد زمان و A سطح مقطع لوله در جهت عمود بر جهت جریان می باشند.

۴-۲-۴ بازنویسی معادلات حاکم بر حسب پارامترهای وابسته

معادلات حاکم جریان درون خطوط لوله به راحتی قابل حل نبوده بنابراین، این معادلات باید با استفاده از معادله حالت، بر حسب متغیرهای وابسته دما، فشار و سرعت نوشته شوند. معادله حالت برای یک گاز، متغیرهای P ، T و ρ را به هم مرتبط می سازد. معادلات حالت در فرم کلی عبارتست از :

$$\rho = \frac{P}{ZRT} \quad (۹-۴)$$

در اینجا Z ضریب تراکم پذیری بوده و تابعی از P و T می باشد. R ثابت ویژه گاز مربوطه می باشند. برای محاسبه ضریب تراکم پذیری Z ، در این پژوهش از معادله حالت AGA8 استفاده شده است [۷۷].

برای تعریف h بر حسب P ، T و Z ، موران و همکاران^۱ [۷۸] رابطه ای ترمودینامیکی برای آنتالپی ارائه داده اند :

$$dh = C_p dT + \left\{ \frac{T}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_P + 1 \right\} \frac{dP}{\rho} \quad (۱۰-۴)$$

با جایگذاری روابط گفته شده می توان معادلات حاکم را به صورت زیر بازنویسی نمود:

¹ Moran et al.

$$\left(\frac{\partial P}{\partial t}\right) + v \left(\frac{\partial P}{\partial x}\right) + \rho V_w^2 \left(\frac{\partial v}{\partial x}\right) = \frac{V_w^2}{C_p T} \left[1 + \frac{T}{Z} \left(\frac{\partial Z}{\partial T}\right)_P\right] \frac{\Omega + wv}{A} \quad (۱۱-۴)$$

$$\left(\frac{\partial v}{\partial t}\right) + v \left(\frac{\partial v}{\partial x}\right) + \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial P}{\partial x}\right) = -\frac{w}{A\rho} - g \sin \theta \quad (۱۲-۴)$$

$$\left(\frac{\partial T}{\partial t}\right) + v \left(\frac{\partial T}{\partial x}\right) + \frac{V_w^2}{C_p} \left[1 + \frac{T}{Z} \left(\frac{\partial Z}{\partial T}\right)_P\right] \left(\frac{\partial v}{\partial x}\right) = \frac{V_w^2}{C_p P} \left[1 - \frac{P}{Z} \left(\frac{\partial Z}{\partial P}\right)_T\right] \frac{\Omega + wv}{A} \quad (۱۳-۴)$$

V_w در معادلات بالا معرف سرعت آیزنتروپیک موج (سرعت صوت) می باشد که به صورت زیر تعریف می گردد:

$$V_w = \sqrt{\frac{ZRT}{\left\{1 - \frac{P}{Z} \left(\frac{\partial Z}{\partial P}\right)_T - \frac{P}{\rho C_p T} \left[1 + \frac{T}{Z} \left(\frac{\partial Z}{\partial T}\right)_P\right]^2\right\}}} \quad (۱۴-۴)$$

با توجه به اهمیت دبی در خطوط لوله و دانستن این موضوع که دانستن دبی جرمی جریان در هر نقطه از خطوط لوله نسبت به سرعت گاز در آن نقطه کاربردی تر می باشد، می توان معادلات حاکم را بر حسب دبی جرمی بازنویسی نمود. رابطه سرعت و دبی جرمی به صورت زیر بیان می گردد:

$$v = \frac{\dot{m}}{\rho A} = \frac{\dot{m} Z R T}{P A} \quad (۱۵-۴)$$

سپس با جایگذاری دبی جرمی به جای سرعت در معادلات حاکم، معادلات حاکم به فرم زیر بازنویسی می گردند:

$$\frac{\partial P}{\partial t} + \frac{\dot{m}ZRT}{PA} \left[1 - \frac{V_w^2}{ZRT} \left(1 - \frac{P}{Z} \left(\frac{\partial Z}{\partial P} \right)_T \right) \right] \frac{\partial P}{\partial x} + \dot{m}V_w^2 \quad (۱۶-۴)$$

$$\left(\frac{1}{\dot{m}} \frac{\partial \dot{m}}{\partial x} + \frac{1}{T} \left(1 + \frac{T}{Z} \left(\frac{\partial Z}{\partial T} \right)_P \right) \frac{\partial T}{\partial x} \right) = \frac{V_w^2}{C_p} \left\{ 1 + \frac{T}{Z} \left(\frac{\partial Z}{\partial T} \right)_P \right\} \left(\frac{\Omega}{A} + \frac{\dot{m}ZRT}{PA^2} w \right)$$

$$\begin{aligned} \frac{ZRT}{AP^2} \left\{ P \left(\frac{\partial \dot{m}}{\partial t} + \frac{\dot{m}ZRT}{PA} \frac{\partial \dot{m}}{\partial x} \right) - \dot{m} \left(1 - \frac{P}{Z} \left(\frac{\partial Z}{\partial P} \right)_T \right) \times \left(\frac{\partial P}{\partial t} + \frac{\dot{m}ZRT}{PA} \frac{\partial P}{\partial x} \right) \right. \\ \left. + \frac{P\dot{m}}{T} \left(1 + \frac{T}{Z} \left(\frac{\partial Z}{\partial T} \right)_P \right) \times \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\dot{m}ZRT}{PA} \frac{\partial T}{\partial x} \right) \right\} + \frac{ZRT}{P} \frac{\partial P}{\partial x} = - \frac{wZRT}{PA} - g \sin \theta \end{aligned} \quad (۱۷-۴)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial T}{\partial t} + \frac{V_w^2}{C_p} \left(1 + \frac{T}{Z} \left(\frac{\partial Z}{\partial T} \right)_P \right) \frac{ZRT}{AP^2} \left[P \frac{\partial \dot{m}}{\partial x} - \dot{m} \left(1 - \frac{P}{Z} \left(\frac{\partial Z}{\partial P} \right)_T \right) \frac{\partial P}{\partial x} \right] + \frac{\dot{m}ZRT}{PA} \\ \times \left(1 + \frac{V_w^2}{C_p T} \left(1 + \frac{T}{Z} \left(\frac{\partial Z}{\partial T} \right)_P \right)^2 \right) \frac{\partial T}{\partial x} = \frac{V_w^2}{C_p T} \left\{ 1 - \frac{P}{Z} \left(\frac{\partial Z}{\partial P} \right)_T \right\} \left(\frac{\Omega}{A} + \frac{\dot{m}ZRT}{PA^2} w \right) \end{aligned} \quad (۱۸-۴)$$

جزئیات بیشتر در مورد معادلات حاکم و بدست آوردن معادلات نهایی به طور مفصل در پیوست الف بیان شده است.

۴-۲-۵ روابط مربوط به ضریب اصطکاک

یکی از پارامترهای مهم در مدلسازی جریان گاز طبیعی درون خطوط لوله، ضریب اصطکاک می باشد. مقاومت دیواره لوله در برابر جریان از عوامل ابتدایی محدود کننده فشار و ظرفیت انتقال گاز توسط خطوط لوله می باشد. جریان گاز طبیعی در خطوط لوله، همیشه باعث تبدیل مقداری از انرژی مکانیکی به گرما می شود. این مقدار که کار تلف شده نامیده می شود، نشانگر تمام اتلاف های انرژی در اثر برگشت ناپذیریهای جریان سیال است. این برگشت ناپذیری ها در حالت جریان تک فاز، شامل اتلاف های سایشی

(اصطکاک)، اتلاف های درونی در اثر تاثیرات لزجت و اتلاف های مرتبط با زبری دیواره داخلی خطوط لوله هستند. در شرایط جریان آشفته که همیشه در خطوط لوله انتقال گاز وجود دارد، طبیعت جریان اجازه پیش بینی تئوری میزان اتلاف های انرژی در سیستم های واقعی را نمی دهد؛ بنابراین میزان این اتلاف ها را می بایست با آزمایشهای واقعی تعیین نمود و سپس به صورت تابعی از متغیرهای جریان، به صورت یک رابطه بیان کرد. معمولاً کار تلف شده را با استفاده از یک ضریب اصطکاک و آنالیز ابعادی محاسبه می کنند. می توان نشان داد که ضریب اصطکاک، تابعی از عدد رینولدز و زبری نسبی لوله است [۷۵].

عدد رینولدز به صورت یک عدد بدون بعد به صورت زیر بیان می گردد:

$$Re = \frac{\rho v D}{\mu} \quad (۱۹-۴)$$

که در آن D قطر لوله، v سرعت سیال، ρ چگالی سیال و μ لزجت سیال می باشد.

زبری نسبی به صورت زبری مطلق به قطر داخلی لوله تعریف می شود:

$$e_D = \frac{\varepsilon}{D} \quad (۲۰-۴)$$

D قطر داخلی لوله و ε زبری مطلق می باشند. مقادیر زبری مطلق برای جنس مختلف لوله های گاز طبیعی در مرجع [۷۵] آورده شده است.

برای لوله های صاف و در گستره های متفاوت از اعداد رینولدز، رابطه ضریب اصطکاک به صورت کلی زیر ارائه شده است:

$$f = a Re^{-b} \quad (۲۱-۴)$$

که ضرایب در جدول ۴-۱ آورده شده است:

جدول ۱-۴ ضرایب معادله (۲۱-۴) برای محاسبه ضریب اصطکاک در لوله های صاف

Parameter	Blasius [81]	Modified (1/9) th Powe Law [80]	Panhandle [79]
a	0.079	0.046	0.02118
b	0.25	0.2	0.1461
Reynolds Range	3000-(1e+5)	(2e+4)-(1+e6)	(2e+6)-(1+e8)

برای محاسبه ضریب اصطکاک برای جریان درون لوله روابط فراوانی توسط محققین ارائه گردیده شده است. به عنوان مثال برای لوله های زیر، در تمامی گستره های عدد رینولدز روابط ارائه شده در جدول ۲-۴، پیشنهاد شده است:

جدول ۲-۴ روابط ضریب اصطکاک برای لوله های زیر

Serghides (I) [82]	$f = 0.25 \left[A - \frac{(B - A)^2}{C - 2B + A} \right]^{-2}$ $A = -2 \log \left(\frac{\varepsilon}{3.7D_i} + \frac{12}{\text{Re}} \right), B = -2 \log \left(\frac{\varepsilon}{3.7D_i} + \frac{2.51A}{\text{Re}} \right)$ $C = -2 \log \left(\frac{\varepsilon}{3.7D_i} + \frac{2.51B}{\text{Re}} \right)$
Serghides (II) [82]	$f = 0.25 \left[4.781 - \frac{(A - 4.781)^2}{B - 2A + 4.781} \right]^{-2}$
Zigrang-Sylvester (I) [83]	$f^{-0.5} = -4 \log \left[\frac{\varepsilon}{3.7D_i} - \frac{5.02}{\text{Re}} \log \left(\frac{\varepsilon}{3.7D_i} + \frac{13.0}{\text{Re}} \right) \right]$
Zigrang-Sylvester (II) [83]	$f^{-0.5} = -4 \log \left\{ \frac{\varepsilon}{3.7D_i} - \frac{5.02}{\text{Re}} \log \left[\frac{\varepsilon}{3.7D_i} - \frac{5.02}{\text{Re}} \log \left(\frac{\varepsilon}{3.7D_i} + \frac{13}{\text{Re}} \right) \right] \right\}$

Chen [84]	$f^{-0.5} = -4 \log \left\{ 0.2698 \frac{\varepsilon}{D_i} - \frac{5.0452}{Re} \times \log \left[0.3539 \left(\frac{\varepsilon}{D_i} \right)^{1.1098} + \frac{5.8506}{Re^{0.8981}} \right] \right\}$
Haaland [85]	$f^{-0.5} = - \left(\frac{1.8}{n} \right) \log \left[\left(\frac{\varepsilon}{3.7 D_i} \right)^{1.11n} + \left(\frac{6.9}{Re} \right)^n \right]; \text{ where } n=3$

در صنعت گاز طبیعی برای محاسبه ضریب اصطکاک برای جریان درون لوله با توجه به فشار جریان گاز طبیعی و گستره عدد رینولدز، از روابط گوناگونی استفاده می شود. این روابط در جدول ۳-۴ ارائه گردیده است:

جدول ۳-۴ روابط ضریب اصطکاک استفاده شده در صنایع گاز طبیعی [۸۶]

نوع معادله	رابطه ضریب اصطکاک	محدوده استفاده
Weymouth	$f = \frac{0.032}{D^{1/3}}$	فشار بالا، دبی جریان بالا و قطرهای بزرگ سیستم های انتقال
Panhandle A	$f = \frac{0.085}{Re^{0.147}}$	$5000 < Re < 11 \times 10^6$
Panhandle B	$f = \frac{0.015}{Re^{0.0392}}$	$4000 < Re < 11 \times 10^6$
AGA	$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log_{10} \left(\frac{2.825}{Re \sqrt{f}} \right)$	$Re > 5000$
Colebrook-White	$\frac{1}{\sqrt{f}} = 1.74 - 2 \log_{10} \left(\frac{2\varepsilon}{D} + \frac{18.7}{Re \sqrt{f}} \right)$	$Re > 4000$
IGT	$f = \frac{0.1874}{Re^{1/5}}$	شبکه های توزیع و تغذیه گاز طبیعی

خطوط لوله گاز طبیعی	$f = \frac{0.356}{Re^{0.26}}$	Mueller
خطوط لوله گاز طبیعی و هوای فشرده	$f = \frac{0.24}{(Re \cdot D)^{0.142}}$	Fritzsche
فشارهای کمتر 1 psig	$f = \frac{1 + \frac{91.44}{D} + 0.0012D}{88.5}$	Spitzglass

۴-۲-۶ مدل سازی انتقال حرارت

به طور کلی رابطه انتقال حرارت برای جریان گاز طبیعی درون خطوط لوله به صورت زیر تعریف می شود:

$$Q = UA\Delta T \quad (۴-۲۲)$$

در این حالت برای محاسبه انتقال حرارت، محاسبه ضریب انتقال حرارت کلی U ، بسیار مهم می باشد. مکانیزم های انتقال حرارت برای یک خط لوله به صورت زیر تعریف می شوند:

۴-۲-۶-۱ ضریب انتقال حرارت بین گاز درون لوله و دیواره لوله

در این حالت ابتدا عدد ناسلت به صورت زیر تعریف می شود:

$$Nu = \frac{h_i D_i}{k_g} \quad (۴-۲۳)$$

جائیکه h_i ضریب انتقال حرارت گاز درون لوله، k_g ضریب هدایت حرارتی گاز درون لوله و D_i قطر داخلی لوله می باشد. روابط متعددی برای محاسبه عدد ناسلت جریان گاز طبیعی درون لوله ارائه شده است. پرکاربردترین این روابط در جدول ۴-۴ بیان گردیده است:

جدول ۴-۴ رابطه عدد ناسلت برای گاز درون لوله

محدوده استفاده	رابطه ناسلت	ارائه دهنده
$13 \leq Re \leq 2300$ $0.48 \leq Pr \leq 16700$ $0.0044 \leq \frac{\mu}{\mu_w} \leq 9.75$	$Nu = 1.86 \left(\frac{Re Pr D_i}{l} \right)^{1/3} \left(\frac{\mu}{\mu_w} \right)^{0.14}$	Tosun [87] Sider and Tate [88]
$2300 \leq Re \leq 5 \times 10^6$ $0.5 \leq Pr \leq 2000$	$Nu = \frac{\frac{f}{8} Re \cdot Pr}{1.07 + 12.7 \left(\frac{f}{8} \right)^{1/2} (Pr^{2/3} - 1)}$	Petukhov-Kirilov [89]
$2300 \leq Re \leq 5 \times 10^6$ $0.5 \leq Pr \leq 2000$	$Nu = \frac{\frac{f}{8} (Re - 1000) Pr}{1.07 + 12.7 \left(\frac{f}{8} \right)^{1/2} (Pr^{2/3} - 1)}$	Genielinski [90]
$2300 \leq Re \leq 10^4$ $0.6 \leq Pr \leq 160$	$Nu = 0.023 Re^{0.8} \cdot Pr^{1/3}$	Dittus-Boelter [91]

۴-۲-۶ ضریب انتقال حرارت برای دیواره لوله، پوشش و لایه ایزوله (عایق)

ضریب انتقال حرارت برای لوله ای با ضخامت δ ، قطر داخلی D و ضریب انتقال حرارت هدایتی دیواره

k_w عبارت است از:

$$U_i = U h_i = \frac{\frac{2k_w}{D}}{\ln\left(1 + \frac{2\delta}{D}\right)} \quad (۲۴-۴)$$

جدول ۴-۵، ضریب انتقال حرارت هدایتی را برای انواع جنس لوله ها و عایق های مختلف نشان می

دهد [۷۵].

جدول ۴-۵ ضریب انتقال حرارت بر حسب جنس لوله [۷۵]

جنس لوله های تجاری		جنس عایق های تجاری	
نوع	ضریب $k_w \left(\frac{W}{m.K} \right)$	نوع	ضریب $k_w \left(\frac{W}{m.K} \right)$
فولاد	۴۵-۵۲	آسفالت	۰/۱۷
آلومینیوم	۲۰۰	سیمان	۱/۰۵
مس	۳۸۰	بتن (عایق)	۰/۱-۰/۶
پی وی سی	۰/۱۹	نئوپرن	۰/۲۵
پلی اتیلن	۰/۳۶	پلی استر	۰/۱۵۷
چدن نشکن	۵۲	فوم پی وی سی	۰/۰۴

۴-۲-۶-۳ ضریب انتقال حرارت برای لایه خارجی

در این حالت بسته به اینکه خطوط لوله مدفون در خاک بوده یا در سطح زمین قرار دارد، محاسبه ضریب انتقال حرارت به دو دسته تقسیم می گردد:

۴-۲-۶-۳-۱ خطوط لوله مدفون در خاک

برای خط لوله نشان داده شده در شکل ۴-۴ که به فاصله H در زیر زمین قرار دارد، رابطه زیر برای ضریب انتقال حرارت ارائه شده است [۹۲]:

$$U_i = h_i = \frac{2\eta k_s}{D \cosh^{-1} \left(\frac{2H}{D+2\delta} \right)} \quad (۴-۲۵)$$

جائیکه در آن k_s ضریب انتقال حرارت هدایتی خاک می باشد. جدول ۴-۶ این ضریب را بر حسب نوع خاک نشان می دهد. در این پژوهش به خاطر مطالعه موردی شهر سمنان، ضریب هدایت حرارتی خاک برای خاک شنی (خشک) انتخاب شده است.

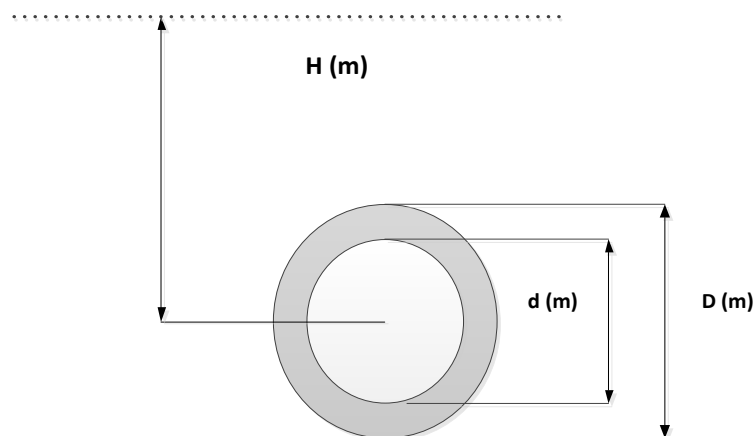
جدول ۴-۶ ضریب هدایت حرارتی انواع خاک [۹۲]

نوع	ضریب $k_s \left(\frac{W}{m.K} \right)$
ذغال سنگ نارس (خشک)	۰/۱۷
ذغال سنگ نارس (مرطوب)	۰/۵۴
ذغال سنگ نارس (یخی)	۰/۸۹
خاک گلدانی	۰/۱۷۵
خاک شنی (خشک)	۰/۴-۰/۷

در رابطه (۴-۲۵) η معرف اثر پانل می باشد. اثر پانل عبارت است از تاثیر انتقال حرارت جابه جایی بی نهایت در مواجهه با سطح زمین. به عبارت دیگر اثر پانل حاصل تقسیم انتقال حرارت در حالت واقعی به انتقال حرارت ماکزیمم (در حالتی که عدد بایوت به سمت بی نهایت میل می کند) تعریف می شود. این پارامتر تابعی از عدد بایوت می باشد. برای نسبت $\frac{H}{D} = 1.5$ ، روابط زیر پیشنهاد شده است [۹۲]:

$$\eta = \begin{cases} 0.8882Bi^{0.2379}, & \text{if } 0.001 < Bi \leq 0.5 \\ 0.9025Bi^{0.0276}, & \text{if } 0.5 < Bi \leq 100 \end{cases} \quad (۴-۲۶)$$

که در آن عدد بایوت عبارت است از: $Bi = h_{\infty} \left(\frac{D}{2} + \delta \right) / k_s$



شکل ۴-۴ شماتیکی از خط لوله مدفون در عمق H از سطح زمین

۲-۳-۶-۲-۴ خطوط لوله بالای سطح زمین

در این حالت رابطه زیر را برای عدد ناسلت پیشنهاد داده شده است [۹۳]:

$$Nu_o = \frac{h_o D_o}{k_o} = 0.3 + \frac{0.62 Re_o^{1/2} Pr_o^{1/3}}{\left[1 + \left(\frac{0.4}{Pr_o}\right)^{2/3}\right]^{1/4}} \left[1 + \left(\frac{Re_o}{282000}\right)^{5/8}\right]^{4/5} \quad (۲۷-۴)$$

جائیکه زیرنویس o مربوط به سطح خارجی می باشد. به طور کلی برای دمای هوای بین ۲۲۳ و ۳۳۳ کلوین و فشار یک اتمسفر با درصد خطای زیر ۳٪ روابط زیر برای محاسبه ضریب انتقال حرارت هوا، لزجت سینماتیک و عدد پرانتل هوا پیشنهاد شده است [۹۳]:

$$k_{air} = 6.55 \times 10^{-5} T + 0.00594 \quad (۲۸-۴)$$

$$\nu_{air} = 0.0818 \times 10^{-6} T - 8.6471 \times 10^{-6} \quad (۲۹-۴)$$

$$Pr_{air} = -1.587 \times 10^{-4} T + 0.759 \quad (۳۰-۴)$$

۴-۶-۲-۴ محاسبه ضریب انتقال حرارت کلی

در نهایت ضریب انتقال حرارت کلی برای خطوط لوله مدفون در خاک و خطوط لوله بالای سطح زمین از روابط زیر محاسبه می شود:

الف) برای خطوط مدفون در خاک

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_i} + \frac{\ln\left(1 + \frac{2\delta}{D}\right)}{\frac{2k_w}{D}} + \frac{D \cosh^{-1}\left(\frac{2H}{D+2\delta}\right)}{2k_s \cdot \eta} \quad (31-4)$$

ب) برای خطوط بالای سطح زمین

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_i} + \frac{\ln\left(1 + \frac{2\delta}{D}\right)}{\frac{2k_w}{D}} + \frac{1}{h_0} \quad (32-4)$$

ذکر این نکته ضروری است که در این پژوهش از روابط مربوط به خطوط لوله مدفون در خاک استفاده شده است.

ذکر این نکته ضروری است که روابط ارائه شده در این قسمت مربوط به مدلسازی انتقال حرارت در حالت پایا می باشند. محققان از همین روابط برای برای مدلسازی انتقال حرارت در حالت گذرا نیز استفاده کرده اند [۳۸]. عباسپور و چاپمن [۳۸]، برای جریان غیرهم دمای گاز طبیعی در خطوط لوله و در حالت گذرا، چندین ضریب انتقال حرارت کلی را معرفی کرده و با استفاده از آنها، میزان انتقال حرارت و همچنین پارامترهای مهم خطوط لوله همانند دما، فشار و دبی جرمی را محاسبه نموده اند. مطالعات آنها نشان می دهد با استفاده از روابط انتقال حرارت حالت پایا در مدلسازی جریان گذرا، خطای محاسبات برای خطوط مدفون در خاک ۰/۶۷٪ و برای خطوط لوله بالای سطح زمین ۴/۵۱٪ می باشد. با توجه به اهمیت خطوط مدفون در شبکه های گازرسانی و مقدار خطای زیر ۱٪ در محاسبات انتقال حرارت، استفاده از مدل انتقال حرارت پایا در مدلسازی خطوط لوله گاز طبیعی در حالت گذرا مناسب می باشد.

۴-۲-۷ تأثیرات گاز واقعی

در این پژوهش گاز طبیعی به عنوان گاز واقعی در نظر گرفته شده و تأثیرات گاز واقعی در مدلسازی مورد بررسی قرار گرفته شده است. برای این منظور از معادله حالت AGA8 استفاده شده است تا تأثیرات گاز واقعی برای جریان گاز طبیعی درون خطوط لوله مورد بررسی قرار بگیرد. معادله حالت AGA8 به طور کلی برای محاسبه ضریب تراکم پذیری و چگالی گاز طبیعی ارائه شده است [۷۷]. با توجه به دقت بالا در محاسبه چگالی گاز طبیعی، معادله حالت AGA8 در مبانی فروش گاز طبیعی بسیار پرکاربرد می باشد. با توجه به اینکه گاز طبیعی مخلوطی از چندین گاز می باشد، در این معادله حالت فرض بر آن است که گاز طبیعی مخلوطی از ۲۱ عنصر بوده که محدوده کسر مولی هر جزء در مخلوط گاز طبیعی مشخص می باشد. جدول ۴-۷، محدوده مجاز برای استفاده از این روش را نشان می دهد [۷۷].

معادله حالت AGA8 در محدوده وسیعی از دما، فشار و چگالی گاز طبیعی کاربرد دارد. با استفاده از این معادله حالت، محاسبه ضریب تراکم پذیری در محدوده دمایی ۱۳۰- درجه سانتیگراد تا ۴۰۰ درجه سانتیگراد و فشارهای بالای ۲۸۰ مگاپاسکال، با دقت قابل قبولی امکان پذیر می باشد [۷۷]. معادله حالت AGA8 توسط فرزانه گرد و رهبری [۹۴]، [۹۵] توسعه داده شده و با استفاده از آن خواص ترمودینامیکی گاز طبیعی شامل آنتالپی، انرژی داخلی، آنتروپی و غیره محاسبه شده است.

جدول ۴-۷ محدوده مجاز مورد استفاده برای معادله حالت AGA8

Quantity	Normal Range	Expanded Range
Relative Density	0.554 to 0.87	0.07 to 1.52
Gross Heating Value	477 to 115 Btu/scf	0 to 1800 Btu/scf
Gross Heating Value	18.7 to 45.1 MJ/m ³	0 to 66 MJ/m ³
Mole Percent Methane	45 to 100	0 to 100
Mole Percent Nitrogen	0 to 50	0 to 100

Mole Percent Carbon Dioxide	0 to 30	0 to 100
Mole Percent Ethane	0 to 10	0 to 100
Mole Percent Propane	0 to 4	0 to 12
Mole Percent Total Butanes	0 to 1	0 to 6
Mole Percent Total Pentanes	0 to 0.3	0 to 4
Mole Percent Hexanes Plus	0 to 0.2	0 to Dew Point
Mole Percent Helium	0 to 0.2	0 to 3
Mole Percent Hydrogen	0 to 10	0 to 100
Mole Percent Carbon Monoxide	0 to 3	0 to 3
Mole Percent Argon	0	0 to 1
Mole Percent Oxygen	0	0 to 21
Mole Percent Water	0 to 0.05	0 to Dew Point
Mole Percent Hydrogen Sulfide	0 to 0.02	0 to 100

معادله مربوط به ضریب تراکم پذیری Z در معادله حالت AGA8 به صورت زیر ارائه شده است [۷۷]:

$$Z = 1 + B\rho_m - \rho_r \sum_{n=13}^{18} C_n^* + \sum_{n=13}^{58} C_n^* D_n^* \quad (۳۳-۴)$$

در رابطه (۳۳-۴)، Z ضریب تراکم پذیری، B ضریب دوم ویریال، ρ_r چگالی کاهیده، C_n^* و D_n^* ضرایب تابع دما و ترکیبات گاز طبیعی، می باشند.

ρ_r دانسیته کاهیده به صورت زیر با دانسیته مولار ارتباط پیدا می کند [۷۷]:

$$\rho_r = K^3 \rho_m \quad (۳۴-۴)$$

جائیکه K پارامتر اندازه مخلوط بوده و با استفاده از رابطه (۳۵-۴) تعریف شده و از مشخصه های مربوط به ساختار شیمیایی اجزای مخلوط می باشد [۷۷]:

$$K^5 = \left(\sum_{i=1}^N x_i K_i^{\frac{5}{2}} \right)^2 + 2 \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N x_i x_j (K_{ij}^5 - 1) (K_i K_j)^{\frac{5}{2}} \quad (۳۵-۴)$$

که در رابطه (۳۵-۴) ، x_i کسر مولی جزء i در مخلوط، K_i پارامتر اندازه مربوط به جزء i و K_{ij} پارامتر اندازه برهمکنش اجزای i و j می باشند که مقادیر آنها وابسته به ترکیب گاز و اجزای مختلف گازهای تشکیل دهنده گاز طبیعی در مخلوط بوده و در مرجع [۷۷]، آورده شده اند.

در رابطه (۳۳-۴) ، B ضریب دوم ویرال بوده که به صورت زیر تعریف می شود [۷۷]:

$$B = \sum_{n=1}^{18} a_n T^{-u_n} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N x_i x_j B_{ijk}^* E_{ij}^{u_n} (K_i K_j)^{\frac{3}{2}} \quad (۳۶-۴)$$

در رابطه (۳۶-۴) ضریب B_{ijk}^* توسط رابطه (۳۷-۴) تعریف می شود [۷۷]:

$$B_{ijk}^* = (G_{ij} + 1 - g_n)^{g_n} (Q_i Q_j + 1 - q_n)^{q_n} \times (F_i^{1/2} F_j^{1/2} + f_n)^{f_n} (S_i S_j + 1 - s_n)^{s_n} (W_i W_j + 1 - w_n)^{w_n} \quad (۳۷-۴)$$

پارامترهای دودوئی E_{ij} و G_{ij} به ترتیب پارامترهای انرژی برهمکنشی ضریب دوم ویرال و پارامتر دودوئی موقعیت یا جهت ذرات نامیده می شوند که توسط روابط (۳۸-۴) و (۳۹-۴) تعریف می شوند [۷۷]:

$$E_{ij} = E_{ij}^* (E_i E_j)^{1/2} \quad (۳۸-۴)$$

$$G_{ij} = \frac{G_{ij}^* (G_i + G_j)}{2} \quad (۳۹-۴)$$

در روابط (۳۶-۴) تا (۳۹-۴) ، T دما ، N تعداد اجزای ترکیب گاز طبیعی، x_i کسر مولی جزء i ، a_n ، f_n ، g_n ، q_n ، s_n ، w_n پارامترهای ثابت معادله حالت یا ضرایب مشخصه دودوئی مربوط به اجزای تشکیل دهنده گاز طبیعی در مخلوط بوده که بسته به حالت‌های مختلف مقادیر آنها در مرجع [۷۷] آورده شده است . E_i ، F_i ، G_i ، K_i ، Q_i ، S_i و W_i پارامترهای مشخصه متناظر بوده که در حالت‌های مختلف برهمکنش ذرات نسبت به یکدیگر در مخلوط گاز، مقادیر آنها ثابت می باشند. E_{ij}^* و G_{ij}^* پارامترهای دودویی برخورد اجزای i و j هستند که برای یک موقعیت یا جهت خاص دو جزء i و j در مخلوط گاز

می باشند. مقادیر این دو پارامتر برای حالت‌های مختلف ترکیبات مخلوط نسبت به یکدیگر در مرجع [۷۷] آورده شده است.

در رابطه (۴-۳۳) ضریب C_n^* تابعی از ترکیب اجزای تشکیل دهنده گاز طبیعی و دمای گاز بوده که توسط رابطه زیر تعریف می شود [۷۷]:

$$C_n^* = a_n(G + 1 - g_n)^{g_n}(Q^2 + 1 - q_n)^{q_n}(F + 1 - f_n)^{f_n}U^{u_n}T^{-u_n} \quad (۴-۴۰)$$

در رابطه (۴-۴۰) ، G ، Q ، F و U به ترتیب، پارامترهای موقعیت، کوادراتیو، دمای بالای مخلوط و انرژی بوده که به صورت زیر تعریف می شوند [۷۷]:

$$U^5 = \left(\sum_{i=1}^N x_i E_i^{\frac{5}{2}} \right)^2 + 2 \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N x_i x_j (U_{ij}^5 - 1)(E_i E_j)^{\frac{5}{2}} \quad (۴-۴۱)$$

$$G = \sum_{i=1}^N x_i G_i + 2 \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N x_i x_j (G_{ij}^* - 1)(G_i + G_j) \quad (۴-۴۲)$$

$$Q = \sum_{i=1}^N x_i Q_i \quad (۴-۴۳)$$

$$F = \sum_{i=1}^N x_i^2 F_i \quad (۴-۴۴)$$

در رابطه (۴-۴۱) ، U_{ij} پارامتر برهمکنش دودویی برای انرژی مخلوط می باشد.

در رابطه (۴-۳۳) ، D_n^* به صورت زیر تعریف می شود [۷۷]:

$$D_n^* = (b_n - c_n k_n \rho_r^{k_n}) \rho_r^{b_n} \exp(-c_n \rho_r^{k_n}) \quad (۴-۴۵)$$

ضرایب کلیه روابط گفته شده در مرجع [۷۷] آورده شده اند.

در نهایت با مشخص بودن دما، فشار و درصد مولی اجزای تشکیل دهنده مخلوط گاز طبیعی، چگالی و ضریب تراکم پذیری گاز طبیعی محاسبه می شوند. جزئیات نحوه محاسبه خواص ترمودینامیکی با استفاده از معادله حالت AGA8 و روابط ترمودینامیکی در پیوست ب آورده شده است.

۸-۲-۴ روش حل معادلات حاکم

با توجه به ماهیت معادلات حاکم، برای حل این معادلات از روشهای عددی استفاده شده است. محققان روشهای عددی متفاوتی را برای حل این نوع معادلات ارائه نموده اند. مهمترین روش های عددی عبارتند از: روش مشخصه ها^۱، روش المان محدود^۲، روش تفاضل محدود صریح^۳ و روش تفاضل محدود ضمنی^۴. انتخاب هر کدام از روشهای عددی نامبرده شده بستگی به ماهیت معادلات حاکم مورد نظر دارد. برای حل معادلات حاکم مربوط به جریان گاز طبیعی درون خطوط لوله، روش تفاضل محدود ضمنی نسبت به سایر روش ها از دقت بالاتری برخوردار می باشد [۳۸]. عمده مزیت روش تفاضل محدود ضمنی بدون قید و شرط پایدار بودن این روش و همچنین محدود نبودن به گام های زمانی در حل معادلات می باشد [۹۶]. روش تفاضل محدود ضمنی بسته به نوع گسسته سازی معادلات حاکم، به سه دسته تقسیم می شوند: ۱. روش تفاضلات مرکزی^۵ ۲. روش کرانک - نیکلسون^۶ ۳. روش کاملاً ضمنی^۷

برای حل معادلات حاکم جریان گاز طبیعی درون خطوط لوله و در شرایط گذرا، از روش تفاضل محدود کاملاً ضمنی استفاده شده است [۳۸]. در این روش پایداری برای گام های زمانی بزرگ تضمین می گردد

¹Method of characteristics

²Finite element method

³Explicit finite difference methods

⁴Implicit finite difference methods

⁵central difference method

⁶Crank-Nikolson method

⁷fully implicit method

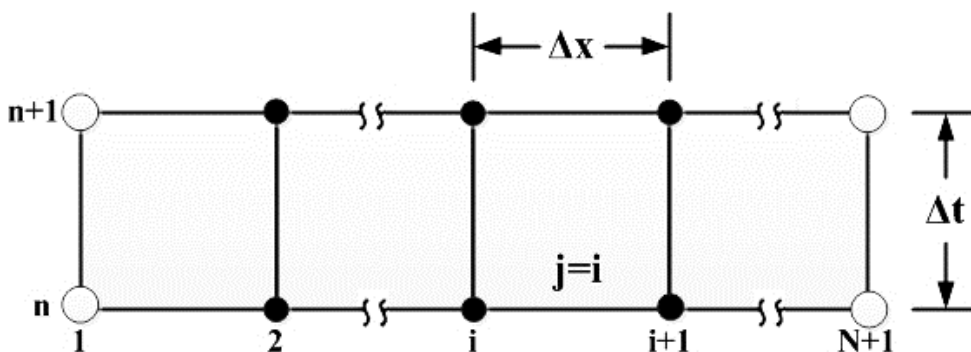
اما در هر گام زمانی دستگاه معادلات غیر خطی تولید شده باید با استفاده از روش های حل معادلات غیر خطی مانند روش نیوتن - رافسون، حل گردد.

۹-۲-۴ گسسته سازی معادلات حاکم

فرض کنیم فرم کلی یک معادله دیفرانسیل مشتقات جزئی شامل جمله مشتق نسبت به مکان، ترم مشتق نسبت به زمان و همچنین ترم مستقل به صورت زیر باشد:

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial B}{\partial x} = C \quad (۴۶-۴)$$

شکل ۴-۵، شبکه بندی مکان - زمان را برای تقریب تفاضلات محدود تشریح می کند.



شکل ۴-۵ شبکه مکان-زمان برای روش تفاضلات محدود

فرم کلی تقریب تفاضلات محدود برای هر ترم در رابطه (۴۶-۴)، به صورت زیر تعریف می گردد [۹۶]:

$$\frac{\partial A}{\partial t} = \frac{\theta(A_{i+1}^{n+1} - A_{i+1}^n) + (1 - \theta)(A_i^{n+1} - A_i^n)}{\Delta t} \quad (۴۷-۴)$$

$$\frac{\partial B}{\partial x} = \frac{\varphi(B_{i+1}^{n+1} - B_i^{n+1}) + (1 - \varphi)(B_{i+1}^n - B_i^n)}{\Delta x} \quad (۴۸-۴)$$

$$C = (1 - \varphi)\{\theta C_{i+1}^n + (1 - \theta)C_i^n\} + \varphi\{\theta C_{i+1}^{n+1} + (1 - \theta)C_i^{n+1}\} \quad (49-4)$$

در روابط (47-4) تا (49-4)، فاکتورهای وزنی بوده به طوریکه $0 \leq \theta \leq 1$ و $0 \leq \varphi \leq 1$ می باشند.

در روش تفاضل محدود کاملاً ضمنی، $\theta = \frac{1}{2}$ و $\varphi = 1$ می باشند. بنابراین روابط (47-4) تا (49-4) به صورت زیر تبدیل می شوند:

$$\frac{\partial A}{\partial t} = \frac{(A_{i+1}^{n+1} - A_{i+1}^n + A_i^{n+1} - A_i^n)}{2\Delta t} \quad (50-4)$$

$$\frac{\partial B}{\partial x} = \frac{B_{i+1}^{n+1} - B_i^{n+1}}{\Delta x} \quad (51-4)$$

$$C = \frac{C_{i+1}^{n+1} + C_i^{n+1}}{2} \quad (52-4)$$

در این پژوهش، برای گسسته سازی معادلات حاکم جریان درون خطوط لوله از روش تفاضلات محدود کاملاً ضمنی استفاده شده است. با توجه به روابط (50-4)، (51-4) و (52-4)، پارامترهای مهم جریان گاز طبیعی درون خطوط لوله یعنی فشار، دبی و دما را می توان به راحتی تقریب زده و در معادلات حاکم جایگذاری نماییم. با توجه به شکل 5-4، فرض بر آن است که لوله دارای N گره و n گام زمانی می باشد.

مشتقات جزئی پارامترهای مهم جریان گاز طبیعی درون خطوط لوله نسبت به زمان به صورت زیر تعریف می شوند:

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \frac{(P_{i+1}^{n+1} - P_{i+1}^n + P_i^{n+1} - P_i^n)}{2\Delta t} \quad (53-4)$$

$$\frac{\partial \dot{m}}{\partial t} = \frac{(\dot{m}_{i+1}^{n+1} - \dot{m}_{i+1}^n + \dot{m}_i^{n+1} - \dot{m}_i^n)}{2\Delta t} \quad (54-4)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{(T_{i+1}^{n+1} - T_{i+1}^n + T_i^{n+1} - T_i^n)}{2\Delta t} \quad (55-4)$$

مشتقات جزئی پارامترهای مهم جریان گاز طبیعی درون خطوط لوله نسبت به مکان به صورت زیر تعریف می شوند:

$$\frac{\partial P}{\partial x} = \frac{P_{i+1}^{n+1} - P_i^{n+1}}{\Delta x} \quad (56-4)$$

$$\frac{\partial \dot{m}}{\partial x} = \frac{\dot{m}_{i+1}^{n+1} - \dot{m}_i^{n+1}}{\Delta x} \quad (57-4)$$

$$\frac{\partial T}{\partial x} = \frac{T_{i+1}^{n+1} - T_i^{n+1}}{\Delta x} \quad (58-4)$$

در نهایت ترم های مستقل در جریان گاز طبیعی درون خطوط لوله در فصل مشترک بین گره ها توسط روابط زیر تعریف می شوند:

$$P = \frac{P_{i+1}^{n+1} + P_i^{n+1}}{2} \quad (59-4)$$

$$\dot{m} = \frac{\dot{m}_{i+1}^{n+1} + \dot{m}_i^{n+1}}{2} \quad (60-4)$$

$$T = \frac{T_{i+1}^{n+1} + T_i^{n+1}}{2} \quad (۶۱-۴)$$

با توجه به روابط با جایگذاری روابط (۴-۵۳) تا (۴-۶۱)، میتوانیم معادلات حاکم را در شرایط مختلف گسسته سازی نموده و سیستم معادلات را حل نماییم. به عنوان نمونه برای شرایط گذرا درون خطوط لوله و در حالت هم دما رابطه پیوستگی به صورت زیر گسسته می گردد:

$$\frac{(P_{i+1}^{n+1} - P_{i+1}^n + P_i^{n+1} - P_i^n)}{2\Delta t} + c^2 * \frac{\dot{m}_{i+1}^{n+1} - \dot{m}_i^{n+1}}{\Delta x} = 0 \quad (۶۲-۴)$$

همچنین معادله مومنتوم به صورت زیر گسسته می گردد:

$$\begin{aligned} & \frac{(\dot{m}_{i+1}^{n+1} - \dot{m}_{i+1}^n + \dot{m}_i^{n+1} - \dot{m}_i^n)}{2\Delta t} \\ & + c^2 \left(\frac{\left(2 * \frac{\dot{m}_{i+1}^{n+1} + \dot{m}_i^{n+1}}{2} * \frac{P_{i+1}^{n+1} + P_i^{n+1}}{2} * \frac{\dot{m}_{i+1}^{n+1} - \dot{m}_i^{n+1}}{\Delta x} \right) - \frac{P_{i+1}^{n+1} - P_i^{n+1}}{\Delta x} * \left(\frac{\dot{m}_{i+1}^{n+1} + \dot{m}_i^{n+1}}{2} \right)^2}{\left(\frac{P_{i+1}^{n+1} + P_i^{n+1}}{2} \right)^2} \right) \\ & + \frac{P_{i+1}^{n+1} - P_i^{n+1}}{\Delta x} + \left(\frac{f \cdot c^2}{2D} \right) \frac{\left(\frac{\dot{m}_{i+1}^{n+1} + \dot{m}_i^{n+1}}{2} \right)^2}{\frac{P_{i+1}^{n+1} + P_i^{n+1}}{2}} = 0 \end{aligned} \quad (۶۳-۴)$$

جائیکه در روابط (۴-۶۲) و (۴-۶۳)، $c^2 = ZRT$ می باشد.

برای حل جریان گذرای گاز طبیعی درون خطوط لوله با توجه به روش عددی گفته شده، با جایگذاری روابط (۴-۵۳) تا (۴-۶۱) در معادلات حاکم یعنی روابط (۴-۱۶) تا (۴-۱۸)، سه مجموعه معادله برای هر پارامتر بوجود می آید. در حقیقت برای هر لوله تعداد معادلات برابر با (3N-3) معادله می باشد. تعداد

مقادیر مجهول در گام زمانی $n+1$ ، شامل فشار، دبی جرمی و دما برابر است با $3N$. سه معادله از شرایط مرزی بدست می آیند در حالیکه تعداد مجهولات $3N$ و تعداد معادلات نیز $3N$ می باشند. ماهیت این معادلات غیر خطی بوده و برای هر گام زمانی باید با استفاده از روش نیوتن - رافسون، پارامترهای مهم جریان گاز طبیعی درون خطوط لوله را محاسبه نماییم.

۴-۲-۱۰ بررسی پایداری روش حل عددی معادلات حاکم

با توجه به مطالب بیان شده در قسمت های قبل، معادلات حاکم برای جریان گذرای گاز طبیعی درون خطوط لوله در حالت گذرا، با استفاده از روش عددی تفاضل محدود کاملاً ضمنی، گسسته سازی شده و سپس دستگاه غیر خطی معادلات مربوطه با استفاده از روش نیوتن - رافسون حل شده اند. تجزیه و تحلیل پایداری روش های عددی از جمله مباحث کلیدی در تحلیل های عددی می باشد. به همین منظور در این قسمت روش عددی انتخاب شده برای حل معادلات حاکم از دیدگاه پایداری مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته است.

برای تجزیه و تحلیل پایداری روش های عددی از روش ون - نیومن^۱ استفاده می شود. در این روش با استفاده از تقریب مشخص برای حل های عددی، یک ضریب تقویت^۲ تعریف می شود. شرط پایداری روش عددی به این صورت تعریف می گردد که قدر مطلق ضریب تقویت باید همواره کوچکتر یا مساوی با یک باشد. در این روش، ضریب تقویت تابعی از نوع روش حل عددی و تقریب های مشتقات در معادلات حاکم می باشد، بنابراین نوع روش انتخابی برای حل معادلات حاکم بسیار مهم می باشد [۹۷].

فرم کلی معادلات حاکم برای جریان گاز طبیعی درون خطوط لوله در شرایط گذرا به فرم زیر می باشد:

^۱Von-Neumann

^۲ Amplification factor

$$\frac{\partial u}{\partial t} + a \frac{\partial u}{\partial x} = 0 \quad (۶۴-۴)$$

رابطه (۶۴-۴) یک معادله مشتقات جزئی از نوع هذلولوی^۱ می باشد. حال به بررسی پایداری روش حل عددی اشاره شده در این پژوهش می پردازیم. با استفاده از مطالعه تورلی و تایلی [۳۰]، رابطه (۶۴-۴) با استفاده از روش تفاضلات محدود کاملاً ضمنی، گسسته سازی شده به صورت زیر تبدیل می گردد:

$$u_i^{n+1} = u_i^n - \sigma(u_i^{n+1} - u_{i-1}^{n+1}) \quad (۶۵-۴)$$

در رابطه (۶۵-۴)، σ پارامتر منحصر به فرد روش عددی انتخابی بوده که به عنوان عدد کورانت^۲ به صورت $\sigma = a \frac{\Delta t}{\Delta x}$ تعریف می گردد. با جایگذاری هر ترم به فرم u_{i+m}^{n+k} در رابطه (۶۵-۴) با $V^{n+k} e^{I(i+m)\varphi}$ ، رابطه (۶۵-۴) به صورت زیر تبدیل می گردد:

$$V^{n+1} = V^n - \sigma V^{n+1}(1 - e^{-I\varphi}) \quad (۶۶-۴)$$

با تعریف ضریب تقویت به صورت $G \equiv \frac{V^{n+1}}{V^n}$ ، ضریب تقویت به صورت زیر بدست می آید:

$$G = \frac{1}{1 + \sigma(1 - e^{-I\varphi})} \quad (۶۷-۴)$$

برای شرایط پایداری داریم:

$$|G|^2 = G \times G^* = \frac{1}{(1 - \sigma + \cos\varphi)^2 + \sigma^2 \sin^2\varphi} \ll 1 \quad (۶۸-۴)$$

برای تمامی مقادیر φ ، رابطه (۶۸-۴) برقرار بوده که نشان دهنده این است که روش عددی انتخابی برای گسسته سازی معادلات حاکم، بدون قید و شرط پایدار^۳ می باشد. با توجه به مطالب بیان شده، روش انتخابی برای حل معادلات حاکم در این پژوهش، از نقطه نظر پایداری فن - نیومن روشی کاملاً پایدار بوده و مقدار تقسیم بندی در بازه زمانی و مکانی برای روش عددی انتخابی، محدودیت مشخصی ندارند.

¹ Hyperbolic PDE

² Courant or CFL number

³ Unconditionally stable

حال به بررسی پایداری معادلات اصلی جریان گاز طبیعی در خطوط لوله و در حالت گذرا می پردازیم. معادلات حاکم با استفاده از روبرط مربوط به مشتقات زمانی و مکانی، گسسته سازی شده و در روابط (۶۲-۴) و (۶۳-۴)، نشان داده شده اند.

با تعریف روابط (۶۹-۴) ، فرم بی بعد شده معادلات حاکم توسط روابط Error! Reference source not found. و (۷۸-۴) تعریف می شوند [۲۵]:

$$t^* = \frac{t}{L/c}; x^* = \frac{x}{L}; u^* = \frac{u}{c}; m^* = u^* \rho^*; P^* = \frac{P}{P_N}; \rho^* = \frac{\rho}{\rho_N} \quad (۶۹-۴)$$

$$(P_{i+1}^{*n+1} - P_{i+1}^{*n} + P_i^{*n+1} - P_i^{*n}) + \frac{2\Delta t^*}{\Delta x^*} (m_{i+1}^{*n+1} - m_i^{*n+1}) = 0 \quad (۷۰-۴)$$

$$(m_{i+1}^{*n+1} - m_{i+1}^{*n} + m_i^{*n+1} - m_i^{*n}) + \frac{2\Delta t^*}{\Delta x^*} (P_{i+1}^{*n+1} - P_i^{*n+1}) + F^* (m_{i+1}^{*n+1} + m_i^{*n+1}) = 0 \quad (۷۱-۴)$$

$$F^* = \frac{fL}{2D} \Delta t^* |m^*| / P^*$$

با تعریف روابط فوریه به فرم زیر خواهیم داشت [۲۵]:

$$P_i^{*n} = V_p^n e^{ji\theta}; m_i^{*n} = V_m^n e^{ji\theta} \quad (۷۲-۴)$$

جائیکه در رابطه (۷۲-۴)، $\theta = k\Delta x^*$ و $j = \sqrt{-1}$ می باشند. با جایگذاری رابطه (۷۲-۴) در روابط (۷۰-۴) و (۷۱-۴)، این روابط به صورت زیر بازنویسی می شوند [۲۵]:

$$\begin{bmatrix} V_P^{n+1} \\ V_P^n \end{bmatrix} = W \begin{bmatrix} V_P^{n1} \\ V_P^{n-1} \end{bmatrix} \quad (73-4)$$

$$W = \begin{bmatrix} a & b \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (74-4)$$

$$a = \frac{2 + F^*}{1 + F^* + K^*}; b = \frac{-1}{1 + F^* + K^*} \quad (75-4)$$

$$K^* = \left\{ \left(\frac{2\Delta t^*}{\Delta x^*} \right) \frac{\sin(\theta)}{1 + \cos(\theta)} \right\}^2 \quad (76-4)$$

در رابطه (73-4)، W ماتریس تقویت^۱ می باشد. برای پایداری روش عددی در این حالت باید مقادیر ویژه ماتریس W که با λ نشان داده می شود، کوچکتر یا مساوی یک باشد. این پارامتر با استفاده از رابطه زیر تعریف می شود [۲۵]:

$$\lambda = \frac{\left(1 + \frac{F^*}{2}\right) \pm \sqrt{\left(\frac{F^*}{2}\right)^2 - K^*}}{1 + F^* + K^*} \quad (77-4)$$

با توجه به مثبت بودن پارامترهای F^* و K^* می توان نتیجه گرفت که $|\lambda| \leq 1$ می باشد. بنابراین روش بدون قید و شرط پایدار می باشد [۲۵].

¹ amplification matrix

۴-۳ مدل سازی شبکه های توزیع و تغذیه گاز طبیعی در حالت پایا

در این بخش ابتدا به مدل سازی شبکه های توزیع و تغذیه گاز طبیعی در حالت پایا پرداخته شده است. هدف از مدل سازی در این حالت، محاسبه قطر لوله های شبکه می باشد. با توجه به معلوم بودن دبی جریان گاز طبیعی (مصارف گره ها در شبکه) و محدودیت های مشخص برای فشار و سرعت گاز طبیعی در خطوط لوله، تنها مجهول موجود در این حالت قطر خطوط لوله می باشد. پس از آماده نمودن نقشه گره ها^۱ طبق استاندارد ارائه شده می بایست جهت محاسبات افت فشار در گره ها و جریان حجم انتقالی گاز و سرعت در لوله اقدام نمود. از آنجایی که حل شبکه با تعداد زیادی حلقه با دست بسیار وقت گیر و در برخی موارد غیر ممکن است جهت متعادل نمودن شبکه از برنامه های کامپیوتر مختلفی که در سراسر دنیا جهت حل شبکه های گازرسانی با روش های محاسباتی نوشته شده است، استفاده می گردد. به طور کلی این برنامه ها بر اساس دو اصل زیر استوار می باشند [۳]:

۱- مجموع جبری دبی های لوله های متصل به یکدیگر برابر بار مصرفی آن گره می باشد .

۲- مجموع جبری افت فشار داخل هر حلقه برابر صفر است.

با اعمال شرایط فوق، مجموعه ای از معادلات غیر خطی حاصل می گردد که برای آنها روش های محاسباتی تئوری وجود ندارد و از روش های آزمون و خطا استفاده می شود که مهم ترین این روش ها عبارتند از:

۱- روش هاردی -کراس

۲- روش نیوتن رافسون

۳- روش های خطی

¹ Node map

۱-۳-۴ فرمول های طراحی شبکه (روش هاردی-کراس)

رابطه بین دبی و افت فشار در خطوط لوله شبکه های گاز طبیعی در حالت پایا که به معادله اساسی جریان مشهور می باشد، به صورت زیر تعریف می گردد [۸۶]:

$$Q_h = 1.329 \times 10^{-8} \left(\frac{T_b}{P_b} \right) \sqrt{\frac{(P_1^2 - P_2^2)}{f L Z T \gamma_g}} D^5 \quad (۷۸-۴)$$

در این رابطه، Q_h دبی حجمی، D قطر لوله، L طول لوله، T دمای متوسط جریان گاز، Z ضریب تراکم پذیری، P_1 و P_2 به ترتیب فشار بالادست و پایین دست جریان، γ_g چگالی نسبی، f ضریب اصطکاک در نهایت T_b و P_b به ترتیب دما و فشار مرجع می باشند. رابطه (۷۸-۴) را می توان به شکل کلی زیر نیز نشان داد:

$$P^2 = K \cdot Q_h^n \quad \text{or} \quad P^2 = R_h \cdot Q^n \quad (۷۹-۴)$$

که در آن K ضریب مقاومت لوله و R_h فاکتور مقاومت لوله می باشد که بر حسب قطر داخلی در جداولی بر اساس فرمول انتخابی داده می شوند. n بسته به رابطه ضریب اصطکاک، عددی است بین ۱/۸ تا ۲ و مجذور افت فشار را به شکل $P^2 = P_1^2 - P_2^2$ نشان داده شده است. روش هاردی - کراس در واقع یک راه حل ریاضی جهت حل دستگاه معادلات به دست آمده معادلات حاکم می باشد. نهایتاً جریان لوله ها و فشار گره ها به دست می آید. برای این کار ابتدا جریانهای فرضی اولیه ای را در نظر می گیرند، به طوری که قانون اول برای کلیه گره ها صادق باشد. با انتخاب قطر های اولیه عملیات محاسبه آغاز می گردد در واقع محاسبات برای صدق قانون دوم مجموع جبری افت فشار هر حلقه را محاسبه می کند و چنانچه مقدار آن نزدیک به صفر نباشد جریان های اولیه را تصحیح می نماید [۳]. این عملیات تا ارضا شدن قانون دوم تکرار می شود. برای بدست آوردن جریان تصحیحی به صورت زیر عمل می کنیم:

ابتدا رابطه جریان، رابطه (۷۹-۴)، را برای حلقه ها در حالت تعادل می نویسیم:

$$P^2 - KQ_h^n = 0 \quad (۸۰-۴)$$

مشتق رابطه (۸۰-۴) به صورت زیر تعریف می شود:

$$\frac{dP^2}{dQ_h} = KQ_h^{n-1} \quad (۸۱-۴)$$

مقدار Q را می توانیم به صورت $Q = \frac{P^2}{dP^2}$ بنویسیم. اگر به جای رابطه جریان مشتق مقادیر آنها را جایگزین کنیم، رابطه زیر به دست می آید که دبی تصحیحی هر حلقه می باشد:

$$Q_h = \frac{KQ_h^n}{KQ_h^{n-1}} \quad (۸۲-۴)$$

سپس با استفاده از دبی تصحیحی محاسبات را برای شبکه ها انجام می دهیم. در صورتی که قانون دوم برقرار شده باشد، دبی در خطوط لوله معین می گردد، در غیر این صورت محاسبات تکرار می شوند. شرط همگرایی در این روش به صورت $|Q_h^n - Q_h^{n-1}| \leq 10^{-6}$ می باشد.

۴-۴ مدل سازی شبکه توزیع و تغذیه گاز طبیعی در حالت گذرا

در این بخش مدل سازی جریان گاز طبیعی درون خطوط لوله در شبکه های توزیع و تغذیه در حالت گذرا، ارائه گردیده است. در بخش قبل و در تحلیل شبکه های گاز طبیعی در حالت پایا، هدف اصلی تعیین قطر خطوط لوله شبکه گاز طبیعی می باشد. در مرحله بعد فشار گاز طبیعی در گره ها و دبی گاز طبیعی در خطوط لوله تعیین می گردد. برای مدل سازی شبکه ها در حالت گذرا، فرض بر آن است که شبکه در حالت پایا مدل سازی شده و اطلاعات پارامترهای مهم برای شبکه گاز طبیعی موجود می باشد. در این حالت مصرف گاز طبیعی در گره ها^۱ بر حسب زمان تغییر می کنند. حال باید پاسخ شبکه به تغییرات اعمال

^۱ Natural gas demand

شده بیایم که برای این منظور از مدل سازی شبکه در حالت گذرا استفاده می نماییم. برای مدل سازی شبکه های توزیع و تغذیه در حالت گذرا دو حالت در نظر گرفته می شود:

الف) مدل سازی بر مبنای اصول کلی (قوانین کیرشهف^۱) در شبکه های گاز طبیعی

ب) مدل سازی بر مبنای انباشتگی جریان گاز طبیعی

۱-۴-۴ مدل سازی بر مبنای اصول کلی در شبکه های گاز طبیعی

در تحلیل شبکه های گاز طبیعی در حالت پایا به دو اصل اساسی در شبکه های توزیع و تغذیه گاز طبیعی اشاره گردید. برای مدل سازی در حالت گذرا و بر مبنای دو اصل کلی گفته شده، فرض بر این است که در محل اتصال لوله ها (گره)، جریان گازی ذخیره نمی شود. در حقیقت در این حالت مصرف گاز طبیعی در گره ها در زمان مشخص معلوم می باشد و با استفاده از اصول کلی، فشار در گره های شبکه محاسبه می گردد. اصول کلی در شبکه های توزیع و تغذیه گاز طبیعی را می توان به صورت ریاضی بیان نمود:

۱. اصل اول:

$$\sum_{i=1}^m Q_{hi} = 0 \quad (۸۳-۴)$$

رابطه (۸۳-۴) بیان میدارد، جمع جبری جریان های وارد شده به هر گره باید برابر با صفر باشد.

۲. اصل دوم:

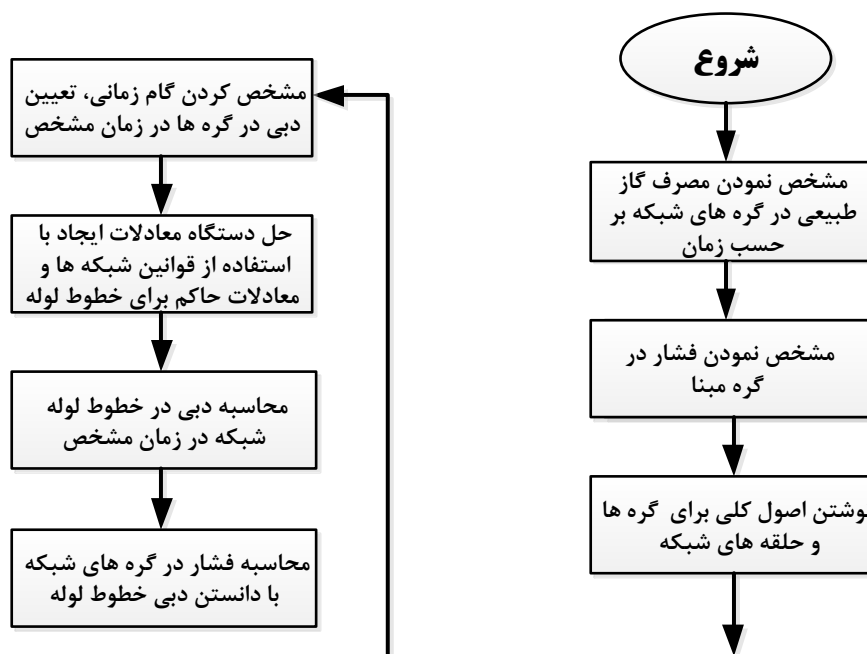
$$\sum_{i=1}^n (P_1^2 - P_2^2)_i = 0 \quad (۸۴-۴)$$

¹ Kirchhoff's laws

رابطه (۴-۸۴) بیان میدارد که، جمع جبری افت فشار در هر حلقه بسته با توجه به جهت قراردادی برابر با صفر می باشد.

با توجه به معلوم بودن مصرف گاز طبیعی در هر لحظه از زمان در گره های شبکه، هدف محاسبه فشار گره ها و دبی گاز طبیعی در خطوط لوله شبکه در زمان مورد نظر می باشد.

فرآیند مدلسازی شبکه های توزیع و تغذیه گاز طبیعی را در این حالت در شکل ۴-۶، نشان داده شده است.



شکل ۴-۶ فرآیند مدلسازی شبکه های گاز طبیعی در حالت گذرا بر مبنای اصول کلی

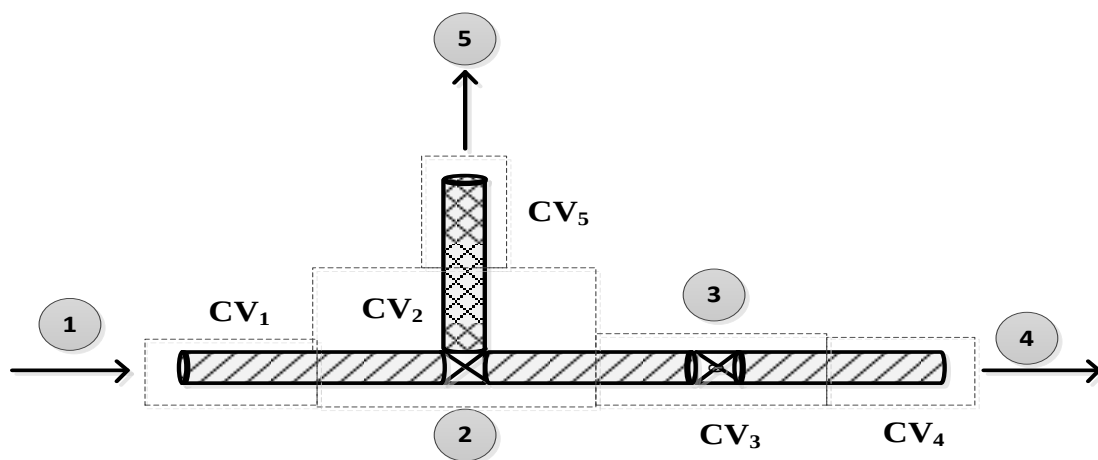
۴-۴-۲ مدلسازی بر مبنای انباشتی جریان گاز طبیعی

در روش اول برای مدلسازی جریان گاز طبیعی در شبکه های توزیع و تغذیه، گره ها شامل حجم خاصی از گاز طبیعی نبوده و صرفاً مانند یک نقطه در نظر گرفته شده اند. در شبکه های توزیع و تغذیه گاز

طبیعی، هنگامی که مصرف گاز طبیعی در گره ها (توسط مصرف کنندگان) افزایش پیدا می کند (به دلیل کاهش دما)، شبکه گاز طبیعی باید بتواند دبی مورد نظر را تأمین نماید. در این حالت با توجه به تراکم پذیر بودن جریان گاز طبیعی، از انباشتگی جریان گاز طبیعی در خطوط لوله و گره های شبکه برای تأمین دبی مورد نظر استفاده می شود. در این حالت فرض بر آن است که در محل اتصال لوله ها (گره) جریان گاز طبیعی ذخیره می شود. در نتیجه دبی مورد نظر تأمین شده و با توجه به افزایش مصرف و در نتیجه افزایش دبی در خطوط لوله، فشار در گره های شبکه های گاز طبیعی کاهش پیدا میکند.

برای مدلسازی جریان گاز طبیعی در شبکه ها در این حالت به صورت زیر عمل می نماییم:

۱. هر گره و قسمتی از لوله های متصل شده به گره را به عنوان حجم کنترل در نظر می گیریم. شکل ۷-۴، حجم کنترل های مخصوص به هر گره را برای یک شبکه نمونه، نشان می دهد.



شکل ۷-۴ حجم کنترل برای گره ها در یک شبکه نمونه

۲. معادله بقای جرم در حالت گذرا برای حجم کنترل مخصوص به هر گره می نویسیم. این رابطه به صورت زیر نوشته می شود:

$$\frac{dm_j}{dt} = \sum_{i=1}^N K_{ij}(\dot{m}_{ij} - \dot{m}_j) \quad (۸۵-۴)$$

جائیکه در رابطه (۸۵-۴)، مقدار جرم موجود در گره j ، $\dot{m}_j$ دبی جرمی وارد شده یا خارج شده به گره j توسط لوله i ام متصل به آن، $\dot{m}_{ij}$ دبی جرمی مصرف شده توسط گره j ، N تعداد لوله های متصل به گره j و K_{ij} برابر با یک اگر دبی جرمی $\dot{m}_{ij}$ ورودی و برابر با منفی یک اگر $\dot{m}_{ij}$ خروجی باشد، می باشند.

سمت چپ تساوی در رابطه (۸۵-۴) را می توان به صورت زیر بازنویسی نمود:

$$\frac{dm}{dt} = \frac{d(\rho V)}{dt} = \left(\frac{V}{ZRT} \right) \frac{dP}{dt} \quad (۸۶-۴)$$

در رابطه (۸۶-۴)، V برابر با حجم می باشد. با ترکیب روابط (۸۶-۴) و (۸۵-۴) و تبدیل دبی های جرمی به دبی های حجمی خواهیم داشت:

$$\left(\frac{V}{ZRT} \right) \frac{dP_j}{dt} = \sum_{i=1}^N K_{ij} \times \rho^* \times (qh_{ij} - Q_{h_j}) \quad (۸۷-۴)$$

در رابطه (۸۷-۴)، ρ^* چگالی در شرایط مرجع، qh_{ij} دبی حجمی لوله i ام متصل به گره j ام و Q_{h_j} دبی حجمی مصرف شده در گره مورد نظر می باشند. با گسسته سازی رابطه (۸۷-۴)، رابطه زیر را برای محاسبه فشار در گره j ام خواهیم داشت:

$$\left(\frac{V}{ZRT} \right) \frac{P_j^{k+1} - P_j^k}{\Delta t} = \sum_{i=1}^N K_{ij} \times \rho^* \times (qh_{ij} - Q_{h_j}) \quad (۸۸-۴)$$

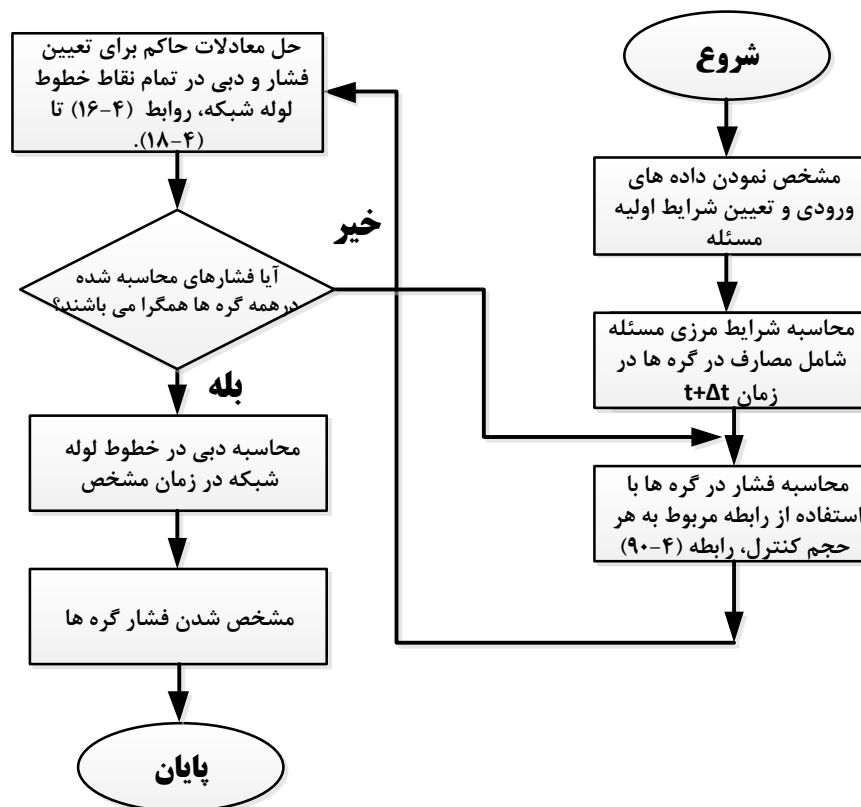
۳. با مشخص بودن شرایط مرزی در گام زمانی بعدی، فشار در گره های شبکه با استفاده از رابطه (۴-۸۸) محاسبه می گردد.

۴. با داشتن دبی در گره ها و همچنین فشارهای محاسبه شده از مرحله قبلی، معادلات حاکم مربوط به جریان گاز طبیعی درون خطوط لوله شبکه، یعنی روابط (۴-۱۶) تا (۴-۱۸)، حل می گردند. فشار و دبی در تمام نقاط محاسبه می گردند.

۵. با مقایسه فشار محاسبه شده در مراحل ۳ و ۴، اگر فشارها همگرا باشند که حل به پایان رسیده است. در غیر اینصورت دوباره باید محاسبات به مرحله ۳ رفته و این مرحله را تکرار کرده و فرآیند حل دوباره تکرار گردد.

شرط همگرایی در این حالت به صورت $\frac{|P3-P4|}{|P3|} \leq 10^{-6}$ تعریف می گردد که در آن فشار محاسبه شده در مرحله ۳ و P4 فشار محاسبه شده در مرحله ۴ می باشند.

دیگرام مراحل گفته شده برای مدلسازی شبکه های گاز طبیعی در حالت گذرا با استفاده از روش ارائه شده در این بخش، در شکل ۴-۸ نشان داده شده است.



شکل ۴-۸ دیاگرام مدلسازی شبکه های توزیع و تغذیه گاز طبیعی در حالت گذرا بر مبنای انباشتگی

۴-۵ پیش بینی مصرف گاز طبیعی در شبکه توزیع و تغذیه

برای تحلیل شبکه های گاز طبیعی در حالت گذرا، نیاز به شرایط مرزی برای حل معادلات حاکم بر شبکه ها می باشد. مصرف گاز طبیعی که به عنوان بار مصرفی در گره های شبکه اعمال می شود، یکی از مهمترین شرایط مرزی در شبکه های توزیع و تغذیه می باشد. برای تعیین مصرف گاز طبیعی در شبکه ها توسط مدل های ریاضی، ۳ مدل اصلی وجود دارد: ۱. مدل سری های زمانی، مدل رگرسیون و مدل شبکه عصبی مصنوعی.

در مدل سری زمانی، پیش بینی مصرف با داده های آینده بر اساس مقادیر قبلاً مشاهده شده مدلسازی می گردد. مدل های رگرسیون برای پیش بینی مصرف، مدل های بسیار مفید می باشند و بسته به ماهیت

داده ها می توانند خطی یا غیر خطی باشند. مدل شبکه های عصبی مصنوعی یک روش محاسباتی جدید برای مدل سازی مسائل غیر خطی، بهینه سازی، پیش بینی مصرف و غیره می باشند. در این پژوهش برای پیش بینی مصرف گاز طبیعی از مدل شبکه عصبی مصنوعی استفاده شده است.

۴-۵-۱ شبکه های عصبی مصنوعی

مغز انسان، به اذعان بسیاری از دانشمندان، پیچیده ترین سیستمی است که تا کنون در کل گیتی مشاهده شده و مورد مطالعه قرار گرفته است. اما این پیچیده ترین سیستم، نه ابعادی در حد کَشکشان دارد و نه تعداد اجزای سازنده اش، بیشتر از پردازنده های ابر کامپیوترهای امروزی است. پیچیدگی راز آلود این سیستم بی نظیر، به ارتباط های فراوان موجود میان عناصر آن بر می گردد. چیزی که، مغز ۱۴۰۰ گرمی انسان را، از همه سیستم های دیگر، متمایز می کند. فرایندهای خودآگاه و ناخودآگاهی که در حدود جغرافیایی بدن انسان رخ می دهند، همگی تحت مدیریت مغز هستند. برخی از این فرایندها آن قدر پیچیده هستند، که هیچ کامپیوتر یا اَبَر کامپیوتری در جهان، امکان پردازش و انجام آن را ندارد. با این حال، تحقیقات نشان می دهند که واحدهای سازنده مغز انسان، از نظر سرعت عملکرد، حدود یک میلیون بار، کندتر از ترانزیستورهای مورد استفاده در تراشه های سیلیکونی CPU هستند.

سرعت و قدرت پردازش بسیار بالای مغز انسان، به ارتباط های بسیار انبوهی بر می گردد که در میان سلول های سازنده مغز وجود دارد و اساسا، بدون وجود این لینک های ارتباطی، مغز انسان هم به یک سیستم معمول کاهش می یابد، که قطعا امکانات فعلی را نخواهد داشت. گذشته از همه این ها، عملکرد عالی مغز در حل انواع مسائل و کارایی بالای آن، شبیه سازی مغز و قابلیت های آن را، به مهم ترین آرمان معماران سخت افزار و نرم افزار تبدیل کرده است. در واقع، اگر روزی فرا برسد (که البته ظاهرا خیلی هم دور نیست)، که ما بتوانیم کامپیوتری در حد و اندازه های مغز انسان را بسازیم، قطعا یک انقلاب بزرگ در

علم، صنعت و البته زندگی انسان ها، رخ خواهد داد. در راستای شبیه سازی رفتار محاسباتی مغز انسان، از چند دهه گذشته، که کامپیوترها امکان پیاده سازی الگوریتم های محاسباتی را فراهم نمودند، کارهای پژوهشی توسط متخصصین علوم کامپیوتر، مهندسين و ریاضی دان ها شروع شده است، که ما حاصل کار آن ها، در شاخه ای از علم هوش مصنوعی، و در زیر شاخه هوش محاسباتی، تحت عنوان موضوع "شبکه های عصبی مصنوعی"^۱ طبقه بندی شده است. در مبحث شبکه های عصبی مصنوعی، مدل های ریاضی و نرم افزاری متعددی با الهام گرفتن از مغز انسان پیشنهاد شده اند، که برای حل گستره وسیعی از مسائل علمی، مهندسی و کاربردی، در حوزه های مختلف کاربرد دارند.

امروز به قدری استفاده از سیستم های هوشمند، به ویژه شبکه عصبی مصنوعی گسترده شده است، که می توان این ابزارها را، در ردیف عملیات پایه ریاضی و به عنوان ابزارهای عمومی و مشترک طبقه بندی کرد. چرا که کمتر رشته دانشگاهی است که نیازی به تحلیل، تصمیم گیری، تخمین، پیش بینی، طراحی و ساخت داشته باشد، و در آن از موضوع شبکه های عصبی استفاده نشده باشد. گستردگی کاربرد شبکه های عصبی مصنوعی در علوم فنی و مهندسی در لیست زیر تا حدود زیادی به تصویر کشیده شده است.

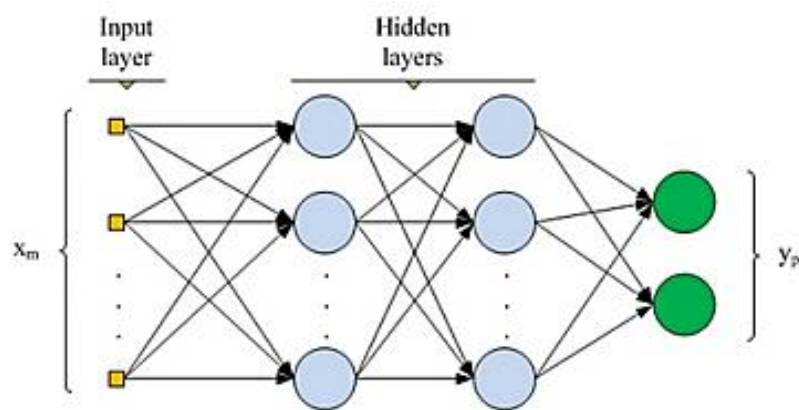
۱. مهندسی معکوس و مدل سازی سیستم ها
۲. پیش بینی مصرف بار الکتریکی
۳. عیب یابی سیستم های صنعتی و فنی
۴. طراحی انواع سیستم های کنترل
۵. طراحی و بهینه سازی سیستم های فنی و مهندسی
۶. تصمیم گیری بهینه در پروژه های مهندسی

¹ Artificial Neural Networks (ANNs)

۴-۵-۱-۱ انواع شبکه های عصبی مصنوعی

انواع مختلفی از مدل های محاسباتی تحت عنوان کلی شبکه های عصبی مصنوعی معرفی شده اند، که هر یک برای دسته ای از کاربردها قابل استفاده اند و در هر کدام، از وجه مشخصی از قابلیت ها و خواص مغز انسان، الهام گرفته شده است. در همه این مدل ها، یک ساختار ریاضی، که البته به صورت گرافیکی قابل نمایش دادن بوده، در نظر گرفته می شود که یک سری پارامترها و پیچ های تنظیم دارد. این ساختار کلی، توسط یک الگوریتم یادگیری یا تربیت^۱ آن قدر تنظیم و بهینه می شود، که بتواند رفتار مناسبی را از خود نشان دهد.

نگاهی به فرایند یادگیری در مغز انسان نیز، نشان می دهد که در واقع ما نیز در مغزمان فرایندی مشابه با این را تجربه می کنیم و همه مهارت ها، دانسته ها و خاطرات ما، در اثر تضعیف یا تقویت ارتباط میان سلول های عصبی مغز شکل می گیرند. این تقویت و تضعیف، در زبان ریاضی خودش را به صورت تنظیم یک پارامتر (موسوم به وزن^۲) مدل سازی و توصیف می شود.



شکل ۴-۹ ساختار یک شبکه عصبی

¹ Training Algorithm

² Weight

اما طرز نگاه مدل های مختلف شبکه های عصبی مصنوعی کاملاً متفاوت است و هر یک، بخشی از قابلیت های یادگیری و تطبیق مغز انسان را هدف قرار داده و تقلید نموده اند. در ادامه، به بررسی مروری یکی از انواع مختلف شبکه های عصبی که در این پژوهش از آن استفاده شده است، می پردازیم.

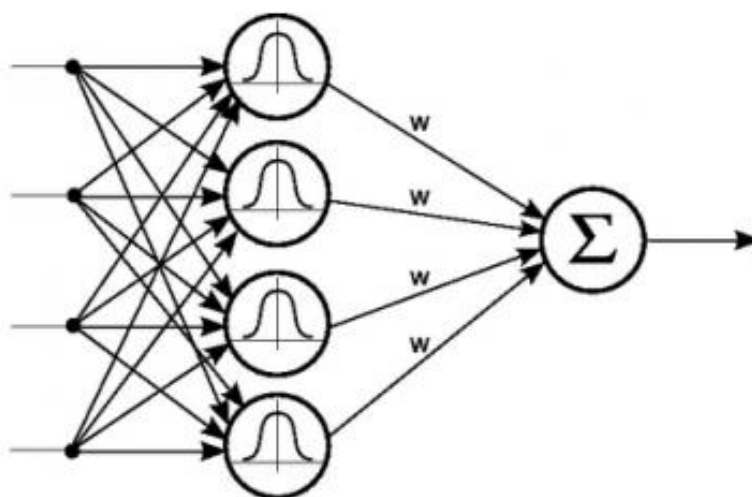
۲-۱-۵-۴ پرسپترون چند لایه یا MLP

یکی از پایه ای ترین مدل های عصبی موجود، مدل پرسپترون چند لایه^۱ است که عملکرد انتقالی مغز انسان را شبیه سازی می کند. در این نوع شبکه عصبی، رفتار شبکه ای مغز انسان و انتشار سیگنال در آن بیشتر مد نظر بوده است و از این رو، گهگاه با نام شبکه های پیشرو^۲ نیز خوانده می شوند. هر یک از سلول های عصبی مغز انسان، موسوم به نورون^۳، پس از دریافت ورودی (از یک سلول عصبی یا غیر عصبی دیگر)، پردازشی روی آن انجام می دهند و نتیجه را به یک سلول دیگر (عصبی یا غیر عصبی) انتقال می دهد. این رفتار تا حصول نتیجه ای مشخص ادامه دارد، که احتمالاً منجر به یک تصمیم، پردازش، تفکر و یا حرکت خواهد شد.

^۱ Multi-Layer Perceptron (MLP)

^۲ Feedforward Networks

^۳ Neuron



شکل ۴-۱۰ ساختار شبکه های عصبی چند لایه [۹۸]

در ساختار شبکه های عصبی چند لایه، خروجی به صورت زیر تعریف می گردد:

$$y = f \left(\sum_{i=1}^N w_i x_i \right) \quad (۴-۸۹)$$

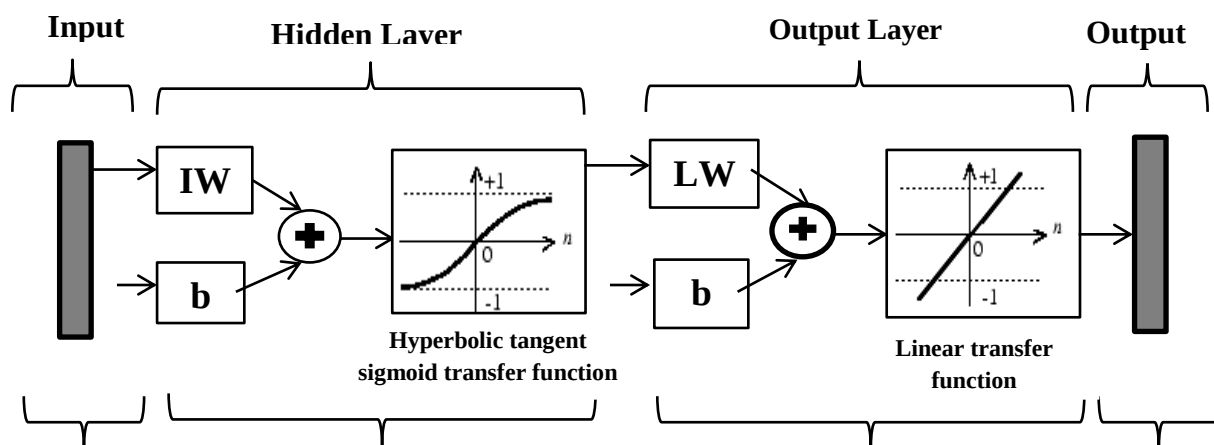
در این رابطه، y خروجی شبکه عصبی، w_i وزن داده ورودی x_i و N تعداد داده ها می باشند. در شبکه های عصبی، هر تابع ای می تواند به عنوان یک تابع انتقال^۱ مورد استفاده قرار بگیرد اما در عمل، تعداد محدودی از توابع به عنوان تابع انتقال مورد استفاده قرار می گیرند. تابع انتقال در تمامی لایه های مخفی مشابه است. علاوه بر این، برای همه نورونهای خروجی، یک نوع تابع انتقال استفاده شده است. در این پژوهش، برای تابع نورونهای لایه مخفی، تابع تانژانت هیپربولیک به عنوان تابع انتقال استفاده شده است و توابع خطی به عنوان تابع انتقال برای نورون های لایه خروجی مورد استفاده قرار گرفته اند.

$$f(x) = \frac{2}{(1 + e^{-2x})} - 1 \quad (۴-۹۰)$$

$$g(x) = x \quad (۴-۹۱)$$

¹ transfer function

شکل ۱۱-۴ شبکه عصبی چند لایه مورد استفاده در این پژوهش را نشان می دهد.



شکل ۱۱-۴ شبکه عصبی چند لایه مورد استفاده در این پژوهش

در شکل ۱۱-۴، **IW** ماتریس وزن ورودی، **LW** ماتریس وزن لایه ها و **b** نشان دهنده بردار بایاس^۱ می باشند.

^۱ bias vector

میانگین مربعات خطا در پیش بینی مقدار مصرف گاز طبیعی از رابطه زیر محاسبه می گردد:

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(NGD_{act_i} - NGD_{fcst_i} \right)^2 \quad (92-4)$$

مقدار رگرسیون^۱ که رابطه بین داده های خروجی از شبکه عصبی و داده های موجود می باشد، از رابطه زیر محاسبه می گردد:

$$R^2 = \frac{N \sum_{i=1}^N \left(NGD_{act_i} NGD_{fcst_i} \right) - \sum_{i=1}^N NGD_{act_i} \sum_{i=1}^N NGD_{fcst_i}}{\sqrt{N \sum_{i=1}^N \left(NGD_{act_i} \right)^2 - \left(\sum_{i=1}^N NGD_{act_i} \right)^2} \times \sqrt{N \sum_{i=1}^N \left(NGD_{fcst_i} \right)^2 - \left(\sum_{i=1}^N NGD_{fcst_i} \right)^2}} \quad (93-4)$$

در روابط بالا، N تعداد داده ها، NGD_{act} مقدار مصرف گاز طبیعی واقعی و NGD_{fcst} مقدار مصرف گاز طبیعی پیش بینی شده با استفاده از شبکه عصبی می باشد.

¹ Regression values (R-squared)

۵- فصل پنجم: نتایج

۵-۱ مقدمه

با توجه به مباحث مطرح شده در فصل مدلسازی، در این فصل نتایج مربوط به مدلسازی جریان گاز طبیعی درون خطوط لوله برای حالت گذرا ارائه گردیده است. همچنین با توجه به روش مدلسازی جریان گاز طبیعی در شبکه های گاز طبیعی، ابتدا روش های ارائه شده برای مدلسازی، معتبرسازی شده و سپس دو شبکه توزیع و تغذیه به طور کامل مدلسازی شده اند و نتایج آنها در این فصل ارائه شده است.

۵-۲ جریان گذاری گاز طبیعی درون خطوط لوله

در تحلیل جریان گذرا گاز طبیعی درون خطوط لوله به یکی از مسائل مهم و کاربردی در این زمینه پرداخته شده است. مسئله مورد نظر در حالت مختلف مورد بررسی قرار گرفته و نتایج آن مورد بحث و بررسی قرار گرفته است.

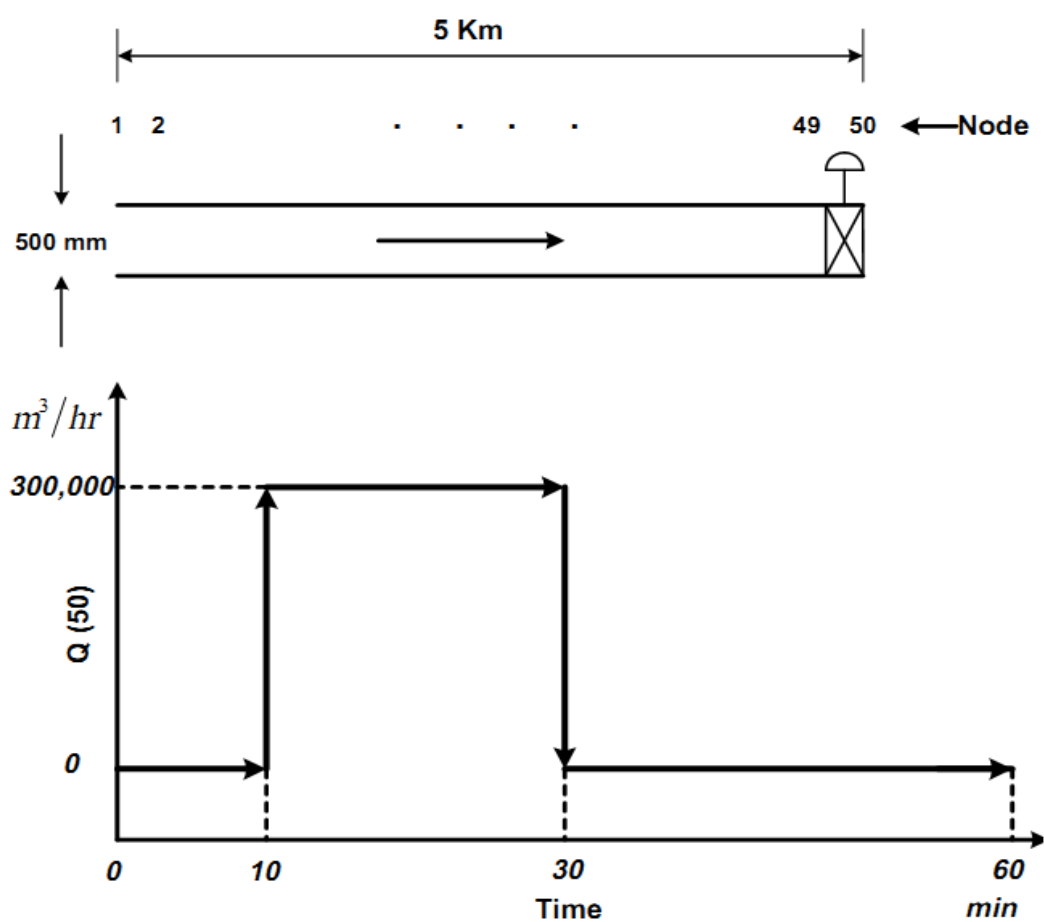
۵-۲-۱ جریان همدم با صرف نظر از ترم اینرسی

یکی از پژوهش های مهم و کاربردی در این زمینه توسط کیوچی [۲۵] انجام گرفته است. او با استفاده از تفاضلات محدود ضمنی به حل هم زمان معادلات مومنتوم و پیوستگی پرداخت. می توان با فرض یک سرعت کوچک برای جریان در مقایسه با سرعت موج، از ترم اینرسی در معادلات حاکم مربوط به مومنتوم صرف نظر نمود. شرایط خط لوله مورد بررسی به صورت زیر می باشد:

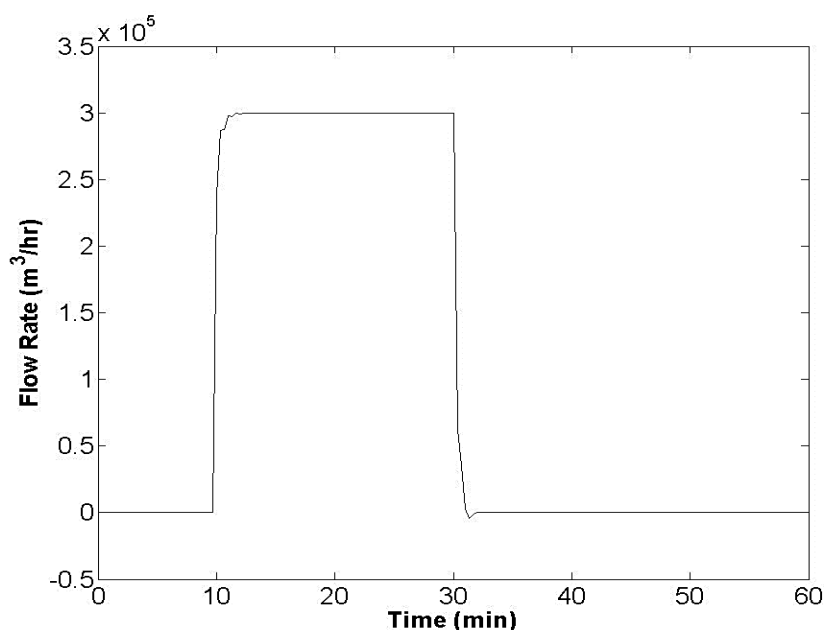
لوله افقی به طول ۵ کیلومتر و قطر ۰/۵ متر که حاوی گازی با وزن مولکولی ۱۸ و فشار ورودی ۵ MPa می باشد. همانطور که در شکل ۵-۱ نیز نشان داده شده است، ابتدا شیر خروجی بسته بوده پس از ۱۰ دقیقه شیرخروجی برای مدت ۲۰ دقیقه باز شده و سپس بسته می شود. هنگامی که شیر باز می شود

جریان خروجی به میزان $300,000 \left(\frac{m^3}{hr} \right)$ می رسد. این جریان در شرایط استاندارد ($288/15 \text{ K}$ و

100 KPa) می باشد. شکل ۱-۵، شرایط این مسئله را نشان می دهد.



شکل ۱-۵ شرایط مسئله Kiuchi [۲۵]



شکل ۲-۵ تغییرات دبی در ورودی لوله برای شرایط مسئله Kiuchi [۲۵]

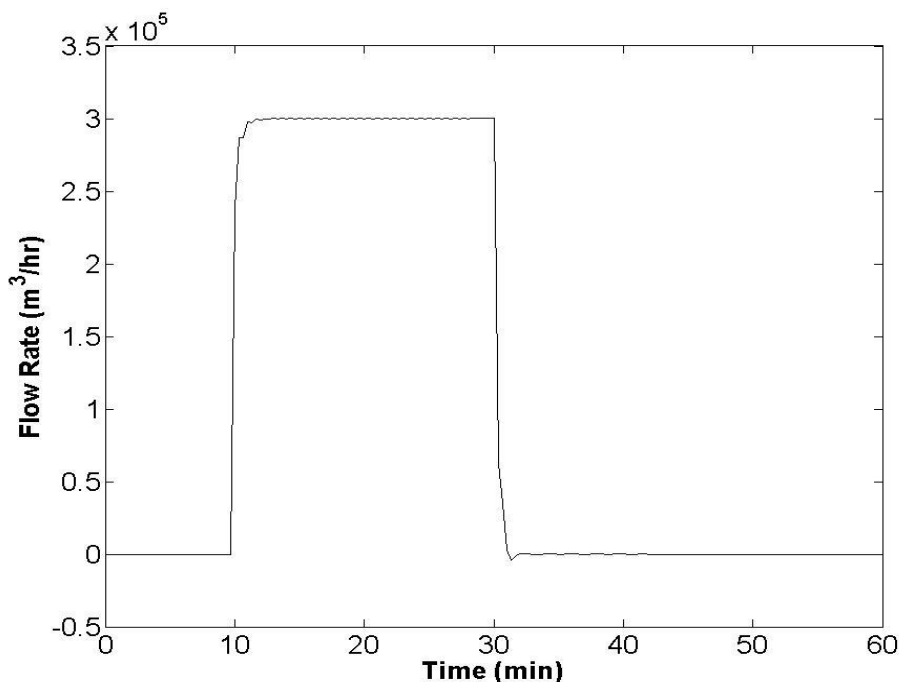
۲-۲-۵ جریان همدمای با در نظر گرفتن ترم اینرسی

در قسمت قبل همانطور که بیان گردید، از ترم اینرسی در معادله مومنتوم صرف نظر شده است. در این قسمت جریان همدمای گاز طبیعی با در نظر گرفتن ترم اینرسی مورد بررسی قرار گرفته و نتایج به صورت منحنی های تغییرات دبی در ورودی لوله و تغییرات فشار در نقاط مختلف لوله ارائه گردیده است. شکل ۳-۵ تا شکل ۸-۵ بیانگر تغییرات دبی و فشار برای جریان گذرای همدمای داخل لوله با در نظر گرفتن ترم اینرسی در معادله مومنتوم می باشند. این تغییرات برای گام های زمانی متفاوت رسم شده اند.

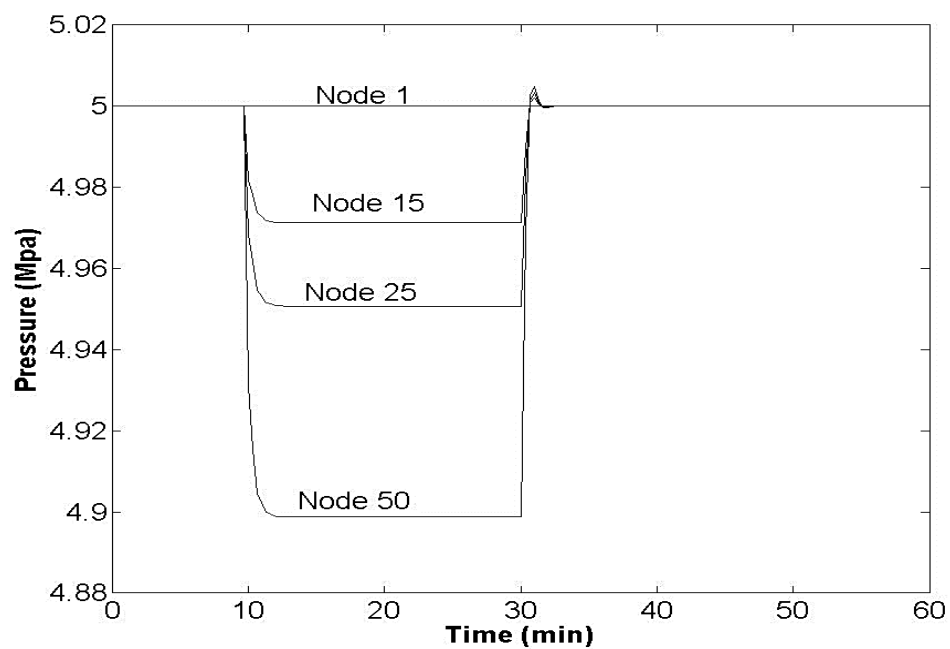
از مقایسه شکل ۳-۵ و شکل ۲-۵ می توان نتیجه گیری نمود که در گام های زمانی بزرگتر ترم اینرسی در معادلات مومنتوم، تاثیر چندانی بر روی رفتار جریان سیال در شرایط تغییرات ناگهانی (مانند باز و بسته شدن شیر) ندارد. با مقایسه نتایج دبی در ورودی لوله می توان نتیجه گیری نمود که در گام های

زمانی بزرگ ترم اینرسی تاثیر چندانی بر رفتار جریان سیال ندارد اما در گام های زمانی کوچکتر ترم اینرسی نقش مهمی بر روی دامنه نوسانات و مدت زمان رسیدن به حالت پایا، ایفا می کند.

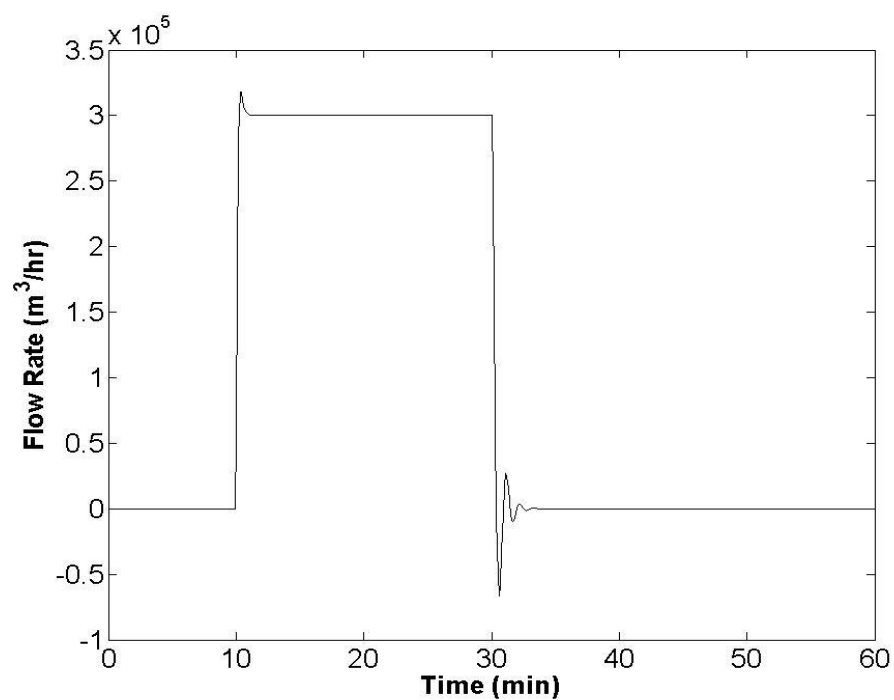
هنگامی که شیر در انتهای خروجی لوله به طور ناگهانی بسته می شود، جریان سیال در بالادست شیر بلافاصله به حالت ساکن در می آید. به همین علت فشار در بالادست جریان افزایش پیدا می کند. همانطور که موج فشار به تدریج به سمت انتهای ورودی حرکت می کند، میزان افزایش فشار در نقطه انتهایی بیشتر از نقاط بالادست آن است، در نتیجه این فرآیند، یک جریان بازگشتی ایجاد می شود. جریان بازگشتی به نوبه خود موجب کاهش فشار می شود، بنابراین تغییرات فشار به حالت نوسانی تبدیل شده که این نوسانات بستگی به گام زمانی ای داشته که برای شبیه سازی مورد استفاده قرار گرفته است.



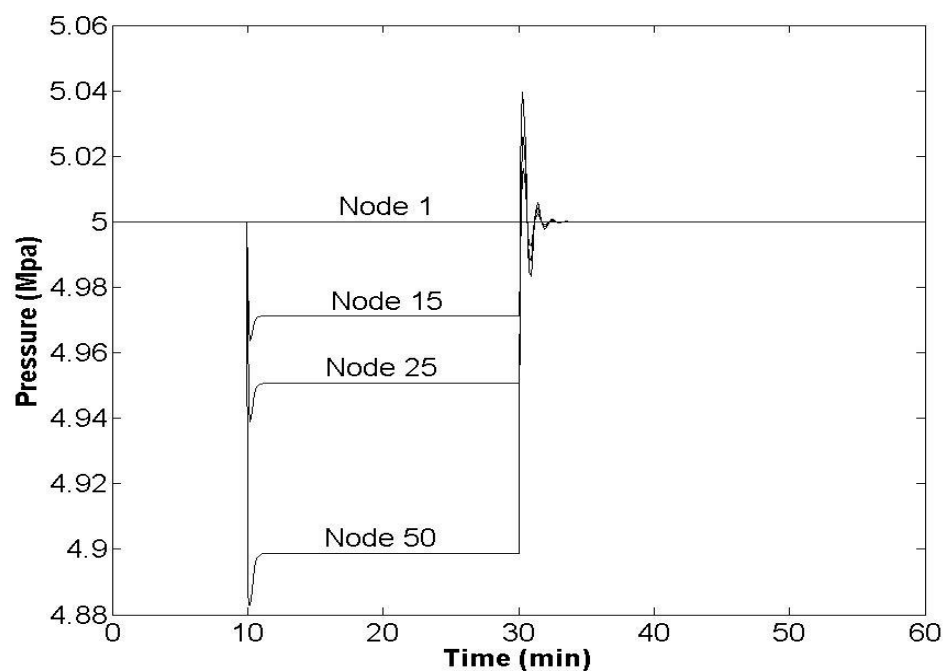
شکل ۵-۳ تغییرات دبی در ورودی لوله برای جریان همدم با در نظر گرفتن اینرسی برای $\Delta t = 1 \text{ min}$



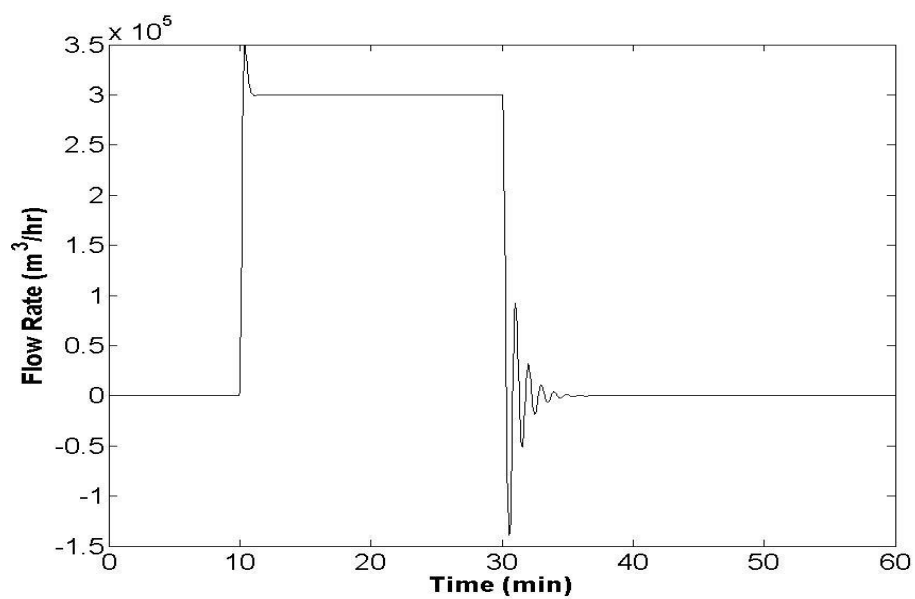
شکل ۴-۵ تغییرات فشار برای جریان همدم با در نظر گرفتن اینرسی برای $\Delta t = 1\text{min}$



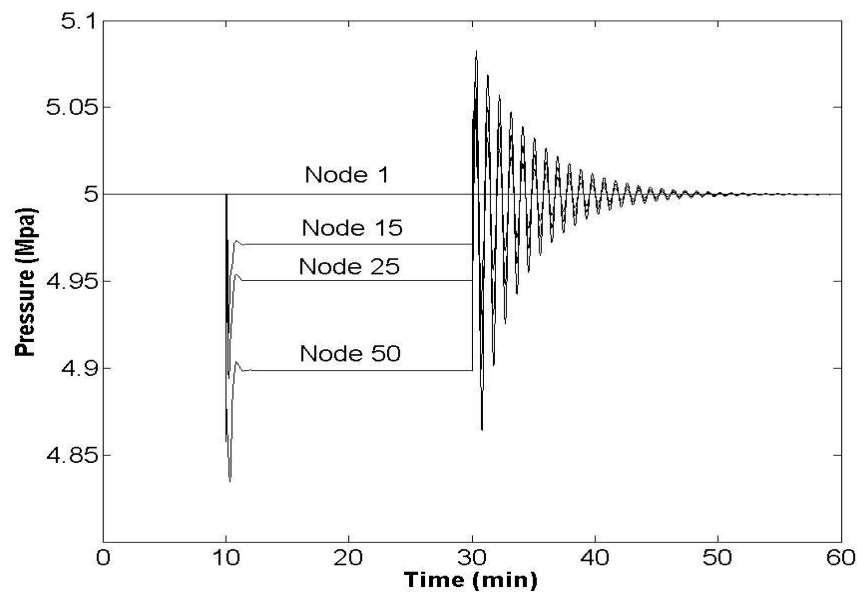
شکل ۵-۵ تغییرات دبی در ورودی لوله برای جریان همدم با در نظر گرفتن اینرسی برای $\Delta t = 0.1\text{min}$



شکل ۵-۶ تغییرات فشار برای جریان همدم با در نظر گرفتن اینرسی برای $\Delta t = 0.1 \text{ min}$



شکل ۵-۷ تغییرات دبی در ورودی لوله برای جریان همدم با در نظر گرفتن اینرسی برای $\Delta t = 0.01 \text{ min}$



شکل ۵-۸ تغییرات فشار برای جریان همدما با در نظر گرفتن اینرسی برای $\Delta t = 0.01 \text{ min}$

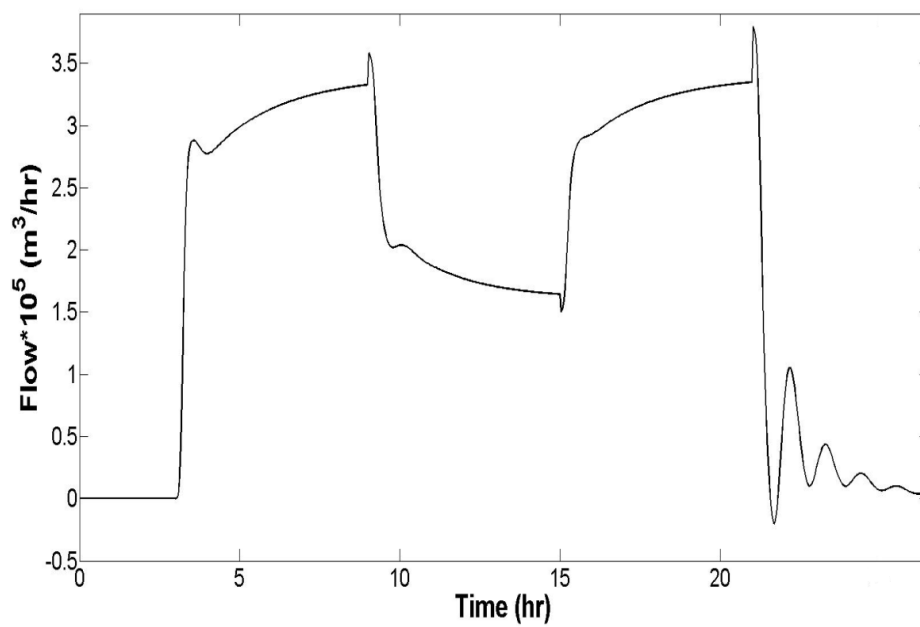
۵-۲-۳ جریان غیرهمدمای گاز طبیعی

در مدلسازی جریان گذرای غیرهمدما در خطوط لوله گاز طبیعی، معادلات پیوستگی، مومنتوم و انرژی، گسسته سازی شده و به طور هم زمان حل می شوند. تا دبی، فشار و دمای گاز درون لوله تعیین شوند. برای این منظور لوله ای حاوی جریان گاز به طول ۵ کیلومتر و مشابه حالت قبل را در نظر می گیریم که دارای شیر خروجی بوده و فشار ورودی ۵ مگاپاسکال می باشد. ابتدا شیر خروجی بسته بوده و دبی خروجی صفر و دمای گاز ۲۹۸/۱۸ کلوین می باشد. پس از ۳ ساعت شیرخروجی برای مدت ۲۱ ساعت باز شده و دبی خروجی و دمای ورودی مطابق جدول ۵-۱ در بازه های زمانی متفاوت تغییر کرده سپس شیر خروجی دوباره بسته می شود.

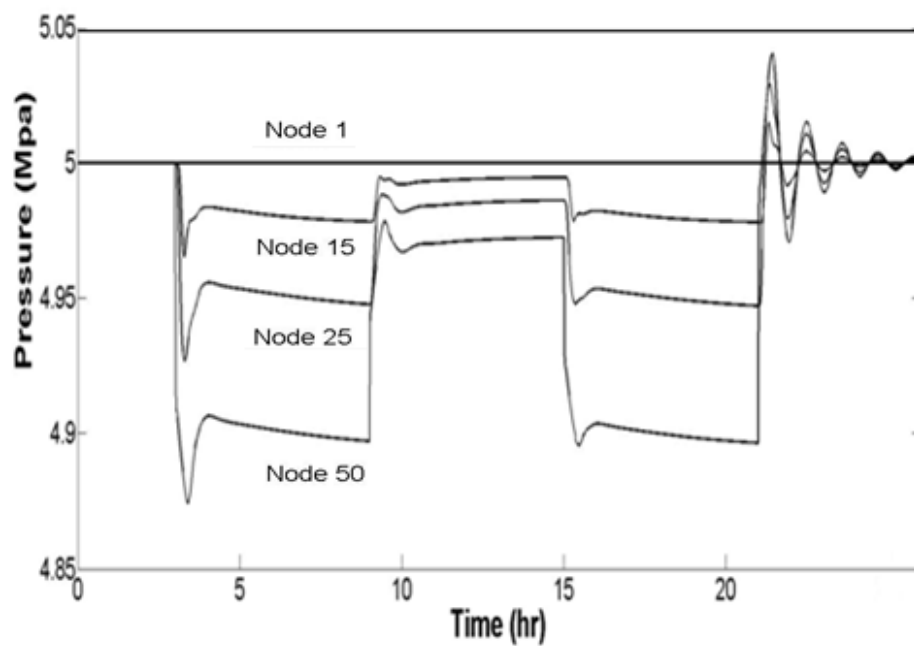
جدول ۵-۱ تغییرات دبی خروجی بر حسب زمان و برای دمای ورودی مختلف

بازه زمانی (hr)	0-3	3-9	9-15	15-21	21-24
دبی خروجی (m^3/hr)	0	3×10^5	1.5×10^5	3×10^5	0
دمای ورودی K	298.18	333.18	313.18	333.18	298.18

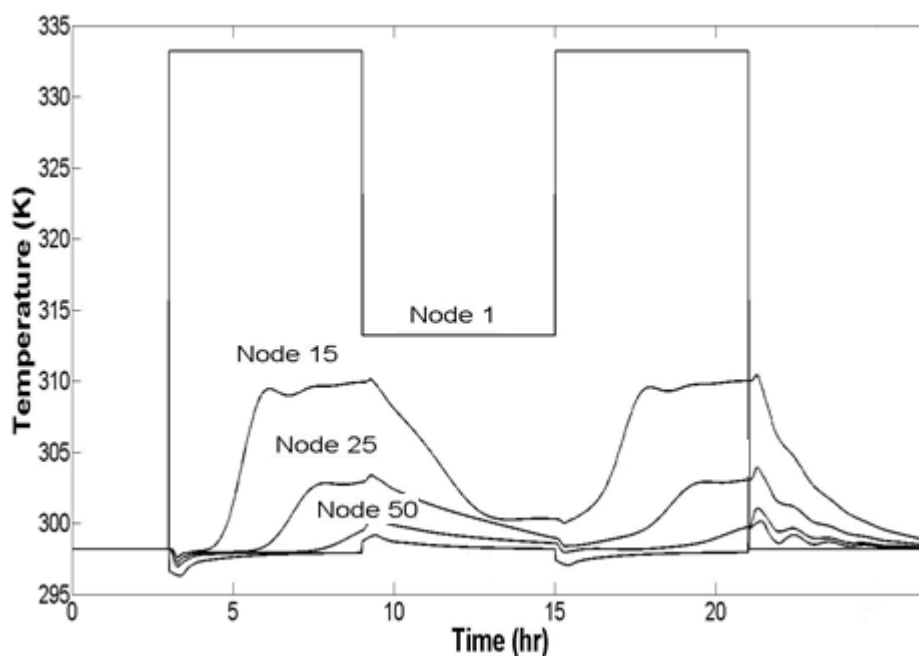
ترکیب گاز به صورت ۹۷٪ متان، ۲٪ اتان و ۱٪ پروپان در نظر گرفته شده است. گرمای منتقل شده با استفاده از رابطه $Q = UA(T_{amb} - T_g)$ محاسبه می شود که $T_{amb} = 298.18K$ دمای محیط و $U = 200 \left(\frac{W}{m^2.K} \right)$ ضریب انتقال حرارت جابه جایی می باشد. شکل ۵-۹ تا شکل ۵-۱۱ نتایج این قسمت را نشان می دهد. همان طور که مشخص است تغییرات دبی با تغییرات دما، هماهنگ بوده و به عبارت دیگر، تغییرات دبی به میزان قبل توجهی تحت تاثیر تغییرات دما می باشد. در حالیکه تغییرات دبی در جریان همدما به صورت نوسانات ناگهانی و رسیدن به شرایط پایا می باشد، در جریان غیرهمدما تغییرات دبی به صورت صعود تدریجی بوده که ناشی از وابستگی قابل توجه تغییرات چگالی با تغییرات دما می باشد. با باز و بسته شدن شیر خروجی، دما و فشار و دبی تغییر می کنند که منجر به تغییرات چگالی می گردد. همان طور که تغییرات چگالی جریان به آرامی از یک نقطه جریان به نقاط دیگر منتقل می شود، خواص جریان نیز تغییر می کنند. با پیشروی در طول لوله افت فشار نیز افزایش می یابد. همچنین شکل ۵-۱۰ نشان می دهد با کاهش دبی خروجی، فشار خط افزایش می یابد که این امر با مقایسه فشار لوله به ازای دبی های متفاوت مشهود است. شکل ۵-۱۱ تغییرات دمای گاز را نشان می دهد. با پیشروی در طول لوله، ضمن کاهش مقادیر دما، دامنه تغییرات آنها نیز کاهش می یابد.



شکل ۵-۹ تغییرات دبی برای جریان غیرهمدم



شکل ۵-۱۰ تغییرات فشار برای جریان غیرهمدم

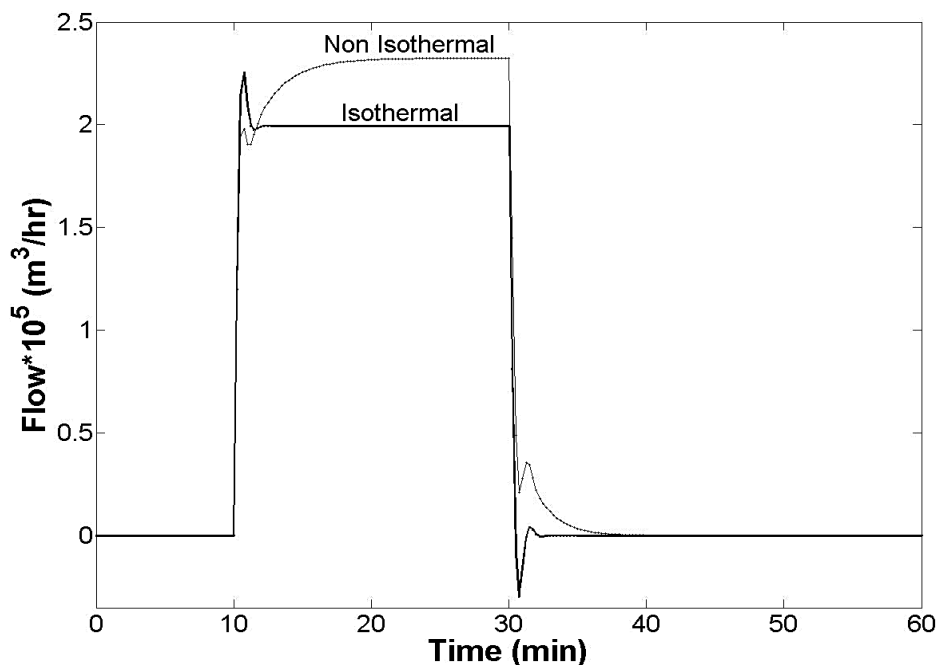


شکل ۵-۱۱ تغییرات دما برای جریان غیرهمدما

۵-۲-۴ مقایسه جریان گذرای گاز طبیعی در حالت همدما و غیرهمدما

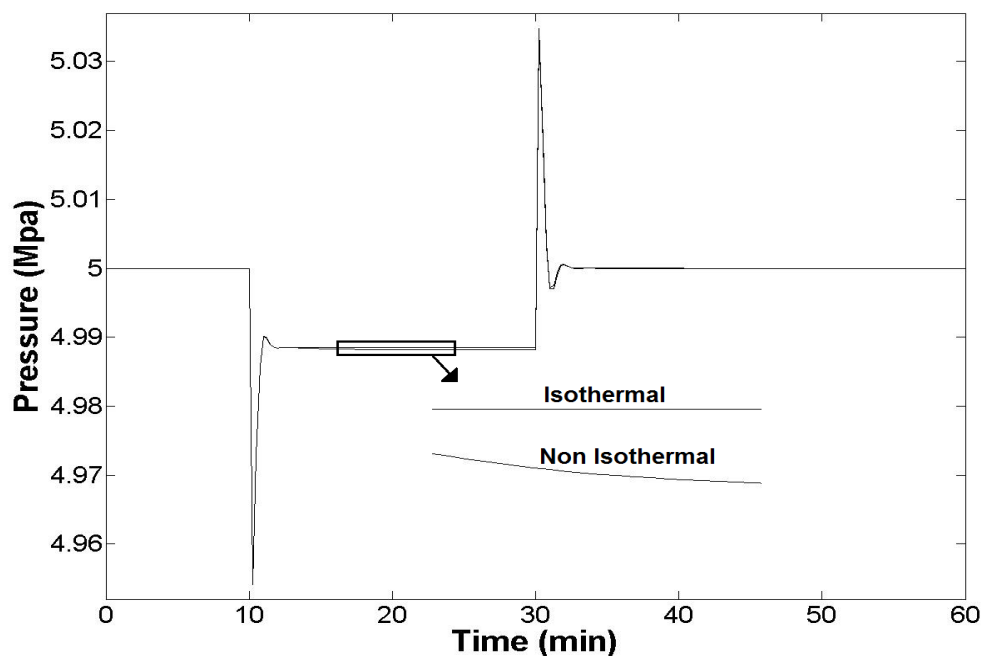
پس از بررسی جریان گذرای همدما و جریان گذرای غیر همدمای گاز طبیعی درون خطوط لوله، این دو حالت در این قسمت با یکدیگر مقایسه شده اند. بدین منظور خط لوله ای به طول ۵ کیلومتر و قطر ۰/۵ متر را در نظر می گیریم که جریان گذرای گاز ابتدا در خروجی صفر و دمای ورودی لوله ۲۹۸/۱۸ کلوین بوده، پس از ۱۰ دقیقه شیر خروجی باز شده و جریان $250000 \left(\frac{m^3}{hr} \right)$ به مدت ۲۰ دقیقه به دمای ۳۳۳/۱۸ کلوین جاری شده و سپس شیر خروجی بسته می شود و دمای ورودی لوله به ۲۹۸/۱۸ کلوین باز می گردد. فشار ورودی ۵ مگاپاسکال و ثابت می باشد. برای جریان همدما، دمای خط ثابت و برابر ۲۹۸/۱۸ کلوین می باشد.

شکل ۵-۱۲ تغییرات دبی در ورودی لوله را برای جریان های همدمای و غیرهمدمای گاز طبیعی درون لوله نشان می دهد. همانطور که در شکل مشخص است در جریان همدمای تغییرات دبی به صورت جهشی از میزان اولیه به مقدار نهایی می باشد اما در جریان غیرهمدمای این تغییرات به صورت تدریجی رخ می دهد.



شکل ۵-۱۲ مقایسه منحنی تغییرات دبی در ابتدای لوله برای دو حالت جریان همدمای و جریان غیر همدمای

شکل ۵-۱۳ تغییرات فشار را در خروجی لوله برای جریان های همدمای و غیرهمدمای گاز طبیعی در خط لوله نشان می دهد. همانطور که در شکل مشخص است برای جریان همدمای، منحنی به صورت جهشی به مقدار نهایی می رسد در حالیکه در جریان غیر همدمای این تغییرات به صورت تدریجی می باشد.



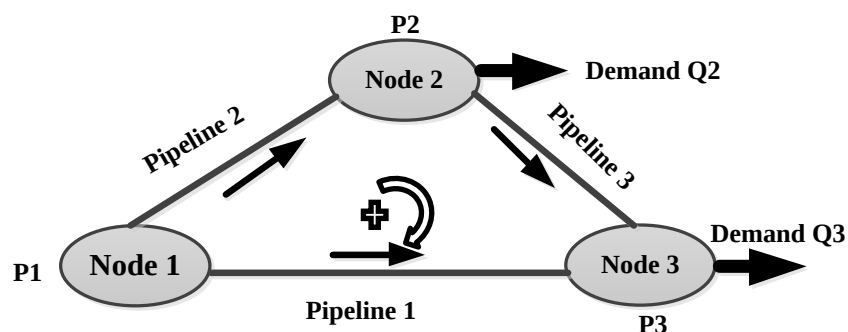
شکل ۵-۱۳ مقایسه منحنی تغییرات فشار در انتهای لوله برای دو حالت جریان همدم و جریان غیر همدم

۵-۳ جریان گذرا در شبکه های گاز طبیعی

با توجه به مطالب گفته شده در فصل ۴، در این فصل به مدلسازی چند نمونه از شبکه های گاز طبیعی در حالت گذرا پرداخته شده است. ابتدا دو شبکه نمونه خطوط لوله گاز طبیعی در حالت گذرا و برای معتبرسازی مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته شده است. سپس شبکه توزیع و تغذیه مدلسازی شده و در حالت گذرا و در شرایط حالت بحرانی مورد بحث و بررسی قرار گرفته است.

۵-۳-۱ معتبرسازی یک شبکه حلقوی گاز طبیعی

برای معتبرسازی محاسبات مربوط به شبکه های گاز طبیعی، ابتدا شبکه گاز طبیعی مهمی که در اکثر مطالعات گذشته بررسی شده، انتخاب گردیده است. در شکل ۵-۱۴، شبکه مورد نظر نشان داده شده است. مطابق شکل ۵-۱۴، این شبکه دارای ۳ گره، ۳ لوله و یک حلقه بسته می باشد. گره ۱، در حالت فشار ثابت و به عنوان گره مبنا در نظر گرفته شده است. مصرف گاز طبیعی در گره های ۲ و ۳ بر حسب زمان تغییر می کند. هدف در این شبکه معین کردن فشار گره ها و دبی خطوط لوله شبکه بر حسب زمان می باشد.

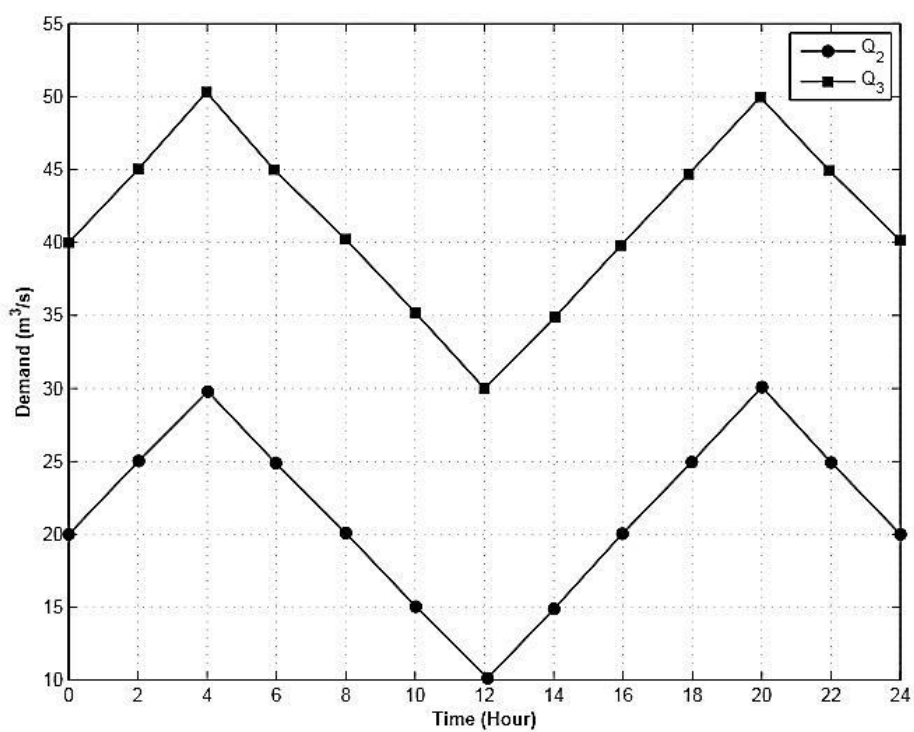


شکل ۵-۱۴ شبکه خطوط لوله حلقوی گاز طبیعی

جدول ۵-۲، مشخصات خطوط لوله در شبکه مورد مطالعه را نشان می دهد. همچنین شکل ۵-۱۵ مصارف را برای گره های ۲ و ۳ بر حسب زمان نشان می دهد. در محاسبات بازه زمانی Δt ، یک دقیقه (۶۰ ثانیه) فرض شده است که در محاسبات دیگر مطالعات نیز آورده شده است. لازم به ذکر است که ضریب اصطکاک در همه مطالعات قبلی ثابت و برابر با ۰/۰۰۳ و دما برابر با ۲۷۸ کلوین می باشند.

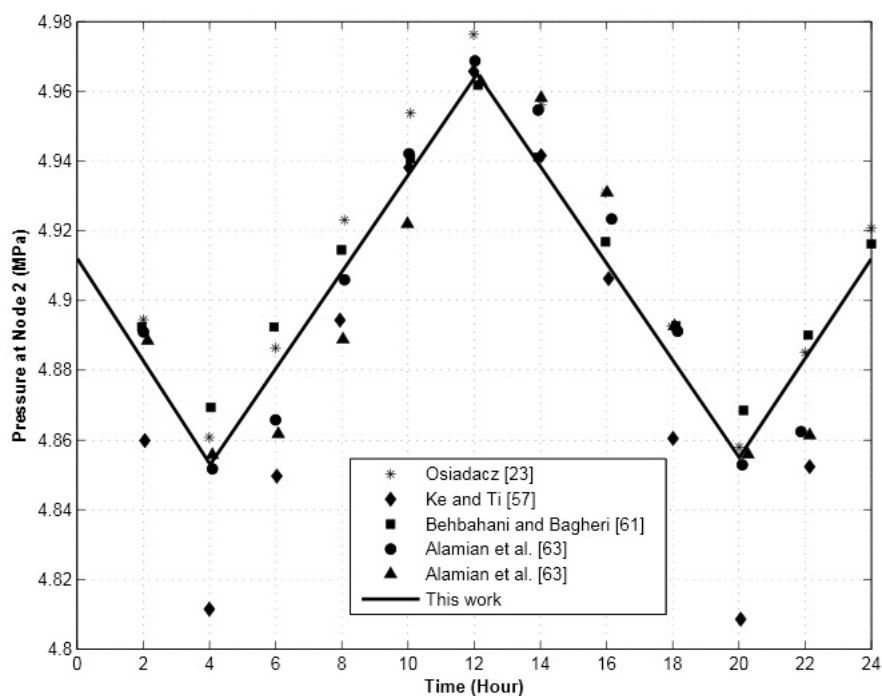
جدول ۲-۵ مشخصات لوله ها در شبکه مورد بررسی

شماره لوله	از گره	تا گره	قطر (متر)	طول (کیلومتر)
۱	۱	۳	۰/۶	۸۰
۲	۱	۲	۰/۶	۹۰
۳	۲	۳	۰/۶	۱۰۰

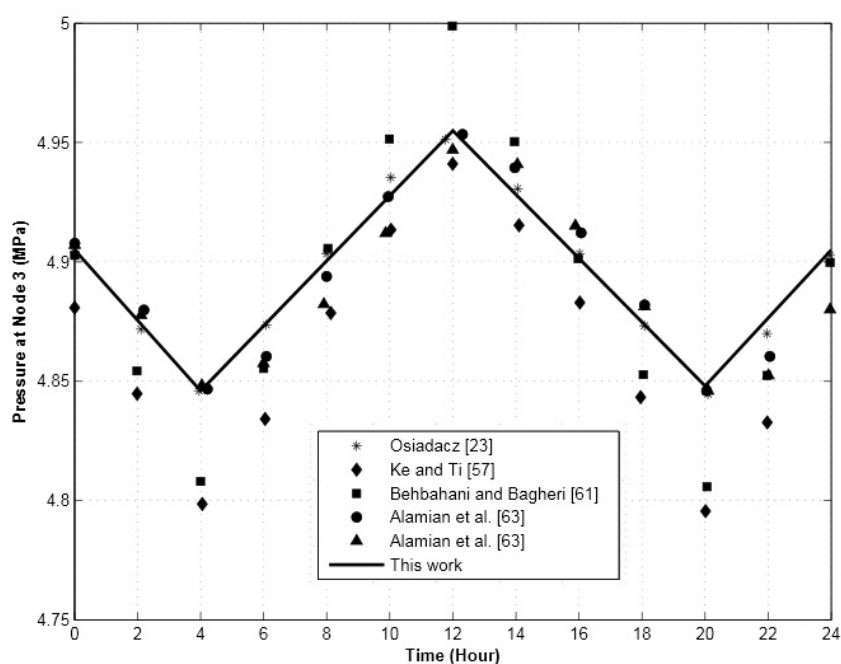


شکل ۵-۱۵ مصارف در گره های ۲ و ۳ بر حسب زمان

با تحلیل شبکه مورد نظر و مقایسه داده ها با مطالعات گذشته، فشار در گره ۲ و ۳ محاسبه شده و به ترتیب در شکل ۵-۱۶ و شکل ۵-۱۷ نشان داده شده اند. در این شکل ها، اشکال مطالعات گذشته و خط ممتد مطالعه حاضر در این پژوهش را نشان میدهند. جدول ۵-۳، درصد خطای محاسبات نسبت به مطالعات گذشته را برای محاسبه فشار گره های ۲ و ۳ نشان میدهد. با توجه به جدول ۵-۳، درصد خطا کمتر از ۰/۷٪ بوده که نشان دهنده دقت بالای روش ارائه شده در تحلیل شبکه های لوله می باشد.



شکل ۵-۱۶ فشار در گره ۲ بر حسب زمان، مطالعه حاضر و مطالعات گذشته



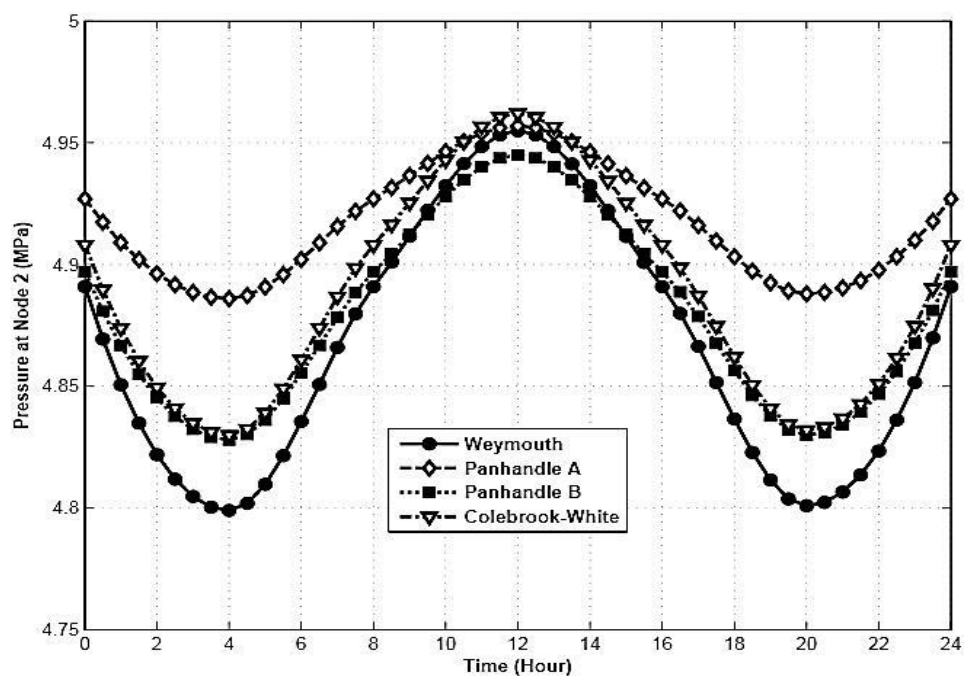
شکل ۵-۱۷ فشار در گره ۳ بر حسب زمان، مطالعه حاضر و مطالعات گذشته

جدول ۵-۳ درصد خطای محاسبات فشار گره ها در مقایسه با مطالعات گذشته

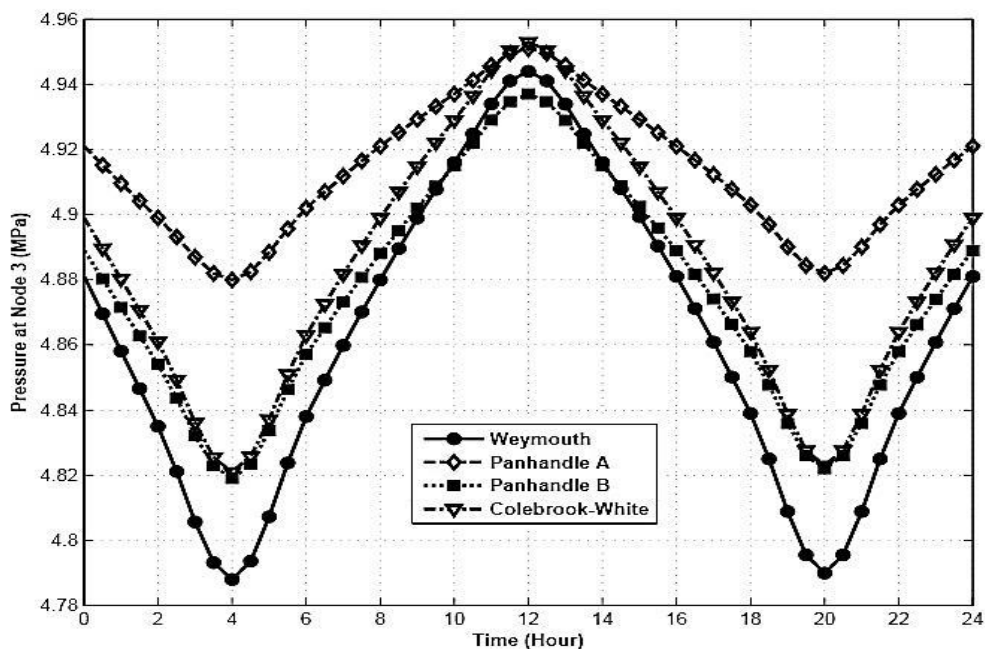
ازیاداک [۲۳]	کی و تی [۵۷]	بهیپهانی نژاد و باقری [۶۱]	علامیان و همکاران روش اول [۶۳]	علامیان و همکاران روش دوم [۶۳]	
درصد خطا (%)					فشار در گره ها
۰/۲	۰/۴	۰/۱۴	۰/۱۷	۰/۲۵	گره ۲
۰/۰۷۵	۰/۶۳	۰/۴۴	۰/۱۵	۰/۲۴	گره ۳

حال به بررسی تاثیر ضریب اصطکاک های متفاوت می پردازیم. فشار در شبکه مورد نظر و برای گره های ۲ و ۳ با استفاده از ضرایب اصطکاک متفاوت محاسبه شده است. شکل ۵-۱۸ و شکل ۵-۱۹ ، فشار در گره های ۲ و ۳ را بر حسب زمان و برای ضرایب اصطکاک مختلف نشان میدهد. با توجه به شکل ۵-۱۸ و

شکل ۵-۱۹، معادله ویموث بیشترین و معادله پن هندل A کمترین میزان افت فشار را برای خطوط لوله بر حسب زمان نشان می دهند.



شکل ۵-۱۸ فشار در گره ۲ بر حسب زمان و برای ضرایب اصطکاک متفاوت



شکل ۵-۱۹ فشار در گره ۳ بر حسب زمان و برای ضرایب اصطکاک متفاوت

لازم به ذکر است که در شکل ۵-۱۸ و شکل ۵-۱۹ فشار گره های موجود در شبکه با استفاده از معادلات اصطکاک مختلف، محاسبه گردیده است. با توجه به شکل ۵-۱۸ و شکل ۵-۱۹، نتایج استفاده از معادله ویموث با توجه به ثابت بودن آن، بسیار نزدیک به نتایج شرایط معتبرسازی می باشد.

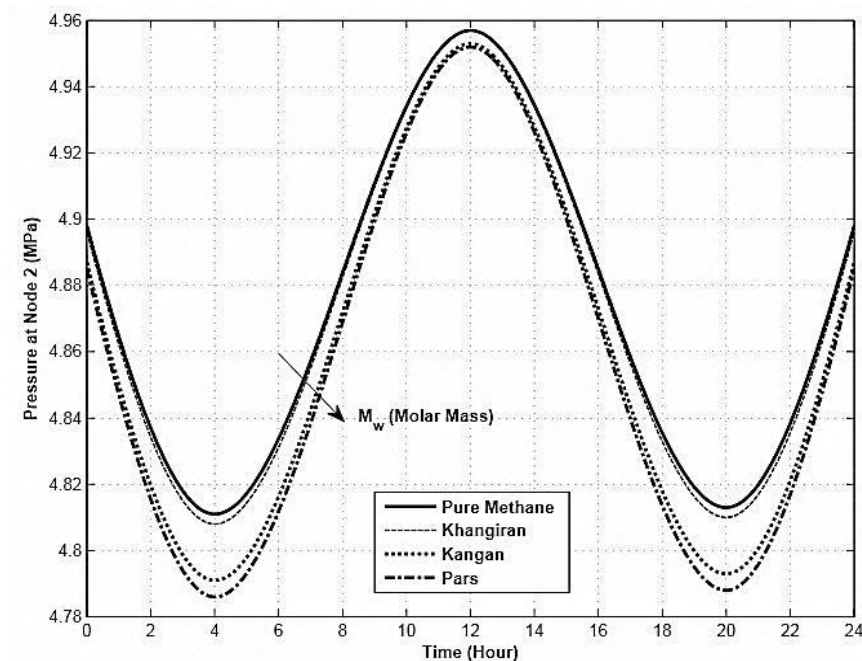
حال به تاثیر ترکیب گاز طبیعی بر روی فشار در گره های شبکه پرداخته شده است. در حقیقت تاثیرات گاز واقعی را در شبکه مورد بررسی قرار می دهیم. جدول ۵-۴، درصد مولی اجزای گاز طبیعی مناطق مختلف ایران که در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفته است را نشان می دهد.

جدول ۴-۵ درصد مولی اجزای تشکیل دهنده گاز طبیعی در مناطق مختلف گازی ایران [۲]

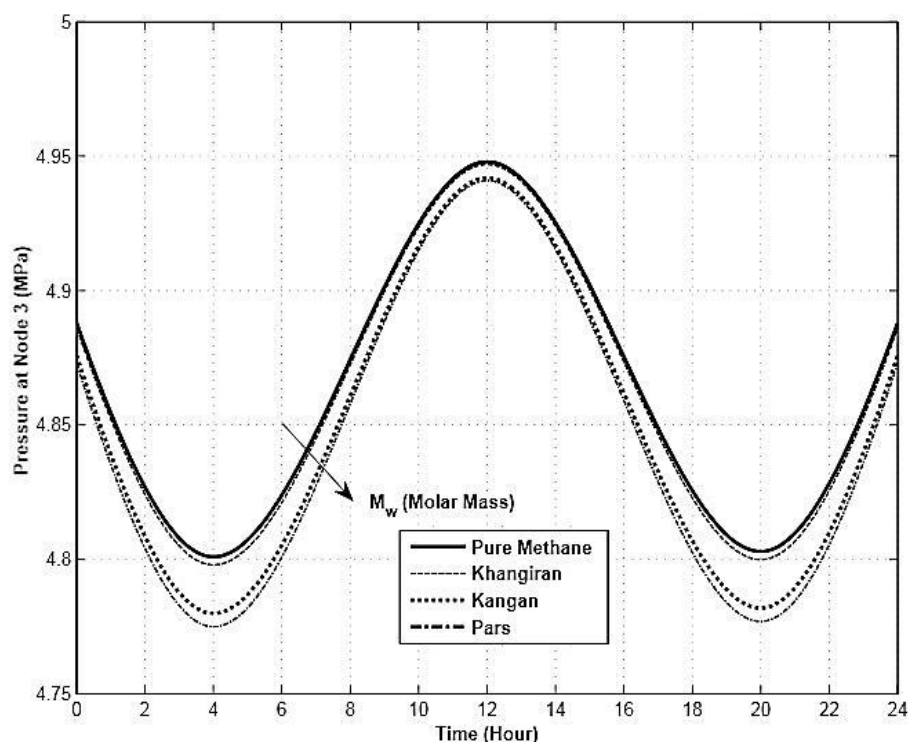
درصد مولی (%)			اجزای گاز طبیعی
پارس	کنگان	خانگیران	
۸۷	۹۰/۰۴	۹۸/۶	متان
۵/۴	۳/۶۹	۰/۵۹	اتان
۱/۷	۰/۹۳	۰/۰۹	پروپان
۰/۳	۰/۲	۰/۰۲	ایزو بوتان
۰/۴۵	۰/۲۹	۰/۰۴	بوتان نرمال
۰/۱۳	۰/۱۴	۰/۰۲	ایزو پنتان
۰/۱۱	۰/۰۸	۰/۰۲	پنتان نرمال
۰/۰۷	۰/۱۴	۰/۰۷	هگزان نرمال
۰/۰۳	۰/۰۱	۰	کربن ۷ و بالاتر
۳/۱	۴/۴۸	۰/۵۶	نیتروژن
۱/۸۵	۰	۰	دی اکسید کربن
۱۸/۶۸	۱۷/۷۹	۱۶/۳۱	وزن مولکولی (کیلوگرم بر کیلو مول)

شکل ۲۰-۵ و شکل ۲۱-۵، فشار در گره های ۲ و ۳ را بر حسب زمان و برای گازهای طبیعی مناطق مختلف نشان می دهد. با توجه به شکل ۲۰-۵ و شکل ۲۱-۵، با افزایش وزن مولکولی گاز طبیعی فشار در

گره ها کاهش یافته در نتیجه افت فشار در خطوط لوله افزایش پیدا می کند. در شکل ۵-۲۰ و شکل ۵-۲۱ از معادله ویموث برای محاسبه ضریب اصطکاک استفاده شده است. تاثیر وزن مولکولی در محاسبه وزن مولکولی نسبی می باشد و به طور مستقیم افت فشار را تحت تاثیر قرار می دهد.



شکل ۵-۲۰ فشار در گره ۲ بر حسب زمان و برای گازهای طبیعی مختلف



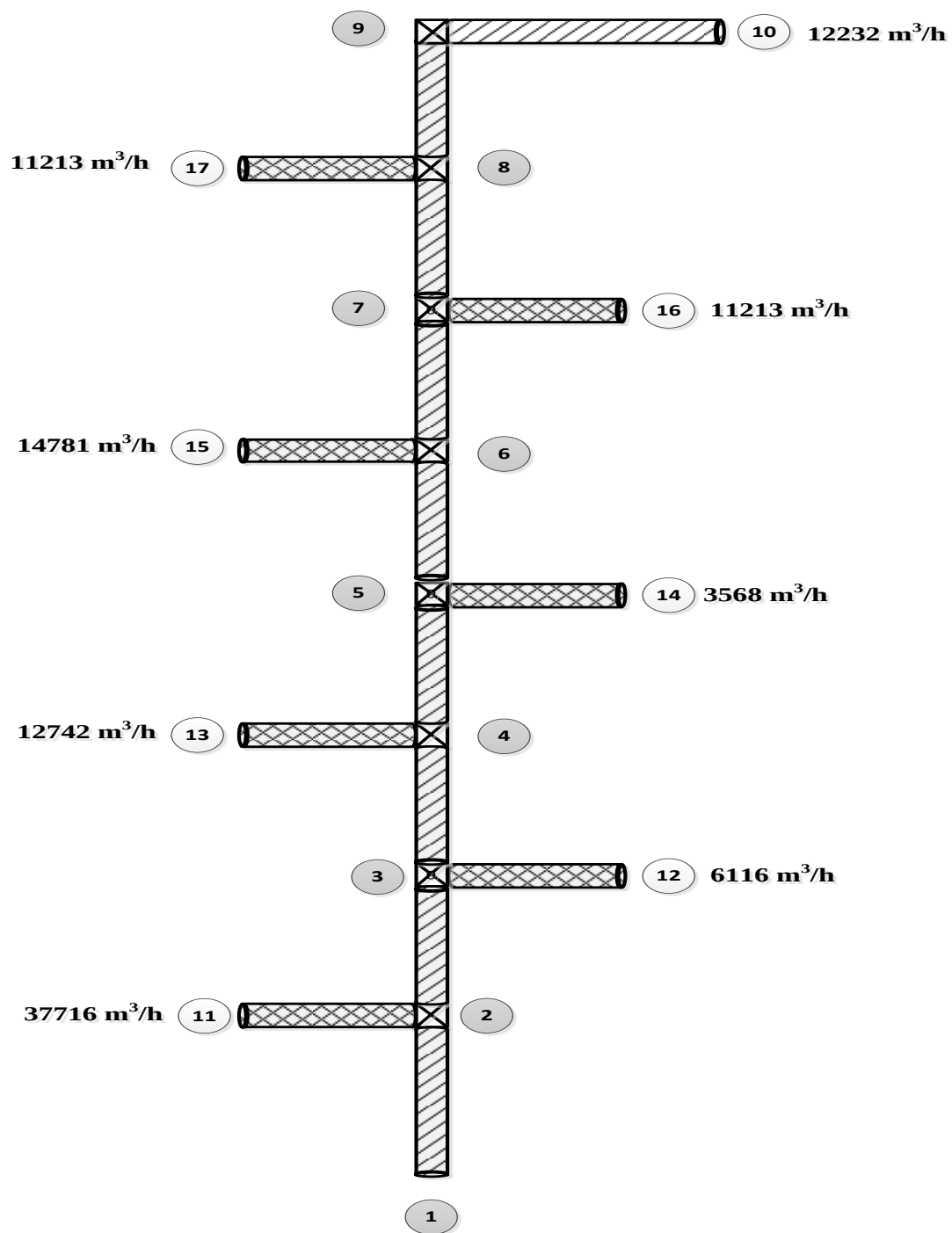
شکل ۵-۲۱ فشار در گره ۳ بر حسب زمان و برای گازهای طبیعی مختلف

۵-۳-۲ معتبرسازی یک شبکه شاخه ای گاز طبیعی

در این بخش به معتبرسازی روش ارائه شده برای شبکه های گاز طبیعی در حالت گذرا با استفاده از مطالعه کیوچی [۲۵] پرداخته ایم. شکل ۵-۲۲، شبکه خطوط لوله شاخه ای مورد مطالعه را نشان می دهد. شبکه مورد نظر شامل ۱۰ گره اصلی و ۷ گره به عنوان مصرف کننده می باشد. گره شماره یک گره مبنا بوده و گره های شماره ۱۰ تا ۱۷ به عنوان مصرف کننده می باشد. دبی های نوشته شده بر روی شکل برای گره های مصرف کننده در حالت پایا می باشند. جدول ۵-۵ مشخصات لوله ها و فواصل را در شبکه مورد نظر نشان می دهد.

جدول ۵-۵ مشخصات شبکه خطوط لوله شاخه ای گاز طبیعی مورد مطالعه

گره تا گره	D(mm)	L(km)	گره تا گره	D(mm)	L(km)
۱ تا ۲	۴۳۷	۱۸/۵	۲ تا ۱۱	۳۳۵	۲۹/۸
۲ تا ۳	۴۳۷	۳۹/۴	۳ تا ۱۲	۲۰۳	۷۸/۸
۳ تا ۴	۴۳۷	۲۰/۱	۴ تا ۱۳	۲۰۳	۱۱/۳
۴ تا ۵	۴۳۷	۲۰/۱	۵ تا ۱۴	۱۵۲	۱۳/۷
۵ تا ۶	۴۳۷	۱۰۷	۶ تا ۱۵	۳۳۵	۱۶/۹
۶ تا ۷	۴۳۷	۱۰۳	۷ تا ۱۶	۳۰۵	۱۶/۱
۷ تا ۸	۴۳۷	۱۸/۵	۸ تا ۱۷	۳۳۵	۳۸/۶
۸ تا ۹	۴۳۷	۳۰/۶			
۹ تا ۱۰	۳۰۵	۱۲/۹			

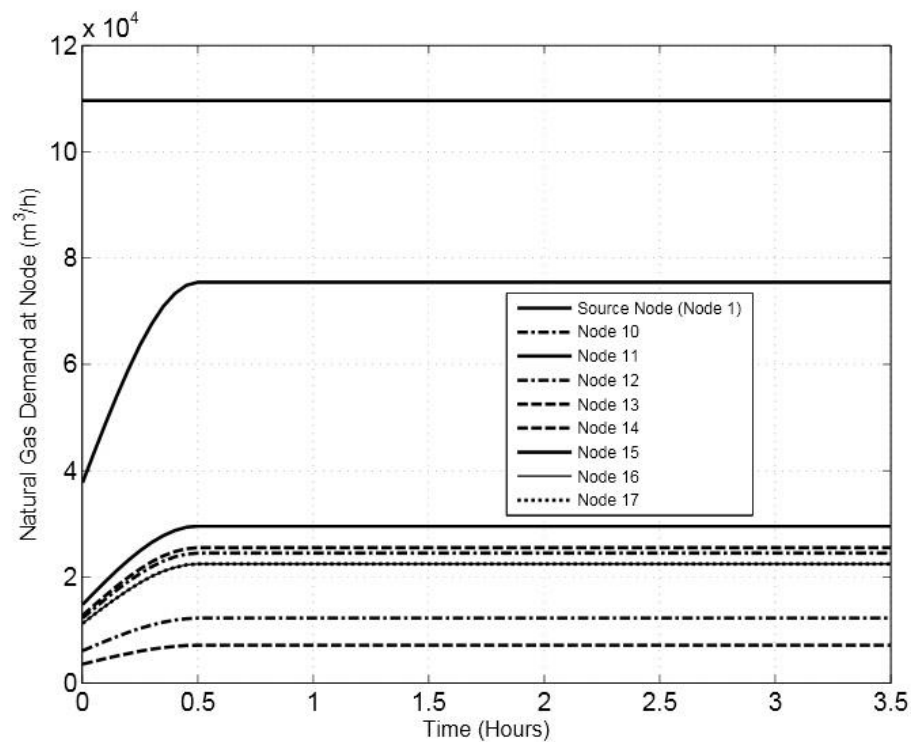


شکل ۵-۲۲ شبکه خطوط لوله شاخه ای گاز طبیعی مورد مطالعه

در شبکه مورد نظر حالت بحرانی مورد بررسی قرار گرفته است. حالت بحرانی برای شبکه مورد نظر به صورت زیر در نظر گرفته شده است:

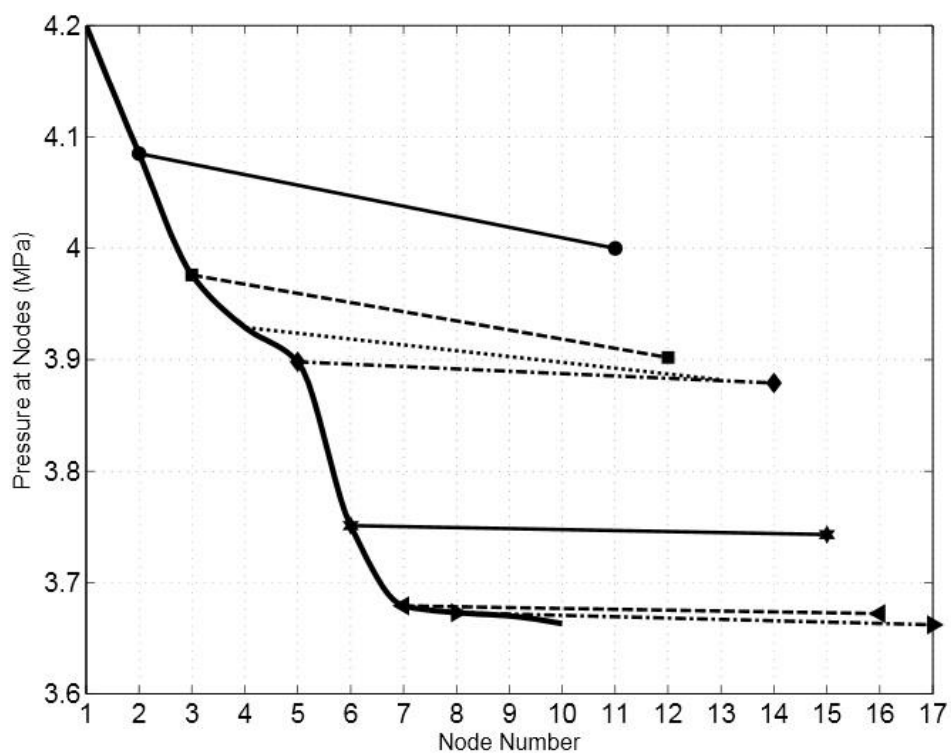
الف) مصرف گره های ۱۰ تا ۱۷ طی یک بازه نیم ساعته دو برابر شده و سپس در همین مقدار باقی می ماند.

ب) دبی ورودی شبکه، یا به عبارت دیگر دبی گره مبنا در طی تمامی زمان ها ثابت باقی می ماند. هدف پاسخ شبکه به شرایط بحرانی ۳/۵ ساعت بعد از اعمال این شرایط می باشد. لازم به توضیح است که دبی ورودی به شبکه برای کلیه زمان ها برابر با دبی در حالت پایا بوده که عبارت است از مجموع دبی مصرف شده در گره های مصرف کننده ۱۰ تا ۱۷. شکل ۵-۲۳ دبی گره های مختلف را بر حسب زمان مورد نظر نشان می دهد. دبی گره ها به عنوان شرایط مرزی در تحلیل شبکه مورد استفاده قرار می گیرند.



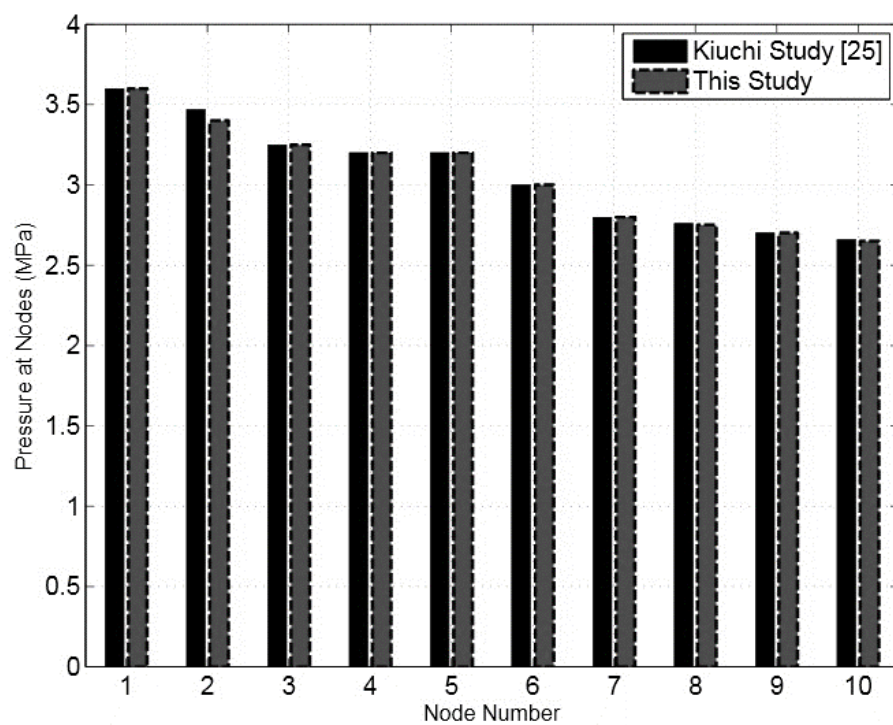
شکل ۵-۲۳ دبی گره ها بر حسب زمان مورد مطالعه

با توجه به اینکه برای محاسبه فشار بر حسب زمان معلوم بودن فشار در حالت اولیه ضروری می باشد، به همین منظور حالت اولیه، حالت پایای شبکه در نظر گرفته شده است. فشار در نقاط مختلف شبکه در حالت پایا محاسبه گردیده است. شکل ۵-۲۴، فشار در گره های مختلف شبکه خطوط مورد مطالعه را نشان می دهد. با توجه به شکل ۵-۲۴، فشار در گره های اصلی ۱ تا ۹ و فشار در گره های مصرف کننده ۱۰ تا ۱۷ محاسبه شده است.

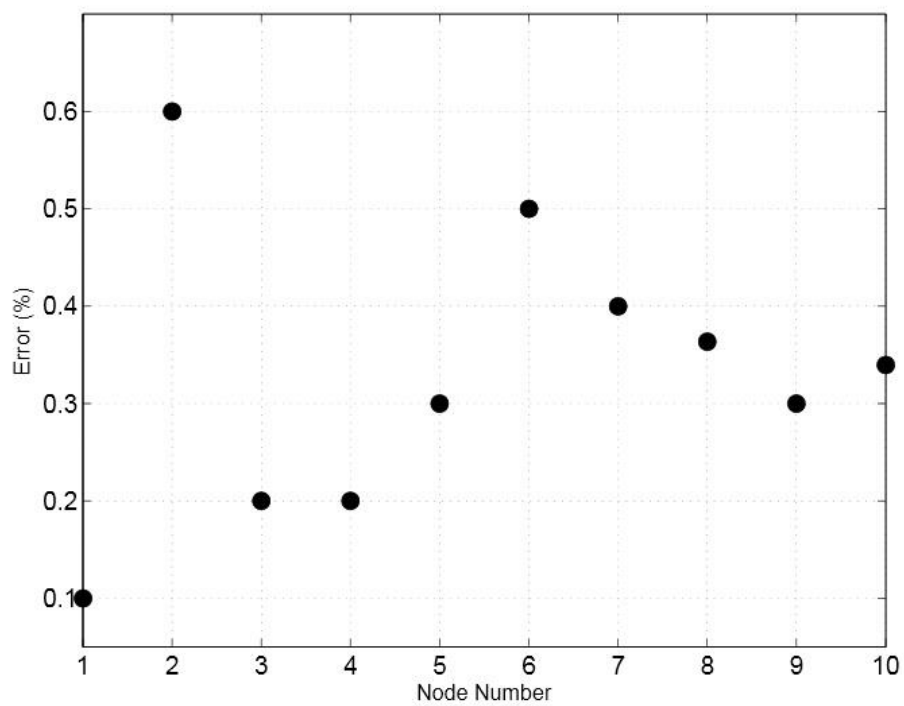


شکل ۲۴-۵ فشار در نقاط مختلف شبکه در حالت پایا

در این قسمت روش ارائه شده برای محاسبه فشار گره ها در حالت بحرانی در یک بازه زمانی ۳/۵ ساعته ، با شرایط مرزی مشخص شده در شکل ۲۵-۵، با مطالعه کیوچی [۲۵] مقایسه گردیده است. شکل ۲۵-۵، فشار گره های ۱ تا ۱۰ را بعد از بازه زمانی ۳/۵ ساعته محاسبه شده در این پژوهش و مطالعه کیوچی را نشان می دهد. همچنین شکل ۲۶-۵، درصد خطای محاسبات در مقایسه با مطالعه کیوچی را نشان می دهد.



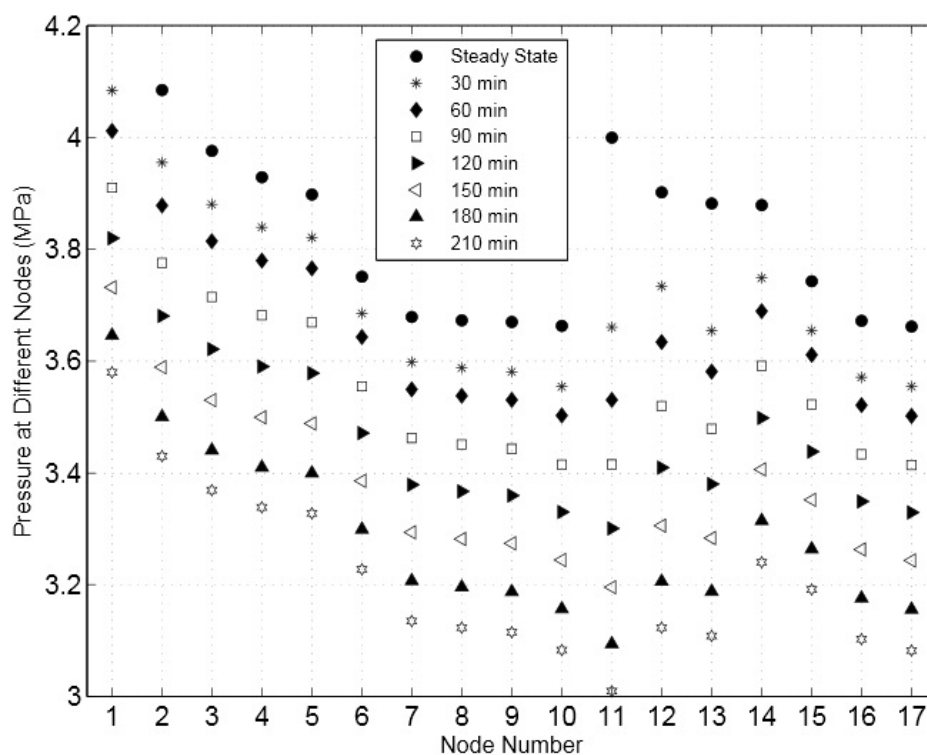
شکل ۵-۲۵ فشار در گره های ۱ تا ۱۰ توسط این مطالعه و مطالعه کیوچی [۲۵]



شکل ۵-۲۶ درصد خطا در محاسبه فشار گره ها نسبت به مطالعه کیوچی [۲۵]

شکل ۵-۲۵ و شکل ۵-۲۶، نشان دهنده آن است که روش پیشنهادی برای مدلسازی شبکه های گاز طبیعی از دقت قابل قبولی در مقایسه با روش های دیگر برخوردار می باشد. همچنین درصد خطای متوسط میانگین در مقایسه با مطالعه کیوچی [۲۵]، برابر با ۰/۳۷٪ می باشد که دقت بسیار بالایی می باشد.

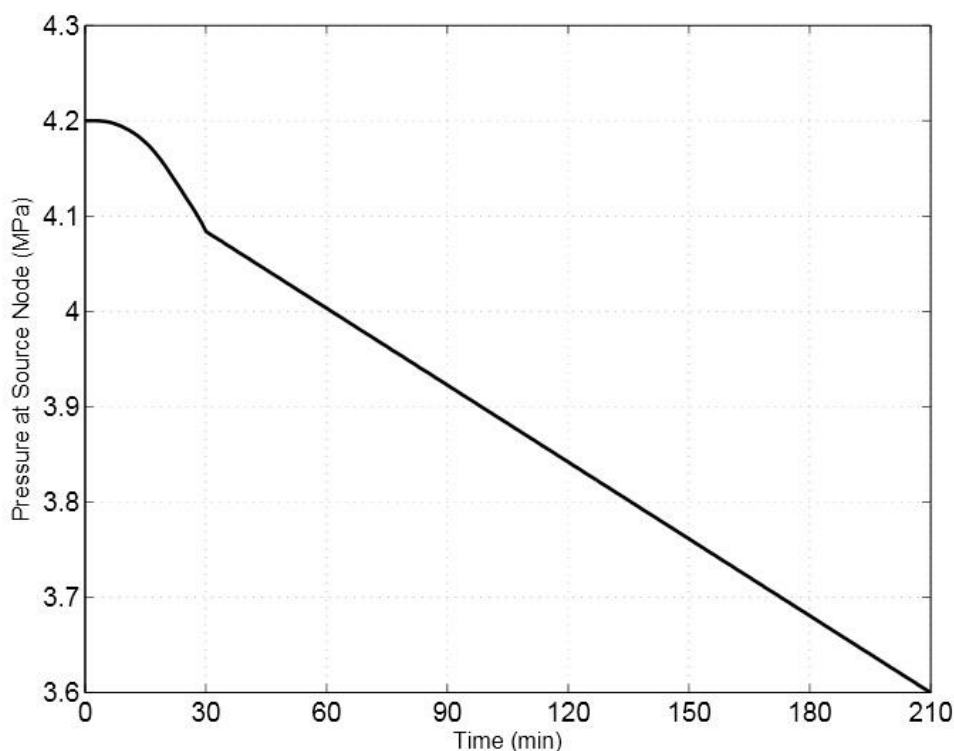
در این قسمت فشار گره های مختلف شبکه در حالت بحرانی و در بازه زمانی ۳/۵ ساعته محاسبه گردیده است. شکل ۵-۲۷، فشار در گره های مختلف شبکه را در بازه های نیم ساعته از حالت پایا نشان می دهد.



شکل ۵-۲۷ فشار در گره های مختلف شبکه در بازه های نیم ساعته از حالت پایا تا ۳/۵ ساعت

با توجه به شکل ۵-۲۷، در بازه زمانی نیم ساعته از حالت پایا که مصرف در گره های ۱۰ تا ۱۷ دو برابر می شود، افت فشار بیشتری در گره ها اتفاق افتاده است. همچنین از نیم ساعت تا ۳/۵ ساعت که مصرف گره ها تغییر نمی کنند در بازه های نیم ساعته، افت فشار یکسانی برای گره ها اتفاق افتاده است.

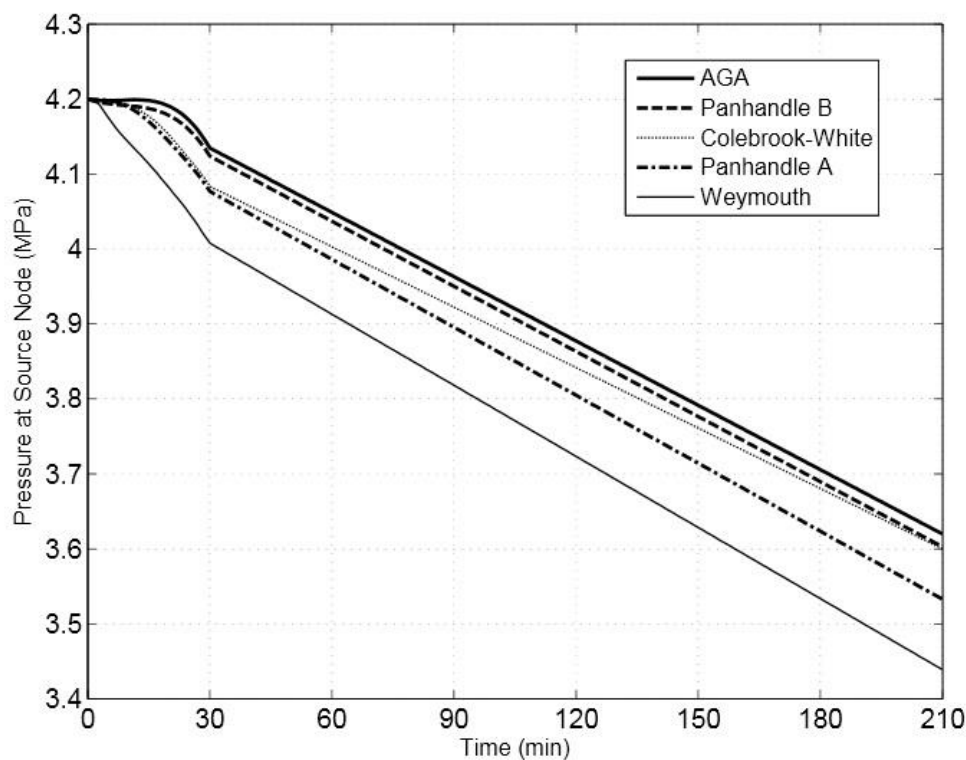
از آنجائیکه دبی ورودی برای گره شماره ۱ به عنوان گره مبنا در طول بازه ۳/۵ ساعته تغییر نمی کند، افت فشار این گره از اهمیت خاصی برخوردار می باشد. فشار در گره مبنا اگر در شرایط بحرانی از مقدار خاصی کمتر شود باعث افزایش سرعت در خطوط لوله شده که می تواند برای شبکه گازرسانی خطرآفرین باشد. شکل ۲۸-۵، تغییرات فشار گره مبنا را بر حسب زمان در حالت بحرانی و در یک بازه ۳/۵ ساعته نشان می دهد. با توجه به شکل ۲۸-۵، افت فشار در نیم ساعت اول با توجه به افزایش خطی دبی مصرف کننده ها، به صورت درجه دو بوده و برای بازه های دیگر زمانی با توجه به ثابت ماندن دبی مصرف کننده در حالت بحرانی به صورت خطی تغییر می کند.



شکل ۲۸-۵ فشار در گره مبنا بر حسب زمان در حالت بحرانی

شکل ۲۹-۵، فشار گره مبنا را برای ضرایب اصطکاک مختلف بر حسب زمان و در حالت بحرانی نشان می دهد. با توجه به شکل ۲۹-۵، معادله ویموث بیشترین افت فشار و معادله AGA کمترین افت فشار را برای

گره مبنا بر حسب زمان گزارش کرده اند. با توجه به سادگی معادله ویموث و وابسته نبودن آن به عدد رینولدز و زبری نسبی لوله ها، در اکثر مواقع از این معادله در صنعت گاز استفاده می شود. اما تقریب درست تر نسبت به حالت های دیگر استفاده از معادلاتی است که تاثیر عدد رینولدز و همچنین دبی جریان در آنها لحاظ شده باشد (معادله کلبروک - وایت). با توجه به نتایج بدست آمده، می توان نتیجه گیری نمود که ضریب اصطکاک یک پارامتر مهم در تحلیل شبکه خطوط لوله به طور ویژه در حالت بحرانی می باشد.



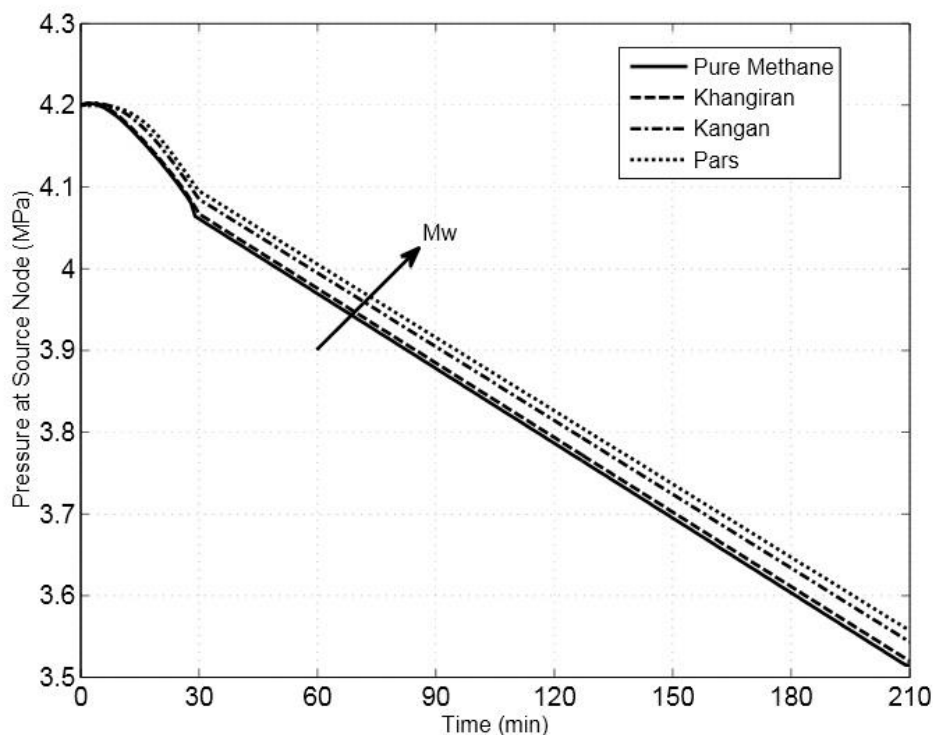
شکل ۵-۲۹ فشار در گره مبنا بر حسب زمان برای ضرایب اصطکاک مختلف و در حالت بحرانی

شکل ۵-۳۰، فشار در گره مبنا بر حسب زمان را برای متان خالص و گازهای طبیعی مناطق مختلف ایران در حالت بحرانی را نشان می دهد. با توجه به شکل ۵-۳۰، با افزایش وزن مولکولی گاز طبیعی، افت

فشار کمتری در گره مبنا اتفاق افتاده است. به طور مثال افت فشار در گره مبنا برای گاز طبیعی پارس با وزن مولکولی ۱۸/۶۸ کمتر از گاز طبیعی خانگیران با وزن مولکولی ۱۶/۳۱ می باشد.

با افزایش وزن مولکولی میزان جرم ذخیره شده توسط گاز طبیعی در یک مخزن مشخص با فشار و دمای مشخص، افزایش پیدا می کند. با توجه به نکته ذکر شده، با افزایش وزن مولکولی گاز طبیعی، مقدار گاز بیشتری در فشار مشخص در لوله های متصل به گره مبنا ذخیره شده و در نهایت با توجه به انباشتگی گاز طبیعی درون خطوط لوله شبکه، گره مبنا در این حالت افت فشار کمتری را گزارش می کند.

بنابراین می توان نتیجه گیری نمود برای جلوگیری از مشکلات ناشی از شرایط بحرانی و افت فشار ناشی از آن، می توان از گازهای با وزن مولکولی بزرگتر استفاده نمود. به شرطی که در شرایط عملیاتی بتوان از گازهای با وزن مولکولی بزرگتر استفاده نمود، میتوان از بروز مشکلاتی قبیل افزایش سرعت و از کار افتادن شیرهای فشارشکن در شبکه ها، جلوگیری نمود.

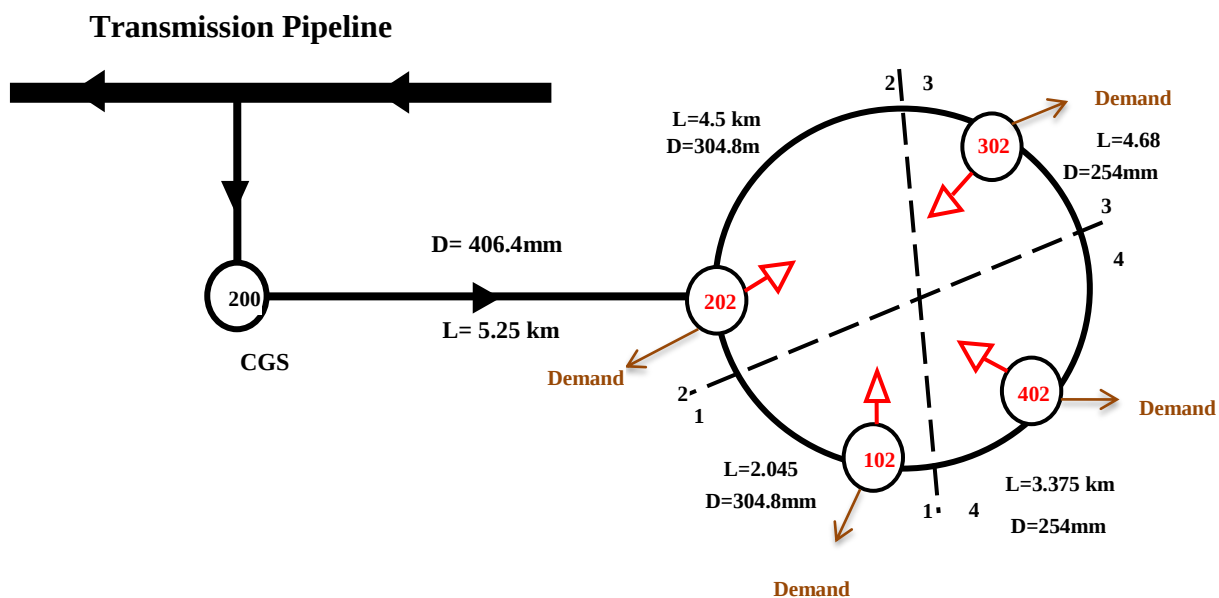


شکل ۳-۵ فشار در گره مبنا بر حسب زمان برای گازهای طبیعی مناطق مختلف در حالت بحرانی

۳-۳-۵ بررسی شبکه تغذیه گاز طبیعی در حالت گذرا و شرایط بحرانی

بعد از معتبرسازی روش پیشنهادی برای مدلسازی و تحلیل شبکه های گاز طبیعی، در این بخش یک شبکه تغذیه گاز طبیعی (حلقه کمربندی) مورد مدلسازی، بحث و بررسی شرایط بحرانی قرار گرفته است. شکل ۳۱-۵ شماتیک شبکه تغذیه مورد مطالعه را نشان می دهد همچنین جدول ۵-۶ مشخصات لوله های شبکه مورد مطالعه و

جدول ۵-۷ مقدار مصرف گره ها در حالت پایا برای شبکه مورد مطالعه را نشان میدهند.



شکل ۳۱-۵ شماتیک شبکه تغذیه مورد مطالعه

جدول ۶-۵ مشخصات لوله های شبکه مورد مطالعه

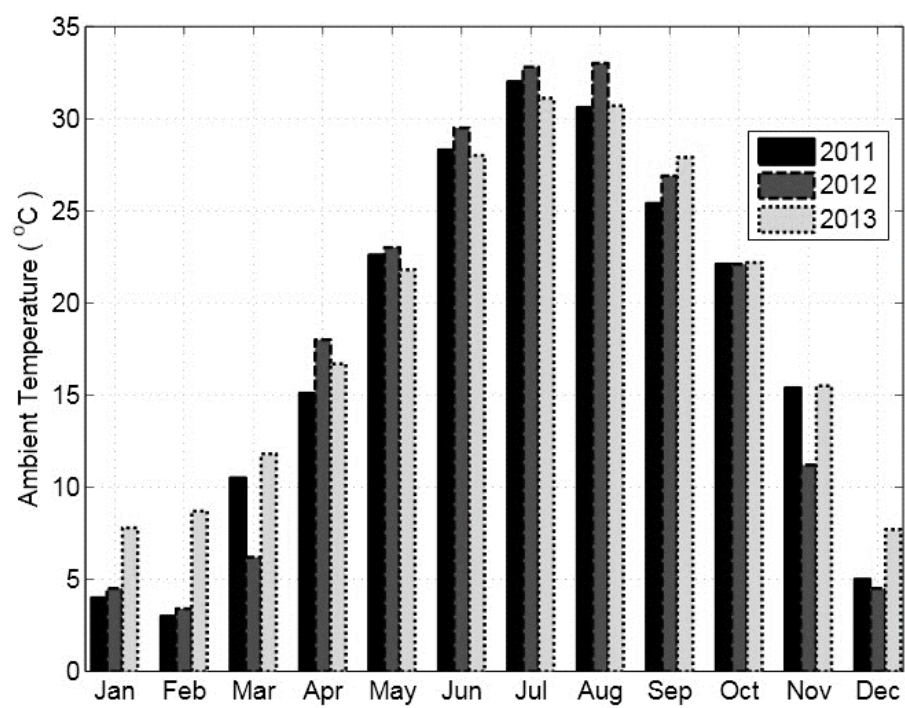
شماره مشخصه لوله	از گره	تا گره	قطر (میلیمتر)	طول (کیلومتر)
۰	۲۰۰	۲۰۲	۴۰۶/۴	۵/۲۵۰
۱	۲۰۲	۱۰۲	۳۰۴/۸	۲/۰۴۵
۲	۲۰۲	۳۰۲	۳۰۴/۸	۴/۵
۳	۳۰۲	۴۰۲	۲۵۴	۴/۶۸
۴	۱۰۲	۴۰۲	۲۵۴	۳/۳۷۵

جدول ۷-۵ مقدار مصرف گره ها در حالت پایا برای شبکه مورد مطالعه

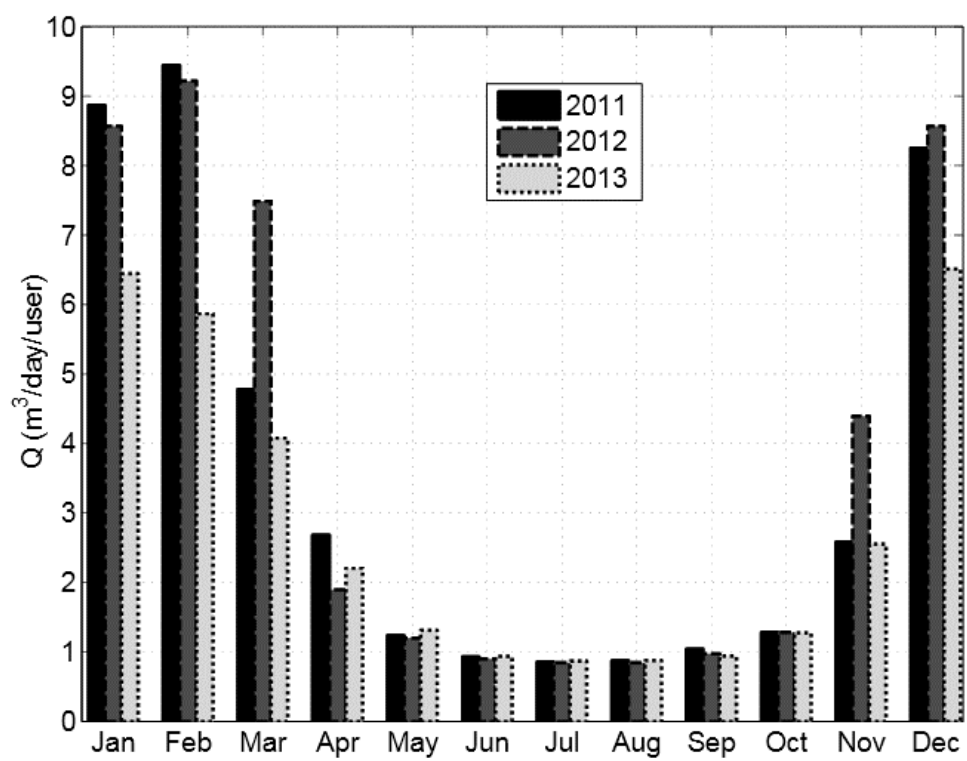
شماره گره	مصرف گاز طبیعی (مترمکعب بر ساعت)
۱۰۲	۵۰۰۰
۲۰۲	۵۰۰۰
۳۰۲	۵۰۰۰
۴۰۲	۱۶۳۰۰

۵-۳-۳-۱ محاسبه مصرف گاز طبیعی در شبکه مورد مطالعه (مطالعه موردی شهر سمنان)

در این بخش و برای اینکه مصرف گاز طبیعی برای گره های مختلف حالت واقعی داشته باشد، شهر سمنان به عنوان نمونه انتخاب شده است. شکل ۵-۳۲ متوسط دمای محیط برای ماه های مختلف را در طی سالهای ۲۰۱۱ تا ۲۰۱۳ در شهر سمنان نشان می دهد [۹۹]. شکل ۵-۳۳ مصرف گاز طبیعی برای ماه های مختلف در طی سالهای ۲۰۱۱ تا ۲۰۱۳ در شهر سمنان نشان می دهد [۲].

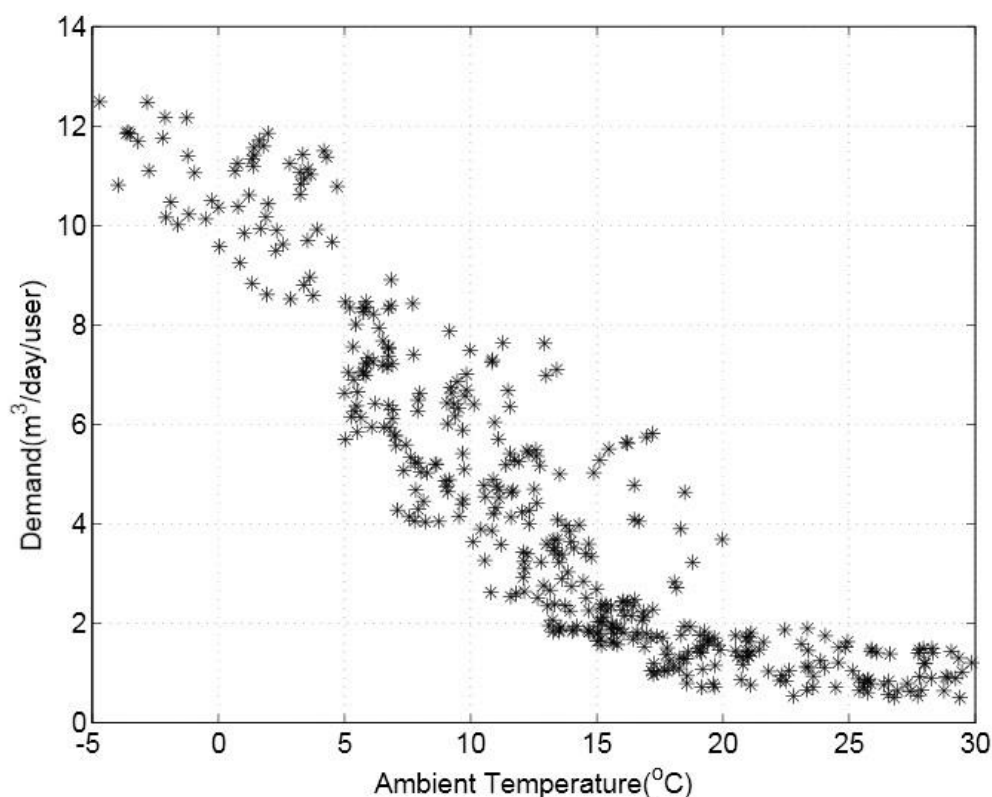


شکل ۵-۳۲ متوسط دمای محیط برای ماه های مختلف



شکل ۳-۵ مصرف گاز طبیعی برای ماه های مختلف

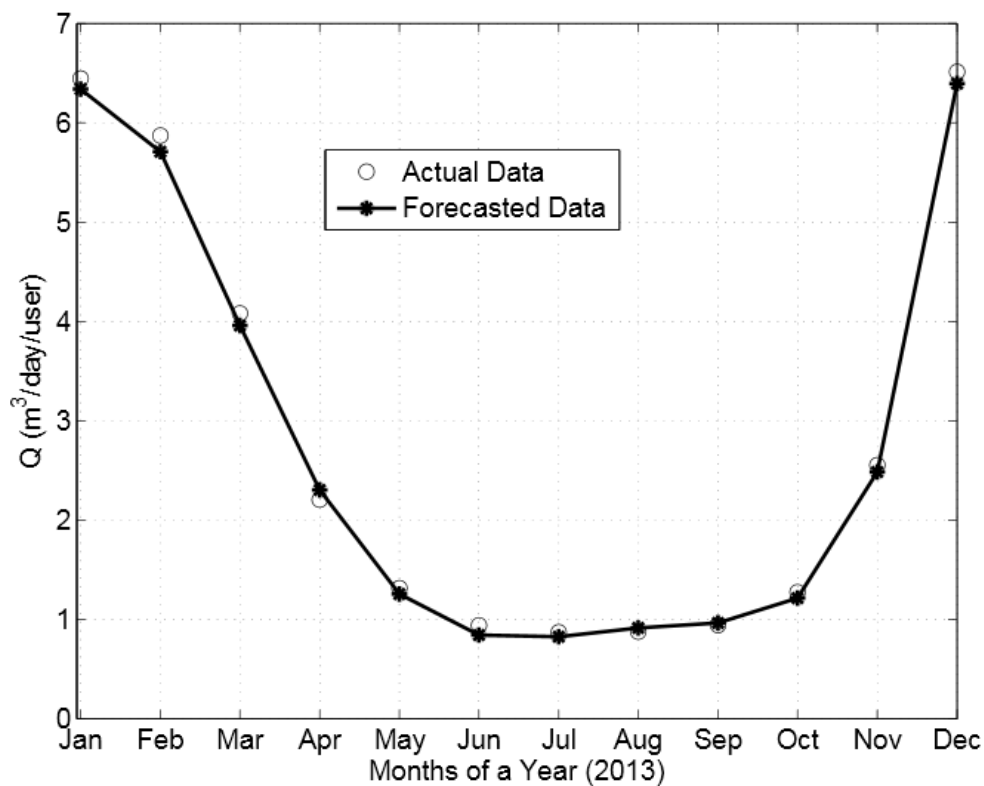
با توجه به شکل های نشان داده شده برای مصرف و دمای محیط، شکل ۵-۳۴ الگوی مصرف گاز طبیعی بر حسب دمای محیط را بر حسب متر مکعب و بر تعداد مصرف کنندگان نشان می دهد. با توجه به شکل مصرف گاز طبیعی بین دمای ۵- تا ۱۵ درجه یک سیر صعودی داشته و از دمای ۱۵ تا ۳۰ درجه تقریباً ثابت باقی می ماند.



شکل ۵-۳۴ الگوی مصرف گاز طبیعی بر حسب دمای محیط

با داشتن داده های مورد نظر برای دمای محیط و مصرف گاز طبیعی، برای پیش بینی مصرف با توجه به دمای محیط از شبکه های عصبی چند لایه استفاده شده است. با داشتن یک شبکه عصبی و با دادن دمای محیط به عنوان ورودی، مصرف گاز طبیعی در هر دمای محیط محاسبه گردیده است. شکل ۵-۳۵ مصرف گاز طبیعی بر حسب در ماه های مختلف یک سال (سال ۲۰۱۳) را برای شهر سمنان نشان میدهد.

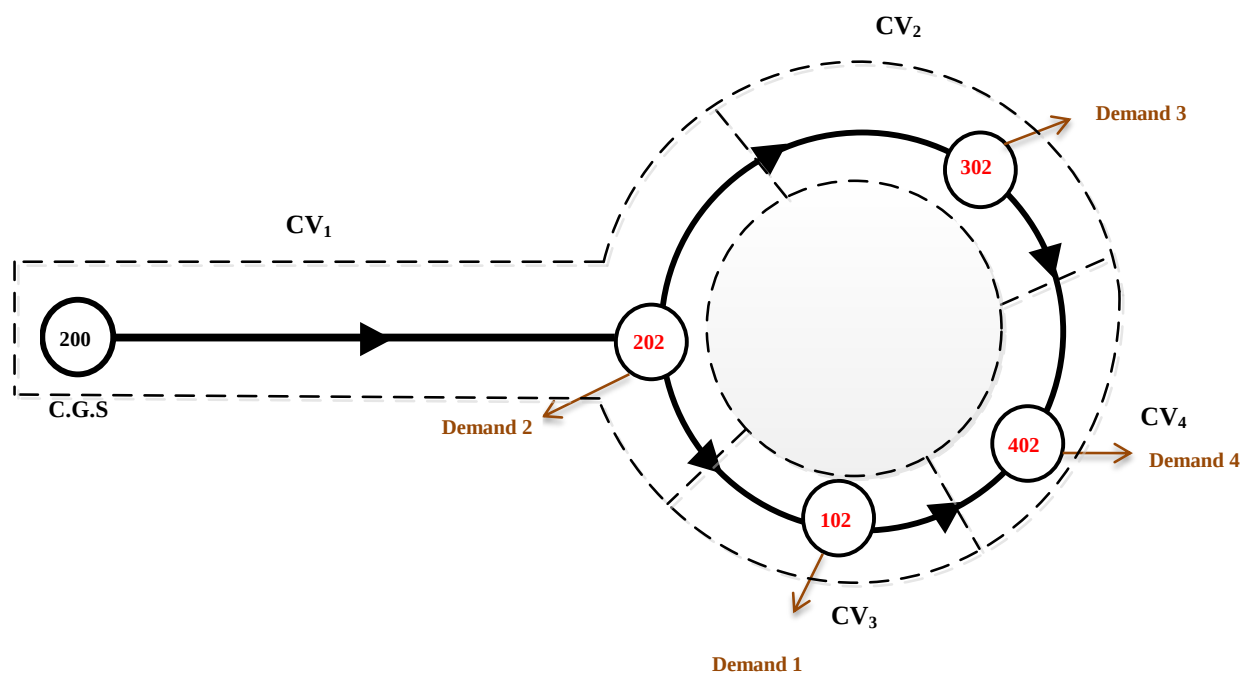
در شکل داده های اندازه گیری شده با داده های پیش بینی شده با استفاده از مدل شبکه های عصبی ترسیم شده اند.



شکل ۵-۳ مصرف گاز طبیعی بر حسب در ماه های مختلف یک سال

۵-۳-۲ تحلیل شبکه تغذیه مورد مطالعه در حالت گذرا

با توجه به مطالب بیان شده در مورد مدلسازی شبکه های توزیع و تغذیه در حالت گذرا، شبکه مورد مطالعه تقسیم بندی شده و حجم های کنترل مختلف شبکه، تعریف می گردند. شکل ۵-۳۶ حجم های کنترل در شبکه تغذیه مورد مطالعه را نشان می دهد.



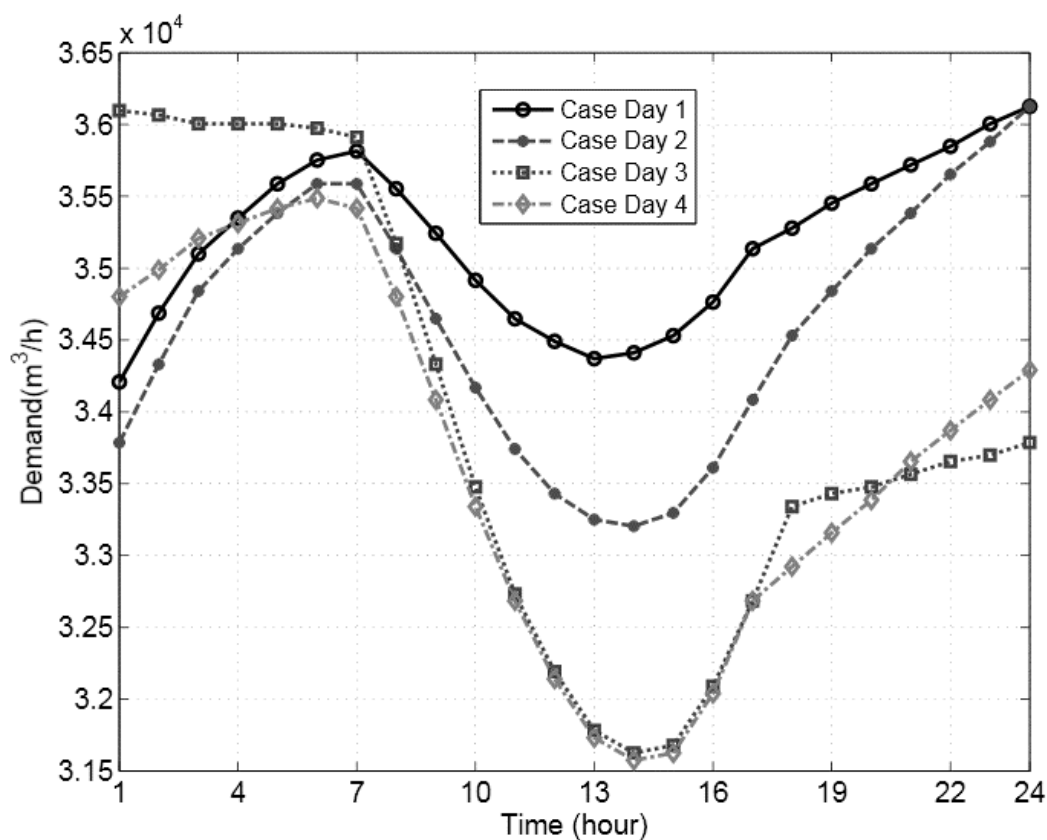
شکل ۵-۳۶ حجم های کنترل در شبکه تغذیه مورد مطالعه

برای اینکه تاثیر دمای گاز طبیعی بر شبکه مورد نظر بررسی شود، دمای چهار روز سرد سال برای شهر سمنان انتخاب شده است. جدول ۵-۸ تغییرات ساعتی دمای محیط برای چهار روز سرد سال را نشان می دهد. برای هر روز و در یک ساعت ویژه، دمای محیط کمترین مقدار را دارا می باشد که در جدول به صورت برجسته نشان داده شده است.

با داشتن دمای محیط بر حسب ساعت، مصرف گاز طبیعی برای شبکه در ساعت های مختلف با استفاده از شبکه عصبی طراحی شده محاسبه می گردد. شکل ۵-۳۷ مصرف گاز طبیعی در گره ها بر حسب ساعت و در چهار روز مختلف را نشان می دهد. با توجه به شکل، بدیهی است که در نقاطی که دما کمترین مقدار خود را دارا می باشد، مصرف گاز طبیعی ماکزیمم مقدار خود را دارا می باشد.

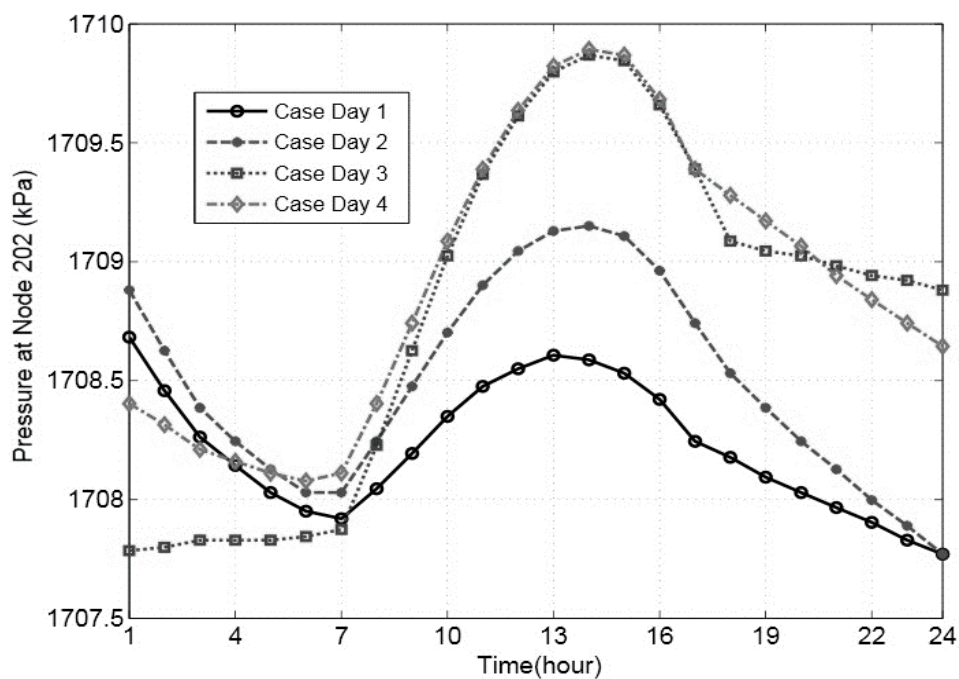
جدول ۵-۸ تغییرات ساعتی دمای محیط برای چهار روز سرد سال

Time (hour)	case day 1	case day 2	case day 3	case day 4
	ambient temperature (°C)			
1	0.78	1.21	-1.51	0.13
2	0.26	0.65	-1.47	-0.09
3	-0.22	0.09	-1.38	-0.34
4	-0.52	-0.26	-1.38	-0.47
5	-0.82	-0.56	-1.38	-0.60
6	-1.03	-0.82	-1.34	-0.69
7	-1.12	-0.82	-1.25	-0.60
8	-0.78	-0.26	-0.30	0.13
9	-0.39	0.30	0.65	0.91
10	0	0.82	1.51	1.64
11	0.30	1.25	2.20	2.24
12	0.47	1.55	2.67	2.72
13	0.60	1.72	3.02	3.06
14	0.56	1.77	3.15	3.19
15	0.43	1.68	3.10	3.15
16	0.17	1.38	2.76	2.80
17	-0.26	0.91	2.24	2.24
18	-0.43	0.43	1.64	2.03
19	-0.65	0.09	1.55	1.81
20	-0.82	-0.26	1.51	1.59
21	-0.99	-0.56	1.42	1.34
22	-1.16	-0.91	1.34	1.12
23	-1.38	-1.21	1.29	0.91
24	-1.55	-1.55	1.21	0.69

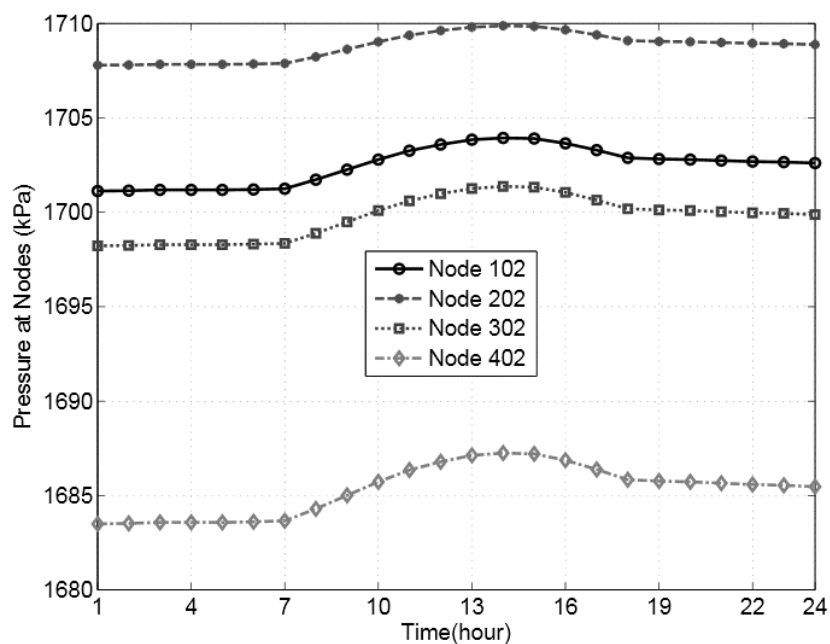


شکل ۵-۳۷ مصرف گاز طبیعی در گره ها بر حسب ساعت و در چهار روز مختلف

با دانستن دبی مصرف شده در گره ها به عنوان شرط مرزی برای حل مسئله، فشار در گره های مختلف محاسبه می گردد. شکل ۵-۳۸ تغییرات ساعتی فشار گره ۲۰۲ شبکه تغذیه برای چهار روز مختلف را نشان می دهد. همچنین در شکل ۵-۳۹ تغییرات ساعتی فشار کلیه گره های شبکه تغذیه در روز سوم در سال ۲۰۱۳ محاسبه گردیده است. با توجه به شکل های مربوط به فشار ملاحظه می گردد که در صورت افزایش مصرف گاز طبیعی، فشار گاز طبیعی در گره ها کاهش می یابد که این کاهش فشار در هنگام مصرف بیشتر، بالاتر بوده و باید مورد توجه قرار بگیرد.

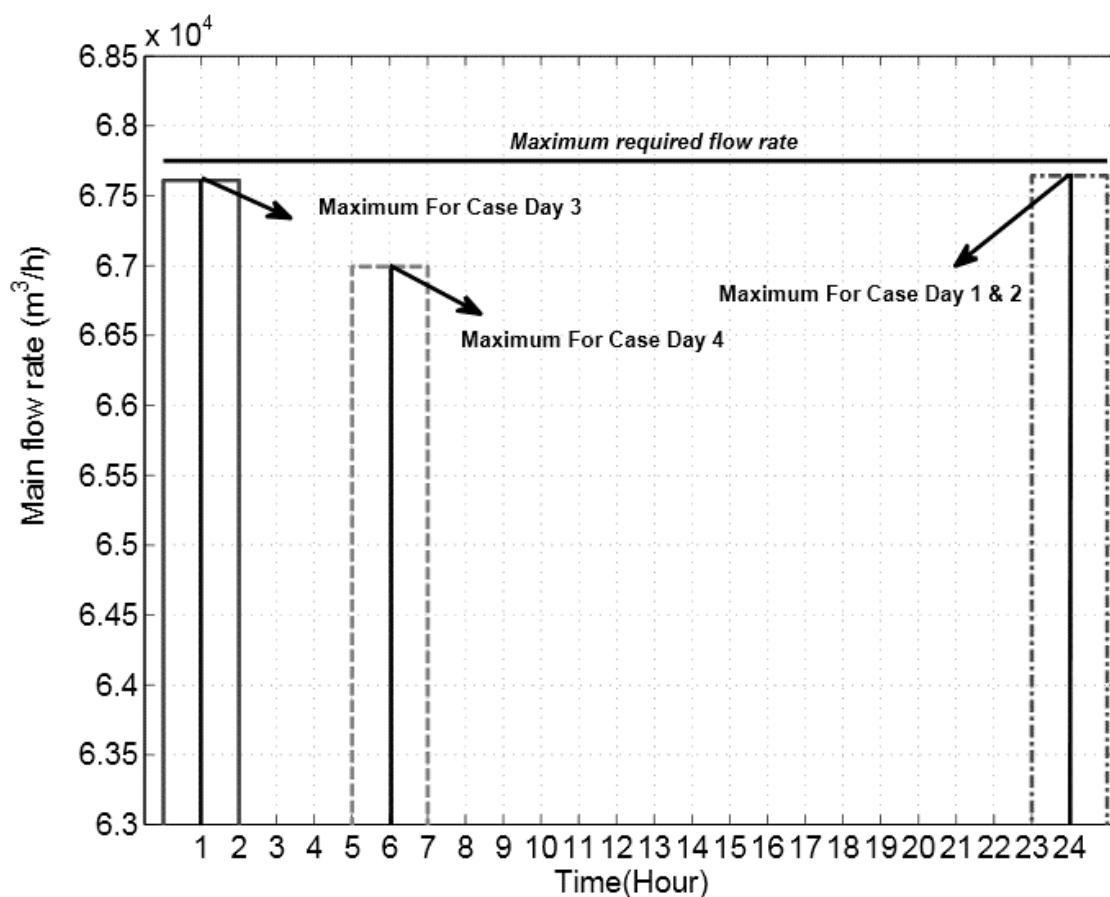


شکل ۳۸-۵ تغییرات ساعتی فشار گره ۲۰۲ شبکه تغذیه برای چهار روز مختلف



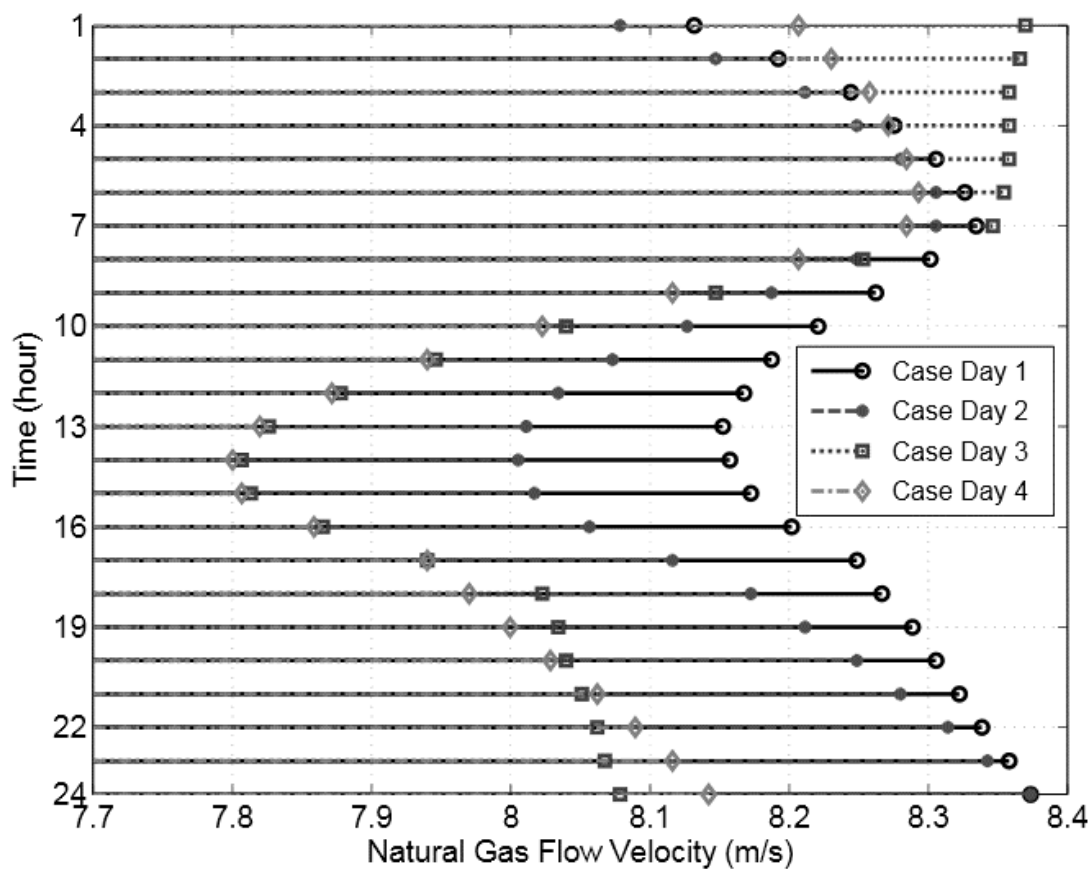
شکل ۳۹-۵ تغییرات ساعتی فشار کلیه گره های شبکه تغذیه در روز سوم در سال ۲۰۱۳

با مشخص بودن فشار و دبی در گره ها می توان، مقدار دبی مصرفی برای شبکه و سرعت گاز در خطوط لوله را محاسبه نمود. شکل ۴۰-۵ ماکزیمم مصرف بر حسب ساعت و برای روزهای مختلف را نشان می دهد.



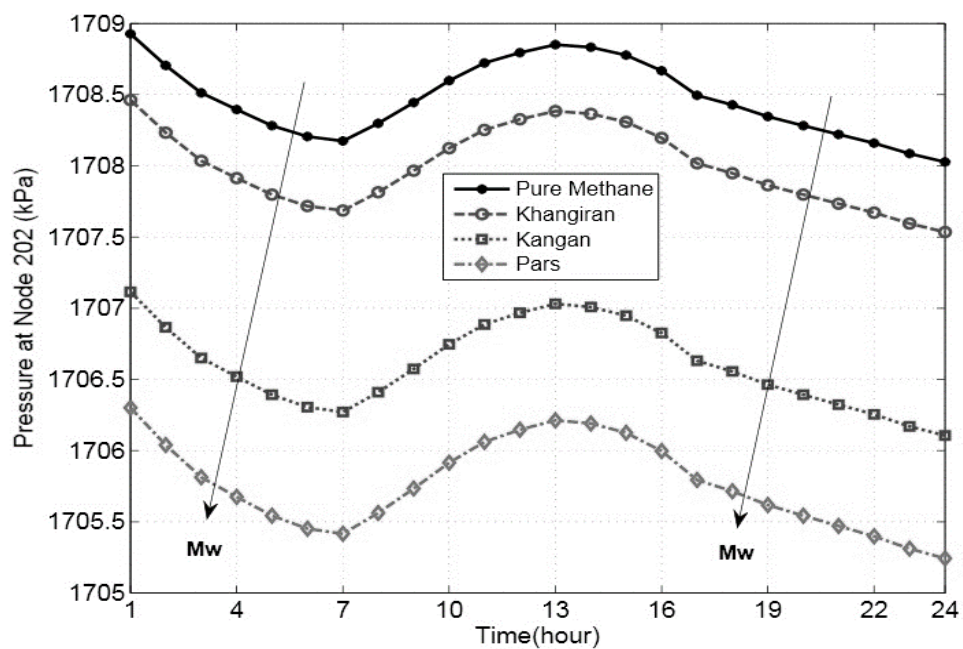
شکل ۴۰-۵ ماکزیمم مصرف بر حسب ساعت و برای روزهای مختلف در شبکه تغذیه

شکل ۴۱-۵ محاسبه سرعت گاز طبیعی بر حسب زمان در شبکه توزیع برای روزهای مختلف را نشان می دهد. سرعت در خط لوله اصلی بین گره ۲۰۰ و ۲۰۲ محاسبه گردیده است. با توجه به شکل ۴۱-۵، سرعت گاز طبیعی در تمامی ساعات و در روزهای مختلف کمتر از حالت استاندارد ۱۸ متر بر ثانیه بوده که نشان دهنده این است که شبکه در حالت معمول وظیفه گازرسانی را به درستی انجام می دهد.

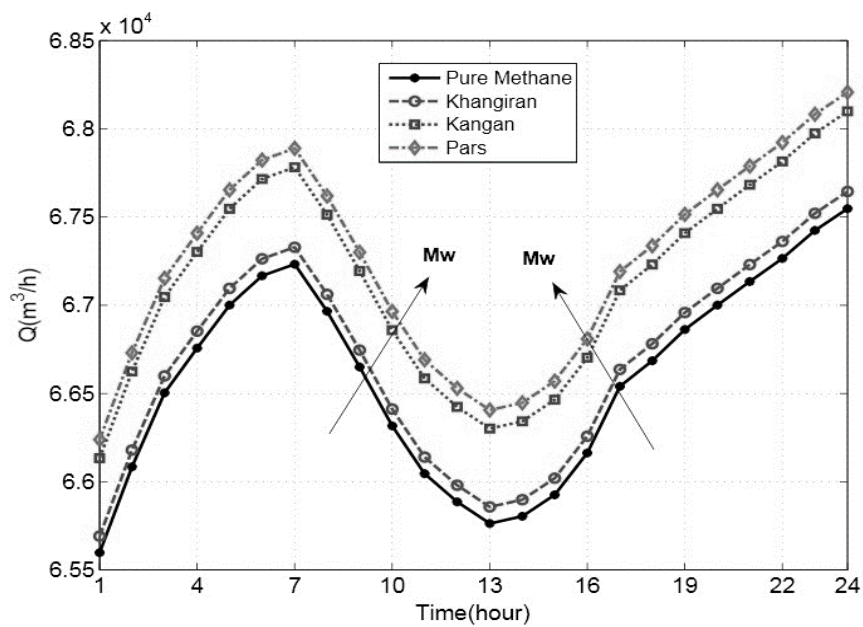


شکل ۴۱-۵ محاسبه سرعت گاز طبیعی بر حسب زمان در شبکه توزیع برای روزهای مختلف

شکل ۴۲-۵ تغییرات فشار گره ۲۰۲ بر حسب زمان برای گازهای طبیعی مناطق مختلف همچنین شکل ۴۳-۵ تغییرات دبی خط لوله اصلی بر حسب زمان برای گازهای طبیعی مناطق مختلف را نشان می دهند. با توجه به شکل با افزایش وزن مولکولی گاز طبیعی، افت فشار بیشتری را در شبکه شاهد بوده و در نتیجه دبی برای خط لوله اصلی نیز افزایش پیدا می کند.

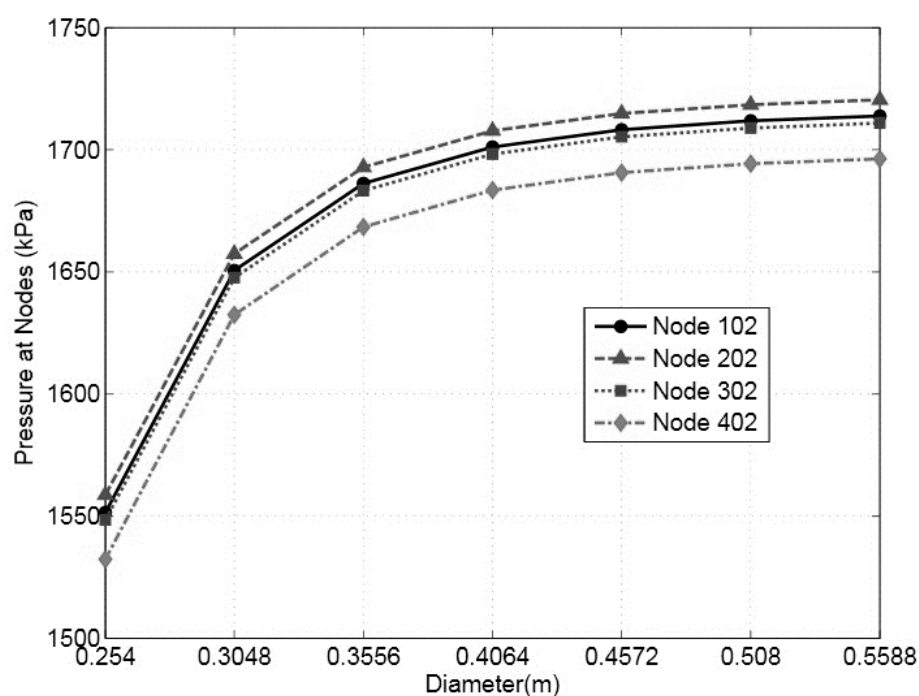


شکل ۴۲-۵ تغییرات فشار گره ۲۰۲ بر حسب زمان برای گازهای طبیعی مناطق مختلف

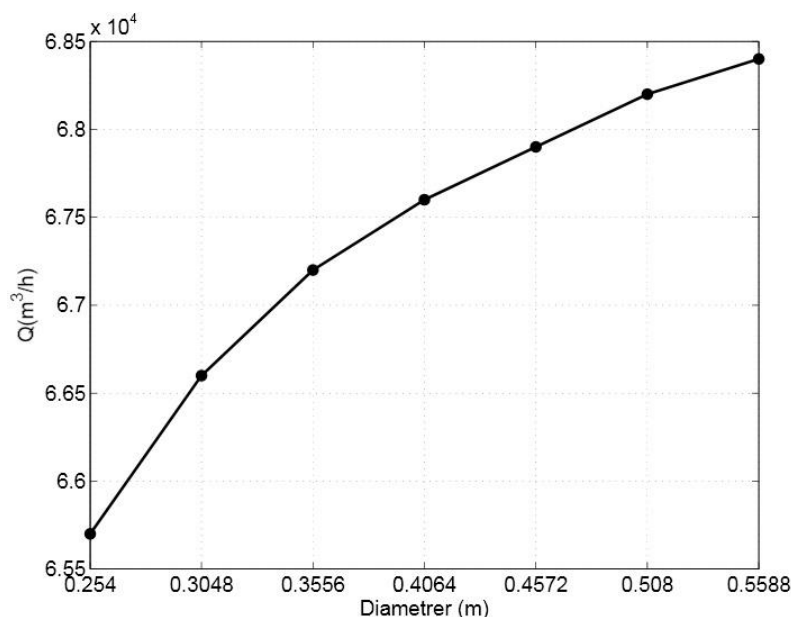


شکل ۴۳-۵ تغییرات دبی خط لوله اصلی بر حسب زمان برای گازهای طبیعی مناطق مختلف

شکل ۴۴-۵ و شکل ۴۵-۵، تاثیر قطر را بر روی فشار گره ها و همچنین دبی مورد نظر در خط لوله اصلی شبکه تغذیه مورد مطالعه را نشان می دهد. بدیهی است که هر چه قطر خطوط لوله در شبکه کمتر باشد دبی کمتری وارد شبکه شده و فشار در شبکه نسبت به حالت قبل کاهش می یابد. تاثیر قطر معمولاً در حالت بحرانی نمود بیشتری خواهد کرد. جائیکه با داشتن قطرهای بالاتر، شبکه می تواند در شرایط بحرانی پاسخ مثبت تری به شرایط حاکم داشته باشد.



شکل ۴۴-۵ تغییرات فشار در گره های شبکه بر حسب قطر خط لوله اصلی شبکه تغذیه مورد مطالعه



شکل ۵-۴ تغییرات دبی بر حسب قطر در خط لوله اصلی شبکه تغذیه مورد مطالعه

۵-۳-۳ بررسی شرایط بحرانی در شبکه تغذیه مورد مطالعه

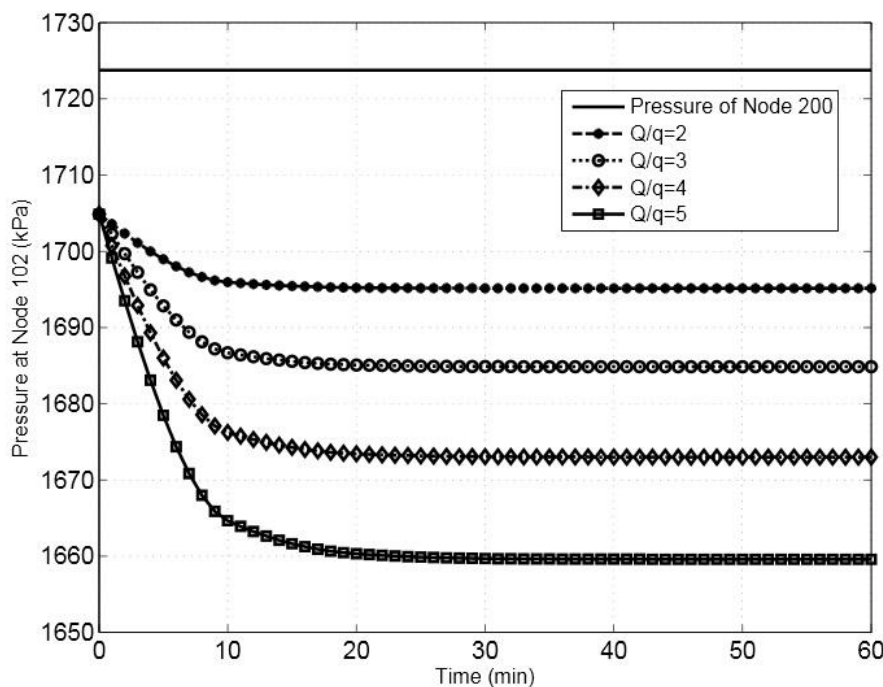
در این بخش یکی از حالت هایی که ممکن است در شبکه های توزیع و تغذیه اتفاق بیفتد مورد بررسی قرار گرفته است. در بعضی مواقع ممکن است به علت حوادث طبیعی و یا حوادث غیر طبیعی خطوط شبکه آسیب ببینند. در این حالت گاز طبیعی به اتمسفر تخلیه می گردد. تاثیر این حالت به این صورت در شبکه اعمال می گردد که مصرف گر ها به حد چشمگیری از حالت پایا بیشتر می گردد. پاسخ شبکه به چنین تغییراتی کاهش فشار می باشد.

در این بخش فرض بر این است که در خط لوله شبکه تغذیه مورد مطالعه در قسمت ورودی دچار حادثه گردیده است، فشار کلیه نقاط شبکه در حالت گذرا مورد محاسبه قرار گرفته است. شکل ۵-۴ تا شکل ۵-۹، فشار در گر ها ۱۰۲ تا ۴۰۲ را در حالت های مختلف بر حسب زمان نشان میدهند. نسبت Q/q ، مقدار افزایش دبی در صورت پارگی خط لوله می باشد. با توجه به شکل های نشان داده شده، فشار کلیه

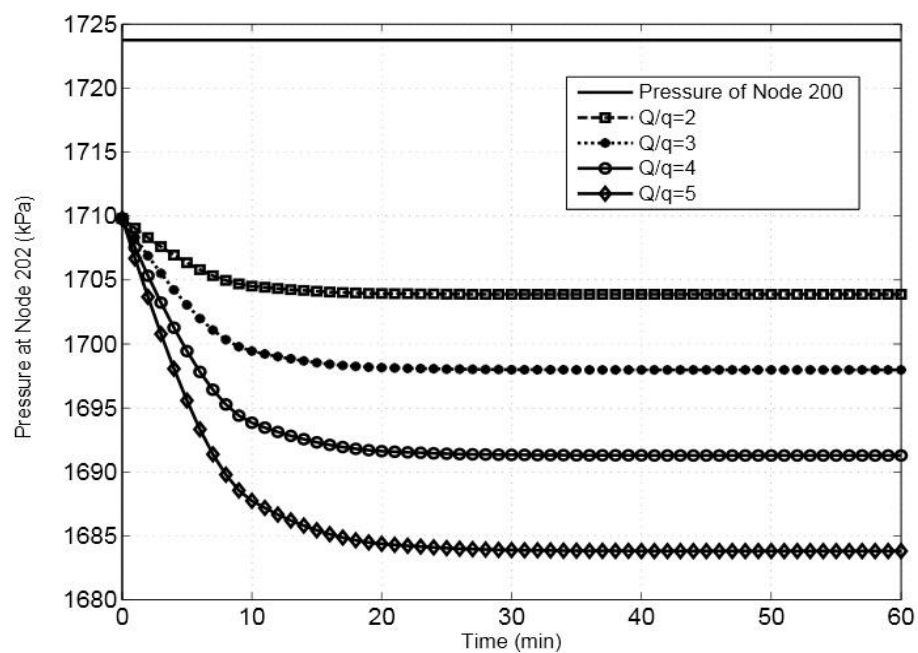
گره ها، با افزایش ناگهانی دبی به طور ناگهانی کاهش پیدا می کنند و شبکه با کاهش فشار به وضعیت موجود پاسخ می دهد. با گذشت زمان و با ثابت ماندن دبی خروجی، فشار گره ها تقریباً ثابت می گردد.

با توجه به نتایج به دست آمده می توان نتیجه گیری نمود که پارگی یا افزایش ناگهانی به عنوان یک شوک به شبکه وارد می شود و شبکه با کاهش فشار به این شوک پاسخ می دهد اما با گذشت زمان، شبکه دیگر پاسخی به تغییرات دبی نداشته و یک حالت پایا در شبکه اتفاق می افتد.

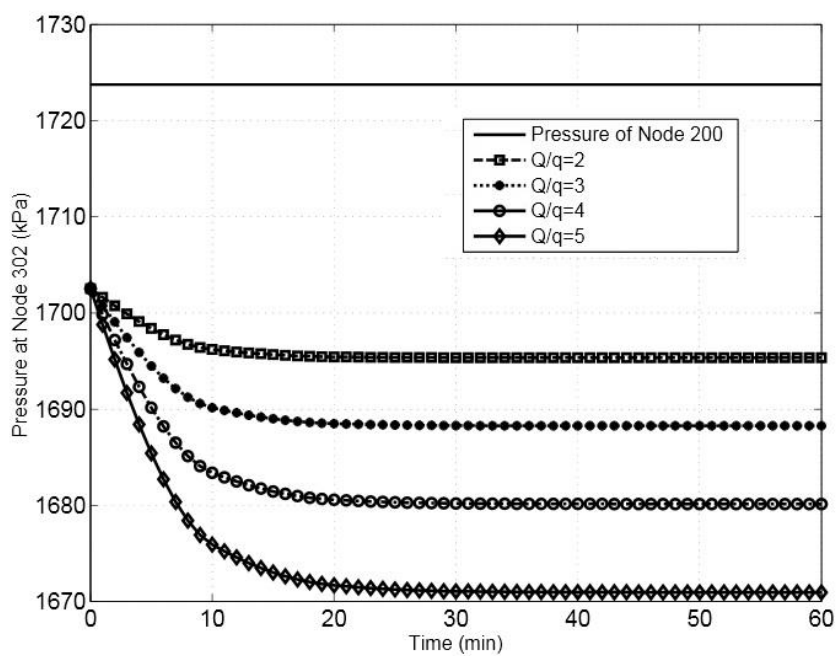
شکل ۵-۴۶ تا شکل ۵-۴۹ نمودار فشار در گره های ۱۰۲ تا ۴۰۲ را درحالتی نشان می دهند که مصرف یکی از مصرف کننده ها به ترتیب ۲ تا ۵ برابر می گردد.



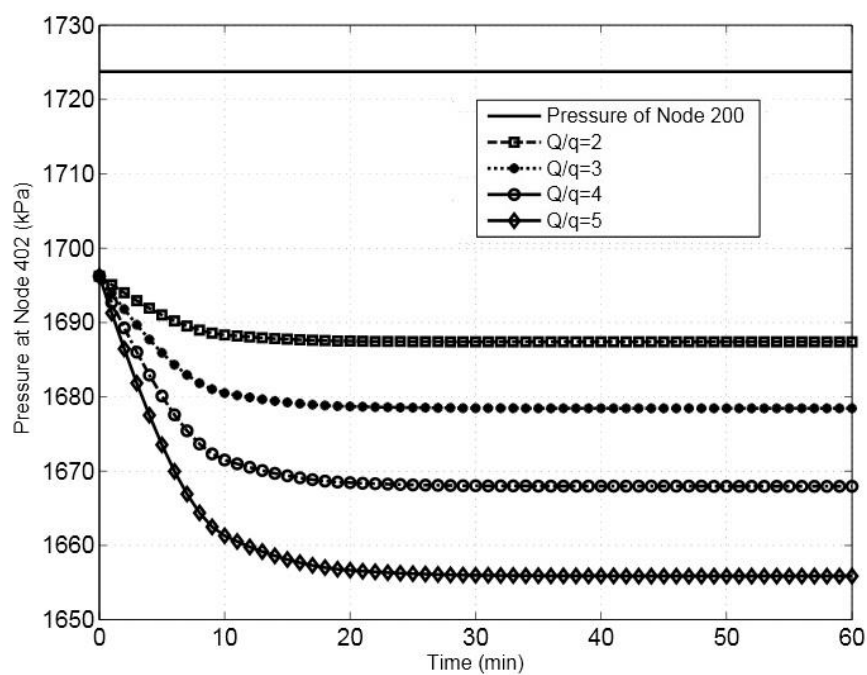
شکل ۵-۴۶ فشار در گره ۱۰۲ بر حسب زمان و دبی های مختلف



شکل ۴۷-۵ فشار در گره ۲۰۲ بر حسب زمان و دبی های مختلف

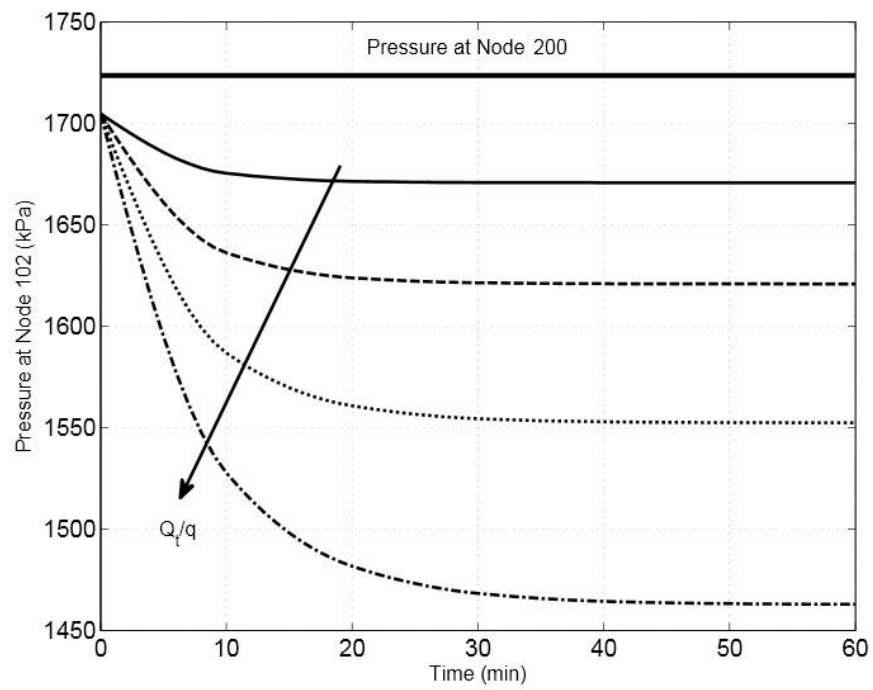


شکل ۴۸-۵ فشار در گره ۳۰۲ بر حسب زمان و دبی های مختلف

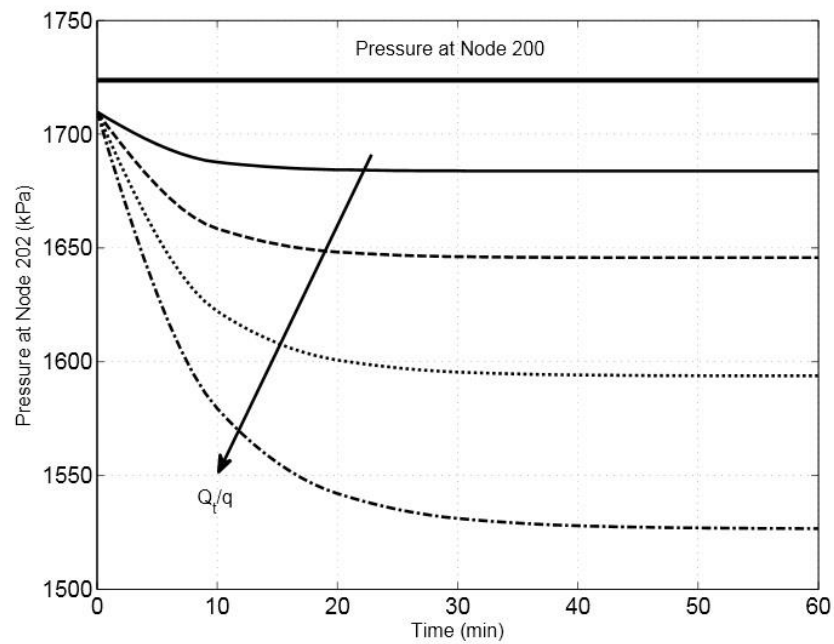


شکل ۵-۴۹ فشار در گره ۴۰۲ بر حسب زمان و دبی های مختلف

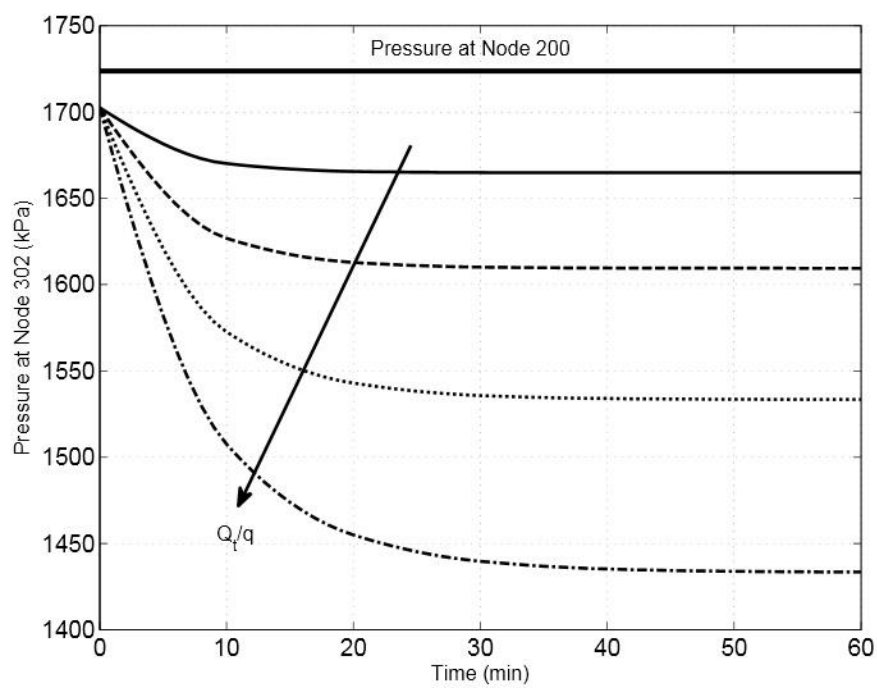
شکل ۵-۵۰ تا شکل ۵-۵۳ فشار در گره های ۱۰۲ تا ۴۰۲ را برای موقعی نشان میدهند که دبی تمامی مصرف کننده ها ۲ تا ۵ برابر شوند.



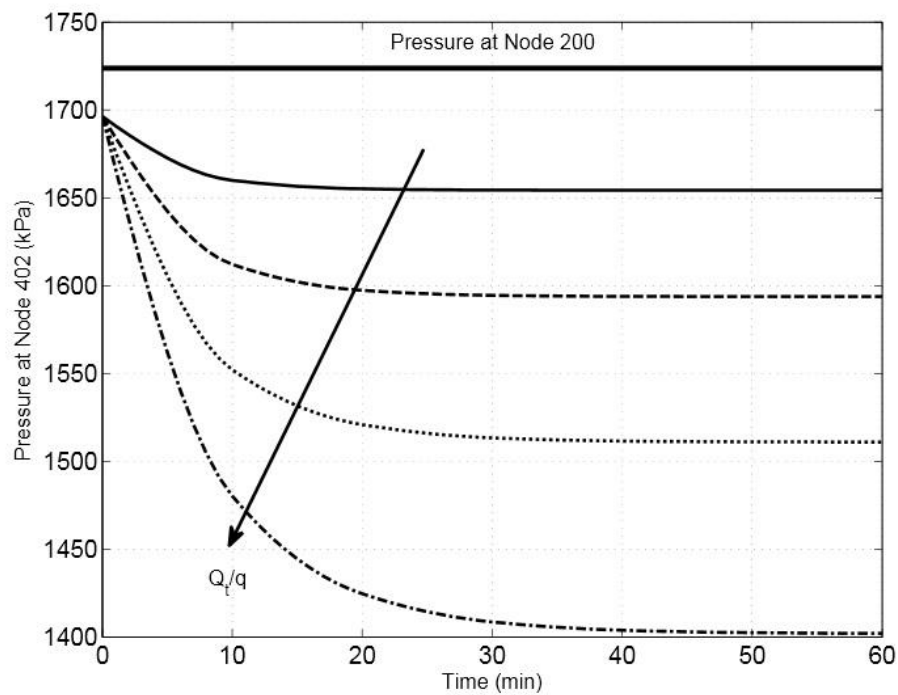
شکل ۵-۵ فشار در گره ۱۰۲ بر حسب زمان و دبی های مختلف



شکل ۵-۱ فشار در گره ۲۰۲ بر حسب زمان و دبی های مختلف



شکل ۵-۵ فشار در گره ۳۰۲ بر حسب زمان و دبی های مختلف



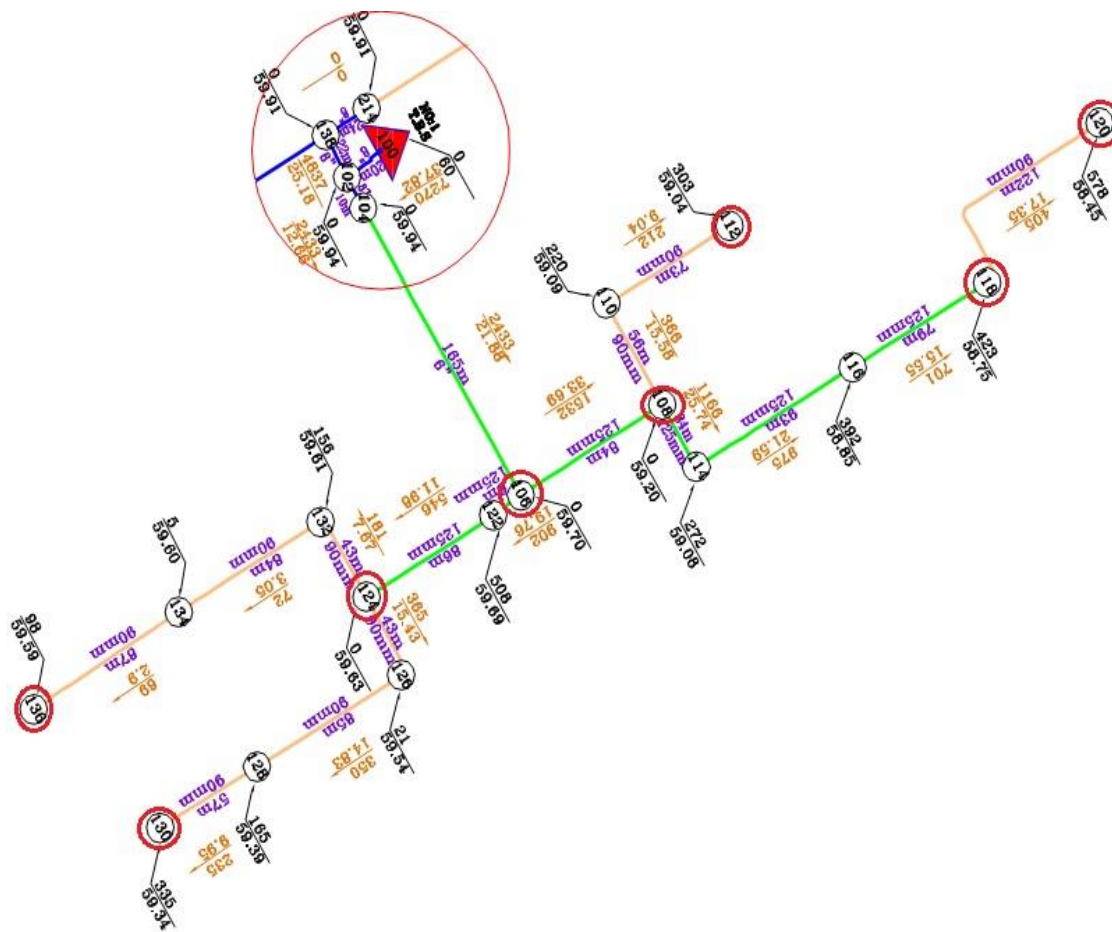
شکل ۵-۵ فشار در گره ۴۰۲ بر حسب زمان و دبی های مختلف

با توجه به شکل ۵-۵۰ تا شکل ۵-۵۳، اگر مصرف گاز طبیعی در کلیه گره های شبکه به علل مختلف از جمله پارگی و یا کاهش شدید دما، افزایش پیدا کند، فشار در گره های شبکه افت قابل ملاحظه ای خواهد داشت. کاهش فشار علاوه بر مشکلات ناشی برای شیرهای فشارشکن باعث افزایش سرعت در خطوط لوله گردیده که خود این عامل باعث خطرات ایمنی و خوردگی خطوط لوله در شبکه های تغذیه و توزیع می گردد.

۵-۳-۱ بررسی شبکه توزیع گاز طبیعی در حالت گذرا و شرایط بحرانی

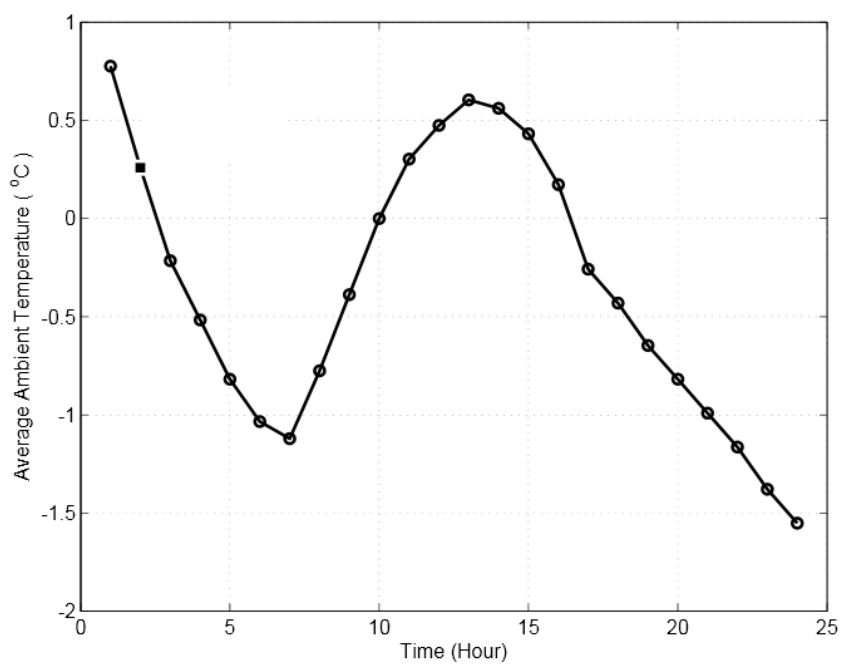
در این بخش، شبکه توزیع گاز طبیعی در حالت گذرا مدلسازی شده و تاثیر شرایط بحرانی بر شبکه مورد نظر مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته است. شبکه های توزیع گاز طبیعی که وظیفه گازرسانی به مشترکین در شهرها را بر عهده دارند، دارای فشار پایین تری نسبت به سایر شبکه های گاز طبیعی می باشند. شرایط بحرانی در این نوع شبکه ها معمولاً در فصول سرد سال اتفاق می افتد جاییکه با افزایش مصرف گاز طبیعی توسط مشترکین، فشار در شبکه های گاز طبیعی به نصف و حتی در مناطق سردسیر به یک چهارم فشار در حالت عادی شبکه توزیع می رسد.

بر همین اساس در این بخش، شبکه توزیع گاز طبیعی مربوط به شهر سمنان مورد مطالعه قرار گرفته است. شکل ۵-۵۴ بخشی از شبکه توزیع گاز طبیعی مورد مطالعه را نشان میدهد. مصرف گاز طبیعی در گره های شبکه و همچنین فشار در گره های شبکه مورد نظر در حالت پایا داده شده است. فرض بر آن است که مصرف گاز طبیعی مصرف کنندگان در دمای ۱۵ درجه سانتیگراد محاسبه گردیده است (با توجه به اصول طراحی شبکه های توزیع و تغذیه در فصل دوم). با توجه به شکل ۵-۵۴، گره های ۱۰۶، ۱۰۸، ۱۱۲، ۱۱۸، ۱۲۰، ۱۲۴، ۱۳۰ و ۱۳۶ برای تحلیل شبکه انتخاب شده اند. گره مبنا در محاسبات مربوط به گره ۱۰۲ در شکل ۵-۵۴، بوده که فشار آن ثابت در نظر گرفته شده است.

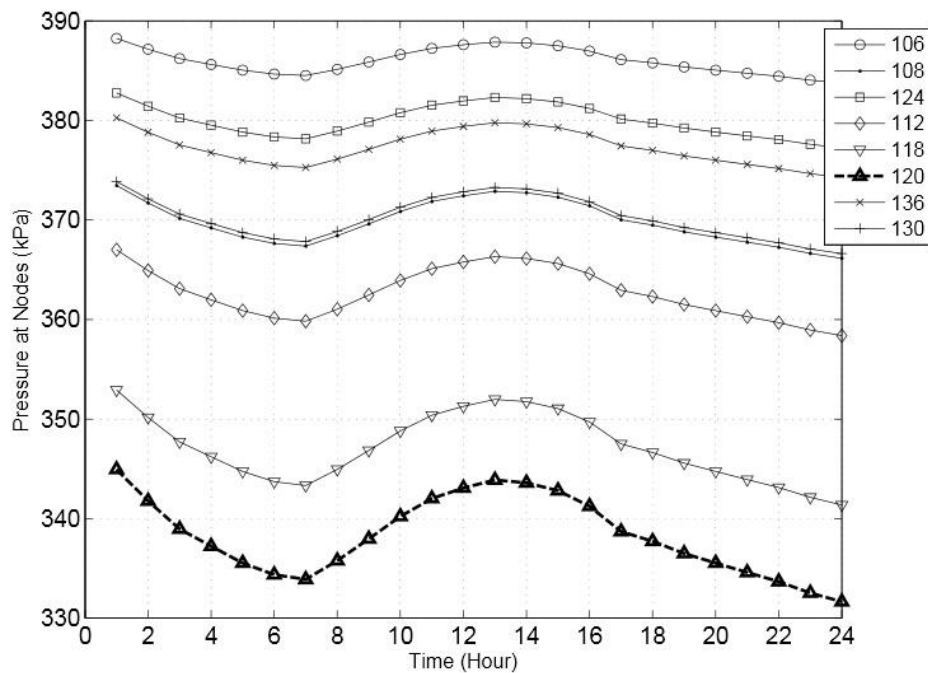


شکل ۵-۵ بخشی از شبکه توزیع گاز طبیعی مورد مطالعه

مصرف گاز طبیعی برای سردترین روز سال با استفاده از شبکه های عصبی مدل شده و به عنوان شرط مرزی به شبکه اعمال می گردد تا پاسخ شبکه به تغییرات درجه حرارت را بیابیم. شکل ۵-۵ تغییرات دمای محیط بر حسب زمان برای سردترین روز سال (مطالعه موردی شهر سمنان) را نشان می دهد. شکل ۵-۷ تغییرات فشار برای گره ۱۲۰ در حالت گذرا و پایا در شبکه توزیع را نشان می دهد.

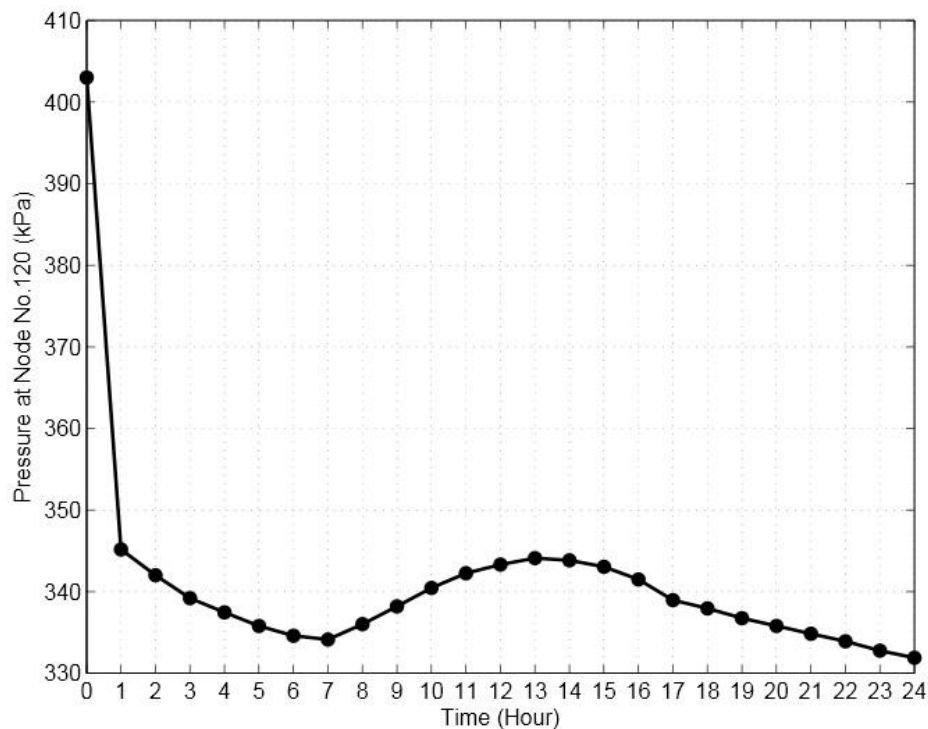


شکل ۵-۵۵ تغییرات دمای محیط بر حسب زمان برای سردترین روز سال (مطالعه موردی شهر سمنان)



شکل ۵-۵۶ تغییرات فشار برای گره های انتخابی در شبکه توزیع مورد مطالعه

با محاسبه فشار گره های انتخابی شبکه و با توجه به شکل ۵-۵۶، به این نتیجه خواهیم رسید که دورترین گره شبکه از گره مبنا (گره ۱۲۰)، بیشترین میزان افت فشار را در بین گره های انتخابی دارد. برای اینکه مقایسه ای بین فشار گره ۱۲۰ در حالت پایا و در حالت گذرا داشته باشیم، در شکل ۵-۵۷ تغییرات فشار برای گره ۱۲۰ در حالت گذرا و پایا در شبکه توزیع نشان داده شده است. با توجه به شکل ۵-۵۵ و شکل ۵-۵۷، در زمانی که دما کمترین مقدار خود را داشته با افزایش مصرف گاز طبیعی، فشار در این لحظه بیشترین انحراف را نسبت به حالت پایا دارد. همچنین نرخ کاهش فشار در لحظه مورد نظر نسبت به حالت پایا، ۱۸٪ بوده که با توجه به دمای محیط نه چندان پایین (۱/۵- درجه سانتیگراد) مقدار قابل توجهی می باشد.

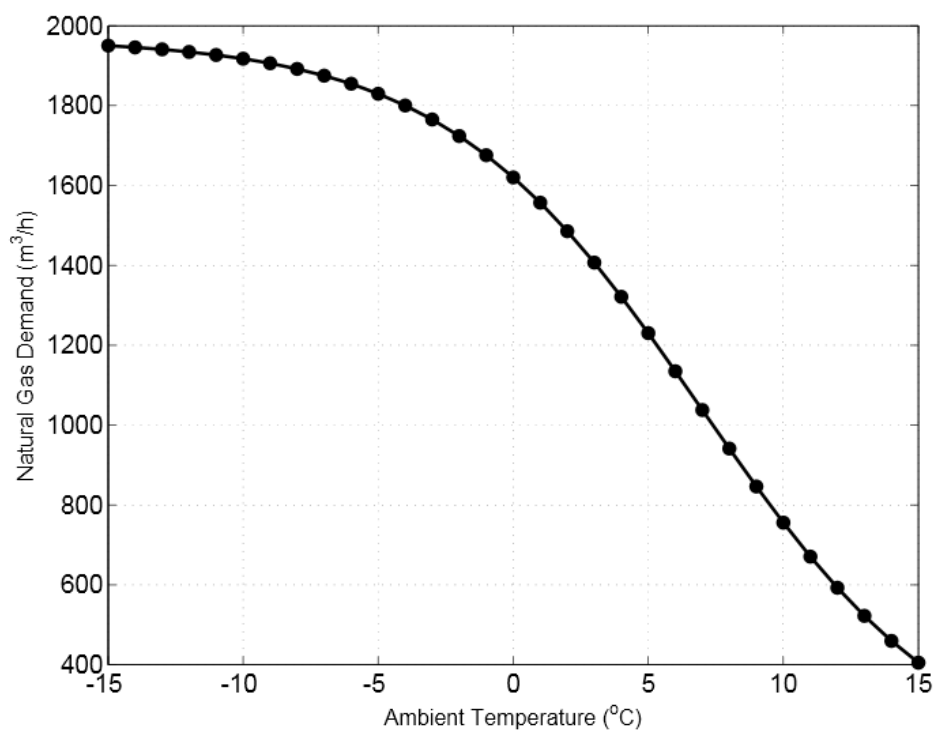


شکل ۵-۵۷ تغییرات فشار برای گره ۱۲۰ در حالت گذرا و پایا در شبکه توزیع

۵-۳-۱-۱ تاثیر شرایط بحرانی؛ کاهش شدید دما

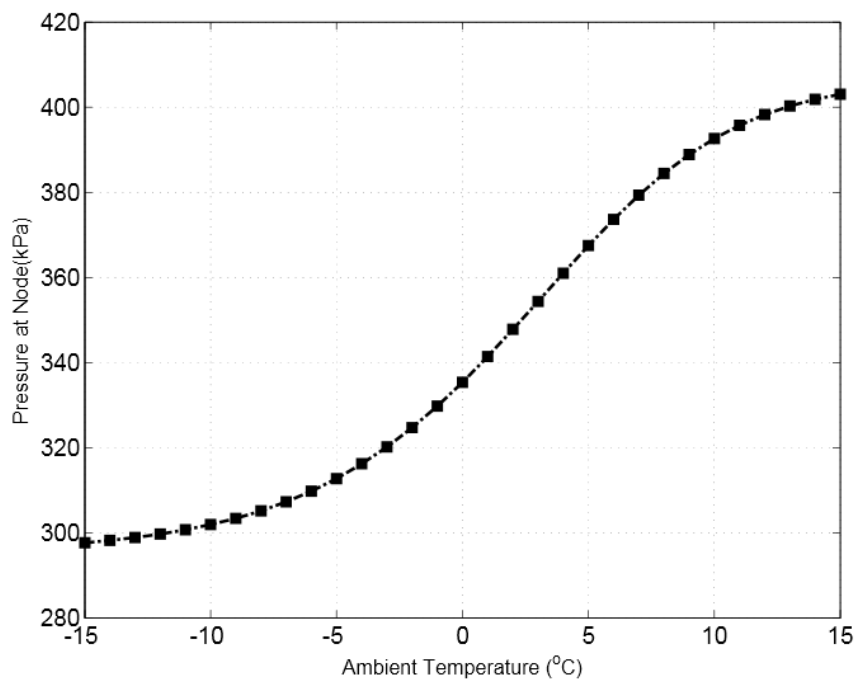
برای اینکه تاثیرات شرایط بحرانی در شبکه توزیع مورد مطالعه، با دقت بیشتری بررسی گردد به صورت زیر عمل شده است:

فرض بر آن است که شبکه در حالت پایا در یک روز مشخص وظیفه گازرسانی را انجام می دهد. در این حالت دما در حالت طراحی پایا و برابر با ۱۵ درجه سانتیگراد می باشد. حال با توجه به تغییرات آب و هوایی، دما به شدت کاهش پیدا می کند. برای این منظور یک محدوده دمایی بین ۱۵ تا ۱۵- درجه سانتیگراد در نظر گرفته شده است. با کاهش دما مصرف گره مورد مطالعه (گره ۱۲۰)، افزایش چشمگیری داشته است. به عنوان مثال کاهش دما تا ۳- درجه سانتیگراد، باعث افزایش ۴/۳۵ برابری مصرف در گره مورد نظر میگردد. شکل ۵-۵۸ تاثیر دمای محیط بر مصرف گره شماره ۱۲۰ در شبکه توزیع مورد مطالعه را نشان میدهد.



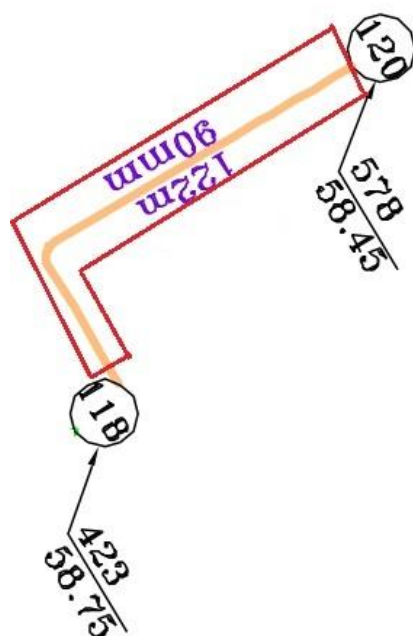
شکل ۵-۵۸ تاثیر دمای محیط بر مصرف گره شماره ۱۲۰ در شبکه توزیع مورد مطالعه

با تحلیل شبکه توزیع، فشار در گرهِ مورد نظر با توجه به شرایط مرزی جدید محاسبه می گردد. شکل ۵-۵۹ فشار گرهِ مورد نظر در شبکه توزیع را به صورت تابعی از دمای محیط نشان می دهد. با توجه به مطالب گفته شده با کاهش دما و افزایش مصرف، فشار در گرهِ مورد نظر کاهش یافته است. به عنوان مثال در دمای ۳- درجه سانتیگراد، فشار گرهِ حدود ۲۱٪ نسبت به حالت پایا کاهش یافته است.

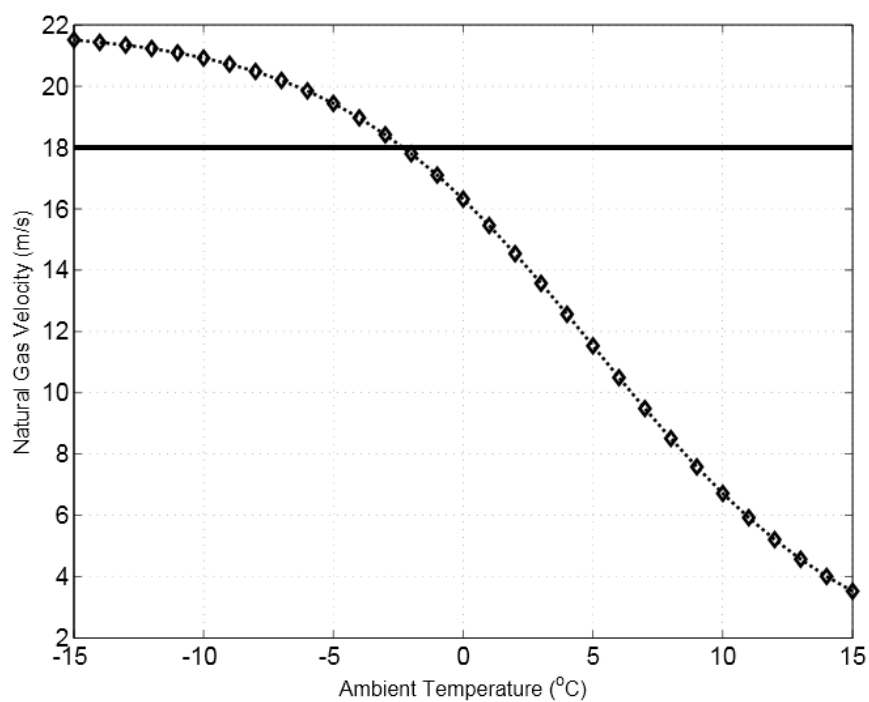


شکل ۵-۵۹ تاثیر دمای محیط بر فشار گره شماره ۱۲۰ در شبکه توزیع مورد مطالعه

در نهایت، سرعت گاز طبیعی در خط لوله متصل به گره های ۱۱۸ و ۱۲۰ (شکل ۵-۶۰، شکل ۵-۵۴) محاسبه شده است. شکل ۵-۶۱ تاثیر دمای محیط بر سرعت گاز طبیعی درون خطوط لوله در شبکه توزیع مورد مطالعه را نشان می دهد. یکی از تاثیرات شرایط بحرانی در این شکل نشان داده شده است. با توجه به محدوده سرعت مجاز گاز طبیعی در شبکه های توزیع و تغذیه (۱۸ متر بر ثانیه)، با کاهش دمای محیط و در نتیجه کاهش فشار، سرعت گاز طبیعی درون خطوط لوله افزایش پیدا کرده است. با توجه به شکل ۵-۶۱، از دمای ۳- درجه سانتیگراد و کمتر از این دما، سرعت گاز طبیعی به بالاتر از مقدار مجاز رسیده است. افزایش سرعت گاز طبیعی در خطوط لوله، یکی از عوامل ایجاد بحران در شبکه های توزیع گاز طبیعی بوده که باعث فرسایش در خطوط لوله این نوع شبکه ها می گردد.



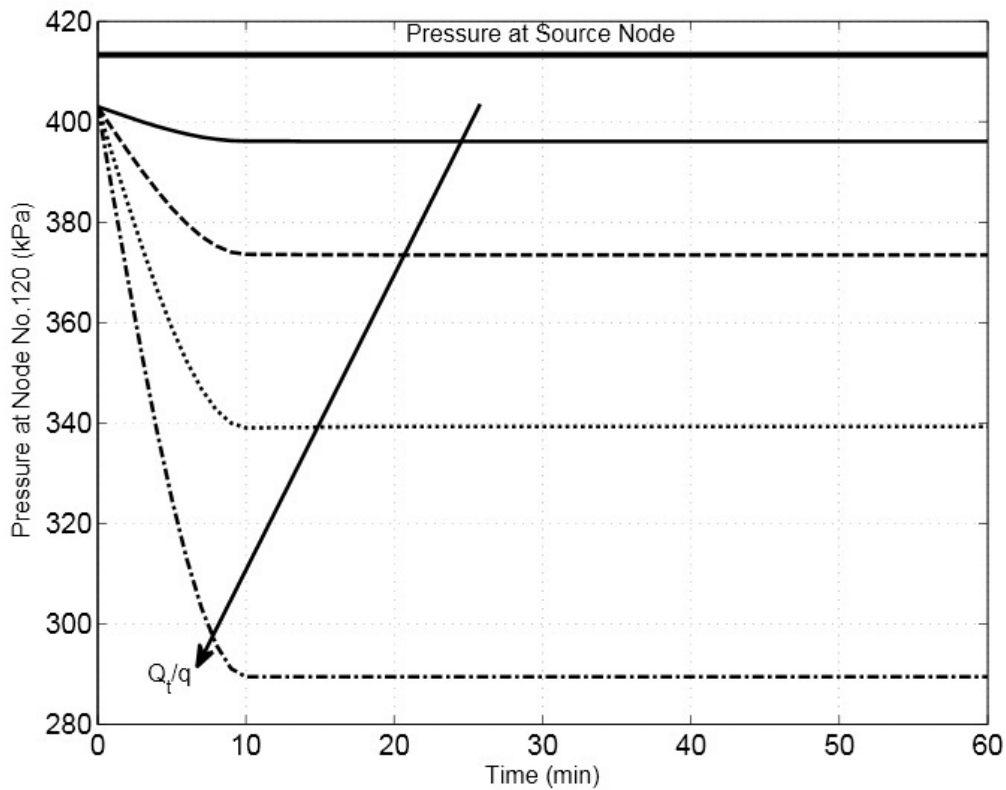
شکل ۵-۶ خط لوله بین گره های ۱۱۸ و ۱۲۰ برای محاسبه سرعت در شبکه توزیع مورد مطالعه



شکل ۵-۶ تاثیر دمای محیط بر سرعت گاز طبیعی درون خطوط لوله در شبکه توزیع مورد مطالعه

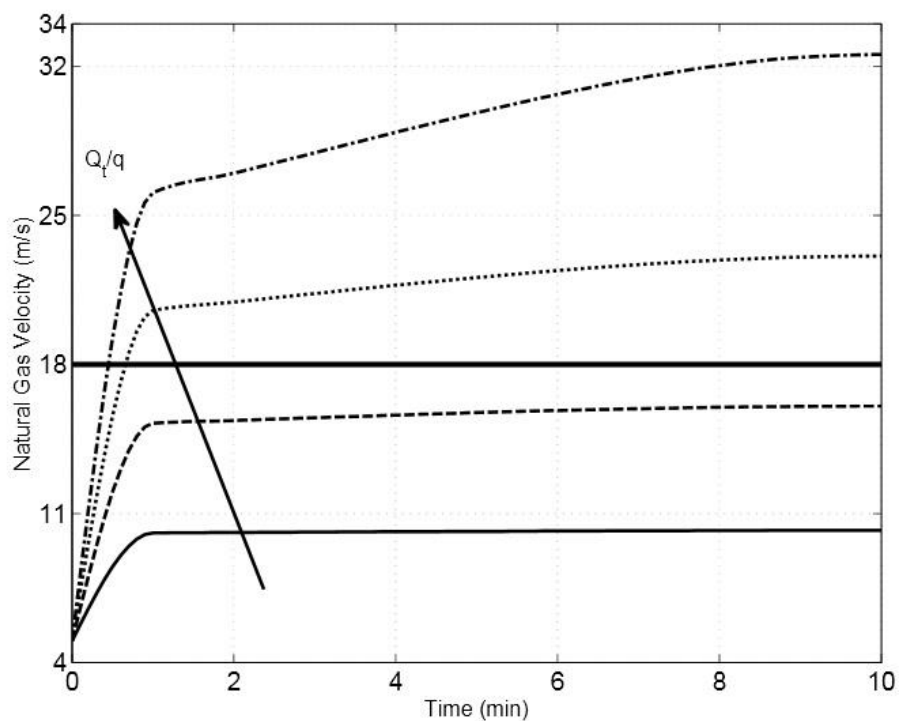
۵-۳-۱-۲ تاثیر شرایط بحرانی؛ پارگی خطوط لوله

در این قسمت، تاثیر پارگی یکی از خطوط لوله بر عملکرد شبکه توزیع مورد بحث و بررسی قرار گرفته است. در این حالت مصرف گره های شبکه متصل به خط لوله ای که پارگی در آن اتفاق افتاده است، به شدت افزایش پیدا می کند. پاسخ شبکه به افزایش مصرف ناگهانی در صورت پارگی خطوط لوله در شبکه توزیع در شکل ۵-۶۲ نشان داده شده است. در شکل ۵-۶۲، فشار گره ۱۲۰ در شبکه توزیع مورد مطالعه برای افزایش مصرف گره های شبکه به ۲، ۳، ۴ و ۵ برابر حالت معمول، ترسیم گردیده است. با توجه به شکل ابتدا کاهش ناگهانی برای گره مربوطه اتفاق افتاده و ادامه با افزایش زمان مقدار فشار ثابت باقی می ماند. در حقیقت بعد از گذشت زمان مشخص، پاسخ شبکه به افزایش مصرف ناگهانی ثابت مانده یا به عبارت دیگر شبکه در حالت پایا قرار دارد.



شکل ۵-۶۲ تاثیر فشار بر حسب زمان در حالت افزایش ناگهانی مصرف بر اثر پارگی خطوط لوله

با توجه با کاهش ناگهانی فشار در گره مورد مطالعه در شبکه توزیع، سرعت گاز طبیعی در خط لوله متصل به گره مورد مطالعه (گره ۱۲۰) محاسبه شده است. شکل ۵-۶۳، سرعت گاز طبیعی نسبت به زمان را برای خط لوله متصل به گره ۱۲۰ شبکه توزیع را نشان می دهد. با توجه به شکل ۵-۶۳، با افزایش ۲ و ۳ برابری مصرف گره ها بر اثر پارگی خطوط لوله، سرعت گاز طبیعی پایین تر از حد مجاز قرار داشته و خطری از این ناحیه شبکه توزیع را تهدید نمی کند. با افزایش ۴ و ۵ برابری مصرف گره های شبکه سرعت گاز طبیعی به بالاتر از حد مجاز رسیده و حتی با افزایش زمان، سرعت افزایش پیدا کرده تا به یک سرعت ثابت برسد. بنابراین با افزایش بیش از اندازه مصرف گره های شبکه توزیع در شرایط پارگی خطوط لوله، ممکن است سرعت گاز طبیعی در خطوط لوله شبکه به بالاتر از حد مجاز رسیده و مشکلات فرسایش برای شبکه اتفاق بیفتد.



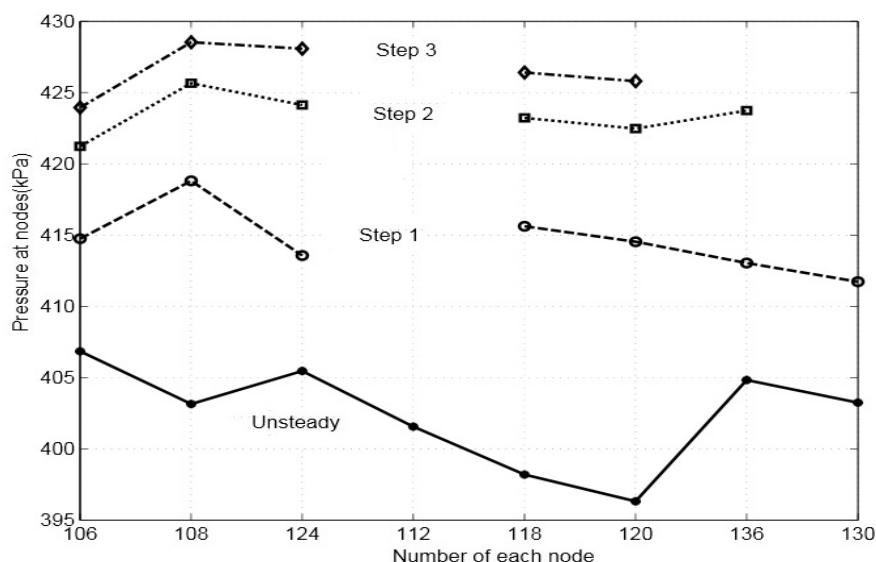
شکل ۵-۶۳ سرعت گاز طبیعی در حالت افزایش ناگهانی مصرف بر اثر پارگی خطوط لوله

۵-۳-۱-۳ تأثیر شرایط بحرانی؛ حذف یک شاخه در شرایط بحرانی

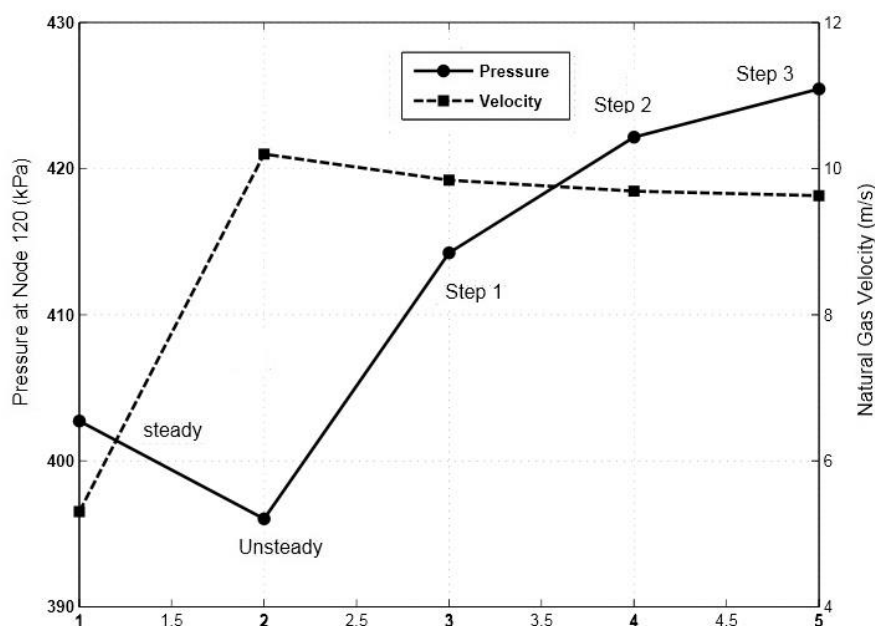
در بخش قبلی نشان داده شد که افزایش ناگهانی مصرف در گره های شبکه، باعث بروز مشکل در شبکه های توزیع می گردد. در این قسمت به بررسی راهکاری برای غلبه بر مشکل ناشی از مصرف ناگهانی پرداخته شده است. فرض بر آن است که در شبکه توزیع مورد مطالعه و در گره ۱۲۰، مصرف کنندگانی قرار دارند که عملیات گازرسانی به آنها نباید متوقف شود (به عنوان مثال یک بیمارستان). حال گره های شبکه دچار افزایش ناگهانی مصرف می گردند که همزمان باعث کاهش فشار در گره ها و افزایش سرعت

با توجه به شکل ۵-۶۴ برای جلوگیری از مشکلات بوجود آمده، در مرحله اول جریان گاز عبوری از نزدیکترین شاخه به گره ۱۲۰، یعنی خط لوله بین گره های ۱۰۸ تا ۱۱۲، توسط شیر قرار گرفته بر روی این خط مسدود می شود. در مرحله دوم، گاز خط لوله بین گره های ۱۲۴ تا ۱۳۰ توسط شیر قطع شده است. در نهایت گاز خط لوله بین گره های ۱۲۴ و ۱۳۶ توسط یک شیر، قطع خواهد شد.

حال به تاثیر هر یک از مراحل اشاره شده بر روی فشار گره های شبکه و همچنین تاثیر بر سرعت جریان گاز طبیعی درون خط لوله بین گره ۱۱۸ تا ۱۲۰ می پردازیم. شکل ۵-۶۵ تاثیر قطع گاز یک یا چند شاخه بر روی فشار گره های شبکه توزیع مورد مطالعه را نشان میدهد. در شکل ۵-۶۵، فرض بر آن است که مصرف گاز طبیعی در گره های شبکه، دو برابر حالت پایا باشد. با توجه به شکل ۵-۶۵، در مرحله اول گره ۱۱۲، در مرحله دوم گره ۱۳۰ و در مرحله سوم گره ۱۳۶، از مدلسازی شبکه حذف گردیده اند. با قطع مرحله به مرحله گاز یک یا چند شاخه از شبکه توزیع، فشار گاز طبیعی در گره مورد مطالعه افزایش پیدا می کند. در نتیجه، سرعت گاز طبیعی در خطوط لوله شبکه که به طرز ناگهانی افزایش پیدا کرده است، باید کاهش یافته و به حد مجاز نزدیکتر می گردد. شکل ۵-۶۶ تاثیر قطع گاز یک یا چند شاخه بر روی فشار گره ۱۲۰ و سرعت خط لوله متصل به گره ۱۲۰ را نشان میدهد. با توجه به شکل ۵-۶۶، با انجام مراحل سرعت گاز طبیعی در خط لوله متصل به گره ۱۲۰ کاهش می یابد. در این حالت حتی در بدترین حالت، سرعت گاز زیر حد مجاز قرار داشته و مشکلی از این نظر شبکه را تهدید نمی کند.

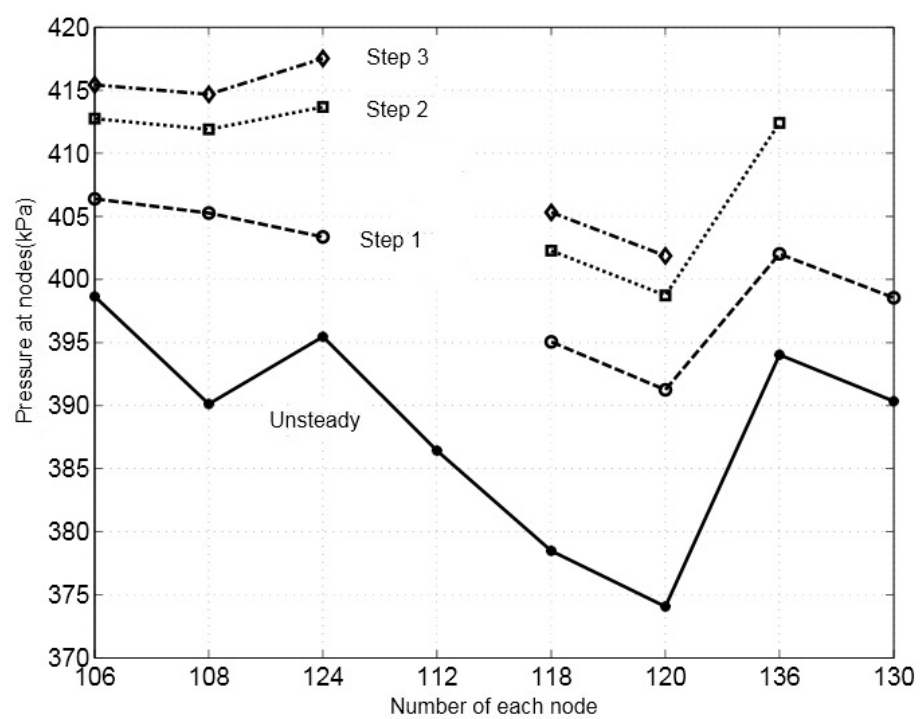


شکل ۵-۶۵ تاثیر قطع گاز یک یا چند شاخه بر روی فشار گره های شبکه توزیع (مصرف گره ها دو برابر حالت پایا)

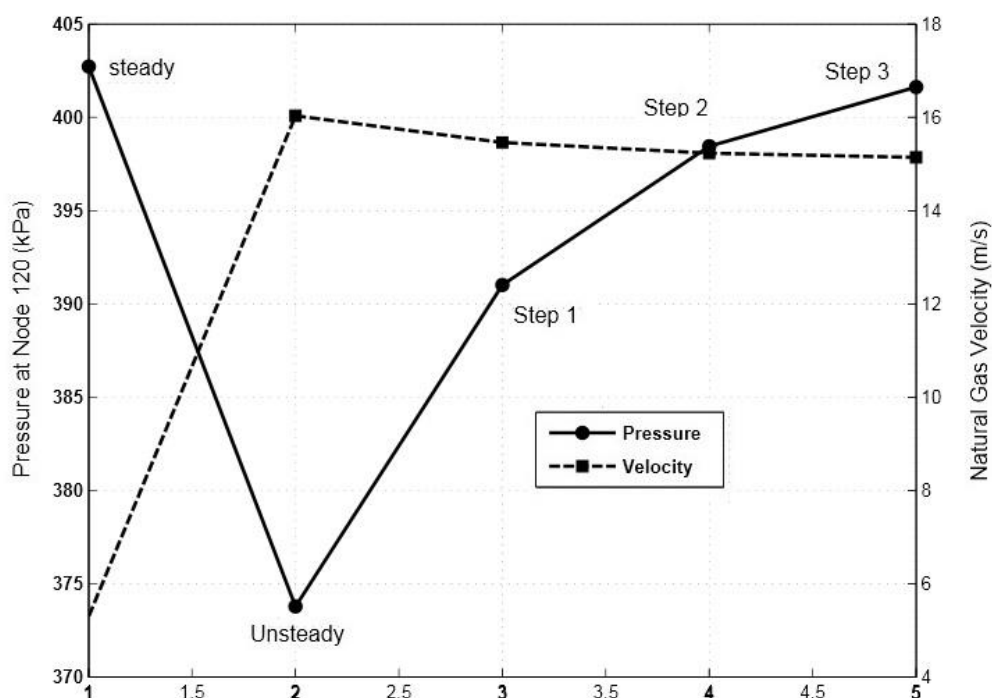


شکل ۵-۶۶ تاثیر قطع گاز یک یا چند شاخه بر روی فشار گره ۱۲۰ و سرعت خط لوله (مصرف گره ها دو برابر حالت پایا)

شکل ۵-۶۷ تاثیر قطع گاز یک یا چند شاخه بر روی فشار گره های شبکه توزیع را نشان میدهد. در این حالت مصرف گاز طبیعی در گره های شبکه سه برابر حالت پایا می باشد. شکل ۵-۶۸ تاثیر قطع گاز یک یا چند شاخه بر روی فشار گره ۱۲۰ و سرعت خط لوله متصل به گره ۱۲۰ را نشان میدهد. با توجه به شکل ۵-۶۷ و شکل ۵-۶۸، با انجام مرحله به مرحله حذف یک یا چند شاخه، فشار در گره های شبکه افزایش پیدا می کند. همچنین سرعت گاز طبیعی در خط لوله متصل به گره ۱۲۰ که نسبت به حالت پایا سه برابر شده بود، کاهش می یابد. ذکر این نکته ضروری است که همچنان سرعت در خط لوله متصل به گره ۱۲۰، پایین تر از حد مجاز بوده و مشکل از این بابت شبکه را تهدید نمی کند.

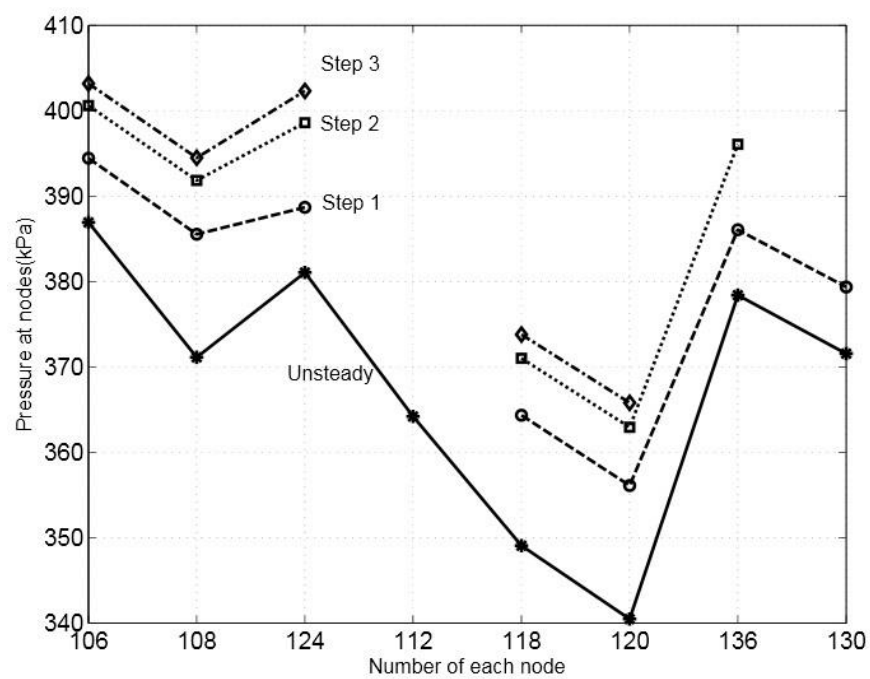


شکل ۵-۶۷ تاثیر قطع گاز یک یا چند شاخه بر روی فشار گره های شبکه توزیع (مصرف گره ها سه برابر حالت پایا)

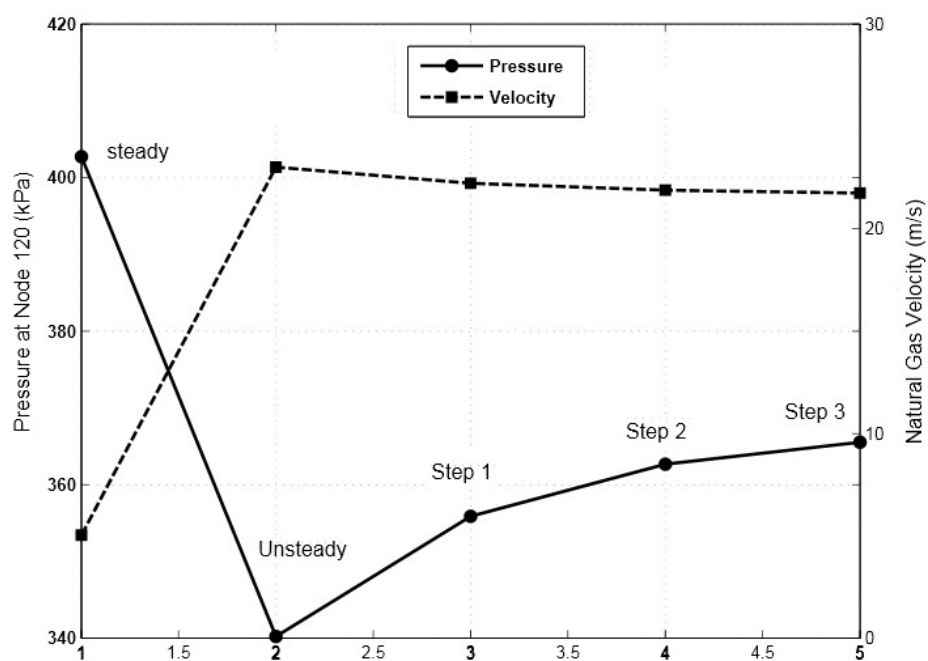


شکل ۵-۶۸ تاثیر قطع گاز یک یا چند شاخه بر روی فشار گره ۱۲۰ و سرعت خط لوله (مصرف گره ها سه برابر حالت پایا)

شکل ۵-۶۹، تاثیر قطع گاز یک یا چند شاخه بر روی فشار گره های شبکه توزیع را در حالتی که مصرف گاز طبیعی در گره های شبکه چهار برابر حالت پایا بوده را نشان میدهد. همچنین در شکل ۵-۷۰، تاثیر قطع گاز یک یا چند شاخه بر روی فشار گره ۱۲۰ و سرعت خط لوله متصل به گره ۱۲۰ را در این حالت نشان میدهد. با توجه به شکل ۵-۶۹ و شکل ۵-۶۷، با انجام مرحله به مرحله حذف یک یا چند شاخه، فشار در گره های شبکه افزایش پیدا می کند. در این حالت سرعت گاز طبیعی در خط لوله متصل به گره ۱۲۰ بالاتر از حد مجاز می باشد. با انجام مرحله به مرحله قطع گاز یک یا چند شاخه، سرعت گاز طبیعی کاهش یافته اما همچنان بالاتر از حد مجاز می باشد. سرعت گاز طبیعی از ۲۳ متر بر ثانیه به ۲۱ متر بر ثانیه در انتهای مرحله سوم، رسیده است. با توجه به مقادیر سرعت محاسبه شده، باید راهکارهای دیگری برای کاهش سرعت شبکه در این حالت، در نظر بگیریم.

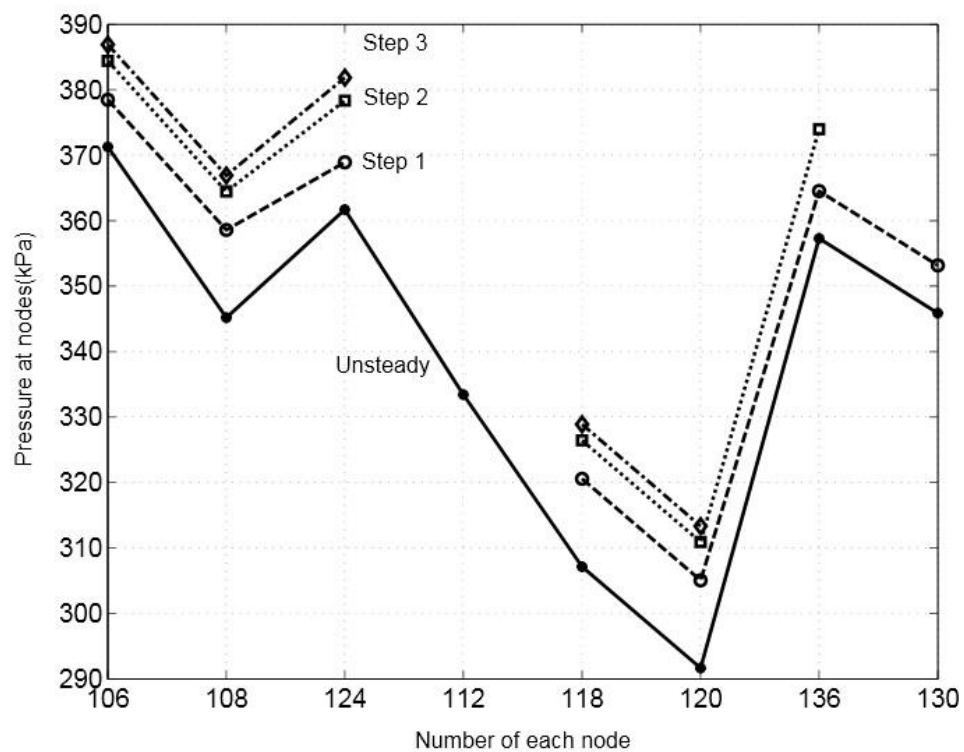


شکل ۶۹-۵ تاثیر قطع گاز یک یا چند شاخه بر روی فشار گره های شبکه توزیع (مصرف گره ها چهار برابر حالت پایا)

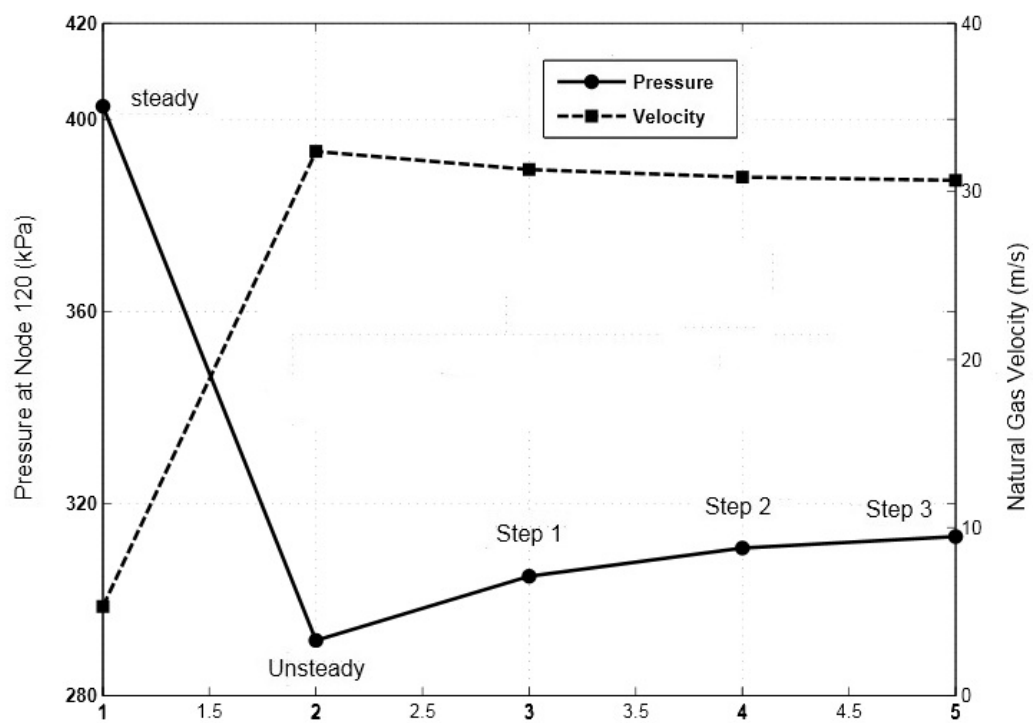


شکل ۵-۷۰ تاثیر قطع گاز یک یا چند شاخه بر روی فشار گره ۱۲۰ و سرعت خط لوله (مصرف گره ها چهار برابر حالت پایا)

شکل ۵-۷۱، تاثیر قطع گاز یک یا چند شاخه بر روی فشار گره های شبکه توزیع را در حالتی که مصرف گاز طبیعی در گره های شبکه پنج برابر حالت پایا بوده را نشان میدهد. همچنین شکل ۵-۷۲ شکل ۵-۷۰، تاثیر قطع گاز یک یا چند شاخه بر روی فشار گره ۱۲۰ و سرعت خط لوله متصل به گره ۱۲۰ را نشان میدهد. با توجه به شکل ۵-۶۹ شکل ۵-۷۱، با انجام مرحله به مرحله حذف یک یا چند شاخه، فشار در گره های شبکه افزایش پیدا کرده است. با توجه به افزایش مصرف پنج برابری گاز در گره ها، افزایش فشار گاز در پایان مرحله سوم می تواند از قطع شدن جریان گاز طبیعی در بالادست رگولاتورها، جلوگیری نماید. با توجه به شکل ۵-۷۲، شکل ۵-۶۷ در این حالت سرعت گاز طبیعی در خط لوله متصل به گره ۱۲۰ بالاتر از حد مجاز بوده و با انجام مرحله به مرحله قطع گاز، همچنان سرعت گاز طبیعی بالاتر از حد مجاز می باشد. با توجه به افزایش ناگهانی مصرف در گره های شبکه، قطع یک یا چند شاخه نیز نمی تواند مشکل سرعت بالا در خطوط لوله شبکه را حل نماید.



شکل ۷۱-۵ تاثیر قطع گاز یک یا چند شاخه بر روی فشار گره های شبکه توزیع (مصرف گره ها پنج برابر حالت پایا)



شکل ۷۲-۵ تاثیر قطع گاز یک یا چند شاخه بر روی فشار گره ۱۲۰ و سرعت خط لوله (مصرف گره ها پنج برابر حالت پایا)

۶- فصل هشتم: جمع بندی و ارائه پیشنهادات

۱-۶ جمع بندی

در این پژوهش، شبکه های توزیع و تغذیه گاز طبیعی در حالت گذرا مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته است. همچنین اثرات شرایط بحرانی در این نوع شبکه ها مورد بحث قرار گرفته و شرایط بحرانی بر روی یک شبکه توزیع و تغذیه شهر واقعی (سمنان) به عنوان مطالعه موردی، بررسی گردیده است. با توجه به نتایج بدست آمده می توان نکات زیر را به عنوان جمع بندی نتایج بیان نمود:

۱. برای تحلیل شبکه های خطوط لوله گاز طبیعی، ابتدا جریان گاز طبیعی درون خطوط لوله به طور کامل مورد بررسی قرار گرفته و سپس از نتایج آن برای مدلسازی شبکه ها استفاده گردیده است. برای مدلسازی جریان گاز طبیعی در حالت گذرا از روش تفاضل ضمنی کاملاً صریح استفاده شده است. نتایج نشان می دهد این روش کاملاً پایدار بوده و به طور گسترده برای شبیه سازی خطوط لوله می توان از آن استفاده نمود.

۲. شرایط مرزی برای تحلیل شبکه ها، عموماً شامل مصرف گاز طبیعی توسط مصرف کنندگان بوده که به صورت بار بر روی گره های شبکه اعمال می گردند. در این پژوهش با استفاده از روش شبکه های عصبی مصنوعی، مصرف گاز طبیعی برای شهر سمنان با توجه به مشخصه های آب و هوایی مدلسازی شده و به عنوان شرایط مرزی در تحلیل شبکه توزیع و تغذیه مورد استفاده قرار گرفته است. نتایج پیش بینی مصرف گاز طبیعی با استفاده از مدل شبکه عصبی طراحی شده با داده های واقعی ارائه شده توسط شرکت گاز استان سمنان، دقتی کمتر از ۱٪ را گزارش کرده است که نشان دهنده دقت بالای مدل طراحی شده می باشد.

۳. تحلیل شبکه های توزیع و تغذیه در حالت گذرا، به صورت پاسخ شبکه به تغییرات دمای محیط مورد بررسی قرار گرفته شده است. دمای محیط در طول شبانه روز و حتی در فصول مختلف، دچار نوسان می گردد. با توجه به روش ارائه شده در این پژوهش می توان پاسخ شبکه را نسبت

به این تغییرات و نوسانات محاسبه نمود. با کاهش دما در شبکه توزیع مورد مطالعه از حالت پایا ۱۵ درجه سانتیگراد تا ۳- درجه سانتیگراد، مصرف گاز طبیعی نسبت به حالت پایا ۴ برابر شده و فشار در گره های شبکه بین ۱۷ تا ۲۵٪ نسبت به حالت پایا افت داشته است. در این حالت سرعت گاز طبیعی بالاتر از حد مجاز ۱۸ متر بر ثانیه می گردد که باعث فرسایش خطوط لوله و کاهش ایمنی در خطوط لوله شبکه می گردد.

۴. شرایط بحرانی مصرف در شبکه های توزیع و تغذیه به علت فشار کاری پایین تر نسبت به شبکه های انتقال، تاثیرات مهمتری بر روی نقاط مختلف شبکه می گذارد. پارگی خطوط لوله و کاهش شدید دمای محیط که هر دو باعث افزایش بار بر روی گره های شبکه می باشند، از مهمترین عوامل ایجاد شرایط بحرانی می باشند. هر دو عامل شرایط بحرانی به عنوان افزایش مصرف در گره های شبکه و شرایط مرزی به شبکه توزیع و تغذیه اعمال گردیده است. در شرایط بحرانی و مصرف ۴ برابری مصرف گاز در گره ها، پاسخ شبکه تغذیه افت فشاری بین ۱۷ تا ۲۱٪ بوده و در شبکه های توزیع پاسخ شبکه افت فشاری بین ۱۵ تا ۳۱٪ گزارش شده است.

۵. با توجه به نتایج، پارامترهای مختلفی در شرایط بحرانی برای شبکه مهم هستند. این پارامترها عبارتند از: فشار کاری شبکه، مشخصات فیزیکی خطوط لوله شامل طول و قطر، نوع گاز طبیعی مصرفی. نتایج نشان می دهد، هریک از پارامترهای اشاره شده باعث بحرانی تر شدن شرایط شبکه گازرسانی در شرایط مورد بحث می گردد. با کاهش فشار شبکه، پاسخ شبکه شدیدتر می شود (افزایش ۱۰ درصدی کاهش فشار در شبکه). برای گازهای سنگین تر افت فشار بیشتری گزارش شده است (حدود ۱۲ درصد نسبت به متان خالص). بنابراین شبکه هایی که از این نوع گازها استفاده می نمایند در معرض آسیب بیشتری در شرایط بحرانی می باشند.

۶. یکی از تاثیرات اصلی شرایط بحرانی در شبکه های گاز طبیعی، کاهش فشار در گره های شبکه گاز طبیعی می باشد. کاهش فشار در شبکه ها باعث ایجاد پیامدهای منفی شامل قطع عملکرد شیرهای فشار شکن و افزایش سرعت گاز طبیعی در خطوط لوله شبکه می شود. هر یک از پیامدهای منفی نامبرده می توانند آسیبی به شبکه وارد کنند از جمله آسیب های آنها می توان به قطع ارتباط بخشی از شبکه با گره مبنا، فرسایش خطوط لوله و خطرات جانی ناشی از ایمن نبودن خطوط گاز طبیعی، اشاره نمود.

۷. داشتن سناریوهایی در شرایط بحرانی برای مدیریت کردن گازرسانی به مصرف کنندگان، از جمله نتایج دیگر این پژوهش می باشد. با توجه به اینکه شرکت های گاز استانی همواره درصدد هستند تا گاز به طور مستمر به همه مصرف کنندگان برسد. در شرایط بحرانی ممکن است فرآیند گازرسانی به مشترکین به طور مستمر انجام نپذیرد. بنابراین داشتن سناریوهای مختلف می تواند مدیریت شرایط بحرانی را برای این شرکت ها تسهیل نماید. سناریوهایی که در این پژوهش مورد بحث و بررسی قرار گرفته است عبارتند از: داشتن یک خط موازی برای گازرسانی در شرایط بحرانی، خارج کردن یک یا چند شاخه به منظور گازرسانی به مشترکین ویژه مانند بیمارستان ها. با کاهش یک یا چند خط لوله از شبکه اصلی در شرایط بحرانی، فشار در گره ها افزایش یافته و باعث کاهش سرعت گاز از حد مجاز ۱۸ متر بر ثانیه می شود. برای افزایش مصرف در شرایط ۲ و ۳ برای گاز طبیعی با خارج کردن دو خط لوله به شرایط مجاز سرعت و برای افزایش مصرف ۴ تا ۵ برابری با خارج کردن ۳ خط لوله به شرایط مجاز سرعت رسیده ایم.

۶-۲ پیشنهادات

با توجه به مطالب گفته شده و با بررسی جوانب تحلیل و مدلسازی شبکه های گاز طبیعی، پیشنهادات برای پژوهش های آینده در ادامه آورده شده است:

۱. از آنجائیکه داده های آزمایشگاهی مانند فشار در گره های مختلف شبکه، مصرف گاز طبیعی مشکین بر حسب دما و غیره؛ برای تحلیل شبکه های توزیع و تغذیه گاز طبیعی موجود نمی باشد، آنگاه بررسی آزمایشگاهی شبکه توزیع بخشی از یک شهر واقعی برای معتبرسازی محاسبات مدلسازی شبکه های توزیع در حالت گذرا و شرایط بحرانی می تواند مفید واقع گردد.

۲. از آنجائیکه ممکن است شبکه های انتقال بر روی کارکرد شبکه های توزیع و تغذیه تاثیر بگذارند، آنگاه ترکیب شبکه های انتقال و توزیع و تغذیه گاز طبیعی به منظور مدلسازی میتواند توصیف دقیق تری از شرایط کارکرد شبکه های توزیع و تغذیه ارائه دهد؛ به طور مشخص اینکه شرایط بحرانی در شبکه های انتقال گاز طبیعی چه تاثیری را بر شبکه توزیع خواهد داشت.

۳. از آنجائیکه در شرایط بحرانی و به هنگام قطع گاز دانستن این موضوع که چه نوع مشترک هایی را می توان از شبکه و تا چه مدت خارج نمود، بسیار مفید است آنگاه باید تفکیک مصرف کنندگان در شبکه های توزیع به اولویت های مختلف مورد بررسی قرار بگیرد؛ همانطور که در فصل نتایج بیان گردید، می توان گاز بعضی از مشترکین را قطع نموده تا گاز به مشترکین با اهمیت ویژه برسد. با تفکیک مصرف کنندگان به اولویت های مختلف، در شرایط بحرانی می توانیم مصرف کنندگان را با توجه به اولویت از شبکه خارج کرده تا عملیات گازرسانی به مشترکین با اولویت بالاتر انجام شود. ذکر این نکته ضروری است که این نوع تقسیم بندی بسته به موقعیت سیاسی، اجتماعی هر منطقه متفاوت بوده و باید در سطح کلان در مورد آن تصمیم گیری نمود

۴. از آنجائیکه هیچ دستورالعمل و روش برای نگهداری و گازرسانی در شرایط بحرانی برای شبکه های گاز طبیعی در شرکت های گاز استانی موجود نمی باشد آنگاه توسعه دستورالعملی برای این نوع شبکه ها بسیار ضروری به نظر می رسد. با تفکیک کردن مصرف کنندگان، می توان اقدام به

توسعه دستورالعملی برای شبکه های توزیع در حالت بحرانی نمود؛ یک دستورالعمل پیشنهادی در شرایط بحرانی می تواند برای گازرسانی مستمر به مصرف کنندگان در شرایط بحرانی بسیار مفید باشد.

۷- منابع

- [1] Bruce McDowell American Gas Association, "Natural Gas 101 & Current Industry Issues," 2008.
- [2] "National Iran Gas Company official website." [Online]. Available: <http://nigc.com/pages/Products.html>.
- [3] "طراحی شبکه های گازرسانی، شرکت ملی گاز ایران، امور تدوین استانداردها،"، ۱۳۸۴.
- [4] G. A. Rhoads and others, "Which Flow Equation-Does it Matter?," in *PSIG Annual Meeting*, 1983.
- [5] L. Ouyang and K. Aziz, "Steady-state gas flow in pipes," *J. Pet. Sci. Eng.*, vol. 14, no. 3–4, pp. 137–158, 1996.
- [6] D. W. Schroeder Jr and others, "A tutorial on pipe flow equations," in *PSIG Annual Meeting*, 2010.
- [7] S. Tian, M. A. Adewumi, and others, "Development of analytical design equation for gas pipelines," *SPE Prod. Facil.*, vol. 9, no. 02, pp. 100–106, 1994.
- [8] N. Martinez-Romero, O. Osorio-Peralta, I. Santamaria-Vite, and others, "Natural gas network optimization and sensibility analysis," in *SPE International Petroleum Conference and Exhibition in Mexico*, 2002.
- [9] A. F. Doonan, I. Fletcher, C. S. Cox, and W. J. B. Arden, "Evaluation of a remote boundary pressure control strategy using Simulink," 1998.
- [10] D. Fauer and others, "The Making of a Useful Pipeline Simulation Model," in *PSIG Annual Meeting*, 2002.
- [11] K. Gersten, H. D. Papenfuss, T. Kurschat, P. Genillon, F. Fernandez Perez, and N. Revell, "Pipeline Technology-Heat Transfer in Gas Pipelines," *Oil Gas Eur. Mag.*, vol. 27, no. 1, pp. 30–34, 2001.
- [12] J. M. Duan, W. Wang, Y. Zhang, L. J. Zheng, H. S. Liu, and J. Gong, "Energy equation derivation of the oil-gas flow in pipelines," *Oil Gas Sci. Technol. d*  IFP

Energies Nouv., vol. 68, no. 2, pp. 341–353, 2013.

- [13] A. Nouri-Borujerdi and M. Ziaei-Rad, “Simulation of compressible flow in high pressure buried gas pipelines,” *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 52, no. 25–26, pp. 5751–5758, 2009.
- [14] M. Fedorov, “Analytical study of steady-state compressible flow of perfect gas with constant heat flux and friction in constant area ducts,” *Int. J. Therm. Sci.*, vol. 49, no. 7, pp. 1277–1287, 2010.
- [15] S. Sanaye and J. Mahmoudimehr, “Technical assessment of isothermal and non-isothermal modelings of natural gas pipeline operational conditions,” *Oil Gas Sci. Technol. d’IFP Energies Nouv.*, vol. 67, no. 3, pp. 435–449, 2012.
- [16] M. Farzaneh-Gord, H. R. Rahbari, M. Bajelan, and L. Pilehvari, “Investigation of hydrate formation in natural gas flow through underground transmission pipeline,” *J. Nat. Gas Sci. Eng.*, vol. 15, 2013.
- [17] A. López-Benito, F. J. E. Tenreiro, and L. C. Gutiérrez-Pérez, “Steady-state non-isothermal flow model for natural gas transmission in pipes,” *Appl. Math. Model.*, vol. 40, no. 23–24, pp. 10020–10037, 2016.
- [18] E. B. Wylie, M. A. Stoner, and V. L. Streeter, “Network: System transient calculations by implicit method,” *Soc. Pet. Eng. J.*, vol. 11, no. 04, pp. 356–362, 1971.
- [19] H. H. Rachford Jr, T. Dupont, and others, “A fast, highly accurate means of modeling transient flow in gas pipeline systems by variational methods,” *Soc. Pet. Eng. J.*, vol. 14, no. 02, pp. 165–178, 1974.
- [20] S. P. dos Santos and others, “Transient analysis a must in gas pipeline design sidney pereira,” in *PSIG Annual Meeting*, 1997.
- [21] T. Tanaka, “A Computer Simulation of Unsteady-State Gas Flow in Pipe Line,” *J. Japan Pet. Inst.*, vol. 26, no. 1, pp. 67–77, 1983.

- [22] C. A. Luongo and others, "An efficient program for transient flow simulation in natural gas pipelines," in *PSIG Annual Meeting*, 1986.
- [23] A. Osiadacz, "Simulation and analysis of gas networks," 1987.
- [24] A. Osiadacz, "Optimal numerical method for simulating dynamic flow of gas in pipelines," *Int. J. Numer. Methods Fluids*, vol. 3, no. 2, pp. 125–135, 1983.
- [25] T. Kiuchi, "An implicit method for transient gas flows in pipe networks," *Int. J. Heat Fluid Flow*, vol. 15, no. 5, pp. 378–383, 1994.
- [26] M. A. Adewumi and J. Zhou, "Simulation of Transient Flow In Natural Gas Pipelines," in *PSIG Annual Meeting*, 1995.
- [27] G. R. Price, R. K. McBrien, S. N. Rizopoulos, and H. Golshan, "Evaluating the effective friction factor and overall heat transfer coefficient during unsteady pipeline operation," *J. Offshore Mech. Arct. Eng.*, vol. 121, no. 2, pp. 131–136, 1999.
- [28] A. J. Osiadacz, "Different transient models-limitations, advantages," in *28th Annual Meeting PSIG (Pipeline Simulation Interest Group)*. PSIG, San Francisco, 1996.
- [29] M. Mohitpour, W. Thompson, and B. Asante, "The importance of dynamic simulation on the design and optimization of pipeline transmission systems," in *1996 1st International Pipeline Conference*, 1996, pp. 1183–1188.
- [30] A. R. D. Thorley and C. H. Tiley, "Unsteady and transient flow of compressible fluids in pipelines—a review of theoretical and some experimental studies," *Int. J. heat fluid flow*, vol. 8, no. 1, pp. 3–15, 1987.
- [31] R. I. Issa and D. B. Spalding, "Unsteady one-dimensional compressible frictional flow with heat transfer," *J. Mech. Eng. Sci.*, vol. 14, no. 6, pp. 365–369, 1972.
- [32] J. K. Van Deen and S. R. Reintsema, "Modelling of high-pressure gas transmission lines," *Appl. Math. Model.*, vol. 7, no. 4, pp. 268–273, 1983.
- [33] Y. Dukhovnaya and M. A. Adewumi, "Simulation of non-isothermal transients in

- gas/condensate pipelines using TVD scheme,” *Powder Technol.*, vol. 112, no. 1, pp. 163–171, 2000.
- [34] A. J. Osiadacz and M. Chaczykowski, “Comparison of isothermal and non-isothermal pipeline gas flow models,” *Chem. Eng. J.*, vol. 81, no. 1–3, pp. 41–51, 2001.
- [35] A. Hati, N. Verma, and R. Chhabra, “Transient analysis of gas flow in a straight pipe,” *Can. J. Chem. Eng.*, vol. 79, no. 1, pp. 18–27, 2001.
- [36] E. Tentis, D. Margaritis, and D. Papanikas, “Transient gas flow simulation using an adaptive method of lines,” *Comptes Rendus Mec.*, vol. 331, no. 7, pp. 481–487, 2003.
- [37] L. M. C. Gato and J. C. C. Henriques, “Dynamic behaviour of high-pressure natural-gas flow in pipelines,” *Int. J. Heat fluid flow*, vol. 26, no. 5, pp. 817–825, 2005.
- [38] M. Abbaspour and K. S. Chapman, “Nonisothermal transient flow in natural gas pipeline,” *J. Appl. Mech.*, vol. 75, no. 3, p. 31018, 2008.
- [39] M. Chaczykowski, “Sensitivity of pipeline gas flow model to the selection of the equation of state,” *Chem. Eng. Res. Des.*, vol. 87, no. 12, pp. 1596–1603, 2009.
- [40] M. Chaczykowski, “Transient flow in natural gas pipeline—The effect of pipeline thermal model,” *Appl. Math. Model.*, vol. 34, no. 4, pp. 1051–1067, 2010.
- [41] C. A. Dorao and M. Fernandino, “Simulation of transients in natural gas pipelines,” *J. Nat. Gas Sci. Eng.*, vol. 3, no. 1, pp. 349–355, 2011.
- [42] E. Ebrahimzadeh, M. N. Shahrak, and B. Bazooyar, “Simulation of transient gas flow using the orthogonal collocation method,” *Chem. Eng. Res. Des.*, vol. 90, no. 11, pp. 1701–1710, 2012.
- [43] N. Noorbehesht and P. Ghaseminejad, “Numerical simulation of the transient flow in natural gas transmission lines using a computational fluid dynamic method,” *Am. J. Appl. Sci.*, vol. 10, no. 1, 2013.

- [44] J. F. Helgaker, A. Oosterkamp, L. I. Langelandsvik, and T. Ytrehus, "Validation of 1D flow model for high pressure offshore natural gas pipelines," *J. Nat. Gas Sci. Eng.*, vol. 16, pp. 44–56, 2014.
- [45] P. Wang, B. Yu, Y. Deng, and Y. Zhao, "Comparison study on the accuracy and efficiency of the four forms of hydraulic equation of a natural gas pipeline based on linearized solution," *J. Nat. Gas Sci. Eng.*, vol. 22, pp. 235–244, 2015.
- [46] M. A. Stoner and others, "Steady-State analysis of gas production, transmission and distribution systems," in *fall Meeting of the Society of Petroleum Engineers of AIME*, 1969.
- [47] M. A. Stoner and others, "Sensitivity analysis applied to a steady-state model of natural gas transportation systems," *Soc. Pet. Eng. J.*, vol. 12, no. 02, pp. 115–125, 1972.
- [48] G. P. Berard, B. G. Eliason, and others, "An improved gas transmission system simulator," *Soc. Pet. Eng. J.*, vol. 18, no. 06, pp. 389–398, 1978.
- [49] T. van der Hoeven and others, "Some mathematical aspects of gas network simulation," in *PSIG Annual Meeting*, 1992.
- [50] A. L. H. Costa, J. L. de Medeiros, and F. L. P. Pessoa, "Steady-state modeling and simulation of pipeline networks for compressible fluids," *Brazilian J. Chem. Eng.*, vol. 15, no. 4, pp. 344–357, 1998.
- [51] W. Sung, D. Huh, J. Lee, O. Kwon, and others, "Optimization of pipeline networks with a hybrid MCST-CD networking model," *SPE Prod. Facil.*, vol. 13, no. 03, pp. 213–219, 1998.
- [52] R. Z. Ramos-Mercado, S. Wu, L. R. Scott, and E. A. Boyd, "A reduction technique for natural gas transmission network optimization problems," *Ann. Oper. Res.*, vol. 117, no. 1–4, pp. 217–234, 2002.
- [53] G. P. Greyvenstein and D. P. Laurie, "A segregated CFD approach to pipe network

- analysis,” *Int. J. Numer. Methods Eng.*, vol. 37, no. 21, pp. 3685–3705, 1994.
- [54] J. Szoplik and A. Piastów, “The steady-state simulations for gas flow in a pipeline network,” *Chem. Eng.*, vol. 21, 2010.
 - [55] A. Lewandowski and others, “Object-oriented modeling of the natural gas pipeline network,” in *PSIG Annual Meeting*, 1994.
 - [56] W. Q. Tao and H. C. Ti, “Transient analysis of gas pipeline network,” *Chem. Eng. J.*, vol. 69, no. 1, pp. 47–52, 1998.
 - [57] S. L. Ke and H. C. Ti, “Transient analysis of isothermal gas flow in pipeline network,” *Chem. Eng. J.*, vol. 76, no. 2, pp. 169–177, 2000.
 - [58] H. P. Reddy, S. Narasimhan, and S. M. Bhallamudi, “Simulation and state estimation of transient flow in gas pipeline networks using a transfer function model,” *Ind. Eng. Chem. Res.*, vol. 45, no. 11, pp. 3853–3863, 2006.
 - [59] A. Herrán-González, J. M. De La Cruz, B. De Andrés-Toro, and J. L. Risco-Martín, “Modeling and simulation of a gas distribution pipeline network,” *Appl. Math. Model.*, vol. 33, no. 3, pp. 1584–1600, 2009.
 - [60] W. Hai, L. Xiaojing, and Z. Weiguo, “Transient flow simulation of municipal gas pipelines and networks using semi implicit finite volume method,” *Procedia Eng.*, vol. 12, pp. 217–223, 2011.
 - [61] M. Behbahani-Nejad and A. Bagheri, “The accuracy and efficiency of a MATLAB-Simulink library for transient flow simulation of gas pipelines and networks,” *J. Pet. Sci. Eng.*, vol. 70, no. 3, pp. 256–265, 2010.
 - [62] M. Behbahani-Nejad and Y. Shekari, “The accuracy and efficiency of a reduced-order model for transient flow analysis in gas pipelines,” *J. Pet. Sci. Eng.*, vol. 73, no. 1, pp. 13–19, 2010.
 - [63] R. Alamian, M. Behbahani-Nejad, and A. Ghanbarzadeh, “A state space model for transient flow simulation in natural gas pipelines,” *J. Nat. Gas Sci. Eng.*, vol. 9, pp.

51–59, 2012.

- [64] H. A. Behrooz and R. B. Boozarjomehry, “Modeling and state estimation for gas transmission networks,” *J. Nat. Gas Sci. Eng.*, vol. 22, pp. 551–570, 2015.
- [65] M. Aydinalp-Koksal and V. I. Ugursal, “Comparison of neural network, conditional demand analysis, and engineering approaches for modeling end-use energy consumption in the residential sector,” *Appl. Energy*, vol. 85, no. 4, pp. 271–296, 2008.
- [66] K. Kavaklioglu, H. Ceylan, H. K. Ozturk, and O. E. Canyurt, “Modeling and prediction of Turkey’s electricity consumption using artificial neural networks,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 50, no. 11, pp. 2719–2727, 2009.
- [67] A. Khotanzad, H. Elragal, and T.-L. Lu, “Combination of artificial neural-network forecasters for prediction of natural gas consumption,” *IEEE Trans. Neural Networks*, vol. 11, no. 2, pp. 464–473, 2000.
- [68] P. Potočnik, B. Soldo, G. Šimunović, T. Šarić, A. Jeromen, and E. Govekar, “Comparison of static and adaptive models for short-term residential natural gas forecasting in Croatia,” *Appl. Energy*, vol. 129, pp. 94–103, 2014.
- [69] F. Yu and X. Xu, “A short-term load forecasting model of natural gas based on optimized genetic algorithm and improved BP neural network,” *Appl. Energy*, vol. 134, pp. 102–113, 2014.
- [70] F. B. Gorucu, “Artificial neural network modeling for forecasting gas consumption,” *Energy Sources*, vol. 26, no. 3, pp. 299–307, 2004.
- [71] R. Kizilaslan and B. Karlik, “Combination of neural networks forecasters for monthly natural gas consumption prediction,” *Neural Netw. world*, vol. 19, no. 2, p. 191, 2009.
- [72] Ö. F. DEMİREL, S. Zaim, A. Çalışkan, and P. Özuyar, “Forecasting natural gas consumption in Istanbul using neural networks and multivariate time series

- methods,” *Turkish J. Electr. Eng. Comput. Sci.*, vol. 20, no. 5, pp. 695–711, 2012.
- [73] M. Kovačič and B. Šarler, “Genetic programming prediction of the natural gas consumption in a steel plant,” *Energy*, vol. 66, pp. 273–284, 2014.
- [74] J. Szoplik, “Forecasting of natural gas consumption with artificial neural networks,” *Energy*, vol. 85, pp. 208–220, 2015.
- [75] O. Bratland, “Pipe flow 1: single-phase flow assurance,” 2009, vol. 2. 2009.
- [76] A. H. Shapiro, *The dynamics and thermodynamics of compressible fluid flow*. John Wiley & Sons, 1953.
- [77] AGA8-DC92 EoS, “Compressibility and super compressibility for natural gas and other hydrocarbon gases,” *Transm. Meas. Comm. Rep.*, no. 8, 1992.
- [78] M. J. Moran, H. N. Shapiro, D. D. Boettner, and M. B. Bailey, *Fundamentals of engineering thermodynamics*. John Wiley & Sons, 2010.
- [79] J. G. Knudsen and D. L. Katz, “Fluid dynamics and heat transfer,” 1958.
- [80] T. B. Drew, E. C. Koo, and W. H. McAdams, “The friction factor for clean round pipes,” *Trans. AIChE*, vol. 28, pp. 56–72, 1932.
- [81] H. Blasius, “Das ähnlichkeitsgesetz bei reibungsvorgängen in flüssigkeiten,” in *Mitteilungen über Forschungsarbeiten auf dem Gebiete des Ingenieurwesens*, Springer, 1913, pp. 1–41.
- [82] T. K. Serghides, “Estimate friction factor accurately,” *Chem. Eng.*, vol. 91, no. 5, pp. 63–64, 1984.
- [83] D. J. Zigrang and N. D. Sylvester, “Explicit approximations to the solution of Colebrook’s friction factor equation,” *AIChE J.*, vol. 28, no. 3, pp. 514–515, 1982.
- [84] N. H. Chen, “An explicit equation for friction factor in pipe,” *Ind. Eng. Chem. Fundam.*, vol. 18, no. 3, pp. 296–297, 1979.

- [85] S. E. Haaland, "Simple and explicit formulas for the friction factor in turbulent pipe flow," *J. Fluids Eng.*, vol. 105, no. 1, pp. 89–90, 1983.
- [86] E. S. Menon, *Gas pipeline hydraulics*. CRC Press, 2005.
- [87] I. Tosun, *Modeling in transport phenomena: a conceptual approach*. Elsevier, 2007.
- [88] E. N. Sieder and G. E. Tate, "Heat transfer and pressure drop of liquids in tubes," *Ind. Eng. Chem.*, vol. 28, no. 12, pp. 1429–1435, 1936.
- [89] B. S. Petukhov, "Heat transfer and friction in turbulent pipe flow with variable physical properties," in *Advances in heat transfer*, vol. 6, Elsevier, 1970, pp. 503–564.
- [90] V. Gnielinski, "New equations for heat and mass transfer in turbulent pipe and channel flow," *Int. Chem. Eng.*, vol. 16, no. 2, pp. 359–368, 1976.
- [91] F. P. Incorpera, D. P. Dewitt, T. L. Bergman, and A. S. Lavine, "Fundamentals of Heat and Mass Transfer (Vol." United States of America: John Wiley and Sons Inc, 2007.
- [92] M. Chung, P.-S. Jung, and R. H. Rangel, "Semi-analytical solution for heat transfer from a buried pipe with convection on the exposed surface," *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 42, no. 20, pp. 3771–3786, 1999.
- [93] S. W. Churchill and M. Bernstein, "A correlating equation for forced convection from gases and liquids to a circular cylinder in crossflow," *J. Heat Transfer*, vol. 99, no. 2, pp. 300–306, 1977.
- [94] M. Farzaneh-Gord and H. R. Rahbari, "Developing novel correlations for calculating natural gas thermodynamic properties," *Chem. Process Eng. - Inz. Chem. i Proces.*, vol. 32, no. 4, pp. 435–452, 2011.
- [95] M. Farzaneh-Gord and H. R. Rahbari, "Numerical procedures for natural gas accurate thermodynamic properties calculation," *J. Eng. Thermophys.*, vol. 21, no. 4, 2012.

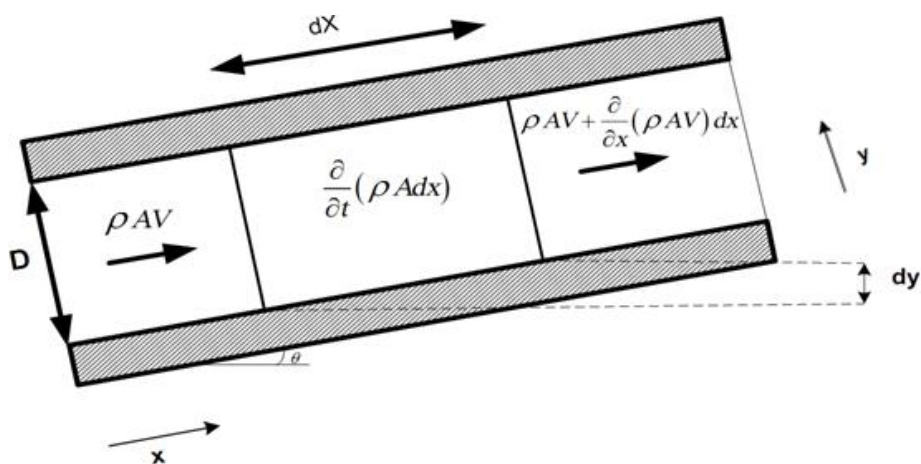
- [96] K. A. Hoffmann and S. T. Chiang, "Computational Fluid Dynamics Volume I," *Eng. Educ. Syst. Wichita, Kan, USA*, 2000.
- [97] C. Hirsch, *Numerical computation of internal and external flows: The fundamentals of computational fluid dynamics*. Elsevier, 2007.
- [98] M. H. Beale, M. T. Hagan, and H. B. Demuth, "Neural Network Toolbox  User's Guide," *Mathworks Inc*, 1992.
- [99] "I.R.OF IRAN Meteorological Organization website." [Online]. Available: <http://www.irimo.ir/eng/index.php>.

۸- پیوست الف) معادلات حاکم برای

جریان درون خطوط لوله

۸-۱ معادله پیوستگی

بر طبق قانون بقای جرم ، جرم نه تولید می شود و نه از بین می رود. بنا براین خالص خروجی جرم از سطح کنترل برابر است با نرخ کاهش جرم داخل حجم کنترل.



شکل ۸-۱ حجم کنترل برای معادله پیوستگی [۷۵]

مطابق با حجم کنترل نشان داده شده در شکل ۸-۱ ، پس از ساده سازی ، معادله پیوستگی را به صورت زیر خواهیم داشت:

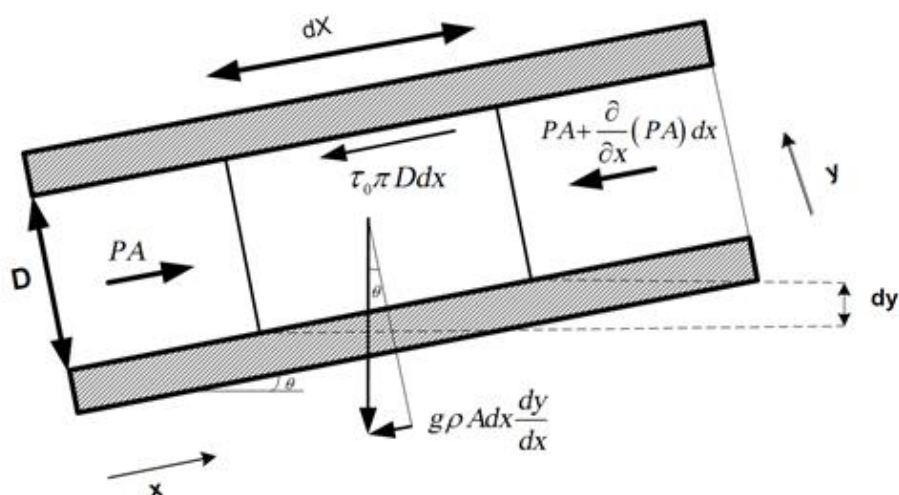
$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho v) = 0 \quad (۸-۱)$$

که در آن، ρ چگالی سیال و v نیز سرعت سیال در جهت محور لوله می باشد.

۸-۲ معادله مومنتوم

کاربرد قانون دوم نیوتن در مورد مدل جریان را معادله مومنتوم می نامند. قانون دوم نیوتن در مورد حجم کنترل می گوید که نیروی خالص وارد بر حجم کنترل برابر است با جرم حجم کنترل ضربدر شتاب آن. که این نیرو دو منشأ دارد:

- ۱- نیروهای داخلی یا بدنه ای که مستقیماً بر روی جرم حجمی سیال وارد می شوند. مانند نیروهای ثقلی، نیروهای مغناطیسی و نیروی گریز از مرکز
- ۲- نیروهای سطحی که مستقیماً بر سطح حجم کنترل وارد می شوند مانند نیروی اصطکاک دیواره



شکل ۸-۲ حجم کنترل برای معادله مومنتوم [۷۵]

با در نظر گرفتن نیروهای وارد بر حجم کنترل شکل ۸-۲، معادله مومنتوم بدین صورت نوشته می شود:

$$PA - PA - \frac{\partial}{\partial x}(PA)dx - \tau_0 \pi D dx - \rho g A \left(\frac{dy}{dx} \right) dx = \rho A \left(v \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial t} \right) dx \quad (۸-۲)$$

پارامتر τ_0 تنش برشی بین سیال و دیواره لوله می باشد و برابر است با :

$$\tau_0 = \frac{f\rho v|v|}{8} \quad (۳-۸)$$

متغیر f ضریب اصطکاک مودی است. محققان از روابط متفاوتی برای محاسبه ضریب اصطکاک استفاده

نموده اند. با استفاده از تعریف $\frac{dy}{dx} = \sin\theta$ خواهیم داشت :

$$-A \frac{\partial P}{\partial x} - \frac{f\rho v|v|}{8} \pi D - \rho g A \sin\theta = \rho A \left(v \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial t} \right) \quad (۴-۸)$$

و همچنین:

$$w = \frac{f\rho v|v|}{8} \pi D \quad (۵-۸)$$

فرم نهایی معادله مومنتوم به صورت زیر ارائه می شود:

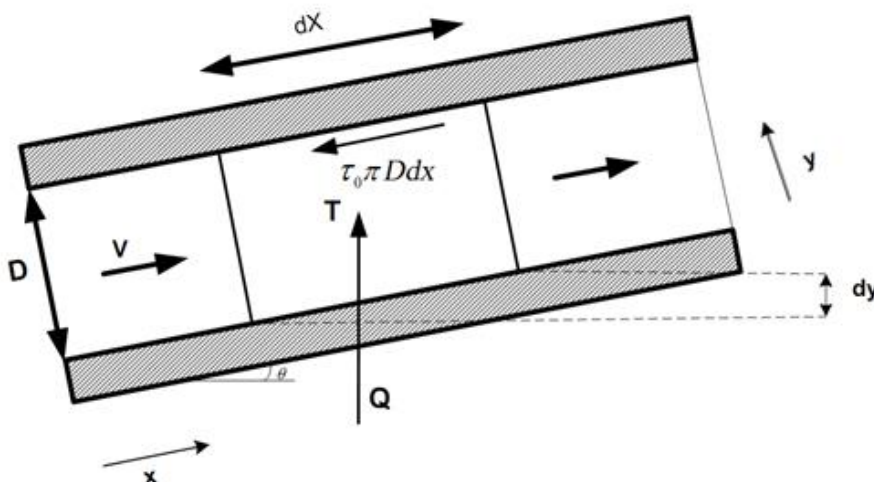
$$\rho \frac{\partial v}{\partial t} + \rho v \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial P}{\partial x} = -\frac{w}{A} - \rho g \sin\theta \quad (۶-۸)$$

۳-۸ معادله انرژی

اصل بقای انرژی چیزی غیر از قانون اول ترمودینامیک نیست. این اصل عبارتست از : مقدار انرژی گرمایی

و مکانیکی ورودی به حجم کنترل ، به اضافه مقدار انرژی گرمایی تولید شده در آن، منهای انرژی گرمایی

و مکانیکی خروجی از حجم کنترل بایستی با مقدار انرژی ذخیره شده در حجم کنترل برابر باشند. اگر مجموع انرژی ورودی و تولید شده بیش از انرژی خروجی باشد، مقدار انرژی ذخیره شده در حجم کنترل، افزایش خواهد یافت. اگر عکس آن باشد مقدار انرژی ذخیره شده کاهش خواهد یافت.



شکل ۸-۳ حجم کنترل برای معادله انرژی [۷۵]

فرم پایه معادله انرژی برای شکل ۸-۳، از قانون اول ترمودینامیک [۷۶] نوشته می شود:

$$Q = q\rho A dx = \frac{\partial}{\partial t} \left[\rho A dx \left(u + \frac{v^2}{2} + gy \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x} \left[\rho v A \left(u + \frac{v^2}{2} + \frac{P}{\rho} + gy \right) \right] dx \quad (۷-۸)$$

جایی که q انتقال حرارت به حجم کنترل در واحد جرم و در واحد زمان و u، انرژی داخلی است.

$$\begin{aligned} q\rho A dx = \rho A dx & \left[\frac{\partial}{\partial t} \left(u + \frac{v^2}{2} + gy \right) + v \frac{\partial}{\partial x} \left(u + \frac{v^2}{2} + gy \right) \right] \\ & + \left[\left(u + \frac{v^2}{2} + gy \right) \left(\frac{\partial(\rho A)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v A)}{\partial x} \right) \right] dx \\ & + \left[\frac{P}{\rho} \frac{\partial(\rho v A)}{\partial x} + (\rho v A) \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{P}{\rho} \right) \right] dx \end{aligned} \quad (۸-۸)$$

جداسازی ترم دوم نتیجه می دهد :

$$\left(\frac{\partial(\rho A)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v A)}{\partial x} = 0 \right) \text{ ترم دوم برابر صفر خواهد بود.}$$

پس از تقسیم بر $\rho A dx$ خواهیم داشت :

$$q = \frac{D}{Dt} \left(u + \frac{v^2}{2} + gy \right) + \frac{v}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{P}{\rho A} \frac{\partial(vA)}{\partial x} \quad (9-8)$$

با ضرب معادله مومنتوم در v خواهیم داشت:

$$\frac{v}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} = -v \frac{Dv}{Dt} - \frac{wv}{\rho A} - vg \sin \theta \quad (10-8)$$

معادله پیوستگی را نیز می توان به فرم زیر باز نویسی کرد:

$$\frac{\partial}{\partial x} (vA) = - \frac{D\rho A}{Dt \rho} \quad (11-8)$$

$$q = \frac{D}{Dt} \left(u + \frac{v^2}{2} + gy \right) + \frac{v}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{P}{\rho A} \frac{\partial(vA)}{\partial x} \quad (12-8)$$

$$q = \frac{Du}{Dt} - \frac{P}{\rho^2} \frac{D\rho}{Dt} - \frac{wv}{\rho A} \quad (13-8)$$

با استفاده از روابط (۸-۱۰) و (۸-۱۱)، خواهیم داشت:

به عبارت دیگر:

با استفاده از تعریف h به عنوان آنتالپی :

$$\frac{Dh}{Dt} = \frac{Du}{Dt} + \frac{D}{Dt} \left(\frac{P}{\rho} \right) \quad (۸-۱۴)$$

$$q + \frac{wv}{\rho A} = \frac{Dh}{Dt} - \frac{1}{\rho} \frac{DP}{Dt} \quad (۸-۱۵)$$

$$\rho \frac{Dh}{Dt} + \rho v \frac{\partial h}{\partial x} - \frac{\partial P}{\partial x} - v \frac{\partial P}{\partial x} = \frac{\Omega + wv}{A} \quad (۸-۱۶)$$

و برای معادله انرژی خواهیم داشت :

با در نظر گرفتن تساوی $\Omega = q\rho A$ شکل نهایی معادله انرژی نوشته می شود :

که h آنتالپی ویژه و Ω گرمای وارده به لوله در واحد طول و در واحد زمان و A سطح مقطع لوله در جهت عمود بر جریان می باشند.

۸-۴ استفاده از معادله حالت برای بازنویسی معادلات حاکم

معادله حالت برای یک گاز، متغیرهای P ، T و ρ را به هم مرتبط می سازد. معادلات حالت در فرم کلی عبارتست از :

$$\frac{P}{\rho} = ZRT \quad (۱۷-۸)$$

در اینجا Z ضریب تراکم پذیری بوده و تابعی از P و T می باشد. R ثابت ویژه گاز مربوطه بر حسب $\left(\frac{J}{kg.k}\right)$ معادلات حاکم به راحتی قابل حل نبوده بنابراین، این معادلات باید با استفاده از معادله حالت، بر حسب متغیرهای وابسته دما، فشار و سرعت نوشته شوند. برای جایگزینی ρ با عبارتهایی از P، T و Z از معادله حالت داریم:

$$\rho = \frac{P}{ZRT} \quad (۱۸-۸)$$

بنابراین:

$$\ln(\rho) = \ln(P) - \ln(R) - \ln(T) - \ln(Z) \quad (۱۹-۸)$$

با مشتق گیری بر حسب زمان:

$$\frac{1}{\rho} \frac{D\rho}{Dt} = \frac{1}{P} \frac{DP}{Dt} - \frac{1}{R} \frac{DR}{Dt} - \frac{1}{T} \frac{DT}{Dt} - \frac{1}{Z} \frac{DZ}{Dt} \quad (۲۰-۸)$$

$$dZ = \left(\frac{\partial Z}{\partial P}\right)_T dP + \left(\frac{\partial Z}{\partial T}\right)_P dT \quad (۲۱-۸)$$

$$\frac{DZ}{Dt} = \left(\frac{\partial Z}{\partial P}\right)_T \frac{DP}{Dt} + \left(\frac{\partial Z}{\partial T}\right)_P \frac{DT}{Dt} \quad (۲۲-۸)$$

عبارت $\frac{1}{R} \frac{DR}{Dt}$ برابر صفر است پس ضریب تراکم پذیری تابعی از P و T بوده و داریم:

بنابراین:

$$\frac{1}{\rho} \frac{D\rho}{Dt} = \left\{ \frac{1}{P} - \frac{1}{Z} \left(\frac{\partial Z}{\partial P} \right)_T \right\} \frac{DP}{Dt} - \left\{ \frac{1}{T} + \frac{1}{Z} \left(\frac{\partial Z}{\partial T} \right)_P \right\} \frac{DT}{Dt} \quad (۲۳-۸)$$

$$\left\{ \frac{1}{P} - \frac{1}{Z} \left(\frac{\partial Z}{\partial P} \right)_T \right\} \frac{DP}{Dt} - \left\{ \frac{1}{T} + \frac{1}{Z} \left(\frac{\partial Z}{\partial T} \right)_P \right\} \frac{DP}{Dt} - \left\{ \frac{1}{T} + \frac{1}{Z} \left(\frac{\partial Z}{\partial T} \right)_P \right\} \frac{DT}{Dt} + \frac{\partial v}{\partial x} = 0 \quad (۲۴-۸)$$

با جایگذاری این رابطه در معادله پیوستگی رابطه (۸-۱)، خواهیم داشت:

برای تعریف h بر حسب P، T و Z، رابطه ترمودینامیکی زیر برای آنتالپی ارائه شده است [۷۸]:

$$dh = C_p dT + \left\{ \frac{T}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_P + 1 \right\} \frac{dP}{\rho} \quad (۲۵-۸)$$

و سپس :

$$\frac{Dh}{Dt} = C_p \frac{DT}{Dt} + \left\{ \frac{T}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_P + 1 \right\} \frac{1}{\rho} \frac{dP}{Dt} \quad (۲۶-۸)$$

با جایگذاری رابطه (۲۶-۸) در رابطه (۸-۱۶)، خواهیم داشت :

$$\rho C_p \frac{DT}{Dt} + \left\{ \frac{T}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_P \right\} \frac{dP}{Dt} = \frac{\Omega + wv}{A} \quad (۲۷-۸)$$

$\frac{DT}{Dt}$ و $\frac{DP}{Dt}$ را از روابط (۲۳-۸) و (۲۴-۸) جایگزین می کنیم:

$$\begin{aligned} \rho C_p \left[\frac{1}{P} - \frac{1}{Z} \left(\frac{\partial Z}{\partial P} \right)_T \right] \frac{DP}{Dt} + \left[\frac{1}{T} + \frac{1}{Z} \left(\frac{\partial Z}{\partial T} \right)_P \right] \frac{T}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_P \frac{DP}{Dt} \\ = -\rho C_p \frac{\partial v}{\partial x} + \left[\frac{1}{T} + \frac{1}{Z} \left(\frac{\partial Z}{\partial T} \right)_P \right] \frac{\Omega + wv}{A} \end{aligned} \quad (۲۸-۸)$$

از معادله حالت و با در نظر گرفتن فشار ثابت خواهیم داشت :

$$\frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_P = -\frac{1}{T} \left\{ 1 + \frac{T}{Z} \left(\frac{\partial Z}{\partial T} \right)_P \right\} \quad (۲۹-۸)$$

اکنون از روابط (۲۳-۸) و (۲۴-۸) برای تعیین $\frac{DT}{Dt}$ استفاده می کنیم:

$$\begin{aligned} \rho C_p \left[\frac{1}{P} - \frac{1}{Z} \left(\frac{\partial Z}{\partial P} \right)_T \right] \frac{DT}{Dt} + \left[\frac{1}{T} + \frac{1}{Z} \left(\frac{\partial Z}{\partial T} \right)_P \right] \frac{T}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_P \frac{DT}{Dt} \\ = \frac{T}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_P \frac{\partial v}{\partial x} + \left[\frac{1}{P} - \frac{1}{Z} \left(\frac{\partial Z}{\partial P} \right)_T \right] \frac{\Omega + wv}{A} \end{aligned} \quad (۳۰-۸)$$

با تقسیم این عبارت بر C_p و جایگذاری $\frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_P$ از معادله حالت، خواهیم داشت :

$$\begin{aligned} \frac{\rho}{P} \left\{ \left[1 - \frac{P}{Z} \left(\frac{\partial Z}{\partial P} \right)_T \right] - \frac{P}{\rho C_p T} \left[1 + \frac{T}{Z} \left(\frac{\partial Z}{\partial T} \right)_P \right]^2 \right\} + \frac{1}{C_p} \left[1 + \frac{T}{Z} \left(\frac{\partial Z}{\partial T} \right)_P \right] \frac{\partial v}{\partial x} \\ = \frac{1}{C_p T} \left[1 - \frac{P}{Z} \left(\frac{\partial Z}{\partial P} \right)_T \right] \frac{\Omega + wv}{A} \end{aligned} \quad (۳۱-۸)$$

۵-۸ تعریف سرعت موج در معادلات حاکم

اگر آنتروپی، به صورت تابعی از فشار و چگالی باشد، خواهیم داشت:

$$ds = \left(\frac{\partial s}{\partial P} \right)_\rho dP + \left(\frac{\partial s}{\partial \rho} \right)_P d\rho \quad (۳۲-۸)$$

برای یک فرآیند آیزنتروپیک :

$$\left(\frac{\partial s}{\partial P} \right)_\rho \left(\frac{\partial P}{\partial \rho} \right)_s + \left(\frac{\partial s}{\partial \rho} \right)_P = 0 \quad (۳۳-۸)$$

بنابراین :

$$\left(\frac{\partial P}{\partial \rho}\right)_s = - \frac{\left(\frac{\partial s}{\partial t}\right)_P \left(\frac{\partial T}{\partial \rho}\right)_P}{\left(\frac{\partial s}{\partial T}\right)_\rho \left(\frac{\partial P}{\partial \rho}\right)_\rho} \quad (۳۴-۸)$$

در روشی مشابه ، دما نیز تابعی از فشار و چگالی است $T = T(P, \rho)$ ، پس داریم :

$$dT = \left(\frac{\partial T}{\partial p}\right)_\rho dP + \left(\frac{\partial T}{\partial \rho}\right)_P d\rho \quad (۳۵-۸)$$

برای دمای ثابت $dT=0$ ، خواهیم داشت :

$$\frac{\left(\frac{\partial T}{\partial \rho}\right)_P}{\left(\frac{\partial T}{\partial P}\right)_\rho} = - \frac{1}{\left(\frac{\partial \rho}{\partial P}\right)_T} \quad (۳۶-۸)$$

همچنین :

$$\left(\frac{\partial P}{\partial \rho}\right)_s = \left[\frac{\left(\frac{\partial s}{\partial T}\right)_P}{\left(\frac{\partial s}{\partial T}\right)_\rho} \right] \left[\frac{1}{\left(\frac{\partial \rho}{\partial P}\right)_T} \right] \quad (۳۷-۸)$$

با استفاده از مرجع [۷۸] روابط زیر را داریم:

$$\left(\frac{\partial s}{\partial T}\right)_P = \frac{C_P}{T} \quad (۳۸-۸)$$

$$\left(\frac{\partial s}{\partial T}\right)_\rho = \frac{C_v}{T} = \frac{C_P}{T} - \left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_P \left(\frac{\partial P}{\partial T}\right)_v \quad (۳۹-۸)$$

بنابراین:

$$\left(\frac{\partial P}{\partial T}\right)_v = -\frac{\left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_P}{\left(\frac{\partial v}{\partial P}\right)_T} \quad (۴۰-۸)$$

با استفاده از رابطه (۴۰-۸) می توان رابطه (۳۹-۸) را به صورت زیر بازنویسی کرد :

$$\left(\frac{\partial s}{\partial T}\right)_\rho = \frac{C_P}{T} - \frac{1}{\rho^2} \left[\frac{\left(\frac{\partial \rho}{\partial T}\right)_P^2}{\left(\frac{\partial \rho}{\partial P}\right)_T} \right] \quad (۴۱-۸)$$

و با ساده سازی :

$$\left(\frac{\partial s}{\partial T}\right)_\rho \left(\frac{\partial \rho}{\partial P}\right)_T = \frac{C_P}{T} \left(\frac{\partial \rho}{\partial P}\right)_T - \frac{1}{\rho^2} \left(\frac{\partial \rho}{\partial T}\right)_P^2 \quad (۴۲-۸)$$

از معادله حالت داریم :

$$\left(\frac{\partial \rho}{\partial T}\right)_P = -\frac{\rho}{T} \left[1 + \frac{T}{Z} \left(\frac{\partial Z}{\partial T}\right)_P \right] \quad (۴۳-۸)$$

$$\left(\frac{\partial \rho}{\partial P}\right)_T = \frac{\rho}{P} \left[1 - \frac{P}{Z} \left(\frac{\partial Z}{\partial P}\right)_T \right] \quad (۴۴-۸)$$

با جایگذاری این عبارات در رابطه (۳۷-۸) خواهیم داشت :

$$\left(\frac{\partial P}{\partial \rho}\right)_s = \frac{C_P}{T} \left[\frac{C_P}{T} \left\{ \frac{\rho}{P} \left[1 - \frac{P}{Z} \left(\frac{\partial Z}{\partial P}\right)_T \right] - \frac{1}{C_P T} \left[1 + \frac{T}{Z} \left(\frac{\partial Z}{\partial T}\right)_P \right]^2 \right\} \right]^{-1} \quad (۴۵-۸)$$

و نتیجه می دهد :

$$\left(\frac{\partial P}{\partial \rho}\right)_s = \frac{1}{\left[\frac{\rho}{P}\left\{1 - \frac{P}{Z}\left(\frac{\partial Z}{\partial P}\right)_T - \frac{P}{\rho C_p T}\left[1 + \frac{T}{Z}\left(\frac{\partial Z}{\partial T}\right)_P\right]^2\right\}\right]} \quad (۴۶-۸)$$

عبارت $\left(\frac{\partial P}{\partial \rho}\right)_s^{\frac{1}{2}}$ را میتوان به عنوان سرعت آیزنتروپیک موج V_w تعریف کرد. با استفاده از معادله حالت،

سرعت آیزنتروپیک موج به صورت زیر تعریف می شود :

$$V_w = \sqrt{\frac{ZRT}{\left\{1 - \frac{P}{Z}\left(\frac{\partial Z}{\partial P}\right)_T - \frac{P}{\rho C_p T}\left[1 + \frac{T}{Z}\left(\frac{\partial Z}{\partial T}\right)_P\right]^2\right\}}} \quad (۴۷-۸)$$

۸-۶ بازنویسی معادلات حاکم

با جایگذاری روابط گفته شده می توان فرم کلی معادلات حاکم را به صورت زیر بیان نمود:

$$\left(\frac{\partial P}{\partial t}\right) + v\left(\frac{\partial P}{\partial x}\right) + \rho V_w^2 \left(\frac{\partial v}{\partial x}\right) = \frac{V_w^2}{C_p T} \left[1 + \frac{T}{Z}\left(\frac{\partial Z}{\partial T}\right)_P\right] \frac{\Omega + wv}{A} \quad (۴۸-۸)$$

$$\left(\frac{\partial v}{\partial t}\right) + v\left(\frac{\partial v}{\partial x}\right) + \frac{1}{\rho}\left(\frac{\partial P}{\partial x}\right) = -\frac{w}{A\rho} - g\sin\theta \quad (۴۹-۸)$$

$$\begin{aligned} \left(\frac{\partial T}{\partial t}\right) + v\left(\frac{\partial T}{\partial x}\right) + \frac{V_w^2}{C_p} \left[1 + \frac{T}{Z}\left(\frac{\partial Z}{\partial T}\right)_P\right] \left(\frac{\partial v}{\partial x}\right) \\ = \frac{V_w^2}{C_p P} \left[1 - \frac{P}{Z}\left(\frac{\partial Z}{\partial P}\right)_T\right] \frac{\Omega + wv}{A} \end{aligned} \quad (۵۰-۸)$$

به راحتی می توان، این معادلات را بر حسب دبی جرمی جریان ($\dot{m}$) نوشت . زیرا داشتن دبی جرمی جریان در هر نقطه از خطوط لوله کاربردی تر نسبت به سرعت گاز در آن نقطه می باشد. برای انجام این کار، سرعت را با عبارتی بر حسب دبی جرمی می نویسیم :

$$v = \frac{\dot{m}}{\rho A} = \frac{\dot{m} Z R T}{P A} \quad (۵۱-۸)$$

سپس :

$$\frac{\partial v}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\dot{m} Z R T}{P A} \right) = \frac{R}{A} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\dot{m} Z T}{P} \right) \quad (۵۲-۸)$$

$$= \frac{R}{A P^2} \left(P \left(Z T \frac{\partial \dot{m}}{\partial x} + \dot{m} T \frac{\partial Z}{\partial x} + \dot{m} Z \frac{\partial T}{\partial x} \right) - \dot{m} Z T \frac{\partial P}{\partial x} \right)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} = \frac{R}{A P^2} \left(P \left(Z T \frac{\partial \dot{m}}{\partial t} + \dot{m} T \frac{\partial Z}{\partial t} + \dot{m} Z \frac{\partial T}{\partial t} \right) - \dot{m} Z T \frac{\partial P}{\partial t} \right) \quad (۵۳-۸)$$

همچنین :

$$\frac{\partial Z}{\partial x} = \left(\frac{\partial Z}{\partial P} \right)_T \frac{\partial P}{\partial x} + \left(\frac{\partial Z}{\partial T} \right)_P \frac{\partial T}{\partial x} \quad (۵۴-۸)$$

$$\frac{\partial Z}{\partial t} = \left(\frac{\partial Z}{\partial P} \right)_T \frac{\partial P}{\partial t} + \left(\frac{\partial Z}{\partial T} \right)_P \frac{\partial T}{\partial t} \quad (۵۵-۸)$$

با جایگذاری این معادلات در روابط (۵۲-۸) و (۵۳-۸)، خواهیم داشت:

$$\frac{\partial v}{\partial x} = \frac{Z R T}{A P^2} \left[P \frac{\partial \dot{m}}{\partial x} - \dot{m} \left(1 - \frac{P}{Z} \left(\frac{\partial Z}{\partial P} \right)_T \right) \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{P \dot{m}}{T} \left(1 + \frac{T}{Z} \left(\frac{\partial Z}{\partial T} \right)_P \right) \frac{\partial T}{\partial x} \right] \quad (۵۶-۸)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} = \frac{Z R T}{A P^2} \left[P \frac{\partial \dot{m}}{\partial t} - \dot{m} \left(1 - \frac{P}{Z} \left(\frac{\partial Z}{\partial P} \right)_T \right) \frac{\partial P}{\partial t} + \frac{P \dot{m}}{T} \left(1 + \frac{T}{Z} \left(\frac{\partial Z}{\partial T} \right)_P \right) \frac{\partial T}{\partial t} \right] \quad (۵۷-۸)$$

در نهایت فرم کلی معادلات حاکم به صورت زیر بازنویسی می شود:

$$\begin{aligned} \frac{\partial P}{\partial t} + \frac{\dot{m}ZRT}{PA} \left[1 - \frac{V_w^2}{ZRT} \left(1 - \frac{P}{Z} \left(\frac{\partial Z}{\partial P} \right)_T \right) \right] \frac{\partial P}{\partial x} + \dot{m}V_w^2 \\ \left(\frac{1}{\dot{m}} \frac{\partial \dot{m}}{\partial x} + \frac{1}{T} \left(1 + \frac{T}{Z} \left(\frac{\partial Z}{\partial T} \right)_P \right) \frac{\partial T}{\partial x} \right) = \frac{V_w^2}{C_p} \left\{ 1 + \frac{T}{Z} \left(\frac{\partial Z}{\partial T} \right)_P \right\} \left(\frac{\Omega}{A} + \frac{\dot{m}ZRT}{PA^2} w \right) \end{aligned} \quad (\Delta\lambda-\lambda)$$

$$\begin{aligned} \frac{ZRT}{AP^2} \left\{ P \left(\frac{\partial \dot{m}}{\partial t} + \frac{\dot{m}ZRT}{PA} \frac{\partial \dot{m}}{\partial x} \right) - \dot{m} \left(1 - \frac{P}{Z} \left(\frac{\partial Z}{\partial P} \right)_T \right) \times \left(\frac{\partial P}{\partial t} + \frac{\dot{m}ZRT}{PA} \frac{\partial P}{\partial x} \right) \right. \\ \left. + \frac{P\dot{m}}{T} \left(1 + \frac{T}{Z} \left(\frac{\partial Z}{\partial T} \right)_P \right) \times \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\dot{m}ZRT}{PA} \frac{\partial T}{\partial x} \right) \right\} + \frac{ZRT}{P} \frac{\partial P}{\partial x} = -\frac{wZRT}{PA} - g\sin\theta \end{aligned} \quad (\Delta\lambda-\lambda)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial T}{\partial t} + \frac{V_w^2}{C_p} \left(1 + \frac{T}{Z} \left(\frac{\partial Z}{\partial T} \right)_P \right) \frac{ZRT}{AP^2} \left[P \frac{\partial \dot{m}}{\partial x} - \dot{m} \left(1 - \frac{P}{Z} \left(\frac{\partial Z}{\partial P} \right)_T \right) \frac{\partial P}{\partial x} \right] + \frac{\dot{m}ZRT}{PA} \\ \times \left(1 + \frac{V_w^2}{C_p T} \left(1 + \frac{T}{Z} \left(\frac{\partial Z}{\partial T} \right)_P \right)^2 \right) \frac{\partial T}{\partial x} = \frac{V_w^2}{C_p T} \left\{ 1 - \frac{P}{Z} \left(\frac{\partial Z}{\partial P} \right)_T \right\} \left(\frac{\Omega}{A} + \frac{\dot{m}ZRT}{PA^2} w \right) \end{aligned} \quad (\Delta\lambda-\lambda)$$

۹- پوست ب) معادله حالت AGA8

۱-۹ مقدمه

تحقیقات انجام گرفته زیر نظر آقای هوارد در سالهای ۱۹۲۸ تا ۱۹۲۹ منجر به تدوین روش استاندارد برای محاسبه ضریب تراکم پذیری گاز طبیعی تا فشار ۴ مگاپاسکال در دایره تحقیقات استاندارد گاز طبیعی آمریکا، گردید. اما تا سال ۱۹۵۴ که آقای پروفسر ساموئل.ر. در دانشگاه اوهایو گزارشی از تحقیقات انجام گرفته اش بر روی ضریب تراکم پذیری گاز طبیعی بر مبنای مطالعات پیشین آقای هوارد را منتشر کرد، این تحقیقات انتشار پیدار نکرده بود. ضریب تراکم پذیری گاز طبیعی و همچنین معادله حالتی بر مبنای تحقیقات آقای زیمرمن ، بین سالهای ۱۹۵۶ تا ۱۹۶۲ در دانشگاه اوهایو ، توسعه داده و منتشر گردید. نتایج این تحقیق توسط انجمن گاز آمریکا^۱ (AGA) تحت عنوان "دستورالعملی برای محاسبه ضریب تراکم پذیری گاز طبیعی" در سال ۱۹۶۲ منتشر گردید. در ادامه در سال ۱۹۸۵ رساله ای جهت محاسبه دقیق ضریب تراکم پذیری گاز طبیعی با در نظر گرفتن اثرات دما و فشار و گستره اجزای تشکیل دهنده گاز، به سرپرستی پرفسور کنت.ای. در دانشگاه اوکلاهما انتشار یافت. نتایج در سال ۱۹۸۴ برای محاسبات گاز طبیعی در خطوط انتقال کامل گشته و این گزارش پایه و اساسی برای گزارش کامل در سال ۱۹۸۵ گردید. تحقیقات اولیه بین سالهای ۱۹۸۱ تا ۱۹۸۴ که توسط موسسه GERG انتشار یافته

¹-American Gas Association

شده بود ، برای فشارهای نزدیک به ۶ مگاپاسکال ضریب تراکم پذیری را محاسبه می نمود. اما در بین سالهای ۱۹۸۵ تا ۱۹۹۰ این نتایج به صورت چشمگیری توسط موسسه GERG توسعه داده شد. نتایج جدید نشان می داد که نتایج منتشر شده بین سالهای ۱۹۸۱ تا ۱۹۸۴ نیاز به بازبینی دارند. همچنین، اطلاعات مربوط به سرعت صوت که در بین سالهای ۱۹۸۵ تا ۱۹۸۹ توسط موسسه GRI انتشار یافته بود، نشان داد که محاسبات برای گازهای غنی و در جریان های بحرانی از دقت کافی برخوردار نیستند. پس از بازبینی های انجام شده، معادله حالت جدید برای محاسبه ضریب تراکم پذیری گاز طبیعی توسط موسسات GRI و GERG ارائه گردید. همچنین روش بازبینی شده با استفاده از داده های آزمایشگاهی و تحلیلی، توسط پرفسور ریچارد جاکوبسن تکمیل گردید [۷۷].

۹-۲ شرح و بسط روش AGA8

با استفاده از این روش می توان، ضریب تراکم پذیری گاز طبیعی و چگالی گاز طبیعی را محاسبه نمود. با توجه به اینکه گاز طبیعی مخلوطی از چندین گاز می باشد، در این روش فرض بر آن است که گاز طبیعی مخلوطی از ۲۱ عنصر بوده که محدوده کسر مولی هر جزء در مخلوط گاز طبیعی مشخص می باشد. جدول ۹-۱، محدوده مجاز برای استفاده از این روش را نشان می دهد [۷۷].

جدول ۹-۱ محدوده مجاز مورد استفاده برای روش AGA8

Quantity	Normal Range	Expanded Range
Relative Density	0.554 to 0.87	0.07 to 1.52
Gross Heating Value	477 to 115 Btu/scf	0 to 1800 Btu/scf
Gross Heating Value	18.7 to 45.1 MJ/m ³	0 to 66 MJ/m ³
Mole Percent Methane	45 to 100	0 to 100
Mole Percent Nitrogen	0 to 50	0 to 100
Mole Percent Carbon Dioxide	0 to 30	0 to 100

Mole Percent Ethane	0 to 10	0 to 100
Mole Percent Propane	0 to 4	0 to 12
Mole Percent Total Butanes	0 to 1	0 to 6
Mole Percent Total Pentanes	0 to 0.3	0 to 4
Mole Percent Hexanes Plus	0 to 0.2	0 to Dew Point
Mole Percent Helium	0 to 0.2	0 to 3
Mole Percent Hydrogen	0 to 10	0 to 100
Mole Percent Carbon Monoxide	0 to 3	0 to 3
Mole Percent Argon	0	0 to 1
Mole Percent Oxygen	0	0 to 21
Mole Percent Water	0 to 0.05	0 to Dew Point
Mole Percent Hydrogen Sulfide	0 to 0.02	0 to 100

با توجه به داده های جدول ۹-۱ ، از معادله حالت AGA8، تنها برای گاز طبیعی با درصد مشخص شده، می توان استفاده کرد. دو روش برای محاسبه ضریب تراکم پذیری گاز طبیعی با استفاده از استاندارد ارائه شده، وجود داشته که به شرح زیر می باشند [۷۷]:

روش اول که Gross Characterization Method (G.C.M) نامیده می شود که با استفاده از ارزش حرارتی و چگالی نسبی گاز طبیعی، ضریب تراکم پذیری گاز طبیعی را محاسبه می کند. دقت جوابهای بدست آمده با استفاده از این روش در محدوده دما و فشارهای پایین قابل قبول می باشد. این مسئله باعث می شود که در دماهای بالا، استفاده از این روش خطایی را وارد محاسبات مربوط به ضریب تراکم پذیری نماید.

روش دوم که Detail Characterization Method (D.C.M) نامیده می شود، در محدوده وسیعتری از دما، فشار و چگالی گاز طبیعی کاربرد دارد. با استفاده از این روش محاسبه ضریب تراکم پذیری در

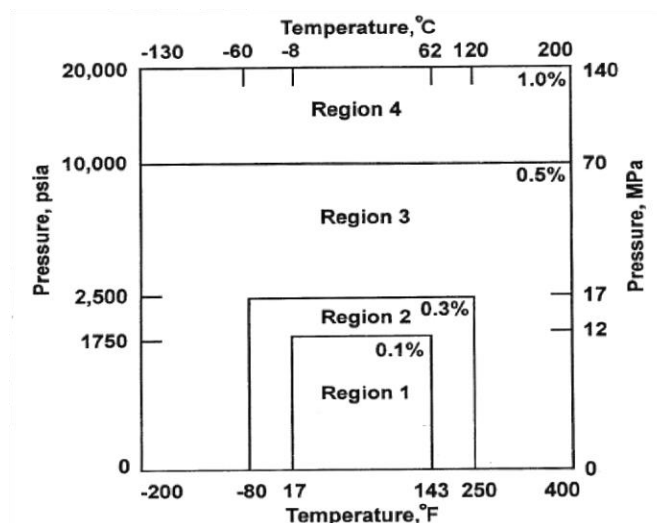
محدوده دمایی ۱۳۰- درجه سانتیگراد تا ۴۰۰ درجه سانتیگراد و فشارهای بالای ۲۸۰ مگاپاسکال، با دقت قابل قبولی امکان پذیر می باشد. با توجه به محدوده نسبتاً وسیع دما و فشار در این روش، محاسبات ضریب تراکم پذیری با استفاده از روش D.C.M انجام می گیرد. با استفاده از این روش، خطای محاسبات ضریب تراکم پذیری و چگالی گاز طبیعی، برای ترکیبات گازی که درصد مولی هگزان و هیدروکربن های سنگین بیش از ۱٪ را کاهش می دهد.

۹-۳ عدم قطعیت

عدم قطعیت مربوط به محاسبات ضریب تراکم پذیری با استفاده از هر دو روش D.C.M و G.C.M به ترکیبات گاز طبیعی و محدوده دما و فشار محاسبات بستگی دارد. خطای محاسبات انجام شده با استفاده از این دو روش با جداول اطلاعاتی GRI و GERG مقایسه شده و نتایج قابل قبولی بدست آمده است.

۹-۳-۱ عدم قطعیت روش D.C.M

در حالت کلی عدم قطعیت این روش برای گاز طبیعی با درصد مولی ترکیبات گاز که در محدوده نرمال جدول (۱-۲)، قرار می گیرند، مطابق با شکل (۱-۲) می باشد. برای گاز طبیعی با درصد مولی در محدوده گسترده در جدول (۱-۲)، این روش خطای متوسطی داشته و برای مقادیر خارج از ناحیه ۱ شکل (۱-۲)، این خطا بزرگ می باشد. جداول اطلاعاتی GRI و GERG درستی این روش را برای ناحیه ۱ و بخشی از نواحی ۲، ۳ و ۴ تایید کرده است [۷۷].



شکل ۹-۱ محدوده خطا برای محاسبه ضریب تراکم پذیری با استفاده از روش AGA8 [۷۷]

۹-۳-۲ عدم قطعیت روش G.C.M

عدم قطعیت مورد نظر برای این روش برای محدوده نرمال ترکیب گاز طبیعی در جدول ۹-۱، در داخل ناحیه ۱ از شکل ۹-۱، قرار می گیرد. جداول اطلاعاتی GRI و GERG درستی این روش را برای ناحیه ۱ از شکل ۹-۱، تایید کرده اند. برای خارج از این محدوده این معادلات کاربرد نداشته و نباید مورد استفاده قرار بگیرند [۷۷].

۹-۴ محاسبه ضریب تراکم پذیری با استفاده از D.C.M

برای محاسبه ضریب تراکم پذیری گاز طبیعی و چگالی گاز طبیعی ابتدا به شرح و بسط روابط ریاضی و معادلات مربوط به روش D.C.M، پرداخته سپس روش حل معادلات توضیح داده می شود:

۹-۴-۱ روابط ریاضی و معادلات مربوط به روش D.C.M

در این روش مدلی برای محاسبه ضریب تراکم پذیری گاز طبیعی ارائه می شود. ضریب تراکم پذیری Z ، به صورت زیر تعریف می شود [۷۷]:

$$PV = nZRT \quad (۹-۱)$$

که در رابطه (۹-۱)، P فشار، V حجم، n تعداد مولها، T دما و R ثابت جهانی گازها می باشند. می توان این رابطه را به صورت زیر نیز نوشت:

$$P = Z\rho_m RT \quad (۹-۲)$$

که در آن ρ_m چگالی مولار بوده که به صورت زیر تعریف می شود:

$$\rho_m = \frac{n}{V} \quad (۹-۳)$$

رابطه بین چگالی جرمی و چگالی مولار به صورت زیر تعریف می شود:

$$\rho = \rho_m \cdot M_w \quad (۹-۴)$$

در رابطه (۹-۴)، ρ دانسیته جرمی و M_w وزن مولکولی بوده که به صورت زیر محاسبه می شود:

$$M_w = \sum_{i=1}^N x_i M_{w,i} \quad (۹-۵)$$

در رابطه (۹-۵)، x_i کسر مولی جزء i ام از مخلوط گاز، $M_{w,i}$ وزن مولکولی جزء i ام و N تعداد اجزای تشکیل دهنده گاز می باشند.

معادله مربوط به ضریب تراکم پذیری Z در معادله حالت AGA8 به صورت زیر ارائه شده است [۷۷]:

$$Z = 1 + B\rho_m - \rho_r \sum_{n=13}^{18} C_n^* + \sum_{n=13}^{58} C_n^* D_n^* \quad (۶-۹)$$

در رابطه (۶-۹)، Z ضریب تراکم پذیری، B ضریب دوم ویریال، ρ_r چگالی کاهیده، C_n^* و D_n^* ضرایب تابع دما و ترکیبات گاز طبیعی، می باشند.

ρ_r دانسیته کاهیده به صورت زیر با دانسیته مولار ارتباط پیدا می کند [۷۷]:

$$\rho_r = K^3 \rho_m \quad (۷-۹)$$

جائیکه K پارامتر اندازه مخلوط بوده و با استفاده از رابطه (۸-۹) تعریف شده و از مشخصه های مربوط به ساختار شیمیایی اجزای مخلوط می باشد [۷۷]:

$$K^5 = \left(\sum_{i=1}^N x_i K_i^{\frac{5}{2}} \right)^2 + 2 \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N x_i x_j (K_{ij}^5 - 1) (K_i K_j)^{\frac{5}{2}} \quad (۸-۹)$$

که در رابطه (۸-۹)، x_i کسر مولی جزء i در مخلوط، K_i پارامتر اندازه مربوط به جزء i و K_{ij} پارامتر اندازه برهمکنش اجزای i و j می باشند که مقادیر آنها وابسته به ترکیب گاز و اجزای مختلف گازهای تشکیل دهنده گاز طبیعی در مخلوط بوده و در مرجع [۷۷]، آورده شده اند.

در رابطه (۶-۹)، B ضریب دوم ویریال بوده که به صورت زیر تعریف می شود [۷۷]:

$$B = \sum_{n=1}^{18} a_n T^{-u_n} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N x_i x_j B_{ijk}^* E_{ij}^{u_n} (K_i K_j)^{\frac{3}{2}} \quad (۹-۹)$$

در رابطه (۴-۳۶) ضریب B_{ijk}^* توسط رابطه (۹-۱۰) تعریف می شود [۷۷]:

$$B_{ijk}^* = (G_{ij} + 1 - g_n)^{g_n} (Q_i Q_j + 1 - q_n)^{q_n} \times (F_i^{1/2} F_j^{1/2} + f_n)^{f_n} (S_i S_j + 1 - s_n)^{s_n} (W_i W_j + 1 - w_n)^{w_n} \quad (۱۰-۹)$$

پارامترهای دودوئی E_{ij} و G_{ij} به ترتیب پارامترهای انرژی برهمکنشی ضریب دوم ویریا و پارامتر دودوئی موقعیت یا جهت ذرات نامیده می شوند که توسط روابط (۹-۱۱) و (۹-۱۲) تعریف می شوند [۷۷]:

$$E_{ij} = E_{ij}^* (E_i E_j)^{1/2} \quad (۹-۱۱)$$

$$G_{ij} = \frac{G_{ij}^* (G_i + G_j)}{2} \quad (۹-۱۲)$$

در روابط (۹-۹) تا (۹-۱۲)، T دما، N تعداد اجزای ترکیب گاز طبیعی، x_i کسر مولی جزء i ، a_n ، f_n ، g_n ، q_n ، s_n ، u_n ، w_n پارامترهای ثابت معادله حالت یا ضرایب مشخصه دودوئی مربوط به اجزای تشکیل دهنده گاز طبیعی در مخلوط بوده که بسته به حالت‌های مختلف مقادیر آنها در مرجع [۷۷] آورده شده است. E_i ، F_i ، G_i ، K_i ، Q_i ، S_i و W_i پارامترهای مشخصه متناظر بوده که در حالت‌های مختلف برهمکنش ذرات نسبت به یکدیگر در مخلوط گاز، مقادیر آنها ثابت می باشند. E_{ij}^* و G_{ij}^* پارامترهای دودویی برخورد اجزای i و j هستند که برای یک موقعیت یا جهت خاص دو جزء i و j در مخلوط گاز می باشند. مقادیر این دو پارامتر برای حالت‌های مختلف ترکیبات مخلوط نسبت به یکدیگر در مرجع [۷۷] آورده شده است.

در رابطه (۹-۶) ضریب C_n^* تابعی از ترکیب اجزای تشکیل دهنده گاز طبیعی و دمای گاز بوده که توسط رابطه زیر تعریف می شود [۷۷]:

$$C_n^* = a_n (G + 1 - g_n)^{g_n} (Q^2 + 1 - q_n)^{q_n} (F + 1 - f_n)^{f_n} U^{u_n} T^{-u_n} \quad (۹-۱۳)$$

در رابطه (۹-۱۳)، G ، Q ، F و U به ترتیب، پارامترهای موقعیت، کوادراتیو، دما بالای مخلوط و انرژی بوده که به صورت زیر تعریف می شوند [۷۷]:

$$U^5 = \left(\sum_{i=1}^N x_i E_i^{\frac{5}{2}} \right)^2 + 2 \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N x_i x_j (U_{ij}^5 - 1) (E_i E_j)^{\frac{5}{2}} \quad (۱۴-۹)$$

$$G = \sum_{i=1}^N x_i G_i + 2 \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N x_i x_j (G_{ij}^* - 1) (G_i + G_j) \quad (۱۵-۹)$$

$$Q = \sum_{i=1}^N x_i Q_i \quad (۱۶-۹)$$

$$F = \sum_{i=1}^N x_i^2 F_i \quad (۱۷-۹)$$

در رابطه (۱۴-۹)، U_{ij} پارامتر برهمکنش دودویی برای انرژی مخلوط می باشد.

در رابطه (۹-۶)، D_n^* به صورت زیر تعریف می شود [۷۷]:

$$D_n^* = (b_n - c_n k_n \rho_r^{k_n}) \rho_r^{b_n} \exp(-c_n \rho_r^{k_n}) \quad (۱۸-۹)$$

ضرایب کلیه روابط گفته شده در مرجع [۷۷] آورده شده اند.

۹-۴-۲ روش حل معادلات مربوط به روش D.C.M

با توجه به رابطه (۹-۶) برای ضریب تراکم پذیری و با جایگذاری این رابطه در رابطه (۹-۲)، و با توجه به رابطه دانسیته مولار و دانسیته کاهیده یعنی رابطه (۹-۴)، داریم:

$$P = \left(1 + B \rho_m - K^3 \rho_m \sum_{n=13}^{18} C_n^* + \sum_{n=13}^{58} C_n^* D_n^* \right) \rho_m R T \quad (۱۹-۹)$$

با توجه به مشخص بودن دما و فشار مطلق گاز طبیعی و مشخص بودن درصد مولی اجزای تشکیل دهنده گاز طبیعی در مخلوط گاز، تنها مجهول در رابطه (۹-۱۹) دانسیته مولار یا ρ_m می باشد. رابطه (۹-۱۹) را می توان به صورت زیر نیز نوشت :

$$P - \left(1 + B\rho_m - K^3\rho_m \sum_{n=13}^{18} C_n^* + \sum_{n=13}^{58} C_n^* D_n^* \right) \rho_m RT = 0 \quad (20-9)$$

با معلوم بودن دما و فشار مطلق گاز طبیعی رابطه (۲۰-۹) یک معادله غیر خطی بر حسب دانسیته مولار بوده که با استفاده از روش نیوتن - رفسون^۱ می توان آن را با یک روش تکرار ساده حل کرده و مقدار دانسیته مولار ρ_m را بدست آورد. پس از محاسبه دانسیته مولار، مقدار ضریب تراکم پذیری گاز طبیعی به صورت زیر محاسبه می شود:

$$Z = \frac{P}{\rho_m RT} \quad (21-9)$$

۵-۹ محاسبه خواص ترمودینامیکی

با استفاده از روابط ترمودینامیکی و معادله حالت AGA8 می توان خواص ترمودینامیکی گاز طبیعی را محاسبه نمود. فرزانه گرد و رهبری [۹۴]، [۹۵] با مبنا قرار دادن معادله حالت AGA8 تمامی خواص ترمودینامیکی گاز طبیعی را محاسبه کرده اند. در این بخش به طور مختصر روش محاسبه خواص ترمودینامیکی با استفاده از معادله حالت AGA8 آورده شده است:

۱-۵-۹ محاسبه چگالی

برای محاسبه چگالی ابتدا با استفاده از رابطه (۲۰-۹) دانسیته مولار محاسبه خواهد شد و در نهایت با استفاده از رابطه زیر چگالی جرمی محاسبه می شود:

$$\rho = M_w \rho_m \quad (22-9)$$

¹-Newton-Raphson Method

۹-۵-۲ محاسبه ظرفیت گرمایی در حجم ثابت

ظرفیت گرمایی در حجم ثابت با استفاده از رابطه (۹-۲۳) تعریف می شود:

$$C_{m,v} = \left(\frac{\partial u_m}{\partial T} \right)_{v_m} \quad (۹-۲۳)$$

در رابطه (۹-۲۳)، $C_{m,v}$ ظرفیت گرمایی مولار در حجم ثابت، u_m انرژی داخلی مولار^۱، v_m حجم مخصوص مولار و T دما می باشند. رابطه (۹-۲۳) را می توان به صورت زیر بازنویسی کرد:

$$C_{m,v} = \left(\frac{\partial u_m}{\partial s_m} \right)_{v_m} \left(\frac{\partial s_m}{\partial T} \right)_{v_m} \quad (۹-۲۴)$$

جائیکه در رابطه (۹-۲۴)، s_m آنترופی مولار^۲ می باشد.

با استفاده از روابط ترمودینامیکی می دانیم که $T = \left(\frac{\partial u_m}{\partial s_m} \right)_{v_m}$ ، بنابراین رابطه (۹-۲۴) به صورت زیر خلاصه می شود:

$$C_{m,v} = T \left(\frac{\partial s_m}{\partial T} \right)_{v_m} \quad (۹-۲۵)$$

اگر از رابطه (۹-۲۵) بر حسب حجم مخصوص مولار v_m و با فرض ثابت بودن دما، مشتق بگیریم خواهیم داشت:

$$\left(\frac{\partial C_{m,v}}{\partial v_m} \right)_T = \frac{\partial}{\partial v_m} \left[T \left(\frac{\partial s_m}{\partial T} \right)_{v_m} \right] = T \frac{\partial^2 s_m}{\partial v_m \partial T} \quad (۹-۲۶)$$

با استفاده از یکی از روابط ماکسول و انتگرال گیری از رابطه (۹-۲۵)، رابطه (۹-۲۶) برای محاسبه ظرفیت گرمایی مولار در حجم ثابت بدست می آید :

^۱ - Molar Internal Energy

^۲ - Molar Entropy

$$C_{m,v} = C_{m,vI} + T \int_{v_{mI} \rightarrow \infty (T=const)}^{v_m} \left(\frac{\partial^2 P}{\partial T^2} \right)_{v_m} dv_m \quad (27-9)$$

جائیکه در رابطه (۲۶-۹)، $C_{m,vI}$ ظرفیت گرمایی مولار ایده آل در حجم ثابت، v_{mI} حجم مخصوص مولار در حالت گاز ایده آل و v_m حجم مخصوص مولار در حالت گاز واقعی، می باشند. گازهای حقیقی رفتاری شبیه رفتار گازهای ایده آل در فشارهای نزدیک صفر یا هنگامی که $v_{mI} \rightarrow \infty$ می کند، خواهند داشت. با جایگذاری $P = \rho_m ZRT$ و $v_m = 1/\rho_m$ در رابطه (۲۶-۹)، خواهیم داشت:

$$C_{m,v} = C_{m,vI} - RT \int_{\rho_{mI} \rightarrow 0 (T=const)}^{\rho_m} \frac{1}{\rho_m} \left[T \left(\frac{\partial^2 Z}{\partial T^2} \right)_{\rho_m} + 2 \left(\frac{\partial Z}{\partial T} \right)_{\rho_m} \right] d\rho_m \quad (28-9)$$

در رابطه (۲۸-۹)، Z ضریب تراکم پذیری، ρ_m دانسیته مولار در حالت گاز واقعی، ρ_{mI} دانسیته مولار در حالت گاز ایده آل، R ثابت جهانی گازها و T دما می باشند. برای گازهای ایده آل رابطه زیر بین ظرفیت گرمایی مولار در فشار ثابت و ظرفیت گرمایی مولار در حجم ثابت وجود دارد:

$$C_{m,vI} = C_{m,pI} - R \quad (29-9)$$

جائیکه در رابطه (۲۹-۹)، $C_{m,pI}$ ظرفیت گرمایی مولار در فشار ثابت برای گاز ایده آل می باشد. ظرفیت گرمایی مولار در فشار ثابت برای گاز ایده آل با استفاده از رابطه (۳۰-۹) محاسبه می شود:

$$C_{m,pI} = \sum_{j=1}^N x_j C_{m,pi}^j \quad (30-9)$$

در معادله (۳۰-۹)، x_j کسر مولی جزء j در مخلوط گاز و $C_{m,pi}^j$ ظرفیت حرارتی مولار فشار ثابت در حالت ایده آل برای همان جزء می باشند. ظرفیت حرارتی مولار فشار ثابت برای اجزای مخلوط گاز ایده آل به صورت زیر بیان شده است [۹۵]:

$$C_{m,pi}^j = a_j + b_j \left(\frac{\frac{c_j}{T}}{\sinh\left(\frac{c_j}{T}\right)} \right)^2 + d_j \left(\frac{\frac{e_j}{T}}{\cosh\left(\frac{e_j}{T}\right)} \right)^2 \quad (31-9)$$

در رابطه (31-9)، $C_{m,pi}^j$ ظرفیت حرارتی مولار فشار ثابت در حالت ایده آل برای جزء j در مخلوط گاز، ضرایب a_j ، b_j ، c_j ، d_j و e_j ثابت های مربوط به همان جزء و T دما می باشند. با توجه به مشخص بودن معادله حالت AGA8 برای محاسبه ضریب تراکم پذیری و محاسبات مشتقات، همچنین با مشخص بودن دما، فشار و کسر مولی اجزای تشکیل دهنده گاز طبیعی، می توان ظرفیت گرمایی در حجم ثابت را محاسبه نمود.

۳-۵-۹ محاسبه ظرفیت گرمایی در فشار ثابت

ظرفیت گرمایی مولار در فشار ثابت با استفاده از رابطه (32-9) تعریف می شود:

$$C_{m,p} = \left(\frac{\partial h_m}{\partial T} \right)_P \quad (32-9)$$

در رابطه (32-9)، $C_{m,p}$ ظرفیت گرمایی مولار در فشار ثابت، h_m آنتالپی مولار^۱، فشار P و دما T می باشند. رابطه (32-9) را می توان به صورت زیر بازنویسی کرد:

$$C_{m,p} = \left(\frac{\partial h_m}{\partial s_m} \right)_P \left(\frac{\partial s_m}{\partial T} \right)_P \quad (33-9)$$

جائیکه در رابطه (33-9)، s_m آنتروپی مولار می باشد. با استفاده از روابط ترمودینامیکی، می دانیم که $T = \left(\frac{\partial h_m}{\partial s_m} \right)_P$ ، بنابراین رابطه (33-9) به صورت زیر خلاصه می شود:

$$C_{m,p} = T \left(\frac{\partial s_m}{\partial T} \right)_P \quad (34-9)$$

با فرض اینکه s_m آنتروپی مولار تابعی دیفرانسیل کامل از دما و حجم مخصوص مولار باشد، بنابراین:

¹ - Molar Enthalpy

$$ds_m = \left(\frac{\partial s_m}{\partial T} \right)_{v_m} dT + \left(\frac{\partial s_m}{\partial v_m} \right)_T dv_m \quad (۳۵-۹)$$

با توجه به روابط ماکسول [۷۸] و رابطه (۲۵-۹)، رابطه (۳۵-۹) به صورت زیر تبدیل می شود :

$$ds_m = \frac{C_{m,v}}{T} dT + \left(\frac{\partial P}{\partial T} \right)_{v_m} dv_m \quad (۳۶-۹)$$

همچنین با فرض اینکه s_m آنتروپی مولار تابعی دیفرانسیل کامل از دما و فشار باشد، خواهیم داشت :

$$ds_m = \left(\frac{\partial s_m}{\partial T} \right)_P dT + \left(\frac{\partial s_m}{\partial P} \right)_T dP \quad (۳۷-۹)$$

با استفاده از روابط ماکسول و رابطه (۳۴-۹)، رابطه (۳۷-۹) به صورت زیر تبدیل می شود :

$$ds_m = \frac{C_{m,p}}{T} dT - \left(\frac{\partial v_m}{\partial T} \right)_P dP \quad (۳۸-۹)$$

با توجه به روابط (۳۶-۹) و (۳۸-۹) رابطه زیر برای محاسبه ظرفیت گرمایی مولار در فشار ثابت بدست می آید:

$$C_{m,p} = C_{m,v} + T \left(\frac{\partial v_m}{\partial T} \right)_P \left(\frac{\partial P}{\partial T} \right)_{v_m} \quad (۳۹-۹)$$

برای محاسبه ظرفیت گرمایی در فشار ثابت، نیاز به محاسبه ظرفیت گرمایی در حجم ثابت می باشد. با مشخص بودن دما ، فشار و کسر مولی اجزای گاز طبیعی در مخلوط و با جایگذاری مشتقات در رابطه (۳۹-۹)، ظرفیت گرمایی مولار در فشار ثابت محاسبه می شود.

۴-۵-۹ محاسبه آنتالپی

با فرض اینکه آنتالپی تابعی از دما و حجم مخصوص مولار می باشد، آنتالپی مولار باقیمانده از رابطه زیر محاسبه می گردد:

$$\int_{-\infty}^{\infty} \left[\left(- \right) P \right] d \int_{-\infty}^{\infty} \left(- \right) \quad (40-9)$$

جائیکه $h_{m,i}$ و به ترتیب آنتالپی مولار و حجم مخصوص مولار، در حالت گاز ایده آل می باشند. با جایگذاری مشتقات در رابطه (40-9) و با تغییر متغیر از v_m به ρ_m داریم:

$$\int \left(- \right) - \int \quad (41-9)$$

در رابطه (41-9)، آنتالپی مولار در حالت گاز ایده آل بوده که به صورت زیر محاسبه خواهد شد:

$$\sum x \quad (42-9)$$

در رابطه (42-9)، آنتالپی مولار در حالت گاز ایده آل برای جزء j در مخلوط گاز و x_j کسر مولی مربوط به همان جزء می باشند. $h_{m,i}^j$ با استفاده از رابطه زیر محاسبه می گردد:

$$\left(\frac{c_j}{T} \right) - d_j e_j \tanh \left(\frac{e_j}{T} \right) \quad (43-9)$$

جائیکه $h_{m,i0}^j$ آنتالپی مولار گاز ایده آل جزء j در مخلوط گاز در دمای مرجع می باشد. ضرایب a_j ، e_j و برای اجزای تشکیل دهنده گاز طبیعی در مرجع [95] آورده شده اند.

با محاسبات مشتقات موجود در رابطه (41-9)، با مشخص بودن دما، فشار و درصد مولی اجزای گاز طبیعی با استفاده از رابطه (41-9)، می توان آنتالپی گاز طبیعی را محاسبه نمود.

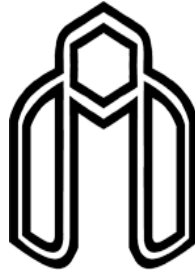
Abstract

Natural gas passes through various pipeline networks to reach consumers. Natural gas is transmitted through the main lines that formed the transmission pipeline networks (TPNs) to the city's gate, then distributed through the distribution pipeline networks (DPNs) to consumers which includes household, industrial and specific consumer. The DPN consists of a variety of components including natural gas demands, nodes, pipelines and town border stations (TBS). DPNs is designed in a steady state, but the conditions of these networks in the transient conditions are very important for natural gas companies and these conditions should be considered. In the transient conditions and at certain times, a situation occurs for DPNs where the natural gas consumption will increase dramatically at the pipeline network's nodes. This mode is known as critical condition in DPNs. The severe decrease in ambient temperature and rupture of pipeline network are the most important factors in the increase of natural gas consumptions and as a result, these factors are the most important factors in creating critical conditions in these types of networks .

The purpose of this research is to analyze natural gas DPNs in critical conditions. For this purpose, the DPNs are initially examined in a steady state and the temperature, pressure and natural gas flow rate in all nodes and network pipelines are calculated. Then, a method for modeling the DPNs in the transient condition is presented and then using the two important networks, the proposed method is validated. The validation results show that the proposed method has acceptable accuracy. In addition, two natural gas DPNs have been studied in transient conditions. For the boundary conditions of the networks, the case study data (Semnan city) has been selected and natural gas consumption has been predicted using artificial neural network models. Finally, the response of DPNs to critical conditions has been calculated and analyzed. The results indicate that in the critical conditions the natural gas pressure at the network nodes decreases. As a result, the natural gas velocity in the pipeline network increases and goes higher than the standard. The increasing natural gas velocity will cause erosion in pipelines and reduce safety in the natural gas supply process to consumers. In addition, the sudden pressure drop in some cases disrupts the process in

natural gas regulators and causes gas breakdown. Using the results of this research, solutions for distribution pipeline networks in critical situations are provided for gas companies to use these solutions for gas supply.

Keywords: Natural gas, pipeline networks, transmission and distribution , natural gas consumption, neural network, critical condition



**Shahrood University
of Technology**

**Faculty of Mechanical and Mechatronics Engineering
Ph.D. Thesis in Energy Conversion Engineering**

Analysis Of Natural Gas Distribution Pipeline Networks In Critical Conditions

By: Hamid Reza Rahbari

Supervisor

Mahmood Farzaneh Gord

August 2018