



دانشگاه شهید چمران اهواز
دفتر پژوهش شرکت گاز استان خوزستان

گزارش سالیانه فعالیت‌های انجام‌شده در سال ۱۳۸۹

KHGCRO YR 1389

۳۱ فروردین ۱۳۹۰

گزارش سالانه فعالیت‌های ۱۳۸۹	عنوان
KHGCRO YR 1389	کد گزارش
۱۳۹۰/۱/۳۱	تاریخ
<p>دکتر مرتضی بهبهانی‌نژاد، عضو هیئت علمی گروه مهندسی مکانیک دانشگاه شهید چمران مهندس مازیار چنگیزیان، دانشجوی دکترای مهندسی مکانیک دانشگاه شهید چمران مهندس ابوالفضل غریبی‌خراجی، دانشجوی کارشناسی ارشد فرآوری و انتقال گاز دانشگاه صنعت نفت اهواز</p> <p>مهندس رضوان عالمیان، کارشناس ارشد مهندسی مکانیک، دانشگاه شهید چمران مهندس علی حسینی‌خیرآبادعلیا، کارشناس ارشد زمین‌شناسی نفت، دانشگاه شهید چمران مهندس حجت سعیدیان، دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک، دانشگاه شهید چمران</p> <p>خانم فروزنده عمید، کارشناس شیمی کاربردی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد کرج</p>	تدوین کنندگان
<p>گزارش حاضر دربرگیرنده‌ی فعالیت‌های دفتر پژوهش گاز در سال ۱۳۸۹ می‌باشد. پس از ارائه مقدمه، با توجه به اینکه بخش اعظمی از فعالیت‌های دفتر در سال ۱۳۸۹ در ارتباط با تدوین نرم‌افزار تعیین هدر رفت گاز می‌باشد، گزارش مبسوطی از این فعالیت‌ها در فصل دوم ارائه شده‌است. فصل سوم دربرگیرنده‌ی مطالعاتی در رابطه با کاربردهای لوله‌های کامپوزیتی و مزایای آنها می‌باشد. بررسی مشکلات مطرح شده مرتبط با سیستم فیلتراسیون ایستگاه تقلیل فشار نیروگاه آبادان و ارائه‌ی سناریوهای مختلف جهت رفع مشکل در فصل چهار این گزارش ملاحظه می‌شود. در ارتباط با مشکلات موجود در سیستم‌های حفاظت کاتدیک منطقه‌ی مسجدسلیمان، این منطقه از لحاظ زمین‌شناسی مورد بررسی قرار گرفته و نتایج آن در فصل پنج این گزارش ارائه می‌شود. با توجه به اهمیت روزافزون انرژی‌های فناناپذیر همچون انرژی خورشیدی و نیز پتانسیل بالای این انرژی در خوزستان، بخشی از فعالیت‌های سال جاری دفتر مختص به معرفی این انرژی و امکان‌سنجی استفاده از آن در بخش‌های مختلف شرکت گاز بوده که گزارش آن در فصل ششم ارائه می‌شود. در فصل آخر این گزارش نیز سایر فعالیت‌هایی که بصورت موردی ارجاع شده و تعریف شده‌اند ارائه شده‌است.</p>	چکیده

فهرست مطالب

۱	مقدمه	۱
۳	۲ تدوین نرم افزار محاسبه ی هدر رفت گاز	۳
۴	۱.۲ تست های تجربی انجام شده	۴
۴	۱.۱.۲ تست تجربی شماره یک	۴
۶	۲.۱.۲ تست تجربی شماره دو	۶
۱۱	۳.۱.۲ تست تجربی شماره سه	۱۱
۱۵	۴.۱.۲ تست تجربی شماره چهار	۱۵
۱۷	۵.۱.۲ تست تجربی شماره پنج	۱۷
۴۰	۶.۱.۲ تست تجربی شماره شش	۴۰
۴۸	۷.۱.۲ مدل سازی مسئله به کمک نتایج تست های تجربی	۴۸
۵۳	۲.۲ بررسی تئوریک صحت فرضیات و معادلات حاکم	۵۳
۵۴	۱.۲.۲ تصحیح معادلات حاکم	۵۴
۵۷	۲.۲.۲ روش حل	۵۷
۶۲	۳.۲.۲ ضریب تراکم پذیری	۶۲
۷۰	۴.۲.۲ تغییرات آنتالپی گاز در لوله بر حسب فشار ورودی گاز	۷۰
۷۲	۵.۲.۲ محاسبه ی خطای ظاهر شده در صورت فرض گاز کامل	۷۲
۷۳	۶.۲.۲ نتیجه گیری کلی از بررسی تغییرات آنتالپی	۷۳
۷۷	۷.۲.۲ اعمال شرایط گاز واقعی در موازنه انرژی	۷۷
۸۴	۸.۲.۲ تصحیح اثر ضریب تراکم پذیری در معادلات	۸۴
۸۶	۹.۲.۲ مقایسه نتایج کلی با حالت گاز کامل	۸۶
۸۹	۳.۲ بازنویسی نرم افزار در محیط برنامه نویسی C#	۸۹
۹۰	۱.۳.۲ تصحیح برخی از بخش های نرم افزار	۹۰
۹۱	۲.۳.۲ تصحیح کمیت های دما، فشار و چگالی در برنامه	۹۱
۹۳	۳.۳.۲ تصحیح خطاهای برنامه ناشی از طول ورودی	۹۳
۹۴	۴.۲ منابع	۹۴
۹۵	۳ مطالعه و بررسی کاربرد لوله های کامپوزیتی	۹۵

۹۵.....	۱.۳ ویژگی‌ها و خواص لوله‌های کامپوزیتی.....	
۹۶.....	تعریف لوله فایبرگلاس.....	۱.۱.۳
۹۶.....	خواص مکانیکی و حرارتی.....	۲.۱.۳
۹۷.....	ویژگی‌های خط انتقال.....	۳.۱.۳
۹۸.....	افت فشار و زبری.....	۴.۱.۳
۱۰۱.....	خوردگی و نشت سیال.....	۵.۱.۳
۱۰۲.....	هزینه نصب.....	۶.۱.۳
۱۰۳.....	میزان کاربرد لوله‌های کامپوزیتی در خطوط انتقال آلبرتا.....	۲.۳
۱۰۳.....	معرفی استان آلبرتا.....	۱.۲.۳
۱۰۴.....	مرکز بهینه‌سازی انرژی در آلبرتا.....	۲.۲.۳
۱۰۴.....	خطوط انتقال در آلبرتا.....	۳.۲.۳
۱۰۵.....	مواد جایگزین فولاد در ساخت لوله.....	۴.۲.۳
۱۰۷.....	کاربرد لوله‌ها با جنس‌های مختلف.....	۵.۲.۳
۱۱۲.....	لوله‌های فلزی با لایه داخلی.....	۶.۲.۳
۱۱۳.....	جمع‌بندی.....	۳.۳
۱۱۵.....	مراجع.....	۴.۳
۱۱۶.....	۴ بررسی سیستم فیلتراسیون گاز طبیعی.....	
۱۱۶.....	۱.۴ مطالعه و بررسی مشکلات گزارش شده در رابطه با فیلترهای گاز ایستگاه‌های تقلیل فشار.....	
۱۱۷.....	بررسی وضعیت موجود.....	۱.۱.۴
۱۲۰.....	سناریوهای موجود در رابطه با مشکل فیلترها.....	۲.۱.۴
۱۲۱.....	اقدامات انجام گرفته در راستای مشکل مطرح شده در نیروگاه آبادان.....	۳.۱.۴
۱۲۳.....	۲.۴ بررسی سیستم فیلتراسیون گاز طبیعی درون خطوط لوله.....	
۱۲۴.....	فیلترهای خط لوله.....	۱.۲.۴
۱۲۷.....	المنت فیلتر.....	۲.۲.۴
۱۲۹.....	عملکرد فیلتر خط لوله.....	۳.۲.۴
۱۳۱.....	فیلتر - جداکننده.....	۴.۲.۴
۱۳۱.....	جداکننده‌ی ساتریفیوژ.....	۵.۲.۴
۱۳۳.....	جداکننده‌ی ساتریفیوژ با چند سیکلون.....	۶.۲.۴
۱۳۴.....	بهبود فیلتراسیون در ایستگاه تقلیل فشار شهرستان شیراز.....	۷.۲.۴

۱۳۶	انتخاب سیستم تصفیه گاز طبیعی	۳.۴
۱۳۶	روش‌های مقابله با ذرات ناخالصی جامد در گاز	۱.۳.۴
۱۳۹	نمونه‌ای از تجهیزات اندازه‌گیری تولیدی شرکت Parker	۲.۳.۴
۱۴۱	فهرست منابع	۴.۴
۱۴۲	بررسی مشکل مرتبط با سیستم‌های حفاظت کاتدیک مسجد سلیمان	۵
۱۴۳	موقعیت جغرافیایی و راه‌های دسترسی منطقه	۱.۵
۱۴۴	زمین‌شناسی عمومی منطقه	۲.۵
۱۴۵	جایگاه زمین‌ساختی منطقه	۱.۲.۵
۱۴۵	تقسیمات زاگرس	۲.۲.۵
۱۴۵	منطقه چین خورده زاگرس	۳.۲.۵
۱۴۶	چینه‌شناسی منطقه	۳.۵
۱۴۶	سازند گچساران	۱.۳.۵
۱۴۷	سازند میشان	۲.۳.۵
۱۴۷	سازند آجاجری	۳.۳.۵
۱۴۸	سازند بختیاری	۴.۳.۵
۱۴۸	نهشته‌های کواترنری	۵.۳.۵
۱۴۸	خصوصیات لیتولوژی غالب سازندها	۴.۵
۱۵۰	ژئومورفولوژی منطقه مسجد سلیمان	۵.۵
۱۵۰	منابع آب سطحی و زیر زمینی	۶.۵
۱۵۰	منابع آب سطحی	۱.۶.۵
۱۵۰	منابع آب زیرزمینی	۲.۶.۵
۱۵۱	ساختارهای موجود در منطقه	۷.۵
۱۵۱	وضعیت چین خوردگی‌ها	۱.۷.۵
۱۵۱	روندهای عمده ساختاری	۲.۷.۵
۱۵۲	بررسی گسل‌های اصلی منطقه	۳.۷.۵
۱۵۳	شرایط خاک منطقه از لحاظ تولید خوردگی	۸.۵
۱۵۴	عوامل موثر بر مقاومت الکتریکی خاک	۹.۵
۱۵۴	تغییرات مقاومت الکتریکی نسبت به میزان آب (درصد رطوبت) و تخلخل	۱.۹.۵
۱۵۵	تغییرات مقاومت الکتریکی نسبت به غلظت یونها	۲.۹.۵

۱۵۶	تغییرات مقاومت الکتریکی نسبت به دما	۳.۹.۵
۱۵۹	بحث و بررسی	۱۰.۵
۱۵۹	سازند گچساران	۱.۱۰.۵
۱۵۹	سازند میشان	۲.۱۰.۵
۱۶۰	سازند آجاجری	۳.۱۰.۵
۱۶۰	سازند بختیاری	۴.۱۰.۵
۱۶۰	نتیجه‌گیری	۱۱.۵
۱۶۱	منابع	۱۲.۵
۱۶۳	۶ مطالعه و بررسی آبگرم‌کن‌های خورشیدی	
۱۶۳	مقدمه‌ای بر گرمایش خورشیدی	۱.۶
۱۶۴	سیستم‌های چرخش طبیعی (ترموسیفون)	۲.۶
۱۶۶	آبگرم‌کن‌های جابجایی اجباری	۳.۶
۱۶۶	اجزاء آبگرم‌کن خورشیدی	۴.۶
۱۶۷	گردآورنده‌ها	۱.۴.۶
۱۷۱	مخزن ذخیره	۲.۴.۶
۱۷۲	مبدل گرمایی	۳.۴.۶
۱۷۲	عایق‌بندی حرارتی	۴.۴.۶
۱۷۳	معرفی و مقایسه نرم‌افزارهای شبیه‌ساز انرژی خورشیدی	۵.۶
۱۷۴	معرفی نرم‌افزار پلی‌سان	۱.۵.۶
۱۷۵	مراحل و روند طراحی یک سیستم ایده‌آل به کمک نرم‌افزار پلی‌سان	۲.۵.۶
۱۸۰	مراجع	۶.۶
۱۸۱	۷ سایر فعالیت‌ها	
۱۸۱	هفته پژوهش	۱.۷
۱۸۲	برشور معرفی دفتر و فیلم آموزشی	۱.۱.۷
۱۸۳	بنرهای تهیه شده	۲.۱.۷
۱۸۷	گزارش تصویری از هفته پژوهش	۳.۱.۷
۱۹۲	روش‌های نواریپیچی خطوط لوله	۲.۷
۱۹۲	فواید نواریپیچی لوله‌ها	۱.۲.۷

۱۹۳	استاندارد نواریچی	۲.۲.۷
۱۹۳	انواع روش‌های نواریچی	۳.۲.۷
۱۹۷	نواریچی خطوط لوله گاز با قطر کم	۴.۲.۷
۱۹۸	منابع	۵.۲.۷
۱۹۸	معرفی سیستم بوزنی با روش ابداعی	۳.۷
۱۹۸	آئین‌نامه‌های موجود در زمینه بودهی به گاز	۱.۳.۷
۲۰۰	سیستم‌های بوزنی متداول	۲.۳.۷
۲۰۲	اصلاح سیستم بوزنی کنارگذر	۳.۳.۷
۲۰۷	مراجع	۴.۳.۷
۲۰۸	کاهش مصرف انرژی به کمک عایقکاری سقف	۴.۷
۲۰۸	اطلاعات ساختمان	۱.۴.۷
۲۱۰	تحلیل وضعیت موجود	۲.۴.۷
۲۱۰	میزان بارهای حرارتی و برودتی با استفاده از عایق	۳.۴.۷
۲۱۱	مقالات ارسالی مرتبط با گاز	۵.۷
۲۱۳	الف. اثبات روابط استفاده شده	
۲۱۳	الف. ۱. اثبات $H_2 - H_1 = CPT_2 - T_1$ با فرض ثابت بودن ضریب تراکم‌پذیری	
۲۱۴	الف. ۲. اثبات $CP = KZRK - 1$ با فرض ثابت بودن ضریب تراکم‌پذیری	
۲۱۵	الف. ۳. منابع	
۲۱۶	ب فرم تکمیل شده‌ی ثبت اختراع در شرکت ملی گاز	
۲۲۰	ج بارهای حرارتی و برودتی فضاها	
۲۳۵	د مقالات ارسالی دفتر گاز	

فهرست شکل‌ها

- شکل ۲-۱: انشعاب ۲ اینچی از خط اصلی ایستگاه ۴
- شکل ۲-۲: دبی سنج نصب شده بر انشعاب ۲ اینچی جهت قرائت دبی هدر رفت ۵
- شکل ۲-۳: تخلیه انشعاب به اتمسفر ۵
- شکل ۲-۴: مدل‌های مختلف لوله پیتوت ۶
- شکل ۲-۵: دبی سنج قدیمی (سمت راست) و جدید (سمت چپ) نصب شده در محل تست ۷
- شکل ۲-۶: انشعاب ۲ اینچی از خط اصلی ایستگاه ۷
- شکل ۲-۷: شماتیکی از دبی سنج طراحی شده ۸
- شکل ۲-۸: دبی سنج طراحی شده بر مبنای لوله پیتوت ۸
- شکل ۲-۹: لوله پیتوت نصب شده ۹
- شکل ۲-۱۰: اتصال لوله‌ی ۲ اینچ بعد از دبی سنج طراحی شده به لوله‌ی ۶ اینچ حامل دبی سنج توربینی ۱۰
- شکل ۲-۱۱: دبی سنج طراحی شده پس از اعمال تغییرات ۱۰
- شکل ۲-۱۲: تجهیزات نصب شده جهت کالیبراسیون دبی سنج جدید ۱۱
- شکل ۲-۱۳: تنظیم فشار خط اصلی ۱۱
- شکل ۲-۱۴: فشارسنج نصب شده بر خط اصلی ۱۲
- شکل ۲-۱۵: فشارسنج اندازه‌گیری فشار سکون جریان در لوله ۱۲
- شکل ۲-۱۶: قرائت دبی اندازه‌گیری شده توسط کارشناس مربوطه ۱۲
- شکل ۲-۱۷: تغییرات خطای دبی سنج جدید با تغییر فشار جریان ۱۴
- شکل ۲-۱۸: تجهیزات نصب شده جهت نرم‌افزار تخمین میزان هدر رفت گاز ۱۵
- شکل ۲-۱۹: تجهیزات نصب شده جهت نرم‌افزار تخمین میزان هدر رفت گاز ۱۶
- شکل ۲-۲۰: دبی سنج طراحی شده بر مبنای لوله پیتوت ۱۷
- شکل ۲-۲۱: شماتیکی از لوله پیتوت استفاده شده در دبی سنج ۱۸
- شکل ۲-۲۲: لوله پیتوت استفاده شده در دبی سنج ۱۸
- شکل ۲-۲۳: سوراخ‌های تعبیه شده در لوله پیتوت ۱۹
- شکل ۲-۲۴: لوله محل نصب لوله پیتوت ۱۹
- شکل ۲-۲۵: نقشه قطعه‌ی طراحی شده برای نصب بر روی لوله ۱۹
- شکل ۲-۲۶: قطعه‌ی طراحی شده برای نصب بر روی لوله ۲۰
- شکل ۲-۲۷: بدنه‌ی اصلی دبی سنج ۲۰
- شکل ۲-۲۸: نحوه‌ی قرارگیری پیتوت درون لوله ۲۱

- شکل ۲-۲۹: شماتیکی از بورد مانومتر..... ۲۲
- شکل ۲-۳۰: استفاده از آب‌بند لاستیکی برای سیل کردن پیتوت..... ۲۲
- شکل ۲-۳۱: مسدود کردن ورودی دبی‌سنج..... ۲۳
- شکل ۲-۳۲: نحوه‌ی بسته شدن لوله پیتوت..... ۲۳
- شکل ۲-۳۳: نحوه‌ی تزریق هوا و مسدود کردن خروجی مانومتر..... ۲۳
- شکل ۲-۳۴: نمای کلی از تست نشتی دبی‌سنج..... ۲۴
- شکل ۲-۳۵: طرح کلی بورد و پایه‌ی دوران..... ۲۵
- شکل ۲-۳۶: نقشه‌ی ایزومتریک طرح..... ۲۵
- شکل ۲-۳۷: بورد جهت نصب مانومتر..... ۲۶
- شکل ۲-۳۸: نحوه‌ی اتصال مانومتر به بورد..... ۲۷
- شکل ۲-۳۹: نحوه‌ی اتصال شیرها به بورد..... ۲۸
- شکل ۲-۴۰: تصویری از شیرهای استفاده شده در دبی‌سنج..... ۲۹
- شکل ۲-۴۱: نحوه‌ی اتصال بورد مانومتر به پایه..... ۳۰
- شکل ۲-۴۲: بورد مانومتر در حالت زاویه‌دار..... ۳۰
- شکل ۲-۴۳: نحوه‌ی اتصال مانومتر به شیرها..... ۳۱
- شکل ۲-۴۴: نحوه‌ی بسته شدن لوله پیتو-استاتیک به بورد مانومتر..... ۳۱
- شکل ۲-۴۵: کل تجهیزات دبی‌سنج ساخته شده..... ۳۲
- شکل ۲-۴۶: تزریق هوا به دبی‌سنج..... ۳۳
- شکل ۲-۴۷: نمای کلی از تست نشتی دبی‌سنج..... ۳۳
- شکل ۲-۴۸: نشتی در اتصالات شیرها..... ۳۴
- شکل ۲-۴۹: نشتی در مانومتر..... ۳۴
- شکل ۲-۵۰: مراحل مختلف نصب تجهیزات بر روی خط اصلی..... ۳۵
- شکل ۲-۵۱: مقادیر اندازه‌گیری شده دبی توسط کنتور توربینی و دبی‌سنج طراحی شده..... ۳۶
- شکل ۲-۵۲: نصب دبی‌سنج و لوله‌ی رابط بر روی خط اصلی..... ۳۷
- شکل ۲-۵۳: دبی اندازه‌گیری شده توسط دبی‌سنج و محاسبه شده توسط نرم‌افزار..... ۳۹
- شکل ۲-۵۴: نصب دبی‌سنج و لوله‌ی رابط بر روی خط اصلی..... ۳۹
- شکل ۲-۵۵: محل نصب دبی‌سنج در تست قبل..... ۴۰
- شکل ۲-۵۶: محل نصب دبی‌سنج در تست اخیر..... ۴۱
- شکل ۲-۵۷: اندازه‌گیری اختلاف فشار، فشار سکون و استاتیک در ورودی لوله..... ۴۲

- شکل ۲-۵۸: اندازه‌گیری دمای جریان گاز خروجی ۴۲
- شکل ۲-۵۹: ترمومتر استفاده شده برای اندازه‌گیری دمای جریان گاز خروجی ۴۳
- شکل ۲-۶۰: محل نصب سنسور دما در ترمومتر ۴۳
- شکل ۲-۶۱: مقایسه دبی‌های به‌دست آمده از تست و نرم‌افزار بر حسب فشار خط اصلی ۴۵
- شکل ۲-۶۲: مقایسه دبی‌های به‌دست آمده از تست و نرم‌افزار بر حسب فشار سکون اندازه‌گیری شده توسط دبی‌سنج ۴۵
- شکل ۲-۶۳: مقایسه دبی‌های به‌دست آمده از تست و نرم‌افزار بر حسب فشار خط با روش طول معادل ۴۶
- شکل ۲-۶۴: فاصله‌ی L جهت تعیین ضریب اصطکاک ۴۶
- شکل ۲-۶۵: مقایسه دبی‌های به‌دست آمده از تست و نرم‌افزار بر حسب فشار خط پس از تصحیح ضریب اصطکاک ۴۷
- شکل ۲-۶۶: مقایسه دبی‌های به‌دست آمده از تست و چهار روش ذکر شده بر حسب فشار دبی‌سنج ۴۸
- شکل ۲-۶۷: شمای کلی از مدل مسئله ۴۹
- شکل ۲-۶۸: انتخاب متان بعنوان سیال ۴۹
- شکل ۲-۶۹: اعمال تراکم‌پذیر بودن سیال ۴۹
- شکل ۲-۷۰: قسمتی از توزیع شبکه‌ی در محیط محاسباتی ۵۰
- شکل ۲-۷۱: فشار در شرایط مرزی ورودی ۵۰
- شکل ۲-۷۲: فشار در شرایط مرزی خروجی ۵۰
- شکل ۲-۷۳: توزیع فشار استاتیک در طول لوله ۵۱
- شکل ۲-۷۴: توزیع دانسیته‌ی گاز در طول لوله ۵۱
- شکل ۲-۷۵: توزیع دما در طول لوله ۵۲
- شکل ۲-۷۶: نمودار عدد ماخ بر حسب طول لوله ۵۲
- شکل ۲-۷۷: نمودار عدد رینولدز بر حسب طول لوله ۵۳
- شکل ۲-۷۸: توزیع ضریب اصطکاک در طول لوله ۵۳
- شکل ۲-۷۹: میزان درصد مولی متان موجود در گاز طبیعی مناطق مختلف کشور [۳] ۶۲
- شکل ۲-۸۰: ضریب تراکم‌پذیری در مناطق مختلف کشور [۴] ۶۳
- شکل ۲-۸۱: ضریب تراکم‌پذیری بر حسب دما و فشار نقصانی ۶۴
- شکل ۲-۸۲: ضریب تراکم‌پذیری با استفاده از پینگ‌رایبسون ۶۹
- شکل ۲-۸۳: ضریب تراکم‌پذیری با استفاده از سواردریش کوانگ ۶۹

- شکل ۲-۸۴: مقایسه ضریب تراکم‌پذیری محاسبه شده از معادلات پینگ‌رابینسون و سواردریش کوانگ ۷۰
- شکل ۲-۸۵: تغییرات آنتالپی بر حسب دما و فشار ۷۱
- شکل ۲-۸۶: تغییرات آنتالپی در طول لوله بر حسب فشار ورودی گاز در دمای ثابت ۲۸۳ کلوین ۷۲
- شکل ۲-۸۷: تغییرات آنتالپی در چند دمای ثابت بر حسب فشار ورودی گاز ۷۵
- شکل ۲-۸۸: تغییرات آنتالپی در طول لوله بر حسب فشار ورودی گاز در دمای ثابت ۷۶
- شکل ۲-۸۹: تغییر سرعت ورودی با فرض گاز کامل و یا واقعی با تغییر فشار ابتدای خط ۸۷
- شکل ۲-۹۰: تغییر سرعت خروجی با فرض گاز کامل و یا واقعی با تغییر فشار ابتدای خط ۸۷
- شکل ۲-۹۱: تغییر دما در خروجی با فرض گاز کامل و یا واقعی با تغییر فشار ابتدای خط ۸۸
- شکل ۲-۹۲: تغییر عدد ماخ در خروجی با فرض گاز کامل و یا واقعی با تغییر فشار ابتدای خط ۸۸
- شکل ۲-۹۳: صفحه اول نرم‌افزار ۸۹
- شکل ۲-۹۴: صفحه‌ی ورود اطلاعات ۸۹
- شکل ۲-۹۵: صفحه نمایش نتایج ۹۰
- شکل ۲-۹۶: مدل در نظر گرفته شده برای تخمین هدر رفت گاز از لوله شکسته ۹۰
- شکل ۲-۹۷: صفحه ورودی اطلاعات برای حالت مخزن ۹۱
- شکل ۲-۹۸: صفحه ورودی اطلاعات در حالت وارد کردن عدد نامناسب برای طول لوله ۹۴
- شکل ۳-۱: نمودار تغییر ضریب زبری با گذشت زمان ۹۹
- شکل ۳-۲: مقایسه افت فشار برای دو لوله فلزی و کامپوزیتی در یک دوره ۱۰ ساله ۱۰۰
- شکل ۳-۳: مقایسه هزینه نصب لوله‌های فلزی و کامپوزیتی ۱۰۳
- شکل ۳-۴: وضعیت خطوط انتقال در آبرتا ۱۰۵
- شکل ۳-۵: جنس و نوع کاربرد لوله‌های خطوط انتقال در آبرتا ۱۰۸
- شکل ۳-۶: طول و قطر تمامی خطوط انتقال سیال ۱۰۹
- شکل ۳-۷: طول و قطر خطوط انتقال نفت خام ۱۱۰
- شکل ۳-۸: طول و قطر خطوط انتقال گاز طبیعی ۱۱۱
- شکل ۳-۹: میزان خطوط انتقال با لوله‌های فلزی دارای لایه محافظت کننده و نوع کاربرد آنها ۱۱۲
- شکل ۳-۱۰: میزان تاثیر عوامل مختلف در ایجاد اختلال در خطوط انتقال ۱۱۳
- شکل ۴-۱: ایستگاه تقلیل فشار نیروگاه آبادان ۱۱۷
- شکل ۴-۲: فیلترهای معیوب شده در عرض کمتر از یک هفته ۱۱۸
- شکل ۴-۳: شماتیک مسیر طی شده گاز از مبدا تا نیروگاه آبادان ۱۱۹
- شکل ۴-۴: اندازه‌ی ذرات باقی مانده در فیلتر ایستگاه تقلیل فشار نیروگاه آبادان ۱۲۱

- شکل ۴-۴: نمونه‌ای از فیلترهای با درب پیچ شو [۱] ۱۲۵
- شکل ۴-۵: طرح شماتیک یک فیلتر گاز خشک [۱] ۱۲۶
- شکل ۴-۶: تصویری از یک فیلتر ادغامی [۱] ۱۲۷
- شکل ۴-۷: نمونه‌ای از المنت ته‌دوخته شده [۱] ۱۲۷
- شکل ۴-۸: نمونه‌ای از المنت ته‌لاستیکی [۱] ۱۲۸
- شکل ۴-۹: نمونه‌ای از المنت شبکه سیمی [۱] ۱۲۹
- شکل ۴-۱۰: نمونه‌ای از المنت جاذب [۱] ۱۲۹
- شکل ۴-۱۱: نمودار افت فشار بر حسب دبی برای فیلتر [۱] ۱۳۰
- شکل ۴-۱۲: اصول کار فیلتر جداکننده [۲] ۱۳۱
- شکل ۴-۱۳: مکانیزم فیلتراسیون در جداکننده سانتریفوژ [۳] ۱۳۲
- شکل ۴-۱۴: طرح شماتیک عبور جریان گاز از یک سیکلون [۳] ۱۳۳
- شکل ۴-۱۵: توزیع اندازه‌ی ذرات در یک تست از ذرات پشت فیلتر [۴] ۱۳۵
- شکل ۴-۱۶: طرح پیشنهادی برای بهبود فیلتراسیون ایستگاه تقلیل فشار شهر شیراز [۴] ۱۳۶
- شکل ۴-۱۸: محدوده‌ی دبی (Nm^3 / hr) و فشار کاری مدل‌های سری ZA ۱۴۰
- شکل ۴-۱۹: ضرایب تبدیل دبی برای سایر گازها ۱۴۰
- شکل ۴-۲۰: مشخصات ساخت مدل‌ها ۱۴۱
- شکل ۵-۱: موقعیت جغرافیایی شهرستان مسجد سلیمان ۱۴۴
- شکل ۵-۲: وضعیت ساختمانی کمربند چین خورده - تراستی زاگرس [۶] ۱۴۶
- شکل ۵-۳: نقشه زمین‌شناسی منطقه مسجد سلیمان ۱۴۷
- شکل ۵-۴: وابستگی مقاومت الکتریکی مواد نسبت به میزان آب [۱۵] ۱۵۵
- شکل ۵-۵: وابستگی مقاومت الکتریکی محلولها نسبت به غلظت نمکها [۱۵] ۱۵۶
- شکل ۵-۶: وابستگی مقاومت الکتریکی محلول NaCl با غلظتهای متفاوت نسبت به دما [۱۵] ۱۵۷
- شکل ۶-۱: سیستم آبگرمکن خورشیدی ترموسیفون مدار بسته ۱۶۵
- شکل ۶-۲: سیستم آبگرمکن خورشیدی ترموسیفون مدار باز ۱۶۶
- شکل ۶-۳: آبگرمکن خورشیدی با سیستم جابجایی اجباری ۱۶۶
- شکل ۶-۴: گردآورنده صفحه تخت ۱۶۸
- شکل ۶-۵: انواع صفحات جاذب بکار رفته در آبگرمکن‌های خورشیدی ۱۶۹
- شکل ۶-۶: انتخاب اطلاعات مربوط به آب و هوای منطقه مورد نظر ۱۷۵
- شکل ۶-۷: طراحی سیستم مورد نظر با توجه به الگوهای موجود ۱۷۶

- شکل ۶-۸: وارد کردن مقدار آب گرم روزانه مصرفی ۱۷۶
- شکل ۶-۹: وارد کردن مقدار انرژی گرمایی مورد نیاز ۱۷۷
- شکل ۶-۱۰: انتخاب ویژگی‌های ساختمان مورد نظر از کاتالوگ‌های مربوطه ۱۷۷
- شکل ۶-۱۱: کاتالوگ مربوط به کلکتورها و مشخصات مربوط به آن ۱۷۸
- شکل ۶-۱۲: کاتالوگ مربوط به تانک‌های ذخیره و مشخصات مربوط به آن ۱۷۸
- شکل ۶-۱۳: کاتالوگ مربوط به بویلرها و مشخصات مربوط به آن ۱۷۹
- شکل ۶-۱۴: نتایج مربوط به سیستم طراحی شده و اجزای مربوطه ۱۷۹
- شکل ۶-۱۵: نتایج اقتصادی و آنالیزهای مالی ۱۸۰
- شکل ۷-۱: بروشور معرفی دفتر پژوهش شرکت گاز-۱ ۱۸۲
- شکل ۷-۲: بروشور معرفی دفتر پژوهش شرکت گاز-۲ ۱۸۳
- شکل ۷-۳: بنر نرم افزار تخمین هدررفت گاز و دبی سنج تحقیقاتی ۱۸۴
- شکل ۷-۴: بنر سیستم پردازش موازی، عناوین فعالیت‌ها و لیست مستندات دفتر ۱۸۴
- شکل ۷-۵: افتتاح نمایشگاه هفته پژوهش و فناوری توسط فرماندار استان خوزستان ۱۸۷
- شکل ۷-۶: نمایی از غرفه ۱۸۸
- شکل ۷-۷: نمایی از غرفه ۱۸۸
- شکل ۷-۸: بازدیدکنندگان از غرفه ۱۸۹
- شکل ۷-۹: بازدیدکنندگان از غرفه ۱۸۹
- شکل ۷-۱۰: بازدیدکنندگان از غرفه ۱۹۰
- شکل ۷-۱۱: غرفه‌های شرکت کننده در هفته پژوهش ۱۹۰
- شکل ۷-۱۲: غرفه‌های شرکت کننده در هفته پژوهش ۱۹۱
- شکل ۷-۱۳: غرفه‌های شرکت کننده در هفته پژوهش ۱۹۱
- شکل ۷-۱۴: نحوه نواریپیچی خطوط لوله گاز با دست [۳] ۱۹۴
- شکل ۷-۱۵: ماشین نواریپیچی سایز دستی کوچک [۱] ۱۹۵
- شکل ۷-۱۶: ماشین نواریپیچی دستی سایز بزرگ با بازوی کششی [۱] ۱۹۵
- شکل ۷-۱۷: ماشین نواریپیچی با موتور [۱] ۱۹۶
- شکل ۷-۱۸: ماشین نواریپیچی با موتور [۴] ۱۹۶
- شکل ۷-۱۹: نحوه کار ماشین نواریپیچی با موتور [۴] ۱۹۶
- شکل ۷-۲۰: سیستم بوزنی با روش کنارگذر ۲۰۱
- شکل ۷-۲۱: سیستم بوزنی با روش پالسی ۲۰۱

-
- شکل ۲۲-۷: شمایی از سیستم کنارگذر قدیمی ۲۰۲
- شکل ۲۳-۷: شمایی از سیستم کنارگذر اصلاح شده ۲۰۴
- شکل ۲۴-۷: راهنمای مندرجات شکل ۲۳-۷ ۲۰۴
- شکل ۲۵-۷: کتور استفاده شده در طرح ۲۰۵
- شکل ۲۶-۷: فیلتر و رگلاتور استفاده شده در طرح ۲۰۵
- شکل ۲۷-۷: شیر یک طرفه استفاده شده در طرح ۲۰۶
- شکل ۲۸-۷: کنترلر استفاده شده در طرح ۲۰۶
- شکل ۲۹-۷: شیر برقی استفاده شده در طرح ۲۰۷
- شکل ۳۰-۷: نقشه‌ی منازل سازمانی شرکت گاز استان خوزستان ۲۰۹

فهرست جدول‌ها

- جدول ۱-۲: مقادیر اندازه‌گیری شده در تست تجربی ۱۳
- جدول ۲-۲: مقایسه‌ی دبی قرائت شده و محاسبه شده ۱۴
- جدول ۳-۲: دبی قرائت شده از روی کنتور توربینی و دبی سنج طراحی شده ۳۵
- جدول ۴-۲: درصد خطا بین دبی قرائت شده از روی کنتور توربینی و دبی سنج طراحی شده بعد از کالیبراسیون ۳۷
- جدول ۵-۲: دبی قرائت شده از روی کنتور توربینی و دبی سنج طراحی شده ۳۸
- جدول ۶-۲: نتایج تست تجربی دبی سنج ۴۴
- جدول ۷-۲: نمادهای بکار رفته در روابط ۷۷
- جدول ۱-۳: عوامل موثر در بروز عیب در خط انتقال ۱۰۲
- جدول ۲-۳: خطوط تحت نظارت NEB در آبرتا ۱۰۴
- جدول ۱-۴: درصد وزنی ترکیبات مختلف ذرات معلق در جریان گاز ۱۲۲
- جدول ۲-۴: پی‌پی‌ام عناصر موجود در ذرات ۱۲۲
- جدول ۱-۴: مشخصات فیلتر خط لوله‌ی ایستگاه CGS شیراز [۴] ۱۳۴
- جدول ۲-۴: ماهیت، منشا و روش‌های کاهش ذرات معلق درون خطوط لوله گاز [۵] ۱۳۸
- جدول ۱-۵: جدول راهنمای اصطلاحات استفاده شده ۱۴۳
- جدول ۲-۵: تاثیر مقاومت مخصوص خاک بر میزان خوردگی [۱۵] ۱۵۴
- جدول ۳-۵: رابطه‌ی بین درصد رطوبت و مقاومت الکتریکی خاک [۱۵] ۱۵۵
- جدول ۴-۵: تاثیر درصد نمک بر روی مقاومت الکتریکی خاک [۱۵] ۱۵۶
- جدول ۵-۵: مقاومت الکتریکی خاک‌ها و سنگ‌ها بر حسب اهم / متر [۱۵] ۱۵۸
- جدول ۱-۷: روش‌ها و عرض نوارهای پیشنهاد شده برای قطر مختلف لوله‌ها [۱] ۱۹۷
- جدول ۲-۷: بارحرارتی و برودتی منزل در پیک مصرف (حالت جاری) ۲۱۰
- جدول ۳-۷: بارحرارتی و برودتی منزل در پیک مصرف (همراه با عایق) ۲۱۱

۱ مقدمه

در این گزارش عمده فعالیت‌های انجام‌شده توسط دفتر پژوهش‌های گاز در سال ۱۳۸۹ تشریح شده‌است. سرفصل‌های انجام‌شده در سال عبارت از موارد ذیل می‌باشند.

- تدوین نرم‌افزار تخمین میزان هدر رفت گاز
پس از تشکیل هسته‌ی اولیه نرم‌افزار در سال گذشته، جهت تکمیل و بررسی دقت نرم‌افزار تست‌های انجام‌شده که گزارش آن در فصل دوم ارائه می‌شود. علاوه بر تست‌های تجربی صحت فرض گاز کامل به کمک روابط و معادلات حاکم بر گاز واقعی مورد بررسی قرار گرفته و نتایج آن ارائه شده‌است.
- مطالعه و بررسی کاربرد لوله‌های کامپوزیتی
با توجه به هزینه‌های بالای تعمیرات و نگهداری لوله‌های فولادی، لوله‌های کامپوزیتی به عنوان یک جایگزین مناسب در اغلب شرایط معرفی شده‌اند. در فصل سوم این گزارش این لوله‌ها بررسی شده و مزایای آنها مورد مطالعه قرار گرفته‌است.
- بررسی سیستم فیلتراسیون گاز طبیعی
با توجه به مشکل سیستم فیلتراسیون نیروگاه آبادان و تعویض مکرر فیلترها، بازدید از محل صورت گرفته و سناریوهای مرتبط با این پدیده مورد بررسی قرار گرفته و در فصل چهارم این گزارش ارائه شده‌است.
- بررسی مشکل مرتبط با سیستم‌های حفاظت کاتدیک مسجد سلیمان
جهت علت یابی توزیع نامناسب جریان و شرایط غیر متعارف سیستم حفاظت کاتدیک منطقه‌ی مسجد سلیمان، مطالعه‌ای در رابطه با زمین‌شناسی این منطقه و اطلاعات مربوط به

ضریب‌هدایت الکتریکی خاک منطقه انجام شده که گزارش آن در فصل پنجم ملاحظه می‌گردد.

- مطالعه و بررسی آبگرم‌کن‌های خورشیدی

پیرو درخواست مسئولین محترم بخش پژوهش شرکت گاز استان خوزستان در رابطه با مطالعه و بررسی آبگرم‌کن‌های خورشیدی و امکان‌سنجی استفاده از آنها برای شرایط بومی، مطالعات اولیه‌ای در این راستا انجام گرفت که نتایج آن در فصل ششم منعکس شده‌است.

- سایر فعالیت‌ها

در این فصل نیز به آن دسته از فعالیت‌های دفتر که بر حسب مورد و نیاز اعلام شده از طرف شرکت گاز، انجام شده‌اند، اشاره شده‌است. این فعالیت‌ها شامل موارد ذیل می‌شوند.

- هفته پژوهش

در این بخش فعالیت‌های مرتبط با هفته پژوهش مشتمل بر آماده‌سازی پوستره‌های دفتر و نیز برپایی غرفه ارائه شده‌است.

- روش‌های نواریپیچی خطوط لوله

کلیات روش‌ها و دستگاه‌های نواریپیچی خطوط لوله و تقسیم‌بندی آنها متناسب با سایز لوله‌ها در این بخش ارائه شده‌است.

- معرفی سیستم بوزنی با روش ابداعی

ابتکار یکی از عزیزان در راستای ارتقای کیفیت بوزنی به گاز و نیز کاهش مصرف مواد بوزا در این بخش معرفی و بررسی شده‌است.

- کاهش مصرف انرژی به کمک عایقکاری سقف

میزان صرفه‌جویی در مصرف انرژی با استفاده از عایق کاری سقف در یکی از منازل مسکونی شرکت گاز به کمک نرم‌افزار Carrier محاسبه شده و در این بخش ارائه می‌شود.

۲ تدوین نرم افزار محاسبه ی هدر رفت گاز

یکی از سرفصل‌های اصلی فعالیت‌های پژوهشی سال ۱۳۸۹ دفتر پژوهش گاز در راستای تکمیل نرم‌افزار تخمین میزان هدر رفت گاز تعریف گردید. طراحی و تدوین مقدماتی این نرم‌افزار در اواخر سال ۱۳۸۸ انجام شده و مابقی مراحل کار به سال ۱۳۸۹ موکول گردید. طراحی این نرم‌افزار در فاز نخست بر پایه‌ی یک سری فرضیات بوده که مهم‌ترین آنها به شرح ذیل می‌باشد.

۱. استفاده از معادله حالت گاز کامل برای گاز طبیعی

۲. شکستن کامل لوله و یا به عبارتی خروج گاز از سطحی برابر با سطح مقطع لوله

۳. فشار مخزن برابر با فشار استاتیک خط جریان

با توجه به فرضیات فوق، انتظار می‌رود که نتایج نرم‌افزار با مقادیر واقعی متفاوت باشد. از اینرو دقت نرم‌افزار می‌بایست بررسی گردد. برای این منظور یک سری آزمایشات تجربی جهت بررسی نتایج نرم‌افزار پیش‌بینی شد که در زمان‌های مختلف اجرا گردید. شایان ذکر است که با توجه به ماهیت تجربی آزمایشات در برخی از تست‌های انجام شده کاستی‌ها و نواقصی مشاهده گردید. گزارش مبسوط مراحل انجام شده و مشکلات موجود مربوط به هر یک از آنها در گزارشات ماهیانه دفتر پژوهش گاز ارائه شده است. در این گزارش جهت حفظ پیوستگی مطالب از ذکر برخی جزئیات و موانع موجود صرف‌نظر شده است.

علاوه بر تست‌های تجربی پیش‌بینی شده جهت بررسی صحت عملکرد نرم‌افزار، فرضیات مسئله به خصوص فرض کامل بودن گاز طبیعی به صورت تئوریک بررسی شده است. در این راستا معادلات حاکم بر مسئله مجدداً با فرض گاز واقعی استخراج شده و خطای ناشی از فرض کامل بودن گاز مورد بررسی قرار گرفته و نتایج آن ارائه گردیده است.

علاوه بر اقداماتی که در راستای افزایش دقت و کارایی نرم‌افزار صورت گرفته است، از آنجا که در نسخه‌ی اولیه پردازشگر این نرم‌افزار به کمک زبان برنامه‌نویسی فرترن و محیط گرافیکی توسط

زبان ویژوال بیسیک نگارش شده‌است، ادامه‌ی این مسیر و استفاده همزمان از این دو زبان انجام تغییرات و ارائه ویرایش‌های جدید نرم‌افزار را با کمی اشکال مواجه می‌نماید. برای رفع این مشکل و استفاده از یک زبان واحد جهت انجام کارهای تحلیلی و گرافیکی به‌صورت همزمان، پس از بررسی زبان‌های برنامه‌نویسی مختلف، زبان برنامه‌نویسی C# به‌عنوان کاندیدای اصلی جهت نگارش این نرم‌افزار انتخاب شد. از اینرو بخشی از فعالیت‌های انجام شده در اینراستا مربوط به یادگیری این زبان و بازنویسی نرم‌افزار اولیه به کمک زبان C# می‌باشد. در ادامه مجموعه اقداماتی که در این زمینه و نیز مرتبط با بررسی دقت نرم‌افزار صورت گرفته شرح داده می‌شود.

۱.۲ تست‌های تجربی انجام شده

همانگونه که در مقدمه ذکر شده، در راستای تکمیل نرم‌افزار تست‌های متعددی پیش‌بینی و انجام شده‌است. در این بین در برخی موارد حین انجام آزمایش مشکلاتی پدیدار شده که انجام آزمایش را مختل نموده و آنرا به زمانی دیگر موکول می‌نمود. شرح کامل اقدامات انجام شده در گزارشات ماهیانه‌ی دفتر پژوهش ارائه شده است و در این گزارش تنها مواردی که تست به‌صورت کامل اجرا شده و نتایجی در برداشته، مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرند.

۱.۱.۲ تست تجربی شماره یک

تست شماره یک با هماهنگی بخش اندازه‌گیری شرکت گاز استان در یکی از ایستگاه‌های گاز شهری انجام گرفت. برای انجام تست، مطابق با شکل ۱-۲ یک انشعاب ۲ اینچ از خط گرفته شد. در مسیر این انشعاب همانگونه که در شکل ۲-۲ مشاهده می‌گردد یک دبی‌سنج تعبیه گشته تا میزان دبی گاز قرائت گردد. انتهای لوله نیز باز گذاشته شده تا گاز از خط اصلی به اتمسفر تخلیه گردد (شکل ۲-۳).



شکل ۱-۲: انشعاب ۲ اینچی از خط اصلی ایستگاه



شکل ۲-۲: دبی‌سنج نصب‌شده بر انشعاب ۲ اینچی جهت قرائت دبی هدر رفت

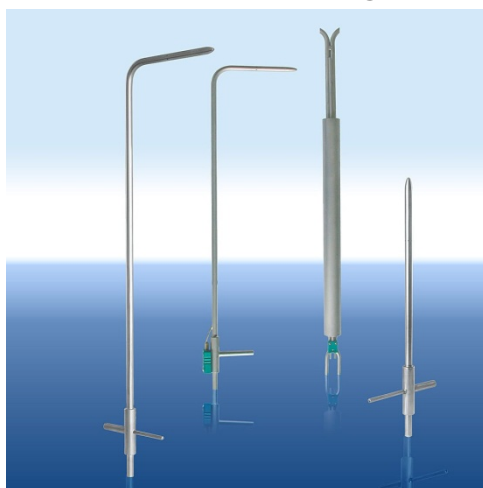


شکل ۲-۳: تخلیه انشعاب به اتمسفر

با تنظیم دستی فشار خط در دو مرحله بر روی ۱۰ Psi و ۲۰ Psi و اجازه‌ی نشت گاز به اتمسفر در بازه‌ی زمانی نزدیک به ۵ دقیقه، میزان حجم گاز خروجی از خط توسط دبی‌سنج اندازه گرفته شد. با بررسی نتایج نرم‌افزار و مقایسه آنها با اطلاعات تجربی اختلاف زیادی مشاهده گردید. با تغییر پارامترها و نیز کاهش افت‌های فشار در مسیر انشعاب بهبود چندانی در نتایج حاصل نشد. با کمی بررسی بیشتر ملاحظه گردید که حجم و دبی قرائت شده توسط دستگاه بسیار فراتر از محدوده‌ی کاری دبی‌سنج می‌باشد. به‌عنوان مثال در فشار ۲۰ Psi و در زمان ۵ دقیقه حجم گاز خروجی توسط دبی‌سنج برابر با ۵۰ مترمکعب اندازه‌گیری شده‌بود. این میزان برابر با دبی در حدود ۶۰۰ مترمکعب بر ساعت می‌باشد که با توجه به اینکه دبی ماکزیمم کارکرد دبی‌سنج برابر با ۲۰۰ مترمکعب بر ساعت است، دبی‌سنج نتایج نادرستی را ارائه کرده و نمی‌توان به مقادیر اندازه‌گیری شده توسط دستگاه

اطمینان داشت. با کاهش فشار ورودی به ۱Psi نیز این مشکل حل نشده و همچنان دبی کارکرد بالاتر از میزان طراحی دبی سنج مشاهده می‌شد. به‌ازای فشارهای خیلی پایین دبی‌سنج در محدوده‌ی مجاز کاری خود قرار می‌گرفت ولی با توجه به عدم وجود فشارسنجی که بتواند مقدار فشار زیر ۱Psi را نشان دهد، مشکل همچنان به‌قوت خود باقی ماند.

جهت رفع این مشکل ساخت یک لوله پیتوت جهت نصب در مسیر گاز درون لوله پیشنهاد گردید. لوله پیتوت لوله‌ی بسیار نازکی است که توانایی اندازه‌گیری فشار سکون و فشار استاتیک جریان را دارا می‌باشد. در شکل ۲-۴ انواع مختلف این لوله نشان داده شده‌است.



شکل ۲-۴: مدل‌های مختلف لوله پیتوت

با نصب این وسیله در مسیر گاز و قرائت فشارها توسط مانومتر وصل شده به لوله پیتوت می‌توان سرعت گاز و در نتیجه دبی آنرا مشخص نموده و از اینرو به‌عنوان معیاری جهت بررسی دقت نرم‌افزار استفاده کرد.

۲.۱.۲ تست تجربی شماره دو

مطابق با زیربخش قبل، تجهیزات اولیه نصب شده جهت انجام تست، فاقد دقت و کارایی مناسب جهت اندازه‌گیری بوده و از اینرو با ارائه راه‌کارهایی انجام تست به جلسه‌ی دیگر موکول گردید. از جمله موانع موجود دبی‌سنجی بود که محدوده‌ی دبی اندازه‌گیری آن حداکثر ۱۰۰ مترمکعب بر ساعت بود که به‌مراتب از میزان دبی تخلیه شده‌ی گاز کمتر بوده و از اینرو فاقد کارایی لازم بود. بنابراین این دبی‌سنج با یک مدل مناسب‌تر که قابلیت اندازه‌گیری تا ۱۰۰۰ مترمکعب بر ساعت را داشت، تعویض گردید که تصویری از دبی‌سنج ابتدایی و جدید در شکل ۲-۵ ارائه شده‌است.



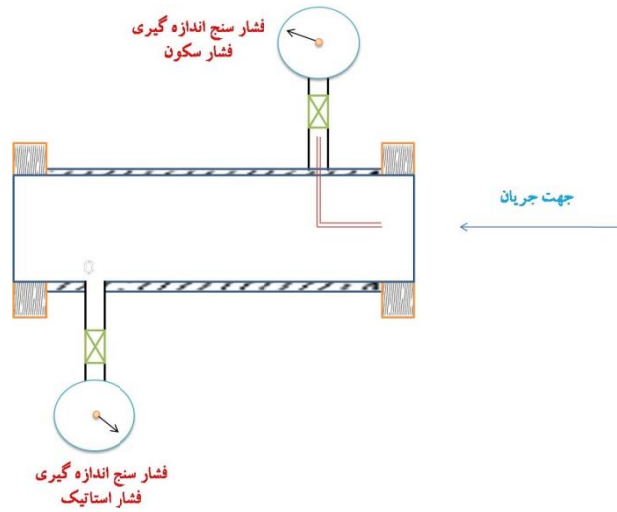
شکل ۲-۵: دبی سنج قدیمی (سمت راست) و جدید (سمت چپ) نصب شده در محل تست

تعویض دبی سنج و استفاده از مدلی با محدوده‌ی کارکرد بالاتر ناگزیر سبب انشعابات و لوله‌ای که دبی سنج بر آن نصب می‌شود را تغییر داده و منجر به افزایش سایز آن می‌شود. این مسئله به خوبی در شکل ۲-۵ مشاهده می‌گردد. با توجه به شکل ۲-۶ انشعاب گرفته شده از خط اصلی برابر با دو اینچ بوده و از اینرو به منظور اندازه‌گیری دبی می‌بایست به کمک یک مبدل خط ۲ اینچ را به ۶ اینچ تبدیل نمود.



شکل ۲-۶: انشعاب ۲ اینچی از خط اصلی ایستگاه

با توجه به اینکه نرم‌افزار برای محاسبه‌ی نشت گاز از یک لوله با قطر ثابت طراحی شده‌است، تغییر قطر لوله منجر به تغییر در ماهیت جریان شده و دیگر نمی‌توان نتایج نرم‌افزار را با نتایج حاصل از قرائت دبی سنج جدید مقایسه نمود. برای رفع این مشکل و نیز افزایش دبی خروجی از لوله بدون نگرانی نسبت به قرارگیری دبی خروجی در محدوده‌ی کاری دبی سنج، راه‌کار استفاده از یک لوله پیتوت جهت محاسبه‌ی سرعت جریان و در نهایت محاسبه‌ی دبی گاز پیشنهاد گردید. شماتیکی از دبی سنج طراحی شده در شکل ۲-۷ ارائه شده‌است.

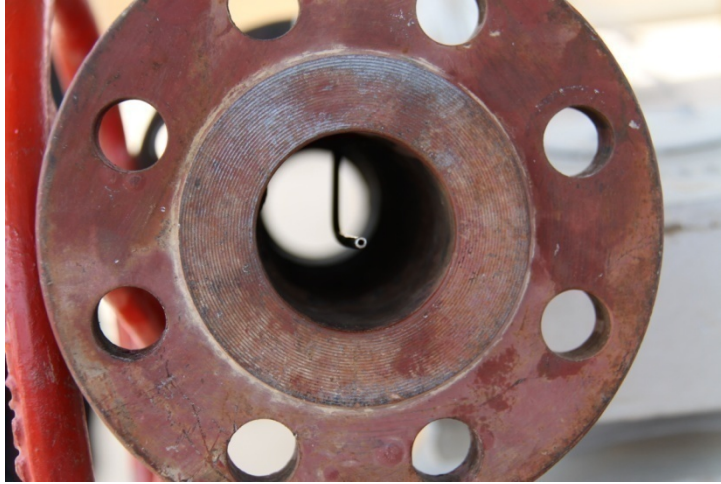


شکل ۲-۷: شماتیکی از دبی‌سنج طراحی شده

دبی‌سنج طراحی شده، طبق سفارش آماده شده و نمونه‌ی اولیه‌ی آن در شکل ۲-۸ نشان داده شده‌است. لوله پیتوت نصب شده در دبی‌سنج نیز در شکل ۲-۹ نشان داده شده‌است.



شکل ۲-۸: دبی‌سنج طراحی شده بر مبنای لوله پیتوت



شکل ۲-۹: لوله پیتوت نصب شده

مطابق شکل ۲-۷ و شکل ۲-۸ در دبی سنج طراحی شده، توسط دو فشارسنج، فشار استاتیک جریان (P) و فشار سکون جریان (P_s) (قرائت شده توسط لوله پیتوت) اندازه‌گیری می‌شود. با تعیین فشارها با داشتن دمای خط اصلی (T_s) می‌توان سرعت درون لوله را به کمک رابطه‌ی ذیل محاسبه نمود.

$$\frac{V^2}{2} = C_p T_s \left[1 - \left(\frac{P}{P_s} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right] \quad (1-2)$$

سرعت محاسبه شده از رابطه‌ی (۱-۲) برابر با سرعت در مرکز لوله می‌باشد. از آنجا که جریان درون لوله به جریان درهم نزدیک است، میزان سرعت متوسط در حدود $0/8$ سرعت ماکزیمم (سرعت در مرکز لوله) می‌باشد. از اینرو برای محاسبه‌ی دبی حجمی گاز از رابطه‌ی ذیل استفاده می‌شود.

$$Q = 0.8VA \quad (2-2)$$

در رابطه‌ی فوق A سطح مقطع لوله می‌باشد. بدین ترتیب دبی درون لوله محاسبه می‌گردد. شایان ذکر است که جهت انجام محاسبات مذکور یک نرم‌افزار ساده طراحی شده‌است. بمنظور کالیبراسیون این دبی‌سنج جدید، خط دو اینچ حامل گاز به کمک یک مبدل به خط ۶ اینچی که دبی‌سنج بزرگ بر روی آن نصب شده متصل شده‌است (شکل ۲-۱۰). بدین وسیله با قرائت دبی از روی دبی‌سنج توربینی و نیز محاسبه‌ی دبی اندازه‌گیری شده توسط دبی‌سنج طراحی شده و مقایسه این مقادیر می‌توان ضرایب تصحیح دبی‌سنج طراحی شده را تعیین و آنرا کالیبره نمود.



شکل ۱۰-۲: اتصال لوله‌ی ۲ اینچ بعد از دبی‌سنج طراحی شده به لوله‌ی ۶ اینچ حامل دبی‌سنج توربینی پس از نصب قطعات و تجهیزات بر روی خط اصلی نوبت به شروع تست بود. در این بین مشکلاتی در حین آزمایش مشاهده گردید و مجدداً انجام تست مختل گردید. پس از رفع نواقص، دبی‌سنج طراحی شده پس از انجام تغییرات در نهایت مطابق با شکل ۱۱-۲ آماده گردید.



شکل ۱۱-۲: دبی‌سنج طراحی شده پس از اعمال تغییرات

پس از نصب دبی‌سنج برای شروع تست فشار خط اصلی بر روی ۶ psig تنظیم گردید. در این حالت فشار سنج نصب شده بر روی لوله پیتوت فشاری نزدیک به ۲ psig را نشان می‌داد. در حالت طبیعی انتظار می‌رفت که این فشار سنج فشار سکون جریان یعنی فشاری نزدیک به فشار خط اصلی را نشان دهد. اختلاف فاحش بین این دو عدد تنها می‌توانست ناشی از ایرادی در نصب لوله پیتوت باشد. به عبارتی ممکن است که لوله پیتوت نسبت به راستای جریان زاویه‌دار شده و یا اینکه مکان

نصب لوله پیتوت بر روی بدنه‌ی دبی‌سنج به خوبی آب‌بندی نشده باشد. پس از باز نمودن دستگاه مشخص شد که متأسفانه آب‌بندی لوله پیتوت دچار مشکل است. از آنجائیکه این مشکل با توجه به امکانات محدود در محل قابل رفع نبود، انجام تست به زمانی دیگر موکول گردید.

۳.۱.۲ تست تجربی شماره سه

با رفع نواقص و ایرادات سیستم نصب شده اندازه‌گیری دبی انجام تست مقدور گردید. این آزمایش جهت کالیبراسیون دبی‌سنج جدید انجام شد که شرح آن مطابق با ذیل می‌باشد.

کالیبراسیون دبی‌سنج جدید

دبی‌سنج جدید نیز همچون دیگر دستگاه‌های اندازه‌گیری نیاز به کالیبراسیون دارد. به‌منظور کالیبراسیون آن سیستمی مطابق با شکل ۲-۱۲ تهیه شده که در آن خروجی لوله ۲ اینچ وارد یک دبی‌سنج دیگر شده و بدین ترتیب می‌توان با مقایسه مقادیر اندازه‌گیری شده توسط دبی‌سنج جدید و دبی‌سنج توربینی، نسبت به دقت دبی‌سنج جدید اظهار نظر نموده و آنرا کالیبره نمود.



شکل ۲-۱۲: تجهیزات نصب شده جهت کالیبراسیون دبی‌سنج جدید

برای کالیبراسیون دبی‌سنج جدید ابتدا فشار خط اصلی توسط یکی از همکاران روی مقداری معین ثابت می‌شود (شکل ۲-۱۳). فشار درون خط اصلی توسط فشار سنج نصب شده بر روی این خط قرائت می‌گردد (شکل ۲-۱۴).



شکل ۲-۱۳: تنظیم فشار خط اصلی



شکل ۲-۱۴: فشارسنج نصب شده برخط اصلی

در این مرحله پس از ثابت شدن عدد نمایشی فشارسنج‌ها، مقدار فشار خط اصلی (شکل ۲-۱۴)، فشار سکون و فشار استاتیک جریان گاز درون لوله قرائت می‌گردد (شکل ۲-۱۵).



شکل ۲-۱۵: فشارسنج اندازه‌گیری فشار سکون جریان در لوله

در نهایت نیز مقدار دبی عبوری اندازه‌گیری شده در بازه‌ی زمانی ۳ دقیقه، توسط دبی سنج توربینی قرائت می‌شود.



شکل ۲-۱۶: قرائت دبی اندازه‌گیری شده توسط کارشناس مربوطه

با توجه به مراحل مذکور، آزمایش در ۹ مرحله انجام گردیده که نتایج آن در جدول ۱-۲ ارائه شده‌است.

جدول ۱-۲: مقادیر اندازه‌گیری شده در تست تجربی

مرحله	فشار خط اصلی (psig)	فشار سکون جریان (psig)	فشار استاتیک جریان (psig)	دبی کنتور توربینی (مترمکعب در ۳ دقیقه)
۱	۶	۲/۱	۰/۷۰۴	۳۶
۲	۱۱	۴	۱/۴۴	۵۰
۳	۱۶	۶	۲/۳۴۶	۶۲
۴	۲۰	۸	۳/۳۹۳	۷۱
۵	۲۵	۱۰	۴/۵	۸۰
۶	۲۹	۱۲	۶	۸۶
۷	۳۲	۱۴	۷	۹۴
۸	۳۴	۱۶	۹/۵	۱۰۰
۹	۳۸	۱۸	۱۲	۱۰۹

برای محاسبه‌ی میزان دبی عبوری گاز در شرایط استاندارد و بر حسب مترمکعب بر ساعت، می‌بایست از رابطه‌ی ذیل استفاده نمود.

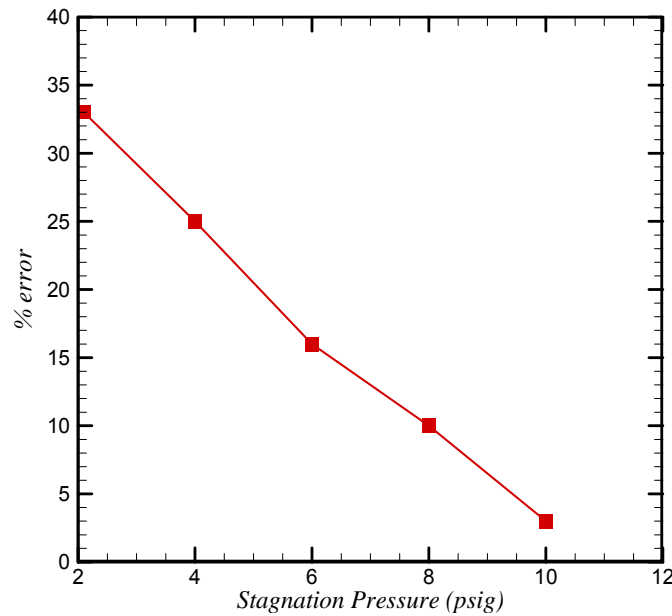
$$(۳-۲) \quad \frac{m^3}{hr} \text{ دبی در شرایط استاندارد} = 20 \times \text{عدد قرائت شده} \times \frac{\text{فشار استاندارد} + \text{فشار استاتیک جریان}}{\text{فشار استاندارد}}$$

از آنجا که بیشینه دبی قابل اندازه‌گیری توسط کنتور توربینی نزدیک به $\frac{m^3}{hr}$ ۲۰۰۰ می‌باشد، از اینرو با توجه به اینکه مقادیر ارائه شده در جدول ۱-۲ می‌بایست در عددی بزرگتر از ۲۰ ضرب شوند، مقادیر قرائت شده توسط کنتور تقریباً تنها تا مرحله‌ی ۵ از دقت لازم برخوردارند. در جدول ۲-۲ مقادیر دبی قرائت شده و محاسبه شده و درصد اختلاف آنها ارائه شده‌است.

جدول ۲-۲: مقایسه‌ی دبی قرائت شده و محاسبه شده

مرحله	دبی قرائت شده از کنتور توربینی (مترمکعب بر ساعت)	دبی محاسبه شده (مترمکعب بر ساعت)	درصد خطا
۱	۷۵۴	۹۹۹	٪۳۳
۲	۱۰۹۸	۱۳۷۰	٪۲۵
۳	۱۴۳۹	۱۶۶۹	٪۱۶
۴	۱۷۵۰	۱۹۲۰	٪۱۰
۵	۲۰۹۳	۲۱۵۱	٪۳

مطابق با جدول فوق مشاهده می‌شود که با افزایش فشار خط اصلی، خطای دبی‌سنج جدید نیز کاهش یافته و در فشارهای بالای، دبی‌سنج از دقت قابل قبولی برخوردار می‌باشد. برای روشن‌تر شدن این موضوع در شکل ۲-۱۷ نیز نحوه‌ی تغییر درصد خطای دبی‌سنج جدید با تغییرات فشار ارائه شده‌است.



شکل ۲-۱۷: تغییرات خطای دبی‌سنج جدید با تغییر فشار جریان

با توجه به شکل ۲-۱۷ همانگونه که پیشتر نیز اشاره گردید، با دقت قابل قبولی می‌توان از دبی‌سنج جدید استفاده نمود. از اینرو برای ادامه‌ی کار دیگر نیازی به استفاده از دیگر کنتورها نبوده و

تنها با اتصال این دبی‌سنج به خط لوله می‌توان دبی خروجی را اندازه‌گرفت و با نتایج نرم‌افزار مقایسه نمود.

۴.۱.۲ تست تجربی شماره چهار

با هماهنگی انجام‌گرفته با کارشناسان بخش اندازه‌گیری گروه در ایستگاه حاضر شده و تجهیزات مرتبط با تست بر روی خط مورد نظر مطابق با شکل ۱۸-۲ متصل گردیدند.



شکل ۱۸-۲: تجهیزات نصب شده جهت نرم‌افزار تخمین میزان هدر رفت گاز

در شکل ۱۹-۲ نمایی نزدیک از دبی‌سنج ارائه شده‌است. همانگونه که در شکل ۱۸-۲ مشاهده می‌شود، انتهای لوله بسته است. بستن انتهای لوله به‌منظور چک کردن اتصالات و مطمئن بودن از عدم نشتی می‌باشد. برای این منظور پس از بستن انتهای لوله فشار درون خط را به نزدیک ۴۰ psi رسانده و به‌کمک کف و آب تمامی اتصالات مورد بررسی قرار گرفتند. شکل ۱۹-۲ نمایی از فشارسنج‌ها در حین تست نشتی بوده و هر دو فشار یکسانی را نشان می‌دهند.



شکل ۲-۱۹: تجهیزات نصب شده جهت نرم‌افزار تخمین میزان هدر رفت گاز

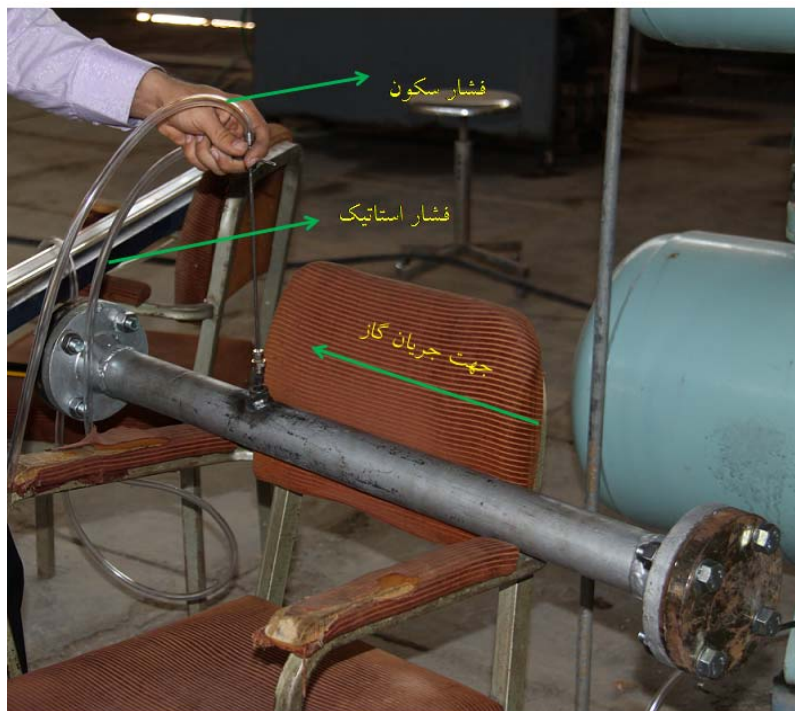
پس از انجام این مرحله و اطمینان از عدم نشتی در سیستم انتهایی لوله باز شده و به گاز اجازه‌ی خروج داده شد. مراحل آزمایش از فشارهای پایین تا فشار ۴۰ psi صورت گرفت. متأسفانه بر خلاف نتایج سری قبل، فشار سکون و فشار استاتیک قرائت شده تقریباً با هم یکسان بوده و در فشارهای بالا تنها اختلافی در حدود ۱ تا ۲ psi را نشان می‌دادند. حال آنکه در سری قبل در فشارهای مشابه اختلاف‌ها معقول بوده و دبی قرائت شده توسط دبی‌سنج توربینی با دبی‌سنج پیتوت اختلاف ناچیزی در حدود ۱۰ درصد را نشان می‌دادند. در این سری آزمایش عدد قرائت شده از فشار سنج استاتیک با توجه به اینکه تقریباً در انتهایی لوله قرار گرفته بود، برابر با صفر (فشار اتمسفر) بوده که تقریباً معقول می‌باشد. حال آنکه فشارسنج مربوط به فشار سکون نیز عددی مشابه با فشار استاتیک را نشان می‌داد. برای مدل سازی شرایط قبلی آزمایش انتهایی لوله مجدداً کمی بسته شد و به گاز اجازه‌ی خروج داده شد ولی همچنان نتایج چندان تغییری نکرد.

با توجه به مشکل بوجود آمده، لوله پیتوت از دبی‌سنج خارج شده و جهت بررسی دقت آن همراه با گروه تحقیقاتی به دانشگاه شهید چمران برده شد. با استفاده از تجهیزات موجود در آزمایشگاه سیالات دانشگاه شهید چمران اهواز، مشاهده گردید که لوله‌ی پیتوت طراحی شده از دقت قابل قبولی برخوردار بوده و از اینرو مشکلات بوجود آمده در حین آزمایش ناشی از این لوله نمی‌باشد. در هر صورت با توجه به دقت بالای مانومترها و نیاز آنها به نصب تجهیزات کمتر بر روی دبی‌سنج طراحی شده، مدل جدیدی از دبی‌سنج به کمک تنها یک لوله پیتوت که قادر به اندازه‌گیری فشار استاتیک و سکون در یک نقطه می‌باشد، مد نظر قرار گرفت. با اتصال انتهایی این لوله پیتوت به مانومترها اختلاف فشار استاتیک و سکون جریان در یک نقطه با دقت بالاتری قابل رویت می‌باشد.

لوله پیتوت مورد نظر از تجهیزات موجود در آزمایشگاه فراهم شده و در نهایت قرار شد با استفاده از مانومترهای موجود در آزمایشگاه مجدداً تست تجربی صورت گیرد که این برنامه با توجه به برقراری هماهنگی‌های لازم به سری بعد موکول گردید.

۵.۱.۲ تست تجربی شماره پنج

در طی آزمایشات گذشته، مشخص شد که دبی‌سنج‌های موجود دارای محدودیت در میزان اندازه‌گیری دبی عبوری می‌باشند. از اینرو برای رفع این مشکل و اندازه‌گیری دبی‌های بالا، بدون نگرانی نسبت به محدوده‌ی کاری دبی‌سنج، راه‌کار استفاده از یک لوله پیتو-استاتیک جهت محاسبه‌ی سرعت جریان و در نهایت محاسبه‌ی دبی گاز پیشنهاد گردید. دبی‌سنج طراحی شده، طبق سفارش آماده شده و در شکل ۲-۲۰ نشان داده شده‌است. در طراحی این دبی‌سنج از یک مانومتر و یک لوله پیتو-استاتیک استفاده شده‌است که در ادامه توضیح داده خواهد شد، همچنین به خاطر سادگی به جای پیتو-استاتیک از لفظ پیتوت استفاده شده‌است.



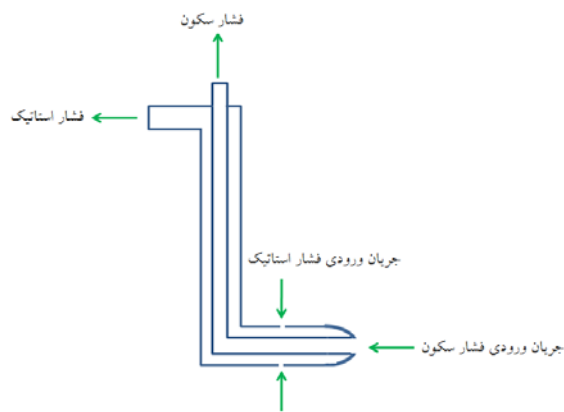
شکل ۲-۲۰: دبی‌سنج طراحی شده بر مبنای لوله پیتوت

لوله پیتوت دبی‌سنج

لوله پیتوت استفاده شده در دبی‌سنج قابلیت مشخص کردن فشار سکون و استاتیک را دارا می‌باشد. همانطور که در شکل ۲-۲۱ نشان داده شده، پیتوت از دو لوله‌ی هم‌محور که یکی داخل دیگری قرار دارد، ساخته شده‌است. ورودی لوله‌ی تعیین‌کننده فشار سکون موازی با خطوط جریان در مرکز لوله

قرار می‌گیرد. از آنجایی که در فشار استاتیک سرعت گاز نباید اثر بگذارد و ورودی آن بصورت دو سوراخ روی سطح لوله، تعبیه شده‌است. سوراخ‌های تعبیه شده در لوله پیتوت در شکل ۲-۲۳ مشاهده می‌شوند.

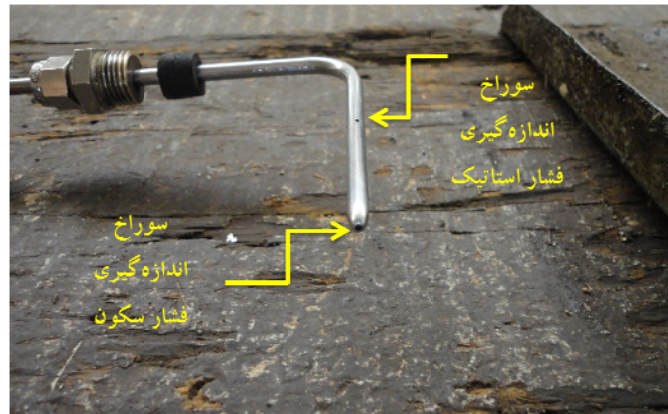
برای تعیین مقادیر فشار سکون و استاتیک جریان گاز، خروجی‌های پیتوت توسط شیلنگ به محل‌های مناسب خود در بورد مانومتر وصل می‌شوند تا از طریق اختلاف ارتفاعی که در ستون مایع مانومتر ایجاد می‌کند، مقدار فشار مشخص شود. خروجی‌های لوله‌ی پیتوت در شکل ۲-۲۱ نشان داده شده‌است.



شکل ۲-۲۱: شماتیکی از لوله پیتوت استفاده شده در دبی سنج



شکل ۲-۲۲: لوله پیتوت استفاده شده در دبی سنج



شکل ۲-۲۳: سوراخ‌های تعبیه شده در لوله پیتوت

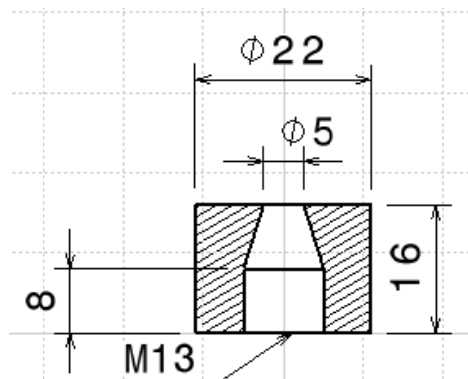
بدنه‌ی دبی سنج

به منظور اندازه‌گیری دبی، لوله پیتوت می‌بایست در مرکز لوله‌ای که گاز درون آن جریان دارد قرار گیرد. بدین منظور لوله پیتوت بر روی لوله‌ای که توسط همکاران بخش اندازه‌گیری تهیه شده بود می‌بایست نصب گردد. نمایی از این لوله در شکل ذیل مشاهده می‌شود.



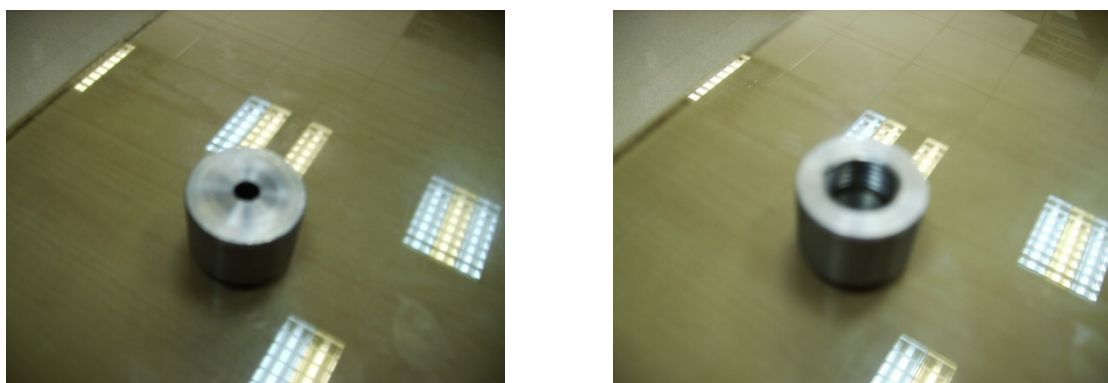
شکل ۲-۲۴: لوله محل نصب لوله پیتوت

با توجه به اتصالات موجود بر روی لوله پیتوت، برای نصب این لوله بر روی لوله‌ی حامل جریان گاز می‌بایست تمهیدات ویژه‌ای در نظر گرفته شود تا علاوه بر نگه‌داشتن لوله پیتوت بر روی لوله، آب‌بندی بوده و تحمل جریان با فشار بالا را نیز داشته باشد. بدین منظور قطعه‌ای مطابق با شکل ۲-۲۵ طراحی گردید.



شکل ۲-۲۵: نقشه قطعه‌ی طراحی شده برای نصب بر روی لوله

درون قسمت استوانه‌ای دارای رزوه بوده و نقش یک مهره را برای بسته‌شدن لوله پیتوت بازی می‌کند. پیچ موجود بر روی لوله پیتوت درون این مهره بسته شده و بدین ترتیب لوله پیتوت بر روی آن محکم بسته می‌شود. بخش مخروطی به منظور فشرده‌شدن یک واشر لاستیکی تعبیه شده‌است. بدین ترتیب با قراردادن یک واشر لاستیکی بزرگتر مابین پیشانی پیچ لوله پیتوت و بخش مخروطی، لاستیک درون بخش مخروطی را کیپ کرده و از این‌رو آب‌بندی پیتوت و لوله تا حدود زیادی انجام می‌شود. بر اساس طرح ارائه‌شده در شکل ۲-۲۵، قطعه‌ی فلزی بعد از تراشکاری و رزوه‌کاری آماده گردید. نماهایی از این قطعه در شکل ۲-۲۶ مشاهده می‌گردد.



شکل ۲-۲۶: قطعه‌ی طراحی شده برای نصب بر روی لوله

در نهایت قطعه‌ی طراحی شده بر روی لوله نصب شده و از این‌رو بدنه‌ی دبی‌سنج تکمیل گردید (شکل ۲-۲۷).



شکل ۲-۲۷: بدنه‌ی اصلی دبی‌سنج

نحوه‌ی قرارگیری پیتوت درون بدنه‌ی دبی‌سنج در شکل ۲-۲۸ نشان داده شده‌است.



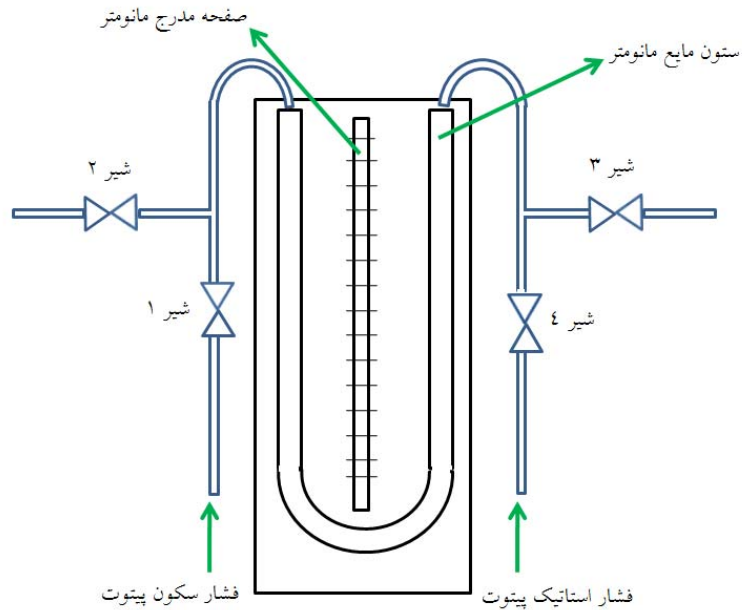
شکل ۲-۲۸: نحوه‌ی قرار گیری پیتوت درون لوله

مانومتر دبی سنج

برای تعیین مقدار فشار استاتیک و فشار سکون از مانومتر ستون مایع در دبی‌سنج استفاده شد. مورد مانومتر که شماتیکی از آن در شکل ۲-۲۹ نشان داده شده، قابلیت اندازه‌گیری فشار استاتیک، فشار سکون و اختلاف فشار استاتیک و سکون را دارا می‌باشد. ستون مایع مانومتر در اینجا از جیوه پر شده است و از طریق اختلاف ارتفاع ایجاد شده در دو سر ستون، فشار قرائت می‌شود.

زمانی که در شکل ۲-۲۹ شیرهای ۱ و ۳ بسته و شیرهای ۲ و ۴ باز باشد، مانومتر فشار استاتیک را مشخص می‌کند، اگر شیرهای ۲ و ۴ بسته و شیرهای ۱ و ۳ باز باشند، مانومتر فشار سکون را نشان می‌دهد. در حالتی که شیرهای ۲ و ۳ بسته و شیرهای ۱ و ۴ باز باشند، مانومتر اختلاف فشار استاتیک با سکون را تعیین می‌کند.

لوله‌ی پیتوت برای هر یک از فشار سکون و فشار استاتیک، یک شیلنگ خروجی دارد. که می‌بایست در محل‌های مناسب در مانومتر وصل شوند. در شکل ۲-۲۹ محل‌های وصل شیلنگ فشار سکون و استاتیک پیتوت در مورد مانومتر مشخص شده است.



شکل ۲-۲۹: شماتیکی از بورد مانومتر

تست نشستی دبی سنج

شرط آنکه بتوان دبی درست را با این دبی سنج محاسبه نمود این است که فشارهای سکون و استاتیک با دقت بیشتری تعیین شوند. برای تعیین دقیق فشار، سیستم طراحی شده می‌بایست بدون نشستی باشد. پس تست نشستی دبی سنج طراحی شده قبل استفاده از آن ضروری است.

برای سیل کردن پیتوت از دو آب‌بند لاستیکی استفاده شده که در شکل ۲-۳۰ نشان داده شده‌است. برای تست نشستی دبی سنج دو طرف آن توسط گسکت و فلنج مانند شکل ۲-۳۱ بسته شد. سپس لوله پیتوت مانند آنچه که در شکل ۲-۳۲ نشان داده شده، روی دبی سنج نصب شد. یکی از شیلنگ‌های رابط پیتوت به کمپرسور هوا و دیگری به مانومتر وصل شد. خروجی از مانومتر نیز مانند شکل ۲-۳۳ مسدود شد.



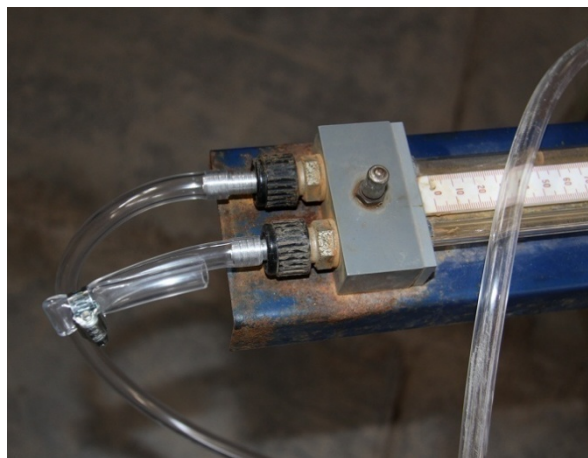
شکل ۲-۳۰: استفاده از آب‌بند لاستیکی برای سیل کردن پیتوت



شکل ۲-۳۱: مسدود کردن ورودی دبی سنج



شکل ۲-۳۲: نحوه‌ی بسته شدن لوله پیتوت



شکل ۲-۳۳: نحوه‌ی تزریق هوا و مسدود کردن خروجی مانومتر

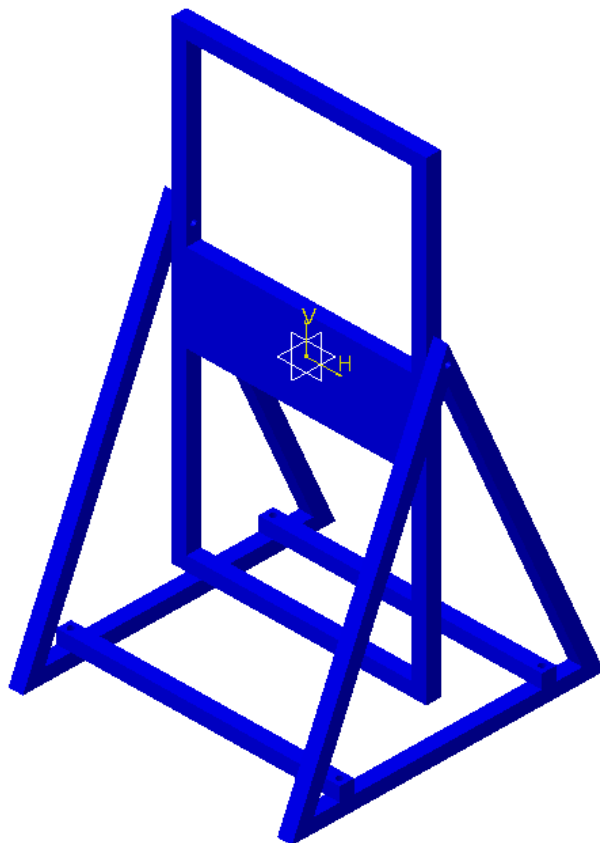
برای تست نشتی دبی‌سنج طراحی شده، هوا با فشار ۳ بار از طریق شیلنگ رابط وصل شده به پیتوت، در دبی‌سنج تزریق شد. سپس تمامی اتصالات با استفاده از کف صابون چک شد و در اتصالات نشتی هوا مشاهده نشد. در شکل ۲-۳۴ نمای کلی از تست نشتی دبی‌سنج نشان داده شده‌است.



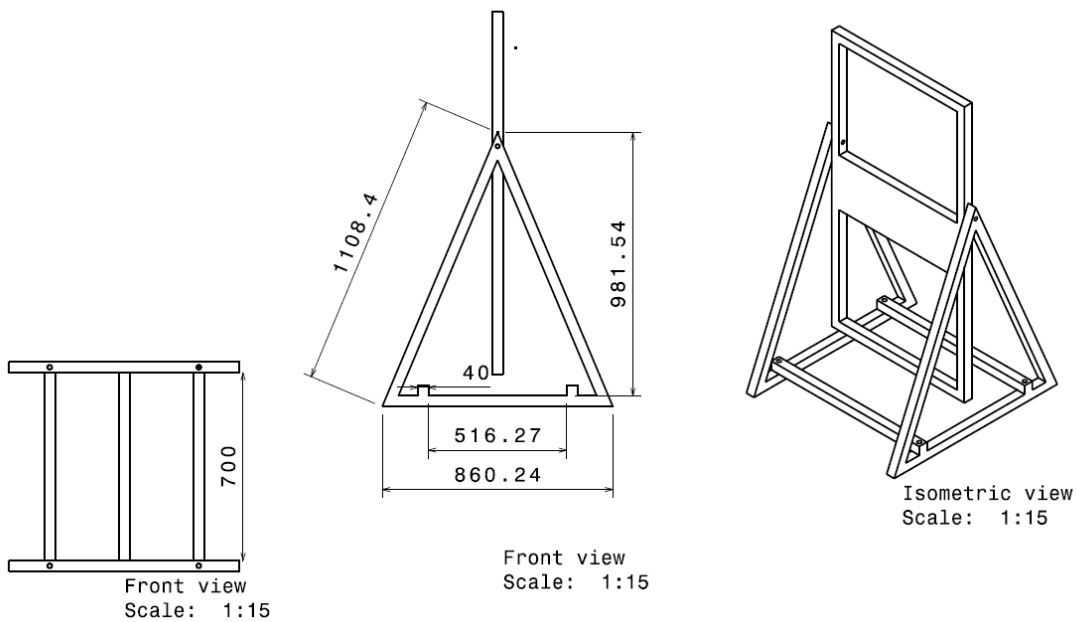
شکل ۲-۳۴: نمای کلی از تست نشتی دبی‌سنج

طراحی و ساخت بورد و پایه‌ی دوران

از آنجایی که دقت محاسبه‌ی دبی‌گاز وابسته به دقت محاسبه‌ی اختلاف فشار استاتیک و سکون توسط مانومتر می‌باشد پس نحوه‌ی قرارگیری مانومتر و شیب آن بسیار با اهمیت است. برای کاهش خطا در نمایش فشار و قرائت اختلاف فشارهای کم توسط مانومتر یک بورد و پایه‌ی دوران طراحی و ساخته شد. طراحی بورد و پایه‌ی دوران با استفاده از نرم‌افزار CATIA انجام شد. طرح کلی بورد و پایه در شکل ۲-۳۵ و نقشه‌ی ایزومتریک طرح در شکل ۲-۳۶ نشان داده شده‌اند.



شکل ۲-۳۵: طرح کلی بورد و پایه‌ی دوران



شکل ۲-۳۶: نقشه‌ی ایزومتریک طرح

در شکل ۲-۳۷ بورد ساخته شده برای نصب مانومتر نشان داده شده است. این بورد به گونه‌ای ساخته شده که می‌توان روی آن مانومتر و ۴ عدد شیر گازی نصب نمود. همانطور که در ادامه ذکر خواهد شد از طریق این شیرها می‌توان فشار استاتیک، سکون و اختلاف فشار سکون با استاتیک را اندازه‌گیری کرد.



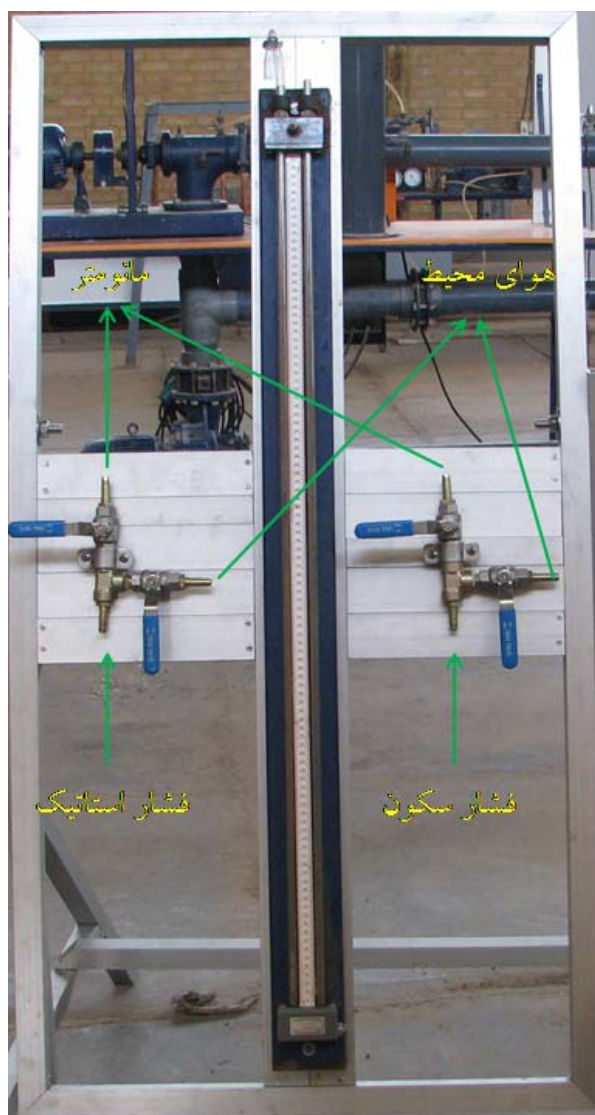
شکل ۲-۳۷: بورد جهت نصب مانومتر

پس از ساخت بورد آلومینیومی، مانومتر مانند آنچه که در شکل ۲-۳۸ نشان داده شده نصب می‌شود. از طریق بورد می‌توان مانومتر را روی پایه‌ای قابل دوران قرار داد تا خطای اندازه‌گیری فشار به حداقل برسد.



شکل ۲-۳۸: نحوه‌ی اتصال مانومتر به بورد

بورد به‌گونه‌ای طراحی شده که دو طرف مانومتر می‌توان اتصالات و شیرهای بکار رفته در ساخت دبی‌سنج را نصب کرد. نحوه‌ی نصب شیرهای بکار رفته در ساخت دبی‌سنج در شکل ۲-۳۹ نشان داده شده‌است. همچنین در شکل ۲-۳۹ محل اتصال شیلنگ‌های رابط مانومتر، فشار سکون و استاتیک مشخص شده‌است.



شکل ۲-۳۹: نحوه‌ی اتصال شیرها به بورد

شیرهای به کار رفته در ساخت دبی سنج می‌بایست در فشار حدود ۴ بار برای گاز نشتی نداشته باشند. ابتدا برای دبی سنج شیرهایی تهیه شد که برای گاز، آب و مواد هیدروکربنی قابل استفاده بودند و روی آنها تست نشتی هوا در فشار ۴ بار صورت گرفت و نشتی مشاهده نشد. اما از آنجایی که احتمال داشت پس از باز و بسته کردن مکرر دچار نشتی شوند، با شیرهای مرغوب‌تری از جنس استنلس استیل که منحصرًا برای گاز بکار می‌روند تعویض شدند. در شکل ۲-۴۰ یکی از شیرهای مورد استفاده گاز، آب و مواد هیدروکربنی و یکی از شیرهای مورد استفاده منحصرًا گاز نشان داده شده‌است.



شکل ۲-۴۰: تصویری از شیرهای استفاده شده در دبی سنج

در مانومتر فشار از طریق تغییر ارتفاع ستون مایع داخل آن اندازه‌گیری می‌شود. برای کاهش خطای اندازه‌گیری فشار توسط مانومتر، بورد مانومتر روی پایه‌ای قابل دوران قرار گرفت. تا کاربر بتواند مانومتر را در زوایای مختلف نسبت به حالت عمود تنظیم کند. با افزایش زاویه‌ی مانومتر نسبت به حالت عمود می‌توان اختلاف فشارهای کم را با دقت خوبی اندازه‌گیری کرد. پس از کامل شدن نصب اتصالات روی بورد مانومتر، بورد مانند آنچه که در شکل ۲-۴۱ نشان داده شده به پایه متصل می‌شود به گونه‌ای که بتوان آنرا براحتی باز و بسته نمود تا در زوایای مختلف نسبت به عمود قابل تنظیم باشد.



شکل ۲-۴۱: نحوه‌ی اتصال بورد مانومتر به پایه

همانطور که در شکل ۲-۴۲ نشان داده شده زمانی که مانومتر اختلاف ارتفاع L را نشان دهد و بورد با عمود زاویه‌ی θ بسازد، اختلاف ارتفاع سیال داخل مانومتر $L \sin \theta$ خواهد شد. از آنجایی که $\sin \theta$ همواره کوچکتر از یک است پس اختلاف فشارهای کم را با دقت خوبی می‌توان اندازه‌گیری کرد.



شکل ۲-۴۲: بورد مانومتر در حالت زاویه‌دار

تست نشتی دبی سنج

پس از اتصال بورد مانومتر به پایه‌ی دوران، شیلنگ‌های رابط بین شیرها و مانومتر مانند شکل ۴۳-۲ و شیلنگ‌های رابط بین شیرها و لوله‌ی پیتو-استاتیک مانند شکل ۴۴-۲ وصل می‌شوند. نمای کلی دبی سنج در شکل ۴۵-۲ نشان داده شده‌است.



شکل ۴۳-۲: نحوه‌ی اتصال مانومتر به شیرها



شکل ۴۴-۲: نحوه‌ی بسته شدن لوله پیتو-استاتیک به بورد مانومتر

در شکل ۲-۴۵ زمانی که شیرهای ۱ و ۳ بسته و شیرهای ۲ و ۴ باز باشد، مانومتر فشار استاتیک را مشخص می‌کند، اگر شیرهای ۲ و ۴ بسته و شیرهای ۱ و ۳ باز باشند، مانومتر فشار سکون را نشان می‌دهد. در حالتی که شیرهای ۲ و ۳ بسته و شیرهای ۱ و ۴ باز باشند، مانومتر اختلاف فشار استاتیک با سکون را تعیین می‌کند.

شرط آنکه بتوان دبی درست را با این دبی‌سنج محاسبه نمود این است که فشارهای سکون و استاتیک با دقت بیشتری تعیین شوند. برای تعیین دقیق فشار، سیستم طراحی شده می‌بایست بدون نشتی باشد. پس تست نشتی دبی‌سنج طراحی شده قبل استفاده از آن ضروری است.



شکل ۲-۴۵: کل تجهیزات دبی‌سنج ساخته شده

برای تست نشتی دبی سنج طراحی شده، هوا با فشار ۴ بار مانند آنچه در شکل ۲-۴۶ نشان داده شده در دبی سنج تزریق شد. سپس تمامی اتصالات با استفاده از کف صابون چک شد. در شکل ۲-۴۷ نمای کلی از تست نشتی دبی سنج نشان داده شده است.



شکل ۲-۴۶: تزریق هوا به دبی سنج



شکل ۲-۴۷: نمای کلی از تست نشتی دبی سنج

برای چک نشتی گاز از کف صابون استفاده شد و مشاهده شد که در اتصالات شیرها و مانومتر نشتی وجود دارد. نشتی اتصالات شیرها در شکل ۲-۴۸ و نشتی مانومتر در شکل ۲-۴۹ نشان داده شده‌اند. در ادامه نشتی دبی سنج جهت استفاده در تست تجربی برطرف خواهد شد.



شکل ۲-۴۸: نشستی در اتصالات شیرها



شکل ۲-۴۹: نشستی در مانومتر

کالیبراسیون دبی سنج طراحی شده

با هماهنگی صورت گرفته با همکاران بخش اندازه‌گیری و تعمیرات، گروه تحقیقاتی در محل ایستگاه حضور یافته و مطابق با نقشه‌ی از پیش تعیین شده، دبی سنج و تجهیزات را بر روی خط اصلی نصب نمودند (شکل ۲-۵۰). با توجه به عدم کالیبراسیون دبی سنج جدید در ابتدا می‌بایست کالیبراسیون صورت گیرد. بدین منظور پس از نصب دبی سنج طراحی شده روی خط خروجی، بعد از بررسی نشستی و آب بندی سیستم، با تنظیم فشار خط ورودی روی ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵، ۳۰، ۳۵، ۴۰، ۴۵، ۵۰ و ۵۵ psig و اجازه‌ی خروج جریان در زمان ۳ دقیقه برای هر یک از فشارها، دبی جریان از روی کنتور قرائت شده و همچنین با استفاده از فشارهای سکون و استاتیک خوانده شده توسط مانومترها، مقدار دبی توسط دبی سنج محاسبه شده است. مقادیر دبی قرائت شده از روی دبی سنج توربینی و مقادیر دبی محاسبه شده در جدول ۲-۳ ارائه شده است.

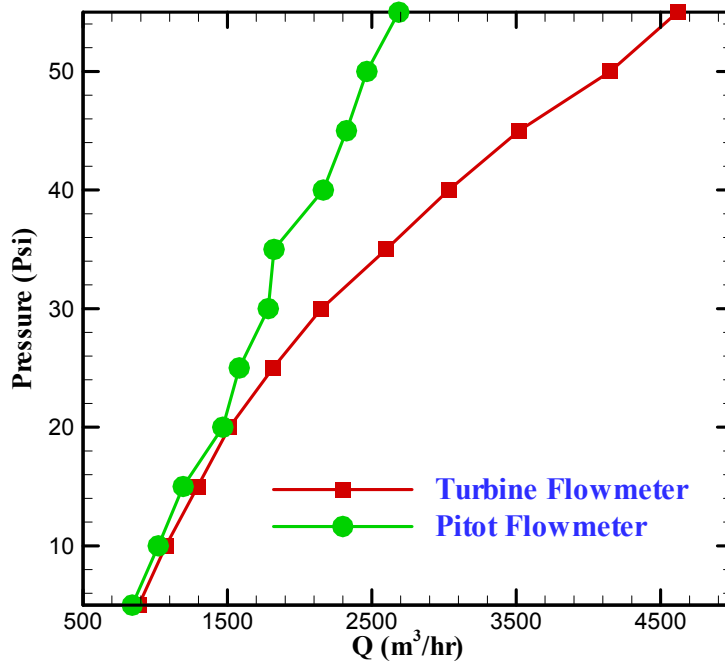


شکل ۲-۵۰: مراحل مختلف نصب تجهیزات بر روی خط اصلی

جدول ۲-۳: دبی قرائت شده از روی کنتور توربینی و دبی سنج طراحی شده

درصد خطا	دبی محاسبه شده (مترمکعب بر ساعت)	دبی قرائت شده از کنتور توربینی (مترمکعب بر ساعت)	فشار (psig)
۵	۸۴۱	۸۸۶	۵
۵	۱۰۲۱	۱۰۷۴	۱۰
۸	۱۱۹۴	۱۲۹۴	۱۵
۳	۱۴۶۸	۱۵۱۴	۲۰
۱۳	۱۵۸۲	۱۸۱۶	۲۵

در شکل ۲-۵۱ نیز مقادیر دبی‌های کنتور توربینی و دبی سنج طراحی شده ارائه گردیده است.



شکل ۲-۵۱: مقادیر اندازه‌گیری شده دبی توسط کنتورتوربینی و دبی‌سنج طراحی شده

با توجه به اینکه دبی‌سنج توربینی دارای محدودیت دبی ماکزیمم ۱۶۰۰ مترمکعب بر ساعت می‌باشد، از این رو اطلاعات آن در دبی‌های بالاتر از این مقدار صحیح نبوده و قابل استناد نمی‌باشد. در هر صورت با توجه به شکل ۲-۵۱ مشاهده می‌گردد که در مقادیر کمتر از این دبی ماکزیمم، نتایج هر دو دبی‌سنج بسیار به هم نزدیک می‌باشد. از اینرو به منظور کالیبراسیون دبی‌سنج طراحی شده تنها از داده‌های مربوط به مرحله‌ی ۱ تا ۴ استفاده شده‌است. رابطه‌ی بین دبی حجمی جریان و سرعت مطابق با ذیل ارائه شده بود:

$$Q = 0.8V.A \quad (۴-۲)$$

با کمی عملیات ریاضی، جهت به حداقل رساندن خطای محاسبات و کالیبراسیون دبی‌سنج می‌توان ضریب ۰/۸۴۴۱ را در معادله فوق جایگزین نمود. در این حالت مقدار دبی از رابطه‌ی ذیل محاسبه می‌گردد.

$$Q = 0.8441V.A \quad (۵-۲)$$

با اعمال ضریب فوق، درصد خطاها تا مرحله‌ی ۴ مطابق با جدول ذیل تغییر می‌نماید.

جدول ۲-۴: درصد خطا بین دبی قرائت شده از روی کنتور توربینی و دبی سنج طراحی شده بعد از کالیبراسیون

مرحله	درصد خطا
۱	۰/۱۵
۲	۰/۳۲
۳	-۲/۶۶
۴	۲/۳۲

انجام تست جهت کالیبراسیون نرم افزار

پس از انجام تست کالیبراسیون دبی سنج، نوبت به کالیبره کردن نرم افزار می‌رسد. برای این منظور، دبی سنج توربینی از روی خط باز شده و تنها دبی سنج طراحی شده همراه با یک لوله‌ی رابط بر روی خط اصلی سوار می‌شوند (شکل ۲-۵۲).



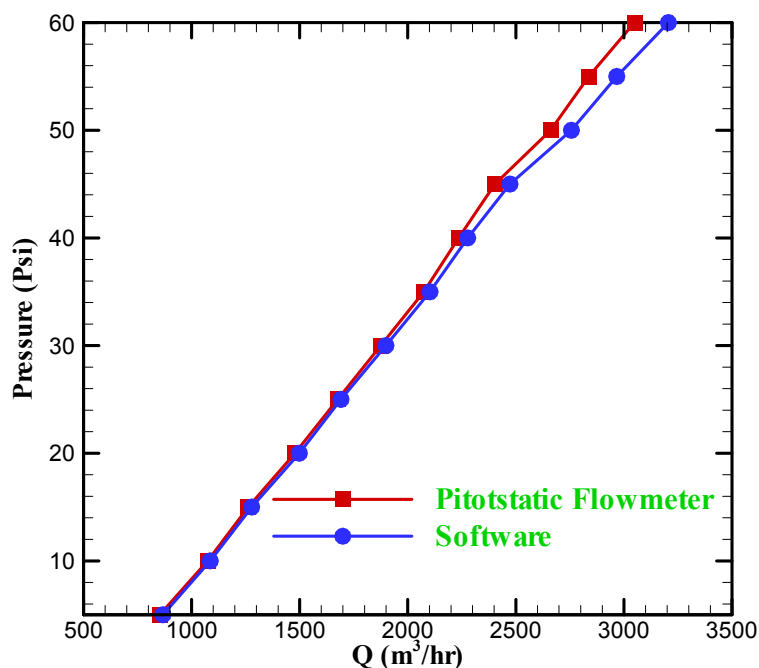
شکل ۲-۵۲: نصب دبی سنج و لوله‌ی رابط بر روی خط اصلی

در این مرحله نیز مجدداً فشار خط اصلی از ۵ تا ۶۰ psig تغییر داده شد و مقادیر فشار سکون و استاتیک جریان درون لوله اندازه‌گیری شده‌است. مقادیر فشار قرائت شده از فشار سنج‌ها در جدول ۲-۵ ارائه شده‌است.

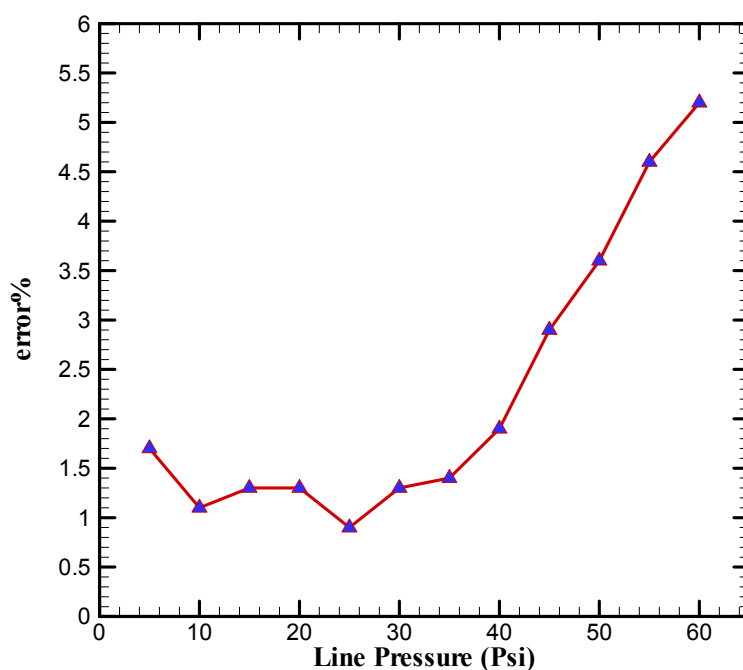
جدول ۲-۵: دبی قرائت شده از روی کنتور توربینی و دبی سنج طراحی شده

فشار خط (psig)	فشار استاتیک (psig)	فشار سکون (psig)
5	0.038	0.95
10	0.057	1.52
15	0.114	2.147
20	0.209	3.021
25	0.285	3.933
30	0.475	5.054
35	0.703	6.308
40	1.007	7.467
45	1.653	8.873
50	2.641	11.077
55	3.838	12.806
60	5.225	14.858

مطابق با جدول فوق مشاهده می‌شود که اختلاف چشمگیری بین فشار خط و فشار سکون جریان وجود دارد. به عبارتی اثرات اتصالات و یا اصطکاک موجود در جدارها به نحوی می‌باشد که چنین افتی را نتیجه می‌دهد. در طراحی نرم‌افزار فشار خط به عنوان فشار سکون جریان درون لوله تلقی می‌گردد. حال با توجه به اختلاف فاحش این دو مقدار، نمی‌توان از فشار خط به عنوان ورودی نرم‌افزار استفاده نمود و می‌بایست فشار سکون اندازه‌گیری شده توسط پیتوت را به عنوان تخمینی از فشار سکون اولیه در اختیار نرم‌افزار قرار داد. پیش‌بینی می‌شود با تکمیل نرم‌افزار و تصحیح ضرایب اصطکاکی این مسئله نیز مرتفع شده و بتوان از فشار خط به عنوان داده‌ی ورودی استفاده نمود. خطای مقادیر دبی اندازه‌گیری شده توسط دبی‌سنج و محاسبه شده توسط نرم‌افزار در شکل ۲-۵۳ ارائه شده‌است.



شکل ۲-۵۳: دبی اندازه‌گیری شده توسط دبی‌سنج و محاسبه شده توسط نرم‌افزار خطای بین مقادیر اندازه‌گیری شده و محاسبه شده نیز در شکل ۲-۵۴ ارائه شده است.



شکل ۲-۵۴: نصب دبی‌سنج و لوله‌ی رابط بر روی خط اصلی

مشاهده می‌گردد که چنانچه فشار سکون جریان به درستی به نرم‌افزار داده شود، نرم‌افزار از توانایی محاسبه‌ی دبی با دقت بالایی برخوردار است. تصحیح اثرات افت‌ها، اثر بسزایی در محاسبه‌ی دبی داشته و از اینرو به عنوان فاز بعدی تکمیل نرم‌افزار مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته است.

۶.۱.۲ تست تجربی شماره شش

نتایج ذکر شده در زیربخش قبل نشان داد که اختلاف چشمگیری بین فشار خط (قبل از انشعاب و یا فشار بعد از رگولاتور) و فشار سکون جریان وجود دارد. به عبارتی اثر اتصالات و یا اصطکاک موجود در جدارها به نحوی می‌باشد که چنین افتی را نتیجه می‌دهد. در طراحی نرم‌افزار، فشار خط به عنوان فشار سکون جریان درون لوله تلقی می‌گردد. حال با توجه به اختلاف فاحش این دو مقدار، نمی‌توان از فشار خط به عنوان ورودی نرم‌افزار استفاده نمود. افت فشار در اتصالات قبل از ورودی لوله نیز تاثیر به‌سزایی در محاسبه‌ی دبی داشته، پس برای رفع این مشکل می‌بایست با تصحیح ضرایب اصطکاکی و طول معادل، فشار خط را به‌عنوان داده‌ی ورودی نرم‌افزار تعریف کرد تا کاربر بتواند با وارد کردن فشار خط در نرم‌افزار میزان دبی هدررفت را مشاهده نماید.

پس در ادامه‌ی فعالیت‌های قبل برای تصحیح ضرایب اصطکاکی تست تجربی جدیدی صورت گرفت. در این زیربخش پس از توضیح مراحل نصب و تست نشستی دبی‌سنج، نحوه‌ی اندازه‌گیری فشار ورودی و دمای خروجی جریان گاز ذکر شده و در نهایت نتایج بدست آمده مورد بررسی قرار می‌گیرد.

نصب دبی‌سنج و تست نشستی آن

در این مرحله برای اندازه‌گیری فشار ورودی لوله و میزان افت فشار در اتصالات قبل از لوله، محل نصب دبی‌سنج نسبت به تست قبل تغییر داده شده‌است. در شکل ۲-۵۵ محل نصب دبی‌سنج برای تست قبل و در شکل ۲-۵۶ محل نصب آن در تست اخیر نشان داده شده‌است.



شکل ۲-۵۵: محل نصب دبی‌سنج در تست قبل



شکل ۲-۵۶: محل نصب دبی سنج در تست اخیر

قبل از انجام تست تجربی، دبی سنج طراحی شده و سایر تجهیزات مربوط به آن در فشار ۶۰ psi تست نشتی شد. پس از اطمینان از عدم نشتی سیستم، تست تجربی در محدوده‌ی فشار ۵ تا ۶۰ psi شروع شد. در ادامه به تشریح تست تجربی و تحلیل نتایج آن پرداخته می‌شود.

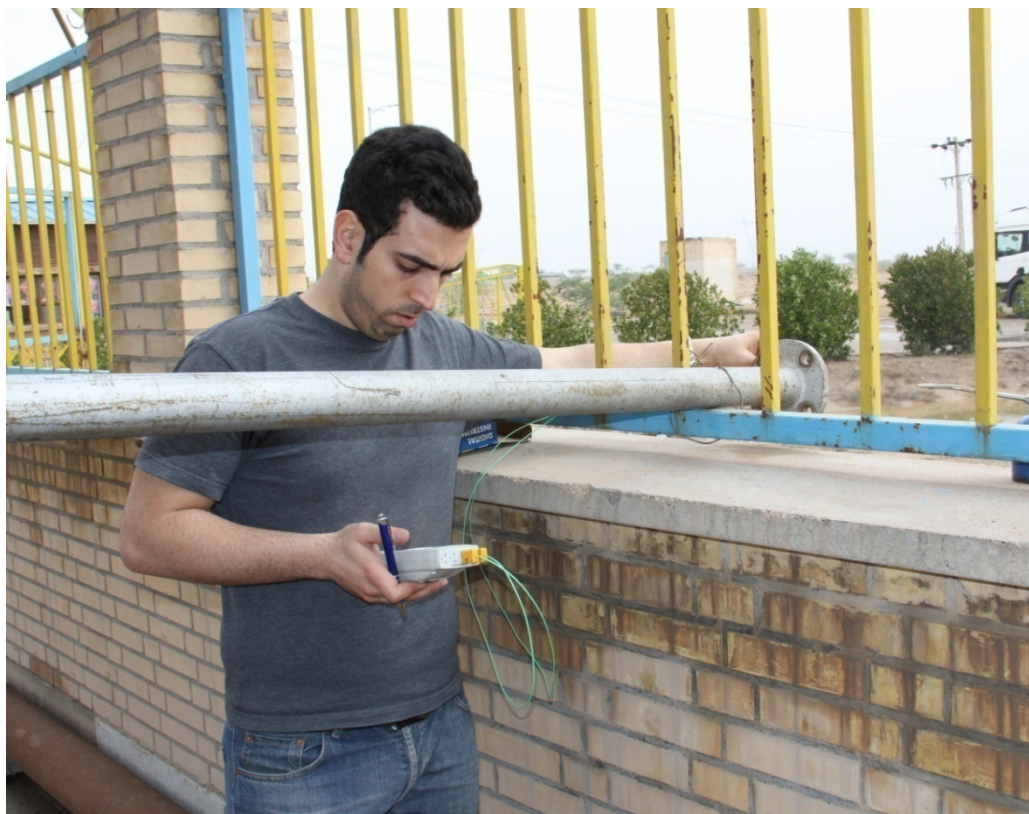
اندازه‌گیری افت فشار اتصالات و دمای جریان گاز خروجی

پس از بسته شدن تجهیزات و اطمینان از نداشتن نشتی آنها، مقادیر اختلاف فشار (بین فشار سکون و استاتیک)، فشار سکون و استاتیک بعد از اتصالات (ورودی لوله) و همچنین مقادیر دمای جریان گاز خروجی در محدوده‌ی ۵ تا ۶۰ psi از فشار خط اندازه‌گیری شد. شکل ۲-۵۷ مانومتر ساخته شده در دانشگاه چمران را نشان می‌دهد که برای پیدا کردن مقادیر اختلاف فشار، فشار سکون و استاتیک بعد از اتصالات، از آن استفاده شد. شکل ۲-۵۸ اندازه‌گیری دمای جریان گاز خروجی را با استفاده از ترمومتری که سنسور دمای آن در مسیر جریان گاز قرار داده شده را نشان می‌دهد.

ترمومتر استفاده‌شده در این تست مدل SWU-801-WIN از شرکت Lutron بوده و در شکل ۲-۵۹ نشان داده شده‌است. همانطور که در شکل ۲-۶۰ مشاهده می‌شود در این ترمومتر می‌توان ۴ سنسور از نوع K یا J را بطور همزمان نصب نمود. در ادامه به بررسی نتایج حاصل از تست تجربی پرداخته می‌شود.



شکل ۲-۵۷: اندازه‌گیری اختلاف فشار، فشار سکون و استاتیک در ورودی لوله



شکل ۲-۵۸: اندازه‌گیری دمای جریان گاز خروجی



شکل ۲-۵۹: ترمومتر استفاده شده برای اندازه‌گیری دمای جریان گاز خروجی



شکل ۲-۶۰: محل نصب سنسور دما در ترمومتر

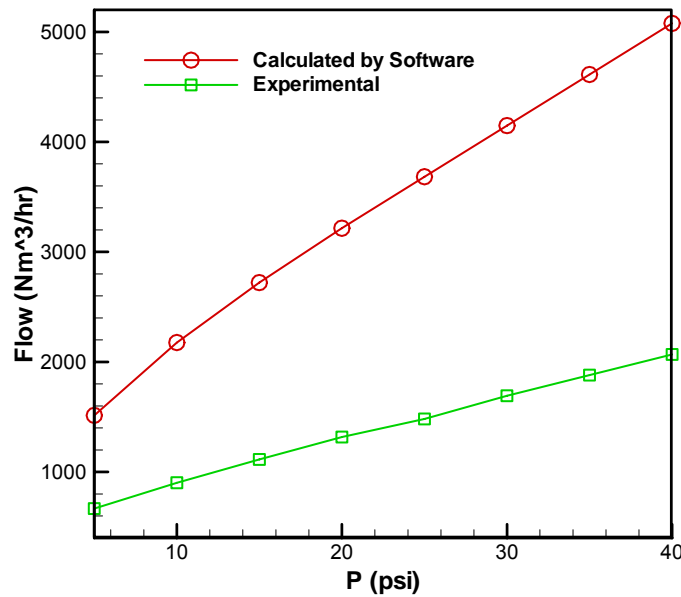
نتایج تست تجربی

نتایجی که از تست تجربی دستگاه دبی سنج به دست آمده در جدول ۲-۶ نشان داده شده است.

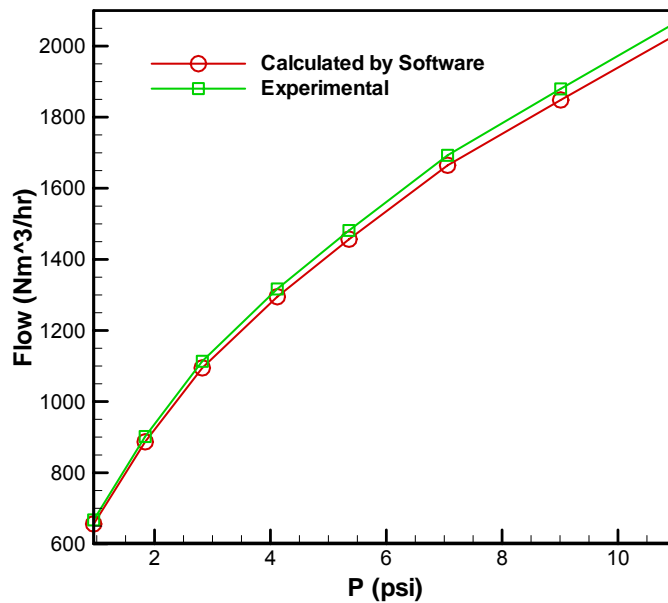
جدول ۲-۶: نتایج تست تجربی دبی سنج

دمای خروجی (°C)	دبی اندازه‌گیری شده ($\frac{Nm^3}{h}$)	فشار استاتیک اندازه‌گیری شده (psi)	فشار سکون اندازه‌گیری شده (psi)	فشار خط (psi)
12	667.0534	0.9475	1.566279	5
11.3	901.8658	1.83699	2.803833	10
10.7	1113.404	2.82317	4.060723	15
10.1	1316.963	4.11873	5.917054	20
9.8	1481.478	5.35629	7.347976	25
9.4	1692.835	7.05792	10.01645	30
8.4	1879.704	9.01094	11.81477	35
7.7	2068.376	11.022	14.19319	40
6.3	2279.004	13.4197	-	45
5.9	2450.532	15.4694	-	50

هدف این تست، تصحیح ضرایب اصطکاکی می‌باشد تا بتوان فشار خط را به‌عنوان داده‌ی ورودی نرم‌افزار تعریف کرد. در این صورت کاربر می‌تواند با وارد کردن فشار خط در نرم‌افزار میزان دبی هدررفت را مشاهده نماید. در شکل ۲-۶ دبی محاسبه‌شده توسط نرم‌افزار با وارد نمودن فشار سکون خط نشان داده‌شده است. اگر به‌جای فشار سکون خط (قبل از انشعاب)، فشار سکون اندازه‌گیری شده توسط دبی‌سنج به نرم‌افزار داده‌شود، به‌عنوان مثال در مرحله‌ی اول به‌جای فشار ۵ psi، فشار ۱/۵ psi به نرم‌افزار داده‌شود، طبق شکل ۲-۶ مشاهده می‌شود که جواب‌ها از دقت بسیار خوبی برخوردار خواهند بود. لذا باید میزان افت لوله و اتصالات بین خط و دبی‌سنج را محاسبه نموده تا اختلاف بین فشار سکون خط و فشار سکون اندازه‌گیری شده به حداقل برسد بدین‌وسیله می‌توان دقت جواب‌ها را بالا برد.



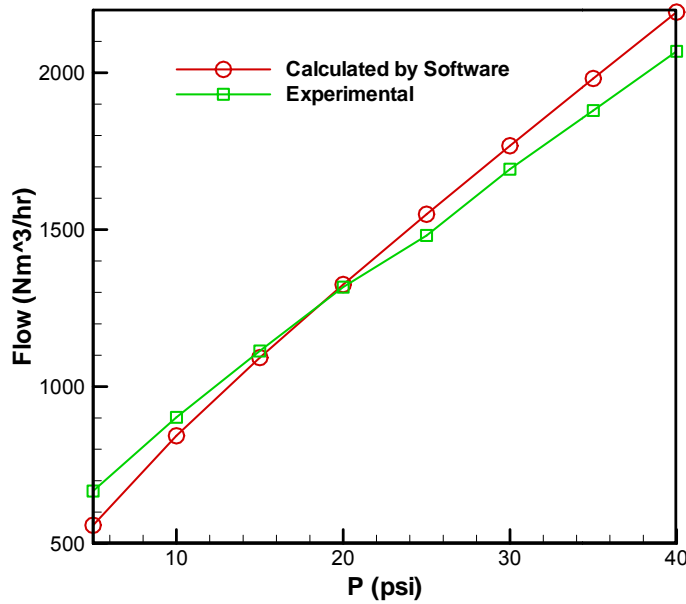
شکل ۲-۶۱: مقایسه دبی‌های به‌دست آمده از تست و نرم‌افزار بر حسب فشار خط اصلی



شکل ۲-۶۲: مقایسه دبی‌های به‌دست آمده از تست و نرم‌افزار بر حسب فشار سکون اندازه‌گیری شده توسط

دبی سنج

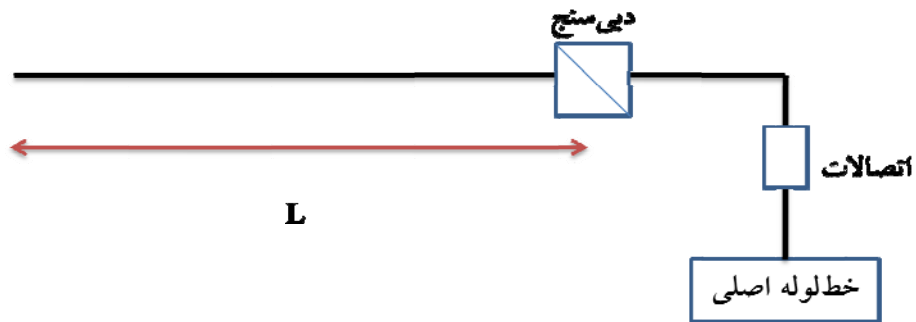
در حال حاضر رابطه‌ای که بتوان میزان افت فشار حاصل از اتصالات را تخمین زد در دست نمی‌باشد. روش معمول برای بدست آوردن میزان افت فشار استفاده از طول معادل می‌باشد. برای چک نمودن دقت این روش، طول معادل را با سعی و خطا برای هر فشار به‌دست آورده و سپس متوسط طول معادل را محاسبه می‌نماییم که مقدار ۵۰/۹۸ متر برای این تست به‌دست می‌آید. با این طول معادل، دبی برای فشارهای مختلف به‌دست آمد و نتایج با دبی تجربی مقایسه شده و در شکل ۲-۶۳ نشان داده شده‌است.



شکل ۶۳-۲: مقایسه دبی‌های به دست آمده از تست و نرم‌افزار بر حسب فشار خط با روش طول معادل همان طور که از شکل ۶۳-۲ بر می‌آید، با استفاده از طول معادل مناسب در هر فشار می‌توان دبی‌ها را با دقت مناسبی تعیین نمود. به منظور اطمینان از روند محاسبه‌ی طول معادل، می‌بایست قبل از آن ضریب اصطکاکی مورد نظر را تصحیح نمود. در ابتدا از رابطه داری-ویسباخ^۱ برای به دست آوردن ضریب اصطکاک استفاده شده که به صورت معادله (۶-۲) نشان داده شده است.

$$\Delta P = \frac{1}{2} \rho f \frac{L}{D} V^2 \quad (6-2)$$

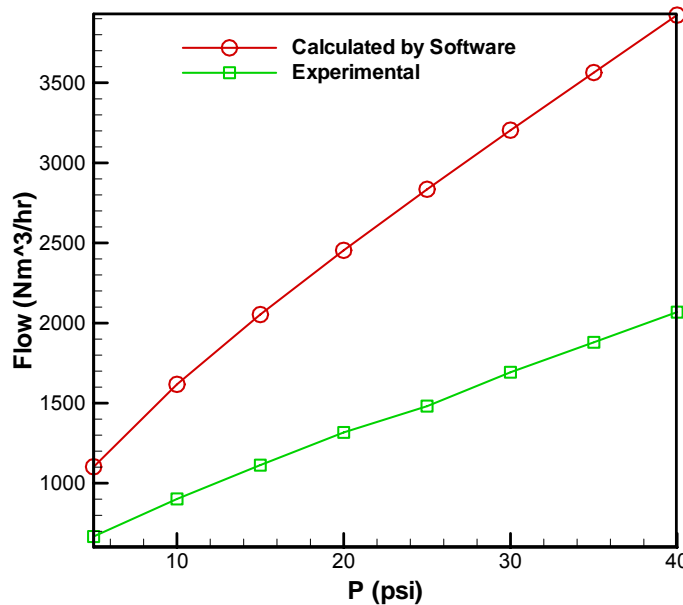
بر اساس معادله‌ی فوق و با داشتن اختلاف فشار، طول (شکل ۶۴-۲)، سرعت و چگالی می‌توان ضریب اصطکاک را تعیین نمود. مطابق با شکل ۶۴-۲ اختلاف فشار بین فشار استاتیک نقطه‌ی اندازه‌گیری شده توسط لوله پیتوت (مکان دبی سنج) و فشار در خروجی لوله (فشار اتمسفر) محاسبه می‌شود.



شکل ۶۴-۲: فاصله‌ی L جهت تعیین ضریب اصطکاک

¹ Darcy-Weisbach equation

محاسبات ضریب اصطکاک برای فشارهای اندازه‌گیری شده انجام شده و پس از متوسط‌گیری، ضریب اصطکاک ۰/۰۵۲ به دست آمد. در مرحله بعد برای اطمینان از میزان دقت ضریب اصطکاک به دست آمده، نمودار دبی محاسبه شده بر اساس این ضریب اصطکاک و دبی تجربی رسم شده که در شکل ۲-۶۵ نشان داده شده است.



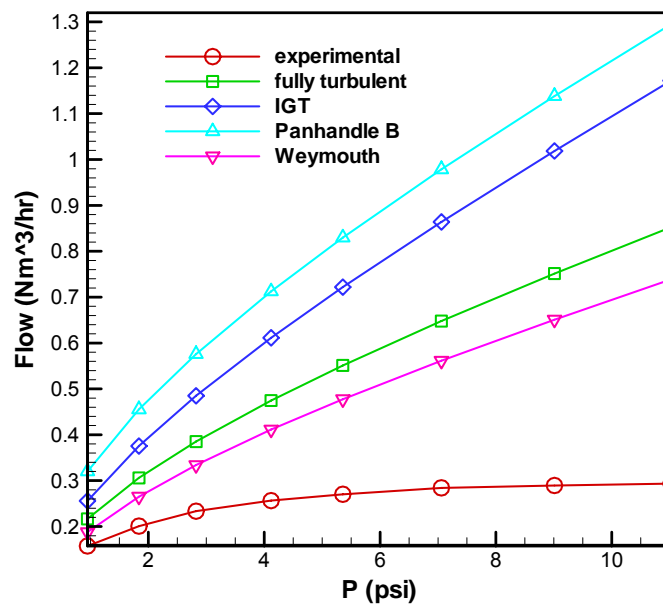
شکل ۲-۶۵: مقایسه دبی‌های به دست آمده از تست و نرم‌افزار بر حسب فشار خط پس از تصحیح ضریب اصطکاک

همان‌طور که از شکل ۲-۶۵ مشخص است، خطای محاسبات نرم‌افزار بسیار بالا می‌باشد. لذا این رابطه نمی‌تواند رابطه مناسبی برای به دست آوردن ضریب اصطکاک در شرایط تست باشد. در ادامه، چهار رابطه دیگر مطرح گردید که شامل روابط جریان کاملاً آشفته^۲ (AGA)، پنهندل ب^۳، IGT و ویموث^۴ می‌باشند [۱]. مقایسه نتایج به دست آمده از این روابط با نتایج تجربی در شکل ۲-۶۶ نشان داده است. با توجه به شکل، نتایج به دست آمده از نرم‌افزار برای چهار روش ذکر شده از دقت مناسبی برخوردار نمی‌باشند. علت اینکه این روابط برای به دست آوردن ضریب اصطکاک در این تست مناسب نمی‌باشند، اینست که این روابط برای سرعت‌های کم در حدود ۱۲ تا ۱۷ متر بر ثانیه قابل کاربرد می‌باشند ولی سرعت در لوله مورد تست بسیار بیشتر از این مقدار می‌باشد [۱]. از اینرو جهت مدل‌سازی افت و تعیین ضریب اصطکاک می‌بایست روش دیگری را اتخاذ نمود.

² Fully Turbulent

³ Panhandle B

⁴ Weymouth



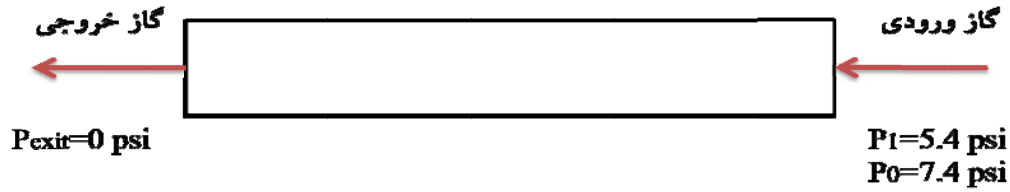
شکل ۲-۶: مقایسه دبی‌های به دست آمده از تست و چهار روش ذکر شده بر حسب فشار دبی سنج

۷.۱.۲ مدل‌سازی مسئله به کمک نتایج تست‌های تجربی

محاسبه‌ی دقیق دبی هدررفت گاز نیازمند محاسبه‌ی دقیق افت فشار در اتصالات و یا ارائه تخمین مناسب از یک طول معادل می‌باشد. جهت بدست آوردن طول معادل نیز می‌بایست ضریب اصطکاک محاسبه گردد. در زیربخش پیش نشان داده شد که روابط موجود برای محاسبه‌ی ضریب اصطکاک، مربوط به سیال تراکم‌ناپذیر یا سیال تراکم‌پذیر در محدوده‌ی سرعت‌های پایین بوده و از اینرو جهت مدل‌سازی مسائلی که سرعت گاز در آن بالای 10 m/s می‌باشد قابل استفاده نیستند. جهت رفع این مشکل ناگزیر می‌بایست معادلات حاکم بر مسئله به صورت عددی حل شوند. جهت رفع این نیاز نرم‌افزار Fluent به عنوان یکی از ابزارهای اصلی در حل عددی جریان‌های سیال مورد استفاده قرار گرفته است. در این زیربخش نحوه‌ی مدل‌سازی و نتایج حاصل از آن ارائه شده است.

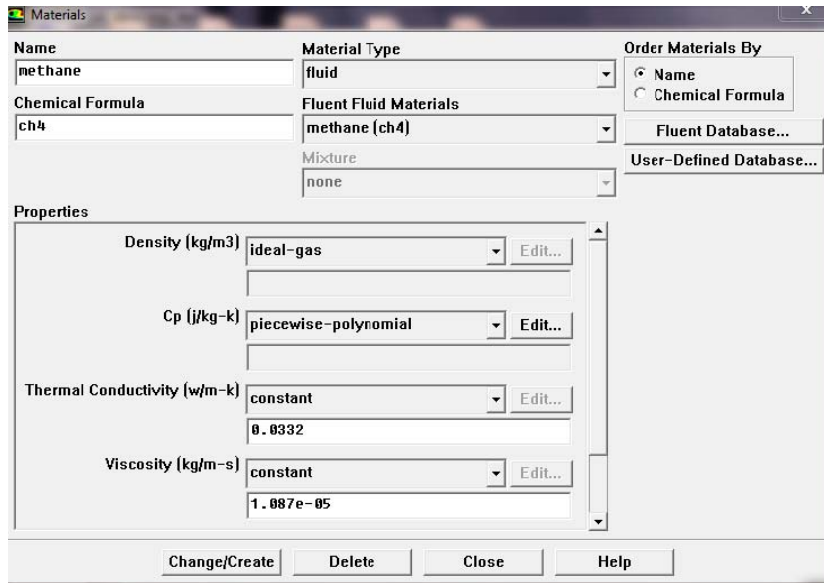
مدل‌سازی و حل جریان درون لوله

این مدل بر اساس نتایج تجربی بدست آمده در تست شماره شش در فشار خط 25 psi در نرم‌افزار Fluent مدل‌سازی شده است. در این مرحله فشار استاتیک و سکون توسط لوله پیتوت در ابتدای لوله اندازه‌گیری شده که به عنوان شرایط مرزی در مدل مورد نظر مورد استفاده قرار می‌گیرند. شماتیکی از مدل مورد نظر در شکل ۲-۶ نشان داده شده که در این مدل فشار استاتیک و سکون ورودی لوله به ترتیب $5/4\text{ psi}$ و $7/4\text{ psi}$ بوده و به عنوان شرایط مرزی اعمال شدند.

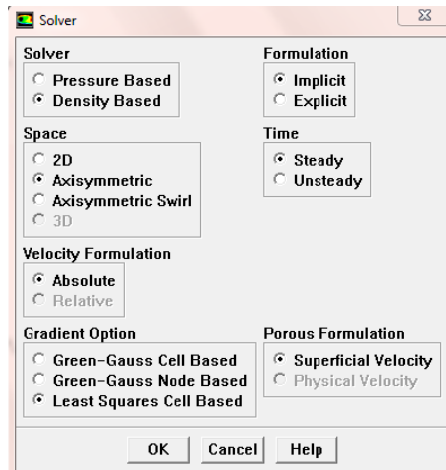


شکل ۲-۶۷: شمای کلی از مدل مسئله

از آنجایی که گاز طبیعی بیشتر از متان تشکیل شده در نرم افزار، متان بعنوان سیال درون لوله انتخاب شده و جریان بصورت تراکم پذیر در نظر گرفته شده است (شکل ۲-۶۸). همانطور که در شکل ۲-۶۹ نشان داده شده، این مدل بصورت متقارن حول محور (Axisymmetric) در نظر گرفته شده است. یعنی با توجه به شکل ۲-۷۰ شبکه برای یک صفحه مشخص شده و از آنجایی که لوله نسبت به محور اصلی متقارن می باشد شکل کلی مسئله از دوران حول این محور ایجاد می شود. این محور در شکل ۲-۷۰ با رنگ زرد نشان داده شده است.



شکل ۲-۶۸: انتخاب متان بعنوان سیال

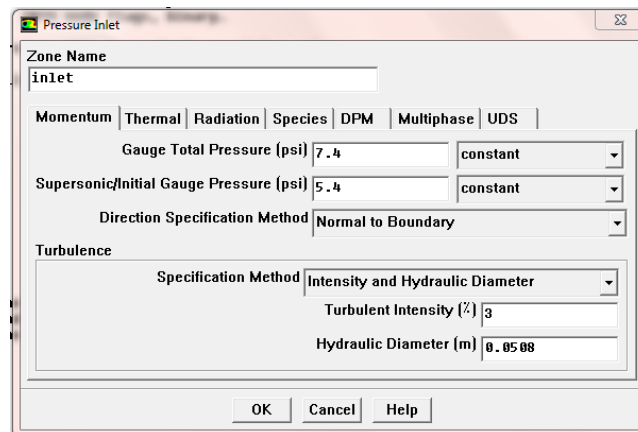


شکل ۲-۶۹: اعمال تراکم پذیر بودن سیال

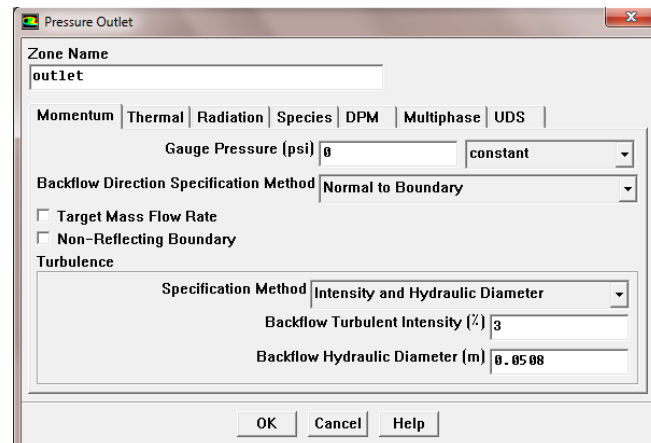
Zone Name	Pressure (psi)	Direction	Turbulence Intensity (%)	Hydraulic Diameter (m)
inlet	7.4	Normal to Boundary	3	0.0508
outlet	0	Normal to Boundary	3	0.0508

شکل ۲-۷۰: قسمتی از توزیع شبکه‌ی در محیط محاسباتی

شبکه‌ی تولید شده بر روی ناحیه‌ی محاسباتی در شکل ۲-۷۰ نشان داده شده است. در این مدل طول لوله ۴ متر، قطر لوله ۲ اینچ و جنس لوله، فولادی با زبری ۷۰۰ میکرواینچ در نظر گرفته شد. در این مدل‌سازی مقادیر اندازه‌گیری شده‌ی فشارهای استاتیک و سکون ورودی به لوله در تست تجربی، بعنوان شرایط مرزی ورودی تعریف شده و در شکل ۲-۷۱ نشان داده شده است. فشار نسبی خروجی صفر، بعنوان شرط مرزی خروجی تعریف شده که در شکل ۲-۷۲ آورده شده است. از نتایج تست تجربی قبل دمای ورودی به لوله اندازه‌گیری شده و در شرایط مرزی اعمال شده است. با قرار دادن مقادیر فشار ورودی و خروجی در نرم‌افزار مقادیر دبی حجمی، سرعت متوسط، عدد ماخ و ضریب اصطکاک در طول لوله محاسبه می‌شود.



شکل ۲-۷۱: فشار در شرایط مرزی ورودی

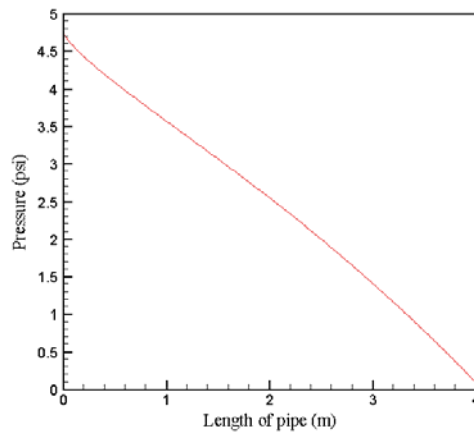


شکل ۲-۷۲: فشار در شرایط مرزی خروجی

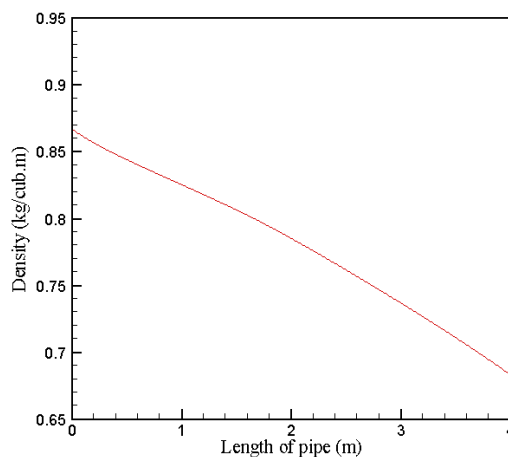
نتایج

پس از کامل شدن حل شبکه‌ی انتخاب شده برای لوله، توزیع مقادیر فشار استاتیک، دانسیته، دما، عدد رینولد، عدد ماخ و ضریب اصطکاک در طول لوله محاسبه می‌شود. پس از گذشت ۲۰ ساعت محاسبات مربوط به حل شبکه با دقت 0.0001 تمام شده و نتایج آن استخراج شد. فشار استاتیک ورودی به‌عنوان شرط مرزی $5/4$ psi تعریف شده در حالی که پس از پایان حل عددی شبکه مقدار محاسبه شده‌ی فشار استاتیک ورودی لوله $4/7$ psi می‌باشد. علت این امر در فعالیت‌های آتی بررسی خواهد شد.

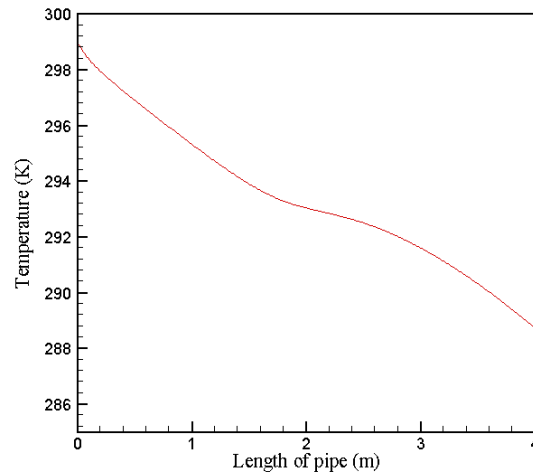
همانطور که در شکل ۷۳-۲ نشان داده شده، فشار استاتیک نسبی از $4/7$ psi در ورودی به حدود صفر در خروجی کاهش می‌یابد. یعنی همانطور که انتظار می‌رود در طول لوله فشار کاهش یافته و در خروجی به فشار نسبی نزدیک صفر (0.065 اتمسفر) می‌رسد. در طول لوله با کاهش شدید فشار و افزایش سرعت مقادیر دما و دانسیته کاهش می‌یابد. توزیع دانسیته و دما در طول لوله به ترتیب در شکل ۷۴-۲ و شکل ۷۵-۲ نشان داده شده‌اند.



شکل ۷۳-۲: توزیع فشار استاتیک در طول لوله

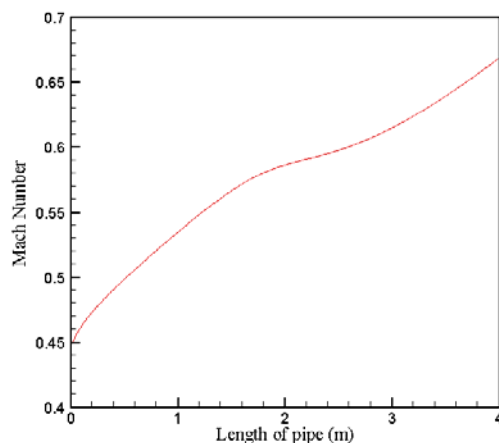


شکل ۷۴-۲: توزیع دانسیته‌ی گاز در طول لوله

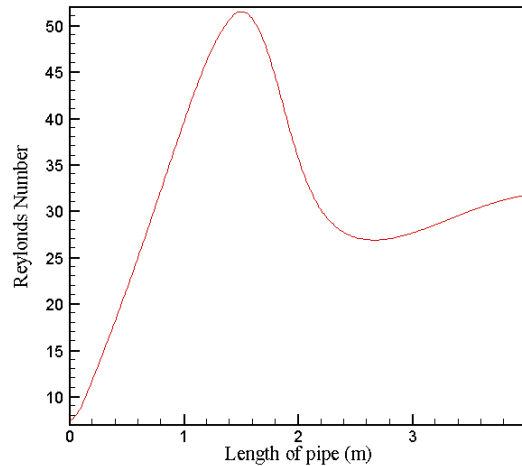


شکل ۷۵-۲: توزیع دما در طول لوله

در طول لوله سرعت افزایش یافته و با کاهش دما و دانسیته، سرعت صوت کاهش می‌یابد پس با توجه به تعریف عدد ماخ (نسبت سرعت به سرعت صوت) انتظار می‌رود در طول لوله عدد ماخ افزایش یابد. نتایج نشان داده شده در شکل ۷۶-۲ نیز تایید کننده این موضوع می‌باشد. عدد رینولد وابسته به دانسیته، سرعت، قطر لوله و ویسکوزیته سیال می‌باشد از آنجایی که قطر لوله ثابت بوده و ویسکوزیته سیال با توجه به روش حل در طول لوله ثابت فرض شده است. پس تغییرات عدد رینولد وابسته به تغییرات سرعت و دانسیته در طول لوله می‌باشد با توجه به اینکه دانسیته در طول لوله کاهش یافته و سرعت افزایش می‌یابد پس تغییرات عدد رینولد می‌تواند در اثر نحوه‌ی تغییرات دانسیته و سرعت باشد. منحنی مربوط به تغییرات رینولد در طول لوله در شکل ۷۷-۲ نشان داده شده است.



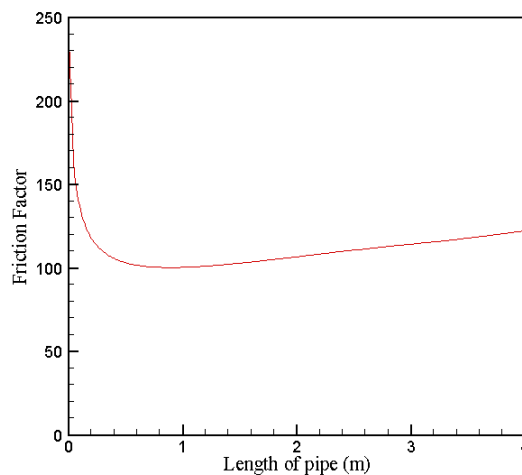
شکل ۷۶-۲: نمودار عدد ماخ بر حسب طول لوله



شکل ۲-۷۷: نمودار عدد رینولدز بر حسب طول لوله

با توجه به شکل ۲-۷۸ توزیع ضریب اصطکاک در طول لوله با مقادیر محاسبه شده در زیربخش قبل تفاوت بسیار زیادی دارد که این می‌تواند ناشی از اثر ندادن عدد ماخ در ضریب اصطکاک در روابط تئوری باشد. پس در ادامه می‌بایست اثر عدد ماخ و رینولدز بر روی ضریب اصطکاک تحقیق شده و یک رابطه‌ی تجربی جهت مدل‌سازی آن استخراج گردد.

برای اعتبارسنجی مقادیر ضریب اصطکاک محاسبه شده از نرم‌افزار Fluent، مقدار دبی حجمی نرمال در این حالت با مقدار بدست آمده از تست تجربی مقایسه شده و حدود ۳۵ درصد خطا مشاهده شد. به علت این خطا و رفع مشکل آن در فعالیت‌های آتی پرداخته خواهد شد.



شکل ۲-۷۸: توزیع ضریب اصطکاک در طول لوله

۲.۲ بررسی تئوریک صحت فرضیات و معادلات حاکم

در ادامه‌ی تکمیل برنامه‌ی محاسبه‌ی هدررفت گاز در شبکه‌های توزیع، برای کاهش انحراف از حالت واقعی، فرض گاز ایده‌آل را اصلاح کرده و مساله با در نظر گرفتن گاز بعنوان گاز واقعی، مورد

بازبینی قرارگرفت. تفاوت اساسی بین فرض گاز کامل و گاز واقعی در معادله حالت گاز می‌باشد. برای گاز واقعی معادلات حالات مختلفی ارائه شده‌است که از جمله می‌توان به معادله حالت وندروالس، پنگ رابینسون و معادلات دیگر اشاره نمود. رابطه‌ی دیگری نیز که اغلب مورد استفاده قرار می‌گیرد، رابطه‌ی اصلاح شده گاز کامل می‌باشد که در آن یک ضریب تراکم‌پذیری اضافه شده‌است. در این بخش تاثیر اضافه شدن این پارامتر بر معادلات حاکم مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۱.۲.۲ تصحیح معادلات حاکم

نرم‌افزار اولیه با فرض کامل بودن گاز طبیعی نگارش شده‌است. معادلات حاکم بر جریان با فرض گاز کامل مطابق با ذیل می‌باشد.

- معادله پیوستگی

$$\dot{m} = \rho u A = cte \quad (7-2)$$

با مشتق‌گیری از این رابطه در راستای x ، با فرض ثابت بودن مقطع لوله، شکل دیفرانسیلی معادله پیوستگی مطابق با رابطه (۸-۲) حاصل می‌شود.

$$\frac{d\rho}{dx} = -\frac{\rho}{u} \frac{du}{dx} \quad (8-2)$$

- معادله مومنتوم در راستای x (طول لوله) برای این بخش دیفرانسیلی

$$\rho u \frac{du}{dx} = -\frac{dP}{dx} - \frac{1}{2} \frac{\rho f u^2}{D} \quad (9-2)$$

- معادله‌ی انرژی

$$\rho c_p \frac{dT}{dx} + \rho u \frac{du}{dx} = 0 \quad (10-2)$$

- معادله حالت

$$P = \rho RT \quad (11-2)$$

با مشتق‌گیری از رابطه‌ی فوق در راستای x ، شکل دیفرانسیلی معادله حالت مطابق با ذیل حاصل می‌گردد.

$$\frac{dP}{dx} = \rho R \frac{dT}{dx} + RT \frac{d\rho}{dx} \quad (12-2)$$

به کمک چهار معادله‌ی پیوستگی، مومنتوم، انرژی و معادله حالت چهار مجهول دما، فشار، سرعت و چگالی تعیین می‌شوند. همانگونه که در ابتدای بخش نیز اشاره گردید، فرض گاز کامل می‌تواند موجب تولید خطا در نتایج شود. برای روشن شدن این مطلب و محاسبه‌ی میزان خطای تولیدی می‌بایست معادلات مجدداً بر اساس گاز واقعی استخراج شده و خطاهای احتمالی مورد بررسی قرار گیرند. در ادامه معادلات پیوستگی، مومنتوم، انرژی و حالت با فرض گاز واقعی ارائه می‌شود. در ادامه مشاهده می‌گردد که تفاوت عمده بین حالت گاز کامل و گاز واقعی در معادلات انرژی و معادله حالت می‌باشد.

- معادله پیوستگی

این معادله تفاوتی با معادله‌ی پیوستگی برای گاز کامل ندارد لذا کماکان معادله (۸-۲) اعتبار دارد.

- معادله مومنتوم در راستای x (طول لوله) برای این بخش دیفرانسیلی

این معادله نیز تفاوتی با معادله‌ی مومنتوم برای گاز کامل ندارد لذا کماکان معادله (۹-۲) اعتبار دارد.

- معادله‌ی انرژی

$$dH + \frac{1}{2} d(u^2) = 0 \quad (13-2)$$

در این حالت دیگر dH برابر با $C_p dT$ نبوده و مقدار آن از رابطه‌ی ذیل حاصل می‌گردد (اثبات در پیوست الف).

$$dH = C_p dT - \left(\frac{RT^2}{P} \left(\frac{\partial Z}{\partial T} \right)_P \right) dP \quad (14-2)$$

• در نتیجه شکل نهایی معادله انرژی برای گاز واقعی مطابق با رابطه‌ی ذیل است.

$$C_p dT - \left(\frac{RT^2}{P} \left(\frac{\partial Z}{\partial T} \right)_P \right) dP + \frac{1}{2} d(u^2) = 0 \quad (15-2)$$

• معادله حالت

$$P = Z\rho RT \quad (16-2)$$

با مشتق‌گیری از رابطه‌ی فوق در راستای x ، شکل دیفرانسیلی معادله حالت مطابق با ذیل حاصل می‌گردد.

$$\frac{dP}{dx} = Z\rho R \frac{dT}{dx} + ZRT \frac{d\rho}{dx} + \rho RT \frac{dZ}{dx} \quad (17-2)$$

روابط فوق معادلات حاکم را در حالت کلی برای جریان گاز واقعی درون یک لوله تعیین می‌نمایند. حال چنانچه فرض شود که ضریب تراکم‌پذیری Z در طول لوله ثابت می‌باشد، شکل دیفرانسیلی معادلات انرژی و حالت به ترتیب برابر با روابط (۱۸-۲) و (۱۹-۲) می‌شود.

$$C_p dT + \frac{1}{2} du^2 = 0 \quad (18-2)$$

$$\frac{dP}{dx} = Z \left(\rho R \frac{dT}{dx} + RT \frac{d\rho}{dx} \right) \quad (19-2)$$

با مقایسه معادلات گاز کامل با معادلات گاز واقعی تنها تفاوت در معادله حالات دیده می‌شود که در معادله حالت گاز واقعی یک ضریب Z نسبت به معادله حالت گاز کامل وجود دارد. بقیه معادلات دقیقاً مشابه می‌باشند (با فرض Z ثابت در طول لوله).

۲.۲.۲ روش حل

دو حالت مختلف برای جریان درون لوله ممکن است اتفاق افتد که عبارتند از:

۱. عدد ماخ جریان در خروجی برابر با یک باشد (حالت خفگی).

۲. عدد ماخ جریان در کل لوله کمتر از یک باشد (جریان کاملاً مادون صوت).

برای حل ابتدا امکان رخ دادن حالت ۱ مورد بررسی قرار می‌گرفت. بدین منظور طبق الگوریتم ارائه شده در مرجع [۲]، روابط ذیل برای بررسی این حالت با فرض گاز کامل استفاده می‌شد.

$$\frac{T}{T_{exit(M=1)}} = \frac{\gamma + 1}{2 + (\gamma - 1)M^2} \quad (20-2)$$

$$\frac{P}{P_{exit(M=1)}} = \frac{1}{M} \left[\frac{\gamma + 1}{2 + (\gamma - 1)M^2} \right]^{1/2} \quad (21-2)$$

$$\frac{\rho}{\rho_{exit(M=1)}} = \frac{1}{M} \left[\frac{2 + (\gamma - 1)M^2}{\gamma + 1} \right]^{1/2} \quad (22-2)$$

$$\frac{fL}{D} = \frac{1 - M^2}{\gamma M^2} + \frac{\gamma + 1}{2\gamma} \ln \left[\frac{(\gamma + 1)M^2}{2 + (\gamma - 1)M^2} \right] \quad (23-2)$$

از آنجائیکه معادلات مذکور با فرض گاز کامل استخراج شده‌اند، از اینرو این معادلات را برای حالت گاز واقعی نیز می‌بایست مجدداً استخراج نمود.

چنانچه جریان گاز درون لوله کاملاً مادون صوت باشد، در این حالت پس از یک فرض اولیه برای مقدار سرعت ورودی گاز، با حل معادلات (۸-۲)، (۹-۲)، (۱۸-۲) و (۱۹-۲) به صورت هم‌زمان^۵، مقادیر مجهولات در طول لوله تعیین می‌شوند. روش‌های تکرار و تعیین مجهولات نیز دقیقاً برای هر دو حالت گاز کامل و واقعی یکسان می‌باشند [۲].

^۵ برای حل معادلات دیفرانسیل مرتبه اول از روش اویلر استفاده شده‌است.

استخراج معادله نسبت دما برای گاز واقعی

با استفاده از معادله انرژی (۲-۱۸)، می‌توان نتیجه گرفت،

$$C_p T_1 + \frac{u_1^2}{2} = C_p T_2 + \frac{u_2^2}{2} \quad (24-2)$$

از طرفی مقادیر سرعت صوت c و C_p (پیوست الف) در گاز واقعی برابر با روابط ذیل می‌باشد.

$$c^2 = \gamma ZRT \quad (25-2)$$

$$C_p = \frac{\gamma RZ}{\gamma - 1} \quad (26-2)$$

با جایگذاری (۲-۲۵) و (۲-۲۶) در (۲-۲۴)، نتیجه می‌شود.

$$\frac{c_1^2}{\gamma - 1} + \frac{u_1^2}{2} = \frac{c_2^2}{\gamma - 1} + \frac{u_2^2}{2} \quad (27-2)$$

با کمی عملیات ریاضی، با فرض اینکه زیر نویس ۲ بیانگر خروجی لوله باشد و در این مقطع $M_2 = 1$ رابطه‌ی زیر حاصل می‌گردد.

$$\frac{T}{T_{exit(M=1)}} = \frac{\gamma + 1}{2 + (\gamma - 1)M^2} \quad (28-2)$$

مشاهده می‌شود که معادله (۲-۲۸) با معادله (۲-۲۰) هیچ تفاوتی نداشته و از اینرو برای هردو گاز کامل و واقعی (با فرض ثابت بودن ضریب تراکم پذیری) یکسان می‌باشد.

استخراج معادله نسبت فشار برای گاز واقعی

با استفاده از معادله پیوستگی می‌توان نوشت،

$$\rho_1 u_1 = \rho_2 u_2 \quad (29-2)$$

همچنین با استفاده از تعریف سرعت صوت نتیجه می‌شود:

$$c^2 = \frac{P}{\rho} \rightarrow \rho = \gamma \frac{P}{c^2} \quad (۳۰-۲)$$

با جایگذاری رابطه (۳۰-۲) در معادله پیوستگی، معادله (۲۹-۲) به شکل زیر بازنویسی می‌شود.

$$\gamma \frac{P_1}{c_1^2} u_1 = \gamma \frac{P_2}{c_2^2} u_2 \rightarrow \frac{P_1}{P_2} = \frac{c_1^2}{c_2^2} \cdot \frac{u_2}{u_1} \rightarrow \frac{P_1}{P_2} = \frac{c_1}{c_2} \cdot \frac{M_2}{M_1} = \sqrt{\frac{T_1}{T_2}} \cdot \frac{M_2}{M_1} \quad (۳۱-۲)$$

با فرض اینکه $M_2 = 1$ و با استفاده از رابطه (۲۸-۲)، معادله زیر حاصل می‌گردد.

$$\frac{P}{P_{exit(M=1)}} = \sqrt{\frac{T}{T_{exit(M=1)}}} \cdot \frac{M_2 = 1}{M} = \frac{1}{M} \left[\frac{\gamma + 1}{2 + (\gamma - 1)M^2} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (۳۲-۲)$$

مشاهده می‌شود که معادله (۳۲-۲) با معادله (۲۱-۲) هیچ تفاوتی نداشته و از اینرو برای هردو گاز کامل و واقعی (با فرض ثابت بودن ضریب تراکم پذیری) یکسان می‌باشد.

استخراج معادله نسبت دانسیته برای گاز واقعی

با استفاده از معادله حالت (۱۶-۲) می‌توان نتیجه گرفت:

$$\frac{\rho_1}{\rho_2} = \frac{P_1}{P_2} \cdot \frac{T_1}{T_2} \quad (۳۳-۲)$$

با فرض اینکه $M_2 = 1$ باشد و با استفاده از رابطه (۲۸-۲) و (۳۲-۲)، معادله زیر حاصل می‌گردد.

$$\frac{\rho}{\rho_{exit(M=1)}} = \frac{1}{M} \left[\frac{\gamma + 1}{2 + (\gamma - 1)M^2} \right]^{\frac{1}{2}} \cdot \left[\frac{\gamma + 1}{2 + (\gamma - 1)M^2} \right]^{-1} = \frac{1}{M} \left[\frac{2 + (\gamma - 1)M^2}{\gamma + 1} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (۳۴-۲)$$

مشاهده می‌شود که معادله (۳۴-۲) با معادله (۲۲-۲) هیچ تفاوتی نداشته و از اینرو برای هردو گاز کامل و واقعی (با فرض ثابت بودن ضریب تراکم پذیری) یکسان می‌باشد.

استخراج معادله فاکتور اصطکاک برای گاز واقعی

برای بدست آوردن معادله متناظر با رابطه (۲۳-۲) برای گاز واقعی، از معادله (۹-۲) استفاده می‌شود. معادله مومنتوم را به شکل زیر نیز می‌توان بازنویسی نمود.

$$\rho u du + dP = -\frac{1}{2} \rho u^2 \frac{f dx}{D} \quad (35-2)$$

با تقسیم طرفین رابطه فوق بر $-\frac{1}{2} \rho u^2$ نتیجه می‌شود،

$$\frac{\rho u du}{-\frac{1}{2} \rho u^2} + \frac{dP}{-\frac{1}{2} \rho u^2} = \frac{f dx}{D} \quad (36-2)$$

برای ادامه ابتدا عبارت اول از سمت چپ مطابق ذیل ساده می‌شود.

$$\frac{\rho u du}{-\frac{1}{2} \rho u^2} = -2 \frac{du}{u} \quad (37-2)$$

با استفاده از تعریف عدد ماخ ($c^2 M^2 = u^2$) و تعریف سرعت صوت (رابطه (۲۵-۲))، نتیجه می‌شود:

$$\gamma ZRT.M^2 = u^2 \quad (38-2)$$

با مشتق‌گیری از رابطه‌ی فوق، معادله زیر حاصل می‌گردد:

$$2\gamma ZRT.M dM + \gamma ZRM^2 dT = 2u du \quad (39-2)$$

با استفاده از معادله انرژی ($dT = \frac{-u du}{C_p}$)، تعریف C_p (رابطه (۲۶-۲)) و تعریف سرعت

صوت ($c^2 = \gamma ZRT$)، با کمی عملیات ریاضی رابطه‌ی ذیل بدست می‌آید:

$$2c^2 M dM - (\gamma - 1) M^2 u du = 2u du \quad (40-2)$$

در نهایت نتیجه می‌شود:

$$-2 \frac{du}{u} = \frac{-2}{M} dM \left[1 + \frac{1}{2} (\gamma - 1) M^2 \frac{du}{u} \right]^{-1} \quad (41-2)$$

برای محاسبه‌ی عبارت دوم از سمت چپ معادله (۳۶-۲) بر حسب عدد ماخ با دیفرانسیل‌گیری از معادله حالت، رابطه‌ی ذیل نتیجه می‌شود:

$$dP = ZRTd\rho + Z\rho RdT \quad (۴۲-۲)$$

از طرفی با توجه به معادله انرژی $dT = \frac{-udu}{C_p}$ و با توجه به معادله پیوستگی $d\rho = \frac{-\rho du}{u}$ ، با جایگذاری این عبارات در رابطه (۴۲-۲) و تقسیم کل عبارت بر $-\frac{1}{2}\rho u^2$ معادله ذیل بدست می‌آید:

$$\frac{dP}{-\frac{1}{2}\rho u^2} = \frac{2}{\gamma M^2} \frac{du}{u} + \frac{2(\gamma-1)}{\lambda} \frac{du}{u} = \frac{2du}{u} \left[\frac{1}{\gamma M^2} + \frac{(\gamma-1)}{\lambda} \right] \quad (۴۳-۲)$$

با ترکیب روابط (۴۱-۲) و (۴۳-۲) رابطه‌ی (۳۶-۲) به شکل زیر بازنویسی می‌شود.

$$\frac{f dx}{D} = \frac{2}{\gamma M^2} (1 - M^2) \left[1 + \frac{1}{2}(\gamma - 1) M^2 \frac{du}{u} \right]^{-1} \frac{dM}{M} \quad (۴۴-۲)$$

با انتگرال‌گیری از معادله فوق از ابتدا تا انتهای لوله به طول L ، رابطه مورد نظر به شکل زیر بدست می‌آید:

$$\frac{fL}{D} = \frac{1 - M^2}{\gamma M^2} + \frac{\gamma + 1}{2\gamma} \ln \left[\frac{(\gamma + 1) M^2}{2 + (\gamma - 1) M^2} \right] \quad (۴۵-۲)$$

بدین ترتیب مشاهده می‌شود که در این حالت نیز هیچ تفاوتی بین رابطه‌ی مربوط به گاز کامل ((۲۳-۲)) و گاز واقعی ((۴۵-۲)) وجود ندارد.

نتیجه‌گیری

مطابق با مباحث ارائه شده در قسمت قبل ملاحظه می‌گردد که به منظور مدل‌سازی هدر رفت گاز واقعی تنها معادله حالت تغییر می‌نماید. البته این قضیه مشروط به ثابت فرض نمودن ضریب تراکم پذیری در طول لوله می‌باشد. بدین ترتیب بدون نیاز به ایجاد تغییرات عمده فقط با اضافه نمودن اثر این ضریب در معادله حالت به راحتی می‌توان شرایط گاز واقعی را مدل نمود. در قسمت بعد روش‌های تعیین ضریب تراکم‌پذیری معرفی شده‌است.

۳.۲.۲ ضریب تراکم‌پذیری

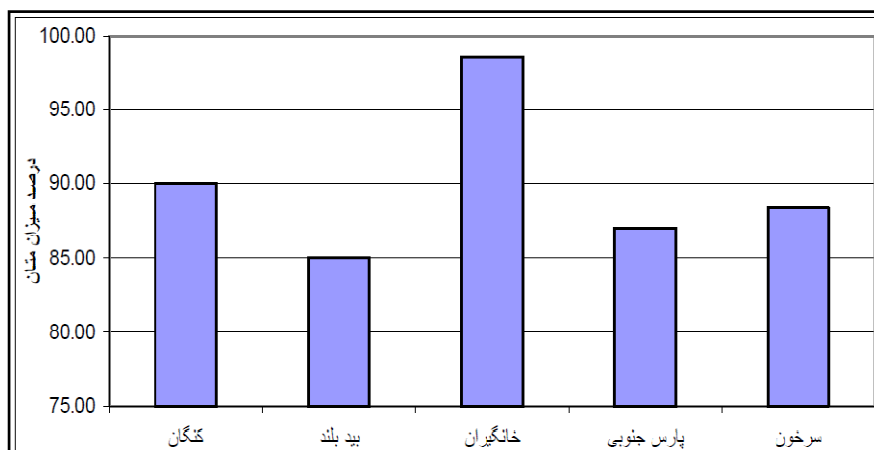
ضریب تراکم‌پذیری جزء خواص ترمودینامیکی یک گاز یا مخلوط گازی بوده که مقدار آن وابسته به دما، فشار و ترکیب درصد مخلوط گازی می‌باشد. در ادامه موارد مربوط به مقدار و نحوه‌ی تعیین این ضریب مورد بررسی قرار می‌گیرد.

مقایسه‌ی توزیع متان و ضریب تراکم‌پذیری در مناطق مختلف کشور

اولین قدم در محاسبه‌ی ضریب تراکم‌پذیری، تعیین ترکیب درصد گاز طبیعی می‌باشد. با توجه به اینکه قسمت اعظم گاز طبیعی را متان تشکیل می‌دهد پس تعیین درصد مولی متان در گاز طبیعی مورد بررسی، ضروری است. پس از مشخص شدن ترکیب درصد، ضریب تراکم‌پذیری در دما و فشار خاص قابل محاسبه می‌باشد. در ادامه با تعیین درصد مولی متان در گاز چند حوزه، ضریب تراکم‌پذیری برای آنها محاسبه و مقایسه شده‌است.

توزیع متان در گاز طبیعی پالایشگاه‌های کشور

درصد مولی متان در گاز طبیعی ۵ حوزه‌ی داخل کشور شامل خانگیران، بید بلند، کنگان، سرخون و پارس جنوبی در نمودارهای شکل ۲-۷۹ نشان داده شده‌است. خانگیران با حدود ۹۸ درصد بیشترین مقدار متان را دارا می‌باشد در حالیکه بید بلند با ۸۵ درصد کمترین مقدار متان را به خود اختصاص داده‌است [۳].

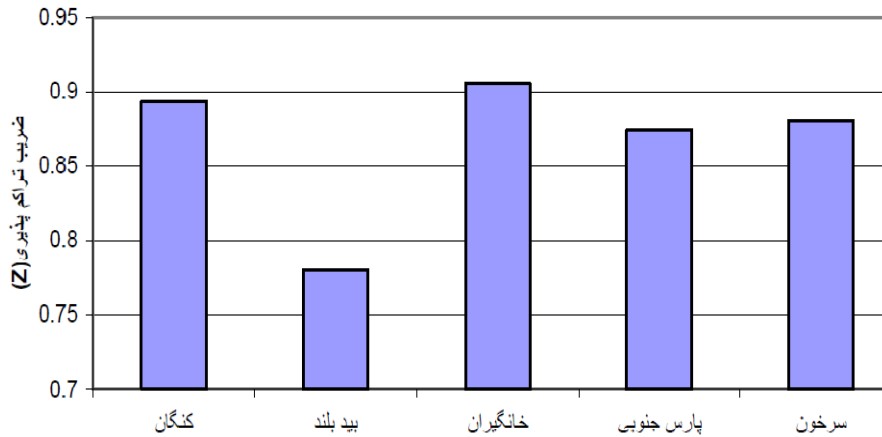


شکل ۲-۷۹: میزان درصد مولی متان موجود در گاز طبیعی مناطق مختلف کشور [۳]

مقایسه‌ی ضریب تراکم‌پذیری مناطق مختلف

برای فشار ۲۰ MPa و دمای ۳۴۰ K ضریب تراکم‌پذیری برای حوزه‌های مختلف با استفاده از استاندارد AGA8 محاسبه شده و نتایج حاصل از آن در شکل ۲-۸۰ نشان داده شده‌است [۴]. با بررسی

نمودارهای شکل ۲-۸۰ مشخص می‌گردد که ترکیب گاز مناطق مختلف بر ضریب تراکم پذیری گاز (در دما و فشار یکسان) تاثیر بسزایی دارد. گاز منطقه‌ی خانگیان با بالاترین درصد متان، بیشترین ضریب تراکم‌پذیری را داراست. در حالیکه گاز منطقه بیدبلند با کمترین درصد متان، پایین‌ترین ضریب تراکم‌پذیری بین مناطق مورد بررسی را به خود اختصاص داده‌است.



شکل ۲-۸۰: ضریب تراکم‌پذیری در مناطق مختلف کشور [۴]

محاسبه‌ی ضریب تراکم‌پذیری

در رابطه‌ی (۲-۴۶) ضریب تراکم‌پذیری برای یک مول گاز بیان شده‌است. در این رابطه، P فشار سیستم، T دمای مخلوط، V حجم واحد مول مخلوط و R ثابت جهانی گازهاست و مقدار آن بر اساس واحدهای فشار، دما و حجم تعیین می‌شود. در حالت گاز ایده‌آل مقدار ضریب تراکم‌پذیری برابر یک شده و برای گاز واقعی ضریب تراکم‌پذیری می‌تواند بزرگ‌تر یا کوچک‌تر از یک باشد.

$$Z = \frac{PV}{RT} \quad (۲-۴۶)$$

در ادامه چند روش برای محاسبه‌ی ضریب تراکم‌پذیری ذکر شده‌است.

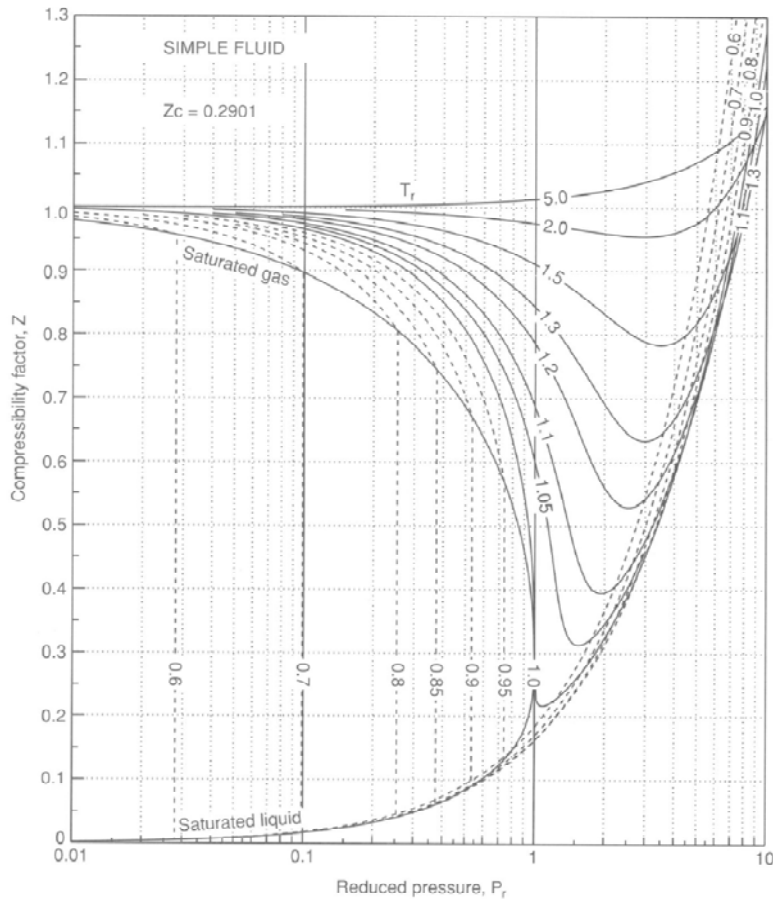
استفاده از دما و فشار نقصانی

در دما و فشارهای مختلف ضریب تراکم‌پذیری برای مواد گوناگون، متفاوت است. برای از بین بردن تابعیت جنس ضریب تراکم‌پذیری، از دما و فشار نقصانی استفاده می‌شود. دما و فشار نقصانی برای یک ماده خالص به شکل زیر تعریف می‌شوند.

$$Pr = \frac{P}{Pc} \quad (۲-۴۷)$$

$$Tr = \frac{T}{T_c} \quad (۴۸-۲)$$

در معادله‌ی (۴۷-۲) Pr فشار نقصانی گاز، P فشار کارکرد و P_c فشار بحرانی گاز می‌باشد. به همین ترتیب در معادله‌ی (۴۸-۲) Tr دمای نقصانی گاز، T دمای مطلق و T_c دمای بحرانی گاز می‌باشد. بر این اساس نمودارهایی مانند شکل ۲-۸۱ ترسیم شده‌اند که برای هر ماده با داشتن دما و فشار نقصانی، ضریب تراکم‌پذیری را می‌توان بدست آورد. در این حالت ضریب تراکم‌پذیری تابع Tr و Pr می‌باشد و تابعیت جنس آن فقط در T_c و P_c آورده شده‌است. پس وابستگی ضریب تراکم‌پذیری نسبت به جنس ضعیف شده‌است. دقت مقدار بدست آمده از این نمودارها برای ضریب تراکم‌پذیری نسبت به مقدار مشابهی محاسبه‌شده از معادلات حالت پایین‌تر می‌باشد.



شکل ۲-۸۱: ضریب تراکم‌پذیری بر حسب دما و فشار نقصانی

استفاده از معادله ویریال

در رابطه‌های (۴۹-۲) و (۵۰-۲) فرم‌های معادله ویریال برای ضریب تراکم‌پذیری نشان داده شده‌است. در این روابط B و B' ضرایب دوم ویریال و C و C' ضرایب سوم ویریال می‌باشند. رابطه‌ی بین

ضرایب دوم در معادله (۵۱-۲) آورده شده است. همچنین معادله‌ی (۵۲-۲) رابطه‌ی بین ضرایب سوم را نشان می‌دهد. ضرایب معادله ویریال برای یک گاز خاص فقط تابع دما می‌باشند پس با مشخص بودن ترکیب درصد گاز و دمای کارکرد، از طریق معادلات موجود قابل محاسبه‌اند.

$$Z = 1 + B'P + C'P^2 + \dots \quad (۴۹-۲)$$

$$Z = 1 + \frac{B}{V} + \frac{C}{V^2} + \dots \quad (۵۰-۲)$$

$$B' = \frac{B}{RT} \quad (۵۱-۲)$$

$$C' = \frac{C - B^2}{(RT)^2} \quad (۵۲-۲)$$

استفاده از معادلات حالت درجه ۳

معادلات حالت از طریق روابط تجربی و نیمه تجربی، رابطه بین دما، فشار و حجم یک ماده خالص و مخلوط را بیان می‌کنند. این نوع معادلات برای گاز و مایع بکار برده می‌شوند و بسته به نوع سیستم مورد بررسی و میزان انحراف آن از حالت ایده‌آل انتخاب می‌شوند. برای هیدروکربن‌های سبک معادلات پینگ‌رابینسون^۶ و سواردریش‌کوانگ^۷ در فرایندهای شبیه‌سازی بیشترین کاربرد را دارند.

معادله حالت پینگ‌رابینسون

در روابط زیر فرم معادله‌ی پینگ‌رابینسون برای یک ماده خالص جهت محاسبه‌ی ضریب تراکم‌پذیری و ضرایب بکار رفته در معادله حالت پینگ‌رابینسون تعریف شده‌اند [۵]. در این روابط R ثابت جهانی گازها و W^A ضریب بی‌مرکزی می‌باشد.

$$Z^3 - (1 - B)Z^2 + (A - 3B^2 - 2N)Z - (AB - B^2 - B^3) = 0 \quad (۵۳-۲)$$

$$A = \frac{aP}{(RT)^2} \quad (۵۴-۲)$$

^۶ Peng Robinson

^۷ Soave Redlich Kwong

^۸ ضریب بی‌مرکزی ثابتی است که فقط تابع جنس بوده و برای مواد مختلف، متفاوت است.

$$B = \frac{bP}{RT} \quad (۵۵-۲)$$

در رابطه‌ی (۵۳-۲) فرم معادله‌ی پینگ‌راینسون برای یک ماده خالص جهت محاسبه‌ی ضریب تراکم‌پذیری نشان داده شده و در روابط (۵۴-۲) و (۵۵-۲) ضرایب بکار رفته در معادله حالت پینگ‌راینسون تعریف شده‌اند. ضرایب a و b بکار رفته در روابط (۵۴-۲) و (۵۵-۲)، تابع جنس بوده و از طریق استفاده از روابط زیر محاسبه می‌شوند.

$$m = 0.37464 + 1.54226w - 0.26992W^2 \quad (۵۶-۲)$$

$$\alpha^{1/2} = 1 + m(1 - Tr^{\frac{1}{2}}) \quad (۵۷-۲)$$

$$a = 0.45724 \left(\frac{RT_c}{P_c} \right)^2 \alpha \quad (۵۸-۲)$$

$$b = 0.0778 \left(\frac{RT_c}{P_c} \right) \quad (۵۹-۲)$$

مقدار m از طریق رابطه‌ی (۵۶-۲) محاسبه شده و با جایگذاری در رابطه‌ی (۵۷-۲) مقدار α بدست می‌آید. با جایگذاری α در رابطه‌ی (۵۸-۲) مقدار a محاسبه می‌شود. با داشتن دما و فشار بحرانی ماده، ضریب b از طریق رابطه‌ی (۵۹-۲) بدست می‌آید.

معادله حالت سواردریش کوانگ

در روابط زیر فرم معادله‌ی سواردریش کوانگ برای یک ماده خالص جهت محاسبه‌ی ضریب تراکم‌پذیری و ضرایب بکار رفته در معادله حالت سواردریش کوانگ تعریف شده‌اند [۵]. در این روابط R ثابت جهانی گازها و w ضریب بی‌مرکزی می‌باشد.

$$Z^3 - Z^2 + (A - B - B^2)Z - AB = 0 \quad (۶۰-۲)$$

$$A = \frac{aP}{(RT)^2} \quad (۶۱-۲)$$

$$B = \frac{bP}{RT} \quad (۶۲-۲)$$

در رابطه‌ی (۶۰-۲) فرم معادله‌ی سواردریش کوانگ برای یک ماده خالص جهت محاسبه‌ی ضریب تراکم‌پذیری نشان داده شده و در روابط (۶۱-۲) تا (۶۷-۲) ضرایب بکار رفته در معادله حالت سواردریش کوانگ تعریف شده‌اند. ضریب a و b بکار رفته در روابط (۶۱-۲) و (۶۲-۲)، تابع جنس بوده و از طریق استفاده از روابط زیر محاسبه می‌شود.

$$m = 0.48 + 1.574w - 0.176w^2 \quad (۶۳-۲)$$

$$\alpha^{1/2} = 1 + m(1 - \text{Tr}^2)^{1/2} \quad (۶۴-۲)$$

$$ac = 0.42747 \left(\frac{RT_c}{P_c} \right)^2 \quad (۶۵-۲)$$

$$a = ac * \alpha \quad (۶۶-۲)$$

$$b = 0.08664 \left(\frac{RT_c}{P_c} \right) \quad (۶۷-۲)$$

مقدار m از طریق رابطه‌ی (۶۳-۲) محاسبه شده و با جایگذاری در رابطه‌ی (۶۴-۲) مقدار α بدست می‌آید. با محاسبه ac از رابطه‌ی (۶۵-۲) و جایگذاری ac و α در رابطه‌ی (۶۶-۲) مقدار a محاسبه می‌شود. با داشتن دما و فشار بحرانی ماده، ضریب b از طریق رابطه‌ی (۶۷-۲) بدست می‌آید.

روش محاسبه‌ی ضریب تراکم‌پذیری در این مسئله

با توجه به شکل ۲-۷۹، ۸۵ درصد گاز طبیعی خروجی از پالایشگاه بیدبلند متان می‌باشد. بنابراین در این گزارش برای محاسبه ضریب تراکم‌پذیری گاز طبیعی مقدار جزء مولی متان در گاز ۰/۸۵ در نظر گرفته شده‌است. برای رسیدن به داده‌های نزدیک‌تر به واقعیت برای گاز طبیعی مقدار اتان ۸ درصد و مقدار پروپان ۴ درصد فرض شده‌است.

در این مسئله از معادلات حالت درجه ۳ برای محاسبه‌ی ضریب تراکم‌پذیری استفاده شده‌است. معادلات پینگ‌رابینسون و سواردریش کوانگ بیان شده در روابط (۵۳-۲) و (۶۰-۲) برای یک ماده خالص کاربرد دارند. ضرایب معادلات پینگ‌رابینسون و سواردریش کوانگ جهت تعیین ضریب تراکم‌پذیری یک مخلوط از طریق قوانین ترکیب محاسبه می‌شوند. در این گزارش روابط (۶۸-۲) تا (۷۴-۲) برای محاسبه‌ی ضرایب معادلات حالت مخلوط گازی بکار برده شده‌اند [۵]. برای استفاده از

معادله حالت برای تعیین ضریب تراکم‌پذیری مخلوط می‌بایست ضرایب a و b مخلوط را از a و b تک تک اجزا با جزء مولی y ، محاسبه کرد. در این حالت می‌توان نوشت:

$$a = \sum_i \sum_j y_i y_j a_{ij} \quad (۶۸-۲)$$

$$b = \sum_i y_i b_i \quad (۶۹-۲)$$

برای محاسبه ضرایب a و b مخلوط گازی، می‌بایست ضریب بی‌مرکزی، دمای بحرانی، حجم بحرانی، ضریب تراکم‌پذیری بحرانی و فشار بحرانی هر دو جزء مخلوط نسبت به یکدیگر محاسبه شود تا از طریق روابط (۶۸-۲) و (۶۹-۲) بتوان مقادیر a و b مخلوط گازی را بدست آورد. ضریب بی‌مرکزی دو جزء مخلوط نسبت به یکدیگر و دمای بحرانی دو جزء مخلوط نسبت به یکدیگر از روابط زیر بدست می‌آید.

$$w_{ij} = \frac{w_i + w_j}{2} \quad (۷۰-۲)$$

$$T_{cij} = (T_{ci} T_{cj})^{1/2} \quad (۷۱-۲)$$

برای محاسبه‌ی حجم بحرانی دو جزء مخلوط نسبت به یکدیگر، ضریب تراکم‌پذیری بحرانی دو جزء مخلوط نسبت به یکدیگر و فشار بحرانی دو جزء مخلوط نسبت به یکدیگر از روابط زیر استفاده می‌شود.

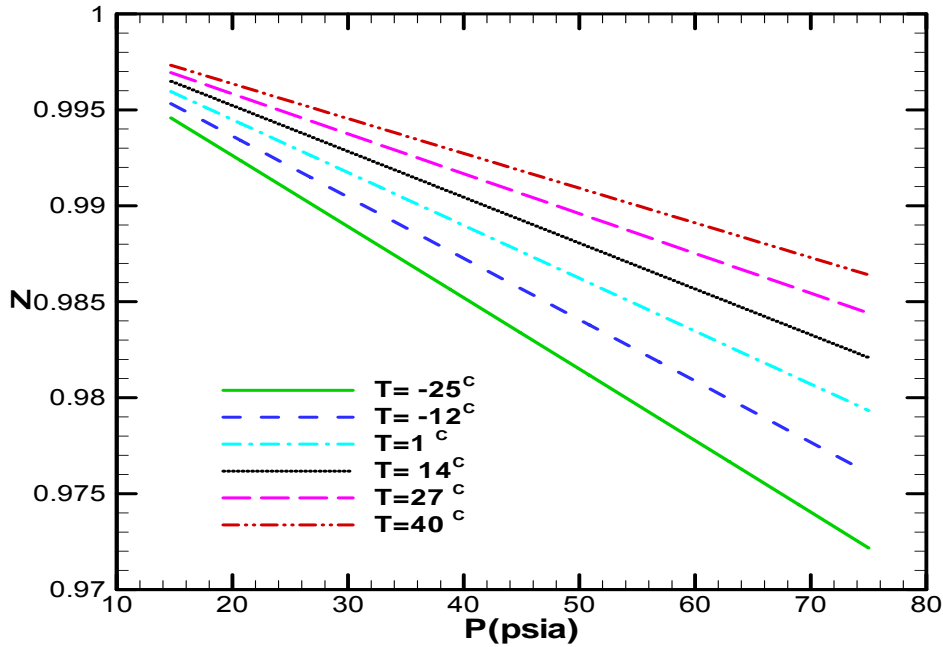
$$V_{cij} = \left(\frac{V_{ci}^{1/3} + V_{cj}^{1/3}}{2} \right)^3 \quad (۷۲-۲)$$

$$Z_{cij} = \frac{Z_{ci} + Z_{cj}}{2} \quad (۷۳-۲)$$

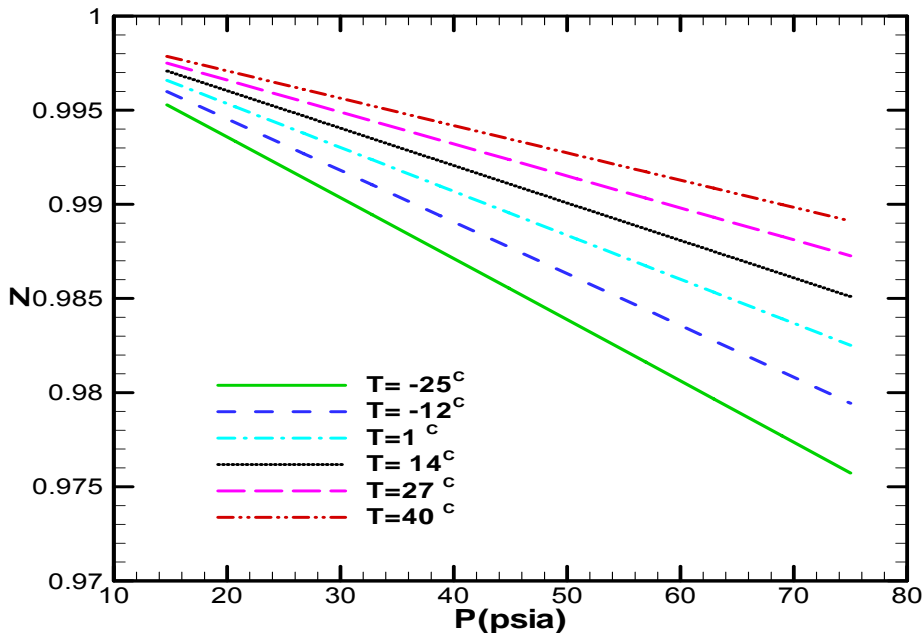
$$P_{cij} = \frac{Z_{cij} R T_{cij}}{V_{cij}} \quad (۷۴-۲)$$

رابطه‌ی (۷۲-۲) بیانگر حجم بحرانی دو جزء مخلوط نسبت به یکدیگر می‌باشد، برای محاسبه‌ی ضریب تراکم‌پذیری بحرانی دو جزء مخلوط نسبت به یکدیگر از رابطه‌ی (۷۳-۲) و فشار بحرانی دو جزء مخلوط نسبت به یکدیگر از رابطه‌ی (۷۴-۲) استفاده می‌شود.

محدوده‌ی عملکرد دما در این مسئله بین ۲۵- تا ۴۰ درجه سانتیگراد و فشار بین ۱۴/۷ تا ۷۵ psia در نظر گرفته شده است. منحنی‌های شکل ۲-۸۲ و شکل ۲-۸۳ ضریب تراکم‌پذیری گاز طبیعی را با ۸۵ درصد مولی متان، ۸ درصد مولی اتان و ۴ درصد مولی پروپان در محدوده‌ی دما و فشار کارکرد، برای معادله‌ی حالت پینگراینسون و سواردریش کوانگ نشان می‌دهد.



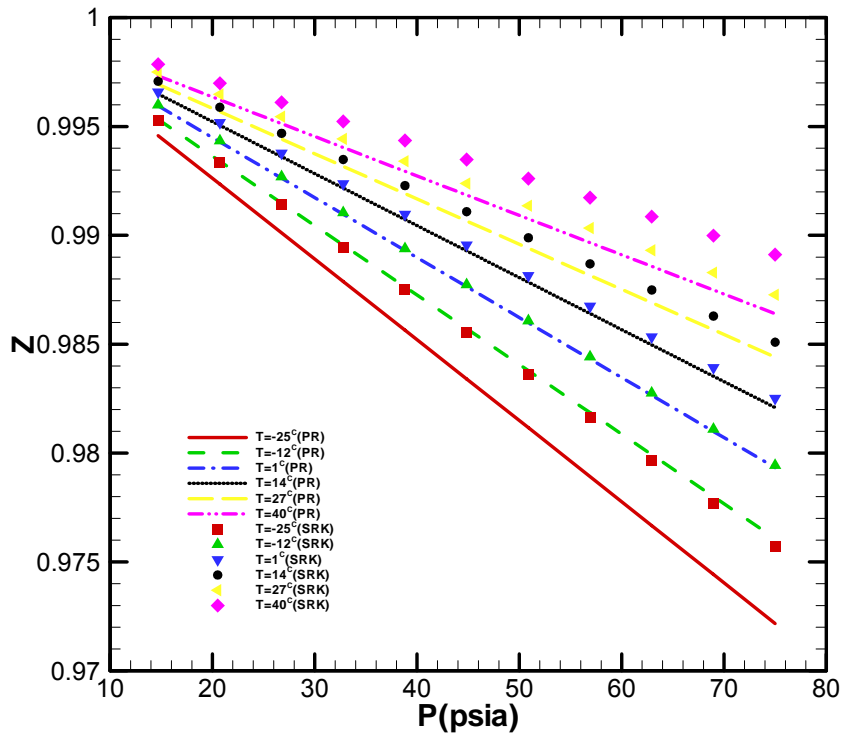
شکل ۲-۸۲: ضریب تراکم‌پذیری با استفاده از پینگراینسون



شکل ۲-۸۳: ضریب تراکم‌پذیری با استفاده از سواردریش کوانگ

نتیجه گیری

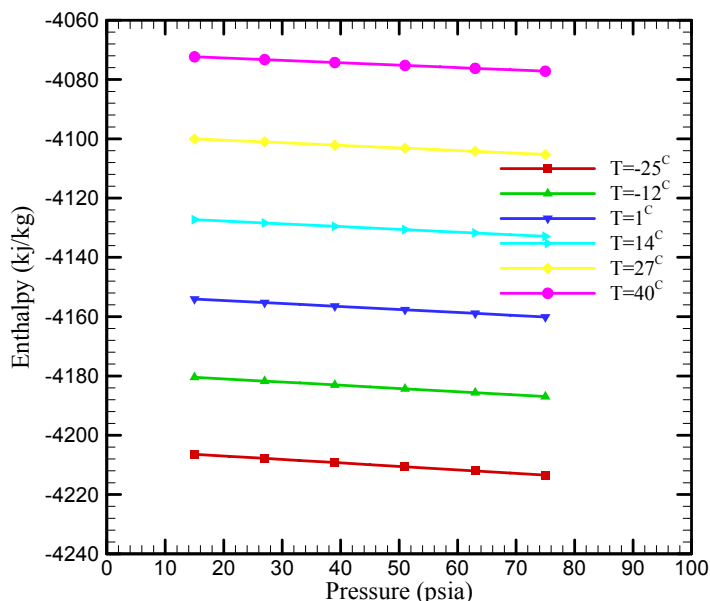
با توجه به شکل ۲-۸۴ ضریب تراکم‌پذیری محاسبه‌شده از معادلات حالت پینگ‌رابینسون و سواردریش‌کوانگ اختلاف زیادی با یکدیگر ندارند، در این مسئله از معادله‌ی پینگ‌رابینسون استفاده می‌شود. با توجه به شکل ۲-۸۴ کمترین مقدار ضریب تراکم‌پذیری در دمای ۲۵- درجه سانتیگراد و فشار ۷۵ psia برای معادله‌ی پینگ‌رابینسون بدست آمده و مقدار آن ۰/۹۷۲ می‌باشد. همچنین تغییرات ضریب تراکم‌پذیری بین ۰/۹۷۲ تا ۰/۹۹۸ می‌باشد. از آنجایی که در شرایط دما و فشار مسئله تغییرات ضریب تراکم‌پذیری زیاد نیست می‌توان آن را در یک مقدار متوسط ثابت فرض کرد.



شکل ۲-۸۴: مقایسه ضریب تراکم‌پذیری محاسبه شده از معادلات پینگ‌رابینسون و سواردریش‌کوانگ

۴.۲.۲ تغییرات آنتالپی گاز در لوله بر حسب فشار ورودی گاز

در این حالت مورد بررسی فرض براین است که گاز طبیعی درون لوله شامل متان با ۸۵ درصد مولی، اتان با ۱۰ درصد مولی و پروپان با ۵ درصد مولی باشد. براین اساس تغییرات آنتالپی بر حسب دما و فشار را می‌توان مانند شکل ۲-۸۵ نشان داد. نمودارهای شکل ۲-۸۵ با استفاده از داده‌های کتابخانه‌ای نرم‌افزار Aspen Hysys رسم شده‌اند.

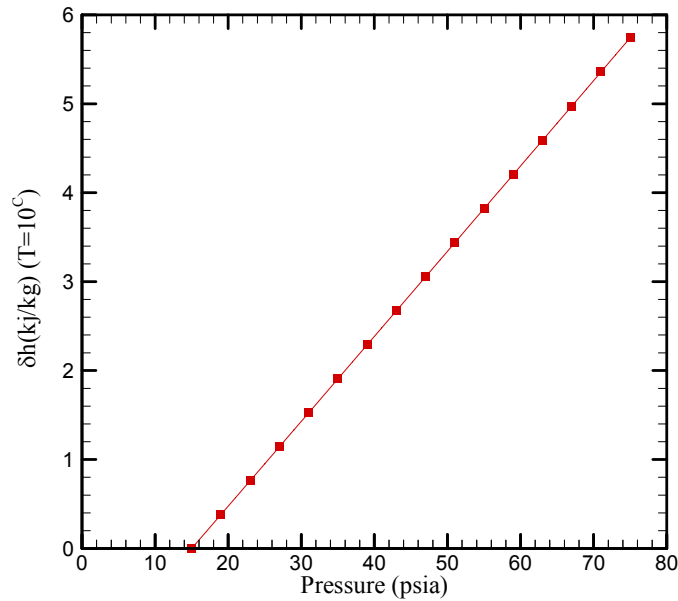


شکل ۲-۸۵: تغییرات آنتالپی بر حسب دما و فشار

با توجه به شکل ۲-۸۵ در محدوده‌ی دما و فشار مورد بررسی، تغییرات آنتالپی در دمای ثابت نسبت به فشار خیلی کمتر از تغییرات آن در فشار ثابت نسبت به دما می‌باشد. برای بررسی تغییرات آنتالپی نسبت به فشار، می‌بایست آنتالپی ورودی و خروجی در دمای ثابت و فشارهای گوناگون محاسبه شود.

با مشخص بودن دما و فشار یک ماده، می‌توان آنتالپی آن را از جداول و نمودارهای ترمودینامیکی بدست آورد. برای این حالت مورد بررسی، فشار خروجی همواره ثابت و برابر فشار اتمسفریک می‌باشد، پس در دمای ثابت آنتالپی خروجی یک مقدار ثابت خواهد داشت. همچنین در فشارهای مختلف ورودی و در دمای ثابت، مقدار آنتالپی‌های ورودی نیز از جداول و نمودارهای ترمودینامیکی بدست آمده و در ترسیم نمودارهای شکل ۲-۸۶ بکار گرفته شده‌اند.

برای تحلیل تغییرات آنتالپی نسبت به فشار در دمای ثابت، دما برای این حالت مورد بررسی در ۱۰ درجه‌ی سانتیگراد (متوسط حسابی دماهای ۲۰- و ۴۰ درجه‌ی سانتیگراد) ثابت فرض شده‌است. آنتالپی‌های ورودی در فشارهای مختلف ورودی و آنتالپی خروجی در فشار ۱۴/۷ psia از داده‌های کتابخانه‌ای نرم‌افزار Aspen Hysys استخراج شده‌اند. با معلوم بودن آنتالپی ورودی و خروجی، تغییرات آنتالپی در طول لوله برای هر فشار ورودی در دمای ثابت محاسبه شده و نتایج محاسبه‌ی تغییرات آنتالپی نسبت به فشار ورودی گاز در دمای ثابت ۱۰ درجه‌ی سانتیگراد در شکل ۲-۸۶ نشان داده شده‌است. مطابق با شکل مذکور مشاهده می‌گردد که تغییرات آنتالپی در یک دمای ثابت، نسبت به تغییر فشار یک رفتار خطی دارد.



شکل ۲-۸۶: تغییرات آنتالپی در طول لوله برحسب فشار ورودی گاز در دمای ثابت ۲۸۳ کلوین

۵.۲.۲ محاسبه‌ی خطای ظاهر شده در صورت فرض گاز کامل

آنتالپی تابع حالت است یعنی فقط تابع شرایط ترمودینامیکی اولیه و نهایی سیستم مورد بررسی می‌باشد. پس تغییرات آنتالپی را می‌توان ناشی از تغییرات آنتالپی در دمای ثابت و تغییرات آنتالپی در فشار ثابت دانست. یعنی می‌توان نوشت:

$$\Delta H_{total} = \Delta H_{P=cte} + \Delta H_{T=cte} \quad (۷۵-۲)$$

در رابطه‌ی (۷۵-۲)، ΔH_{total} کل تغییرات آنتالپی، $\Delta H_{P=cte}$ تغییرات آنتالپی در فشار ثابت و $\Delta H_{T=cte}$ تغییرات آنتالپی در دمای ثابت می‌باشد. از آنجایی که تغییرات آنتالپی در گاز کامل مستقل از فشار است پس رابطه‌ی (۷۵-۲) را برای گاز کامل می‌توان بصورت زیر نوشت.

$$\Delta H_{total} = \Delta H_{P=cte} \quad (۷۶-۲)$$

با توجه به روابط (۷۵-۲) و (۷۶-۲) میزان تغییرات آنتالپی در دمای ثابت برای هر فشار، نشان‌دهنده میزان انحراف از فرض گاز کامل در آن دما و فشار می‌باشد. همانطور که در شکل ۲-۸۶ نشان داده شده است بیشترین تغییرات آنتالپی در دمای ثابت در بیشترین فشار (۷۵ psia) رخ می‌دهد. پس برای این حالت مورد بررسی، در فشار ۷۵ psia بیشترین انحراف از گاز کامل اتفاق می‌افتد. برای محاسبه‌ی خطای ایجاد شده از فرض گاز کامل، می‌توان از رابطه‌ی زیر استفاده کرد.

$$\%E = \frac{\Delta H_{total} - \Delta H_{P=cte}}{\Delta H_{total}} * 100 = \frac{\Delta H_{T=cte}}{\Delta H_{total}} * 100 \quad (۷۷-۲)$$

از آنجایی که در فشار ۷۵ psia بیشترین انحراف از گاز کامل اتفاق می‌افتد، پس برای محاسبه‌ی بیشترین خطای ظاهر شده از گاز کامل در این حالت مورد بررسی، لازم است $\Delta H_{T=cte}$ و ΔH_{total} در دمای ۱۰ درجه‌ی سانتیگراد و فشار ۷۵ psia بدست آید. با توجه به شکل ۲-۸۶ مقدار تغییرات آنتالپی در دمای ثابت، زمانی که فشار ورودی ۷۵ psia باشد، $۵/۷۴$ kJ/kg می‌باشد. پس از مشخص شدن مقدار تغییرات آنتالپی در دمای ثابت، برای بدست آوردن کل تغییرات آنتالپی با استفاده از رابطه‌ی (۷۵-۲)، می‌بایست تغییرات آنتالپی در فشار ثابت بدست آید. برای محاسبه‌ی تغییرات آنتالپی در فشار ثابت می‌توان از رابطه‌ی زیر استفاده کرد.

$$\Delta H_{P=cte} = C_P(T_{out} - T_{in}) \quad (۷۸-۲)$$

در رابطه‌ی (۷۸-۲)، C_P بیانگر گرمای ویژه جرمی در فشار ثابت بر حسب kJ/kg.C ، T_{in} و T_{out} نیز بیانگر دمای ورودی و خروجی گاز بر حسب درجه‌ی سلسیوس می‌باشند. در این حالت مورد بررسی، مقدار C_P در دمای ۱۰ درجه‌ی سانتیگراد و فشار ۷۵ psia برابر $۲/۱$ kJ/kg.C است. زمانی که فشار ورودی ۷۵ psia و دمای ورودی ۳۵ درجه‌ی سانتیگراد باشد، دمای خروجی بدست‌آمده برای گاز کامل توسط نرم‌افزار محاسبه‌ی نشی $۳/۴$ درجه‌ی سانتیگراد می‌شود. پس در این شرایط تغییرات آنتالپی در فشار ثابت طبق رابطه‌ی (۷۸-۲) بدست آمده و مقدار آن برابر $۶۶/۴$ kJ/kg خواهد شد.

از طریق رابطه‌ی (۷۵-۲) مقدار کل تغییرات آنتالپی بدست می‌آید و با استفاده از رابطه‌ی (۷۷-۲) می‌توان درصد خطای ظاهر شده در صورت فرض گاز کامل را محاسبه نمود. در این حالت مورد بررسی کل تغییرات آنتالپی برابر $۶۰/۶۶$ kJ/kg- و خطای ظاهر شده برابر $۹/۵\%$ می‌باشد.

۶.۲.۲ نتیجه‌گیری کلی از بررسی تغییرات آنتالپی

همانطور که در شکل ۲-۸۶ نشان داده شده‌است، تغییرات آنتالپی در دمای ثابت با فشار ورودی بصورت خطی رابطه دارد. این به معنای آن‌است که مشتق آنتالپی نسبت به فشار در دمای ثابت، همواره یک مقدار ثابت خواهد شد. همچنین در بحث محاسبه‌ی ضریب تراکم‌پذیری در گزارش خردادماه این نتیجه بدست آمد که مقدار ضریب تراکم‌پذیری بسیار به یک نزدیک است. رابطه‌ی زیر برای تغییرات آنتالپی نسبت به دما و فشار در پیوست الف ذکر شده‌است.

$$dH = C_p dT + \frac{ZRT}{P} (1 - Z + T \left(\frac{\partial Z}{\partial T}\right)_P) \quad (۷۹-۲)$$

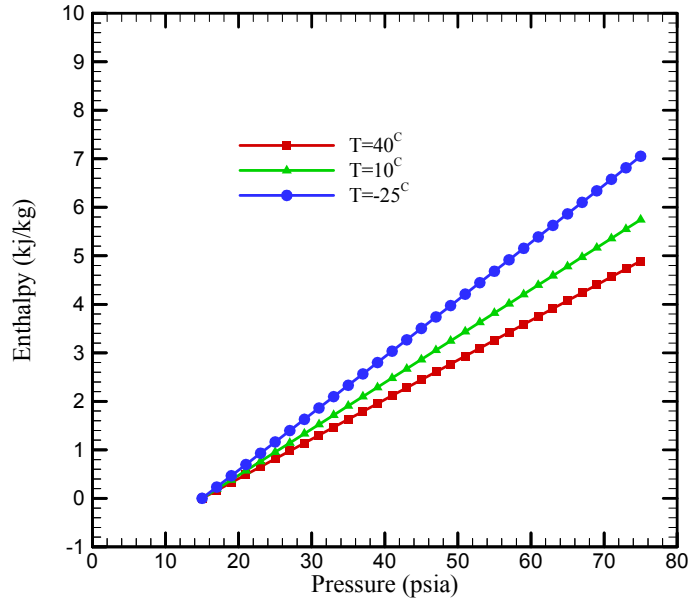
اگر از رابطه‌ی (۷۹-۲) نسبت به فشار در دمای ثابت مشتق گرفته شود و ضریب تراکم‌پذیری یک در نظر گرفته شود اما تغییرات آن نسبت به دما در فشار ثابت لحاظ گردد، رابطه‌ی زیر بدست می‌آید.

$$\left(\frac{\partial H}{\partial P}\right)_T = -\frac{RT^2}{P} \left(\frac{\partial Z}{\partial T}\right)_P \quad (۸۰-۲)$$

همان‌گونه که در شکل ۲-۸۶ مشخص است مشتق آنتالپی نسبت به فشار در دمای ثابت، همواره یک مقدار ثابت خواهد شد. پس با ثابت بودن پارامترهای R و T در رابطه‌ی (۸۰-۲)، می‌توان گفت :

$$\left(\frac{\partial Z}{\partial T}\right)_P \left(\frac{\partial T}{\partial P}\right)_T = \text{constant} \quad (۸۱-۲)$$

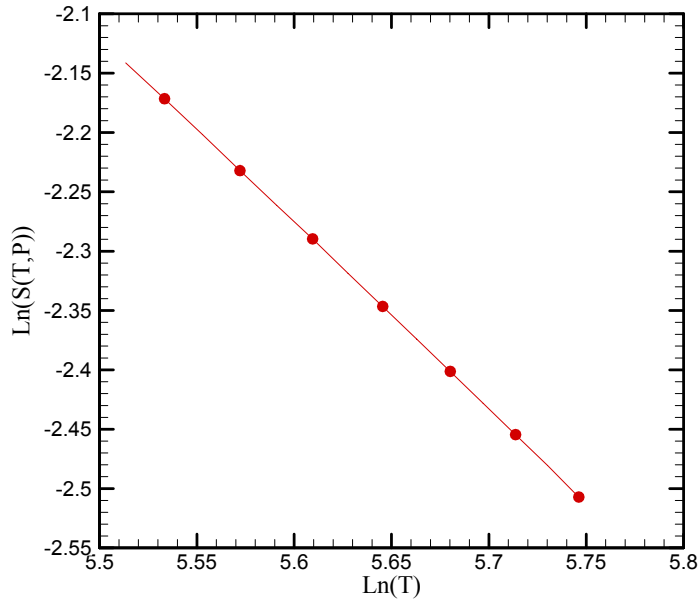
رابطه‌ی (۸۱-۲) نشان می‌دهد در محدوده‌ی فشار این حالت مورد بررسی و در دمای ثابت، مشتق ضریب تراکم‌پذیری نسبت به دما در فشار ثابت نسبت به همان فشار، مقداری ثابت خواهد شد. پس رابطه‌ی (۸۱-۲) مستقل از فشار است. اما همانطور که در شکل ۲-۸۷ نشان داده شده‌است شیب منحنی‌ها در دماهای مختلف تغییر می‌کند. بر اساس رابطه‌ی (۸۰-۲) با تغییر شیب منحنی‌ها یعنی با تغییر مشتق آنتالپی نسبت به فشار در دمای ثابت، مقدار مشتق ضریب تراکم‌پذیری نسبت به دما در فشار ثابت نسبت به همان فشار $\left(\frac{1}{P} \left(\frac{\partial Z}{\partial T}\right)_P\right)$ ، تغییر خواهد کرد. پس می‌توان گفت رابطه‌ی (۸۱-۲) فقط وابسته به دما می‌باشد.



شکل ۲-۸۷: تغییرات آنتالپی در چند دمای ثابت بر حسب فشار ورودی گاز

برای بدست آوردن تابع $\frac{1}{P} \left(\frac{\partial Z}{\partial T} \right)_P$ نسبت به دما، می‌بایست تابع شیب منحنی‌های شکل ۲-۸۷ با دما محاسبه شود. برای این کار مانند آنچه در شکل ۲-۸۸ آورده شده‌است، لازم است مقدار $\ln \left[\frac{RT^2}{P} \left(\frac{\partial Z}{\partial T} \right)_P \right]$ بر حسب $\ln T$ رسم شود. بیانگر شیب خط حاصل از ترسیم تغییرات آنتالپی در دمای ثابت بر حسب فشار ورودی در دمای T می‌باشد که در شکل ۲-۸۷ با S نشان داده شده‌است. پس از خطی‌سازی نمودار $\ln \left[\frac{RT^2}{P} \left(\frac{\partial Z}{\partial T} \right)_P \right]$ بر حسب $\ln T$ ، رابطه‌ی زیر بدست می‌آید.

$$\ln \left[\frac{RT^2}{P} \left(\frac{\partial Z}{\partial T} \right)_P \right] = -1.5707 * \ln T + 6.5203 \quad (۲-۸۲)$$



شکل ۸۸-۲: تغییرات آنتالپی در طول لوله برحسب فشار ورودی گاز در دمای ثابت

پس از ساده کردن و خارج کردن رابطه‌ی (۸۲-۲) از فرم لگاریتمی رابطه‌ی زیر بدست می‌آید.

$$\frac{\left(\frac{\partial Z}{\partial T}\right)_P}{P} = \frac{678.78}{RT^{3.5705}} \quad (۸۳-۲)$$

در رابطه‌ی (۸۳-۲)، R ثابت جهانی گازهاست و زمانی که تغییرات آنتالپی بر حسب kJ/kg باشد، مقدار آن برای این حالت مورد بررسی $۰/۴۴۱۵ \text{ kJ/kg.k}$ خواهد شد. با جایگذاری این مقدار در رابطه‌ی (۸۳-۲)، رابطه‌ی زیر بدست می‌آید.

$$\frac{\left(\frac{\partial Z}{\partial T}\right)_P}{P} = \frac{1537.44}{T^{3.5705}} \quad (۸۴-۲)$$

رابطه‌ی (۸۴-۲) بیانگر این است که $\frac{1}{P}\left(\frac{\partial Z}{\partial T}\right)_P$ در این حالت مورد بررسی فقط تابع دما می‌باشد. با جایگذاری رابطه‌ی (۸۴-۲) در رابطه‌ی (۸۰-۲)، مقدار تغییرات آنتالپی بر حسب فشار در دمای ثابت بدست می‌آید. پس از قرار دادن رابطه‌ی (۸۰-۲) در فرم کلی موازنه‌ی انرژی ذکر شده در پیوست (الف)، رابطه‌ی زیر حاصل می‌شود.

$$\Delta H_{total} = C_P(T_{out} - T_{in}) + \frac{678.78}{T^{1.5705}}(P_{in} - P_{out}) \quad (۸۵-۲)$$

در رابطه‌ی (۲-۸۵)، P برحسب psia، T برحسب کلوین، C_p برحسب kJ/kg.C و ΔH_{total} برحسب kJ/kg می‌باشد. همچنین باید دقت کرد که در رابطه‌ی (۲-۸۵)، T دمای متوسط گاز درون لوله می‌باشد که در این حالت مورد بررسی می‌توان آن را از متوسط حسابی دمای ورودی و خروجی گاز محاسبه نمود.

۷.۲.۲ اعمال شرایط گاز واقعی در موازنه انرژی

در ادامه مباحث مربوط به محاسبه نشتی از خطوط لوله، روابط بدست آمده برای محاسبه‌ی دبی گاز در شرایطی که ضریب تراکم‌پذیری ثابت فرض شود، در بخش‌های قبل بدست آمد. در این بخش رابطه‌ی بدست آمده برای تغییرات آنتالپی در موازنه‌ی انرژی اعمال شده و روابط محاسبه‌ی دما، فشار و سرعت خروجی براین اساس اصلاح می‌شوند. نمادهای بکار رفته در این بخش در جدول ۷-۲ آورده شده‌است.

جدول ۷-۲: نمادهای بکار رفته در روابط

نماد	توضیح	نماد	توضیح
بکاررفته		بکاررفته	
P	فشار	D	قطر لوله
T	دما	f	ضریب داریسی
Z	ضریب تراکم‌پذیری	P^*	فشار خروجی لوله در ماخ ۱
H	آنتالپی	ρ	دانسیته
u	سرعت گاز	γ	نسبت گرماهای ویژه
C_p	ظرفیت گرمایی	M	عدد ماخ
C	سرعت صوت	R	ثابت جهانی گازها

اصلاح روابط در حالت خفگی

در این حالت عدد ماخ در خروجی لوله برابر با یک بوده و سرعت در ورودی به ماکزیمم مقدار خود رسیده‌است. این حالت زمانی رخ می‌دهد که فشار در خروجی به نحوی باشد که بتواند ماخ خروجی را برابر با یک نماید. در این حالت فشاری که گاز در آن تخلیه می‌شود کوچکتر و یا مساوی با P^*

می‌باشد. شایان ذکر است برای تمامی فشارهایی که کم‌تر از P^* می‌باشند، شرایط جریان در لوله یکسان بوده و سرعت و دبی گاز ورودی به لوله یکسان خواهد شد.

در ادامه فرم اصلاح‌شده‌ی موازنه‌ی انرژی برای زمانی که گاز واقعی باشد در استخراج معادلات دما، فشار، آنتالپی و فاکتور اصطکاک مورد بررسی قرار گرفته‌است. پس از محاسبه‌ی این روابط برای گاز واقعی دما، فشار و سرعت خروجی گاز و از آنجا دبی حجمی و جرمی گاز را می‌توان بدست آورد.

استخراج معادله‌ی نسبت دما

در این قسمت هدف پیدا کردن نسبت دما برای گاز واقعی با استفاده از موازنه انرژی اصلاح شده می‌باشد. رابطه‌ی بدست‌آمده برای آنتالپی گاز واقعی بصورت زیر است:

$$dH = C_p dT - \frac{678.78Z}{T_{av}^{1.5705}} dP \quad (۸۶-۲)$$

در رابطه‌ی (۸۵-۲)، H بیانگر آنتالپی می‌باشد. موازنه‌ی انرژی در مرجع [۲] بصورت زیر نوشته شد.

$$dH + \frac{1}{2} d(u^2) = 0 \quad (۸۷-۲)$$

با جایگذاری رابطه‌ی (۸۵-۲) در (۸۷-۲) رابطه‌ی زیر بدست می‌آید.

$$C_p dT - \frac{678.78Z}{T_{av}^{1.5705}} dP + \frac{1}{2} d(u^2) = 0 \quad (۸۸-۲)$$

مقادیر معادل گرمای ویژه و سرعت صوت مطابق روابط زیر تعریف می‌شود.

$$C_p = \frac{\gamma ZR}{\gamma - 1} \quad (۸۹-۲)$$

$$C^2 = \gamma ZRT \quad (۹۰-۲)$$

با اعمال روابط (۸۹-۲) و (۹۰-۲) در رابطه‌ی (۸۸-۲) و ساده‌سازی آن، رابطه‌ی زیر بدست می‌آید.

$$\frac{1}{Z_1 T_1} \left[\frac{1}{\gamma - 1} - \frac{678.78Z}{T_{av}^{1.5705} R \gamma} \frac{P_1}{T_1} + \frac{1}{2} M_1 \right] = \frac{1}{Z_2 T_2} \left[\frac{1}{\gamma - 1} - \frac{678.78Z}{T_{av}^{1.5705} R \gamma} \frac{P_2}{T_2} + \frac{1}{2} M_2 \right] \quad (۹۱-۲)$$

رابطه‌ی (۲-۹۱) بین هر دو نقطه داخل لوله برقرار است. زمانی که سرعت خروجی به سرعت صوت رسیده باشد یعنی عدد ماخ یک باشد، رابطه‌ی (۲-۹۱) بین دو نقطه‌ی ورودی و خروجی، بصورت زیر نوشته می‌شود.

$$\frac{1}{Z_{in} T_{in}} \left[\frac{1}{\gamma - 1} - \frac{678.78 Z}{T_{av}^{1.5705} R \gamma} \frac{P_{in}}{T_{in}} + \frac{1}{2} M_{in} \right] = \frac{1}{T_{out} Z_{out}} \left[\frac{1}{\gamma - 1} - \frac{678.78 Z}{T_{av}^{1.5705} R \gamma} \frac{P_{out}}{T_{out}} + \frac{1}{2} \right] \quad (۲-۹۲)$$

استخراج معادله‌ی نسبت فشار و نسبت دانسیته

در این قسمت هدف پیدا کردن نسبت فشار برای گاز واقعی با استفاده از موازنه انرژی اصلاح شده می‌باشد. با استفاده از معادله پیوستگی می‌توان نوشت:

$$\rho_1 u_1 = \rho_2 u_2 \quad (۲-۹۳)$$

همچنین با استفاده از تعریف سرعت صوت نتیجه می‌شود:

$$C^2 = \frac{P}{\rho} \rightarrow \rho = \gamma \frac{P}{C^2} \quad (۲-۹۴)$$

با جایگذاری رابطه (۲-۳۰) در معادله پیوستگی، معادله (۲-۹۳) به شکل زیر بازنویسی می‌شود.

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{C_1}{C_2} \cdot \frac{M_2}{M_1} = \sqrt{\frac{T_1}{T_2}} \cdot \frac{M_2}{M_1} \quad (۲-۹۵)$$

با فرض اینکه سرعت خروجی به سرعت صوت رسیده باشد، با استفاده از رابطه (۲-۹۵)، معادله زیر را بین دو نقطه‌ی ورودی و خروجی می‌توان نوشت.

$$\frac{P_{in}}{P_{out(M=1)}} = \sqrt{\frac{T_{in}}{T_{out(M=1)}}} \cdot \frac{1}{M_{in}} \quad (۲-۹۶)$$

با استفاده از معادله حالت می‌توان برای نسبت دانسیته نتیجه گرفت:

$$\frac{\rho_{in}}{\rho_{out}} = \frac{P_{in}}{P_{out}} \cdot \frac{T_{out} Z_{out}}{T_{in} Z_{in}} \quad (۲-۹۷)$$

استخراج معادله فاکتور اصطکاک برای گاز واقعی

در این قسمت هدف پیدا کردن معادله فاکتور اصطکاک برای گاز واقعی با استفاده از موازنه انرژی اصلاح شده می‌باشد. معادله مومنتوم را به شکل زیر می‌توان بازنویسی نمود.

$$\rho u du + dP = -\frac{1}{2} \rho u^2 \frac{f dx}{D} \quad (98-2)$$

با تقسیم طرفین رابطه فوق بر $-\frac{1}{2} \rho u^2$ نتیجه می‌شود،

$$\frac{\rho u du}{-\frac{1}{2} \rho u^2} + \frac{dP}{-\frac{1}{2} \rho u^2} = \frac{f dx}{D} \quad (99-2)$$

برای ادامه ابتدا عبارت اول از سمت چپ مطابق ذیل ساده می‌شود.

$$\frac{\rho u du}{-\frac{1}{2} \rho u^2} = -2 \frac{du}{u} \quad (100-2)$$

با استفاده از تعریف عدد ماخ و تعریف سرعت صوت، نتیجه می‌شود:

$$\gamma Z R T . M^2 = u^2 \quad (101-2)$$

با مشتق‌گیری از رابطه‌ی فوق، معادله زیر حاصل می‌گردد:

$$2\gamma Z R T . M dM + \gamma Z R M^2 dT = 2u du \quad (102-2)$$

با استفاده از معادله انرژی می‌توان نوشت.

$$dT = \frac{1}{C_p} \left[\frac{678.78Z}{T_{av}^{1.5705}} dP - \frac{1}{2} d(u^2) \right] \quad (103-2)$$

با استفاده از رابطه‌ی (۱۰۳-۲)، تعریف C_p و تعریف سرعت صوت، رابطه‌ی (۱۰۲-۲) را می‌توان

بصورت زیر نوشت.

$$2c^2MdM - (\gamma - 1)M^2udu + \frac{678.78Z(\gamma - 1)M^2}{T_{av}^{1.5705}}dP = 2udu \quad (104-2)$$

در نهایت نتیجه می‌شود:

$$-2\frac{du}{u} = \left[-2\frac{dM}{M} + \frac{678.78Z(1-\gamma)}{C^2T_{av}^{1.5705}}dP \right] \left[1 + \frac{1}{2}(\gamma - 1)M^2 \right]^{-1} \quad (105-2)$$

برای محاسبه‌ی عبارت دوم از سمت چپ معادله (۳۶-۲) بر حسب عدد ماخ با دیفرانسیل‌گیری از معادله حالت، رابطه‌ی ذیل نتیجه می‌شود:

$$dP = ZRTd\rho + Z\rho RdT \quad (106-2)$$

از طرفی با توجه به معادله رابطه‌ی (۱۰۳-۲) و با توجه به معادله پیوستگی $d\rho = \frac{-\rho du}{u}$ ، با

جایگذاری این عبارات در رابطه (۴۲-۲) و تقسیم کل عبارت بر $-\frac{1}{2}\rho u^2$ معادله ذیل بدست می‌آید:

$$\frac{dP}{-\frac{1}{2}\rho u^2} = \frac{2du}{u} \left[\frac{1}{\gamma M^2} + \frac{(\gamma - 1)}{\gamma} \right] \left[1 + \frac{678.78Z(1-\gamma)\rho}{\gamma T_{av}^{1.5705}} \right]^{-1} \quad (107-2)$$

با جایگذاری رابطه‌ی (۴۳-۲) در (۴۱-۲) رابطه‌ی زیر بدست می‌آید.

$$-2\frac{du}{u} = -2\frac{dM}{M} \left[1 + \frac{678.78Z(1-\gamma)\rho}{\gamma T_{av}^{1.5705}} \right] \left[1 + \left(\frac{678.78Z(1-\gamma)\rho}{2T_{av}^{1.5705}} \right) \left(\frac{1}{\gamma M^2} + \frac{(\gamma - 1)}{\gamma} \right) \right]^{-1} \quad (108-2)$$

با ترکیب روابط (۴۳-۲) و (۱۰۸-۲)، رابطه‌ی (۳۶-۲) به شکل زیر بازنویسی می‌شود.

$$\frac{fdx}{D} = -2\frac{dM}{M} \left[1 + \frac{678.78Z(1-\gamma)\rho}{\gamma T_{av}^{1.5705}} \right] \left[1 + \left(\frac{678.78Z(1-\gamma)\rho}{2T_{av}^{1.5705}} \right) \left(\frac{1}{\gamma M^2} + \frac{(\gamma - 1)}{\gamma} \right) \right]^{-1} \quad (109-2)$$

$$* \left[1 - \left[\frac{1}{\gamma M^2} + \frac{(\gamma - 1)}{\gamma} \right] \left[1 + \frac{678.78Z(1-\gamma)\rho}{\gamma T_{av}^{1.5705}} \right]^{-1} \right]$$

برای انتگرال‌گیری از رابطه‌ی (۱۰۹-۲)، می‌بایست تابع ρ بر اساس عدد ماخ معلوم باشد. با معلوم بودن نسبت دمای ورودی به خروجی، از طریق رابطه‌ی (۹۷-۲) می‌توان نسبت دانسیته ورودی به خروجی را محاسبه نمود. از طریق رابطه‌ی (۹۲-۲) نمی‌توان مقدار صریحی برای نسبت دماها بدست آورد. پس تابع دانسیته بر حسب عدد ماخ بصورت صریح قابل محاسبه نیست.

روش حل

از آنجایی که در رابطه‌ی (۲-۱۰۹) فرم صریحی برای دانسیته پیدا نشد، پس برای حل این معادله می‌بایست فرم دیفرانسیلی موازنه انرژی، معادله حالت، معادله پیوستگی و معادله مومتم نوشته شود و در یک دستگاه مختصات حل شود. فرم دیفرانسیلی معادله پیوستگی بصورت زیر است.

$$\frac{d\rho}{dx} = -\frac{\rho}{u} \frac{du}{dx} \quad (۲-۱۱۰)$$

رابطه‌ی زیر بیانگر فرم دیفرانسیلی معادله حالت می‌باشد. فرم دیفرانسیلی موازنه انرژی در رابطه‌ی (۲-۸۸) و فرم دیفرانسیلی معادله مومتم در رابطه‌ی (۲-۹۸) ذکر شده‌است.

$$\rho ZR \frac{dT}{dx} = \frac{dP}{dx} - ZRT \frac{d\rho}{dx} \quad (۲-۱۱۱)$$

برای تعیین سرعت در ورودی مراحل زیر به ترتیب می‌بایست انجام گیرد.

۱. فرض می‌شود ماخ در خروجی برابر با یک است.
۲. معادلات دیفرانسیل ذکر شده در روابط (۲-۸۵)، (۲-۹۸)، (۲-۸) و (۲-۱۲) می‌بایست بطور همزمان حل گردد.
۳. فشار در خروجی ($P_{exit(M=1)}$) مربوط به این حالت محاسبه می‌گردد.
۴. حال چنانچه $P_{exit(M=1)}$ بیشتر از فشاری که خط بدان تخلیه می‌شود (فشار اتمسفر) باشد از اینرو فرض اولیه درست بوده و با داشتن دمای اولیه گاز می‌توان به کمک عدد ماخ ورودی سرعت گاز ورودی را محاسبه نمود.

جریان مادون صوت

در این حالت عدد ماخ در تمام نقاط طول کانال کوچکتر از یک بوده و جریان در طول کانال مادون صوت می‌باشد. این حالت زمانی رخ می‌دهد که فشار در خروجی به نحوی باشد که نتواند ماخ خروجی را برابر با یک نماید. در این حالت فشاری که گاز در آن تخلیه می‌شود بزرگتر از P^* می‌باشد.

در این حالت نیز معادلات دیفرانسیل ذکر شده در روابط (۲-۸۵)، (۲-۹۸)، (۲-۸) و (۲-۱۲) می‌بایست بطور همزمان حل گردد. پس از حدس اولیه‌ی سرعت ورودی گاز و حل معادلات، مجهولات مسئله مشخص می‌شود. چنانچه فشار محاسبه شده در خروجی لوله برابر با فشار اتمسفر

بود می‌توان نتیجه گرفت که سرعت اولیه درست حدس زده شده و گرنه می‌بایست یک حدس جدید برای سرعت ورودی در لوله زده شود.

برای حل ۴ معادله‌ی (۸۵-۲)، (۹۸-۲)، (۸-۲) و (۱۲-۲) ذکر شده می‌بایست معادلات به فرم ODE^9 بر اساس یک پارامتر مرتب شوند. با انجام کمی عملیات ریاضی روی روابط ذکر شده، فرم ODE برای دانسیته بصورت زیر بدست می‌آید.

$$\frac{d\rho}{dx} = \frac{f\rho}{2D} \left[1 - \left[\frac{ZRT}{u^2} + \frac{678.78Z^2T(\gamma-1)Rap}{\gamma T_{av}^{1.5705}u^2} \right] \left[\frac{\gamma}{\gamma - a(\gamma-1)} \right] \right]^{-1} \quad (112-2)$$

$$* \left[\frac{\gamma}{\gamma - a(\gamma-1)} \right]$$

در رابطه‌ی (۱۱۲-۲) a بصورت زیر تعریف می‌شود.

$$a = \left[\frac{\gamma T_{av}^{1.5705}}{\gamma T_{av}^{1.5705} - 678.78Z(\gamma-1)\rho} \right] \quad (113-2)$$

با ترکیب روابط (۱۱۲-۲) و (۸-۲) فرم ODE برای سرعت بصورت زیر بدست می‌آید.

$$\frac{du}{dx} = \frac{-fu}{2D} \left[1 - \left[\frac{ZRT}{u^2} + \frac{678.78Z^2T(\gamma-1)Rap}{\gamma T_{av}^{1.5705}u^2} \right] \left[\frac{\gamma}{\gamma - a(\gamma-1)} \right] \right]^{-1} \quad (114-2)$$

$$* \left[\frac{\gamma}{\gamma - a(\gamma-1)} \right]$$

با جایگذاری رابطه‌ی (۱۱۴-۲) در رابطه‌ی (۹۸-۲) فرم ODE برای فشار بصورت زیر بدست می‌آید.

$$\frac{dP}{dx} = \frac{fu^2\rho}{2D} \left[1 - \left[\frac{ZRT}{u^2} + \frac{678.78Z^2T(\gamma-1)Rap}{\gamma T_{av}^{1.5705}u^2} \right] \left[\frac{\gamma}{\gamma - a(\gamma-1)} \right] \right]^{-1} \quad (115-2)$$

$$* \left[\frac{\gamma}{\gamma - a(\gamma-1)} \right] - \frac{fu^2\rho}{2D}$$

با ترکیب روابط (۸۸-۲)، (۱۱۴-۲) و (۱۱۵-۲) رابطه‌ی زیر برای فرم ODE دما بدست می‌آید.

⁹ Ordinary Deferential Equation

$$\frac{dT}{dx} = \frac{678.78ZT(\gamma-1)fap}{2\gamma T_{av}^{1.5705}D} \left[1 - \left[\frac{ZRT}{u^2} + \frac{678.78Z^2T(\gamma-1)Rap}{\gamma T_{av}^{1.5705}u^2} \right] \left[\frac{\gamma}{\gamma - a(\gamma-1)} \right] \right]^{-1}$$

$$* \left[\frac{\gamma}{\gamma - a(\gamma-1)} \right] + \frac{fu^2(\gamma-1)a}{2D\gamma ZR} \left[1 - \left[\frac{ZRT}{u^2} + \frac{678.78Z^2T(\gamma-1)Rap}{\gamma T_{av}^{1.5705}u^2} \right] \left[\frac{\gamma}{\gamma - a(\gamma-1)} \right] \right]^{-1} \quad (116-2)$$

$$* \left[\frac{\gamma}{\gamma - a(\gamma-1)} \right]$$

با حل همزمان معادلات (۲-۱۱۲)، (۲-۱۱۴)، (۲-۱۱۵) و (۲-۱۱۶) با یکی از روش‌های حل عددی (رانج-کوتای مرتبه ۴) مقادیر دانسیته، سرعت، فشار و دما به ازای دما و فشار ورودی محاسبه می‌شود.

۸.۲.۲ تصحیح اثر ضریب تراکم‌پذیری در معادلات

مطابق با بررسی‌های پیشین ملاحظه گردید که وجود ضریب تراکم‌پذیری بیشترین تاثیر را بر معادله‌ی انرژی می‌گذارد رابطه‌ی تغییرات آنتالپی برای گاز واقعی بصورت زیر بدست آمد.

$$\Delta H_{total} = C_p(T_{out} - T_{in}) + \frac{678.78}{T^{1.5705}}(P_{in} - P_{out}) \quad (117-2)$$

در رابطه‌ی (۲-۸۵)، P برحسب psia، T برحسب کلوین، Cp برحسب kJ/kg.k و ΔH_{total} برحسب kJ/kg می‌باشد. همچنین باید دقت کرد که در رابطه‌ی (۲-۸۵)، T دمای متوسط گاز درون لوله می‌باشد که در این حالت مورد بررسی می‌توان آن را از متوسط حسابی دمای ورودی و خروجی گاز محاسبه نمود.

از آنجایی که برای محاسبه‌ی دبی گاز نشتی می‌بایست معادله انرژی، معادله حالت، معادله پیوستگی و معادله مومنتم بصورت همزمان حل شوند پس تمامی این معادلات باید در یک سیستم آحاد باشند. برای نوشتن موازنه انرژی تغییرات آنتالپی باید معلوم باشد پس رابطه‌ی (۲-۸۵) می‌بایست در فرم آحاد متریک محاسبه گردد. در ادامه فرم متریک تغییرات آنتالپی محاسبه شده و از طریق آن فرم ODE موازنه‌ی انرژی بدست می‌آید. سپس با حل همزمان معادله انرژی، معادله حالت، معادله پیوستگی و معادله مومنتم برای گاز واقعی و گاز کامل دبی، سرعت گاز خروجی، دمای خروجی و دانسیته‌ی گاز خروجی محاسبه شده و نتایج حاصله مقایسه می‌گردد.

اصلاح رابطه‌ی تغییرات آنتالپی در سیستم متریک

با توجه به مطالب ذکر شده رابطه‌ی زیر را برای تغییرات آنتالپی نسبت به دما و فشار می‌توان نوشت.

$$dH = C_p dT + \frac{ZRT}{P} (1 - Z + T \left(\frac{\partial Z}{\partial T}\right)_P) \quad (118-2)$$

اگر از رابطه‌ی (۷۹-۲) نسبت به فشار در دمای ثابت مشتق گرفته شود و ضریب تراکم‌پذیری یک در نظر گرفته شود اما تغییرات آن نسبت به دما در فشار ثابت لحاظ گردد، رابطه‌ی زیر بدست می‌آید.

$$\left(\frac{\partial H}{\partial P}\right)_T = -\frac{RT^2}{P} \left(\frac{\partial Z}{\partial T}\right)_P \quad (119-2)$$

پس با ثابت بودن پارامترهای R و T در رابطه‌ی (۸۰-۲)، می‌توان گفت :

$$\left(\frac{\partial Z}{\partial T}\right)_P \left(\frac{\partial T}{\partial P}\right)_T = \text{constant} \quad (120-2)$$

رابطه‌ی (۸۱-۲) نشان می‌دهد در محدوده‌ی فشار این حالت مورد بررسی و در دمای ثابت، مشتق ضریب تراکم‌پذیری نسبت به دما در فشار ثابت نسبت به همان فشار، مقداری ثابت خواهد شد. پس رابطه‌ی (۸۱-۲) مستقل از فشار است. بر اساس رابطه‌ی (۸۰-۲) با تغییر شیب منحنی‌ها یعنی با تغییر مشتق آنتالپی نسبت به فشار در دمای ثابت، مقدار مشتق ضریب تراکم‌پذیری نسبت به دما در فشار ثابت نسبت به همان فشار $\left(\frac{1}{P} \left(\frac{\partial Z}{\partial T}\right)_P\right)$ ، تغییر خواهد کرد. پس می‌توان گفت رابطه‌ی (۸۱-۲) فقط وابسته به دما می‌باشد.

برای بدست آوردن تابع $\frac{1}{P} \left(\frac{\partial Z}{\partial T}\right)_P$ نسبت به دما، مانند آنچه در شکل ۸۸-۲ آورده شده، لازم است مقدار $\ln \left[\frac{-RT^2}{P} \left(\frac{\partial Z}{\partial T}\right)_P \right]$ بر حسب $\ln T$ رسم شود. $\left(\frac{-RT^2}{P} \left(\frac{\partial Z}{\partial T}\right)_P\right)$ بیانگر شیب خط حاصل از ترسیم تغییرات آنتالپی در دمای ثابت بر حسب فشار ورودی در دمای T می‌باشد که در شکل ۸۸-۲ با S نشان داده شده‌است. پس از خطی‌سازی نمودار $\ln \left[\frac{-RT^2}{P} \left(\frac{\partial Z}{\partial T}\right)_P \right]$ بر حسب $\ln T$ ، رابطه‌ی زیر بدست می‌آید.

$$\ln \left[\frac{-RT^2}{P} \left(\frac{\partial Z}{\partial T}\right)_P \right] = -1.5677 * \ln T + 4.5719 \quad (121-2)$$

پس از ساده کردن و خارج کردن رابطه‌ی (۸۲-۲) از فرم لگاریتمی رابطه‌ی زیر بدست می‌آید.

$$\frac{(\frac{\partial Z}{\partial T})_P}{P} = \frac{96.7277}{RT^{3.568}} \quad (122-2)$$

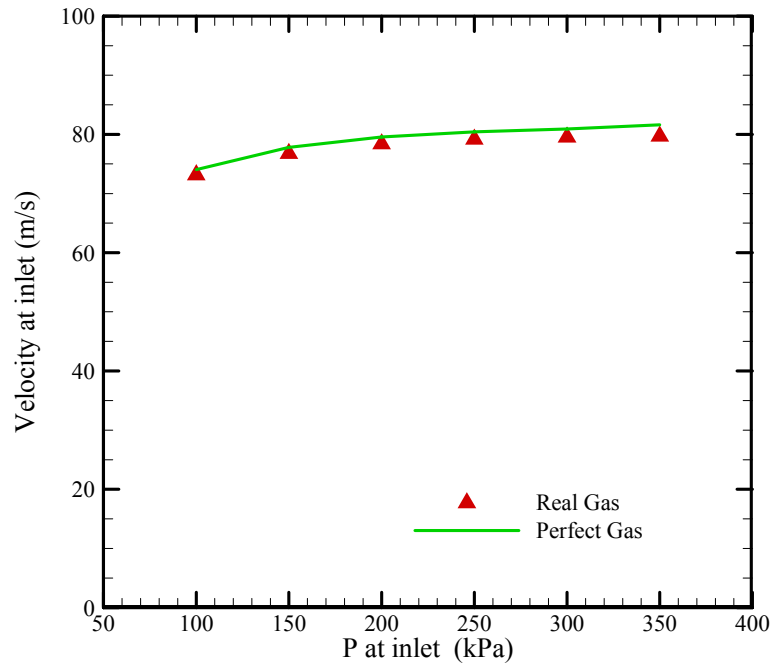
رابطه‌ی (۸۳-۲) بیانگر این است که $\frac{1}{P}(\frac{\partial Z}{\partial T})_P$ در این حالت مورد بررسی فقط تابع دما می‌باشد. با جایگذاری رابطه‌ی (۸۳-۲) در رابطه‌ی (۸۰-۲)، مقدار تغییرات آنتالپی بر حسب فشار در دمای ثابت بدست می‌آید. پس از قرار دادن رابطه‌ی (۸۰-۲) در فرم کلی موازنه‌ی انرژی ذکر شده در پیوست (الف)، رابطه‌ی زیر حاصل می‌شود.

$$\Delta H_{total} = C_P(T_{out} - T_{in}) + \frac{96.7277}{T^{1.568}}(P_{in} - P_{out}) \quad (123-2)$$

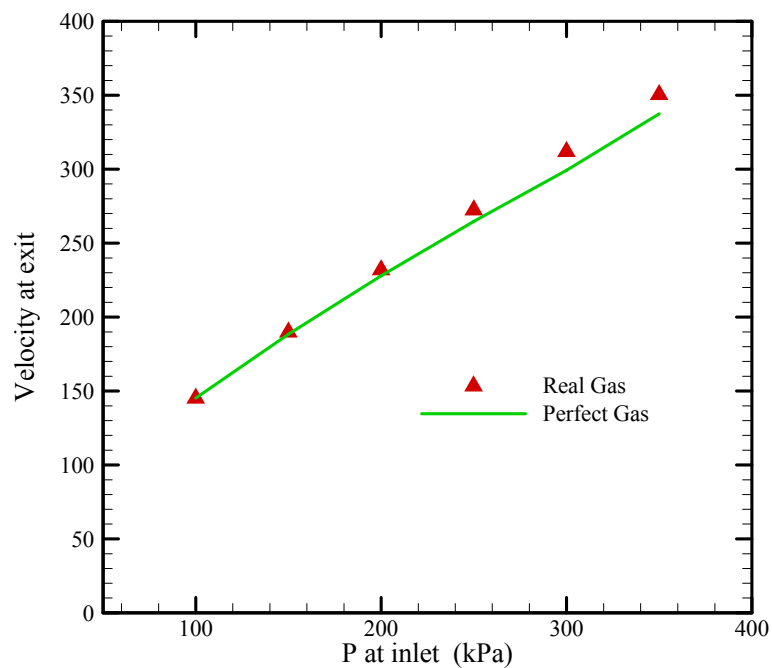
در رابطه‌ی (۱۲۳-۲)، P بر حسب pa ، T بر حسب کلوین، C_P بر حسب kJ/kg.C و ΔH_{total} بر حسب kJ/kg می‌باشد. همچنین باید دقت کرد که در رابطه‌ی (۱۲۳-۲)، T دمای متوسط گاز درون لوله می‌باشد.

۹.۲.۲ مقایسه نتایج کلی با حالت گاز کامل

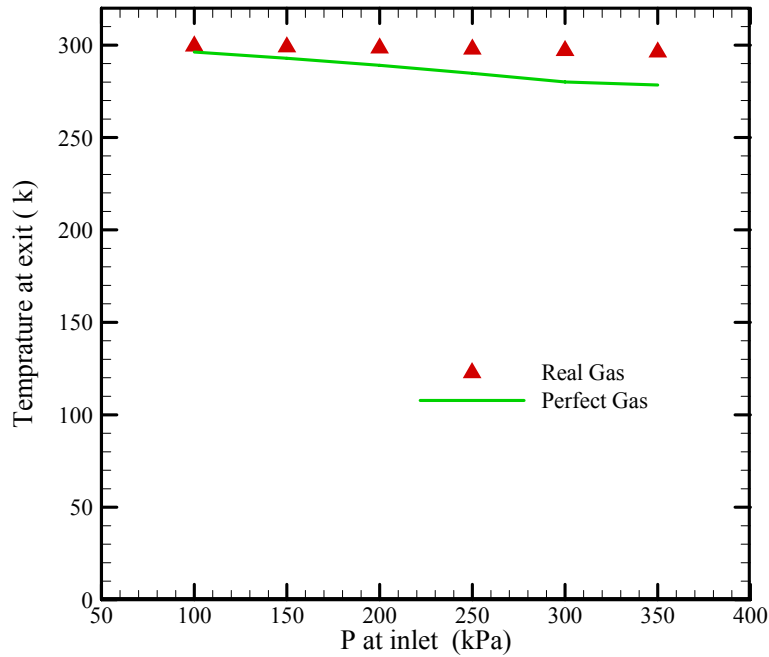
بر مبنای معادلات استخراج شده در قسمت قبل، نرم‌افزار مجدداً بازنویسی شده و نتایج حاصل از فرض گاز کامل و واقعی برای فشارهای ورودی ۱۵۰، ۱۰۰، ۲۰۰، ۲۵۰، ۳۰۰ و ۳۵۰ کیلوپاسکال محاسبه و در این قسمت ارائه می‌شود. در شکل ۸۹-۲ سرعت ورودی در دو حالت، در شکل ۹۰-۲ سرعت خروجی، در شکل ۹۱-۲ دمای خروجی و در شکل ۹۲-۲ عدد ماخ خروجی در دو حالت ارائه شده‌است.



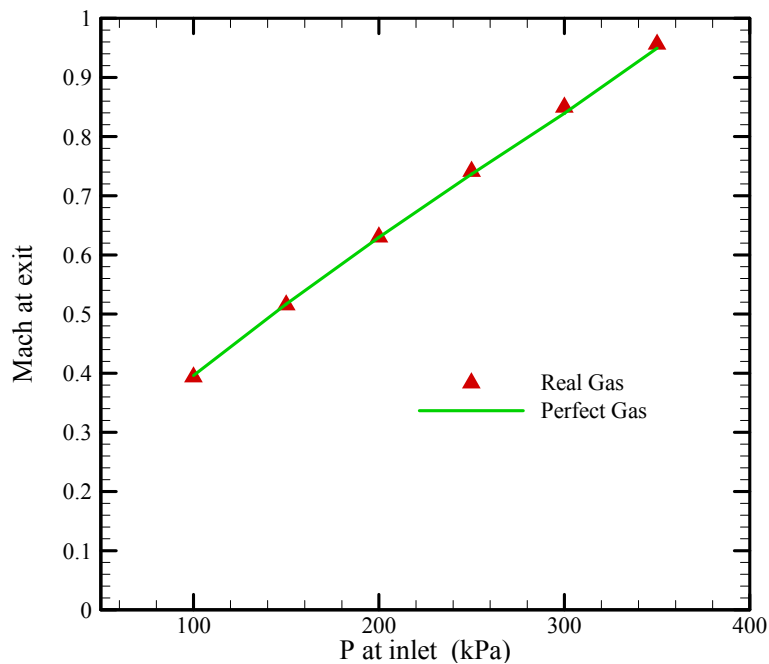
شکل ۲-۸۹: تغییر سرعت ورودی با فرض گاز کامل و یا واقعی با تغییر فشار ابتدای خط



شکل ۲-۹۰: تغییر سرعت خروجی با فرض گاز کامل و یا واقعی با تغییر فشار ابتدای خط



شکل ۹۱-۲: تغییر دما در خروجی با فرض گاز کامل و یا واقعی با تغییر فشار ابتدای خط



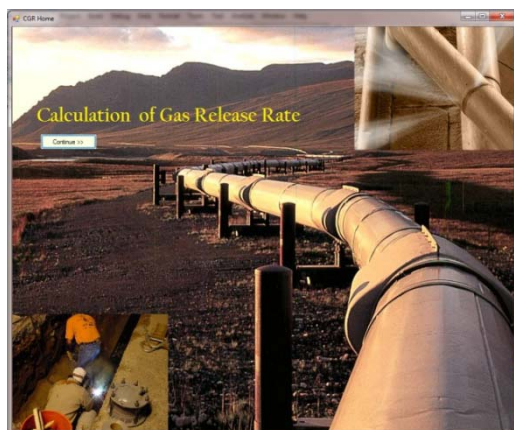
شکل ۹۲-۲: تغییر عدد ماخ در خروجی با فرض گاز کامل و یا واقعی با تغییر فشار ابتدای خط

مطابق با اشکال فوق مشاهده می‌گردد که تفاوت‌ها بین مقادیر در دو حالت ناچیز می‌باشد. به عبارتی فرض گاز کامل در محدوده‌ی فشار مورد نظر می‌تواند نتایج قابل قبولی را ارائه نماید. در این بین همانگونه که انتظار می‌رفت بیشترین اختلاف در مقادیر دماهای پیش‌بینی شده توسط نرم‌افزار در دو

حالت گاز ایده‌ال و واقعی می‌باشد. در هر صورت با توجه به اینکه این تفاوت اثر ناچیزی بر کل حل داشته و سرعت‌های ورودی یکسانی توسط نرم‌افزار پیش‌بینی شده‌است، می‌توان نتیجه گرفت که فرض گاز کامل برای مدل‌سازی این مسئله مطلوب می‌باشد.

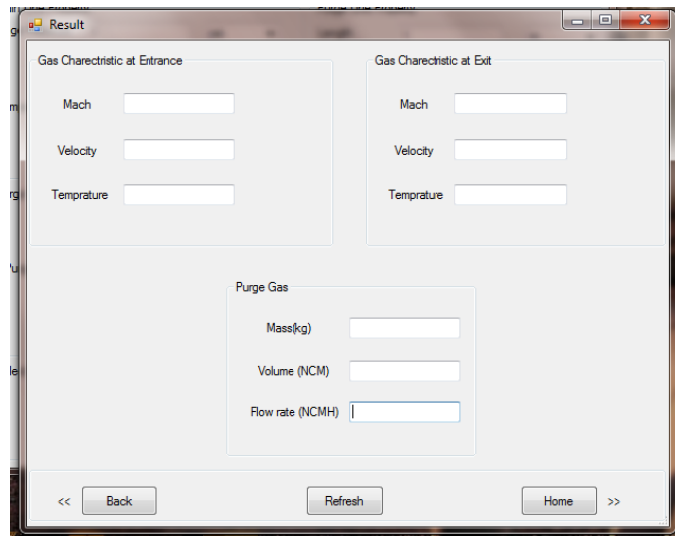
۳.۲ بازنویسی نرم‌افزار در محیط برنامه‌نویسی C#

همانگونه که در ابتدای فصل اشاره شده، به‌منظور تسهیل ویرایش نرم‌افزار و استفاده از یک زبان برنامه‌نویسی واحد در نگارش برنامه، نرم‌افزار مجدداً با زبان C# که یکی از قدرتمندترین زبان‌ها در زمینه‌ی کارهای گرافیکی بوده، بازنویسی شده‌است. در بازنویسی نرم‌افزار اشکالات گزارش شده نیز مرتفع گردیده و این نرم‌افزار در قالب جدیدی ارائه شده‌است. شکل ۲-۹۳ تا شکل ۲-۹۵ محیط جدید این نرم‌افزار را نشان می‌دهند.



شکل ۲-۹۳: صفحه اول نرم‌افزار

شکل ۲-۹۴: صفحه‌ی ورود اطلاعات



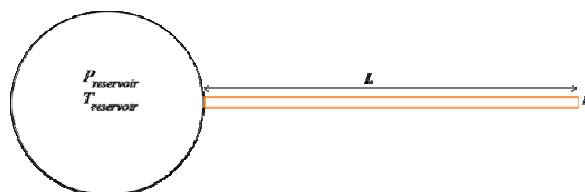
شکل ۲-۹۵: صفحه نمایش نتایج

۱.۳.۲ تصحیح برخی از بخش‌های نرم‌افزار

با توجه به اینکه در طراحی اولیه‌ی نرم‌افزار، خروج گاز از کل سطح مقطع لوله در نظر گرفته می‌شد، نیاز بود که میزان هدررفت در حالتی که سوراخ روی خط اصلی باشد (زمانی که طول معادل ورودی به نرم‌افزار صفر است) را بتوان به کمک نرم‌افزار محاسبه نمود. از دیگر مواردی که در جهت نزدیک نمودن فرضیات مسئله به حالت واقعی در نسخه اولیه صورت گرفته است، تصحیح اثر دما و فشار ورودی می‌باشد. همچنین خطاهایی در حین برنامه در برخی از طول‌ها رخ می‌دهد که این موضوع نیز مرتفع شده و تشریح فرآیندهای مذکور نیز در این فصل ارائه شده است.

بسط برنامه برای محاسبه نشتی در مخزن

در ادامه بهبود نرم‌افزار، توانمندی محاسبه نشتی بر روی خط اصلی (طول معادل ورودی برابر با صفر و یا نشتی در مخزن) نیز به نرم‌افزار اضافه شده است. برای نشان دادن این حالت اگر شکل کلی مدل به کار گرفته شده برای نرم‌افزار به صورت شکل ۲-۹۶ باشد، برای حالت مخزن طول L برابر صفر می‌شود.



شکل ۲-۹۶: مدل در نظر گرفته شده برای تخمین هدر رفت گاز از لوله شکسته

برای محاسبه نشتی در مخزن با وارد کردن طول صفر توسط کاربر، نرم‌افزار به کمک زیرروال‌هایی که تشریح شده‌اند، شرایط جریان را برای طول بسیار ناچیز $0/0001$ واحد محاسبه نموده و چنانچه عدد ماخ خروجی برابر یک شود، میزان نشتی از مخزن از رابطه زیر به دست می‌آید [۶].

$$\dot{m} = \frac{P_0 A}{\sqrt{T_0}} \sqrt{\frac{\gamma}{R} \left(\frac{2}{\gamma+1} \right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma-1}}} \quad (2-97)$$

که در روابط بالا \dot{m} دبی جرمی، T_0 دمای سکون، P_0 فشار سکون، A سطح مقطع لوله، R ثابت جهانی گازها و γ نسبت ضرایب حرارتی ویژه می‌باشد.

در صورتی که عدد ماخ خروجی کمتر از یک شود، باید سرعت در ورودی حدس زده شود و ادامه محاسبات مربوط به هدررفت گاز همان‌گونه که در بخش‌های پیشین توضیح داده شده‌است، انجام می‌شود. جهت استفاده کاربر برای محاسبه میزان هدررفت گاز از خط لوله اصلی (مخزن) تنها نیاز است همان‌طور که در شکل ۲-۹۷ نشان داده شده‌است، طول لوله را مساوی صفر قرار داده و بقیه کمیت‌ها را با توجه به حالت مورد نظر وارد کرده و محاسبات را انجام داد.

شکل ۲-۹۷: صفحه ورودی اطلاعات برای حالت مخزن

۲.۳.۲ تصحیح کمیت‌های دما، فشار و چگالی در برنامه

ویرایش اولیه برنامه بر این اساس تدوین شده‌بود که پس از دریافت دما و فشار مخزن، محاسبات با فرض اینکه دما و فشار ورودی همان دما و فشار استاتیک می‌باشند انجام می‌گرفت. با توجه به اینکه

فرض مخزن، شرایط سکون را تداعی می‌نماید، از این‌رو استفاده از دما و فشار استاتیک به‌جای سکون منجر به تولید خطا در محاسبات می‌شود. به‌منظور تصحیح این اثر به شکل ذیل عمل شده‌است.

- در حالتی که جریان سونیک خارج می‌شود.

در این حالت ماخ ورودی بدون نیاز به دانستن فشار و دمای اولیه تعیین می‌گردد. با داشتن ماخ در ورود، دما و فشار استاتیک را می‌توان از رابطه‌های ذیل محاسبه نمود.

$$\frac{T_0}{T} = 1 + \frac{\gamma - 1}{2} Ma^2 \quad (125-2)$$

$$\frac{P_0}{P} = \left(1 + \frac{\gamma - 1}{2} Ma^2 \right)^{\frac{\gamma}{\gamma - 1}} \quad (126-2)$$

- در حالتی که جریان مادون صوت خارج می‌شود.

ابتدا سرعت داخل لوله خط اصلی (u) حدس زده می‌شود. با استفاده از رابطه (۱۲۷-۲) و سرعت حدسی عدد ماخ به‌دست می‌آید.

$$Ma = \frac{u}{\sqrt{\gamma RT}} \quad (127-2)$$

حال با توجه به داشتن سرعت ورودی و عدد ماخ طبق روابط (۱۲۸-۲) و (۱۲۹-۲) که در زیر آمده است، دما و فشار سکون به‌دست می‌آید.

$$T_0 = T + \frac{u^2}{2C_p} \quad (128-2)$$

$$\frac{P_0}{P} = \left(1 + \frac{\gamma - 1}{2} Ma^2 \right)^{\frac{\gamma}{\gamma - 1}} \quad (129-2)$$

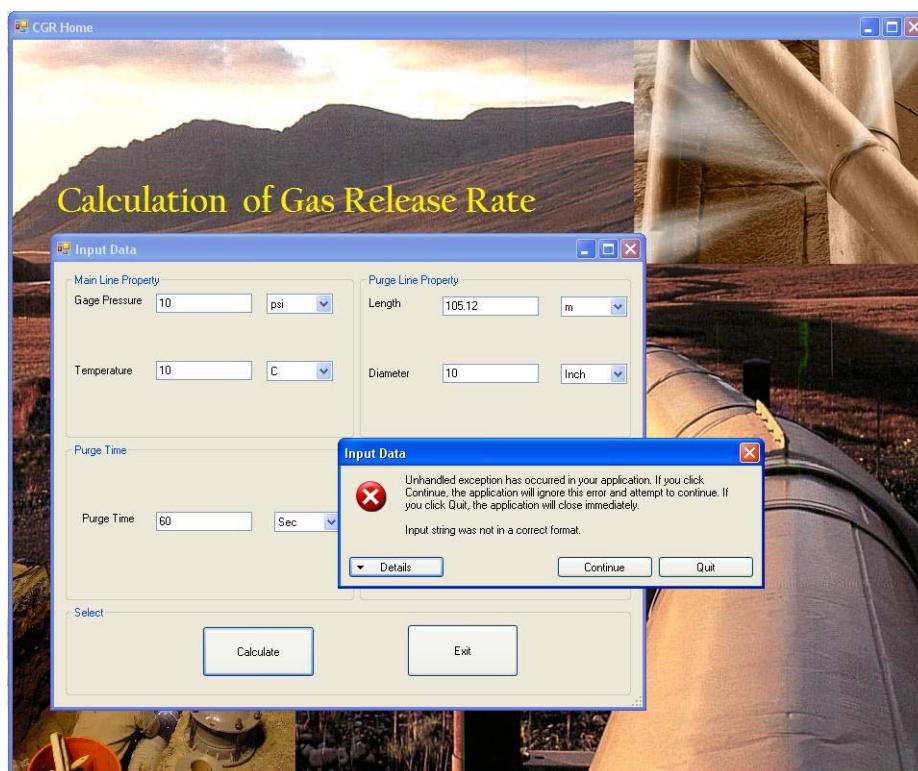
در انتها با داشتن دما و فشار سکون، چگالی حالت سکون نیز طبق رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$\rho_0 = \frac{P_0}{RT_0} \quad (130-2)$$

در روابط بالا T دما، P فشار، ρ چگالی، u سرعت، C_p ضریب حرارتی ویژه در فشار ثابت، R ثابت جهانی گازها، γ نسبت ضرایب حرارتی ویژه، Ma عدد ماخ و زیرنویس صفر برای حالت سکون می‌باشد.

۳.۳.۲ تصحیح خطاهای برنامه ناشی از طول ورودی

یکی از مشکلاتی که کاربر در حین استفاده از نرم‌افزار در برخی اوقات بدان برخورد می‌نمود، اجرای برنامه در برخی از طول‌های ورودی (طول‌های کمتر از $0/05$ واحد یا مضرب ناصحیحی از $0/05$ مانند $0/051$) بود. با توجه به تغییراتی که در برنامه قبلی ایجاد شده، این مشکل برطرف شده‌است. در نسخه جدید برنامه برای لوله‌های با طول زیر 100 واحد، گام مکانی برای انجام محاسبات $0/0001$ واحد در نظر گرفته شده‌است. لذا کاربر می‌تواند برای لوله‌های با طول زیر 100 واحد، مقدار طول لوله را با چهار رقم اعشار دقت (برای مثال $74/2542$ واحد) وارد نماید. همچنین در این برنامه برای لوله‌های بالای 100 واحد با توجه به عدم نیاز به دقت زیر 1 واحد و البته کاهش زمان انجام محاسبات، گام مکانی 1 واحد در نظر گرفته شده‌است. لذا لازم است تا کاربر برای لوله‌های بالای 100 واحد، مقدار طول لوله را با بدون اعشار (برای مثال 147 واحد) وارد نماید. در صورتی که این عدد با اعشار باشد، کاربر همان‌طور که در شکل ۲-۹۸ نشان داده شده‌است، با پنجره خطا روبرو خواهد شد. شایان ذکر است که نرم‌افزار طول‌های زیر $0/0001$ متر را برابر با صفر در نظر گرفته و نتایج مربوط به سوراخ روی خط اصلی را ارائه می‌دهد.



شکل ۲-۹۸: صفحه ورودی اطلاعات در حالت وارد کردن عدد نامناسب برای طول لوله

۴.۲ منابع

[1] M. Mohitpour et al., Pipeline Design and Construction, Second Edition, ASME press, 2003.

[۲] گزارش ماهیانه فعالیت‌های انجام‌شده در دی‌ماه ۱۳۸۸، KHGCRO MR 1388-09، دفتر پژوهش شرکت گاز استان خوزستان، بهمن ۱۳۸۸.

[3] www.nigc.ir

[۴] محمود فرزانه گرد، مهدی دیمی دشت بیاض، عطیه نداف. بررسی تاثیر ترکیب گاز طبیعی مناطق مختلف ایران بر میزان جرم ذخیره شده در مخازن CNG خودروها، ۱۳۷۸

[5] Gas Processors Suppliers Association. *The Gas Processing & Related Process Industries*, Tenth Edition, Gas Processors Association, Oklahoma, 1987

[6] John D. Anderson, Jr., "Modern Compressible Flow", McGraw-Hill, 2nd Edition, 1990.

۳ مطالعه و بررسی کاربرد لوله‌های کامپوزیتی

برای امکان‌پذیری کاربرد لوله‌های کامپوزیتی به‌جای لوله‌های فلزی در خطوط انتقال گاز طبیعی مقایسه‌ای در مورد خواص فیزیکی و کاربردی آنها صورت گرفته‌است. در ابتدا مشخص می‌شود که منظور از لوله‌های کامپوزیتی چه نوع لوله‌ای است و به تفاوت‌های ساختاری، روش انتخاب آنها در مقایسه با لوله‌های مرسوم فلزی و مسایل زیست محیطی اشاره می‌شود. آنگاه با تشریح وجوه تمایز خط انتقال با انواع دیگر خطوط لوله، با در نظر گرفتن وضعیت کاری یک خط انتقال، از دو جنبه فنی و اقتصادی مقایسه‌ای بین لوله‌های فلزی مرسوم و لوله‌های کامپوزیتی انجام شده‌است. از دید فنی مسایل مربوط به ضریب اصطکاک، افت فشار، خوردگی، مقاومت در برابر مواد شیمیایی، وزن، خراشیدگی و مکانیزم‌های شکست در کوتاه مدت و بلند مدت بررسی شده‌اند. از دیدگاه اقتصادی، مسایل مربوط به هزینه اجرای خط به صورت دفن شده، مسایل نشت سیال و تعمیرات خط انتقال بررسی شده تا در نهایت دلایل رویکرد کشورهای توسعه یافته به کاربرد لوله‌های کامپوزیتی در خطوط انتقال مشخص شود. در ادامه خطوط انتقال استان آبرتا و میزان جایگزینی لوله‌های کامپوزیتی بررسی شده است.

۱.۳ ویژگی‌ها و خواص لوله‌های کامپوزیتی

در یک تعریف عمومی، کامپوزیت شامل دو یا چند ماده مشابه است که با یکدیگر مخلوط و ترکیب شده‌اند، به نحوی که مقاومت ماده حاصل بیشتر از مواد اولیه‌ی تشکیل دهنده باشد. چنانچه این تعریف به عنوان ملاک محسوب شود، لوله‌های پلاستیکی نیز جزء لوله‌های کامپوزیتی طبقه‌بندی خواهند شد. اما تعریف دقیق‌تر این است که لوله‌های فایبرگلاس را به عنوان لوله‌های کامپوزیتی محسوب نمود. با این تقسیم‌بندی، تعریف صحیح لوله‌های کامپوزیتی (فایبرگلاس) مخلوط کردن و ترکیب شدن فیبرهای تقویت‌کننده در یک ماتریس از رزین ترموست پلیمری می‌باشد. در این حالت ماده‌ی تقویت‌کننده به صورت شیمیایی در ماتریس رزین ترکیب شده و بار وارد به قطعه را تحمل خواهد کرد.

۱.۱.۳ تعریف لوله فایبرگلاس

تعریف لوله فایبرگلاس در مراجع گوناگون متفاوت است. در مراجع^{۱۰} ASTM تعریف به این صورت است: یک محصول استوانه‌ای که در ساختار خود دارای الیاف تقویت کننده شیشه باشد که در یک بستر پخته شده از رزین ترموست قرار گرفته باشد. دو نوع مرسوم لوله‌های فایبرگلاس با نام‌های^{۱۱} RPMP و^{۱۲} RTRP شناخته می‌شوند. در صنعت نفت اطلاق نام‌های^{۱۳} GRE یا^{۱۴} FRP نیز به لوله‌های فایبرگلاس معمول است. نوع دیگری از لوله‌های کامپوزیتی به نام^{۱۵} CRLP شناخته می‌شوند که در این مدل یک لوله‌ی فلزی از بیرون و داخل با فایبرگلاس پوشش داده می‌شود، البته با استناد به تعریف ASTM از لوله‌ی کامپوزیتی، این نوع لوله جزء لوله‌های کامپوزیتی محسوب نمی‌گردد.

هر چند لوله‌های PE، کامپوزیتی محسوب نمی‌گردند اما بطور گسترده‌ای در خطوط انتقال و توزیع سیالات نفتی (به ویژه گاز طبیعی) استفاده می‌شوند. فشار خطوط اجرا شده با پلی‌اتیلن حداکثر ۱۰۰psi و حداکثر دما ۳۸ درجه سانتیگراد می‌باشد. اشکال عمده‌ی لوله‌های پلاستیکی، کاهش مقاومت مکانیکی آنها با افزایش دما است. لوله‌های پلی‌اتیلن جزء لوله‌های پلاستیکی طبقه‌بندی می‌شوند. از آنجایی که به دلیل مقاومت مکانیکی پایین و وجود پدیده خزش^{۱۶} و خاصیت ترموپلاستیک^{۱۷} بودن نمی‌توانند کاندیدای مناسبی برای خطوط انتقال باشند، لوله‌های پلاستیکی در این گزارش بررسی نشده و تنها لوله‌های کامپوزیتی با مبنای الیاف شیشه و رزین مورد توجه می‌باشد.

۲.۱.۳ خواص مکانیکی و حرارتی

لوله‌های کامپوزیتی تا حدود ۹۳ درجه سانتیگراد خواص خود را حفظ می‌کنند. با استفاده از نوع خاص رزین ونیل استر می‌توان دمای کاری را تا ۱۴۸ درجه سانتیگراد بالا برد. استفاده از رزین یاد شده مقاومت کامپوزیت را در برابر خراشیدگی^{۱۸} بسیار افزایش خواهد داد. معیارهایی که لوله کامپوزیتی را به صورت یک کاندیدای ایده‌آل برای انتقال گاز در آورده است عبارتست از:

۱. مقاومت در برابر خوردگی

۲. مقاومت در برابر مواد شیمیایی

¹⁰ American Society for Testing and Materials

¹¹ Reinforced Plastic Mortar Pipe

¹² Reinforced Thermosetting Resin Plastic

¹³ Glass-fibre Reinforced

¹⁴ Fibre-reinforced plastic

¹⁵ Composite Reinforced Line Pipe

¹⁶ creep

¹⁷ thermoplastic

¹⁸ abrasion

۳. مقاومت مکانیکی بالا

۴. وزن پایین

حداکثر مقاومت مکانیکی لوله کامپوزیتی با رزین ونیل استر بر مبنای الیاف شیشه حدود 24000 psi است که تقریباً ۶۷٪ مقاومت steel A36 است. در مورد مقاومت مکانیکی لوله‌های کامپوزیتی ذکر این نکته ضروری است که هدف بالا بردن مقاومت کامپوزیت تا حد فلز نیست بلکه هدف این است که نسبت مقاومت به وزن کامپوزیت آنقدر بالا رود تا لوله کامپوزیتی برای کارکرد در فشار بالا مناسب باشد. اصولاً به دلیل قابلیت کنترل مقاومت در محل و جهت دلخواه، لوله کامپوزیتی یک کاندیدای ایده‌آل برای خطوط انتقال تحت فشار می‌باشد. نسبت مقاومت به وزن برای لوله‌های کامپوزیتی نسبت به لوله‌های فلزی بیشتر است.

مقاومت مکانیکی لوله‌های فلزی شدیداً از خوردگی و پوسیدگی تاثیر می‌پذیرد. وجود یک سیستم حفاظتی قدرتمند (حفاظت کاتدی، لفاف پیچی^{۱۹}، پوشش دهی و رنگ آمیزی) همه برای حفظ مقاومت مکانیکی لوله ضروری هستند، در مقابل لوله‌ی کامپوزیتی برای حفظ مقاومت مکانیکی خود هیچ‌گونه نیازی به روش‌های حفاظتی ندارد و این یکی از مزایای اقتصادی اجرای خط انتقال با لوله کامپوزیتی می‌باشد.

انتقادهای سازمانهای محیط‌زیست در مورد لوله‌های کامپوزیتی متوجه استایرین می‌باشد. استایرین به علت توانایی مخلوط شدن با تعداد زیادی از پلیمرهای تشکیل دهنده‌ی رزین در مقیاس گسترده‌ای طی فرایند ساخت لوله مورد استفاده قرار می‌گیرد.

۳.۱.۳ ویژگی‌های خط انتقال

در طراحی خطوط انتقال با استفاده از لوله‌ی فلزی، با لحاظ نمودن ضرایب اطمینان در فشار کاری خط، ضخامت کافی برای لوله محاسبه می‌گردد و سپس کلاس لوله تعیین می‌شود. در انتخاب لوله‌های کامپوزیتی روند انتخاب لوله قدری متفاوت خواهد بود. پس از تعیین فشار خط و لحاظ نمودن ضرایب اطمینان، نیازی به محاسبه ضخامت لوله‌ی کامپوزیتی نمی‌باشد و مستقیماً می‌توان لوله کامپوزیتی دارای کلاس فشاری مناسب را انتخاب نمود. به بیان دیگر، کلاس فشاری لوله کامپوزیتی تابعی از ضخامت جداره‌ی لوله نمی‌باشد. باید توجه داشت که کلاس فشاری لوله‌ی کامپوزیتی نیز به نوبه خود دارای حاشیه امنیتی با ضریب حدود ۲ می‌باشد که در صورت نیاز به انجام محاسبات محافظه کارانه می‌توان آن را در نظر گرفت.

¹⁹ wrapping

میزان فشار خطوط انتقال بین ۲۰۰ تا ۱۳۰۰ psig می‌باشد و در یک تقسیم‌بندی کلی می‌توان خط انتقال را خطی با قطر بیش از ۸ inch (۲۰۰ میلیمتر) و فشار بیش از ۵۰۰ psig محسوب نمود. بطور معمول خطوط انتقال بسیار طولانی هستند (در حد چند صد کیلومتر). برای خطوط انتقال، قسمت اعظم هزینه خط، بهای خرید لوله و هزینه نصب آن خواهد بود. با احتساب تمامی ضرایب اطمینان، برای خطوط انتقال فشار طراحی خط حدود ۰/۸ فشار کاری لوله (که توسط شرکت سازنده پیشنهاد می‌گردد) می‌باشد. لوله‌های کامپوزیتی به دلیل روش ساخت، لوله‌ی بدون درز^{۲۰} می‌باشند. بنابراین در محاسبات مربوط به فشار مجاز لوله می‌توان ضریب اتصال^{۲۱} را برابر با یک فرض نمود. این ضریب از نسبت عدد بدست‌آمده از تست اتصال لوله، به عدد بدست‌آمده از تست اتصال در حالت بدون درز محاسبه می‌شود.

هرچند سابقه زیادی از کاربرد لوله‌های کامپوزیتی در خطوط انتقال وجود ندارد اما با رجوع به سابقه‌ی بلند مدت استفاده از لوله‌های کامپوزیتی در خطوط جمع‌آوری^{۲۲} و حفاری، کارایی این لوله‌ها در برابر مواد خورنده، به ویژه مقاومت در برابر H2S ثبت شده است.

۴.۱.۳ افت فشار و زبری

در خطوط انتقال با دبی حجمی بالا و با در نظر گرفتن رژیم جریان کاملاً مغشوش^{۲۳}، به دلیل فشار بالا، عدم وجود رطوبت و تشکیل زیر لایه آرام^{۲۴} مقادیر زبری ناشی از تشکیل رسوب و زبری ناشی از اتصالات، جوش‌ها و... در مقایسه با زبری سطح قابل صرف نظر می‌باشد [۱]. بنابراین، زبری سطح لوله نقش اساسی را در برآورد افت فشار در طول خط انتقال ایفا می‌کند. کاهش زبری سطح باعث افزایش ضریب انتقال می‌شود و این مساله به نوبه خود باعث کاهش افت فشار در طول لوله می‌شود. افزایش زبری سطح در نهایت باعث افزایش انرژی مورد نیاز برای انتقال سیال در طول خط خواهد شد.

برای لوله‌های فلزی نو مقدار زبری سطح بین ۶۵۰ تا ۷۵۰ μ inch در نظر گرفته می‌شود. به دلیل سایش، آلودگی و عوامل مشابه مقدار زبری سطح به میزان ۳۰ تا ۵۰ μ inch در سال افزایش خواهد داشت. برای لوله‌های کامپوزیتی، مقدار زبری سطح بین ۲۰۰ تا ۳۰۰ μ inch در نظر گرفته می‌شود. به دلیل سایش، آلودگی و عوامل مشابه مقدار زبری سطح به میزان ۵۰ تا ۷۵ μ inch در هر پنج سال

²⁰ seamless

²¹ Joint factor

(Most companies use empirical joint factors to adjust the the allowable properties within BJSFM. These factors are determined from joint testing.)

²¹ Joint factor

²² gathering lines

²³ fully turbulent

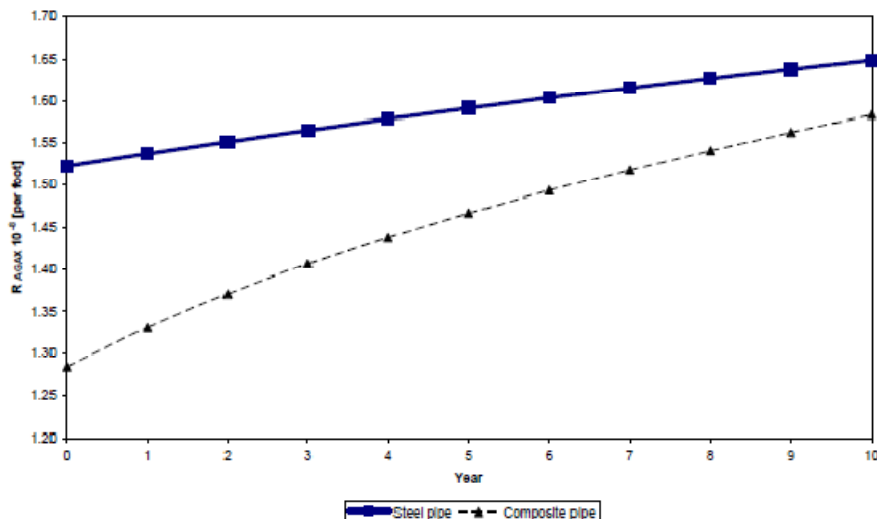
²⁴ laminar sublayer

افزایش خواهد داشت. یعنی به‌طور متوسط در هر سال $0.317 \mu\text{m}$ زبری سطح افزایش خواهد یافت. باید در نظر داشت که زبری سطح ارایه شده برای لوله‌های فلزی به عوامل محیطی وابسته است و مواردی نظیر وجود مواد خورنده در سیال عبوری و اکسیدشدن لوله در مدت انبار شدن، باعث افزایش قابل ملاحظه‌ای در زبری سطح خواهد شد.

ذکر یک مثال عملی برای تغییرات ضریب زبری

به‌عنوان مثال با در نظر گرفتن یک خط انتقال به طول ۲۰۰ مایل، با احتساب چگالی معادل ۰/۶۵ و ضریب تراکم برابر ۱، با دمای ورودی گاز طبیعی ۵۲۰ رانکین، فشار ورودی ۱۰۰۰ psia و دبی حجمی ۷۰۶۲ MCF/hr، با استفاده از مدل AGA^{25} ، نتایج میزان مقاومت لوله برای دو نوع لوله فلزی و کامپوزیتی با در نظر گرفتن میزان افزایش زبری محاسبه شده برای یک دوره ۱۰ ساله در شکل ۱-۳ نشان داده شده است.

دو شاخه نمودار شکل ۱-۳ یک همگرایی را نشان می‌دهند و انتظار این است که با گذشت زمان میزان R برای هر دو نوع لوله یکسان شود، اما به دلیل سایش جداره لوله‌ی فلزی عملاً با افزایش R لوله‌ی فلزی، لوله مقاومت در برابر فشار را از دست خواهد داد در حالی که در لوله‌ی کامپوزیتی به دلیل ساختار ویژه کامپوزیت، تغییر زبری تأثیری بر کلاس فشاری لوله نخواهد داشت. زیرا با کارکرد خط لوله‌ی فلزی و وجود پدیده‌ی سایش و خوردگی، ضخامت دیواره‌ی لوله کاهش می‌یابد. پس لوله مقاومت در برابر فشار را از دست خواهد داد، در حالی که تقریباً در لوله‌های کامپوزیتی ضخامت دیواره در طول کارکرد ثابت است.

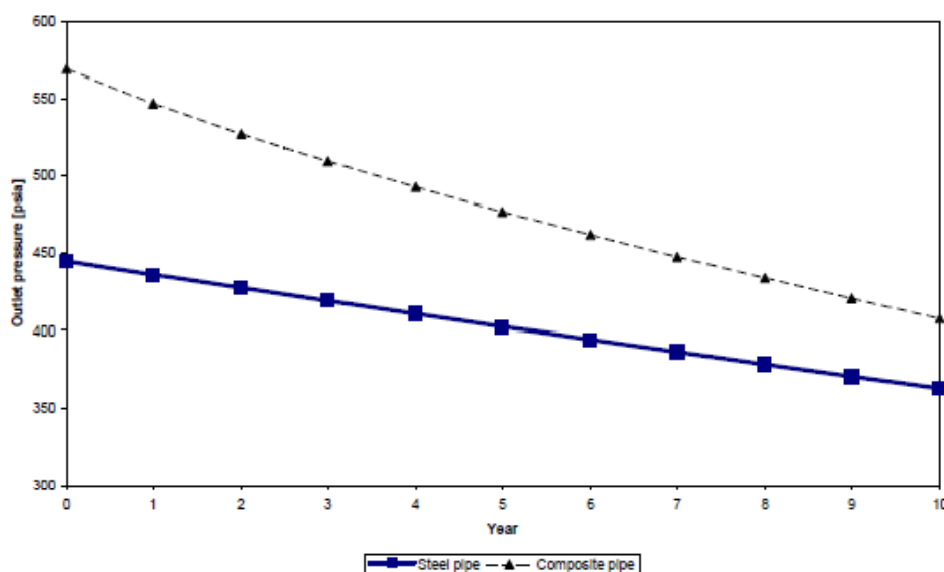


شکل ۱-۳: نمودار تغییر ضریب زبری با گذشت زمان

باید توجه داشت که برای انتخاب لوله‌های فلزی، با توجه به فشار خط، حداقل ضخامت مورد نیاز برای لوله برآورد می‌شود. سپس کلاس فشاری لوله با توجه به در نظر گرفتن ضخامت خوردگی انتخاب می‌گردد. اما در انتخاب لوله‌های کامپوزیتی ماده‌ی سازنده‌ی بایستی متناسب با شرایط مورد نیاز، طراحی و ساخته شود. یعنی مواد مورد استفاده و نحوه‌ی چیدمان آنها به گونه‌ای است که استحکام مورد نظر طراح تامین گردد. به عبارت دیگر نیازی به افزایش ضخامت برای رسیدن به فشار کارکرد بالاتر نیست.

ذکر یک مثال عملی برای تغییرات افت فشار

بعنوان مثال با در نظر گرفتن قطر ۲۰ اینچ برای لوله با استفاده از مدل AGA، فشار گاز در خروجی لوله محاسبه شده و برآورد افت فشار برای لوله فلزی و لوله کامپوزیتی انجام شده است. محاسبات با در نظر گرفتن میزان افزایش زبری لوله در یک دوره ۱۰ ساله صورت گرفته است. نتایج برای یک دوره ۱۰ ساله در نمودار شکل ۲-۳ نشان داده شده‌اند.



شکل ۲-۳: مقایسه افت فشار برای دو لوله فلزی و کامپوزیتی در یک دوره ۱۰ ساله

مشاهده می‌شود که با در نظر گرفتن لوله نو، و با فرض یکسان بودن طول خط و فشار اولیه، اختلاف فشاری حدود ۱۶۰ psia در خروجی این دو نوع لوله وجود خواهد داشت. پس از گذشت ۱۰ سال، کماکان اختلاف بین فشار خروجی این دو نوع لوله وجود دارد اما میزان آن کاهش یافته است و به حدود ۵۰ psia می‌رسد. باید توجه داشت که همگرایی دو شاخه‌ی نمودار به آن معنا نیست که پس از گذشت مدت زمان زیادتر، میزان افت فشار در شبکه فلزی و کامپوزیتی یکسان می‌شود. عموماً پس از گذشت ۱۰ سال خطر ناشی از خوردگی در لوله‌های فلزی آنقدر افزایش می‌یابد که تعمیرات انجام شده روی خط باعث می‌شود ضریب اصطکاک نتواند کاهش یابد. در یک بحث کلی می‌توان

گفت هر قدر طول خط بیشتر باشد، تاثیر نوع لوله بیشتر خود را نشان خواهد داد. به دلیل افت فشار کمتر در خط انتقال با لوله کامپوزیتی، این خط می‌تواند با فشار کمتری نسبت به خط فلزی کار کند.

۵.۱.۳ خوردگی و نشت سیال

مقاومت در برابر خوردگی یکی از مهمترین مسایل در طراحی خطوط انتقال می‌باشد. لوله‌های فلزی کربن‌استیل در برابر خوردگی بسیار ضعیف عمل می‌کنند. چنانچه سیال دارای آب، آب‌نمک^{۲۶}، دی‌اکسیدکربن، سولفید هیدروژن، اکسیژن و یا مخلوطی از این مواد باشد، خطر خوردگی لوله وجود دارد. خطر خوردگی زمانی تشدید می‌شود که تحت مکانیزم SCC^{۲۷} رخ دهد. دو نوع SCC یکی به واسطه آب و سولفید هیدروژن و دیگری به واسطه ترکیبات کلر در خطوط انتقال رخ می‌دهند. مقاومت لوله‌های کامپوزیتی در برابر ترکیب آب و هیدروژن بسیار ناچیز است و ترکیبات کلر نیز باعث SCC نخواهد شد. [5]

خطر بالقوه در خوردگی خطوط انتقال فلزی سیالات نفتی، نشت سیال می‌باشد. به دلیل گستردگی شبکه انتقال گاز، این مساله در این خطوط انتقال بارزتر است. هر چند روش‌های حفاظتی متعددی بر روی خطوط انتقال اعمال می‌شود اما این خطر همواره به عنوان یک خطر بالقوه وجود دارد. تعمیر هرگونه ترک و جلوگیری از نشتی در خطوط انتقال فلزی مستلزم انجام کار گرم^{۲۸} است. به صورت کلی، تعمیر یک خط انتقال صدمه دیده فلزی شامل مراحل زیر است:

۱. هزینه حمل و نقل لوله سالم به محل
۲. هزینه سیال نفتی تلف شده حین تخلیه بخش آسیب دیده یا هزینه سیال تلف شده در حین نشت.
۳. هزینه انجام purge
۴. هزینه انجام تعمیرات (برشکاری، جوشکاری و ...)

تفاوت بسیار شاخص لوله‌های کامپوزیتی، قابلیت تعمیر به صورت کار سرد^{۲۹} می‌باشد. به این ترتیب برای تعمیر یک خط کامپوزیتی معیوب، نیازی به خارج کردن خط از مدار نمی‌باشد. در صورتی که ابعاد عیب اجازه دهد تعمیر لوله کامپوزیتی بدون نیاز به جایگزینی قابل انجام است. عوامل موثر در بروز عیب^{۳۰} در خط انتقال را می‌توان مطابق جدول ۳-۱ تقسیم بندی نمود.

²⁶ brine

²⁷ Stress corrosion cracking

²⁸ hot work

²⁹ cold work

³⁰ defect

جدول ۳-۱: عوامل موثر در بروز عیب در خط انتقال

عوامل	تعریف	موارد
داخلی	عواملی که طرف سیال (داخل لوله) بر روی جنس لوله تاثیر می‌گذارند	۱- سایش ۲- خوردگی
خارجی	عواملی که از طرف محیط (خارج لوله) بر روی لوله تاثیر می‌گذارند.	۱- ضربه مکانیکی ۲- پوسیدگی

۶.۱.۳ هزینه نصب

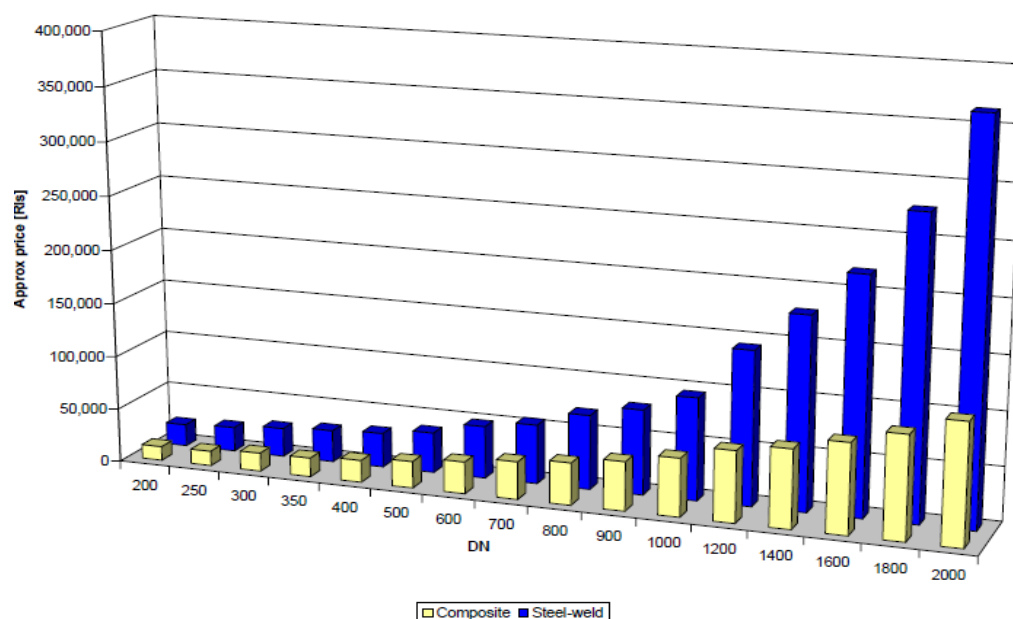
هزینه‌های اجرای خط را می‌توان به شرح زیر تقسیم بندی نمود:

۱. هزینه انتقال اجزا به محل نصب

۲. هزینه انبار لوله

۳. هزینه نصب لوله.

که در این بین هزینه موارد ۱ و ۳ تاثیرگذارتر است. به دلیل وزن پایین لوله‌های کامپوزیتی و قابلیت چیدمان آنها بر روی یکدیگر یا به صورت تلسکوپی، هزینه حمل و نقل به طور متوسط نصف هزینه حمل و نقل لوله‌های فلزی خواهد بود. اما باید توجه داشت که این مساله تنها تا قطر زیر ۱۴۰۰ میلی‌متر وجود دارد و برای اقطار بزرگ‌تر به دلیل آنکه امکان چیدمان روی یکدیگر وجود ندارد هزینه حمل و نقل تقریباً یکسان خواهد شد. وزن پایین لوله‌های کامپوزیتی سرعت عملیات تخلیه و انتقال را بسیار سریع می‌سازد اما با یک دید بسیار محافظه‌کارانه می‌توان گفت تاثیرگذارترین عامل، هزینه نصب لوله‌ها خواهد بود. هر دو نوع لوله به صورت دفن شده تقریباً وضعیت یکسانی را برای حفر کانال نیاز دارند اما در خصوص لوله کامپوزیتی باید به صخره‌های موجود در گودال نیز توجه ویژه مبذول شود تا باعث سوراخ شدن لوله نشود. البته با تغییر نوع رزین، مقاومت لوله کامپوزیتی در برابر ضربه قابل تغییر است. میزان هزینه نصب برای واحد طول لوله‌های فلزی و کامپوزیتی در نمودار شکل ۳-۳ با یکدیگر مقایسه شده‌اند و مشاهده می‌شود که به طور متوسط هزینه اجرای هر متر لوله فلزی ۲/۳۸ برابر اجرای لوله کامپوزیتی می‌باشد.



شکل ۳-۳: مقایسه هزینه نصب لوله‌های فلزی و کامپوزیتی

۲.۳ میزان کاربرد لوله‌های کامپوزیتی در خطوط انتقال آلبرتا

در این قسمت استان آلبرتا بعنوان یک نمونه مطالعاتی در نظر گرفته شده و انواع خطوط انتقال آن از لحاظ جنس و کاربرد، لوله‌های جایگزین لوله‌های فلزی و نوع لایه‌ی داخلی نصب‌شده در لوله‌های فلزی بررسی شده‌است.

۱.۲.۳ معرفی استان آلبرتا

آلبرتا غربی‌ترین استان سرسبز کانادا می‌باشد. اغلب از این استان به عنوان "استان انرژی" نام می‌برند. جمعیت آن بالغ بر ۳/۳ میلیون نفر بوده و روز به روز در حال افزایش می‌باشد. اکثر جمعیت در دو شهر اصلی استان زندگی می‌کنند. ادمنتون^{۳۱} (که مرکز استان است) و کلگری^{۳۲} هر کدام بالغ بر یک میلیون نفر جمعیت را در خود جای داده‌اند. این استان سرآمد تولید نفت و گاز در جهان است. پس از یک دهه رشد بالای اقتصادی هنوز این استان بیشتر تکیه بر صنعت انرژی دارد. این صنعت به طور مستقیم و غیرمستقیم ۲۷۵۰۰۰ شغل جدید ایجاد کرده‌است. این استان به دلیل رشد خوب اقتصادی به محل مناسبی جهت یافتن شغلی مناسب مبدل شده‌است. نرخ بیکاری این استان (۳.۹ درصد) کمتر از میانگین کانادا (۶.۸ درصد) می‌باشد. امروزه این استان به واقع متمول‌ترین استان کانادا و دارای سطح بالای زندگی است.

³¹ Edmonton

³² Calgary

۲.۲.۳ مرکز بهینه‌سازی انرژی در آلبرتا

مرکز بهینه‌سازی انرژی در آلبرتا وظیفه تنظیم کردن پروژه‌های انرژی آلبرتا را بر عهده دارد، خطوط انتقال انرژی نیز در حوزه وظایف این مرکز است. وظیفه دیگر آن بازرسی خطوط لوله و نظارت بر ساخت و عملکرد آنهاست. در پایان سال ۲۰۰۵ بالغ بر ۳۷۷۰۰۰ کیلومتر خطوط انتقال انرژی در آلبرتا موجود بود که در این گزارش بیان خلاصه‌ای از کاربرد این خطوط در صنایع مختلف و نوع لوله‌های بکار رفته ارائه می‌شود. خطوط تحت نظارت مرکز بهینه‌سازی انرژی در آلبرتا شامل موارد زیر است:

۱. خطوط توزیع گاز طبیعی که در فشار ۷۰۰ کیلو پاسکال یا کمتر کار می‌کنند.

۲. خطوط انتقال آب

۳. خطوط تحت نظارت مرکز ملی انرژی^{۳۳}

۴. خطوط واقع شده در مراکز پالایشی، پتروشیمی و تولیدی

مشخصات خطوط تحت نظارت مرکز ملی انرژی^{۳۴} در جدول ۲-۳ آمده است.

جدول ۲-۳: خطوط تحت نظارت NEB در آلبرتا

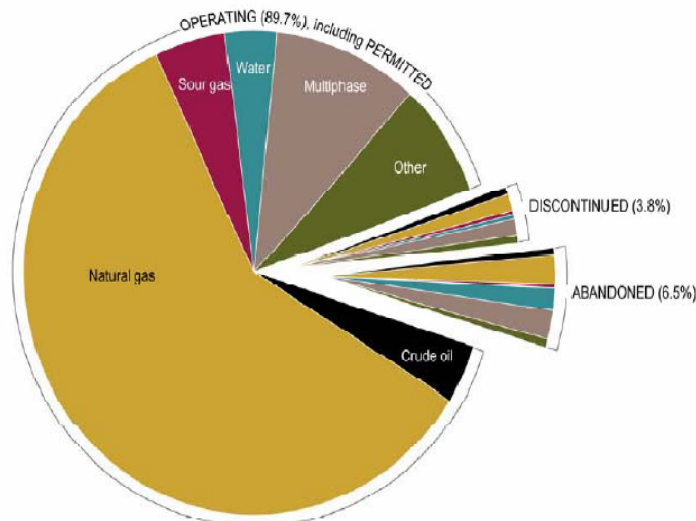
طول (کیلومتر)	نوع کاربرد
۱۰۹۰	نفت خام
۱۲	گاز سوختی
۲۱۳۷	گاز طبیعی
۴۱	گاز ترش
۵۵	مواد با فشار بخار پایین (LVP)
۱۷۷۶	مواد با فشار بخار بالا (HVP)

۳.۲.۳ خطوط انتقال در آلبرتا

شکل ۳-۴ نشان دهنده وضعیت تمامی خطوط لوله‌ی آلبرتا در سال ۲۰۰۵ می‌باشد، همان‌گونه که مشخص است ۸۹/۷ درصد از خطوط انتقال در حال کار هستند که قسمت اعظم آن را خطوط انتقال

³³ National Energy Board

گاز طبیعی دربر می‌گیرد و مقدار ۳/۸ درصد از آنها از سرویس خارج‌اند و ۶/۵ درصد آنها رها شده و از آنها استفاده نمی‌شود.



	OPERATING (including Permitted)		DISCONTINUED		ABANDONED		Total km	% of entire inventory
	km	% of product type	km	% of product type	km	% of product type		
Crude oil	14 902	82.7	1511	8.4	1606	8.9	18 019	4.8
Natural gas	223 921	95.1	4082	1.7	7688	3.2	236 692	62.5
Sour gas	18 120	89.8	1067	5.3	982	4.9	20 168	5.3
Water	14 463	89.4	1502	7.2	4882	23.4	20 847	5.5
Multiphase	38 536	75.7	4356	8.6	8058	15.8	50 977	13.5
Other	28 479	90.0	1853	5.9	1313	4.2	31 645	8.4
Total	338 448	89.7	14 371	3.8	24 430	6.5	377 248	100.0

شکل ۳-۴: وضعیت خطوط انتقال در آلبرتا

۴.۲.۳ مواد جایگزین فولاد در ساخت لوله

به دلیل بالا بودن نرخ خوردگی در لوله‌های فلزی و بالا بودن هزینه‌های ناشی از آن و افزایش فشار کارکرد خطوط انتقال، کشورهای توسعه یافته در حال جایگزینی لوله‌های مناسب در شرایط گوناگون کارکرد با لوله‌های فلزی هستند. در آلبرتا از لوله‌های فایبرگلاس، پلی‌اتیلن با دانسیته بالا و کامپوزیتی به جای لوله‌های فلزی استفاده می‌شود. مرکز بهینه‌سازی انرژی در آلبرتا لوله‌های چندلایه و حفاظت شده را نیز در دسته‌بندی لوله‌های کامپوزیتی قرار می‌دهد. لوله‌های چند لایه، لوله‌هایی هستند که از چندین لایه پلیمری و حتی غیرپلیمری ساخته می‌شوند، ولی لوله‌های حفاظت‌شده، لوله‌های فلزی هستند که معمولاً سطح داخلی آنها با یک لایه محافظ پوشانده می‌شود. برخلاف مرکز بهینه‌سازی انرژی در آلبرتا، مراجع دیگر لوله‌های چندلایه و حفاظت‌شده را لوله‌های کامپوزیتی قلمداد نمی‌کنند. به تفصیل این تقسیم‌بندی‌ها در ادامه ذکر شده‌است.

فایبرگلاس سخت

بیشتر از ۳۰ سال از استفاده این مواد در ساخت لوله‌ها می‌گذرد و در بیش از ۱۰۶۰۰ کیلومتر از خطوط انتقال آلبرتا بکار رفته‌است. این نوع لوله‌ها مقاومت خوبی در برابر خوردگی داشته و قابلیت کارکرد در فشار بالا را دارا می‌باشند. بیشترین کاربرد آنها در انتقال سیالات چند فاز می‌باشد، چون این سیالات معمولاً در فشار بالایی قرار دارند و به علت چند فاز بودن بیشترین خوردگی را ایجاد می‌کنند. برای انتقال گاز طبیعی نیز این نوع لوله‌ها می‌توانند گزینه مناسبی باشند که به طور مفصل در فصل ۳ همین گزارش شرح داده شده‌است. از نقاط ضعف آنها می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

۱. فرایند نصب آنها زمان‌بر است.
۲. نصب اتصالات آنها و فیت کردن آنها مشکل است.
۳. برای استفاده از این مواد در ساخت لوله‌ها به سیم‌نگهدارنده نیاز است. سیم‌نگهدارنده برای تقویت لوله بکار می‌رود و بصورت شبکه‌ای از سیم‌های فلزی درون ساختار لوله است که بین مواد سازنده لوله قرار می‌گیرد.

پلی‌اتیلن با دانسیته بالا

بیش از ۳۰ سال است که این مواد برای ساخت لوله بکار می‌روند و بیشتر از ۲۰۲۰۰ کیلومتر از خطوط انتقال آلبرتا از این جنس‌اند. این نوع لوله‌ها مقاومت خوبی در برابر خوردگی داشته، براحتی قابل نصب هستند و قابلیت پیچش روی قرقه را دارند. از نقاط ضعف آنها می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

۱. در فشارهای بالا محدودیت کار دارند.
۲. بهم چسباندن اتصالات مشکل است.
۳. برای استفاده از این مواد در ساخت لوله‌ها به سیم‌نگهدارنده نیاز است

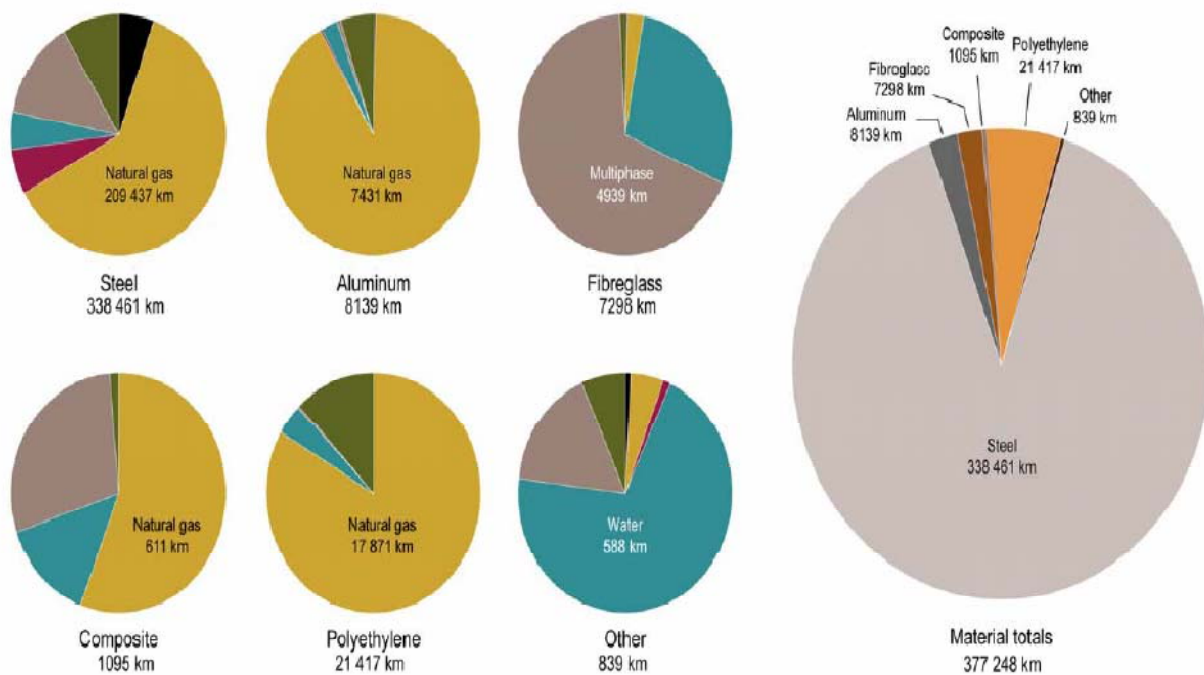
ترکیبی از چند ماده (کامپوزیتی)

در لوله‌های کامپوزیتی استفاده شده در خطوط انتقال آلبرتا، پلی‌اتیلن با دانسیته بالا با یک لایه کمکی و سپس یک پوشش پلیمری به عنوان آستر پوشانده شده‌است. لایه کمکی می‌تواند الیاف شیشه‌ای یا فیبرهای کربنی، فیبرهای کلواری یا سیم‌های فولادی باشد. در ضمن فیبرهای کمکی می‌تواند در رزین‌های ترموست یا ترموپلاست جاسازی شده یا اینکه بصورت خشک در بین لایه‌ها بکار

برده شود. همچنین لایه‌های بکار رفته می‌توانند با یکدیگر پیوند داشته یا اینکه فقط بصورت فیزیکی در کنار هم باشند. محصول بدست‌آمده به علت داشتن پلی‌اتیلن با دانسیته بالا مقاومت خوبی در مقابل خوردگی از خود نشان می‌دهد و همچنین به علت دارا بودن لایه کمکی در فشارهای بالا کاربرد دارد. این نوع لوله به اندازه‌ای انعطاف‌پذیر است که می‌توان آن را روی محور استوانه‌ای پیچید، این کار باعث کاهش حجم اشغال شده و سهولت حمل می‌شود. اجزای آن را می‌توان با استفاده از فلنج یا استفاده از فشار مکانیکی بهم متصل نمود و برای خط انتقال نیازی به حفاظت کاتدیک نیست.

۵.۲.۳ کاربرد لوله‌ها با جنس‌های مختلف

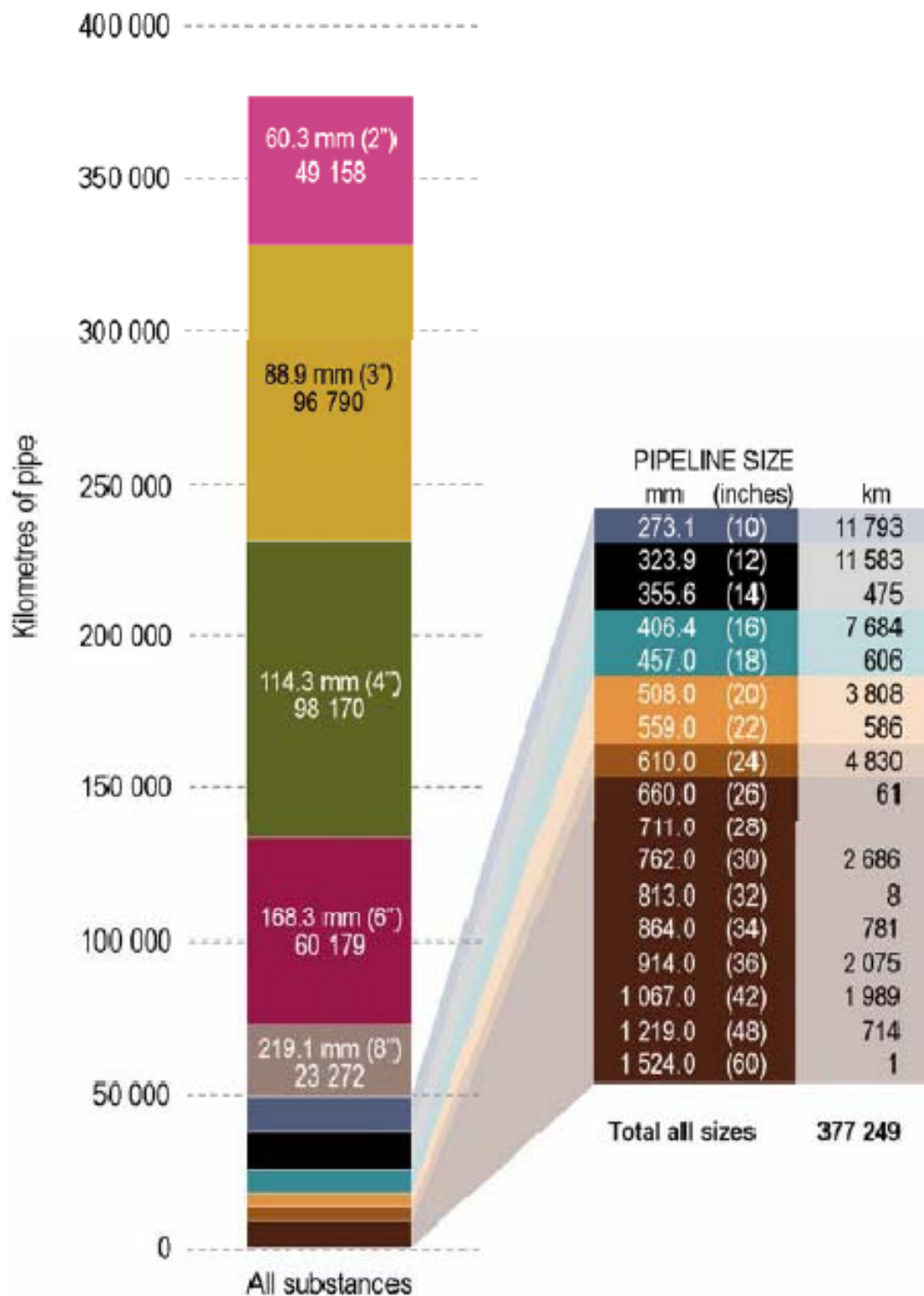
شکل ۵-۳ نشان می‌دهد، چه میزان از هر جنس لوله در آلبرتا بکار برده شده است و این خطوط لوله برای انتقال چه چیزی بکار برده شده‌اند. همچنین نسبت کاربرد هر نوع لوله به کل لوله‌های بکار رفته، مشخص است. مطابق شکل ۵-۳ انواع لوله‌های استفاده‌شده مشتمل بر لوله‌های فولادی، آلومینیومی، فایبرگلاس، پلی‌اتیلن و کامپوزیتی می‌باشد، ۹۰ درصد لوله‌های بکار رفته در آلبرتا از نوع لوله‌های فلزی بوده که در مقایسه با گزارش سال ۱۹۹۸، ۴ درصد کاهش یافته است. این امر بیانگر استفاده از لوله‌های کامپوزیتی و پلیمری بعنوان جایگزین لوله‌های فلزی است و این جایگزینی ناشی از نیاز به افزایش فشار کارکرد در خطوط انتقال و کاهش مشکلات خوردگی می‌باشد. همان‌گونه که در شکل ۵-۳ مشاهده می‌شود، بیشترین کاربرد لوله‌های فلزی، پلی‌اتیلنی، آلومینیومی و کامپوزیتی در آلبرتا در خطوط انتقال گاز طبیعی بوده که به ترتیب ۳۳۸۴۵۱، ۲۱۴۱۷، ۸۱۳۹، ۱۰۹۵ کیلومتر است. بیشترین کاربرد لوله‌های فایبرگلاس در انتقال سیالات چند فاز با ۴۹۳۹ کیلومتر است، که به علت خوردگی بالای این نوع سیالات و مقاومت خوب لوله‌های کامپوزیتی در مقابل خوردگی است [۷].



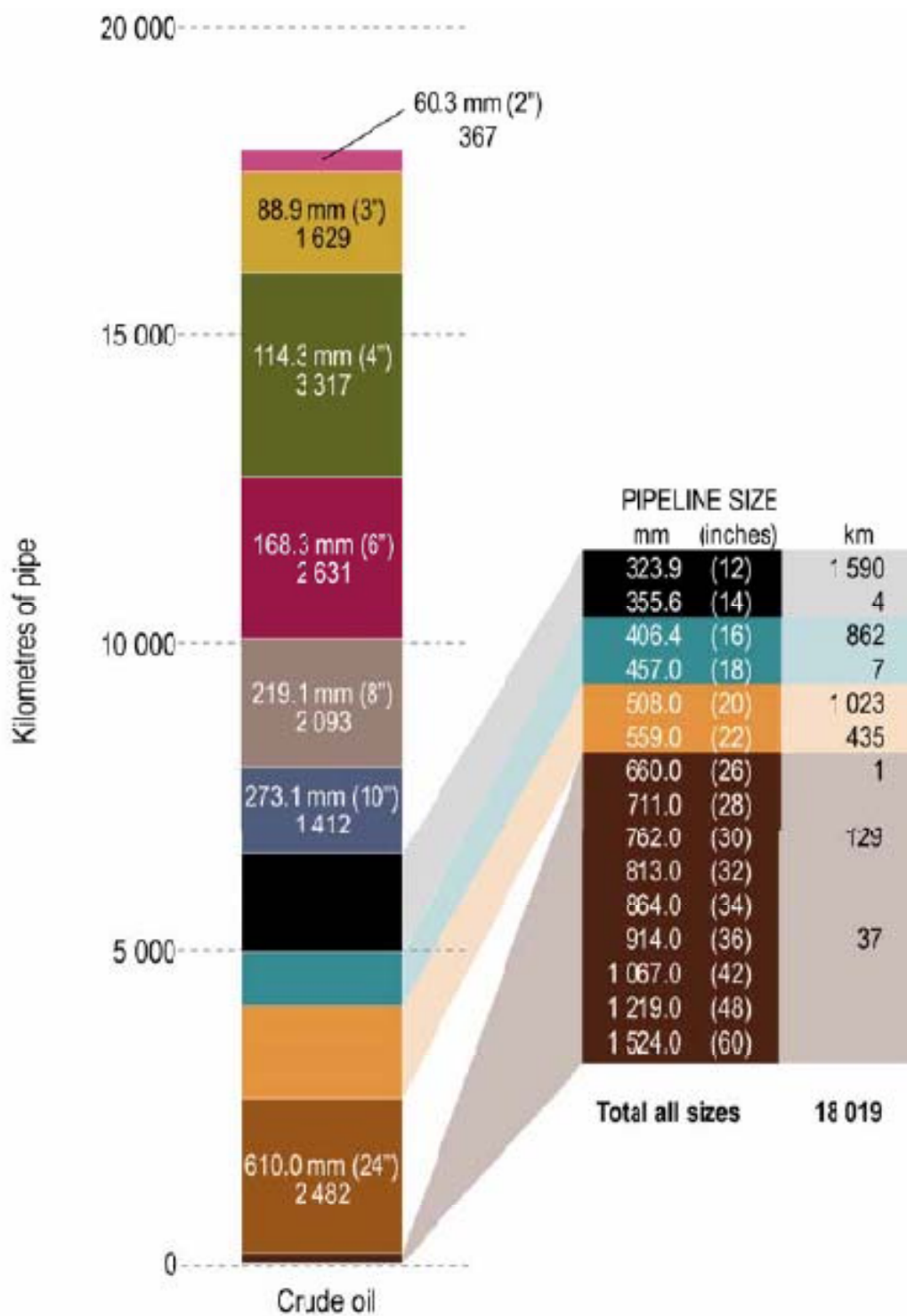
SUBSTANCE CARRIED	PIPE MATERIAL												Total km	% of Inventory
	Steel		Aluminum		Fibreglass		Composite		Polyethylene		Other			
	km	%	km	%	km	%	km	%	km	%	km	%		
Crude oil	17 949	99.6	39	0.2	22	0.1	1	<0.1			8	<0.1	18 019	4.8
Natural gas	209 437	88.9	7431	3.1	200	<0.1	611	0.3	17 871	7.6	41	<0.1	235 592	62.4
Sour gas	20 135	99.8	24	0.1							10	<0.1	20 168	5.3
Water	16 921	81.2	199	0.9	2093	10.0	151	0.7	896	4.3	588	2.8	20 847	5.5
Multiphase	45 471	89.2	50	0.1	4939	9.7	316	0.6	83	0.1	138	0.3	50 977	13.5
Other	28 549	90.2	395	1.3	45	0.1	15	<0.1	2 586	8.2	54	0.2	31 645	8.4
Total	338 461	89.7	8139	2.2	7298	1.9	1095	0.3	21 417	5.7	839	0.2	377 248	100.0

شکل ۳-۵: جنس و نوع کاربرد لوله‌های خطوط انتقال در آلبرتا

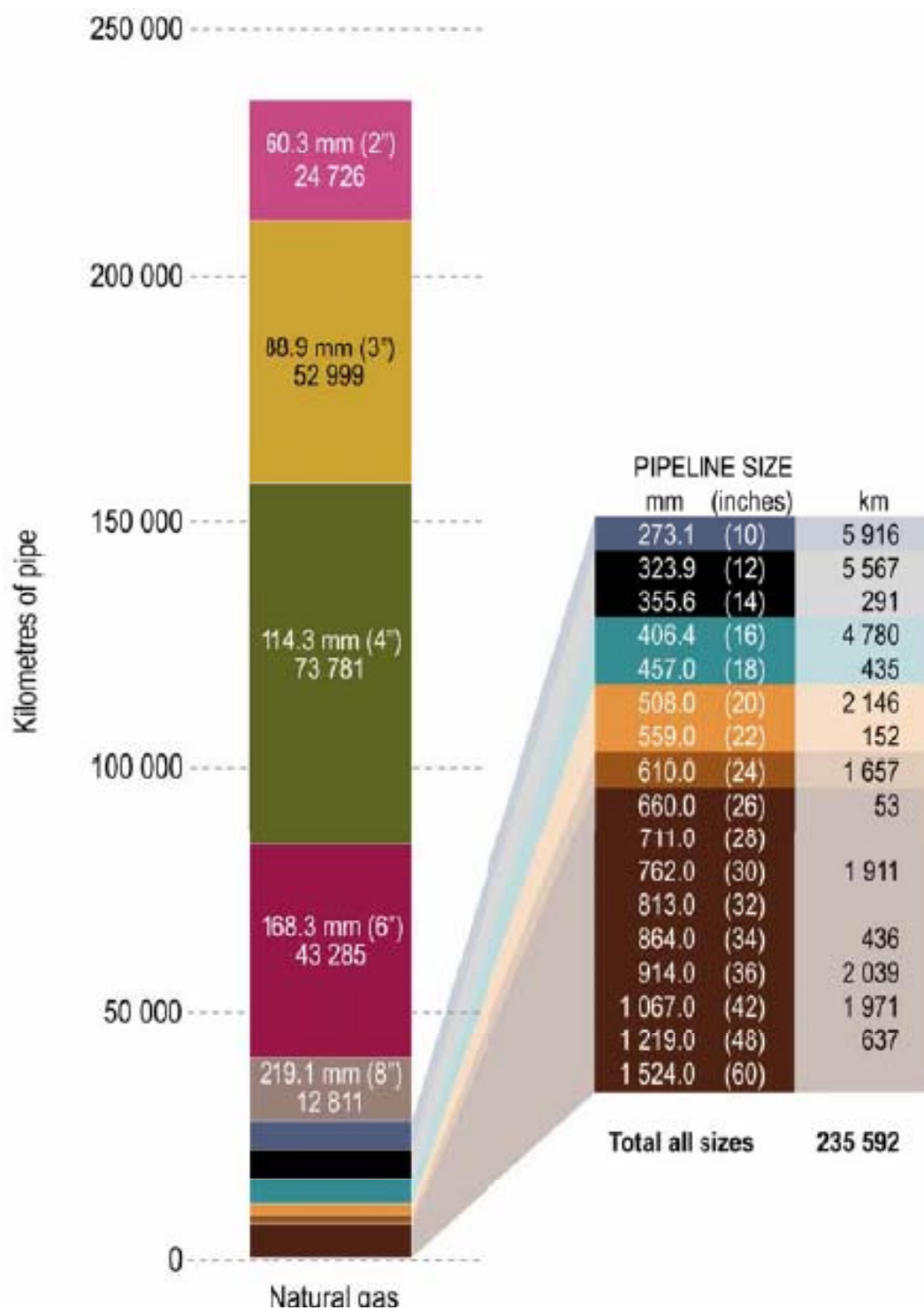
در شکل ۳-۶ تا شکل ۳-۸ به ترتیب طول و قطر تمامی لوله‌های خطوط انتقال در آلبرتا، طول و قطر لوله‌های بکار رفته جهت انتقال نفت خام و گاز طبیعی نشان داده شده‌است. بیشترین لوله‌های بکار رفته در خطوط انتقال آلبرتا قطر ۴ اینچ دارند که طول این خطوط انتقال ۹۶۷۹۰ کیلومتر است. بیشترین لوله‌های بکار رفته برای انتقال نفت خام نیز قطر ۴ اینچ دارند و طول آنها ۳۳۱۷ کیلومتر است. درمورد خطوط انتقال گاز طبیعی نیز لوله‌های به قطر ۴ اینچ با طول ۷۳۷۸۱ کیلومتر بیشترین مقدار را به خود اختصاص داده‌اند.



شکل ۳-۶: طول و قطر تمامی خطوط انتقال سیال



شکل ۳-۷: طول و قطر خطوط انتقال نفت خام

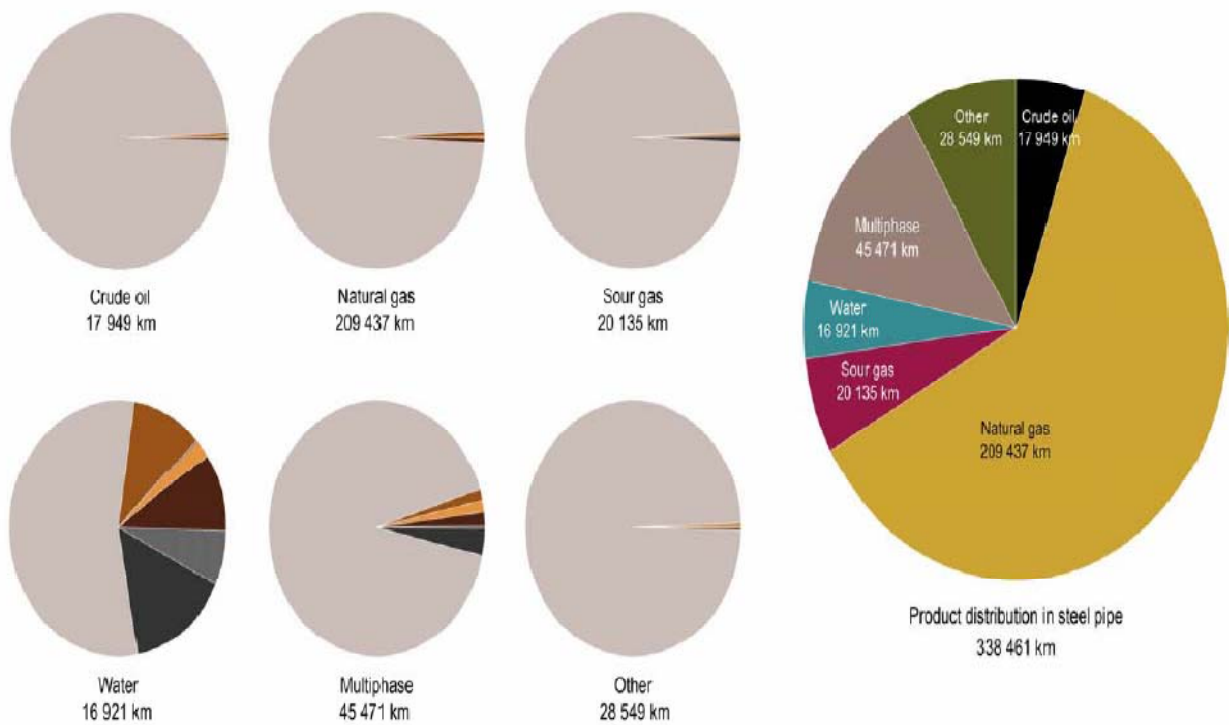


شکل ۳-۸: طول و قطر خطوط انتقال گاز طبیعی

۶.۲.۳ لوله‌های فلزی با لایه داخلی

شکل ۳-۹ نشان می‌دهد چه میزان از خطوط انتقال در آلبرتا فلزی هستند و چه میزان از آنها لایه داخلی نصب شده جهت جلوگیری از خوردگی دارند. در خطوط انتقال آلبرتا برای جلوگیری از خوردگی از لایه پلیمری، پی‌وی‌سی، سیمان و لایه‌ای از پلاستیک می‌باشند. بر اساس گزارش مرکز بهینه‌سازی انرژی در آلبرتا، که بر پایه اطلاعات تجربی می‌باشد، بهترین مواد بکار رفته به‌عنوان محافظت کننده خوردگی در سطح داخلی لوله‌های فلزی لایه پلاستیکی و کامپوزیتی است [۷].

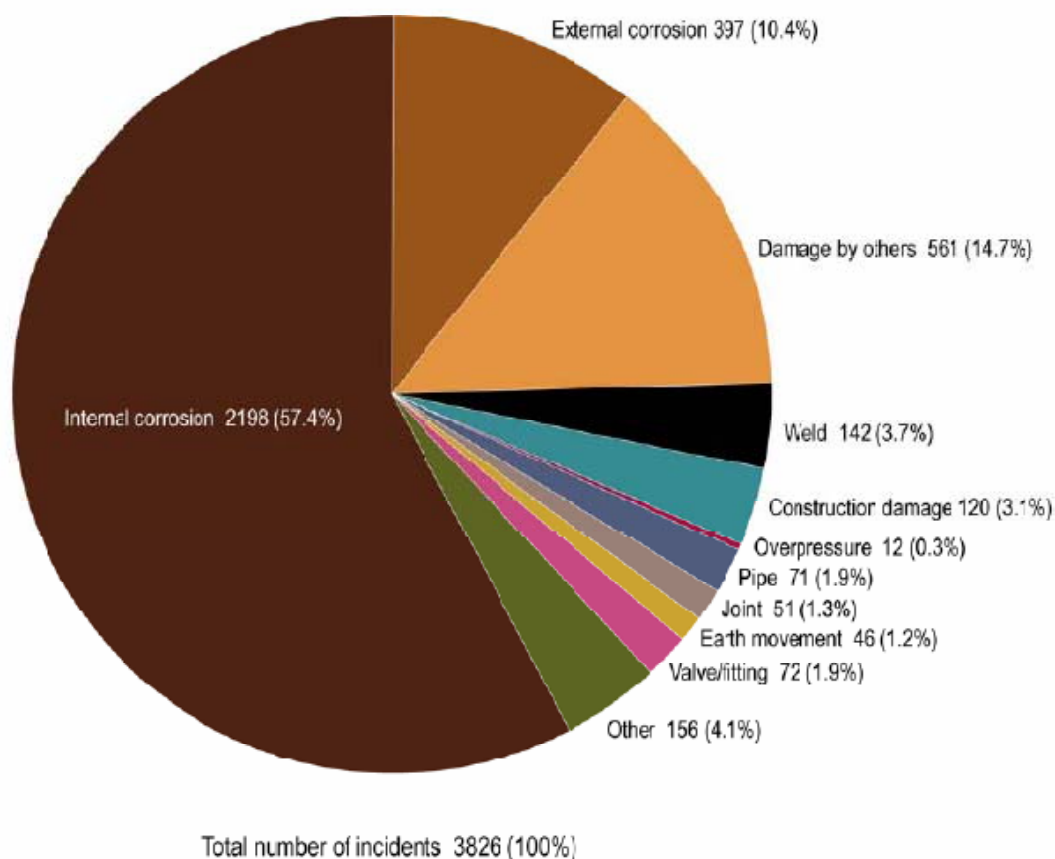
در آلبرتا ۹۴/۸ درصد از لوله‌های فلزی لایه محافظت کننده از خوردگی ندارند و همچنین ۹۸/۴ درصد از خطوط لوله فلزی انتقال گاز طبیعی در آلبرتا بدون لایه محافظ خوردگی می‌باشند که منجر به بالا رفتن نرخ خوردگی خطوط فلزی انتقال گاز طبیعی در آن‌جا شده‌است.



SUBSTANCE CARRIED	CORROSION PREVENTION														Total km	% of Inventory
	Cement		Expanded		None		Other		PVC		Slip lined		Thin film			
	km	%	km	%	km	%	km	%	km	%	km	%	km	%	km	%
Crude oil	1	<0.1	46	0.3	17 801	99.2	20	0.1			49	0.3	33	0.2	17 949	5.3
Natural gas	74	<0.1	266	0.1	205 976	98.4	1 849	0.9			264	0.1	1 006	0.5	209 437	61.9
Sour gas	2	<0.1	163	0.8	19 893	99.0	7	<0.1			59	0.3	11	0.1	20 135	6.0
Water	1 428	8.4	3 113	18.4	7 624	45.0	2 198	13.0	40	2.0	483	2.9	2 034	12.0	16 921	5.0
Multiphase	178	0.4	1 713	3.8	41 430	91.1	704	1.6	7	<0.1	644	1.4	794	1.8	45 471	13.4
Other	1	<0.1	37	0.1	28 254	99.0	158	0.5			30	0.1	68	0.2	28 549	8.4
Total	1 684	0.5	5 339	1.6	320 977	94.8	4 935	1.5	47	<0.1	1 530	0.4	3 948	1.2	338 461	100.0

شکل ۳-۹: میزان خطوط انتقال با لوله‌های فلزی دارای لایه محافظت کننده و نوع کاربرد آنها

شکل ۳-۱۰ نشان می‌دهد که ۵۷/۴ درصد اخلال در خطوط انتقال گاز طبیعی در آلبرتا به علت خوردگی داخلی و ۱۰/۴ درصد به علت خوردگی لایه خارجی است، این نشان‌دهنده اهمیت استفاده از مواد محافظت‌کننده خوردگی در لایه داخلی لوله‌های فلزی می‌باشد.



شکل ۳-۱۰: میزان تاثیر عوامل مختلف در ایجاد اخلال در خطوط انتقال

۳.۳ جمع‌بندی

در یک جمع‌بندی کلی مزایای به کارگیری لوله‌های کامپوزیتی در خطوط انتقال سیالات نفتی را می‌توان به شرح زیر خلاصه نمود:

۱. هر قدر طول خط انتقال بیشتر باشد، استفاده از لوله کامپوزیتی مقرون به صرفه‌تر خواهد بود. این مطلب به خوبی در شکل ۳-۳ نشان داده شده است، به گونه‌ای که با افزایش طول خط لوله (محور افقی)، مقدار هزینه‌ها (محور عمودی) به شدت افزایش می‌یابد.

۲. مزایای کوتاه مدت لوله کامپوزیتی عبارتند از: وزن پایین، هزینه پایین حمل و نقل و اجرا.
 ۳. مزایای بلند مدت لوله کامپوزیتی عبارتند از: ثابت ماندن ضریب اصطکاک در طول عمر خط، عدم نیاز به روش‌های حفاظتی نظیر حفاظت کاتدی.
 ۴. لوله فلزی با پوشش کامپوزیتی نمی‌تواند دقیقاً مانند یک لوله تمام کامپوزیتی رفتار کند. شواهدی وجود دارد که رانش زمین باعث جدا شدن پوشش لوله فلزی شده‌است.
 ۵. قابلیت تعمیراتی لوله کامپوزیتی وضعیت کاری بسیار راحت‌تری را برای بهره‌بردار ایجاد می‌نماید. توجه به این نکته ضروری است که بروز عیوب در لوله‌های فلزی بر اثر عوامل خارجی و داخلی پدید می‌آید اما در لوله‌های کامپوزیتی، به دلیل مقاومت در برابر خوردگی و پوسیدگی، تنها عوامل خارجی در بروز عیوب موثرند.
- از جمله معایب به کارگیری لوله‌های کامپوزیتی می‌توان به موارد زیر اشاره نمود.
۱. بالا بودن هزینه‌ی اولیه خرید و راه‌اندازی خطوط انتقال لوله‌های کامپوزیتی
 ۲. محدودیت کارکرد لوله‌های پلیمری و کامپوزیتی در محدوده دمایی بالا
 ۳. کاهش فشار کارکرد لوله‌های کامپوزیتی و پلیمری با افزایش دما
 ۴. زمان بیشتری برای طراحی لوله‌ی کامپوزیتی، به‌گونه‌ای که فشار مورد نظر کارکرد را تحمل کند مورد نیاز می‌باشد.
 ۵. برای طراحی لوله‌ی کامپوزیتی هزینه بیشتری نسبت به لوله‌ی فلزی صرف می‌شود.
- در پایان می‌توان به این جمع‌بندی رسید که بالغ بر ۳۷۷۰۰۰ کیلومتر خطوط انتقال سیال در سال ۲۰۰۵ در آلبرتا موجود بوده که ۹۰ درصد لوله‌های بکار رفته از نوع لوله‌های فلزی بوده‌اند. درصد لوله‌های فلزی مورد استفاده در سال ۲۰۰۵ در مقایسه با سال ۱۹۹۸، ۴ درصد کاهش را نشان می‌دهد [۷]. این موضوع نشان‌دهنده استفاده از لوله‌های کامپوزیتی و پلیمری بعنوان جایگزین لوله‌های فلزی بوده و این جایگزینی به‌منظور افزایش فشار کارکرد خطوط انتقال و کاهش مشکلات خوردگی، صورت گرفته‌است.
- بیشترین کاربرد لوله‌های فلزی، پلی‌اتیلنی، آلومینیومی و کامپوزیتی در آلبرتا در ارتباط با انتقال گاز طبیعی است، که در این راستا ۳۳۸۴۵۱ کیلومتر مربوط به لوله‌های فلزی، ۲۱۴۱۷ کیلومتر مربوط به لوله‌های پلی‌اتیلنی، ۸۱۳۹ کیلومتر مربوط به لوله‌های آلومینیومی و ۱۰۹۵ کیلومتر مربوط به

لوله‌های کامپوزیتی است. درمورد خطوط انتقال گاز طبیعی لوله‌های به قطر ۴ اینچ با طول ۷۳۷۸۱ کیلومتر بیشترین مقدار را به خود اختصاص داده‌اند.

۴.۳ مراجع

- [۱] Laney P., Use of Composite Pipe Materials in the Transportation of Natural Gas, Idaho International Engineering and Environmental Laboratory, Bechtel BWXT Idaho, LLC, 2002.
- [۲] Golshan H., Narsing M., Study of pipeline deterioration due to age (phase 1), Nova gas transmission limited internal reports, Calgary, Alberta, Canada, 1994.
- [3] Yokozeki T., Ogasawara T., Ishikawa T., Evaluation of gas leakage through composite laminates with multilayer matrix cracks: Cracking angle effects, Composite science and technology vol. 66, 2006.
- [5] Manfredi C., Otegui J.L., Failures by SCC in buried pipelines, Engineering failure analysis vol. 9, 2002.
- [۶] EPA Natural Gas Star program, Composite pipeline defects, Transmission Technology workshop, IMechE online library, 2004
- [۷] EUB Report 2007-A: Pipeline Performance in Alberta, 1990-2005 (April 2007)

۴ بررسی سیستم فیلتراسیون گاز طبیعی

در راستای بحثی که به عنوان مشکل ایستگاه تقلیل فشار نیروگاه آبادان مطرح شد تحقیقات گسترده‌ای برای حل این مشکل یعنی دوره‌ی زمانی بسیار کوتاه تعویض فیلترهای این ایستگاه صورت گرفت که مطالب مرتبط در سه قسمت تقسیم بندی شده‌اند. در قسمت اول به مطالعه و بررسی مشکلات گزارش شده در این ایستگاه پرداخته، در قسمت دوم سیستم‌های فیلتراسیون گاز طبیعی درون خطوط لوله بررسی شده و در قسمت سوم به انتخاب سیستم تصفیه گاز طبیعی متناسب با نیاز پرداخته شده است.

۱.۴ مطالعه و بررسی مشکلات گزارش شده در رابطه با فیلترهای گاز

ایستگاه‌های تقلیل فشار

بحث فیلتراسیون و پاک‌سازی گاز یکی از نکات مهم در طراحی ایستگاه‌های تقویت و یا کاهش فشار گاز می‌باشد. با توجه به تجهیزات نصب شده در این ایستگاه‌ها همچون کمپرسورها، دی‌سنج‌ها و رگولاتورها و حساسیت این تجهیزات به میزان تمیزی گاز، اهمیت بحث پاک‌سازی و خالص‌سازی گاز قبل از ورود به این تجهیزات به هیچ عنوان قابل انکار نمی‌باشد. عدم خلوص کافی گاز علاوه بر اینکه بر دقت اندازه‌گیری تجهیزات اثر قابل توجهی می‌گذارد، منجر به بالارفتن آمار خرابی و توقفات ایستگاه‌ها جهت تعمیرات و تعویض قطعات نیز می‌شود. از اینرو هرگونه اشکال و ایراد در این زمینه منجر به بالارفتن چشمگیر هزینه‌های زمانی و ریالی در تعمیرات و نگهداری ایستگاه‌ها خواهد شد.

گاز ورودی به ایستگاه‌ها حتی در صورت پاک‌سازی قبل از رسیدن به ایستگاه‌های تقویت و یا کاهش فشار به دلیل وجود ذرات زنگ‌آهن، همواره دارای ناخالصی‌هایی می‌باشد. وجود این ناخالصی‌ها همراه با دیگر ناخالصی‌های گاز، تعویض فیلترهای نصب شده را پس از یک دوره‌ی زمانی اجتناب ناپذیر می‌نمایند. به هر میزان که گاز آلوده‌تر باشد دوره‌ی تعویض فیلترها نیز کوتاه‌تر خواهد شد. در این راستا بحثی که به عنوان مشکل ایستگاه تقلیل فشار نیروگاه آبادان مطرح شده نیز

مربوط به دوره‌ی زمانی بسیار کوتاه جهت تعویض فیلترهای این ایستگاه می‌باشد. به عبارتی آلودگی گاز در این ایستگاه به قدری زیاد می‌باشد که مرتباً می‌بایست فیلترهای نصب شده در ایستگاه تعویض گردند. در این قسمت گزارشی از وضعیت موجود و دلایل احتمالی این پدیده همراه با راهکار احتمالی جهت رفع این معضل ارائه شده‌است.

۱.۱.۴ بررسی وضعیت موجود

ایستگاه تقلیل فشار نیروگاه آبادان، در نزدیکی نیروگاه آبادان واقع در ۹ کیلومتری جاده‌ی آبادان ماهشهر قرار دارد. این ایستگاه با ظرفیت روزانه نزدیک به ۲ میلیون مترمکعب، گاز را از فشار ۷۰۰ psi به فشاری نزدیک به ۴۰۰ psi می‌رساند. نمایی از این ایستگاه در شکل ۱-۴ مشاهده می‌شود.



شکل ۱-۴: ایستگاه تقلیل فشار نیروگاه آبادان

همانگونه که در شکل فوق ملاحظه می‌گردد، این ایستگاه مشتمل بر دو مرحله فیلتراسیون می‌باشد. در مرحله‌ی اول گاز با عبور از دستگاه فیلتر-جداکننده^{۳۵} (در حال حاضر تنها یکی در مدار فعال است) تصفیه شده و ذرات بالای ۱۰ میکرون آن جدا می‌گردد. در مرحله‌ی بعد گاز با عبور از یک فیلتر خشک مجدداً تصفیه شده و ذرات بالای ۵ میکرون آن جدا می‌گردد.

³⁵ Filter Separator

مشکل گزارش شده مرتبط با فیلترهای مرحله‌ی اول می‌باشد که به ذعم کارشناسان منطقه^{۳۶}، تقریباً هر هفته بلکه هم کمتر نیاز به تعویض فیلترهای موجود در این دستگاه می‌باشد. فیلترهای موجود در دستگاه در طی مدت تقریباً یک‌هفته‌ای بقدری آلوده شده که حتی در برخی موارد فیلترهای نصب شده کاملاً تخریب شده و تغییر شکل داده‌اند. در شکل ۲-۴ نمونه‌هایی از فیلترهای معیوب شده در ایستگاه مذکور ارائه شده‌است.



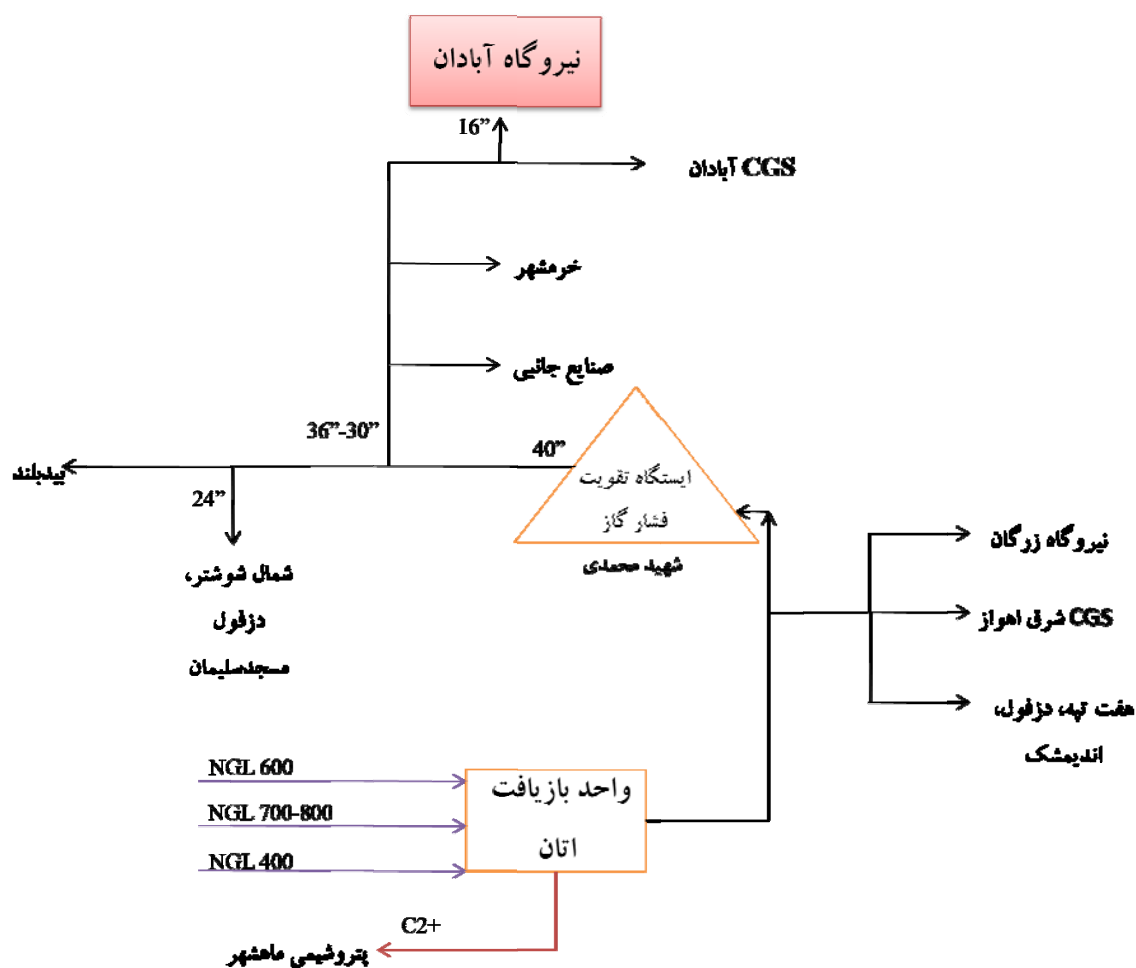
شکل ۲-۴: فیلترهای معیوب شده در عرض کمتر از یک هفته

با توجه به موارد مذکور ملاحظه می‌گردد که آلودگی گاز بیش از حد معمول بوده و از اینرو می‌بایست سرچشمه‌ی این آلودگی تعیین شود. بدین منظور می‌بایست مسیر و فرآیندی که گاز از مبدا تا مقصد (نیروگاه آبادان) طی می‌نماید تعیین شود. در ادامه این مسیر تشریح می‌گردد.

^{۳۶} جناب آقایان مهندس فرجی رئیس بخش و مهندس حمیدان رئیس تعمیرات و نگهداری از شرکت گاز آبادان

مسیر پیموده شده گاز مصرفی نیروگاه آبادان از مبدا تا مقصد

پس از بررسی‌های لازم و به کمک اطلاعات دریافت شده از کارشناسان واحدهای گاز اهواز و آبادان، شماتیک مسیر گاز از مبدا تا نیروگاه آبادان را می‌توان مطابق با شکل ۳-۴ نشان داد.



شکل ۳-۴: شماتیک مسیر طی شده گاز از مبدا تا نیروگاه آبادان

مطابق با شکل فوق، روزانه در حدود ۲۰ میلیون مترمکعب گاز شیرین از واحدهای NGL 600، NGL 700 و NGL 800 به سمت واحد بازیافت اتان ارسال می‌گردد. پس از بازیافت اتان در این واحد، حدود ۳ میلیون مترمکعب در روز C2+ به سمت پتروشیمی ماهشهر ارسال شده و نزدیک به ۱۷ میلیون مترمکعب گاز با درصد خلوص بالای متان برای مصارف بخش‌هایی از استان ارسال می‌گردد. شایان ذکر است که با بازدید انجام گرفته توسط کارشناسان محترم شرکت گاز استان خوزستان دستگاه تصفیه‌ی گاز از نوع جداسازی گریز از مرکزی (اسکراپر) در واحد بازیافت اتان مشاهده گردیده است^{۳۷}. از اینرو علاوه بر تصفیه‌سازی مقدماتی که در واحدهای NGL صورت می‌گیرد، گاز مصرفی استان مجدداً در این واحد پاک‌سازی می‌شود. بخشی از گاز خروجی از واحد

^{۳۷} به نقل از آقای مهندس نکونام رئیس محترم بخش اندازه‌گیری شرکت گاز استان خوزستان

بازیافت اتان برای مصارف شهر اهواز، نیروگاه زرگان و نیز تامین بخشی از مصرف شهرستان‌های اندیمشک، هفت‌تپه و دزفول ارسال شده و مابقی آن جهت افزایش فشار به ایستگاه تقویت فشار محمدی ارسال می‌گردد. مطابق با استانداردهای موجود در این ایستگاه می‌بایست مجدداً تصفیه‌ای بر روی گاز صورت پذیرد تا بدین‌وسیله تعمیرات و نگهداری کمپرسورهای موجود در این ایستگاه به حداقل برسد. متأسفانه علی‌رغم پیگیری‌های انجام گرفته در گذشته (توسط کارشناسان بخش اندازه‌گیری) اطلاعات چندانی در رابطه با این ایستگاه و تجهیزات متعلق بدان در دسترس نمی‌باشد. در هر صورت گاز ورودی بدین ایستگاه تا فشار نزدیک به ۸۰۰ psi فشرده شده و توسط یک خط ۴۰" به سمت پالایشگاه گاز بیدبلند ارسال می‌گردد. گاز مصرفی شهرستان‌های آبادان و خرمشهر نیز با انشعاب گرفتن از این خط تامین می‌گردد. روزانه نزدیک به ۵ تا ۶ میلیون متر مکعب از این خط ۴۰"، توسط یک خط ۳۰"-۳۶" به سمت شهرستان‌های مذکور ارسال می‌گردد. مصرف‌کننده‌های عمده این خط خرمشهر (همراه با نیروگاه و صنایع جانبی) با مصرفی روزانه در حدود ۱ تا ۲ میلیون مترمکعب و نیروگاه آبادان با مصرفی نزدیک به ۳ میلیون متر مکعب در روز می‌باشد. گاز ارسالی به CGS آبادان در حال حاضر عمدتاً مصرف شهری آبادان را تامین می‌نماید و در آینده برای تامین گاز مورد نیاز پالایشگاه استفاده خواهد شد. از اینرو با توجه به مصرف بسیار بالای نیروگاه آبادان نسبت به CGS شرق، این نیروگاه را می‌توان مصرف‌کننده‌ی پایانی در انتهای خط ۳۰"-۳۶" به حساب آورد.

۲.۱.۴ سناریوهای موجود در رابطه با مشکل فیلترها

پس از گفتگو با کارشناسان مرتبط موارد ذیل به عنوان دلیل احتمالی مشکلات فیلترها مطرح گردیده‌است.

۱. عدم تصفیه مناسب گاز در ایستگاه‌های ارسال

۲. جنس نامرغوب لوله‌ها و خوردگی بیش از حد لوله‌ها

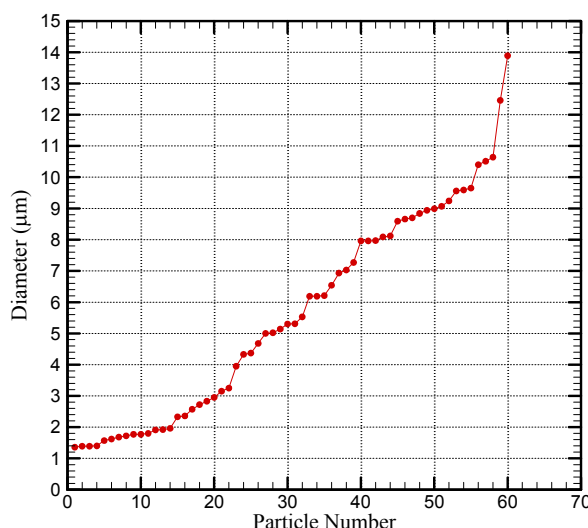
با توجه به موارد مطرح شده در قسمت قبل از آنجا که در مسیر گاز ارسالی یک واحد بازیافت اتان و یک واحد تقویت فشار قرار دارد، از اینرو با توجه به حساسیت‌های موجود در دستگاه‌های این واحدها بازدید از سیستم فیلتراسیون آنها ضروری به نظر می‌رسد. با توجه به اینکه تاکنون نیز گزارشی مبنی بر مشکلات ناشی از فیلتراسیون در واحدهای مذکور ارائه نشده‌است، این ضرورت اهمیت بیشتری پیدا خواهد کرد. همچنین احتمال اینکه وجود خوردگی بالا درون لوله‌ها نیز منجر به آلاینده نمودن گاز شود، نیز دور از ذهن نیست. هرچند که به داعم کارشناسان محلی با وجود چنین

شدت خوردگی در خط ناگزیر می‌بایست در برخی نقاط شبکه سوراخ شدن لوله اتفاق می‌افتاد که خوشبختانه تاکنون موردی از این قبیل گزارش نشده‌است.

۳.۱.۴ اقدامات انجام گرفته در راستای مشکل مطرح شده در نیروگاه آبادان

یکی از محتمل‌ترین سناریوها جهت رفع مشکل ایستگاه تقلیل فشار نیروگاه آبادان اضافه نمودن یک دستگاه تصفیه جدید در مسیر گاز می‌باشد. از بین پارامترهای تعیین کننده نوع دستگاه، میزان دبی ماکزیمم و فشار کاری سیستم معلوم می‌باشد. دبی ماکزیمم در حدود یک میلیون متر مکعب در روز (۴۱۷۰۰ مترمکعب بر ساعت) و فشار ماکزیمم در حدود ۷۰۰ psi می‌باشد. پارامتر بیشینه افت فشار مجاز در خط با توجه به اینکه ایستگاه تقلیل فشار بوده چندان تعیین کننده نمی‌باشد.

برای تعیین سایز و نوع ذرات موجود در گاز، نمونه‌ای از مواد گردآوری شده در فیلترها تهیه شد. با بررسی‌های انجام گرفته تجهیزات موجود در دانشگاه شهید چمران و دانشگاه صنعت نفت اهواز برای تعیین جنس و اندازه‌ی ذرات مناسب نبوده و از اینرو نمونه‌ها برای آزمایش به انستیتو تحقیقاتی رازی واقع در تهران ارسال گردید. بر اساس آزمایش صورت گرفته توسط مرکز پژوهش متالورژی رازی، نتایج اندازه‌گیری سایز ذرات مطابق با شکل ۴-۴ می‌باشد. همانگونه که نشان داده شده‌است، شصت سایز مختلف برای ذرات نتیجه شده‌است که دارای اندازه‌ای بین ۱/۵ تا ۱۳/۸۹ میکرومتر می‌باشند.



شکل ۴-۴: اندازه‌ی ذرات باقی‌مانده در فیلتر ایستگاه تقلیل فشار نیروگاه آبادان

آنالیز جنس ذرات نیز توسط دستگاه XRF انجام شده‌است که نتایج آن در جدول ۴-۱ و جدول ۴-۲ نشان داده شده‌است. مطابق با جدول ۴-۱ درصد بالای سیلیس بیانگر ترکیب ماسه‌ای درون گاز می‌باشد. همچنین منظور از L.O.I در جدول ۴-۱، ترکیبات هیدروکربوری است.

جدول ۱-۴: درصد وزنی ترکیبات مختلف ذرات معلق در جریان گاز

ردیف	ماده	درصد وزنی	ppm
۱	SiO ₂	۲۲/۲	-
۲	Al ₂ O ₃	۳/۴	-
۳	Fe ₂ O ₃	۱۷/۸	-
۴	CaO	۱۰	-
۵	Na ₂ O	۱۳/۸	-
۶	MgO	۸/۲	-
۷	K ₂ O	۲/۲۷	-
۸	TiO ₂	۰/۹۳	-
۹	MnO	۰/۱۱۳	-
۱۰	P ₂ O ₅	۰/۳۴	-
۱۱	L.O.I	۲۰	-

جدول ۲-۴: پی پی ام عناصر موجود در ذرات

ردیف	عنصر	ppm	ردیف	عنصر	ppm
۱	Ba	۱۰	۱۱	W	۱۰
۲	Ce	۱۰	۱۲	Y	۱۶۰
۳	Co	۱۰	۱۳	Zr	۸۰۰
۴	Cr	۲۲۰	۱۴	Zn	۴۲۰
۵	Cu	۱۵۰	۱۵	Mo	۳۳۰
۶	Nb	۲۷۰	۱۶	V	۱۱۰
۷	Ni	۱۱۰	۱۷	Th	۱۰
۸	Pb	۱۰	۱۸	Cl	۲۲۰۰
۹	Rb	۱۰	۱۹	Br	۱۰
۱۰	Sr	۱۰۳۰	۲۰	S	۳۶۰۰

۲.۴ بررسی سیستم فیلتراسیون گاز طبیعی درون خطوط لوله

علاوه بر میعانات گازی، گاز طبیعی معمولاً حاوی مقادیر زیاد رطوبت و ذرات جامد است. به طور کلی اجزاء مختلف موجود در گاز طبیعی را می توان به سه دسته طبقه بندی نمود:

۱. گازها

این اجزاء شامل هیدروکربن های گازی (متان، اتان، پروپان و بوتان) و گازهایی نظیر دی اکسید کربن، نیتروژن، اکسیژن، سولفید هیدروژن و بعضی مواقع هلیوم می باشد. بعضی از این گازها مانند سولفید هیدروژن به علت مشکلاتی که ایجاد می کنند بایستی از گاز طبیعی جدا گردند. این کار معمولاً در تأسیسات بهره برداری و پالایشگاه های گاز صورت می گیرد.

۲. مایعات

این اجزاء شامل آب، نفت همراه گاز و میعانات است. میعانات گازی به علت افت فشار گاز طبیعی ممکن است در هر نقطه ای از سیستم فراورش، انتقال و توزیع گاز بوجود آیند و سبب ایجاد افت فشار بیشتر و آسیب به کمپرسور، تیغه های توربین های دوار و دیگر تجهیزات خط لوله و ایستگاه های گاز شوند. قسمت عمده ای از مایعات همراه گاز در تأسیسات بهره برداری و پالایشگاه های گاز از گاز طبیعی جدا می گردند. با این وجود، معمولاً مقدار اندکی رطوبت و قطرات مایع در گاز باقی می ماند که می توان آن را توسط سیستم فیلتراسیون از گاز جدا نمود.

۳. جامدات

ذرات جامد موجود در گاز شامل خورده های سنگ مخزن، ریزه های دیواره چاه تولید، رسوبات خط لوله و... می باشد. بخشی از ذرات جامد در تأسیسات سرچاهی و بهره برداری از گاز جدا می شوند. اما قسمت عمده ی ذرات در فیلترهای خطوط انتقال گرفته می شوند.

بطور کلی سیستم انتقال و توزیع گاز شامل ایستگاه های کمپرسور، ایستگاه های توزیع و ایستگاه های تقلیل فشار می باشد. این گاز در خطوط مختلف انتقال و توزیع شامل مقادیری از ذرات جامد و قطرات مایع می باشد که علاوه بر ایجاد افت فشار به تجهیزات فرایندی آسیب می رساند. بنابراین لازم است با یک سیستم فیلتراسیون مناسب ذرات جامد و قطرات مایع از گاز طبیعی جدا گردد. بنابر گزارش اعلام شده از طرف شرکت گاز استان خوزستان در سیستم فیلتراسیون ایستگاه تقلیل فشار گاز نیروگاه آبادان اخلاص ایجاد شده و ذرات جامد موجود در گاز طبیعی باعث گرفتگی فیلترها و آسیب به تجهیزات فرایندی شده است. در قسمت قبل کلیات موضوع ذکر شد و در این

قسمت سیستم‌های فیلتراسیون موجود و نوع فیلترهای بکار رفته در ایستگاه‌های تقلیل فشار ذکر شده است. برای فیلتراسیون گاز طبیعی از فیلترهایی موسوم به فیلترهای خط لوله استفاده می‌شود در ادامه به بررسی این نوع فیلترها پرداخته می‌شود.

۱.۲.۴ فیلترهای خط لوله

در صورتی که ذرات جامد و قطرات مایع آنقدر کوچک باشد که نتوان از سیکلون‌ها استفاده کرد مناسب‌ترین گزینه برای حذف آلودگی‌ها بکار بردن سیستم فیلتراسیون می‌باشد. فیلترهایی که برای این هدف بکار برده می‌شوند به فیلترهای خط لوله موسوم‌اند. در این نوع فیلترها ذرات جامد یا قطرات مایع توسط یک یا چند المنت یا کارتریج از جریان گاز جدا می‌شوند. بسته به میزان رطوبت جریان گاز فیلترهای بکار رفته در خطوط لوله به دو نوع فیلترهای خشک^{۳۸} و ادغامی^{۳۹} تقسیم‌بندی می‌شوند.

فیلترهای خشک

فیلترهای خط لوله که برای حذف ذرات از جریان گاز مورد استفاده قرار می‌گیرند دارای ساختاری کم و بیش مشابه هستند. در اینجا مهمترین مواردی که سبب تفاوت میان این فیلترها می‌شود به اختصار شرح داده می‌شود:

نوع درب فیلتر

انواع مختلفی از درب‌های استاندارد برای بستن فیلترهای خط لوله مورد استفاده قرار می‌گیرند که معمولاً به دو دسته کلی تقسیم می‌شوند. در دسته اول، درب فیلتر که یک نوع فلنج کور است با پیچ به بدنه متصل می‌شود. در بعضی از فیلترهای خط لوله، این فلنج با لولا نیز به بدنه فیلتر متصل شده است و بنابراین از بدنه فیلتر جدا نمی‌گردد. این نوع درب‌ها که به "درب‌های پیچ شو"^{۴۰} موسوم هستند، قدرت تحمل فشار زیادی را دارند. ولی در فیلترهای با این نوع درب، برای بازبینی و یا تعویض کارتریج به مدت زمان نسبتاً طولانی نیاز است. شکل ۴-۵ نمونه‌ای از فیلترهای با درب پیچ شو را نشان می‌دهد.

³⁸ Dry gas filters

³⁹ Coalescing filters

⁴⁰ Bolted Cover Closure



شکل ۴-۵: نمونه‌ای از فیلترهای با درب پیچ شو^[۱]

دسته دوم درب‌های فیلتر خط لوله، به "درب‌های سریع بازشو"^{۴۱} موسوم هستند که جهت بازبینی و تعویض المنت به سرعت باز می‌شوند. این نوع درب‌ها در شرکت‌های مختلف به صورت‌های گوناگون ساخته می‌شوند. نکته حائز اهمیت این است که گرچه باز کردن و بستن درب‌های سریع بازشو به مراتب آسان تر و سریع‌تر از درب‌های پیچ شو انجام می‌شود ولی معمولاً آستانه تحمل فشار آنها کمتر است و لذا برای استفاده از آنها بایستی به فاکتورهایی نظیر فشار خط لوله گاز و نوسانات فشار در شرایط زمانی مختلف دقت شود.

نحوه‌ی قرارگیری فیلتر

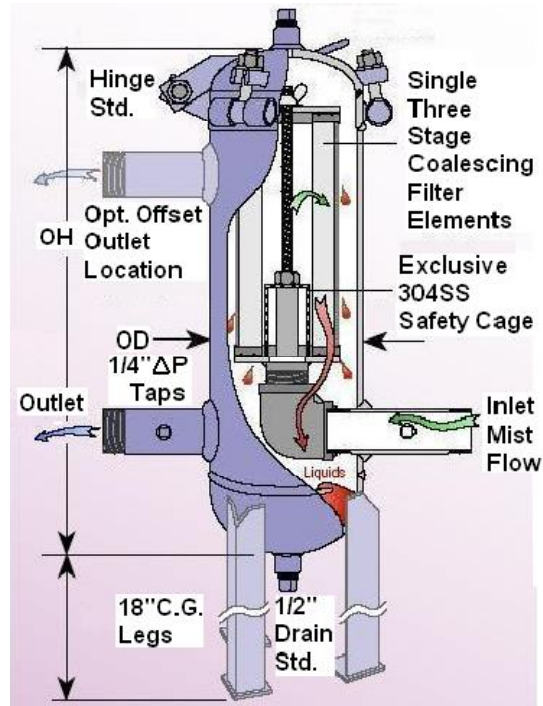
یکی از مواردی که باعث تفاوت میان انواع فیلترهای خط لوله می‌شود شکل افقی یا عمودی آن است. به طور کلی راستای باز کردن درب فیلتر و تعویض کارتریج، مشخص‌کننده عمودی یا افقی بودن آن است. علاوه بر موارد فوق شکل بدنه، جنس بدنه و نوع اتصالات سبب تفاوت در فیلترهای خطوط گاز می‌شود.

عملکرد فیلترهای خشک

مهمترین وجه اشتراک انواع مختلف فیلترهای خطوط گاز، ساختار درونی و نحوه فیلتراسیون آنهاست. به‌طوری این نوع فیلترها مخصوص فیلتراسیون گاز خشک و غیرخورنده می‌باشند و در آنها گاز خشک وارد شده، با یک صفحه‌فلزی برخورد می‌کند و مقداری از ذرات جامد آن جدا می‌شوند

⁴¹ Quick Opening or Quick Release Closure

سپس برای جداسازی بیشتر وارد چند المنت می‌شود تا در نهایت گاز خروجی عاری از ذرات جامد شود. شکل ۴-۶ طرحی از نحوه‌ی عملکرد فیلتر خشک را نشان می‌دهد.



شکل ۴-۶: طرح شماتیک یک فیلتر گاز خشک [۱]

فیلترهای ادغامی

فیلترهای ادغامی نوعی از فیلترهای خط لوله است که هم برای جدا کردن ذرات جامد و هم قطرات مایع از جریان گاز بکار می‌روند. این نوع فیلترها به فیلترهای کوالسر نیز معروفند. المنت‌هایی که در این نوع فیلترها بکار می‌رود به المنت‌های ادغامی موسوم‌اند. از جمله المنت‌های بکار رفته در این فیلترها می‌توان به المنت‌های جاذب اشاره کرد که برای جداسازی ذرات جامد و قطرات مایع تا ۱ میکرون استفاده می‌شود. شکل ۴-۷ شمایی از یک فیلتر ادغامی را نشان می‌دهد.



شکل ۴-۷: تصویری از یک فیلتر ادغامی [۱]

۲.۲.۴ المنت فیلتر

قسمت اصلی فیلتر خط لوله که عملیات جداسازی ذرات جامد و قطرات مایع را از جریان گاز انجام می‌دهد، المنت فیلتر یا کارت‌تریچ می‌باشد. در ادامه به بررسی اجمالی چند نوع از المنت‌های بکار رفته در فیلترهای خط لوله، پرداخته می‌شود.

المنت ته‌دوخته‌شده^{۴۲}

این نوع المنت‌ها بصورت استوانه‌ای هستند و تا حدود دمای 700 F را به خوبی تحمل می‌کنند و از آن‌ها در محیط‌های خورنده نیز می‌توان استفاده کرد. نمونه‌ای از این المنت‌ها در شکل ۴-۸ نشان داده شده‌است.



شکل ۴-۸: نمونه‌ای از المنت ته‌دوخته‌شده [۱]

المنت ته‌لاستیکی^{۴۳}

این نوع المنت‌ها استوانه‌ای هستند و انتهای آن‌ها از پلاستیک پلی‌استر ساخته شده به طوری که هسته‌ی مرکزی المنت، محیط فیلتر و صفحات سیمی نگهدارنده آن را محکم به هم متصل می‌سازد. این لاستیک مصنوعی در مقابل رطوبت، نفت، حلالهای مختلف و ارتعاش مقاوم است. زمانی که المنت در سرویس پیوسته است تا دمای ۲۵۰ F و در سرویس متناوب تا دمای ۳۵۰ F را تحمل می‌کند. نمونه‌ای از این المنت‌ها در شکل ۴-۹ نشان داده شده است.



شکل ۴-۹: نمونه‌ای از المنت ته‌لاستیکی [۱]

المنت شبکه‌سیمی^{۴۴}

این نوع المنت از تور سیمی چین‌دار ساخته شده و زمانی بکار می‌رود که لازم باشد ذرات درشت بدون افت فشار محسوس از جریان گاز جدا شوند. برای استفاده از این المنت، بایستی سطح خارجی تور سیمی را با روغن آغشته کرد. حدود ۹۰ درصد از ذرات $10 \mu\text{m}$ و بزرگ‌تر به لایه‌های روغن تور سیمی برخورد کرده و به آن می‌چسبند. این المنت را می‌توان تمیز کرد و پس از روغن‌کاری مجدد دوباره بکار برد. از المنت‌های با شبکه‌سیمی در فیلترهای استرینر به‌علت اعمال افت فشار پایین در سیستم انتقال و استحکام مناسب در مقابل جریان گاز، استفاده می‌شود. در شکل ۴-۱۰ این نوع المنت نشان داده شده است.

⁴³ Bolted Cover Closure

⁴⁴ Bolted Cover Closure



شکل ۴-۱۰: نمونه‌ای از المنت شبکه‌سیمی [۱]

المنت جاذب

محیط این المنت که از نمد ساخته شده است قادر است تا ۷۵ درصد از وزن خود، آب یا نفت همراه گاز را جذب کند. در ضمن از این نوع المنت می‌توان برای جدا کردن ذرات تا ابعاد ۱ میکرون استفاده کرد. شکل ۴-۱۱ این نوع المنت را نشان می‌دهد.



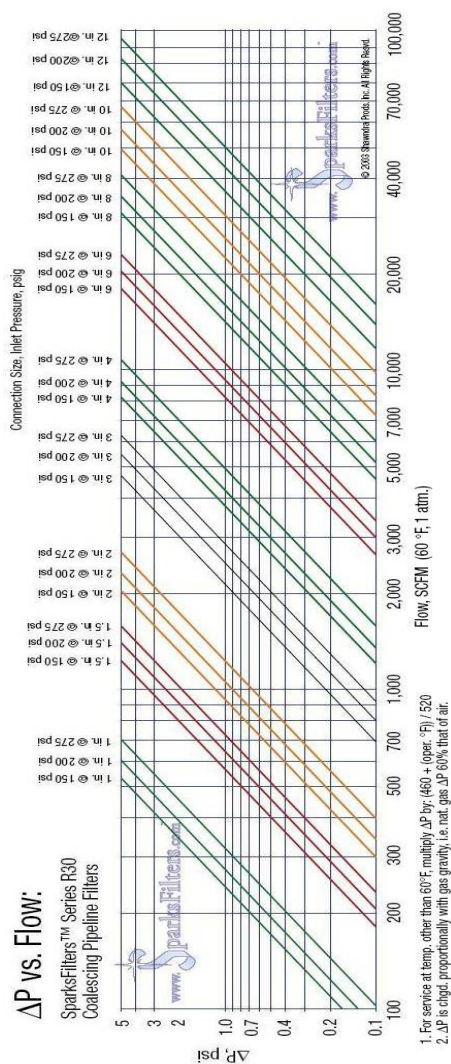
شکل ۴-۱۱: نمونه‌ای از المنت جاذب [۱]

۳.۲.۴ عملکرد فیلتر خط لوله

هدف از بکار بردن فیلتر در خطوط انتقال گاز طبیعی، جدا کردن ذرات جامد و قطرات مایع همراه گاز است. پس مشخصه‌ی اصلی صحیح کار کردن یک فیلتر، عبور ندادن ذرات جامد و رطوبت از خود است. منظور از عملکرد فیلتر، رابطه‌ی بین میزان افت فشار گاز و دبی عبوری آن می‌باشد. واضح است که این رابطه به قطر اتصالات و فشار ورودی نیز وابسته است. در شکل ۴-۱۲ نمودار افت فشار بر حسب دبی عبوری گاز برای یک فیلتر خط لوله در شرایط استاندارد (30 F, 14/7psia) نشان داده شده است [۱].

همانطور که از شکل ۴-۱۲ مشخص است رابطه بین افت فشار با دبی برای فشار ورودی و قطر اتصال معین، یک رابطه لگاریتمی است. با مشخص بودن فشار ورودی گاز، قطر لوله ورودی و دبی جریان گاز، افت فشار توسط نمودار تعیین می گردد. با تجمع ذرات جامد درالمنت فیلتر، به تدریج عبور گاز از آن مشکل تر شده و افت فشار افزایش می یابد. هر فیلتر یک افت فشار خاصی را تحمل می کند که فراتر از آن، به فیلتر و المنت آن صدمه وارد می آید.

برای قرائت افت فشار فیلتر، بایستی از یک اختلاف فشار سنج دقیق استفاده کرد. در ضمن معمولاً به تجربه می توان دریافت آستانه تحمل هر فیلتر در چه افت فشاری رخ می دهد. در اینصورت، قبل از اینکه افت فشار به حد خطرناک برسد می توان جریان گاز را در آن خط قطع و نسبت به پاک سازی فیلتر و المنت یا تعویض آن اقدام نمود.

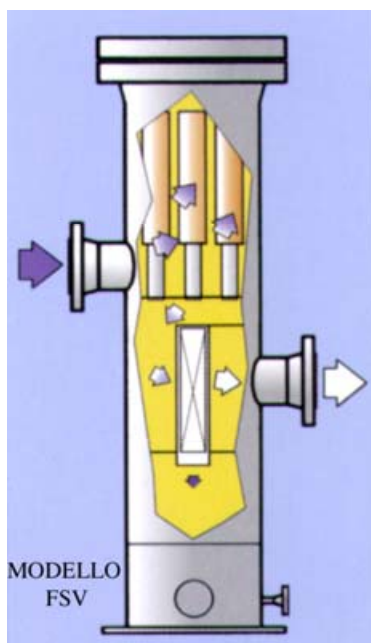


شکل ۴-۱۲: نمودار افت فشار بر حسب دبی برای فیلتر [۱]

۴.۲.۴ فیلتر- جداکننده^{۴۵}

به منظور جدا کردن همزمان مایعات همراه گاز (آب، نفت و میعانات) و ذرات جامد از جریان گاز با بازده بالا، از فیلترهای جداکننده در جریان گاز استفاده می‌شود. استفاده از این جدا کننده‌ها، بهترین روش جهت جدا کردن قطرات بسیار ریز رطوبت و گرد و غبار از جریان گاز است [۲].

شکل ۴-۱۳ اصول کار یک نوع فیلتر-جداکننده را نشان می‌دهد. در فیلتر-جداکننده‌ها، جدا شدن ذرات جامد و مایع به تدریج صورت می‌گیرد. به اینصورت که در ورودی دستگاه ذرات بزرگتر به علت کاهش سرعت گاز و برخورد آن به موانع داخلی توسط نیروی گرانش زمین از گاز جدا می‌شوند. المنت‌های فیلتر ذرات کوچکتر جامد را به دام می‌اندازند در حالی که قطرات مایع در هم ادغام شده و در مرحله بعدی توسط یک واحد جداکننده پره‌دار جدا می‌شوند. معمولاً ذرات جامد درشت و قطرات مایع جدا شده از گاز در یک مخزن جداگانه که به فیلتر جداکننده متصل شده جمع آوری می‌شوند.



شکل ۴-۱۳: اصول کار فیلتر-جداکننده [۲]

۵.۲.۴ جداکننده‌ی سانتریفیوژ^{۴۶}

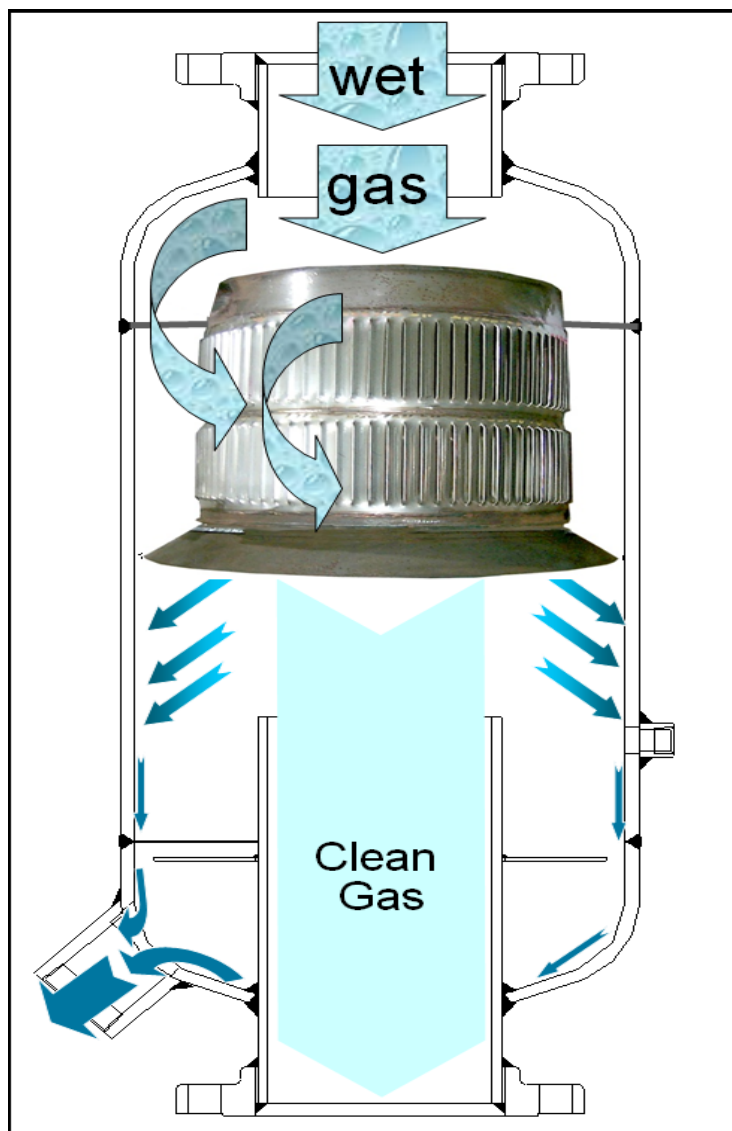
این نوع جداکننده‌ها بصورت افقی یا عمودی در سیستم فیلتراسیون خطوط لوله استفاده می‌شوند و تا بازده ۹۹ درصد برای لخته‌ها، ذرات جامد و قطرات مایع کوچک‌تر از ۱۰ میکرون، جداسازی را انجام

^{۴۵} Filter-separator

^{۴۶} Centrifugal Type Separators

می‌دهند. از آنجایی که مقدار افت فشار کمتر از ۱ psi ایجاد می‌کنند، پس برای فیلتراسیون خطوط توزیع و انتقال بسیار مناسب می‌باشند.

فیلتراسیون در جداکننده‌های سانتریفیوژ بر اساس اعمال نیروی گریز از مرکز صورت می‌گیرد، به طوری که ناخالصی‌ها به علت دانسیته بیشتر از محور مرکزی جداکننده فاصله گرفته و پس از برخورد با دیواره در پایین جداکننده جمع‌آوری می‌شوند. شکل ۴-۱۴ مکانیزم فیلتراسیون در جداکننده‌ی سانتریفیوژ را نشان می‌دهد.

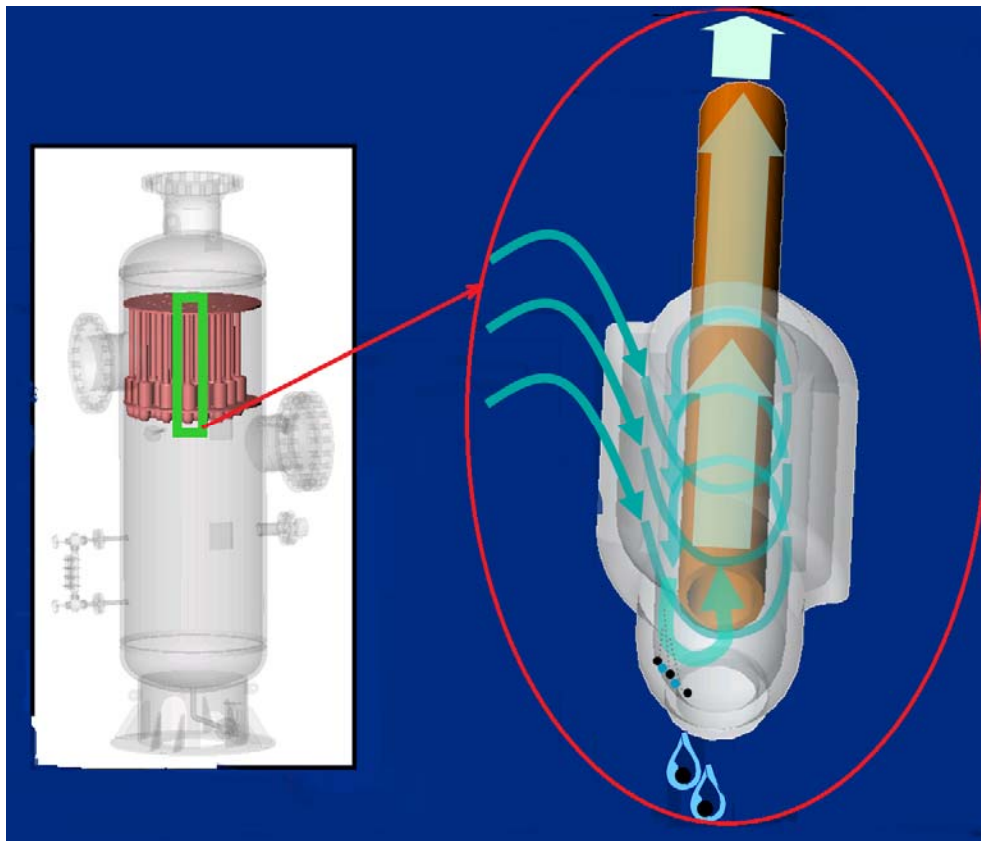


شکل ۴-۱۴: مکانیزم فیلتراسیون در جداکننده‌ی سانتریفیوژ [۳]

۶.۲.۴ جداکننده‌ی سانتریفیوژ با چند سیکلون^{۴۷}

این نوع جداکننده‌ها زمانی که در سیستم لخته‌ای وجود نداشته باشد به خوبی کار می‌کنند بطوری که قادرند با بازده ۱۰۰ درصد، ذرات بیشتر از ۵ میکرون و قطرات مایع بیشتر از ۸ میکرون را از جریان گاز جدا کنند. نوع فیلتراسیون بازده جداسازی بالاتری نسبت به جداکننده‌های سانتریفیوژ دارد اما به‌علت استفاده از چند سیکلون ۲ الی ۳ برابر جداکننده‌ی سانتریفیوژ افت فشار در سیستم بوجود می‌آورند.

طرح شماتیک عبور جریان گاز از یک سیکلون در شکل ۴-۱۵ نشان داده شده‌است. همانطور که در شکل مشخص است جریان گاز در راستای شعاعی سیکلون وارد شده و به علت نیروی گریز از مرکز تا دهانه سیکلون حرکت کرده و از دهانه‌ی سیکلون، به سمت بیرون جداکننده‌ی حرکت می‌کند. ذرات جامد و قطرات مایع نیز به‌علت نیروی گریز از مرکز و داشتن دانسیته‌ی بیشتر نسبت به گاز از پایین سیکلون خارج می‌شوند.



شکل ۴-۱۵: طرح شماتیک عبور جریان گاز از یک سیکلون [۳]

^{۴۷} Multi-Cyclone Centrifugal Separator

۷.۲.۴ بهبود فیلتراسیون در ایستگاه تقلیل فشار شهرستان شیراز

در تیرماه سال ۱۳۸۳ قرارداد پژوهشی با عنوان "روش بهینه سیستم فیلتراسیون گاز طبیعی در ایستگاه‌های تقلیل فشار گاز" بین شرکت گاز استان فارس و گروهی پژوهشی از بخش مهندسی شیمی دانشگاه شیراز به مدیریت دکتر داریوش مولا منعقد گشته و گزارش نهایی این طرح در آبان ماه سال ۱۳۸۵ در اختیار شرکت گاز استان فارس قرار گرفت. در این تحقیق ابتدا سیستم فیلتراسیون گاز طبیعی شهر شیراز و مشکلات مربوط به آن مورد مطالعه قرار گرفت و با بررسی علل و منشا مشکل، راهکاری برای بهبود سیستم فیلتراسیون ارائه گردید.

فیلترهای مورد استفاده

فیلترهای مورد استفاده در ایستگاه تقلیل فشار شهر شیراز از نوع فیلترهای گاز خشک می‌باشند ذرات جامد را توسط تعدادی المنت فیلتر از جریان گاز جدا می‌کند. در جدول ۳-۴ مشخصات فیلتر خط لوله‌ی ایستگاه CGS شیراز ذکر شده‌است.

جدول ۳-۴: مشخصات فیلتر خط لوله‌ی ایستگاه CGS شیراز [۴]

شرکت سازنده	Forain ایتالیا
سال ساخت	۱۹۸۵
نوع درب فیلتر	سریع بازشو نوع گیره‌ای
حداکثر فشار مجاز	در حدود ۱۳۰۰psia
وسایل جانبی	شیرهای اطمینان، بازوی نگهدارنده درب فیلتر، فشارسنج و شیرتخلیه

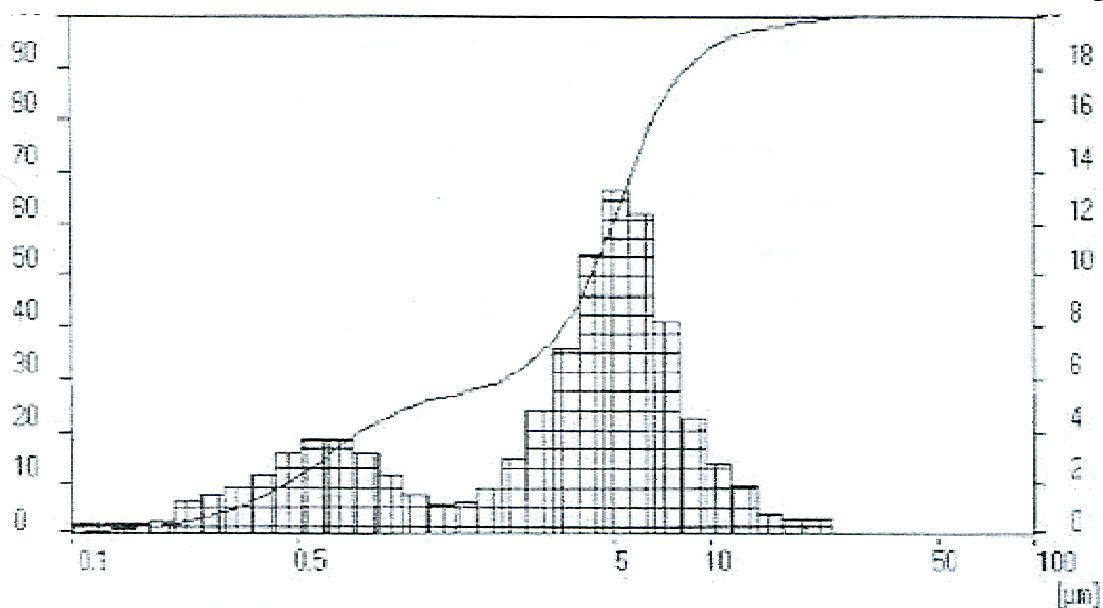
بررسی مشکل

بررسی‌ها نشان داد که مقداری از ذرات جامد موجود در گاز از المنت‌های فیلترهای خط لوله عبور کرده و در ضمن زمانی که مصرف گاز بالاست، ذرات و آلودگی‌ها به سرعت در فیلترها تجمع پیدا کرده و افت فشار زیادی بوجود می‌آورند. براساس این مطالعات مشخص شد که فیلترهای خط لوله مورد استفاده به‌تنهایی نمی‌توانند عملکرد مطلوبی برای رفع مشکلات از خود نشان دهند.

برای پی بردن به منشا مشکلات سیستم فیلتراسیون، آزمایشاتی جهت مشخص کردن جنس، منشا، توزیع اندازه ذرات و غلظت ذرات موجود در گاز انجام گرفت. نتیجه مهم این آزمایشات این بود که بطور میانگین در حدود ۷۲/۵ درصد از نمونه ذرات جمع شده پشت المنت فیلتر از ترکیبات

آهن و اکسیدهای آن و مابقی از گوگرد و کربن تشکیل شده است. پس مهمترین منشا ذرات جامد درون گاز طبیعی، فرسایش و خوردگی خط لوله انتقال گاز است.

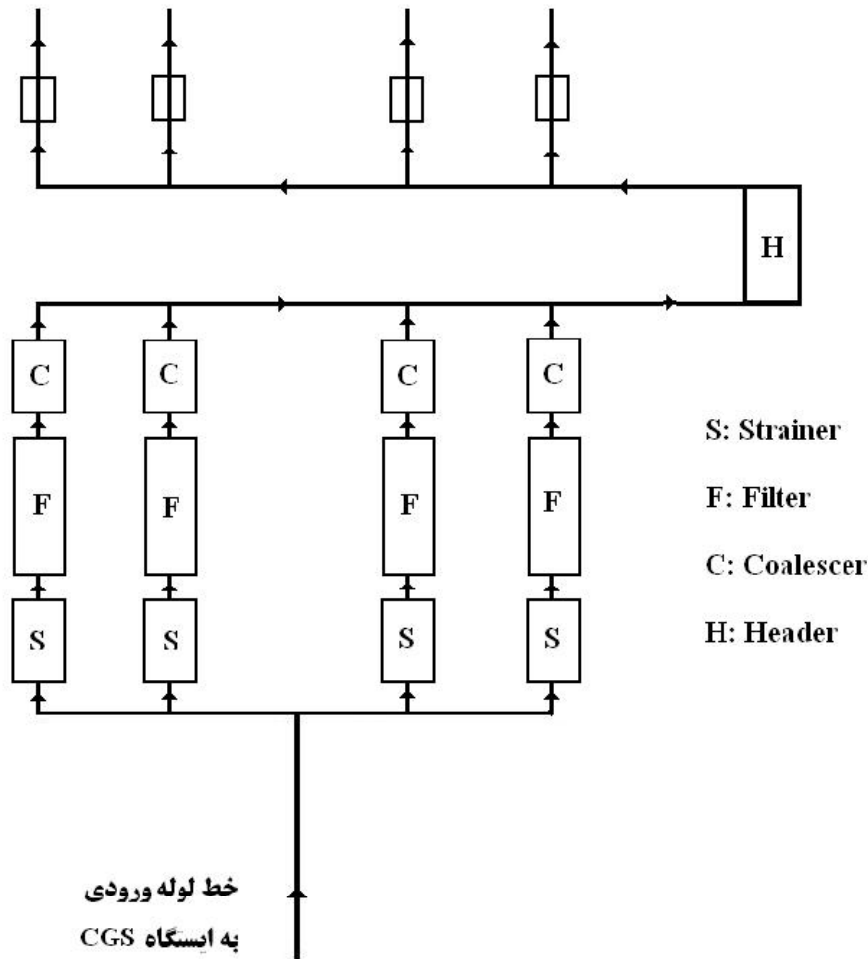
نتایج آزمایشات برای توزیع اندازه‌ی ذرات در شکل ۴-۱۶ نشان داده شده است. نتایج نشان داد به‌طور متوسط ۴ درصد وزنی از ذرات اندازه‌ای بیشتر از ۱۰ میکرون، ۷۰ درصد وزنی از ذرات اندازه‌ای بین ۱ تا ۱۰ میکرون و ۲۶ درصد وزنی از ذرات اندازه‌ای کمتر از ۱ میکرون دارند. میانگین متوسط اندازه ذرات جامد ۳/۳۵ میکرون و بیشترین توزیع اندازه ذرات در محدوده‌ی ۳ تا ۵ میکرون می‌باشد.



شکل ۴-۱۶: توزیع اندازه‌ی ذرات در یک تست از ذرات پشت فیلتر [۴]

ارائه راه‌حل

بر اساس نتایج آزمایشات انجام گرفته و اطلاعات کمی پارامترهای عملیاتی سیستم فیلتراسیون، روش دیگری جهت بهبود عملکرد سیستم فیلتراسیون ایستگاه‌های تقلیل فشار شهر شیراز پیشنهاد گردید. طبق این روش، فیلتراسیون گاز در سه مرحله شامل جداسازی ذرات بالای ۱۰ میکرون در جداکننده استرینر، جداسازی ذرات بین ۱ تا ۱۰ میکرون در فیلترهای خط لوله و جداسازی ذرات و قطرات مایع کوچک‌تر از ۱ میکرون در فیلترهای حاوی المنت کوالسر انجام می‌گیرد. طرح پیشنهادی برای ایستگاه تقلیل فشار شیراز در شکل ۴-۱۷ نشان داده شده است.



شکل ۴-۱۷: طرح پیشنهادی برای بهبود فیلتراسیون ایستگاه تقلیل فشار شهر شیراز [۴]

۳.۴ انتخاب سیستم تصفیه گاز طبیعی

در دو قسمت قبل اهمیت پاک‌سازی گاز قبل از رساندن به دست مصرف‌کننده بررسی و روش‌ها و دستگاه‌های مختلف مربوط بدین فرآیند معرفی گردید. در این قسمت پارامترهای اصلی در تعیین مدل مناسب برای تصفیه‌گاز معرفی شده و تولیدات چندین شرکت مرتبط با تهیه سیستم‌های فیلتراسیون ارائه خواهد شد.

۱.۳.۴ روش‌های مقابله با ذرات ناخالصی جامد در گاز

در راستای از بین بردن و یا کاهش ذرات معلق جامد درون گاز، یکی از مهم‌ترین روش‌ها جلوگیری از تولید آنها در مسیر حرکت گاز می‌باشد. در واقع در این راستا می‌بایست خطوط لوله‌ای طراحی شوند که در حین عملکرد سالم باقی مانده و ذرات معلق به گاز اضافه ننمایند. در هر صورت

روش‌هایی که می‌توان در راستای کاهش عوامل اصلی تولید ذرات درون خطوط لوله استفاده نمود مشتمل بر موارد ذیل می‌باشد.

- استفاده از روش‌های پاک‌سازی مکانیکی مانند سندبلاستینگ
- تا حد ممکن می‌بایست ذرات و بقایای موادی که در حین نصب و کارگذاری لوله‌ها باقی می‌ماند با نصب صحیح و اصولی و نیز تخلیه در انتهای کار به حداقل ممکن برسد.
- کاهش اثرات خوردگی داخلی که عمدتاً ناشی از وجود آب، سولفید هیدروژن، دی‌اکسید کربن و اکسیژن درون گاز می‌باشد.

- کاهش مشتقات هیدروکربنی سنگین به کمک اسکراب‌های روغنی

اعمال تمامی مراحل فوق به صورت عملی نیز نمی‌تواند عدم وجود ذرات معلق جامد درون گاز را تضمین نماید. از اینرو همانگونه که در قسمت قبل نیز اشاره گردید استفاده از دستگاه‌های فیلتراسیون گاز اجتناب ناپذیر می‌باشد. در جدول ۴-۴ انواع متداول ذرات جامد درون خطوط گاز همراه با عوامل به‌وجود آورنده و روش‌های کاهش آنها ارائه شده‌است.

جدول ۴-۴: ماهیت، منشا و روش‌های کاهش ذرات معلق درون خطوط لوله گاز [۵]

نوع ذرات	منشا	روش‌های کاهش
اکسید آهن	خوردگی درون لوله ناشی از اکسیژن، آب، گوگرد و دیگر مواد خورنده در گاز	تمیز کردن لوله قبل از استفاده، استفاده از پیگ، استفاده از فیلترها، کاهش مواد خورنده‌ی گاز، کاهش سرعت گاز، جلوگیری از تغییر جهت گاز
گرد و غبار	چاه گاز، اجزای مواد استفاده شده در اتصالات	تمیز کردن لوله قبل از استفاده، استفاده از پیگ، استفاده از فیلترها، کاهش سرعت گاز، جلوگیری از تغییر جهت گاز
شن و ماسه	چاه‌های گاز- حمل، نصب و بارگذاری لوله‌ها	تمیز کردن لوله‌ها با استفاده از دمش و یا پیگ، استفاده از فیلترها
نمک	چاه‌های گاز	قابل حل در آب
کلراید کلسیم	چاه‌های گاز	قابل حل در آب گرم
سولفات آهن	واکنش ترکیبات سولفات درون گاز با آهن	تمیز کردن لوله‌ها با استفاده از دمش و یا پیگ، استفاده از فیلترها
سولفید آهن	واکنش آهن با سولفید و یا مرکاپتان درون خطوط	حداقل نمودن میزان سولفید هیدروژن، مرکاپتان و اکسیژن گاز، فیلتراسیون، حلالیت در اسیدها
سولفید مس	واکنش مس تیوپ‌ها با سولفید و یا مرکاپتان	حداقل نمودن میزان سولفید هیدروژن، مرکاپتان و اکسیژن گاز، فیلتراسیون، حلالیت ضعیف در اسیدنیتریک
کربنات کلسیم	چاه‌های گاز، در حین نصب و بارگذاری لوله‌ها	فیلتراسیون، حلالیت در اسیدها و کلراید آمونیوم
یخ	منجمد شدن آب درون گاز و یا نشت یافته درون خط	دیهیدراته کردن گاز، استفاده از حرارت و فشار، جداکردن با اتیل الکل و یا متیل الکل
هیدرات	جامد شدن هیدروکربن‌ها همراه با آب	حل در متیل الکل و یا محلول آمونیاک، کاهش فشار و یا افزایش دما

مطابق با جدول ۴-۴ مشاهده می‌شود که روش غالب در جداسازی ذرات جامد از گاز استفاده از سیستم‌های تصفیه گاز می‌باشد. دستگاه‌های تصفیه گاز برای هر مرحله از گازرسانی اعم از انتقال و یا توزیع گاز مورد استفاده‌اند. برای انتخاب دستگاه مناسب می‌بایست اطلاعات زیر فراهم گردد.

۱. تخمینی از میزان ذرات، نوع ذرات و نیز سایز ذرات معلق در گاز

۲. فشار کاری خط

۳. دبی ماکزیمم خط

۴. بیشینه افت فشار مجاز گاز در عبور از دستگاه

بر اساس پارامترهای فوق انواع متعددی از دستگاه‌های فیلتراسیون تولید شده که هر یک متناسب با شرایط کاری خاصی می‌باشند. انواع متداول این دستگاه‌ها مشتمل بر اسکرابر با حمام روغن، تصفیه‌کننده‌های سیکلونی و یا گریز از مرکزی و یا فیلترهای ثابت می‌باشند.

۲.۳.۴ نمونه‌ای از تجهیزات اندازه‌گیری تولیدی شرکت Parker

همانگونه که در بخش قبل اشاره گردید، برای انجام فیلتراسیون بهینه می‌بایست در هنگام انتخاب تجهیزات مرتبط پارامترهایی چون دبی و فشارکاری خط را مورد نظر قرار داد. از اینرو یکی از روش‌های دسته‌بندی فیلترها بر اساس سایز خطوط، دبی و فشار کاری آنها می‌باشد. بر این اساس شرکت‌های متعددی در این زمینه فعالیت نموده و تجهیزات مختلفی متناسب با شرایط کاری مورد نیاز خریداران ارائه نموده‌اند. در این بین با توجه به مصرف بسیار بالای نیروگاه و نیز فشار کاری بالای خط، انتخاب محدود می‌شود. با بررسی‌های انجام گرفته تولیدات شرکت Parker نزدیکترین همخوانی را با نیازهای نیروگاه آبادان داشته که در این بخش معرفی می‌شوند.

تولیدات شرکت Parker جهت جداسازی ذرات مایع و جامد با دقت بالای ۹۹/۹۹ برای ذرات زیر ۰/۰۱ میکرون و ۱۰۰٪ برای ذرات بالای یک میکرون طراحی شده‌اند. مایعات جدا شده از گاز سریعاً از دستگاه تخلیه شده و از اینرو هیچ گونه محدودیت حجمی جهت تخلیه مایع ایجاد نمی‌نماید. سری ZA این محصولات برای سایزهای DN50 تا DN200 و تا فشار ۱۰۰ بار طراحی شده‌اند [۶]. در شکل ۴-۱۸ محدوده‌ی دبی و فشار کاری مدل‌های مختلف این سری ارائه شده‌است. شایان ذکر است که دبی ارائه شده بر اساس دبی هوا در دمای ۲۰ درجه سانتیگراد می‌باشد. برای دیگر گازها می‌بایست از ضرایب تبدیلی که در شکل ۴-۱۹ ارائه شده‌است استفاده گردد.

دیگر مشخصات مربوط به این فیلترها در شکل ۴-۲۰ ارائه شده است. شایان ذکر است حروف اختصاری S و E که بعد از ZA آورده می شوند بیانگر جنس مدل بوده که به ترتیب معادل فولاد سخت و فولاد ضدزنگ می باشد.

Filter Housing Model	Media Grade	2.75 barg	7 barg	14 barg	28 barg	41 barg	69 barg	100 barg
ZA*14	6C	429	915	1716	3317	17414	8006	11552
	10C	715	1526	2861	5532	29042	13353	19266
	3P	715	1526	2861	5532	29042	13353	19266
	A	429	915	1716	3317	17414	8006	11552
	100WS	715	1526	2861	5532	29042	13353	19266
	7CVP	715	1526	2861	5532	29042	13353	19266
	7CVP	715	1526	2861	5532	29042	13353	19266
ZA*17	6C	642	1370	2569	4966	26073	11988	17296
	10C	1070	2283	4281	8276	43448	19976	28823
	3P	1070	2283	4281	8276	43448	19976	28823
	A	642	1370	2569	4966	26073	11988	17296
	100WS	1070	2283	4281	8276	43448	19976	28823
	7CVP	1070	2283	4281	8276	43448	19976	28823
	7CVP	1070	2283	4281	8276	43448	19976	28823
ZA*18	6C	1133	2416	4530	8758	45980	21140	30502
	10C	1888	4027	7551	14598	76639	35236	50841
	3P	1888	4027	7551	14598	76639	35236	50841
	A	1133	2416	4530	8758	45980	21140	30502
	100WS	1888	4027	7551	14598	76639	35236	50841
	7CVP	1888	4027	7551	14598	76639	35236	50841
	7CVP	1888	4027	7551	14598	76639	35236	50841
ZA*19	6C	1133	2416	4530	8758	45980	21140	30502
	10C	1888	4027	7551	14598	76639	35236	50841
	3P	1888	4027	7551	14598	76639	35236	50841
	A	1133	2416	4530	8758	45980	21140	30502
	100WS	1888	4027	7551	14598	76639	35236	50841
	7CVP	1888	4027	7551	14598	76639	35236	50841
	7CVP	1888	4027	7551	14598	76639	35236	50841
ZA*20	6C	1284	2739	5136	9929	52127	23966	34580
	10C	2140	4566	8561	16552	86897	39953	57646
	3P	2140	4566	8561	16552	86897	39953	57646
	A	1284	2739	5136	9929	52127	23966	34580
	100WS	2140	4566	8561	16552	86897	39953	57646
	7CVP	2140	4566	8561	16552	86897	39953	57646
	7CVP	2140	4566	8561	16552	86897	39953	57646
ZA*30	6C	1926	4109	7704	14895	78199	35954	51876
	10C	3210	6848	12840	24824	130326	59920	86456
	3P	3210	6848	12840	24824	130326	59920	86456
	A	1926	4109	7704	14895	78199	35954	51876
	100WS	3210	6848	12840	24824	130326	59920	86456
	7CVP	3210	6848	12840	24824	130326	59920	86456
	7CVP	3210	6848	12840	24824	130326	59920	86456
ZA*40	6C	2568	5479	10273	19861	104272	47941	69172
	10C	4280	9131	17121	33100	173774	79896	115279
	3P	4280	9131	17121	33100	173774	79896	115279
	A	2568	5479	10273	19861	104272	47941	69172
	100WS	4280	9131	17121	33100	173774	79896	115279
	7CVP	4280	9131	17121	33100	173774	79896	115279
	7CVP	4280	9131	17121	33100	173774	79896	115279
ZA*60	6C	3852	8218	15409	29790	156399	71908	103752
	10C	6420	13697	25682	49652	260671	119849	172925
	3P	6420	13697	25682	49652	260671	119849	172925
	A	3852	8218	15409	29790	156399	71908	103752
	100WS	6420	13697	25682	49652	260671	119849	172925
	7CVP	6420	13697	25682	49652	260671	119849	172925
	7CVP	6420	13697	25682	49652	260671	119849	172925
ZA*80	6C	5163	10957	20544	39719	208525	95874	138332
	10C	8560	18262	34241	66200	347549	159793	230558
	3P	8560	18262	34241	66200	347549	159793	230558
	A	5163	10957	20544	39719	208525	95874	138332
	100WS	8560	18262	34241	66200	347549	159793	230558
	7CVP	8560	18262	34241	66200	347549	159793	230558
	7CVP	8560	18262	34241	66200	347549	159793	230558
ZA*100	6C	6420	13697	25682	49652	260671	119849	172925
	10C	10701	22828	42803	82752	434445	199745	288204
	3P	10701	22828	42803	82752	434445	199745	288204
	A	6420	13697	25682	49652	260671	119849	172925
	100WS	10701	22828	42803	82752	434445	199745	288204
	7CVP	10701	22828	42803	82752	434445	199745	288204
	7CVP	10701	22828	42803	82752	434445	199745	288204

شکل ۴-۱۸: محدوده دبی (Nm^3 / hr) و فشار کاری مدل های سری ZA

Gas	Natural Gas	Hydrogen	Carbon Dioxide	Ammonia
Conversion factor	0.8158	0.2638	1.2324	0.772

شکل ۴-۱۹: ضرایب تبدیل دبی برای سایر گازها

Model Number	Port Size	Max Pressure	Max. Temp for each Element	Materials of Construction			Seals	Dimensions	
				Head	Internals	Bowl		Length	Width
ZAS14	DN50	16/100 bar	120°C (C, 3P, 100WS)	Carbon Steel	Carbon Steel	Carbon Steel	Metal-Graphite	931mm	380mm
ZAE14	DN50	16/100 bar	79°C (A)	Stainless Steel	Stainless Steel	Stainless Steel	Metal-Graphite	931mm	380mm
ZAS17	DN65	16/100 bar	120°C (C, 3P, 100WS)	Carbon Steel	Carbon Steel	Carbon Steel	Metal-Graphite	1180mm	380mm
ZAE17	DN65	16/100 bar	79°C (A)	Stainless Steel	Stainless Steel	Stainless Steel	Metal-Graphite	1180mm	380mm
ZAS18	DN80	16/100 bar	120°C (C, 3P, 100WS)	Carbon Steel	Carbon Steel	Carbon Steel	Metal-Graphite	1180mm	420mm
ZAE18	DN80	16/100 bar	79°C (A)	Stainless Steel	Stainless Steel	Stainless Steel	Metal-Graphite	1180mm	420mm
ZAS19	DN80	16/100 bar	120°C (C, 3P, 100WS)	Carbon Steel	Carbon Steel	Carbon Steel	Metal-Graphite	1320mm	440mm
ZAE19	DN80	16/100 bar	79°C (A)	Stainless Steel	Stainless Steel	Stainless Steel	Metal-Graphite	1320mm	440mm
ZAS20	DN100	16/100 bar	120°C (C, 3P, 100WS)	Carbon Steel	Carbon Steel	Carbon Steel	Metal-Graphite	1440mm	500mm
ZAE20	DN100	16/100 bar	79°C (A)	Stainless Steel	Stainless Steel	Stainless Steel	Metal-Graphite	1440mm	500mm
ZAS30	DN100	16/100 bar	120°C (C, 3P, 100WS)	Carbon Steel	Carbon Steel	Carbon Steel	Metal-Graphite	1440mm	500mm
ZAE30	DN100	16/100 bar	79°C (A)	Stainless Steel	Stainless Steel	Stainless Steel	Metal-Graphite	1440mm	500mm
ZAS40	DN150	16/100 bar	120°C (C, 3P, 100WS)	Carbon Steel	Carbon Steel	Carbon Steel	Metal-Graphite	1590mm	640mm
ZAE40	DN150	16/100 bar	79°C (A)	Stainless Steel	Stainless Steel	Stainless Steel	Metal-Graphite	1590mm	640mm
ZAS60	DN150	16/100 bar	120°C (C, 3P, 100WS)	Carbon Steel	Carbon Steel	Carbon Steel	Metal-Graphite	1650mm	790mm
ZAE60	DN150	16/100 bar	79°C (A)	Stainless Steel	Stainless Steel	Stainless Steel	Metal-Graphite	1650mm	790mm
ZAS80	DN200	16/100 bar	120°C (C, 3P, 100WS)	Carbon Steel	Carbon Steel	Carbon Steel	Metal-Graphite	1730mm	790mm
ZAE80	DN200	16/100 bar	79°C (A)	Stainless Steel	Stainless Steel	Stainless Steel	Metal-Graphite	1730mm	790mm
ZAS100	DN200	16/100 bar	120°C (C, 3P, 100WS)	Carbon Steel	Carbon Steel	Carbon Steel	Metal-Graphite	1780mm	840mm
ZAE100	DN200	16/100 bar	79°C (A)	Stainless Steel	Stainless Steel	Stainless Steel	Metal-Graphite	1780mm	840mm

شکل ۴-۲۰: مشخصات ساخت مدل‌ها

۴.۴ فهرست منابع

[1] <http://www.sparksfilters.com>

[2] <http://www.forain.net>

[3] <http://www.psfiler.com>

[۴] مولا، د. "روش بهینه سیستم فیلتراسیون گاز طبیعی در ایستگاه‌های تقلیل فشار گاز"، شرکت گاز استان فارس، دانشگاه شیراز، ۱۳۸۵

[۵] "Gas Engineers Handbook", Industrial Press, 1st Edition, New York, 1974.

[۶] <http://www.parker.com>

۵ بررسی مشکل مرتبط با سیستم‌های حفاظت کاتدیک مسجد سلیمان

در پی درخواست و اعلام نیاز کارشناسان شرکت گاز استان خوزستان در مورد مشکلات سیستم حفاظت کاتدی شبکه گازرسانی شهر مسجدسلیمان، مطالعات لازم جهت شناسایی جنس خاک و همچنین بررسی رطوبت خاک در محدوده کارگزاری شبکه گازرسانی به دفتر پژوهشی گاز محول شد. در این راستا مطالعه زمین شناسی محدوده شهر مسجد سلیمان با توجه به اطلاعات موجود انجام شد. از آنجایی که عوامل مختلفی در شناسایی جنس خاک و همچنین وضعیت رطوبت خاک موثر می‌باشند سعی شده‌است که در حد امکان و متناسب با اطلاعات موجود این عوامل بررسی شود.

در ابتدا کلیاتی از منطقه که شامل موقعیت جغرافیایی و راههای دسترسی و همچنین زمین شناسی عمومی منطقه می‌باشد، بیان شده‌است. با توجه به اهمیت و نقش وضعیت لایه‌بندی و شیب منطقه در میزان رطوبت خاک و آب زیرزمینی، ژئومورفولوژی منطقه به همراه منابع آب سطحی و زیرسطحی مورد اشاره قرار گرفته‌است که قرارگیری محدوده شهری در بین مناطق مرتفع و کوهستانی و همچنین گذر چندین رودخانه دائم و فصلی از جمله رودخانه تمبی از این منطقه باعث شده که وضعیت آب زیر زمینی و رطوبت خاک قابل توجه باشد. از دیگر عوامل موثر می‌توان به ساختارهای موجود در منطقه از قبیل وضعیت چین‌خوردگی و گسل‌ها اشاره کرد که تاثیرات چشمگیری را بخصوص در این منطقه موجب شده‌است. شایان ذکر است که اصطلاحات تخصصی مورد استفاده در این فصل در جدول ۵-۱ معرفی شده‌اند.

جدول ۵-۱: جدول راهنمای اصطلاحات استفاده شده

عنوان	توضیحات	مثال
سازند	تشکیلات و رخنمون‌های خاک و سنگ	سازند آجاجری، گچساران و میشان
لیتولوژی	جنس و نوع سنگ و خاک سازند	مارن، آهک، انیدریت، ماسه سنگ، کنگلومرا، ژپس و نمک
ژئومورفولوژی	وضعیت پستی و بلندی منطقه	
گسل	شکستگی و ترک در زمین	گسل نیایش، لالی
تخلخل	خلل و فرج موجود در خاک و سنگ	
کانی	ماده‌ی جامد، بلورین تشکیل دهنده خاک و سنگ	هالیت، انیدریت
کارست	اثر انحلال آب بر روی آهک و نمک	
آبخوان	سفره آب زیرزمینی	

۱.۵ موقعیت جغرافیایی و راه‌های دسترسی منطقه

منطقه مسجد سلیمان از نظر موقعیت جغرافیایی، بین مختصات $49^{\circ}0'26''$ تا $49^{\circ}34'39''$ طول شرقی و $31^{\circ}40'8''$ تا $32^{\circ}11'43''$ عرض شمالی قرار دارد. شهرستان مسجد سلیمان به عنوان اصلی‌ترین مرکز جمعیتی منطقه در شمال شرق استان خوزستان واقع شده است و از شمال و شرق به ترتیب به شهرستان‌های دزفول و ایذه و استان چهارمحال بختیاری، از جنوب به شهرستان رامهرمز و از غرب به شهرستان شوشتر محدود می‌گردد. طبق شکل ۵-۱ شهر مسجد سلیمان به طول تقریبی ۱۹ کیلومتر و عرض متوسط ۳ کیلومتر با جهت جنوب شرق، شمال غرب بر روی سازند گچساران که نهایتاً بر روی تاق‌دیس سازند آسماری قرار دارد استقرار یافته است. نوارهای باریکی از شهر خصوصاً در بخش‌های شمال و شمال غرب و بخش جنوب تمبی بر روی سازندهای آجاجری، بختیاری و میشان قرار گرفته‌اند. مساحت این شهرستان بر اساس آخرین تقسیمات کشوری ۶۹۸۶ متر مربع و

ارتفاع متوسط آن ۳۶۲ متر از سطح دریا می‌باشد. این شهرستان از سه بخش مرکزی، اندیکا و لالی و ۱۳ دهستان تشکیل شده‌است [۲].



شکل ۵-۱: موقعیت جغرافیایی شهرستان مسجد سلیمان

۲.۵ زمین شناسی عمومی منطقه

منطقه مورد مطالعه، قسمتی از زاگرس چین خورده می‌باشد که در جنوب غرب ایران قرار دارد. در طی بررسی‌های عمومی زمین‌شناسی، ابتدا جایگاه زمین‌ساختی منطقه مورد مطالعه قرار گرفته و سپس چینه‌شناسی سازندهای رخنمون یافته بررسی و در پایان ژئومورفولوژی کلی منطقه مطالعه گردیده است.

۱.۲.۵ جایگاه زمین ساختی منطقه

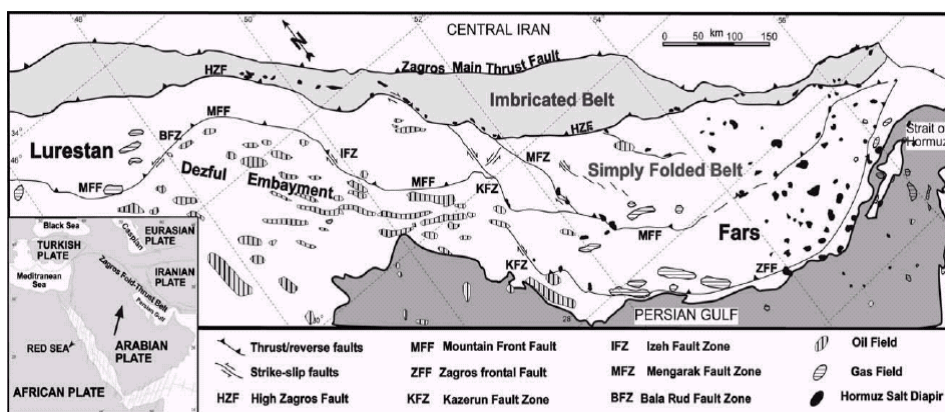
کمر بند چین خورده رورانده (Fold-thrust belt) زاگرس همراه با تعداد بی‌شماری میدین عظیم نفتی در حدود ۲۰۰۰km از شمال شرقی ترکیه شروع شده با گذر از سوریه و عراق تا غرب و جنوب ایران ادامه دارد [۳].

۲.۲.۵ تقسیمات زاگرس

از نظر جغرافیایی زاگرس را می‌توان به نواحی فارس، خوزستان و لرستان تقسیم کرد. از نظر الگوی ساختاری از شمال شرق به جنوب غرب، زاگرس شامل زون راندگی‌ها، کمر بند چین خورده، فروافتادگی دزفول و دشت آبادان است. به لحاظ زمین ریخت‌شناسی از شمال شرق به جنوب غرب، زاگرس شامل زاگرس مرتفع (زاگرس داخلی)، زاگرس چین خورده (زاگرس بیرونی) و دشت خوزستان است. [۴] کمر بند کوهزایی زاگرس را به سه ایالت پتروگرافی - تکتونیکی ارومیه - دختر، سنندج - سیرجان و کمر بند کمی چین خورده زاگرس تقسیم می‌کند. Berberian نیز در سال 1995، بر پایه نمک‌های سری هرمز، زاگرس را به دو بخش جنوب شرقی یا حوضه هرمز و بخش شمال غربی یا حوضه اهواز تقسیم کرده است که مرز جدایی این دو حوضه خطواره قطر - کازرون است [۵]. از آنجا که میدان نفتی مورد مطالعه در منطقه زاگرس چین خورده قرار گرفته است، لذا به طور مختصر به ویژگی‌های این منطقه اشاره می‌شود.

۳.۲.۵ منطقه چین خورده زاگرس

این منطقه شامل توالی ضخیمی از رسوبات اواخر پرکامبرین تا رسوبات آواری پلیوسن و جوانتر است که بصورت مجموعه‌ای از تاقدیس‌ها و ناودیس‌های بزرگ چین خورده‌اند. چین‌ها از زمان میوسن ایجاد شده‌اند و پستی و بلندی‌ها را ایجاد کرده‌اند. در این پستی و بلندی‌ها، کوه‌های تاقدیس مانند و دره‌های ناودیس مانند بر دیگر اشکال ساختمانی غلبه دارند. زون چین خورده با وجود تاقدیس‌های عظیم، طویل و جعبه‌ای شکل مشخص می‌شود که مخازن متعددی را در خود جای داده‌اند [۵]، بطوریکه اکثر تله‌های نفتی تاقدیسی مربوط به شمال شرق عراق و جنوب غرب ایران در این کمر بند قرار دارند. روند چین‌ها عمدتاً شمال غرب - جنوب شرق بوده، ولی در حد تنگه هرمز شرقی - غربی می‌شوند.



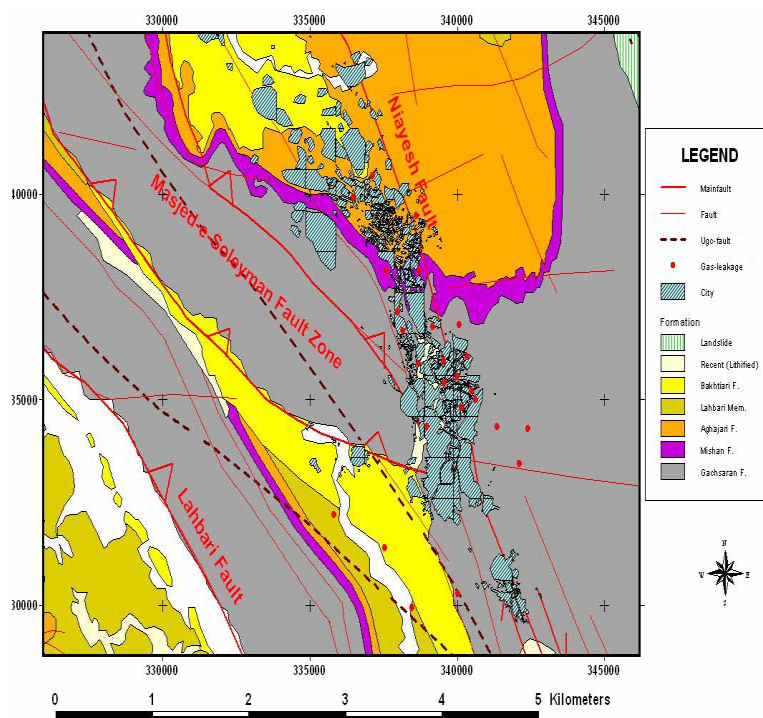
شکل ۲-۵: وضعیت ساختمانی کمربند چین خورده- تراستی زاگرس [۶]

۳.۵ چینه شناسی منطقه

مسجد سلیمان با جهت شمال غرب، جنوب شرق به ترتیب بر روی سازند آغاچری، سازند میشان و سازند گچساران قرار گرفته است. سازند گچساران را می‌توان سازند غالب بستر طبیعی شهر دانست (رنگ خاکستری در شکل ۳-۵)

۱.۳.۵ سازند گچساران

برای سازند گچساران یک برش نمونه کامل در سطح زمین وجود ندارد و این به علت داشتن خواص پلاستیکی ناشی از وجود لایه‌های ضخیم نمک و لایه‌های مارنی است که موجب دگرشکلی لایه‌ها و به هم ریختگی آن‌ها می‌شوند و قابلیت انحلال نمک‌ها این به هم ریختگی را در سطح زمین و یا نزدیک به آن را تسریع و تداوم می‌بخشد. سنگ شناسی کلی سازند گچساران در خوزستان مشتمل بر حدود ۱۶۰۰ متر نمک، انیدریت، مارن‌های رنگارنگ آهک و مقداری شیل بیتوم دار می‌باشد. در بعضی نقاط این سازند ترکیبات سیلویت (کلروپتاسیم) یافت می‌شود. در سطح زمین به جای انیدریت بیشتر ژپس دیده می‌شود و نمک نیز به ندرت در سطح زمین یافت شده است. بخش عمده منطقه مسجد سلیمان (به‌خصوص منطقه شهری)، بر روی بخش‌های سه و چهار این سازند حاوی مارن و انیدریت قرار داشته و این سازند به عنوان پوش سنگ مخزن نفتی به حساب می‌آید. سن این سازند میوسن پایینی بوده و حد پایینی آن با سازند آسماری همساز است [۲].



شکل ۳-۵: نقشه زمین‌شناسی منطقه مسجد سلیمان

۲.۳.۵ سازند میشان

میشان نام دهکده‌ای واقع در ۵۰ کیلومتری جنوب شرقی گچساران در استان کهگلویه و بویراحمد می‌باشد. ردیف سازند میشان در برش نمونه مرکب از ۷۱۰ متر مارن خاکستری و آهک‌های رسی می‌باشد، ۶۰ متر پایینی سازند بیشتر شامل آهک‌های صدف‌دار در تناوب با مارن‌های خاکستری است. حد پایینی سازند میشان به سازند گچساران ناگهانی و همساز بوده و در راس اولین ژئیس با انیدریت که در پی آن لایه‌های متعدد ژئیس تداوم می‌یابد، انتخاب می‌شود. این سازند با سن میوسن میانی‌بالایی از توالی آهک مارنی و مارن سبز خاکستری تشکیل یافته است [۷]. رخنمون سطحی این سازند در شرق شهر مسجد سلیمان (محلاتی مانند نفتک، هشت بنگله و غیره) قابل مشاهده است.

۳.۳.۵ سازند آغاجری

برش نمونه سازند آواری آغاجری در امتداد جاده‌ای که میانه میدان نفتی آغاجری را قطع می‌کند برداشت شده‌است. ردیف این سازند شامل ۲۹۶۶ متر تناوب ماسه سنگهای آهکی قهوه‌ای تا خاکستری و مارن‌های قرمز رنگ با رگه‌های ژئیس و سیلتستون قرمز رنگ است. این سازند در منطقه مورد مطالعه با سن میوسن بالایی- پلیوسن از توالی ماسه سنگ و مارن قرمز رنگ تشکیل یافته است. رخنمون سطحی این سازند در بخش‌های شمالی و شمال شرقی منطقه قابل مشاهده است [۲].

۴.۳.۵ سازند بختیاری

این سازند شامل کنگلومرا و ماسه سنگ‌های آهکی چرتی است که به صورت همساز و گاهی ناهم‌ساز بر روی سازندهای قدیمی‌تر در مناطق مختلف قرار می‌گیرد. یک سوم زیرین این سازند در برش نمونه تناوبی از کنگلومرای توده‌ای، مقاوم با هوازدگی نسبتاً کم و عدسی‌هایی از ماسه سنگ کنگلومرایی است و در دو سوم بالایی شامل کنگلومرایی است که دیواره‌هایی را بوجود آورده‌است. رخنمون سطحی این سازند در بخش شمال شرق منطقه قابل مشاهده است (حوالی روستای بتوند).

۵.۳.۵ نهشته‌های کواترنری

در مرز ترشیاری- کواترنری، فار نهایی کوهزایی آلپی (پاسادنین) رخ داده‌است. به همین دلیل بلافاصله پس از نهشته شدن ماسه سنگ‌ها و مارن‌های آجاجری، کل ناحیه چین‌خورده، از آب خارج شده‌است. در پی ایجاد ارتفاعات، فرسایش رخنمون‌های سنگی باعث ایجاد حجم عظیمی از رسوبات گردیده‌است که این رسوبات در حوضه‌های بین کوهستانی نهشته شده‌اند [۷].

۴.۵ خصوصیات لیتولوژی غالب سازندها

در این قسمت به توضیح بعضی از لیتولوژی‌های موجود در سازندها پرداخته شده‌است.

• انیدریت

انیدریت واژه‌ای است یونانی که از ترکیب دو کلمه‌ی « an » بمعنای بدون و « hydrous » به معنای آب گرفته شده‌است. چراکه این کانی در شرایط طبیعی با آزدایی از ژئیس حاصل می‌شود و در حقیقت ژئیس، نوع آبدار آن محسوب می‌گردد. این کانی که در گروه سولفات‌ها قرار می‌گیرد، همراه با ژئیس از مهمترین کانی‌های تبخیری بشمار می‌رود [۸]. چنین کانی‌هایی بر اثر تبخیر و تغلیظ آب‌های شور در شرایط آب‌وهوایی خشک شکل می‌گیرند [۹]. البته علاوه بر تبخیر، فعالیت‌های آتشفشانی و انتقال یون‌های حاصل از این فعالیت‌ها به محیط و یخ‌زدگی آب نیز می‌تواند سبب افزایش غلظت یون‌های محلول و رسوبگذاری چنین کانی‌هایی شوند. به همین دلیل برای این نهشته‌ها، واژه « کانی‌های اشباعی » بجای کانی‌های تبخیری پیشنهاد شده است [۱۰].

• ژپس

متداولترین کانی سولفات با از دست دادن آب خود به انیدریت تبدیل می‌شود. در ساختمان انیدریت ($\text{CaSO}_4, 2\text{H}_2\text{O}$) که از ۴۱/۲ درصد CaO و ۵۸/۸ درصد SO_3 تشکیل شده‌است، اتم کلسیم دارای عدد هم‌آرایی ۸ بوده، بدین معنی که ۸ اتم از اکسیژن‌های گروه SO_4 آنرا احاطه می‌کنند [۸].

نوع آبدار انیدریت که ژپس نام دارد نیز در برخی از مقاطع مورد مطالعه مشاهده می‌شود. اگرچه این کانی متداولترین کانی سولفات است، اما تحت تاثیر درجه حرارت، فشار و سیالات منفذی، در اعماق آبدایی نموده و بطور کامل به انیدریت تبدیل می‌گردد [۱۰]. عمق تبدیل ژپس به انیدریت توسط فاکتورهای دما، فشار و شوری سیالات منفذی کنترل می‌شود. بر اثر این تبدیل حجم قابل ملاحظه‌ای آب، آزاد شده که می‌تواند سبب افزایش روان شدگی و ایجاد حالت پرفشار شود [۱۱]. لذا در اعماق بندرت می‌توان ژپس اولیه یافت نمود. ولی در مراحل نهایی دیاژنز، انیدریت می‌تواند با آبدگیری مجدد به ژپس (ژپس ثانویه) تبدیل شود.

• مارن

مارن‌ها رسوبات دانه‌ریزی هستند که از نسبت‌های مختلف رس و کلسیت تشکیل شده‌اند. کانی کربناته غالب در اکثر مارن‌ها کلسیت (CaCO_3) است (بین ۳۰ تا ۷۰ درصد حجم سنگ). ولی کانی‌های کربناته دیگری مثل آراگونیت، دولومیت و یا سیدریت نیز ممکن است با مقادیر اندک وجود داشته باشند. واژه مارن بیشتر برای توصیف رسوبات دریاچه‌ای یا مردابی بکار می‌رود، اما ممکن است برای رسوبات دریایی نیز استفاده شود. محتوای بالای CaCO_3 و شرایط تشکیل مارن سبب می‌شود که اکثر آنها به رنگ خاکستری روشن تا متوسط مشاهده شوند [۱۲].

• هالیت

واژه‌ی هالیت از کلمه‌ی یونانی « هالوس » بمعنای نمک و دریا گرفته شده‌است. در ساختمان این کانی که از ۳۹/۳ درصد سدیم و ۶۰/۷ درصد کلر تشکیل شده‌است، هر دو یون سدیم و کلر دارای عدد هم‌آرایی ۶ می‌باشند. بدین معنی که هر یون سدیم توسط ۶ یون کلر و هر یون کلر توسط ۶ یون سدیم دربرگرفته شده و بعبارت دیگر هم‌آرایی اکتاهدري دارند [۱۳].

۵.۵ ژئومورفولوژی منطقه مسجد سلیمان

همانگونه که در بخش زمین شناسی ذکر گردید این منطقه در رشته کوه‌های زاگرس قرار گرفته است. بررسی ژئومورفولوژیکی منطقه حکایت از قرارگیری این منطقه در حد فاصل منطقه کوهستانی و کوهپایه‌ای دارد. به گونه‌ای که در بخش‌های شرقی و شمالی (منطقه اندیکا) منطقه کاملاً کوهستانی با ارتفاعات بیش از ۱۰۰۰ متر بوده و دره‌های عمیق تنگ ایجاد شده است. در صورتیکه در بخش‌های مرکزی (محدوده شهرستان) و جنوبی حالت کوهپایه‌ای با ارتفاعی کمتر از ۶۰۰-۵۰۰ متر می‌باشد و قسمت‌های عمده‌ای از این بخش حالت تپه ماهوری دارد که به دلیل فرسایش پذیری سازندهای گچساران و آماجری می‌باشد. هر چه از سمت جنوب غرب به طرف شمال شرق حرکت می‌کنیم، ارتفاعات بیشتر می‌شوند [۲].

۶.۵ منابع آب سطحی و زیر زمینی

در این بخش باتوجه به محدودیت اطلاعاتی ویر اساس یکسری آمار و گزارشات در مورد وضع آب سطحی و زیر سطحی توضیحاتی ارائه شده است.

۱.۶.۵ منابع آب سطحی

مهمترین و تنها منبع آب در منطقه رودخانه کارون است که نزدیک ترین نقطه آن به شهر در گذار لندر می‌باشد. حدود ۲۵ کیلومتر پایین دست سد کارون قرار گرفته و تاسیسات فعلی آبگیری و تصفیه خانه شرکت نفت در آن محل قرار دارد. رودخانه فرعی تنگ بابا احمد نیز در شمال، مرز بین این شهرستان با شهرستان لالی را تشکیل می‌دهد و در ادامه مسیر خود به رودخانه کارون می‌ریزد. در جنوب غرب شهرستان نیز دو رودخانه فصلی نیز وجود دارد.

۲.۶.۵ منابع آب زیرزمینی

طبق آمار تعداد ۶۰ حلقه چاه عمیق و نیمه عمیق با تخلیه سالانه ۶.۷ میلیون متر مکعب در دشت‌های پراکنده این حوضه مورد بهره برداری قرار می‌گیرد و تعداد ۹ دهنه چشمه و یک رشته قنات نیز در حوضه مذکور شناسایی شده است که میزان تخلیه آنها ۴.۲ میلیون متر مکعب در سال گزارش شده است. به طور کلی با توجه به قرارگیری شهر مسجد سلیمان در یک منطقه کم ارتفاع

و پست و محصور شده بین کوهها و گذر رودخانه‌ها از محدوده شهری وضعیت آب زیرزمینی قابل توجه می‌باشد [۱۴].

۷.۵ ساختارهای موجود در منطقه

در این بخش ابتدا وضعیت چین خوردگی و روندهای عمده ساختمانی مورد بررسی قرار گرفته و در ادامه گسله‌های اصلی منطقه مطالعه گردیده‌اند.

۱.۷.۵ وضعیت چین خوردگی‌ها

الگوی چین خوردگی در این منطقه، از نوع چین‌های ناهماهنگ می‌باشد به گونه ای که عملکرد گسله‌های معکوسی با روند N 120-140 باعث ایجاد پهنه‌های فشاری و تشکیل چین‌های مرتبط با گسل در لایه‌های سخت گردیده‌است و وجود لایه شکل پذیر سازند گچساران، عاملی برای اختلاف در چین خوردگی سطوح مختلف شده و در نهایت باعث شده در افق‌های بالاتر، تاقدیس مسجد سلیمان تبدیل به یک ناودیس کاملاً گسترده گردد.

۲.۷.۵ روندهای عمده ساختاری

برداشت‌های سطحی ساختارها حاکی از وجود سه روند عمده گسلش در منطقه می‌باشد که علیرغم وجود لایه شکل‌پذیر گچساران در رخنمون سطحی، می‌توان با کمی اختلاف این سه روند را شناسایی نمود. مشخصات این روندها به شرح ذیل می‌باشد:

۱. روند N 110-130: این روند گسله‌ها که سیمای کلی دیگر ساختارهای منطقه را نیز رقم زده است، دارای مکانیسم حرکتی معکوس با کمی مولفه امتداد لغز راست بر می‌باشد. عامل اصلی چین خوردگی و تشکیل میدان نفتی مسجد سلیمان عملکرد این گسله‌ها می‌باشد. از مهمترین گسله‌ها با این روند، میتوان به گسله‌های لهبری و مسجد سلیمان اشاره نمود.

۲. روند N 160-170: این روند گسله که از درون شهر مسجد سلیمان می‌گذرد و با ایجاد دره‌ای عمیق باعث رقم خوردن سیمای ژئومورفولوژیکی شهر گردیده‌است، دارای مکانیسم حرکتی امتداد لغز راست بر با کمی مولفه فشاری می‌باشد.

۳. روند N 60-70: این روند گسله که عمداً در حوالی روستای بتوند به صورت گسله‌ای با زون خردشده عریض و در سایر مناطق به صورت خطواره و یا گسله‌های منقطع قابل پیگیری است، دارای مکانیسم حرکتی امتداد لغز چپ‌بر بوده و در بسیاری از جاها باعث ایجاد ریز

چین‌هایی در سازند گچساران گردیده است. شایان توجه است که به نظر می‌رسد که این روند گسلش کاملاً جدید بوده باشد، زیرا سایر گسله‌ها را قطع نموده و یا باعث خمش آنها گردیده‌اند.

۳.۷.۵ بررسی گسل‌های اصلی منطقه

گسل‌های اصلی منطقه مسجد سلیمان عبارتند از: پهنه‌گسلی مسجد سلیمان، گسل‌نیایش، گسل‌لهبری و گسل‌اندیکا می‌باشد. وضعیت ساختاری این گسله‌ها به شرح ذیل می‌باشد:

۱. پهنه‌گسله مسجد سلیمان

این پهنه‌گسله که از چندین گسل هم امتداد تشکیل یافته، از ۱۳ کیلومتری شمال غرب مسجد سلیمان (شمال روستای بتوند) آغاز گردیده و تا جنوب شرق این شهرستان ادامه یافته و نهایتاً توسط گسل‌نیایش قطع و ختم گردیده است. عملکرد این پهنه‌گسله باعث رانده شدن سازند گچساران بر روی دشت آرفتی تمبی شده است.

۲. گسل‌نیایش

این گسل از شمال مسجد سلیمان آغاز گردیده و ضمن عبور از این شهرستان، تا غرب شهرستان هفتکل ادامه پیدا می‌کند. این گسل سایر گسل‌های طولی را قطع می‌نماید. طول این گسل حدود ۷۲ کیلومتر است.

۳. گسل‌لهبری

این گسل از حوالی روستای بتوند (۱۵ کیلومتری غرب مسجد سلیمان) آغاز گردیده و تا ۱۰ کیلومتری شمال شرق هفتکل کشیده شده است. طول این گسل حدود ۹۵ کیلومتر بوده که تنها حدود ۶۰ کیلومتر آن در محدوده چهار گوشه قرار می‌گیرد. این گسل دارای مکانیسم حرکتی معکوس با مولفه راست‌بر می‌باشد و عملکرد آن باعث رانده شدن سازند گچساران بر روی دشت آبرفتی یا گچ‌لهبری شده است.

۴. گسل‌اندیکا

این گسل در ۱۴ کیلومتری شمال شرق مسجد سلیمان قرار گرفته است. طول تقریبی این گسل ۴۵ کیلومتر است که باعث رانده شدن سازند گچساران بر روی سازند بختیاری و نهشته‌های کوآترنری شده است [۲].

۸.۵ شرایط خاک منطقه از لحاظ تولید خوردگی

خاک به‌عنوان یک محیط خورنده از پیچیدگی زیادی نسبت به سایر محیط‌ها برخوردار است. میزان خوردگی در خاک محدوده بسیار وسیعی دارد و از خوردگی بسیار سریع تا خوردگی قابل اغماض را شامل می‌شود. عمده‌ترین انواع خوردگی که در لوله‌های زیر خاک بوجود می‌آید عبارتند از: خوردگی حفره‌ای بدلیل حضور یون کلرید و سولفات، خوردگی گالوانیکی در اثر غیر یکنواختی خاک، خوردگی تحت تنش و خوردگی بیولوژیکی. بدلیل محدوده بسیار وسیع خوردگی لوله‌ای مدفون شده در خاک، متغیرهای بسیار زیادی در بررسی میزان خوردگی خاک تاثیر گذارند و بدلیل غیر یکنواختی ترکیب خاک ارائه یک مدل برای تعیین میزان خوردگی خاک غیرممکن است. یکی از پارامترهای مهم در خوردگی خاک، مقاومت الکتریکی آن می‌باشد. با توجه به تغییر جنس مواد تشکیل دهنده لایه‌های خاک، مقاومت ویژه الکتریکی این لایه‌ها نیز تغییر می‌یابد [۱۵]. علاوه بر این، پارامترهای دیگر، از قبیل درجه تراکم، خلل و فرج موجود در خاک، وضع قرار گرفتن خلل و فرج، حجم خلل و فرج و میزان آب موجود در خلل و فرج، در مقاومت مخصوص الکتریکی خاک تاثیر گذار است. لایه‌های خاک با مقاومت الکتریکی متفاوت باعث می‌شوند که لوله فلزی قرار گرفته شده در خاک دچار خوردگی گالوانیکی شود. بخشی از لوله که در خاک با مقاومت الکتریکی بالا قرار دارد به عنوان کاتد و بخشی از لوله که در خاک با مقاومت الکتریکی پایین قرار دارد به عنوان آند عمل کرده و خورده می‌شود. بنابراین به منظور تعیین نرخ خوردگی لوله‌ها در زیر خاک تعیین مقاومت الکتریکی خاک از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در جدول ۵-۲ تاثیر مقاومت مخصوص خاک بر میزان خوردگی ارائه شده است.

منظور از مقاومت الکتریکی خاک مقاومت یک متر مکعب از زمین به ابعاد $۱ \times ۱ \times ۱$ متر است که بین دو الکترود صفحه‌ای سنجیده شده است، گفته می‌شود. البته این مقاومت به نوع مواد تشکیل دهنده زمین هم بستگی دارد. مقاومت خاک معمولی بین ۵ اهم- متر تا ۵۰۰۰ اهم-متر است و بستگی به جنس ترکیبات خاک و رطوبت و درجه حرارت دارد.

جدول ۲-۵: تاثیر مقاومت مخصوص خاک بر میزان خوردگی [۱۵].

میزان خوردگی	مقاومت مخصوص الکتریکی ($\Omega.m$)
بسیار شدید	۰-۵
شدید	۵-۱۰
متوسط	۱۰-۲۰
ملايم	۲۰-۱۰۰
ناچيز	بالتر از ۱۰۰

۹.۵ عوامل موثر بر مقاومت الکتریکی خاک

مقاومت الکتریکی خاک به عوامل مختلفی که در ذیل اشاره شده وابسته می‌باشد.

۱. رطوبت خاک

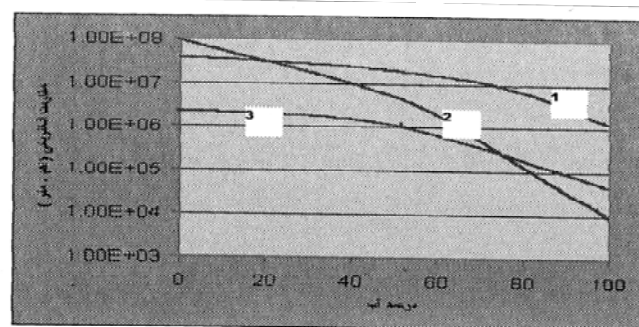
۲. غلظت یونها

۳. دما

از اینرو برای تعیین مقاومت خاک می‌بایست مقادیر هر یک از عوامل فوق در خاک تعیین گردد.

۱.۹.۵ تغییرات مقاومت الکتریکی نسبت به میزان آب (درصد رطوبت) و تخلخل

فاکتور میزان آب نقش اساسی در تغییرات مقاومت الکتریکی خاک دارد، شکل ۴-۵ نتایج کارهای تجربی بر روی چند نمونه سنگی آورده شده‌است. تخلخل این نمونه‌ها از ۰/۷ تا ۴ درصد و درصد آب منافذ از ۰ تا ۱۰۰ درصد می‌باشد.



شکل ۴-۵: وابستگی مقاومت الکتریکی مواد نسبت به میزان آب [۱۵].

۱- پریدوتیت با تخلخل ۱/۴٪ - ۲- گرانیت با تخلخل ۲/۸٪ - ۳- گابرو با تخلخل ۲/۸٪

رابطه ی بین درصد رطوبت و مقاومت الکتریکی خاک در جدول ۳-۵ ارائه شده است.

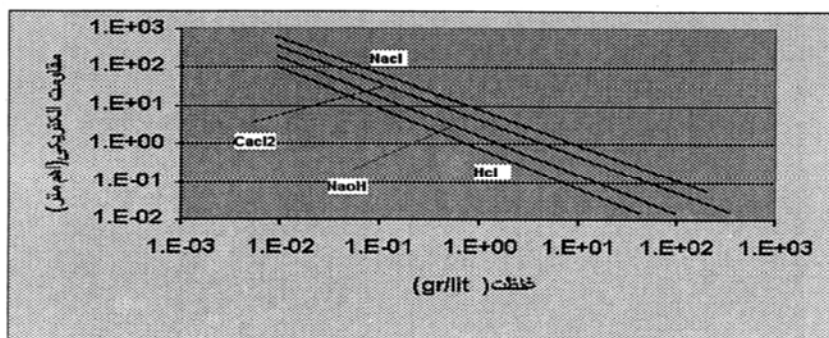
جدول ۳-۵: رابطه ی بین درصد رطوبت و مقاومت الکتریکی خاک [۱۵].

مقاومت الکتریکی خاک (اهم/متر)	درصد رطوبت بر حسب وزن
۱۰۰۰۰۰۰	۰
۱۵۰۰۰۰	۲.۵
۴۳۰۰۰	۵
۱۸۱۵۰	۱۰
۱۰۵۰۰	۱۵
۶۳۰۰	۲۰
۴۲۰۰	۳۰

۲.۹.۵ تغییرات مقاومت الکتریکی نسبت به غلظت یونها

هدایت الکتریکی رابطه مستقیم با غلظت یونها و نمک‌های محلول دارد. تاثیر درصد نمک بر روی مقاومت الکتریکی خاک در جدول ۴-۵ و شکل ۵-۵ ارائه شده است بین مقاومت الکتریکی خاک و مقدار کانی‌های رسا در آب یک رابطه معکوس وجود دارد، ولی این رابطه خیلی ناپایدار است، این امر بدان دلیل است که شرایط ساخت و بافت خاک نقش بسزایی در این رابطه دارد، اگر بین مواد

رسانا تماسی برقرار نباشد یعنی آنها در خاک بصورت ذرات منفک و ایزوله وجود داشته باشند، در این حالت تاثیرشان، حتی در صورت وجود تراکم زیاد آنها، بسیار زیاد خواهد بود.



شکل ۵-۵: وابستگی مقاومت الکتریکی محلولها نسبت به غلظت نمک‌ها [۱۵].

جدول ۴-۵: تاثیر درصد نمک بر روی مقاومت الکتریکی خاک [۱۵].

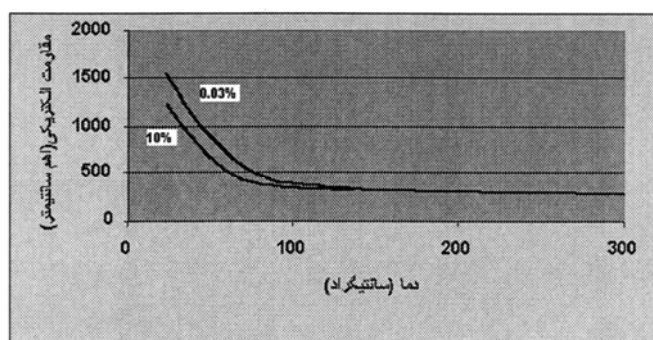
مقاومت بر حسب اهم / متر	درصد وزن نمک به خاک
۱۰۷۰۰	%۰
۱۸۰۰	%۱
۴۶۰	%۵
۱۳۰	%۱۰
۱۰۰	%۲۰

۳.۹.۵ تغییرات مقاومت الکتریکی نسبت به دما

اندازه مقاومت الکتریکی خاک همچنین بستگی به دمای آن دارد. این وابستگی در دید اول ساده است. افزایش حرارت مواد باعث کاهش مقاومت الکتریکی آنها می‌گردد. مطالعه دقیق این پروسه و تغییرات شدید مقاومت الکتریکی خاک هنگام دورشدن از دمای صفر در جهت مثبت و منفی بطور واضح از هم متمایز است.

جریان الکتریکی در خاک یخ زده تحت عمل یونهای متحرک لایه‌های یخ نزده بین بلورهای یخ برقرار می‌شود، غلظت این لایه‌ها تاثیر اساسی بر مقاومت الکتریکی خاک منجمد دارد. یخ چند بلوری تمیز، عایق جریان الکتریکی است. مقاومت الکتریکی یخ طبیعی حدود ۱۰۷-۱۰۵ اهم متر می‌باشد، در صورتیکه یخ دریایی با نمک زیاد دارای مقاومت الکتریکی بین ۳۰-۳۰۰ اهم متر می‌باشد. آهنگ تغییرات مقاومت الکتریکی یخ نسبت به دما در غلظتهای مختلف از نمک موجود در آن در شکل ۵-۶ نشان داده شده‌است. مواد یخ زده بطور اساسی ساخت و بافت خاک را بدلیل وجود یخ تحت تاثیر قرار می‌دهند. در این مواد و همچنین در کاپیلارهای اتصال دهنده بین آنها، در دماهای مختلف، محلول یخ نزده با غلظتهای متفاوت یافت می‌شود که اساساً یک توده پیچیده‌ای را از نقطه نظر هدایت الکتریکی تشکیل می‌دهند.

در مواد با تخلخل کم، مقاومت الکتریکی در هنگام یخبندان تا چند ده مرتبه افزایش می‌یابد. در گراول و ماسه‌های دانه‌درشت این افزایش تا چندصد مرتبه و گاهی تا چند هزار مرتبه می‌باشد. بدین ترتیب مقدار مقاومت الکتریکی یک کمپلکس خاکی با کاهش دما و در حدود یخ زدگی افزایش می‌یابد و مقدار این افزایش در صورتیکه درصد رطوبت آن بیشتر و دما و غلظت نمک آن کم باشد، بیشتر می‌شود. در صورت افزایش دما بالاتر از صفر درجه وقتی که محلول‌های یخ زده به فاز تبدیل می‌شوند، هدایت الکتریکی اغلب بطور چشمگیری افزایش پیدا می‌کند و سپس نسبت به گرادیان افزایش آن تا حدود ۲۰۰-۱۵۰ درجه بطور آهسته‌ای رشد می‌کند، این بدان دلیل است که افزایش دما باعث تحرک بیشتر یونها شده و لذا کاهش محسوس در مقدار مقاومت الکتریکی در دمای بالاتر از صفر درجه اتفاق می‌افتد و اساساً در بازه ۶۰-۱۰ درجه تقریباً از همان قوانین مایعات مذکور تبعیت می‌کند. تغییرات مقاومت الکتریکی مواد با تخلخل کم با افزایش حرارت خیلی به کندی اتفاق می‌افتد و اساساً در دمای بالاتر از ۲۰۰ درجه ثابت می‌ماند [۱۵].



شکل ۵-۶: وابستگی مقاومت الکتریکی محلول NaCl با غلظتهای متفاوت نسبت به دما [۱۵].

با توجه به عوامل موثر بر روی مقاومت الکتریکی خاک که در بالا ذکر گردید برای سنگ‌ها و خاک‌ها با جنس‌های مختلف مقدار مقاومت الکتریکی در جدول ذیل ارائه شده‌است.

جدول ۵-۵: مقاومت الکتریکی خاک‌ها و سنگ‌ها بر حسب اهم / متر [۱۵].

مقاومت بر حسب اهم	نوع سنگ یا خاک
۳۰	زمین‌های باتلاقی
۲۰ - ۱۰۰	زمین‌های گل‌لابی
۱۰ - ۱۵۰	خاک‌های نباتی و گیاه‌دار
۵ - ۱۰۰	خاک‌های نم‌دار ذغال‌سنگی
۵۰	خاک‌های نرم رسی
۱۰۰ - ۲۰۰	مارل یا رس فشرده
۳۰ - ۴۰	مارل دوره ژوراسیک
۵۰ - ۵۰۰	خاک‌های متشکل از رس و ماسه
۲۰۰ - ۳۰۰۰	ماسه سنگ سیلیسی
۱۵۰۰ - ۳۰۰۰	خاک‌های سنگی بدون پوشش گیاهی
۳۰۰ - ۵۰۰	خاک‌های سنگی با پوشش گیاهی
۱۰۰ - ۳۰۰	سنگ‌های آهکی نرم (متخلخل)
۱۰۰۰ - ۵۰۰۰	سنگ‌های آهکی فشرده
۵۰۰ - ۱۰۰۰	سنگ‌های آهکی شکاف‌دار و دارای ترک
۵۰ - ۳۰۰	شیست
۸۰۰	میکا شیست
۱۵۰۰ - ۱۰۰۰۰	گرانیت یا ماسه‌سنگ آتزه شده
۱۰۰ - ۶۰۰	گرانیت یا ماسه‌سنگ کم‌آتزه شده

۱۰.۵ بحث و بررسی

در اینجا با توجه به مشخصات زمین‌شناسی منطقه و عوامل موثر بر مقاومت الکتریکی خاک، هر کدام از سازندهای مذکور از نظر میزان مقاومت و بر اساس مشخصات آن به تفصیل بررسی می‌شود. از آنجا که هر سازند از چندین لیتولوژی مختلف تشکیل شده که هر کدام دارای مقاومت متفاوتی می‌باشند و با توجه به اینکه آزمایشی به طور مستقیم بر روی آنها انجام نشده‌است، مقدار مقاومت برای هر سازند به صورت کیفی بیان می‌شود.

۱.۱۰.۵ سازند گچساران

این سازند بخش وسیعی از بستر شهری را در جنوب شرق (منطقه بی بیان) شامل می‌شود و غالب تاسیسات بر روی آن قرار دارند. این سازند دارای تنوع لیتولوژیکی می‌باشد که شامل نمک، مارن، ژپس، انیدریت و آهک می‌باشد. مقاومت الکتریکی این سازند با توجه به لیتولوژی‌های آن در محدوده ۵۰۰ - ۱۰۰ اهم بر متر می‌باشد. وجود نمک و ژپس و کانی‌های رسی باعث کاهش مقاومت در این سازند می‌شود. این سازند در بعضی از نقاط دارای ترکیب سیلویت (کلرو پتاسیم) است که این ترکیب بدلیل وجود کلر دارای قدرت خوردندگی بالایی است. در این سازند با افزایش عمق بدلیل افزایش درجه شوری ژپس آب از دست داده و به انیدریت تبدیل می‌شود که این فرایند باعث افزایش رطوبت خاک و کاهش مقاومت الکتریکی نیز می‌شود.

سازند گچساران بدلیل لیتولوژی خاص خود در اثر نفوذ آب‌های سطحی یا زیرزمینی به درون لایه‌ها و حل کردن آن‌ها، آب خوان‌های کارستی گچی ایجاد کرده که باعث سولفات‌شدن آب می‌شود و درصد و غلظت کلراید، کلسیم و سدیم و سولفات بالا رفته که باعث افزایش خوردگی می‌گردد. به طور کلی و با توجه به توضیحات بالا سازند گچساران دارای مقاومت الکتریکی پایین و میزان خوردگی بالا می‌باشد.

۲.۱۰.۵ سازند میشان

این سازند بخش کمی از محدوده شهری (محلات نفتک و هشت بنگله) را شامل می‌شود که بدلیل لیتولوژی مارنی و آهکی دارای میزان فرسایش پذیری کمتری نسبت به سازندهای مجاور بوده و مناطق تقریباً بلند را شامل می‌شود. پس با توجه به لیتولوژی آهکی رسی و مارنی دارای مقاومت الکتریکی ۳۰۰ - ۱۰۰ اهم بر متر می‌باشد. میزان نفوذپذیری این سازند پایین می‌باشد. مارن‌های این سازند دارای کانی‌های قابل انحلال گچ، نمک و انیدریت می‌باشد که بدلیل شوری و وجود سدیم دارای خاصیت خوردندگی بالایی هستند.

۳.۱۰.۵ سازند آجاجری

این سازند بعد از سازند گچساران بیشترین گسترش را در محدوده شهری داشته و بخش‌های شمالی و شمال غربی را شامل می‌شود. بدلیل وجود لیتولوژی ماسه سنگی دارای مقاومت الکتریکی در محدوده ۲۰۰-۳۰۰۰ اهم بر متر می‌باشد. فرسایش پذیری این سازند باعث شده که بخش‌های کم ارتفاع و پست منطقه را شامل شود و دارای سیمای تپه ماهوری باشد. میزان نفوذپذیری در این سازند از دو سازند گچساران و میشان بیشتر بوده و دارای وضعیت آب زیرزمینی بهتری می‌باشد. به طور کلی در این سازند بدلیل مقاومت الکتریکی بالا میزان خوردگی پایین می‌باشد.

۴.۱۰.۵ سازند بختیاری

این سازند تنها در بخش‌هایی از شمال غرب شهر (حوالی روستای بتوند) رخنمون دارد و دارای لیتولوژی کنگلومرایبی و ماسه سنگی آهکی می‌باشد. مقاومت الکتریکی در این سازند در محدوده ۱۵۰۰-۳۰۰۰ می‌باشد که دارای بیشترین میزان در بین سازندهای رخنمون یافته می‌باشد لذا کمترین میزان خوردگی را دارد. این سازند بدلیل نفوذپذیری بالا دارای دارای میزان آب زیرزمینی بالایی است به طوری که چندین چشمه در این سازند وجود دارد.

به توجه به توضیحات بالا برای هر کدام از سازندها بر اساس اطلاعات موجود می‌توان گفت که به ترتیب سازندهای بختیاری، آجاجری، گچساران و میشان دارای بالاترین مقاومت الکتریکی هستند که در این بین سازند گچساران بدلایلی که ذکر گردید (وجود نمک، رطوبت و آب‌های سولفاته) دارای بیشترین میزان خوردگی می‌باشد. در نتیجه سازندهای بختیاری و آجاجری دارای پتانسیل مناسبی جهت جلوگیری و کاهش میزان خوردگی می‌باشند.

فعالیت‌های تکتونیکی و گسله بودن منطقه که باعث جابه جایی در لایه‌ها شده و همچنین فرسایش پذیری سازندهای گچساران و آجاجری باعث تشکیل یک لایه نفوذناپذیر (مارنی-رسی) در عمق حدوداً ۴ تا ۵ متری شده که این لایه بعنوان یه سفره معلق در منطقه عمل می‌کند.

۱۱.۵ نتیجه گیری

با توجه به موارد ذکر شده در این فصل، مشاهده می‌گردد که اطلاعات کاملی از وضعیت جنس خاک منطقه‌ی مسجد سلیمان در محدوده‌ی شبکه‌گذاری شبکه‌گاز و همچنین اطلاعات مربوط به رطوبت خاک این محدوده یافت نشده‌است. اطلاعاتی که در مورد جنس لایه‌های خاک و همچنین شرایط آب‌های زیرزمینی به آنها اشاره شده‌است، اطلاعات کلی در مورد منطقه مسجد سلیمان می‌باشد و

بنابراین برای تعیین دقیق جنس خاک و رطوبت آن در نقاط مختلفی که شبکه‌ی گازرسانی تحت تاثیر آنها قرار می‌گیرد، نیاز به آزمایشات و داده‌برداری‌های جداگانه‌ای خواهد داشت.

۱۲.۵ منابع

- [۱]. ماهوری، س. ۱۳۸۶. بررسی ژئوشیمیایی پوش‌سنگ و سنگ‌های منشاء احتمالی افق‌های مختلف میدان نفتی مسجدسلیمان و تأثیر آنها بر تولید گاز H_2S
- [۲]. خدردی غریبوند، ل. (۱۳۸۶). پهنه‌بندی خطر نشت گاز در منطقه مسجدسلیمان با استفاده از تکنیک‌های سنجش از راه دور و GIS. رساله کارشناسی ارشد زمین‌شناسی، دانشگاه شهید چمران اهواز.
- [۳]. Alavi, M. (2004). Regional stratigraphy of the Zagros Fold-Thrust belt of Iran and its proforeland evolution. *American Journal of Science*, Vol. 304, P. 1–20.
- [۴]. Alavi, M., 1994, Tectonic of zagros orogenic belt of Iran, new data and interpretations, *Tectonophysics*, v.229, p. 211-238
- [۵]. آقاناتی، ع.، ۱۳۸۵، زمین‌شناسی ایران، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، چاپ دوم، ۶۰۳ صفحه.
- [۶]-Sepehr, M and Cosgrove, J.W., 2004, Structural framework of Zagros fold-thrust belt of Iran, *Marine and Petroleum Geology*, v.21, p.829-843
- [۷]. مطیعی، ه. (۱۳۷۴). زمین‌شناسی نفت زاگرس. انتشارات سازمان زمین‌شناسی کشور، ۵۸۹ ص.
- [۸]. معزز لسکو، ض.، ۱۳۸۱، کانی‌شناسی غیر سیلیکات‌ها، انتشارات واژگان خرد، چاپ اول، ۲۷۲ صفحه.
- [۹] -Schreiber, B. C., and El Tabakh, M., 2000, Depositional and early alteration of evaporate, *Sedimentology*, v. 47, p. 215-238
- [۱۰]. پروین، ح.، ۱۳۷۶، سنگ‌شناسی رسوبی، انتشارات دانشگاه پیام نور، چاپ دوم، ۳۰۲ صفحه.

- [۱۱]. Kubica, 1992, Lithofacial development of the Badenian chemical sediments in the northern part of the Carpathian Foredeep (in Polish with Englishs ummary), Pr.Panstw.Inst.Geol., 133p.
- [۱۲]-Tuker, M.E., 2001, Sedimentary Petrology (an introduction to the origin of sedimentary rocks): Third edition, Blackwell, Oxford, 260 p.
- [۱۳]. حسینی، ا.، ۱۳۸۴، بلورها و کانی‌ها، نشر رویکرد نوین، چاپ اول، ۲۰۲ صفحه.
- [۱۴]. طرح جامع شهرستان مسجد سلیمان، سازمان مسکن و شهر سازی استان خوزستان، ۱۳۸۶
- [۱۵]. علیرضا عراقی ۱۳۸۶ بررسی تاثیر مقاومت الکتریکی و ترکیب خاک بر خوردگی لوله های

فولادی

۶ مطالعه و بررسی آبگرم کن‌های خورشیدی

پیرو درخواست مسئولین محترم بخش پژوهش شرکت گاز استان خوزستان در رابطه با مطالعه و بررسی آبگرم‌کن‌های خورشیدی و امکان‌سنجی استفاده از آنها برای شرایط بومی، مطالعات اولیه‌ای در این راستا انجام گرفت که نتایج آن در این فصل منعکس شده‌است. در بخش اول این فصل مقدمه‌ای بر گرمایش خورشیدی ارائه شده‌است. پس از آن تقسیم‌بندی کلی آبگرم‌کن‌های خورشیدی با ذکر مزایا و معایب هر کدام ارائه شده و سپس اجزاء سیستم آبگرم‌کن خورشیدی معرفی شده‌است. در بخش دوم این فصل که مربوط به معرفی نرم افزارهای شبیه‌ساز خورشیدی می‌باشد، با توجه به تنوع در نرم افزارهای خورشیدی و کاربردهای آنها و تحقیقات بسیار، از میان نرم افزارهای موجود نرم افزار پلی‌سان^{۴۸} به همراه تیسئل^{۴۹} بیشتر از سایر نرم افزارها نیازهای کاربران را در زمینه طراحی و بهینه‌سازی سیستم مورد نظر ارضا می‌کنند که از این میان نرم افزار پلی‌سان به علت قابلیت‌های بیشتر از جمله توانایی اصلاح و تغییر سیستم مورد نظر و همچنین دقت بیشتر محاسبات نسبت به نرم افزار تیسئل دارای کاربرد بیشتری می‌باشد، لذا در این فصل به طور مفصل نرم افزار پلی‌سان معرفی می‌شود و مراحل طراحی به کمک آن تک تک بررسی می‌شود. البته بایستی ذکر شود با توجه به اینکه تحقیق در رابطه با سیستم‌های خورشیدی در اسفندماه آغاز شد موفق به تهیه نسخه اصلی و کرک شده نرم افزار پلی‌سان نشده لذا فعالیت‌هایی که در جهت یادگیری نرم افزار و تحقیقات مربوطه صورت گرفت بر روی نسخه دموی این نرم افزار بوده است که در قالب یک لوح فشرده به این گزارش پیوست شده‌است.

۱.۶ مقدمه‌ای بر گرمایش خورشیدی

با توجه به محدودیت منابع سوخت فسیلی و زیان‌بار بودن استفاده غیراصولی این‌گونه سوخت‌ها برای سلامت محیط زیست، تحقیقات و کاربردهای انرژی‌های تجدیدپذیر در مجامع صنعتی و علمی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار گشته‌است.

⁴⁸ Polysun

⁴⁹ T*sol

در این میان انرژی خورشیدی، با توجه به اینکه انرژی کاملاً پاک و عاری از هرگونه آلودگی بوده و بعنوان منبع انرژی کاملاً ارزان شناخته شده است، اهمیت بیشتری پیدا می‌کند. در کشورهای نظیر کشور ما که میزان تابش خورشیدی در آن به ۲۰۰۰ kwh در سال می‌رسد و در بسیاری از نقاط آن تعداد ساعات آفتابی از ۲۸۰۰ ساعت در سال تجاوز می‌کند، استفاده از انرژی خورشیدی، نه تنها ضروری بلکه اجتناب‌ناپذیر است. وسعت و شرایط جغرافیایی کشور، بافت اجتماعی، فراوانی و گستردگی روستاها که اغلب به صورت یک نقطه در دل کوه‌ها و پهنا دشت‌ها قرار دارند و همچنین عدم برخورداری از تکنولوژی پیشرفته و مستقل برای تولید و توزیع انرژی به روش‌های متداول امروزی و بسیاری دلایل دیگر نشان می‌دهند که اگر انرژی خورشیدی بر پایه و اساس علمی و فنی مورد استفاده قرار گیرد، منبع مطمئن و مداومی برای تامین انرژی کشور خواهد بود.

روش‌های گوناگونی برای استفاده از این انرژی پاک و لایزال الهی وجود دارد، اما گرم کردن آب با استفاده از آبگرم‌کن‌های خورشیدی، شاید بعنوان آسانترین و اقتصادی‌ترین روش باشد. زیرا با داشتن دانش کافی در باره تابش خورشید، به راحتی و بصورت بسیار موثرتر می‌توان انرژی خورشید را برای گرم کردن آب مصرفی منازل و حتی کاربرهای صنعتی به کار برد.

پیشرفت‌های علمی روی آبگرم‌کن‌های خورشیدی در دهه‌های اخیر رشد چشمگیری داشته است. این نوع آبگرم‌کن‌ها نه تنها برای کاربردهای خانگی بلکه برای هتل‌ها، بیمارستان‌ها، ساختمان‌های اداری، صنایعی مانند نساجی، کاغذ سازی، صنایع غذایی و حتی گرم کردن آب استخرهای شنا در زمستان کاربرد فراوانی پیدا کرده‌اند.

در ادامه ابتدا تقسیم بندی کلی آبگرم‌کن‌های خورشیدی که شامل دو گروه عمده جابجایی طبیعی (ترموسیفون) و جابجایی اجباری می‌باشند، با ذکر مزایا و معایب هر کدام معرفی شده است. سپس به معرفی اجزاء سیستم آبگرم‌کن خورشیدی ترموسیفون پرداخته شده است. اجزاء این نوع آبگرم‌کن‌ها را گردآورنده، مخزن ذخیره، مبدل گرمایی، کنترل کننده‌ها و شیرآلات تشکیل می‌دهند، که هر یک از اجزاء بطور مفصل تشریح شده‌اند [۱]. مهمترین بخش یک آبگرم‌کن خورشیدی، گردآورنده آن بوده و کار اصلی آن جذب تابش خورشید و تبدیل آن به گرما و انتقال آن به سیال عامل جاری داخل لوله‌ها می‌باشد. این بخش همراه اجزاء آن بطور مفصل تری بررسی شده است.

۲.۶ سیستم‌های چرخش طبیعی (ترموسیفون)^{۵۰}

با آنکه چندین دهه از ساخت نخستین آبگرم‌کن خورشیدی ترموسیفون می‌گذرد، اما با این حال یکی از تکنولوژی‌های برتر برای بکارگیری انرژی خورشیدی استفاده از این نوع آبگرم‌کن‌ها می‌باشد. کارایی بالا، سهولت ساخت، عدم حضور قطعات متحرک و عدم نیاز به نگهداری باعث برتری

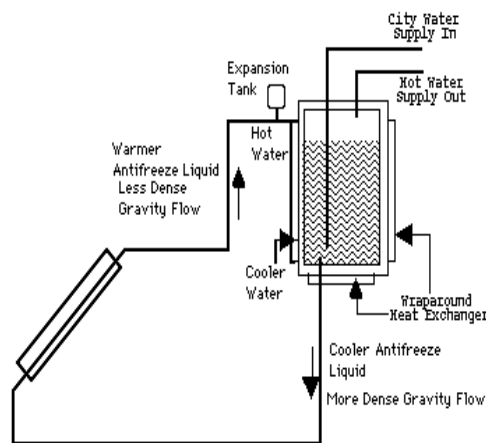
⁵⁰ Natural circulation water heater (thermosyphon)

آبگرمکن‌های ترموسیفون نسبت به نوع دیگر، یعنی آبگرمکن‌های جابجایی اجباری شده‌است. در آبگرمکن‌های خورشیدی چرخش طبیعی، مخزن ذخیره در ارتفاع مشخصی (۳۰ تا ۶۰ سانتیمتر) نسبت به بالاترین قسمت گردآورنده قرار داده می‌شود تا از چرخش معکوس سیال در ساعاتی که تابش خورشید وجود ندارد، جلوگیری شود.

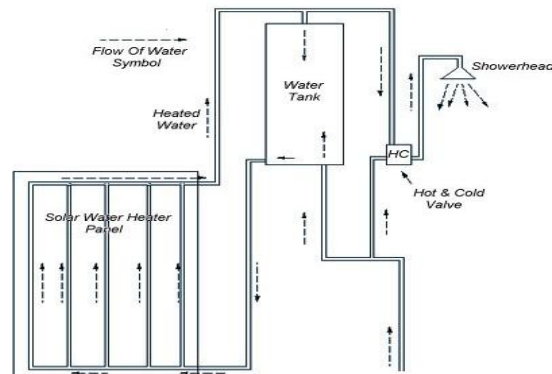
در اوایل صبح، تابش خورشید باعث گرم شدن گردآورنده می‌شود. سیال گرم داخل آن با جابجایی طبیعی بالا رفته، به مخزن ذخیره می‌رسد و آب سرد مخزن از پایین آن به داخل گردآورنده جاری می‌گردد. به این ترتیب چرخش طبیعی در جایی که تابش خورشید به اندازه کافی باشد، به خودی خود برقرار می‌شود و در صورت نبودن تابش کافی خورشید، بعلاوه اینکه نیروی شناوری رو به بالا نمی‌تواند بر افت‌های اصطکاکی سیال داخل لوله غلبه کند، چرخش سیال متوقف می‌گردد.

این سیستم‌ها به دو دسته مدار باز و بسته تقسیم می‌شوند. در سیستم مدار باز (سیستم مستقیم) آب به صورت مستقیم در میان گردآورنده جاری می‌باشد. این سیستم بسیار ساده، کارا و قابل اطمینان بوده ولی در شرایط آب و هوایی سرد و دماهای زیر صفر درجه کارایی خوبی ندارد، و یخ زدن آب داخل لوله‌ها ممکن است منجر به پارگی آن‌ها شود. در سیستم‌های مدار بسته (غیر مستقیم) معمولا سیالی غیر از آب که نقطه انجماد پایین تری دارد بکار گرفته می‌شود. این سیستم‌ها دو چرخه جداگانه دارند که از طریق یک مبدل گرمایی به یکدیگر متصل شده‌اند، و این مبدل، گرما را از سیال داخل گردآورنده به آب مصرفی منزل منتقل می‌کند.

در شکل ۱-۶ و شکل ۲-۶ هر دو سیستم نشان داده شده‌اند:



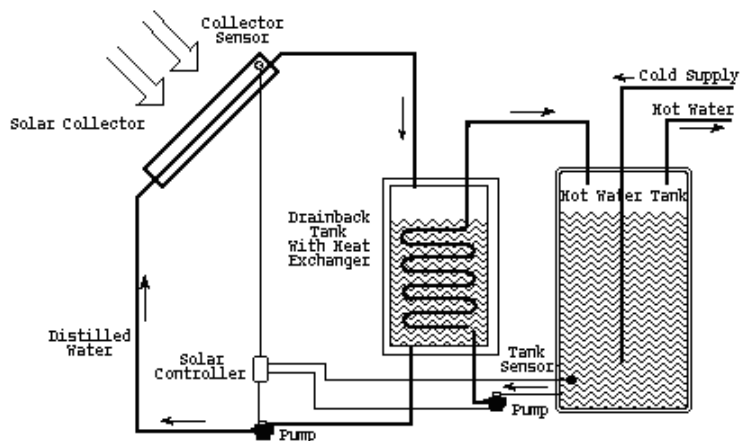
شکل ۱-۶: سیستم آبگرمکن خورشیدی ترموسیفون مدار بسته



شکل ۲-۶: سیستم آبگرمکن خورشیدی ترموسیفون مدار باز

۳.۶ آبگرمکن‌های جابجایی اجباری

تفاوت اصلی این نوع سیستم با آبگرمکن ترموسیفون در اینست که سیال عامل داخل گردآورنده در این حالت توسط پمپ به گردش درمی‌آید. مزیت اصلی این سیستم اینست که می‌توان مخزن ذخیره آنرا در موقعیت دلخواه و مناسب مثلاً در فضای زیرشیروانی، داخل حمام و یا در اطراف سقف قرار داد. این نوع سیستم‌ها نیز به دو دسته مدار باز و بسته تقسیم می‌شوند. یک نمونه از این آبگرمکن در شکل ۳-۶ آورده شده است.



شکل ۳-۶: آبگرمکن خورشیدی با سیستم جابجایی اجباری

۴.۶ اجزاء آبگرمکن خورشیدی

یک آبگرمکن خورشیدی از اجزاء زیر تشکیل شده است:

۱. گردآورنده

۲. مخزن ذخیره

۳. مبدل گرمایی

۴. کنترل‌کننده‌های اتوماتیک

۵. پمپ، لوله‌ها شیرآلات و اتصالات

که هر کدام از این اجزا در ادامه به طور مفصل توضیح داده می‌شوند.

۱.۴.۶ گردآورنده‌ها

مهمترین بخش هر آبگرم‌کن، گردآورنده است که کار اصلی آن جذب تابش خورشیدی و تبدیل آن به گرما و انتقال آن به سیال عامل جاری داخل لوله‌ها یا کانال‌ها می‌باشد. گردآورنده‌ها را بطور کلی می‌توان به سه گروه عمده تقسیم بندی نمود:

۱. گردآورنده‌های تخت^{۵۱}،

۲. گردآورنده‌های لوله‌ای خلا^{۵۲}

۳. گردآورنده‌های سهموی^{۵۳}

در این قسمت ابتدا به طور مختصری به معرفی گردآورنده‌های لوله‌ای خلا و سهموی پرداخته می‌شود و در ادامه به طور کامل گردآورنده‌های تخت معرفی می‌شوند.

گردآورنده‌های لوله‌ای خلا

این گردآورنده‌ها از تعدادی لوله دو جداره شفاف موازی تشکیل شده‌است که در داخل آن یک تیوب با پوششی از ماده جاذب قرار دارد هوا از فضای بین دو جداره خارج گردیده و خلا ایجاد شده از اتلاف حرارت جلوگیری می‌کند. مزیت این نوع گردآورنده توانایی در ایجاد دمای بالاتر می‌باشد.

گردآورنده‌های سهموی

این گردآورنده‌ها سطح آینه‌ای داشته و برای تجمع انرژی خورشیدی بر روی تیوب جاذب که شامل سیال انتقال حرارت است، به کار می‌رود.

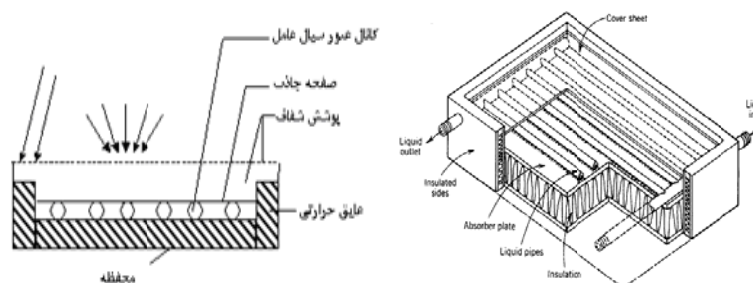
⁵¹ Flat-plate collectors

⁵² Evacuated-tube collectors

⁵³ Concentrating collectors

گردآورنده صفحه تخت

در سیستم‌های آبگرم‌کن خورشیدی معمولاً از گردآورنده‌های صفحه تخت استفاده می‌شود که در شکل ۴-۶ نشان داده شده است. این نوع گردآورنده ساده‌ترین و متداولترین وسیله برای تبدیل انرژی تابشی خورشید به گرمای مفید است. یک گردآورنده خورشیدی را می‌توان به عنوان یک نمونه ویژه از مبدل گرمایی در نظر گرفت. البته گردآورنده‌های خورشیدی در مقایسه با سیستم‌های مبدل گرمایی دارای تفاوت‌هایی می‌باشد. در مبدل‌های گرمایی، گرما معمولاً از طریق جابجایی یا هدایت به سیال دیگر منتقل می‌شود و انتقال گرما از طریق تابش در آن‌ها بسیار ناچیز است درحالی‌که در یک گردآورنده خورشیدی، انتقال حرارت از طریق تابش نقش اساسی دارد. میزان تابش انرژی خورشیدی بدون متمرکز کردن آن در بهترین شرایط عملی حدود 1100 w/m^2 است، و با شرایط جوی تغییر می‌کند. با طراحی صحیح گردآورنده‌های تخت معمولی می‌توان دمای سیال خروجی از آن‌ها را بنا بر نیاز به حدود 100 درجه سانتیگراد بالاتر از دمای محیط رساند. متداولترین کاربرد گردآورنده‌های تخت عبارتست از گرم کردن آب مصرفی و فضای منازل، استفاده از آن‌ها در تهویه مطبوع و بالاخره تهیه آب گرم یا هوای مورد نیاز در فرآیندهای صنعتی. گردآورنده‌های تخت را معمولاً به طور ثابت نصب می‌کنند و به همین دلیل مشکلات مربوط به سیستم‌های دنبال‌کننده خورشید که در گردآورنده‌های متمرکز کننده بکار می‌روند، ندارند.



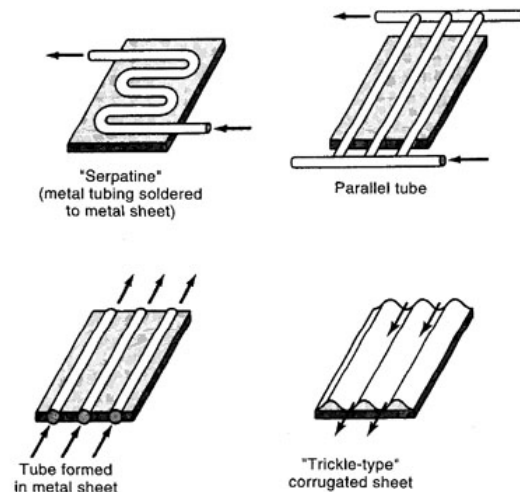
شکل ۴-۶: گردآورنده صفحه تخت

اجزاء گردآورنده صفحه تخت

گردآورنده صفحه تخت خود از اجزایی تشکیل شده‌اند که عبارتند از صفحه جاذب، سیال انتقال دهنده گرما (سیال عامل)، صفحات پوششی و قاب گردآورنده که هر کدام از این اجزا به طور مفصل در ادامه توضیح داده شده است.

صفحه جاذب

صفحه جاذب اصلی ترین جزء گردآورنده می‌باشد، زیرا عمل جذب تابش خورشیدی و انتقال گرما به سیال عامل توسط این قسمت انجام می‌گیرد. انواع مختلفی از صفحات جاذب برای گرمایش سیال عامل وجود دارند که در شکل ۵-۶ تعدادی از آنها نشان داده شده‌اند.



شکل ۵-۶: انواع صفحات جاذب بکار رفته در آبگرم‌کن‌های خورشیدی

صفحه جاذب باید دارای خواص انتقال حرارت خوب، ضریب هدایت حرارتی و ضریب جذب بالا و ضریب صدور پایین بوده و در دماهای بالا پایدار باشد. همچنین در مقابل خوردگی داخلی و خارجی نیز باید مقاوم باشد. خوردگی خارجی در نتیجه رطوبت موجود در محفظه گردآورنده بوجود می‌آید که این رطوبت از نشتی‌های اطراف محفظه، داخل شدن آب باران یا در نتیجه قطرات چگالیده شده از شیشه بوجود می‌آید. (صفحات فولادی حتی اگر روکش داشته باشند، باز هم در مقابل خوردگی خارجی حساسند). خوردگی داخلی در اثر تماس سیال عامل با لوله‌ها یا حضور مواد نامتشابه^{۵۴} در داخل لوله‌ها بوجود می‌آید.

موادی مانند مس، آلومینیوم و فولاد ضدزنگ در ساخت صفحات جاذب مورد استفاده قرار می‌گیرند. از آنجایی که این مواد به تنهایی جذب کننده‌های خیلی خوبی نیستند، با استفاده از روکش می‌توان قابلیت جذب صفحه را افزایش داد.

در میان صفحات جاذب، نوع ماریچی^{۵۵} بعلاوه ایجاد افت فشار زیاد معمولاً در سیستم‌های ترموسیفون به کار نمی‌رود، بلکه بیشتر در سیستم‌های جابجایی اجباری استفاده می‌شود. در ایران معمولاً از نوع لوله‌ای شکل^{۵۶} بعنوان صفحه جاذب استفاده می‌شود. جنس صفحه اغلب آلومینیوم بوده و برای بالا بردن ضریب جذب آن از رنگ‌های ویژه استفاده می‌شود.

⁵⁴ Dissimilar metal

⁵⁵ Serpentine

⁵⁶ Tube formed

سیال انتقال دهنده گرما (سیال عامل)^{۵۷}

سیال عامل گرما را از گردآورنده خورشیدی گرفته و آنرا بطور مستقیم یا غیر مستقیم (از طریق مبدل گرمایی) به آب گرم تبدیل می‌کند. دمای سیال عامل در نتیجه اخذ گرما به تدریج افزایش می‌یابد. اگر دبی سیال عامل داخل گردآورنده کم باشد، دمای آن در اثر گرفتن مقدار معینی گرما افزایش می‌یابد. در چنین حالتی حتی اگر گرما بطور کامل به سیال عامل منتقل شود، دمای متوسط گردآورنده افزایش خواهد یافت، در نتیجه اتلاف حرارتی به محیط افزایش یافته و کارایی گردآورنده پایین می‌آید. از طرفی اگر دبی جریان سیال عامل زیاد شود، راندمان گردآورنده افزایش می‌یابد ولی ممکن است افزایش دمای مورد نظر حاصل نشود. بنابراین باید دبی بهینه جریان انتخاب شود.

در یک سیستم مدار بسته می‌توان سیال عامل مورد نظر را انتخاب کرد. سیال مورد استفاده حتی الامکان باید دارای ویژگی‌های زیر باشد:

۱. نقطه جوش بالا و نقطه ذوب پایین
۲. ضریب هدایت حرارتی و گرمای ویژه بالا
۳. ویسکوزیته و دانسیته پایین
۴. ضریب انبساط گرمایی پایین
۵. بدون اثر خوردگی در اثر تماس با فلزاتی مانند مس، آلومینیوم و فولاد
۶. غیرسمی و بدون بو
۷. ارزان قیمت

معمولترین سیال عامل مورد استفاده آب می‌باشد. آب دارای ویژگی‌های بسیار خوبی می‌باشد، ارزان قیمت بوده، به راحتی در دسترس است، غیرسمی بوده و دارای گرمای ویژه نسبتاً زیاد می‌باشد، اما در هوای سرد یخ می‌زند، در دمای نسبتاً پایینی به جوش می‌آید و می‌تواند باعث خوردگی شود. با تخلیه نمودن سیستم در فصول سرد یا پیش‌بینی مجاری مناسب که بتواند اضافه حجم ناشی از یخ زدن را تحمل کند، می‌توان مشکل یخ زدن را برطرف نمود. بعلاوه، با استفاده از مکانیزم‌های مناسب می‌توان مساله جوش آمدن را بوسیله تحت فشار قرار دادن سیستم از بین برد.

در اغلب موارد مخلوطی از آب و گلیکول به عنوان ضد یخ مورد استفاده قرار می‌گیرد، اما متداولترین ترکیب گلیکول، اتیلن گلیکول بوده و بسیار سمی می‌باشد. پروپیلن گلیکول کمتر سمی می‌باشد. گلیکول‌ها در دوره‌های چند ساله به ویژه اگر تحت دماهای بالا مورد استفاده قرار گیرند، از نقطه نظر شیمیایی کیفیت خود را از دست می‌دهند. گلیکول در مقایسه با آب دارای گرمای ویژه

پایین‌تر و ویسکوزیته بالاتر بوده که باعث افزایش یافتن انرژی مورد نیاز برای به حرکت درآوردن آن می‌شود. سیال عامل بکار رفته در سیستم‌های تولیدی در ایران اغلب بصورت مخلوط آب و پروپیلن گلیکول می‌باشد، که معمولا ۴۰ درصد آن را پروپیلن گلیکول و ۶۰ درصد بقیه را آب تشکیل می‌دهد.

صفحات پوششی

کاهش افت گرمای جابجایی در گردآورنده‌ها بر عهده صفحه پوشش می‌باشد، که این عمل را با محدود کردن جریان هوا انجام می‌دهد. پوشش همچنین افت گرمای تابشی از صفحه جاذب را با بازتاباندن تابش گرمای صادر شده از صفحه جاذب کاهش می‌دهد. در ضمن بعنوان یک محافظ برای صفحه جاذب عمل نموده و از ورود آب باران، گرد و غبار و ... به داخل محفظه گردآورنده جلوگیری می‌کند.

یک ماده باید دارای قابلیت عبوردهی زیادی در طول موج‌های کوتاه (طول موج ناشی از تابش مرئی و مادون قرمز خورشید) باشد، تا بعنوان یک پوشش مفید واقع شود.

قاب گردآورنده

قاب گردآورنده اغلب از جنس آلومینیوم، فولاد و یا چوب ساخته می‌شود و در تعداد معدودی از گردآورنده‌ها از فایبرگلاس نیز استفاده می‌شود. اگر محفظه فلزی بکار برده شود، باید مسیرهای انتقال گرما از بخش‌های گرم گردآورنده به محفظه را سد کرد. یعنی محفظه باید نسبت به صفحه جاذب، پوشش شیشه‌ای و فضاها هوایی عایق کاری شود تا گرمای حاصله از طریق انتقال به محفظه تلف نگردد. برای انبساط و انقباض صفحه پوششی باید تدابیری اتخاذ گردد، زیرا ضریب انبساط آن با ضریب انبساط محفظه کاملا متفاوت است. برای این کار می‌توان از لایه لاستیکی U شکل که در درون یک شیار فلزی جاسازی شده است، استفاده نمود. لاستیک سیلیکون برای اینکار انتخاب مناسبی است، زیرا در مقابل تغییرات جوی مقاوم است.

۲.۴.۶ مخزن ذخیره

در بسیاری از سیستم‌های خورشیدی واحد ذخیره گرما، جهت فراهم نمودن اینرسی گرمایی یا اثر انباره‌ای بکار می‌رود. این اثر انباره‌ای گرما جهت از بین بردن نوسانات انرژی خروجی از گردآورنده که به علت نوسانات کوتاه مدت در تراز تابش خورشید و تغییرات مربوط به چرخه روز و شب ایجاد می‌گردد، مورد نیاز می‌باشد. مقدار ذخیره گرما معمولا به وسیله محدودیت‌های اقتصادی تعیین می‌شود، زیرا ذخایر بزرگ که می‌توانند خروجی نسبتا یکنواختی از سیستم ارائه دهند، عموما خیلی گران تمام می‌شوند.

مخزن ذخیره در آبگرم‌کن‌های خورشیدی باید آب داغ را در خود نگه دارد، بدون اینکه دچار خوردگی شود. همچنین باید در مقابل فشار وارده مقاومت کافی داشته باشد. جنس مخازن به کار رفته در آبگرم‌کن‌های خورشیدی معمولاً از فولاد و مس بوده و گاهی اوقات از فایبرگلاس نیز استفاده می‌شود. این مخازن توسط پشم شیشه و یا پلی اورتان به ضخامت ۱۰ الی ۲۰ سانتیمتر عایق می‌شوند. اندازه مخازن از چند صد لیتر تا چند متر مکعب متغیر است. یک حساب سرانگشتی برای تخمین ظرفیت آن اینست که به ازای هر متر مربع سطح گردآورنده، مخزنی ۷۵ تا ۱۰۰ لیتری در نظر گرفته شود.

۳.۴.۶ مبدل گرمایی

مبدل‌های گرمایی در سیستم‌های گرمایش خورشیدی مایعی برای جلوگیری از یخ زدگی و کاهش فشار بر روی مخزن ذخیره، به کار می‌روند.

از آنجائی که سیستم‌های گرمایش خورشیدی با گردآورنده‌های تخت تحت دمای پایین عمل می‌کنند، به حداقل رسانیدن افت دما در مبدل گرمایی موجود در مدار گردآورنده دارای اهمیت زیاد می‌باشد. این عمل مستلزم کاربرد مبدل گرمایی با سطح خیلی بزرگ و میزان مناسبی از جریان سیال می‌باشد.

اندازه مبدل گرمایی باید طوری انتخاب شود که ارزش تبادل گرمایی یا ضریب اثر کمتر از ۰/۷ نگردد. اندازه یک مبدل گرمایی گلیکول به آب باید طوری انتخاب شود که اختلاف دمای سیال گرم کننده در ورود و دمای سیال گرم شونده در خروج (ΔT) حدود ۳ تا ۸ $^{\circ}C$ باشد. مبدل‌هایی که این اختلاف دما در آن‌ها کمتر از ۳ $^{\circ}C$ باشد، با اینکه کارایی گردآورنده را اندکی افزایش می‌دهند، ولی هزینه آن‌ها زیاد می‌گردد. مبدل‌هایی که اختلاف دما در آن‌ها بیشتر از ۸ $^{\circ}C$ گردد، کارایی گردآورنده را به مقدار بسیار زیادی کاهش می‌دهند. در ایران نیز از مبدل گرمایی استفاده می‌شود و این مبدل‌ها عموماً بصورت مخازن دو جداره می‌باشند.

۴.۴.۶ عایق‌بندی حرارتی

گردآورنده، لوله‌های اتصال و مخزن ذخیره را برای کاهش اتلاف حرارت باید با ماده مناسبی عایق نمود. خواصی که یک عایق خوب باید داشته باشد عبارت اند از:

۱. ضریب هدایت حرارتی پایین داشته باشد.

۲. در تمام نقاطی که بکار می‌رود یکسان و یکنواخت باشد.

۳. در مقابل دماهای نزدیک به ۲۰۰ $^{\circ}C$ پایدار باشد.

۴. در مقابل خوردگی مقاومت کافی داشته باشد.

۵. دارای عمر طولانی بوده و از نظر اقتصادی مقرون به صرفه باشد.

برای عایق کاری گردآورنده حداقل ۲ اینچ عایق خوب باید در زیر و اطراف آن بکار برد. عایق بکار رفته باید عاری از ارتباط دهنده آلی باشد، زیرا دماهای بالای گردآورنده موجب می‌شود که این ماده بر روی سطح زیرین پوشش شفاف رسوب کند و بطور زیان آوری بر روی قابلیت عبوردهی آن تاثیر نماید.

نوع عایقی که در گردآورنده‌های تولید داخلی به کار می‌رود، بیشتر از جنس پشم سنگ، پشم شیشه و پلی‌یورتان می‌باشد. برای مخازن ذخیره، فوم پلی‌یورتان و پلی‌استایرین برای عایق‌بندی به کار گرفته می‌شوند.

۵.۶ معرفی و مقایسه نرم‌افزارهای شبیه‌ساز انرژی خورشیدی

انرژی خورشیدی کاربردهای مختلفی دارد که از آن جمله می‌توان به گرمایش آب، فضا، استخرهای شنا و غیره اشاره کرد. متناسب با کاربردهای مختلف و اهداف متفاوت ابزارها و نرم‌افزارهای شبیه‌سازی متنوعی موجود می‌باشد که در این قسمت مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرد.

۱. مطالعه امکان‌پذیری طرح به کمک نرم‌افزارهایی مانند restscreen, F-chart, webtools انجام می‌شود.

۲. طراحی سیستم‌های استاندارد گرمایش آب، فضا و استخرهای شنا به کمک نرم‌افزارهایی مانند webtools, T*sol express, manufacture tools انجام می‌شود.

۳. طراحی سیستم و بهینه‌سازی آن به همراه کاربردهای متنوع دیگر به کمک نرم‌افزارهایی مانند پلی‌سان، تیسئل و ترانسیس^{۵۸} انجام می‌شود.

۴. طراحی اجزای سیستم مورد نظر به همراه بهینه‌سازی آن‌ها به کمک نرم‌افزارهایی مانند ترانسیس، dedicated (proprietary) tools انجام می‌شود.

با توجه به تنوع در نرم‌افزارهای خورشیدی و کاربردهای آن‌ها نتیجه می‌شود که نرم‌افزار پلی‌سان به همراه تیسئل بیشتر از سایر نرم‌افزارها نیازهای کاربران را در زمینه طراحی و بهینه‌سازی سیستم مورد نظر ارضا میکنند ([۲]). از این میان نرم‌افزار پلی‌سان به علت قابلیت‌های بیشتر از جمله توانایی اصلاح و تغییر سیستم مورد نظر و همچنین دقت بیشتر محاسبات نسبت به نرم‌افزار تیسئل دارای

اهمیت بیشتری می‌باشد. به همین منظور در این بخش به طور مفصل نرم‌افزار پلی‌سان معرفی شده و طراحی به کمک آن مرحله به مرحله مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۱.۵.۶ معرفی نرم‌افزار پلی‌سان

نرم‌افزار پلی‌سان از معدود نرم‌افزارهای شبیه‌سازی انرژی خورشیدی است که امکانات گران بهایی در زمینه برنامه‌ریزی، طراحی و مشخص کردن سیستم مورد نظر برای کاربران خود فراهم آورده‌است. پلی‌سان کاربر را قادر به سنجیدن بازده سیستم طراحی شده، انرژی صرفه‌جویی شده و آنالیز مالی دقیق در زمان کمی می‌کند. از جمله مزایای استفاده از نرم‌افزار پلی‌سان می‌توان به مواردی از قبیل صرفه‌جویی در زمان طراحی، سهولت کارکردن با آن، ارائه نتایج شبیه‌سازی به همراه جزئیات در گزارش‌های توصیفی و طراحی و اصلاح سیستم مورد نظر در زمان کوتاهی اشاره کرد. [۳]

نرم‌افزار شبیه‌سازی پلی‌سان در سه سطح برای استفاده کاربران موجود است.

۱. نسخه سبک^{۵۹}: در این نسخه عملیات شهودی به کمک الگوها و نمونه‌های موجود صورت می‌گیرد، سریع و قابل اعتماد نیز می‌باشد، از جمله محدودیت‌های این نرم‌افزار می‌توان به عدم توانایی این نسخه در وارد کردن داده‌های مربوط به آب و هوا از منابع خاص، عدم توانایی در محاسبه مقدار سوخت صرفه‌جویی شده در سال، عدم توانایی در نمایش نتایج به صورت جدول و نمودار، عدم توانایی در شبیه‌سازی دو سیستم مجزا و مقایسه کردن نتایج آن‌ها در یک نمودار و بسیاری محدودیت‌های دیگر اشاره کرد.

۲. نسخه حرفه‌ای^{۶۰}: این نسخه بسیاری از محدودیت‌های نسخه سبک را ندارد و کار کردن با آن بسیار آسان است. نمایش نتایج در مقیاس وسیع، داشتن نمونه‌ها و الگوهای بسیار زیاد، محاسبه مقدار سوخت صرفه‌جویی شده در سال، شبیه‌سازی دو سیستم مجزا و مقایسه کردن نتایج آن‌ها در یک نمودار از جمله قابلیت‌های این نسخه از نرم‌افزار می‌باشد. از جمله محدودیت‌های این نرم‌افزار می‌توان به عدم توانایی این نسخه در وارد کردن داده‌های مربوط به آب و هوا از منابع خاص و عدم توانایی در وارد کردن مقادیر و نتایج برنامه به نرم‌افزار اکسل^{۶۱} برای اقدامات و عملیات بیشتر اشاره نمود.

۳. نسخه طراح^{۶۲}: این نسخه از نرم‌افزار یکی از کاملترین و جامع‌ترین نرم‌افزارهای شبیه‌سازی موجود می‌باشد و دارای انعطاف پذیری بسیار بالا در زمینه طراحی سیستم‌های بزرگ و پیچیده می‌باشد.

⁵⁹ Light

⁶⁰ Professional

⁶¹ excel

⁶² Designer

با تقویت و بالا بردن ورژن نرم‌افزار پلی‌سان می‌توان گزینه‌های جامعی را به نرم‌افزار افزود از جمله شبیه‌سازی انرژی گرمایی خورشیدی، شبیه‌سازی فتوولتائیک، شبیه‌سازی خنک‌سازی و غیره.

۲.۵.۶ مراحل و روند طراحی یک سیستم ایده‌آل به کمک نرم‌افزار پلی‌سان

برای طراحی یک سیستم ایده‌آل و شبیه‌سازی آن به کمک نرم‌افزار پلی‌سان بایستی مراحل مختلفی طی شود که این مراحل به ترتیب در پنج مرحله خلاصه شده‌اند که در زیر به طور کامل ذکر شده‌اند.

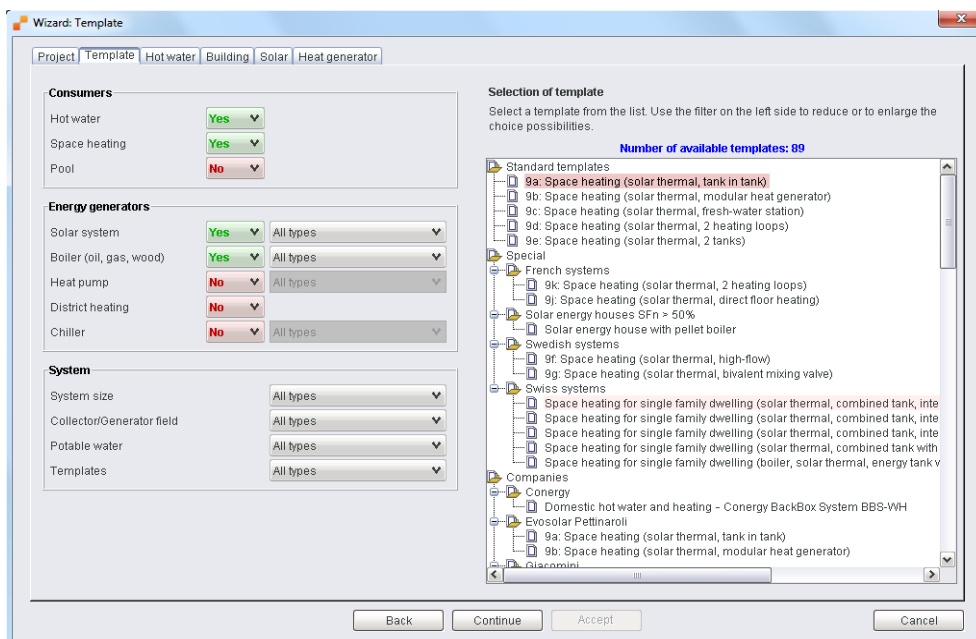
مرحله اول:

در این مرحله بایستی اطلاعات جهانی آب و هوای منطقه مورد نظر از منوی مربوطه انتخاب شود که در شکل ۶-۶ نشان داده شده‌است و پس از آن پیش‌بینی‌های قابل اعتماد مرتبط با اطلاعات آب و هوای منطقه مورد نظر و انجام محاسبات روی این اطلاعات از جمله فعالیت‌های نرم‌افزار است، همچنین محاسبات نرم‌افزار در زمان شبیه‌سازی بر این اساس است که موقعیت خورشید هر چهار دقیقه یک بار به روز می‌شود.

شکل ۶-۶: انتخاب اطلاعات مربوط به آب و هوای منطقه مورد نظر

مرحله دوم:

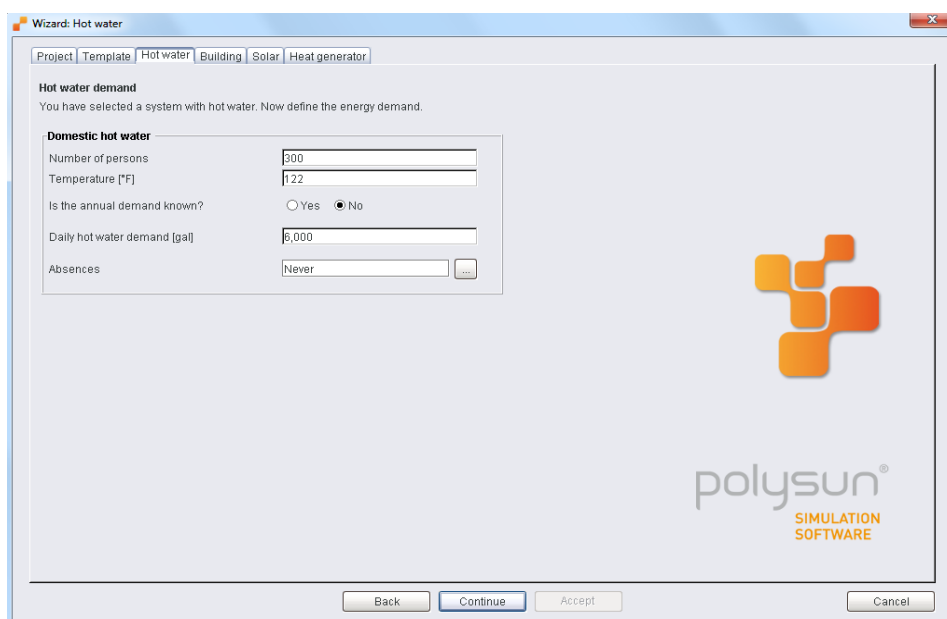
نرم‌افزار پلی‌سان برای کاربران خود بزرگترین و کاملترین الگوهای منتخب جهان را فراهم می‌کند که از این الگوها می‌توان برای طراحی سیستم‌هایی با مصارف آب گرم خانگی، گرمایش فضا و غیره استفاده کرد. عمل طراحی سیستم مورد نظر در این مرحله انجام می‌شود که در شکل ۶-۷ نشان داده شده‌است.



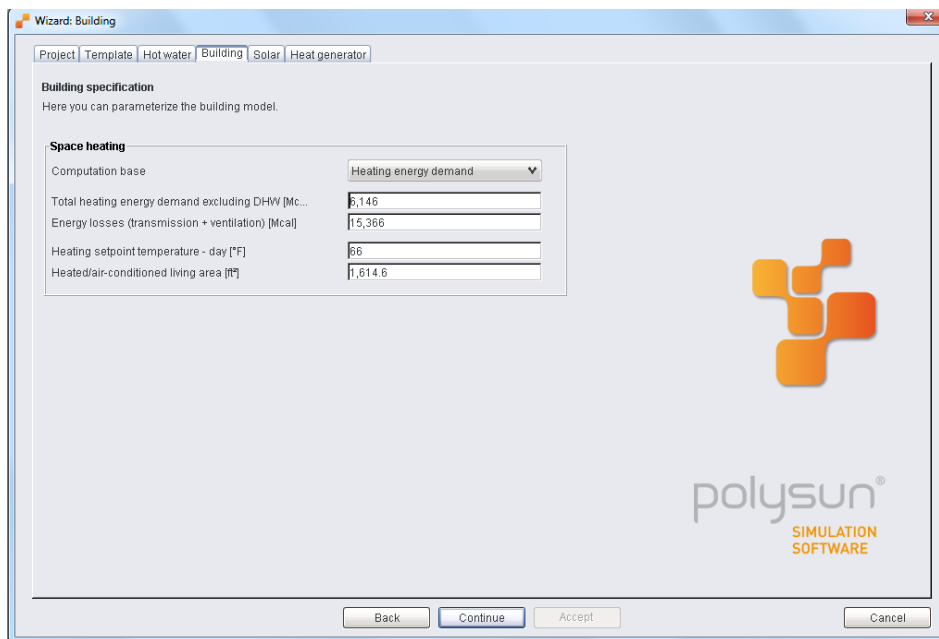
شکل ۶-۷: طراحی سیستم مورد نظر با توجه به الگوهای موجود

مرحله سوم:

در این مرحله از طراحی، مصرف‌کننده‌ها از قبیل مقدار آب‌گرم روزانه مصرفی یا مقدار انرژی گرمایی مورد نیاز مشخص می‌شوند که در شکل ۶-۸ و شکل ۶-۹ نشان داده شده است.



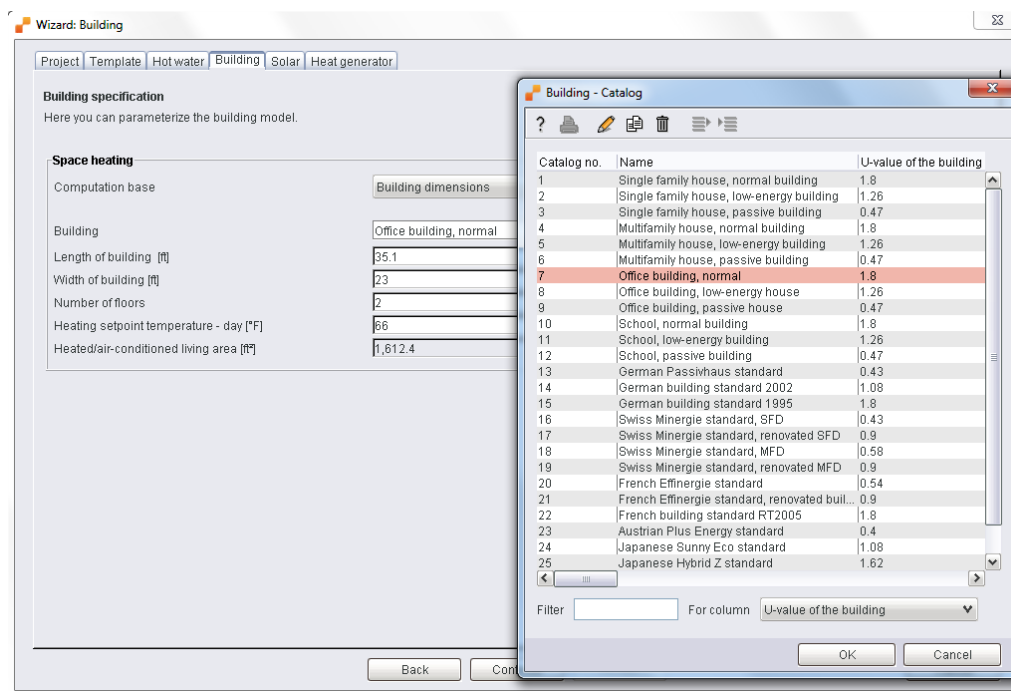
شکل ۶-۸: وارد کردن مقدار آب گرم روزانه مصرفی



شکل ۶-۹: وارد کردن مقدار انرژی گرمایی مورد نیاز

همچنین در این مرحله نیز بایستی ویژگی‌های ساختمان مورد نظر از کاتالوگ‌های مربوطه موجود در نرم

افزار انتخاب شود که در شکل ۶-۱۰ نشان داده شده است.

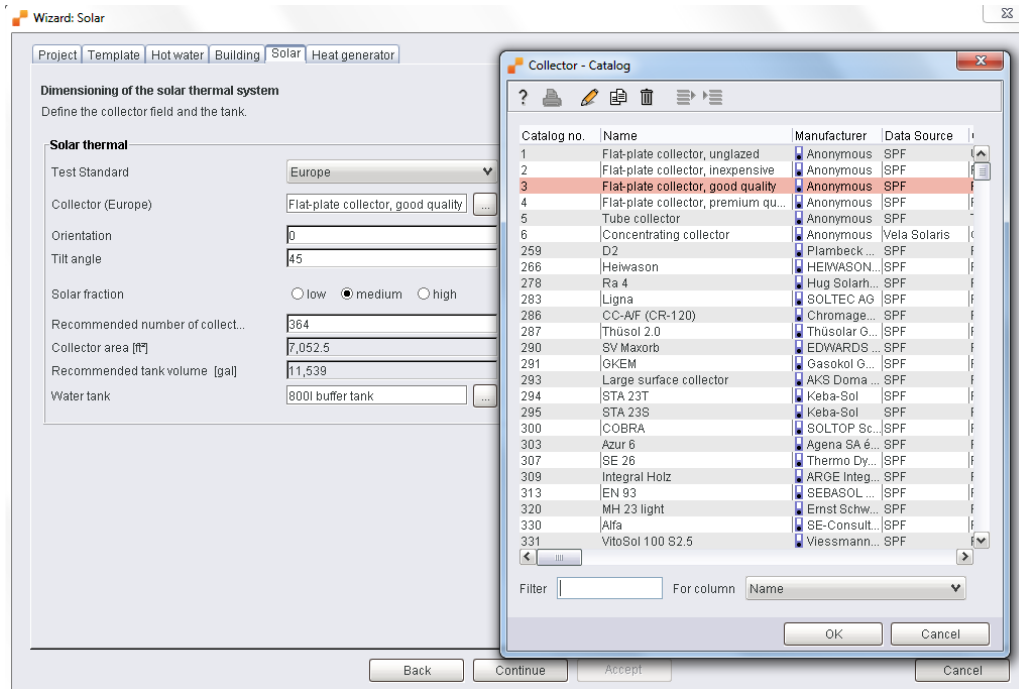


شکل ۶-۱۰: انتخاب ویژگی‌های ساختمان مورد نظر از کاتالوگ‌های مربوطه

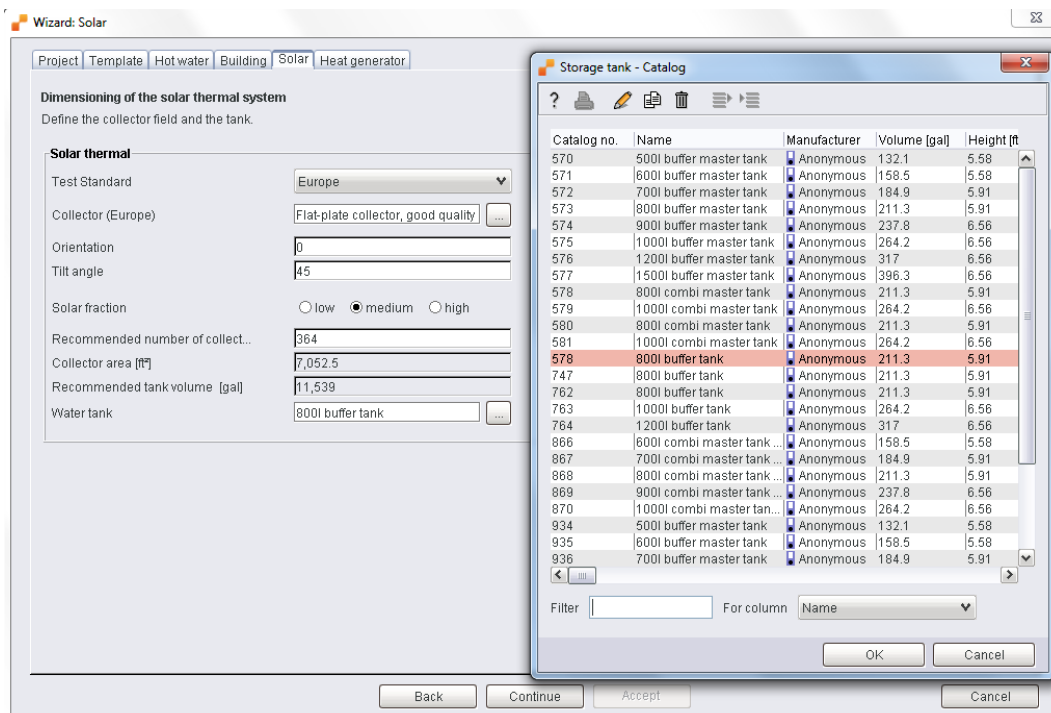
مرحله چهارم:

نرم‌افزار پلی‌سان اطلاعات جامعی از محصولات تجاری موجود در اختیار کاربر قرار می‌دهد، این اطلاعات دائماً به روز شده و به سرعت برای کاربران آماده می‌شود. سیستم طراحی شده شامل

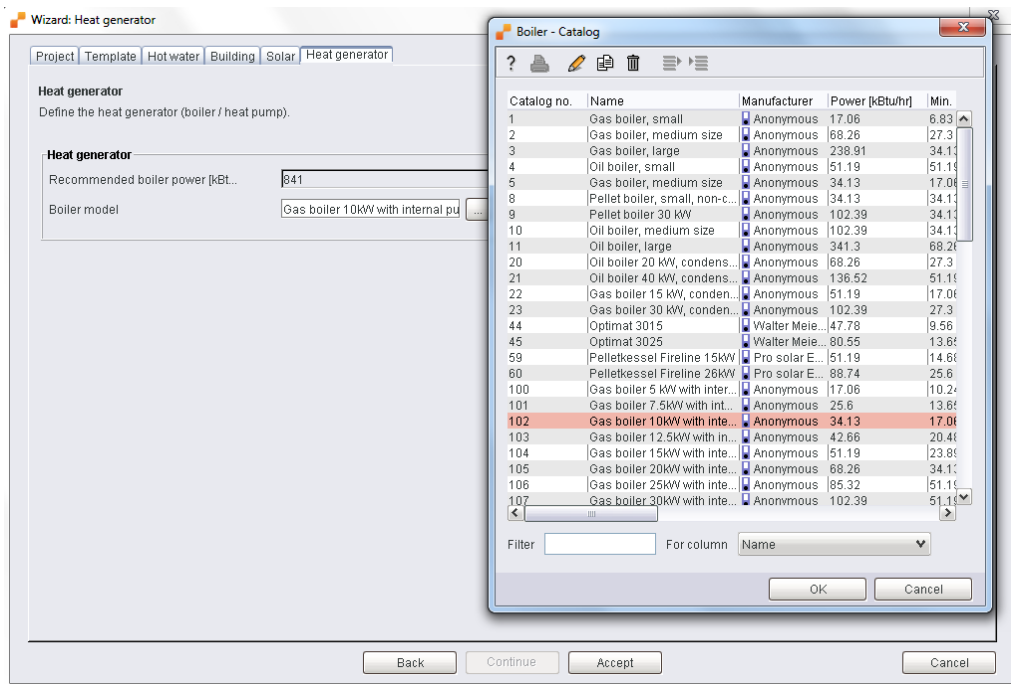
تانک‌ها، مولدهای گرمایی رایج، مبدل‌های گرمایی، کلکتورها، پمپ‌های حرارتی و حلقه‌های آب زیرزمینی به انضمام کاتالوگ‌های مربوطه در نرم‌افزار موجود می‌باشد که در این مرحله بایستی ابعاد سیستم طراحی شده مشخص گردد که در شکل ۶-۱۱ تا شکل ۶-۱۳ برخی از کاتالوگ‌های مربوطه نشان داده شده‌است.



شکل ۶-۱۱: کاتالوگ مربوط به کلکتورها و مشخصات مربوط به آن



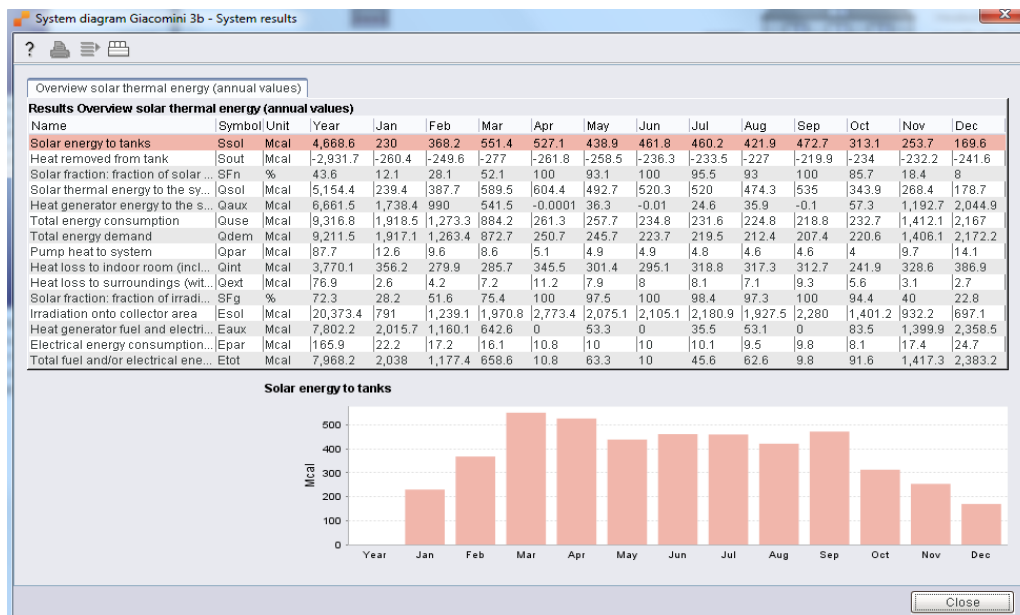
شکل ۶-۱۲: کاتالوگ مربوط به تانک‌های ذخیره و مشخصات مربوط به آن



شکل ۶-۱۳: کاتالوگ مربوط به بویلرها و مشخصات مربوط به آن

مرحله پنجم:

این مرحله نتایج شبیه‌سازی برای سیستم طراحی شده را هم به صورت گرافیکی و هم به صورت جداول منظم نمایش می‌دهد این نتایج هم شامل نتایج مربوط به سیستم طراحی شده و اجزای مربوطه می‌باشد و هم شامل نتایج اقتصادی و آنالیزهای مالی می‌باشد که در شکل ۶-۱۴ و شکل ۶-۱۵ نشان داده شده است.



شکل ۶-۱۴: نتایج مربوط به سیستم طراحی شده و اجزای مربوطه

System diagram Giacomini 3b - Financial analysis

Solar thermal

Financing		Maintenance cost		Life span
Purchase costs	Fixed maintenance costs	Proportional maintenance ...	Life span	
10,000	0	0.5	30	

Types of incentives

Proportional incentives Incentives per area Fixed incentives

25	200	10,000
----	-----	--------

Forecast

Inflation	Interest	Salvage value	Increase of energy prices
2	3	0	5

Energy prices

	Price per kWh	Price per kWh
Electricity	0.2	0.2
	Price per ft ³	Price per Mcal
Natural gas H	0.0311	0.1706

General description: Gas boiler 7.5kW without internal pump | 1, Electric resistance heater element 3

Name	Unit	Value
Effective purchase cost after grants	USD	7500.00
Annual fuel cost savings	USD	698.28
Solar energy cost per kWh	USD	0.05
Payback period	Year	10.00
Present value of the system	USD	37916.07
Net present value	USD	30416.07

OK Close

شکل ۶-۱۵: نتایج اقتصادی و آنالیزهای مالی

۶.۶ مراجع

- [۱] ع. ریاحی، ح. طاهری، "انواع سیستم‌های آبگرم‌کن خورشیدی بکار گرفته شده در ایران"، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه مازندران

[۲] www.solarpolar.ir

[۳] www.velasolaris.com

۷ سایر فعالیت‌ها

در کنار انجام برنامه‌های از پیش تعیین شده‌ی دفتر در برنامه‌ریزی سالیانه، بسته به نیاز فعالیت‌های دیگری انجام گرفته که در این فصل بدان‌ها اشاره می‌شود. عمده‌ی این فعالیت‌ها عبارت از موارد ذیل می‌باشد.

- هفته پژوهش
- روش‌های نواریپیچی خطوط لوله
- معرفی سیستم بوزنی با روش ابداعی
- کاهش مصرف انرژی به کمک عایق‌کاری سقف
- مقالات ارسالی مرتبط با گاز

۱.۷ هفته پژوهش

نمایشگاه دستاوردهای پژوهش و فناوری بطور همزمان با مراسم بزرگداشت هفته پژوهش از تاریخ ۴ لغایت ۹ دی‌ماه سال ۱۳۸۹ در موزه‌ی هنرهای معاصر اهواز برگزار شد. بدین ترتیب از عموم دستگاه‌های اجرایی، دانشگاه‌ها و پژوهشگاه‌های تحقیقاتی علاقمند استان به احداث غرفه دعوت شد. در همین راستا دفتر پژوهش شرکت گاز استان خوزستان با انگیزه شناساندن آخرین نوآوری‌ها و تکنولوژی‌های جدید مطرح در صنایع گاز و مرتبط با فعالیت‌های شرکت گاز استان خوزستان و همچنین ایجاد یک بستر پژوهشی جهت سوق دادن فعالیت‌های تحقیقاتی اعضای هیئت علمی و دانشجویان به سمت نیازهای تحقیقاتی آن با همکاری و مساعدت دفتر ارتباط با صنعت دانشگاه شهید چمران اقدام به دایر کردن غرفه نمود.

با توجه به اهداف و انگیزه‌های اصلی در ایجاد دفتر پژوهش، سعی بر آن بود برای بازدیدکنندگان غرفه که طیف شغلی و تحصیلی مختلفی را دربر می‌گرفتند، خدمات دفتر در پیگیری و یافتن آخرین نوآوری‌ها و تکنولوژی‌های جدید در زمینه صنعت گاز و مرتبط با فرآیندها و فعالیت‌های شرکت گاز خوزستان، مسائل و مشکلاتی که توسط شرکت گاز استان خوزستان به این دفتر ارجاع می‌شود، و

اولویت‌های پژوهشی شرکت گاز خوزستان، در جهت تعریف پروژه کارشناسی، کارشناسی ارشد و دکترا دانشجویان بیان شود. در این راستا بروشوری برای معرفی دفتر، یک فیلم که از کشف گاز تا مصرف آن را نمایش می‌دهد و دو بنر درمورد فعالیت‌های سال ۸۹ دفتر تهیه شد. در ادامه موارد ذکر شده، توضیح داده می‌شود.

۱.۱.۷ بروشور معرفی دفتر و فیلم آموزشی



اکنون که زمانی بیش از ۴ سال از تاسیس دفتر پژوهش می‌گذرد، به‌منظور معرفی و آشنایی علاقه‌مندان با اهداف و زمینه‌های فعالیت دفتر پژوهش بروشوری با محتوای مطالبی در مورد اهداف و زمینه‌های فعالیت دفتر پژوهش طراحی و ارائه شده که در شکل ۱-۷ و شکل ۲-۷ دیده می‌شود.

  <p>به مناسبت هفته پژوهش ۴الی ۹دی ماه ۸۹</p> <p>تلفن داخلی دانشگاه: ۰۷۴۷ و ۰۷۴۸ تلفن: ۰۲۳۲۰۲۹۸-۱۱۱ Email: khgcro@scu.ac.ir</p>	<p>اقدام به طراحی و بسطی پژوهشی با ارائه لینک‌های داتلود گزارشات ماهانه و سالیانه، لیست کتب موجود در این دفتر، طرح‌های تحقیقاتی و معرفی پرسنل و برخی خبرهای مرتبط با صنعت گاز نموده است. نشانی صفحه ابتدایی این سایت به‌صورت ذیل می‌باشد:</p> <p>www.khgcro.scu.ac.ir</p> <p>همچنین این نشانی طراحی و از طریق صفحه اصلی وبسایت دانشگاه شهید چمران (www.scu.ac.ir) و از رهگیری لینک مراکز در این صفحه امکانپذیر است.</p> <p>دستاوردها و چشم اندازها</p> <p>با حمایت پژوهشی این مرکز و شرکت گاز استان خوزستان تسکون طرح‌های تحقیقاتی و پایان‌نامه‌های بسیاری در زمینه گاز طبیعی و در سطوح کارشناسی و کارشناسی ارشد به مرحله انجام رسیده‌اند که در این میان چندین پایان‌نامه کارشناسی ارشد از حمایت مالی شرکت نیز برخوردار بوده‌اند.</p> <p>این مرکز وظیفه خود می‌داند که در راستای تحقق چشم‌انداز بیست ساله کشور و دانش‌آموز ایرانی سر بلند در زمینه صنعت گاز طبیعی به علاقه‌مندی که مایلند در زمینه فرآیندهای انتقال، توزیع و مصرف گاز طبیعی فعالیت پژوهشی داشته باشند همکاری نماید.</p>	<p>سیستم پردازش موازی</p> <p>دفتر پژوهش شرکت گاز در راستای افزایش توان و امکانات پژوهشی خود اقدام به تهیه و نصب یک دستگاه سیستم پردازش موازی نموده است. این دستگاه که هزینه آن توسط شرکت گاز استان خوزستان تامین گردیده است با داشتن ۲۴ عدد پردازشگر 2.66 GHz (۴ عدد پردازنده ۶ هسته‌ای) و 64 GB حافظه فعال دارای توان محاسباتی در حدود 255 GF می‌باشد در حال حاضر بر روی این سیستم نرم‌افزارهای نظیر Ansys Fluent و MATLAB نصب گردیده و در حال بهره‌برداری است.</p> <p>مکان</p> <p>این دفتر در حال حاضر در محوطه باز دانشگاه مهندسی دانشگاه شهید چمران و مجاور کتابخانه این دانشگاه واقع است. دفتر پژوهش گاز دارای چهار اتاق اصلی مشتمل بر مدیریت مرکز، کارشناسان، سالن جلسات و یک سایت کامپیوتر بوده که به سایر پژوهشگران و دانشجویانی که در راستای اهداف دفتر فعالیت دارند سرویس‌دهی می‌نماید.</p> <p>وبسایت و فعالیت آنلاین</p> <p>دفتر پژوهش شرکت گاز خوزستان در راستای سهولت دسترسی دانشجویان، اساتید و محققین محترم به فعالیت‌های جاری و پیشین این مرکز،</p>
---	--	--

شکل ۱-۷: بروشور معرفی دفتر پژوهش شرکت گاز-۱

در برگه معرفی دفتر، موارد مختلفی از جمله تاریخچه، اهداف، آرشیو تخصصی، خصوصیات سیستم پردازش موازی مرکز و شرح خدمات مربوط به دفتر پژوهش شرکت گاز استان خوزستان بیان شده‌است.

فیلمی جهت نمایش در غرفه آماده شد که در آن تصاویری از کشف گاز طبیعی، حفاری مخزن گازی، شیرین‌سازی گاز طبیعی، آب‌زدایی از گاز طبیعی، خطوط انتقال گاز، ایستگاه‌های کمپرسور، توپکرانی خطوط انتقال، ایستگاه‌های تقلیل فشار، عملیات بازرسی خطوط و حفاظت کاتدیک خطوط انتقال نمایش داده شده‌است.

۳	۲	۱
<p>برگزاری سمینارهای علمی جهت آشنایی اساتید و دانشجویان با مسائل و مشکلات و اولویت‌های پژوهشی شرکت گاز خوزستان</p> <p>هدایت دانشجویان در جهت تعریف پروژه کارشناسی، کارشناسی ارشد و دکترا</p>  <p>آرشیو تخصصی</p> <p>در آرشیو تخصصی این مرکز کتب متعددی در ارتباط با صنایع و فرآیندهای گاز طبیعی مرتبط با گاز طبیعی و جریان آن، پایان‌نامه‌های انجام‌شده و نیز CDهای نرم‌افزاری مرتبط با فعالیت‌های شرکت گاز موجود می‌باشد که می‌تواند در ارتباط با فعالیت‌های پژوهشی مرتبط مورد استفاده قرار گیرد.</p>	<p>سابق</p> <p>دفتر پژوهش شرکت گاز استان خوزستان با انگیزه شناسایی آخرین نوآوری‌ها و تکنولوژی‌های جدید در صنایع گاز و مرتبط با فعالیت‌های شرکت گاز استان خوزستان و نیز ایجاد یک بستر پژوهشی جهت سوق دادن فعالیت‌های تحقیقاتی اعضای هیئت علمی و دانشجویان به سمت نیازهای تحقیقاتی آن شرکت تأسیس گردید. اهم اهداف فراسوی این دفتر به شرح ذیل می‌باشند:</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ پیگیری و یافتن آخرین نوآوری‌ها و تکنولوژی‌های جدید در زمینه صنعت گاز مرتبط با فرآیندها و فعالیت‌های شرکت گاز خوزستان ✓ جستجوهای کتابخانه‌ای و اینترنتی در زمینه آخرین یافته‌های علمی و پژوهشی در زمینه گاز در داخل و خارج کشور ✓ ارائه مشاوره در زمینه مسائل و مشکلاتی که توسط شرکت گاز استان خوزستان به این دفتر ارجاع می‌شود ✓ تهیه بانک اطلاعاتی از موسسات تحقیقاتی گاز در داخل و خارج کشور ✓ ارائه گزارش‌های ماهیانه، سالیانه و فنی در ارتباط با فرآیندها و فعالیت‌های شرکت گاز استان خوزستان 	<p>تاریخچه</p> <p>دفتر پژوهش شرکت گاز استان خوزستان به‌طور رسمی از تیرماه ۱۳۸۵ فعالیت خود را در دانشکده مهندسی دانشگاه شهید چمران آغاز نمود. این دفتر در ابتدا با یک عضو هیئت علمی، یک نفر دانشجوی کارشناسی ارشد و یک کارشناس گاز خود را شروع کرده و در حال حاضر با تیمی متشکل از یک دکترای مهندسی مکاتیک، یک دانشجوی دکتری مهندسی مکاتیک، یک نفر کارشناس ارشد مهندسی فرآوری و انتقال گاز و یک نفر کارشناس به فعالیت خود ادامه می‌دهد. این مرکز با انگیزه ارتباط دوجانبه و هرچه بیشتر دانشگاه با صنعت در خصوص تحقیقات پایه و کاربردی صنعت توزیع و مصرف گاز طبیعی تأسیس شده است.</p> 

شکل ۷-۲: بروشور معرفی دفتر پژوهش شرکت گاز-۲

۲.۱.۷ بنرهای تهیه شده

در ادامه معرفی زمینه فعالیت‌های انجام شده توسط دفتر، دو بنر تهیه شد که در این بنرها زمینه‌هایی که مورد مطالعه دفتر پژوهش قرار گرفته‌اند به طور مختصر معرفی شده‌اند. یکی از این بنرها مرتبط با معرفی نرم‌افزار تخمین میزان هدر رفت گاز، طراحی و ساخت دبی‌سنج تحقیقاتی و نتایج تست تجربی بوده که توسط دفتر پژوهش طراحی و آماده شده است. شمایی از این بنر در شکل ۷-۳ نشان داده شده است. بنر دوم در ارتباط با فعالیت‌های انجام‌شده در مرکز، سیستم پردازش موازی و مستندات دفتر آماده شده است که شمایی از آن در شکل ۷-۴ نشان داده شده است.

هفته پژوهش و فناوری گرامی باد

دفتر پژوهش گاز در دانشگاه شهید چمران

طراحی و ساخت دبی سنج تحقیقاتی

با توجه به وجود محدودیت‌های اندازه‌گیری در دبی سنج‌های صنعتی و کیفیت کم ترانسدوکتورهای موجود در بازار، طراحی و ساخت دبی سنج تحقیقاتی با دقت بالا و قابلیت استفاده در دبی‌سنج‌های مختلف انجام شد. این دبی سنج با استفاده از سنسورهای دبی سنج با دقت بالا و استفاده از تجهیزات دقیق ساخته شده است. این دبی سنج با استفاده از سنسورهای دبی سنج با دقت بالا و استفاده از تجهیزات دقیق ساخته شده است.

نرم افزار تخمین میزان هدر رفت گاز

یکی از مهم‌ترین اهداف و کلان بودجه هر صنعت گاز محاسبه میزان هدررفت می‌باشد و این مسئله همواره به‌طور یکجمله مورد توجه بوده است. در صورت امکان، کاهش میزان هدررفت گاز می‌تواند منجر به صرفه‌جویی در هزینه‌های عملیاتی و افزایش بهره‌وری شود. در این راستا، نرم‌افزاری برای تخمین میزان هدررفت گاز طراحی و ساخته شد. این نرم‌افزار با استفاده از الگوریتم‌های پیشرفته و داده‌های میدانی، امکان تخمین دقیق میزان هدررفت گاز را فراهم می‌کند.

انبار مخزن و گاز

در این بخش، دبی سنج‌های هدررفت گاز در مخازن و خطوط انتقال گاز نصب شده است. این دبی سنج‌ها با استفاده از سنسورهای دبی سنج با دقت بالا و استفاده از تجهیزات دقیق ساخته شده است. این دبی سنج با استفاده از سنسورهای دبی سنج با دقت بالا و استفاده از تجهیزات دقیق ساخته شده است.

مقاله علمی

در این بخش، مقاله‌هایی در مورد دبی سنج‌های هدررفت گاز در مخازن و خطوط انتقال گاز در دسترس قرار داده شده است. این مقاله‌ها با استفاده از نتایج تحقیقاتی و تجربی، امکان دسترسی به آخرین دستاوردهای علمی را فراهم می‌کند.

شکل ۷-۳: بنر نرم افزار تخمین هدررفت گاز و دبی سنج تحقیقاتی

عناوین بخشی از فعالیت‌های انجام شده

۱. مطالعات مدل‌سازی حفاظت کاتدیک خطوط لوله
۲. تدوین نرم‌افزار انتخاب کنتور
۳. مدل‌سازی شبکه‌های گاز رسانی شهرستان حمیدیه
۴. ارزیابی ساختمان‌های اداری شرکت گاز استان خوزستان
۵. مطالعه و بررسی روش‌های مختلف مدل‌سازی جریان‌های غیر دائم درون شبکه‌های گاز طبیعی
۶. بررسی مشکلات مربوط به سیستم‌های فیلتراسیون نیروگاه آبادان
۷. تدوین نرم‌افزار محاسبه نرخ خروج گاز از خطوط لوله
۸. ارائه‌های و هدایت دانشجویان جهت سوز به پژوهش‌های مرتبط با گاز

سیستم پردازش موازی

دفتر پژوهش شرکت گاز در راستای افزایش توان و امکانات پژوهشی خود اقدام به تهیه و نصب یک دستگاه سیستم پردازش موازی نموده است. این دستگاه که هزینه آن توسط شرکت گاز استان خوزستان تأمین گردیده است، با داشتن ۲۴ هسته پردازشگر 2.66 GHz (۴ هسته پردازنده P هسته‌ای) و 64 GB حافظه فعال داخلی، توان محاسباتی در حدود 266 GF باشد. در حال حاضر بر روی این سیستم نرم‌افزارهایی نظیر Ansys، Fluent و MATLAB نصب گردیده و در حال بهره‌برداری است.

لیست مستندات دفتر پژوهش

۱. تعداد پایان‌نامه‌های ارشد خاتمه یافته..... ۵
۲. تعداد پایان‌نامه‌های ارشد در حال انجام ۹
۳. تعداد پایان‌نامه‌های ارشد تعریف شده ۲
۴. تعداد مقالات چاپ‌شده (نشریاتی و علمی-تخصصی)..... ۱۱
۵. تعداد مقالات نمایه شده ۲
۶. تعداد گزارشات فنی ۲
۷. تعداد گزارشات تطبیقی ۵۰

www.KHGCRO.scu.ac.ir

شکل ۷-۴: بنر سیستم پردازش موازی، عناوین فعالیت‌ها و لیست مستندات دفتر

بنر معرفی نرم‌افزار و دبی سنج

در این بنر مطالب مرتبط با معرفی نرم‌افزار تخمین میزان هدررفت گاز، طراحی و ساخت دبی‌سنج تحقیقاتی و نتایج تست تجربی ذکر شده‌است. در ادامه جزئیات مطالب ارائه شده در بنر آورده شده‌است.

نرم‌افزار تخمین میزان هدر رفت گاز

یکی از مباحث مهم و قابل توجه در صنعت گاز محاسبه گازهای هدررفت می‌باشد و این مسئله همواره بعنوان یک معضل مورد توجه بوده‌است. گازهای هدررفت در خیلی از موارد قابل اندازه‌گیری نیستند و باید روش‌هایی برای تخمین و محاسبه آنها پیش‌بینی نمود. هدررفت گاز به شیوه‌های مختلفی چون نشتی، سوراخ شدن یا پاره‌گی خطوط لوله بهنگام برخورد با یک وسیله مکانیکی و هنگام راه‌اندازی خطوط و شبکه‌های گازرسانی صورت می‌گیرد. نرم‌افزار حاضر به منظور محاسبه‌ی میزان هدررفت گاز هنگام راه‌اندازی تدوین شده‌است.

مدل مسئله

در این بخش محاسبه‌ی هدر رفت گاز هنگام راه‌اندازی یک خط لوله مورد بررسی قرار می‌گیرد. جریان گاز خروجی از انشعاب ماهیت غیردائم دارد. با این حال با فرض ثابت بودن فشار در ابتدای لوله می‌توان مسئله را در حالت دائم یا شبه دائم در نظر گرفت. بدین ترتیب مخزنی با فشار ثابت و برابر با فشار اولیه‌ی خط (فشار در خط اصلی) در نظر گرفته شده که توسط لوله‌ای (لوله‌ی انشعاب) با طول و قطر مشخص به اتمسفر تخلیه می‌شود. از اینرو فشار مخزن، دمای مخزن، طول لوله، قطر لوله و فشار در خروجی لوله (برابر با فشار اتمسفر) ورودی مسئله می‌باشند.

اعتبارسنجی نرم‌افزار

در ارتباط با اعتبارسنجی نتایج نرم‌افزار، نیاز به انجام آزمایشات و اندازه‌گیری میزان هدررفت گاز در شرایط مختلف می‌باشد. برای این منظور یک Set up آزمایشی مناسب طراحی شد و توسط آن آزمایشات مربوطه صورت گرفت. نتایج بدست آمده اعتبار نرم‌افزار تدوین شده را تایید می‌نماید.

بنا معرفی فعالیت‌ها و امکانات دفتر

این بنا در ارتباط با فعالیت‌های انجام‌شده در مرکز، سیستم پردازش موازی و مستندات دفتر می‌باشد که در آن عکس‌هایی از نمای جلوی دفتر، سیستم پردازش موازی، پایان‌نامه‌های اتمام یافته و گزارشات فنی و سالیانه آورده شده‌است. در ادامه جزئیات مطالب ارائه شده در بنا ذکر می‌شود.

عناوین بخشی از فعالیت‌های انجام‌شده

۱. مطالعات مدل‌سازی حفاظت کاتدیک خطوط لوله
۲. تدوین نرم‌افزار انتخاب کنتور
۳. مدل‌سازی شبکه‌ی گاز رسانی شهرستان حمیدیه
۴. ممیزی ساختمان‌های اداری شرکت گاز استان خوزستان
۵. مطالعه و بررسی روش‌های مختلف مدل‌سازی جریان‌های غیر دائم درون شبکه‌های گاز طبیعی
۶. بررسی مشکلات مربوط به سیستم‌های فیلتراسیون نیروگاه آبادان
۷. تدوین نرم‌افزار محاسبه‌ی نرخ خروج گاز از خطوط لوله
۸. راهنمایی و هدایت دانشجویان جهت سوق به پژوهش‌های مرتبط با گاز

سیستم پردازش موازی

دفتر پژوهش شرکت گاز در راستای افزایش توان و امکانات پژوهشی خود اقدام به تهیه و نصب یک دستگاه سیستم پردازش موازی نموده است. این دستگاه که هزینه آن توسط شرکت گاز استان خوزستان تامین گردیده است، با داشتن ۲۴ عدد پردازشگر 2.66 GHz (۴ عدد پردازنده ۶ هسته‌ای) و 64 GB حافظه فعال دارای توان محاسباتی در حدود 255 GF می‌باشد. در حال حاضر بر روی این سیستم نرم افزارهایی نظیر Ansys, Fluent و MATLAB نصب گردیده و در حال بهره‌برداری است.

لیست مستندات دفتر پژوهش

۱. تعداد پایان‌نامه‌های ارشد خاتمه یافته ۵
۲. تعداد پایان‌نامه‌های ارشد در حال انجام ۹
۳. تعداد پایان‌نامه‌های ارشد تعریف شده ۴
۴. تعداد مقالات چاپ‌شده (نشریات و همایش‌ها) ۱۲
۵. تعداد گزارشات سالانه ۴
۶. تعداد گزارشات فنی ۴
۷. تعداد گزارشات ماهیانه ۵۰

۳.۱.۷ گزارش تصویری از هفته پژوهش



شکل ۵-۷: افتتاح نمایشگاه هفته پژوهش و فناوری توسط فرماندار استان خوزستان



شکل ۶-۷: نمایی از غرفه



شکل ۷-۷: نمایی از غرفه



شکل ۷-۸: بازدیدکنندگان از غرفه



شکل ۷-۹: بازدیدکنندگان از غرفه



شکل ۷-۱۰: بازدیدکنندگان از غرفه



شکل ۷-۱۱: غرفه‌های شرکت‌کننده در هفته پژوهش



شکل ۷-۱۲: غرفه‌های شرکت کننده در هفته پژوهش



شکل ۷-۱۳: غرفه‌های شرکت کننده در هفته پژوهش

۲.۷ روش‌های نواریپیچی خطوط لوله

با توجه به درخواست مسئولان محترم شرکت گاز استان خوزستان در ارتباط با امکان بکارگیری ماشین‌های نواریپیچی برای لوله‌های با قطر کم، مطالعاتی در این رابطه صورت گرفته که نتایج آن در این فصل بیان شده است. موارد مورد بحث مشتمل بر فواید نواریپیچی، استاندارد نواریپیچی، انواع روش‌های نواریپیچی و امکان استفاده از ماشین‌های نواریپیچی برای لوله‌های با قطر کم می‌باشد.

۱.۲.۷ فواید نواریپیچی لوله‌ها

نوارهای محافظ خوردگی، ده‌ها سال است که برای خطوط لوله زیرزمینی در انواع و اندازه‌های مختلف استفاده می‌شود. اولین و مهمترین دلیل استفاده از این نوارها، محافظت لوله‌ها در مقابل خوردگی می‌باشد. دیگر فواید این نوارها در ذیل ارائه شده است [۱]

۱. حفاظت لوله‌ها برای زمان طولانی
۲. سهولت استفاده از آن با دست یا ماشین
۳. سهولت تعمیرنوارها و همچنین جایگزینی آنها پس از بازرسی لوله‌ها
۴. مقاوم در برابر اسیدهای رقیق معدنی، مواد قلیایی و نمک
۵. مقاوم بودن در مقابل نفوذ رطوبت

این پوشش‌ها زمانی می‌توانند کاملاً مؤثر باشند که نصب آن به روش صحیح و با دقت مناسبی انجام شده باشد. بنابراین تکنیک‌های اعمال روش‌های نواریپیچی، دارای نقش مهمی در میزان کاهش خوردگی لوله‌ها هستند. همچنین استفاده از نوار با عرض مناسب (بسته به طول لوله) تاثیر بسزائی در کارکرد پوشش دارد. پوشش نوارها باید پس از نصب دارای خواص زیر باشند [۲]

۱. بدون چین و چروک و فرورفتگی باشد
۲. نوار با میزان کشش مطلوب پیچیده شده باشد
۳. میزان مناسبی از عرض نوارها بر روی یکدیگر قرار گرفته باشند

لذا همان‌گونه که از مباحث بالا بر می‌آید، نواریپیچی خطوط لوله با ماشین، باعث کاهش خطاهای انسانی شده و همچنین با افزایش دقت نواریپیچی و کنترل بر روی میزان کشش نوار می‌تواند در افزایش میزان کارآیی نوارها بسیار مؤثر باشد.

۲.۲.۷ استاندارد نوارپیچی

بر طبق مقررات لوله‌کشی گاز طبیعی برای پیچیدن نوار به دور خطوط لوله‌ها موارد زیر باید رعایت شوند [۲]

۱. پس از اینکه آستری به‌حدی خشک شد که به انگشت نچسبد ولی اثر انگشت بر روی آن باقی بماند لازمست لوله نوارپیچی شود. در این مرحله نوار بر روی لوله بطوری پیچیده می‌شود که به‌مقدار حداقل ۱۰ درصد عرض آن بر روی هم قرار گیرد. نوار باید کاملاً کشیده شده باشد و آثار چین و چروک و پارگی و ناصافی بر روی آن باقی نماند. کشش وارده بر نوار باید ثابت بوده و میزان آن طوری تنظیم گردد که حداکثر ۰/۵ درصد از عرض نوار در اثر کش آمدن کاسته شود. اگر نوارپیچی با ماشین انجام گیرد، تنظیم کشش ماشین نوارپیچی در کیفیت نوارپیچی بسیار پراهمیت است.

۲. نوارپیچی زیری باید بصورتی باشد که لبه‌های نوار حداقل ۱۰ درصد روی هم قرار گیرند. پس از انجام آزمایش با دستگاه منفذیاب^{۶۳} بر روی نوار زیری و انجام تعمیرات مورد نیاز، لازمست تمام قسمتهای لوله بوسیله نوار روئی با رویهم‌پیچی ۱۰ درصد پیچیده شود. در بعضی موارد نظیر تقاطع با کانال آب و غیره لازمست مقدار رویهم‌پیچی نوار زیری را به عرض ۵۵ درصد نوار انجام داد.

۳. محل ختم نوارپیچی باید حداقل سه دور بر روی هم پیچیده شود.

۳.۲.۷ انواع روش‌های نوارپیچی

روش‌های نوارپیچی خطوط لوله به سه روش زیر تقسیم می‌شوند

۱. نوارپیچی دستی

۲. نوارپیچی ماشینی-دستی

۳. نوارپیچی ماشینی با موتور

هر کدام از روش‌های ذکر شده در ذیل به اختصار توضیح داده شده‌است.

نوارپیچی دستی^{۶۴}

این روش ابتدایی‌ترین روش نوارپیچی لوله‌ها می‌باشد که تنها با دخالت اپراتور انجام شده و در آن از هیچ‌گونه ماشینی استفاده نمی‌گردد. ایراد این روش در این است که کنترل بر روی میزان دقیق کشش نوارها وجود ندارد، در حالیکه در برخی از موارد نوارپیچی به میزان دقیقی از کشش نیاز است [۲].
 طریقه اینگونه نوارپیچی در شکل ۷-۱۴ نشان داده شده‌است.



شکل ۷-۱۴: نحوه نوارپیچی خطوط لوله گاز با دست [۳]

نوارپیچی ماشینی - دستی^{۶۵}

نوارپیچی ماشینی بسیار دقیق‌تر از نوارپیچی دستی می‌باشد. همچنین استفاده از ماشین کار نوارپیچی را بسیار آسان‌تر و سریع‌تر می‌نماید. نوارپیچی ماشینی-دستی در دو نوع کوچک و بزرگ ساخته می‌شود که در شکل ۷-۱۵ و شکل ۷-۱۶ نشان داده شده‌است.

⁶⁴ Holiday Detector

⁶⁵ Holiday Detector



شکل ۷-۱۵: ماشین نواریچی سایز دستی کوچک [۱]



شکل ۷-۱۶: ماشین نواریچی دستی سایز بزرگ با بازوی کششی [۱]

همان‌طور که از شکل ۷-۱۵ و شکل ۷-۱۶ پیداست، این نوع ماشین‌ها می‌تواند برای سایزهای مختلف لوله‌ها از کوچک تا بزرگ به‌کار روند.

نواریچی ماشینی با موتور^{۶۶}

این روش بدون دخالت قدرت دست و تنها با نظارت یک اپراتور می‌باشد. با توجه به عدم دخالت نیروی انسانی، این روش سریع‌تر از روش‌های دیگر می‌باشد. طریقه استفاده از این ماشین‌ها در شکل ۷-۱۷ تا شکل ۷-۱۹ نشان داده شده‌است.

^{۶۶} Motor driven wrapping machine



شکل ۷-۱۷: ماشین نواریپیچی با موتور [۱]



شکل ۷-۱۸: ماشین نواریپیچی با موتور [۴]



شکل ۷-۱۹: نحوه کار ماشین نواریپیچی با موتور [۴]

۴.۲.۷ نوارپیچی خطوط لوله گاز با قطر کم

با استفاده از ماشین‌ها برای نوارپیچی خطوط لوله‌ها می‌توان از رعایت نمودن مقررات لوله‌کشی گاز طبیعی اطمینان بیشتری حاصل نموده و همچنین میزان خطاهای انسانی را کاهش داد. جدول ۷-۱، روش‌ها و عرض نوارهای پیشنهاد شده را برای قطر مختلف لوله‌ها نشان می‌دهد.

جدول ۷-۱: روش‌ها و عرض نوارهای پیشنهاد شده برای قطر مختلف لوله‌ها [۱]

قطر لوله (اینچ)	عرض پیشنهادی نوار (میلی‌متر)	روش نوارپیچی پیشنهادی
۲-۱	۳۰	دستی ماشین‌های نوارپیچی دستی کوچک
۱۱-۲/۵	۵۰	ماشین‌های نوارپیچی دستی کوچک
۷۸-۱۲	۱۰۰	ماشین‌های نوارپیچی دستی کوچک و متوسط ماشین نوارپیچی دستی با موتور

بر طبق مطالعات صورت گرفته، ماشین‌های نوارپیچی با موتور برای سایزهای کوچک خطوط لوله پیشنهاد نمی‌شود ولی ماشین‌های نوارپیچی دستی را می‌توان برای تمام سایز لوله به کار برد. مزیت نوع ماشینی دقیق و سریع بودن آن نسبت به نوارپیچی با دست می‌باشد. همچنین کنترل میزان کشش نوارها با نوع ماشینی آن بسیار راحت‌تر و دقیق‌تر می‌باشد.

ماشین‌های نوارپیچی علاوه بر مزیت‌هایی که ذکر شد، فواید دیگری نیز دارند که استفاده از آنها را نسبت به نوارپیچی با دست بسیار ساده‌تر و کاراتر می‌نماید. این فواید در زیر ارائه شده‌اند.

۱. ساخته شده با مکانیزم ترمز برای نوارپیچی با نیروی کششی ثابت (لذا اپراتور می‌تواند نوارپیچی را در هر جا که اراده نموده، متوقف نماید و سپس کار را با همان نیروی کششی قبلی ادامه دهد).

۲. وزن کم

۳. یکپارچه‌سازی نوارپیچی

۴. امکان اضافه نمودن بازوی کششی به ماشین‌های نوارپیچی برای لوله‌های با قطر بزرگ

۵. نصب ساده و حرکت دادن آن در سراسر سازه‌های لوله

لذا با توجه به فواید ذکر شده برای روش نواریپیچی ماشینی و امکان به‌کارگیری از آن برای لوله‌های با قطر کوچک، استفاده از آن برای نواریپیچی خطوط لوله گاز پیشنهاد می‌شود. کاتالوگ‌ها و بروشورهایی برای آشنایی بیشتر با این‌گونه از ماشین‌ها در قالب یک لوح فشرده به این گزارش پیوست شده‌است.

۵.۲.۷ منابع

[۱] <http://www.dekotec.net/>

[۲] شماره استاندارد ۲۰۹۷، مؤسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران، چاپ سوم

[۳] www.denso.net

[۴] www.transcanada.com

۳.۷ معرفی سیستم بوزنی با روش ابداعی

سیستم‌های بوزنی کنارگذر در شرایطی گاز را به‌خوبی بودار نمی‌کنند و ممکن است خطراتی را برای مصرف‌کنندگان به‌وجود آورند. در سیستم‌های بوزنی کنارگذر زمانی که دبی گاز کم باشد افت فشار کافی ایجاد نشده و مقدار مناسب ماده بوزا به خط اضافه نمی‌شوند. در ادامه طرحی برای رفع این مشکل ارائه شده‌است. در این فصل آئین‌نامه‌های موجود در زمینه بودهی به گاز و شرایط استفاده از سیستم‌های بوزنی و مقدار ماده‌ای که باید به گاز اضافه شود، بیان می‌شود. سپس روش‌های متداول بوزنی به گاز ذکر شده و در انتها طرح اجرا شده برای رفع مشکلات مربوط به سیستم‌های بوزنی شرح داده می‌شود.

۱.۳.۷ آئین‌نامه‌های موجود در زمینه بودهی به گاز

بخش‌های مختلف صنایع نفت و گاز با توجه به اهمیت و کاربرد وسیع در عرصه جهانی دارای استانداردها و بخش‌نامه‌های اجرائی بوده که تمامی صنایع مرتبط ملزم به رعایت این دستورات می‌باشند. یکی از سرفصل‌های بخش توزیع و انتقال گاز مربوط به فرآیند بودهی به گاز می‌باشد. در این رابطه عنوان ۴۹ سرفصل ۱۹۲ از کد آئین‌نامه فدرالی^{۶۷} شامل بر حداقل شرایط لازم برای توزیع و انتقال ایمن گاز می‌باشد. در این بخش موارد ذیل به‌چشم می‌خورد [۱].

۱. مشخص نمودن خطوطی که نیاز به بودهی دارند.

⁶⁷ 49 CFR Part 192

۲. حداقل میزان ماده بوزا برای قابل تشخیص بودن گاز

۳. ملاحظات مربوط به مواد بوزا و فرآیند بودهی به گاز

۴. نظارت و بازرسی خطوط لوله گاز برای بررسی عملکرد سیستم بودهی

خطوطی که گاز درون آنها باید بودار باشد

گاز درون خطوط توزیع گاز و نیز خطوط انتقالی که در نواحی با درجه ۳ یا ۴ قرار دارند، خواه به صورت طبیعی، خواه با اعمال فرآیند بوزنی، می‌بایست بودار باشد. در مورد خطوط انتقال درون نواحی با درجه ۳ و ۴ چندین مورد استثناء وجود دارد که در ادامه ناحیه‌بندی و نیز این مستثنیات بیشتر توضیح داده خواهد شد.

درجه ناحیه که در مورد خطوط انتقال گاز بدان اشاره شد در واقع بیانگر میزان جمعیت موجود در اطراف خطوط لوله می‌باشد. با تعیین تعداد واحدهای مسکونی در فاصله ۲۲۰ یاردی از هر سمت لوله در طول یک مایل از لوله و یا تعداد زمین یا ساختمان‌هایی که انسان‌ها در آنها رفت‌وآمد می‌کنند در طول ۱۰۰ مایلی لوله می‌توان درجه ناحیه را مشخص نمود. هرگاه ۴۶ واحد یا بیشتر در طول ۱ مایل از لوله در فاصله ۲۲۰ یاردی از هر سمت لوله، مسکونی باشند و یا ساختمان یا بخشی که ۲۰ نفر برای ۵ روز هفته و بمدت ۱۰ هفته در طول سال در آنجا ساکن باشند، این نواحی جزء کلاس ۳ محسوب می‌شوند. ناحیه درجه ۴، نواحی با ساختمان‌های ۴ طبقه به بالا در فاصله ۲۲۰ یاردی از هر سمت لوله را شامل می‌شود.

حداقل میزان بوزنی گاز

میزان بودهی به گاز باید به میزانی باشد که هرگاه مقدار گاز در هوا به اندازه ۲۰٪ حداقل لازم برای انفجار ناگهانی (LEL)^{۶۸} در محیط رسید، گاز به راحتی توسط یک فرد عادی قابلیت شناسایی داشته باشد.

حداقل میزان گاز لازم در هوا برای انفجار برای گازهای متفاوت فرق می‌کند. در رابطه با گاز طبیعی غلظت ۴/۵٪ تا ۵٪ گاز طبیعی در هوا را به عنوان حداقل آستانه انفجار می‌دانند. برای میعانات گازی^{۶۹} این مقدار را ۲/۵٪ می‌دانند. با توجه به اعداد مذکور زمانی باید گاز در محیط قابل شناسایی باشد که درصد غلظت آن به ۱٪ در هوا برسد. از این رو میزان حداقل بودهی به گاز باید به نحوی باشد که در شرایط فوق (غلظت گاز در هوا به میزان ۱٪) بتوان بوی گاز را حس نمود.

⁶⁸ Lower explosion limit

⁶⁹ LPG

در سیستم‌های بوزنی متداول امروزه چون سیستم کنارگذر و سیستم پالسی میزان ماده بوزا به گاز توسط روش‌ها و فرمول‌های متعددی تنظیم می‌شود که از آن جمله می‌توان به تغییر اختلاف فشار ورودی و خروجی برای مدل‌های کنار گذر و نیز تغییر میزان بودهی توسط پنل کنترلی مدل‌های پالسی، بسته به میزان دبی گاز درون لوله اشاره نمود. استاندارد بودهی گاز ۱۰-۲۵ میلی‌گرم مرکاپتان در هر لیتر گاز می‌باشد.

نظارت و بازرسی عملکرد سیستم بودهی

به منظور کسب اطمینان از عملیات بوزنی به گاز می‌بایست بصورت دوره‌ای از آن نمونه‌برداری کرده و روی آن آزمایش انجام داد. دوره‌ی نمونه‌برداری تحت تاثیر عوامل مختلف، متغیر می‌باشد. از عوامل موثر بر میزان بازرسی می‌توان به اندازه شبکه، راه‌اندازی خطوط جدید، نشتی میانگین در شبکه، نوع لوله‌ها و نوع ماده‌ی بوزا اشاره نمود.

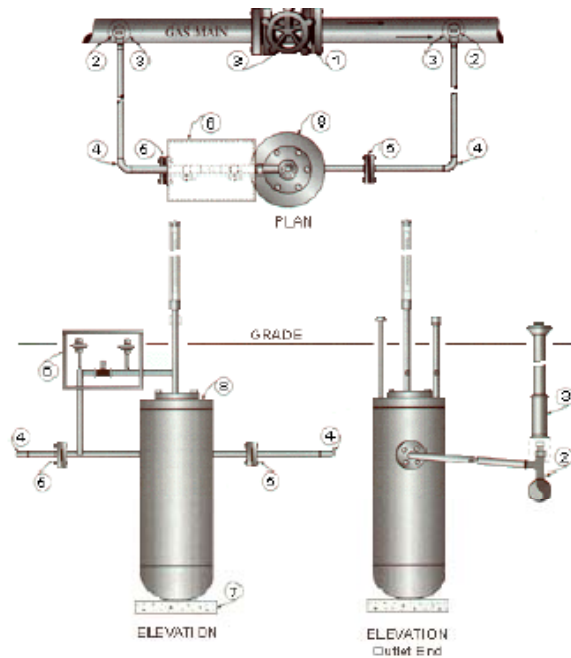
در مورد میزان مرکاپتان علاوه بر کمک از حس بویایی به کمک عیارسنجی گاز و تجزیه آن می‌توان به مقدار ماده‌ی بوزای درون آن پی‌برد. برای محل‌های انجام نمونه‌گیری توصیه شده‌است در جاهایی که احتمال بروز مشکل در آنها بیشتر است، عملیات نمونه‌برداری انجام گردد. از جمله این محل‌ها نقاط کم فشار شبکه می‌باشد.

۲.۳.۷ سیستم‌های بوزنی متداول

با توجه به آنکه گاز طبیعی عاری از هر گونه بویی می‌باشد برای بالا بردن امنیت مصرف به گاز طبیعی ماده‌ی بوزا اضافه می‌کنند. به‌طور کلی دو روش برای بوزنی به گاز متداول‌اند که عبارتند از:

۱. روش کنارگذر

در این روش مقداری گاز از جریان اصلی جدا شده، وارد سیستم بوزنی می‌شود و پس از آنکه ماده‌ی بوزا را جذب کرد مجدداً به جریان اصلی گاز باز می‌گردد و از این طریق ماده بوزا با تمام گاز مخلوط می‌شود. دستگاه‌هایی که با این روش ماده بوزا را به گاز اضافه می‌کنند ساختار ساده‌ای دارند و به همین علت از نظر مکانیکی مشکل خاصی برایشان پیش نمی‌آید. نمونه‌ای از این نوع سیستم بوزنی در شکل ۷-۲۰ نشان داده شده‌است.



شکل ۷-۲۰: سیستم بوزنی با روش کنارگذر

۲. روش پالسی

در روش پالسی پس از آنکه میزان ماده‌ی بوزای مورد نیاز برای تزریق به گاز توسط کاربر به واحد کنترل دستگاه داده شد، دستگاه طی فرآیندی مقدار ماده‌ی بوزای مشخص شده را به گاز اضافه می‌نماید. این دستگاه از دقت نسبتاً خوبی برخوردار است ولی به علت اینکه از دو قسمت الکتریکی (واحد کنترل) و مکانیکی تشکیل شده‌است امکان خرابی آن نسبت به نوع کنارگذر بیشتر بوده و فقط در جاهایی که امکان دسترسی به برق شهری وجود داشته‌باشد بکار می‌رود. نمونه‌ای از این نوع سیستم بوزنی در شکل ۷-۲۱ نشان داده شده‌است.



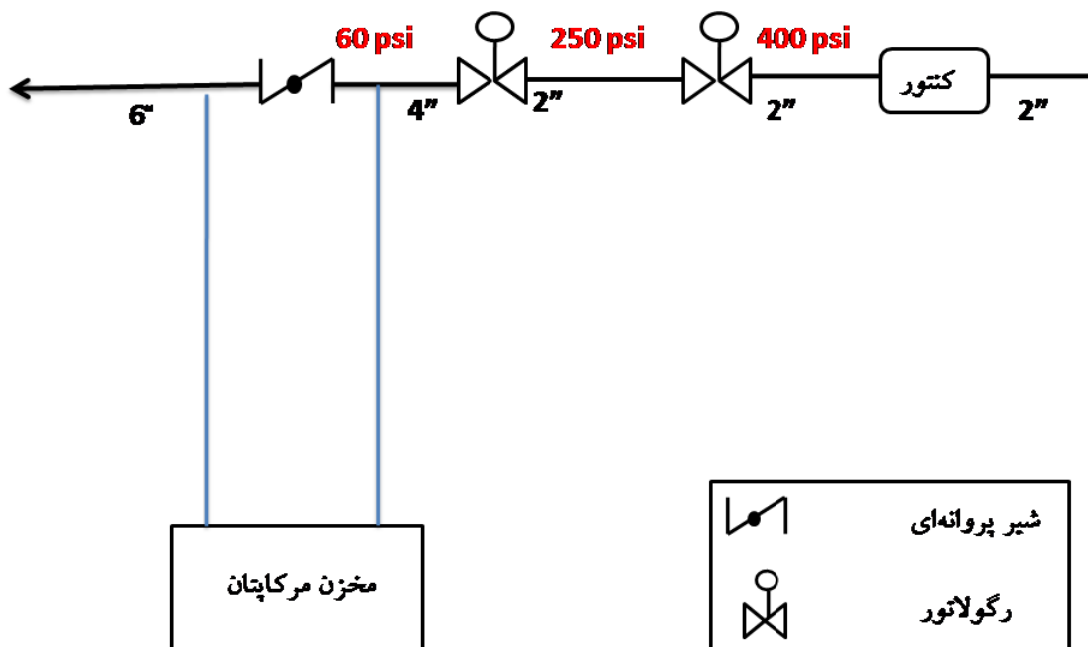
شکل ۷-۲۱: سیستم بوزنی با روش پالسی

۳.۳.۷ اصلاح سیستم بوزنی کنارگذر

از هر دو روش کنارگذر و پالسی در شرکت گاز استان خوزستان استفاده می‌شود. روش پالسی هزینه نگهداری بالاتری داشته و فقط در جاهایی که امکان دسترسی به برق شهری وجود داشته باشد بکار می‌رود. در روش کنارگذر میزان مصرف گاز و دمای گاز بر میزان بودهی تاثیر می‌گذارد و در شرایطی ممکن است مرکاپتان کافی به گاز اضافه نکند. در ادامه شرایط کار سیستم بودهی کنارگذر و اصلاحات اعمال شده به آن توضیح داده خواهد شد.

سیستم کنارگذر قدیمی

سیستم بوزنی کنارگذر طراحی ساده‌تری نسبت به نوع پالسی دارد، همچنین به علت آنکه در ساخت آنها از وسیله‌ی الکتریکی استفاده نشده در جاهایی که امکان دسترسی به برق شهری ندارد بسیار مناسب‌اند. اما چون بودهی به گاز در آنها بر اساس اختلاف فشار صورت می‌گیرد، زمانی که میزان مصرف ایستگاه کمتر از ۳۰ درصد ظرفیت آن باشد به خوبی عمل نمی‌کنند. به عبارت دیگر مطابق با آنچه که در شکل ۷-۲۲ نشان داده شده دبی عبوری از شیر پروانه‌ای باید مقداری باشد تا افت فشار ۴-۵psi در دو طرف آن ایجاد شود و بعنوان نیرو محرکه‌ی تزریق مرکاپتان به گاز عمل کند.

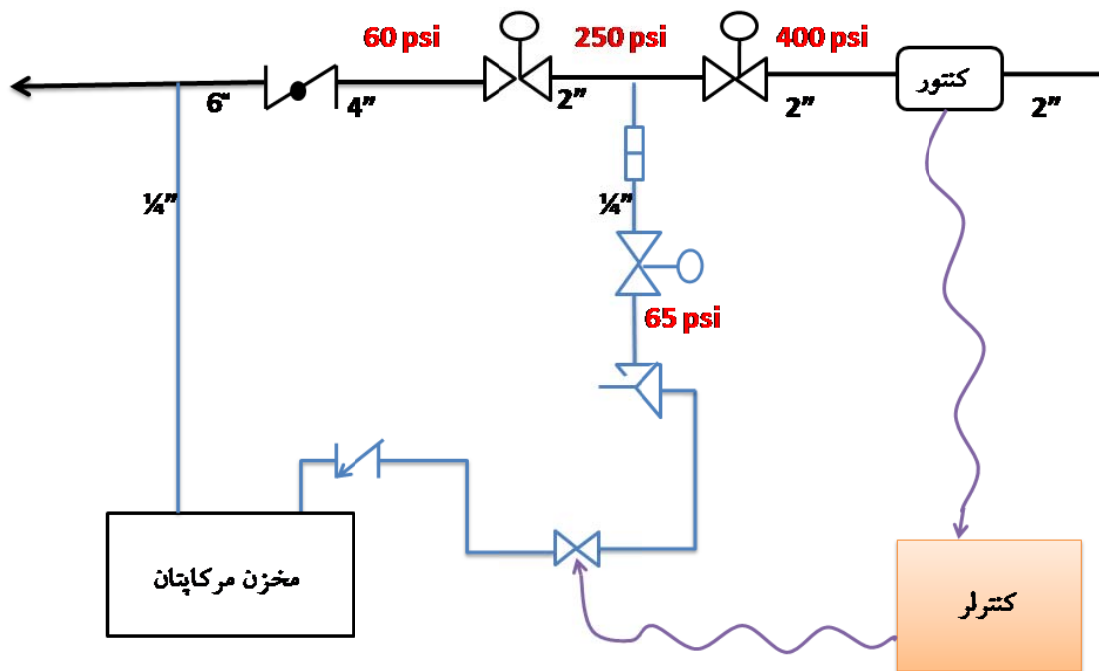


شکل ۷-۲۲: شمایی از سیستم کنارگذر قدیمی

از آنجایی که میزان مصرف گاز در طول سال متغیر است با سیستم بوزنی نشان داده شده در شکل ۷-۲۲ نمی‌توان گاز را همواره به‌خوبی بودار کرد. برای بودار کردن گاز زمانی که میزان مصرف از ۳۰ درصد ظرفیت ایستگاه کمتر شود اپراتور می‌بایست بصورت دستی مرکاپتان به خط اضافه کند یا اینکه مصرف گاز را به‌صورت مصنوعی افزایش دهد یعنی گاز را به اتمسفر تخلیه کند. این معضل در استان خوزستان که جزء مناطق گرمسیر کشور بوده و حدود ۹ ماه از سال هوای گرمی دارد بیشتر اتفاق می‌افتد. در هر صورت ممکن است مصرف مرکاپتان افزایش یابد یا در تزریق مرکاپتان اهمال شود و گاز به‌خوبی بودار نشود و یا گاز هدر رود. برای رفع مشکلات سیستم بوزنی کنارگذر طرحی در شرکت گاز ارائه و اجرا شد که توانسته این نقایص را برطرف کند. در ادامه این طرح شرح داده می‌شود.

سیستم کنارگذر اصلاح‌شده

با توجه به مشکلات ذکرشده در مورد روش‌های کنارگذر و پالسی، طرحی توسط مسئول تعمیرات شرکت گاز جناب آقای مشاک برای اصلاح روش کنارگذر اجرا شد. در این طرح یک انشعاب، که در شکل ۷-۲۳ با رنگ آبی نشان داده شده از جایی که فشار خط ۲۵۰ psi می‌باشد گرفته شده‌است. در این انشعاب از فیلتر، رگولاتور، شیراظمینان، شیربرقی و شیریک‌طرفه استفاده شده‌است. در این طرح اختلاف فشار ۵ psi همواره دو طرف مخزن مرکاپتان اعمال می‌شود. انشعاب گرفته شده از خط با فشار ۲۵۰ psi در رگلاتور فشارش تا ۶۵ psi کاهش می‌یابد. این فشار همواره پشت شیر برقی نگه‌داشته می‌شود تا با دریافت پالس از کنترلر در زمان مناسب باز شده و فشار ۶۵ psi را به ورودی مخزن مرکاپتان اعمال نماید و منجر به تزریق مرکاپتان به جریان گاز گردد. کنترلر از طریق دریافت میزان دبی عبوری از کنتور به شیر برقی فرمان می‌دهد. در شکل ۷-۲۳ شمایی از سیستم کنارگذر اصلاح‌شده نشان داده شده و راهنمای وسایل بکار رفته در این طرح در شکل ۷-۲۴ آورده شده‌است.



شکل ۷-۲۳: شمایی از سیستم کنارگذر اصلاح شده

	شیر پروانه‌ای
	رگولاتور
	شیر یک‌طرفه
	شیر اطمینان
	فیلتر
	شیر برقی

شکل ۷-۲۴: راهنمای مندرجات شکل ۷-۲۳

از شکل ۷-۲۵ تا شکل ۷-۲۹ تجهیزات بکار رفته در طرح نشان داده شده‌اند که در شکل ۷-۲۵ از کنتور به کار رفته و سیم خروجی به کنترلر آمده‌است. فیلتر و رگلاتور انشعاب گرفته شده از خط در شکل ۷-۲۶ مشخص شده و شیر یک‌طرفه نصب شده روی مخزن مرکاپتان در شکل ۷-۲۷ نشان داده شده‌است. در شکل ۷-۲۸ کنترلر بکار رفته در طرح مشاهده می‌شود این کنترلر از طریق دریافت پالس از کنتور و فرمان به شیر برقی مرکاپتان اضافه شده به جریان گاز را کنترل می‌کند. شیر برقی استفاده شده در طرح در شکل ۷-۲۹ نشان داده شده‌است. این شیر فقط برای باز شدن فرمان می‌گیرد

و از طریق فنری که در آن بکار رفته اتوماتیک بسته می‌شود یعنی باز شدن آن بصورت لحظه‌ای می‌باشد.



شکل ۷-۲۵: کنتور استفاده‌شده در طرح



شکل ۷-۲۶: فیلتر و رگلاتور استفاده‌شده در طرح



شکل ۷-۲۷: شیر یک طرفه استفاده شده در طرح



شکل ۷-۲۸: کنترلر استفاده شده در طرح



شکل ۷-۲۹: شیر برقی استفاده‌شده در طرح

گزارشات واحد ایمنی نشان می‌دهد که با اعمال این طرح در زمان‌های مختلف گاز به خوبی بودار شده‌است. از طرفی مصرف مرکاپتان نیز در ایستگاه نسبت به زمانی که تزریق بصورت دستی صورت می‌گرفت بیش از ۵۰ درصد کاهش یافته‌است.

تجهیزات برقی در این طرح با ولتاژ ۱۲ ولت کار می‌کنند پس انرژی الکتریکی مورد نیاز آن‌ها را می‌توان توسط باتری‌های خورشیدی نیز تهیه کرد. در برخی از ایستگاه‌های استان این کار عملی شده و از طریق باتری‌های خورشیدی انرژی الکتریکی مورد نیاز کنترلر تامین شده‌است. پس این طرح در جاهایی که دسترسی به برق شهری نباشد نیز می‌تواند بکار رود.

۴.۳.۷ مراجع

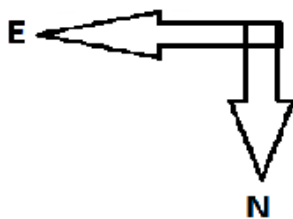
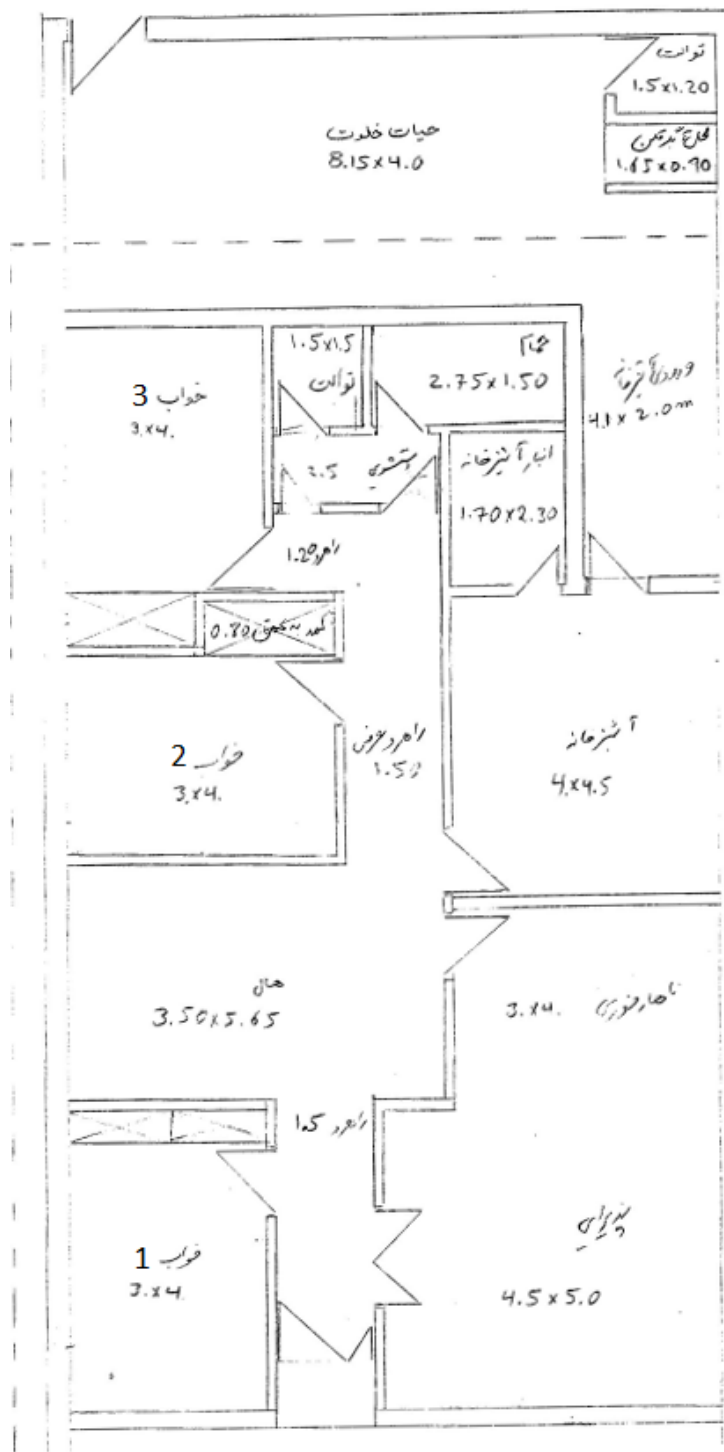
[۱] گزارش ماهیانه فعالیت‌های انجام‌شده در شهریور ماه ۱۳۸۵، KHGCRO MR 1385-03، دفتر پژوهش شرکت گاز خوزستان، بهمن‌ماه ۱۳۸۵.

۴.۷ کاهش مصرف انرژی به کمک عایق کاری سقف

یکی از فعالیت‌های انجام گرفته در سال ۱۳۸۹ بررسی اثر عایق‌کاری سقف منازل مسکونی شرکت گاز استان خوزستان می‌باشد. در این راستا پس از انجام هماهنگی‌های لازم، بازدید از یک نمونه از این منازل صورت گرفت. متأسفانه بدلیل عدم استفاده از عایق‌های حرارتی در جدارها اعم از دیوار، سقف و نیز پنجره‌ها، ساکنین منازل همواره در فصل گرما و سرما دچار مشکل می‌باشند. سقف منازل مذکور از نوع شیروانی می‌باشد. از اینرو فضای داخل خانه تنها با یک لایه‌ی نازک ۵ سانتی‌متری از گچ و رابیتس از فضای بیرون جدا شده است. یکی از راه‌کارهای پیشنهادی جهت بهینه‌سازی مصرف انرژی و تامین آسایش ساکنین، استفاده از عایق‌های حرارتی بر روی بام ساختمان (پوشش گچی) می‌باشد. در این بخش اثر این پارامتر بر کاهش بارهای حرارتی و برودتی ساختمان بررسی می‌گردد.

۱.۴.۷ اطلاعات ساختمان

ساختمان مورد نظر یکی از منازل مسکونی شرکت گاز استان خوزستان بوده که در شهر اهواز نزدیکی میدان شهید بندر واقع است. نقشه‌ی کلی این ساختمان‌ها در شکل ۷-۳۰ ارائه شده است. دیوار از جنس آجر فشاری سوراخدار با ضخامت ۳۵ میلیمتر بوده و پنجره‌ها فلزی تک جداره بدون درزبندی می‌باشند. همانگونه که در نقشه ملاحظه می‌گردد، ساختمان دارای ۳ اتاق خواب، ناهارخوری، پذیرایی و هال مستقل (در ساختمان مورد بازدید دیوار بین ناهارخوری و هال برداشته شده است)، آشپزخانه و سرویس‌های بهداشتی می‌باشد. ضمناً جهت نشان داده شده در شکل ۷-۳۰، صرفاً جهت جغرافیایی منزل مورد بازدید می‌باشد.



شکل ۷-۳۰: نقشه‌ی منازل سازمانی شرکت گاز استان خوزستان

۲.۴.۷ تحلیل وضعیت موجود

با استفاده از نرم‌افزار Carrier، میزان بارحرارتی و برودتی منزل مورد نظر در پیک مصرف تعیین شده و در جدول ۲-۷ ارائه شده‌است. شایان ذکر است مقادیر بارهای مصرفی هر یک از فضاها به صورت مجزا در پیوست (ج) ارائه شده‌است.

جدول ۲-۷: بارحرارتی و برودتی منزل در پیک مصرف (حالت جاری)

Zone 1	DESIGN COOLING			DESIGN HEATING		
	COOLING DATA AT Jul 1600 COOLING OA DB / WB 46.6 °C / 32.9 °C			HEATING DATA AT DES HTG HEATING OA DB / WB 2.6 °C / 0.0 °C		
	OCCUPIED T-STAT 23.9 °C			OCCUPIED T-STAT 22.0 °C		
ZONE LOADS	Details	Sensible (W)	Latent (W)	Details	Sensible (W)	Latent (W)
Window & Skylight Solar Loads	16 m ²	1804	-	16 m ²	-	-
Wall Transmission	95 m ²	3281	-	95 m ²	3122	-
Roof Transmission	0 m ²	0	-	0 m ²	0	-
Window Transmission	16 m ²	1409	-	16 m ²	1287	-
Skylight Transmission	0 m ²	0	-	0 m ²	0	-
Door Loads	3 m ²	389	-	3 m ²	308	-
Floor Transmission	134 m ²	0	-	134 m ²	0	-
Partitions	0 m ²	0	-	0 m ²	0	-
Ceiling	134 m ²	6300	-	134 m ²	5756	-
Overhead Lighting	302 W	276	-	0	0	-
Task Lighting	944 W	908	-	0	0	-
Electric Equipment	1696 W	1607	-	0	0	-
People	20	1277	1303	0	0	0
Infiltration	-	223	364	-	190	0
Miscellaneous	-	0	0	-	0	0
Safety Factor	0% / 0%	0	0	0%	0	0
>> Total Zone Loads	-	17473	1667	-	10663	0

با توجه به جدول فوق مشاهده می‌شود که بار حرارتی ناشی از سقف (Ceiling) برابر با ۵۷۵۶ وات بوده که با توجه به بارحرارتی کل ۱۰۶۶۳ وات، چیزی نزدیک به ۵۴ درصد از توان کل جهت غلبه بر سرمای ورودی از طریق سقف می‌باشد. بار برودتی ناشی از سقف برابر با ۶۳۰۰ وات بوده که برابر با ۳۶ درصد توان کل می‌باشد. با توجه به نقش عمده‌ی سقف در تعیین میزان بارهای حرارتی و برودتی، در قسمت بعد اثر عایق‌کاری سقف بر میزان بارها بررسی شده‌است.

۳.۴.۷ میزان بارهای حرارتی و برودتی با استفاده از عایق

با توجه به تاثیر بسزای سقف در تعیین بارهای حرارتی و برودتی، در این بخش جهت کاهش این بارها، سقف همراه با یکی از عایق‌های متداول مورد بررسی قرار می‌گیرد. عایق مورد نظر یک لایه پشم شیشه به ضخامت ۲/۵ سانتی‌متر می‌باشد. با تغییر ضریب هدایت سقف، محاسبات مجدداً توسط نرم‌افزار Carrier انجام گرفته و نتایج آن در جدول ۳-۷ ارائه شده‌است.

جدول ۷-۳: بار حرارتی و برودتی منزل در پیک مصرف (همراه با عایق)

Zone 1		DESIGN COOLING		DESIGN HEATING		
		COOLING DATA AT Jul 1600		HEATING DATA AT DES HTG		
		COOLING OA DB / WB 46.6 °C / 32.9 °C		HEATING OA DB / WB 2.6 °C / 0.0 °C		
		OCCUPIED T-STAT 23.9 °C		OCCUPIED T-STAT 22.0 °C		
ZONE LOADS	Details	Sensible (W)	Latent (W)	Details	Sensible (W)	Latent (W)
Window & Skylight Solar Loads	16 m ²	1804	-	16 m ²	-	-
Wall Transmission	95 m ²	3281	-	95 m ²	3122	-
Roof Transmission	0 m ²	0	-	0 m ²	0	-
Window Transmission	16 m ²	1409	-	16 m ²	1287	-
Skylight Transmission	0 m ²	0	-	0 m ²	0	-
Door Loads	3 m ²	389	-	3 m ²	308	-
Floor Transmission	134 m ²	0	-	134 m ²	0	-
Partitions	0 m ²	0	-	0 m ²	0	-
Ceiling	134 m ²	4287	-	134 m ²	3917	-
Overhead Lighting	302 W	276	-	0	0	-
Task Lighting	944 W	908	-	0	0	-
Electric Equipment	1696 W	1607	-	0	0	-
People	20	1277	1303	0	0	0
Infiltration	-	223	361	-	190	0
Miscellaneous	-	0	0	-	0	0
Safety Factor	0% / 0%	0	0	0%	0	0
>> Total Zone Loads	-	15460	1663	-	8824	0

مطابق با جداول مذکور با استفاده از تنها ۲/۵ سانتی‌متر عایق پشم شیشه بر روی سقف، بار حرارتی ساختمان نزدیک به ۱۸٪ و بار برودتی آن نزدیک به ۱۲٪ کاهش خواهد یافت. این مسئله با توجه به تعداد زیاد منازل مسکونی می‌تواند منجر به صرفه‌جویی زیادی در مصرف انرژی و نیز تامین آسایش ساکنین گردد. علاوه بر راه‌کار فوق با توجه به عدم رعایت بسیاری از نکات مطرح شده در مقررات ملی ساختمان (مبحث ۱۹) در ساخت منازل مذکور، راه‌کارهای دیگری چون درزبندی پنجره‌ها، استفاده از پنجره‌های چند جداره و بسیاری راه‌کارهای دیگر نیز می‌تواند در کاهش مصرف انرژی ساختمان‌های مذکور موثر واقع گردد.

۵.۷ مقالات ارسالی مرتبط با گاز

یکی از سرفصل‌های فعالیت‌های پژوهشی دفتر گاز هدایت دانشجویان در زمینه‌های تحقیقاتی مرتبط با گاز می‌باشد. دفتر پژوهش در سال‌های اخیر فعالیت‌هایی در زمینه‌ی شبیه‌سازی رفتار گاز در حالت‌های غیر دائم انجام داده که برخی از آنها به‌صورت مقاله در کنفرانس‌ها و مجلات بین‌المللی به چاپ رسیده‌است. در سال ۱۳۸۹ نیز در این زمینه ۳ مقاله با عناوین ذیل منتشر شده‌است.

۱. دقت و کارایی یک مدل رتبه کاسته برای تحلیل جریان گذرای گاز درون خطوط لوله (منتشر

شده در مجله‌ی Petroleum Science and Engineering 2010)

۲. شبیه‌سازی جریان گذرا در خطوط لوله گاز طبیعی توسط روش فضای حالت (ارائه شده در
10th International Conference on Engineering Systems Design and Analysis
(2010)

۳. مدل فضای حالت برای شبیه‌سازی جریان گذرا در خطوط و شبکه‌های گاز طبیعی (پذیرش
شده در Journal of Natural Gas Science and Engineering)

متن کامل مقالات فوق در پیوست د ارائه شده‌است.

الف. اثبات روابط استفاده شده

در ادامه به اثبات دو رابطه‌ی ذکر شده در گزارش پرداخته می‌شود.

الف-۱. اثبات $H_2 - H_1 = C_p(T_2 - T_1)$ با فرض ثابت بودن ضریب تراکم‌پذیری

تعریف آنتالپی بر اساس تغییرات دما، فشار و تغییرات انتروپی، فشار مطابق روابط زیر است [۱].

$$dH = C_p dT + \left(\frac{\partial H}{\partial P}\right)_T dP \quad (\text{الف-۱})$$

$$dH = V dP + T dS \quad (\text{الف-۲})$$

آنتالپی بر اساس تغییرات دما و فشار مطابق رابطه‌ی (الف-۱) و بر اساس تغییرات انتروپی و فشار مطابق رابطه‌ی (الف-۲) تعریف می‌شود. با مشتق‌گیری از رابطه‌ی (الف-۲) در دمای ثابت برحسب فشار، رابطه‌ی زیر بدست می‌آید.

$$\left(\frac{\partial H}{\partial P}\right)_T = V + T \left(\frac{\partial S}{\partial P}\right)_T \quad (\text{الف-۳})$$

با مشتق دوم از رابطه‌ی (الف-۲)، رابطه‌ی زیر بدست می‌آید.

$$\left(\frac{\partial S}{\partial P}\right)_T = -\left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_P \quad (\text{الف-۴})$$

با جایگذاری رابطه‌ی (الف-۴) در رابطه‌ی (الف-۳)، بدست می‌آید:

$$\left(\frac{\partial H}{\partial P}\right)_T = V - T \left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_P \quad (\text{الف-۵})$$

با جایگذاری رابطه‌ی (الف-۵) در (الف-۱) بدست می‌آید:

$$dH = C_p dT + (V - T \left(\frac{\partial V}{\partial T} \right)_P) dP \quad (\text{الف-۶})$$

با داشتن رابطه‌ی حجم برای یک گاز واقعی بصورت:

$$V = \frac{ZRT}{P} \quad (\text{الف-۷})$$

با مشتق‌گیری از رابطه‌ی (الف-۷) و جایگذاری در رابطه‌ی (الف-۶)، نتیجه می‌شود:

$$dH = C_p dT + \left(\frac{ZRT}{P} - \frac{ZRT}{P} - \frac{RT^2}{P} \left(\frac{\partial Z}{\partial T} \right)_P \right) dP \quad (\text{الف-۸})$$

با ثابت فرض کردن ضریب تراکم‌پذیری، $\left(\frac{\partial Z}{\partial T} \right)_P$ صفر شده و پس از انتگرال‌گیری از رابطه‌ی (الف-۸)، می‌توان نوشت:

$$H_2 - H_1 = C_p (T_2 - T_1) \quad (\text{الف-۹})$$

الف.۲ اثبات $C_p = \frac{KZR}{K-1}$ با فرض ثابت بودن ضریب تراکم‌پذیری

تغییرات انرژی داخلی بر اساس تغییرات دما، حجم و تغییرات انتروپی، حجم بصورت زیر است [۱].

$$dU = C_v dT + \left(\frac{\partial U}{\partial V} \right)_T dV \quad (\text{الف-۱۰})$$

$$dU = T ds - PdV \quad (\text{الف-۱۱})$$

با داشتن رابطه‌ی بین انرژی داخلی و آنتالپی بصورت:

$$H = U + PV \quad (\text{الف-۱۲})$$

با مشتق‌گیری از رابطه‌ی (الف-۱۲) و جایگذاری روابط (الف-۱۰) و (الف-۱۱) در آن رابطه‌ی زیر بدست می‌آید.

$$C_p - C_v = \left(\frac{\partial V}{\partial T} \right)_P \left[P + \left(\frac{\partial U}{\partial V} \right)_T \right] \quad (\text{الف-۱۳})$$

با مشتق‌گیری از رابطه‌ی (الف-۱۱)، می‌توان نوشت:

$$\left(\frac{\partial U}{\partial V}\right)_T = T\left(\frac{\partial S}{\partial V}\right)_T - P \quad (\text{الف-۱۴})$$

تغییرات آنتالپی نسبت به تغییرات فشار و انتروپی بصورت زیر است [۱].

$$dH = VdP + TdS \quad (\text{الف-۱۵})$$

با دو بار مشتق‌گیری از رابطه‌ی (الف-۱۵)، نتیجه می‌شود:

$$\left(\frac{\partial S}{\partial V}\right)_T = \left(\frac{\partial P}{\partial T}\right)_V \quad (\text{الف-۱۶})$$

و با جایگذاری رابطه‌ی (الف-۱۶) در (الف-۱۴)، نتیجه می‌شود:

$$\left(\frac{\partial U}{\partial V}\right)_T = T\left(\frac{\partial P}{\partial T}\right)_V - P \quad (\text{الف-۱۷})$$

فشار برای گاز واقعی را می‌توان نوشت:

$$P = \frac{ZRT}{V} \quad (\text{الف-۱۸})$$

با ثابت فرض کردن ضریب تراکم‌پذیری در رابطه‌ی (الف-۱۸)، محاسبه می‌شود و با جایگذاری در رابطه‌ی (الف-۱۷)، بدست می‌آید. با جایگذاری این مقادیر در رابطه‌ی (الف-۱۳) و محاسبه‌ی سمت راست این رابطه، نتیجه می‌شود:

$$C_p - C_v = ZR \quad (\text{الف-۱۹})$$

نسب گرماهای ویژه در فشار ثابت و حجم ثابت بصورت زیر تعریف می‌شود:

$$K = \frac{C_p}{C_v} \quad (\text{الف-۲۰})$$

با جایگذاری مقدار C_v از رابطه‌ی (الف-۲۰) در (الف-۱۹)، نتیجه می‌شود:

$$C_p = \frac{KZR}{K-1} \quad (\text{الف-۲۱})$$

الف.۳ منابع

- [1] John M. Prausnitz, Rudiger n. Lichtenthaler, *Molecular Thermodynamics of Fluid-Phase Equilibria*, Sixth Edition, McGrawHill, 1985

ب فرم تکمیل شده ی ثبت اختراع در شرکت ملی گاز



دفتر (دبیرخانه):

شماره

تاریخ:

فرم پیشنهاد طرح / ساخت داخلی کالا

۱- مشخصات کارآفرین / مخترع :

مدرك تحصیلی:

سال تولد:

شماره ملی :

نام و نام خانوادگی :

تلفن و ایمیل :

آدرس (محل کار/منزل):

توسط کارشناس مربوطه تکمیل گردد.

مشخصات سازمان / شرکت متبوع (در صورتیکه طرح توسط سازمان / شرکت خاصی ارائه میشود):

شرکت گاز استان خوزستان

۲- نام طرح / کالا : (در صورت ثبت اختراع کپی ضمیمه شود)

سیستم بوزنی کنارگذر اصلاح شده

۳- طرح / کالای شما در کدامیک از زمینه های زیر کاربرد دارد؟

- ساخت قطعات و کالاهای خاص مورد نیاز شرکت ملی گاز مربوط به پالایشگاهها، خطوط انتقال و شبکه های گازرسانی (الویت شرکت ملی گاز)

- بهینه سازی مصرف سوخت و صرفه جویی در مصرف گاز و وسایل گازسوز

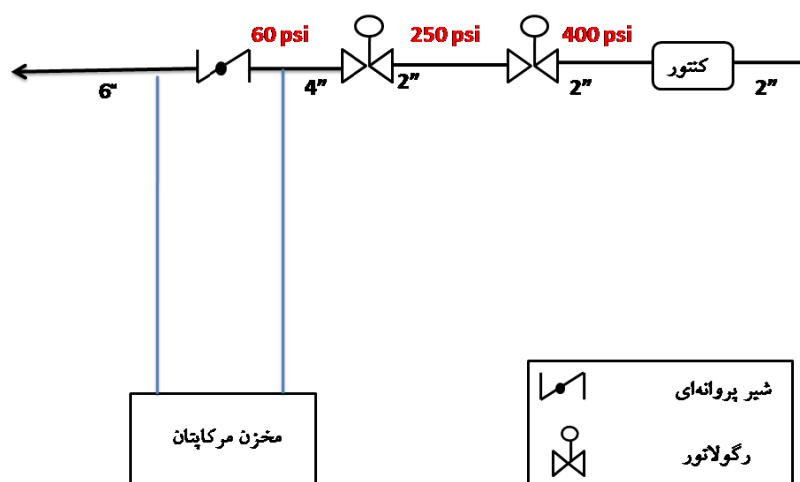
- ایمن سازی وسایل گازسوز خانگی و مصرف کنندگان گاز در واحدهای مسکونی و تجاری

- سایر زمینه ها (مشخص گردد)

۴- طرح / اختراع شما تامین کدامیک از نیازها و یا حل کدامیک از مسایل شرکت گاز را هدف قرار داده است؟

- شرح کامل نیاز / مسئله :

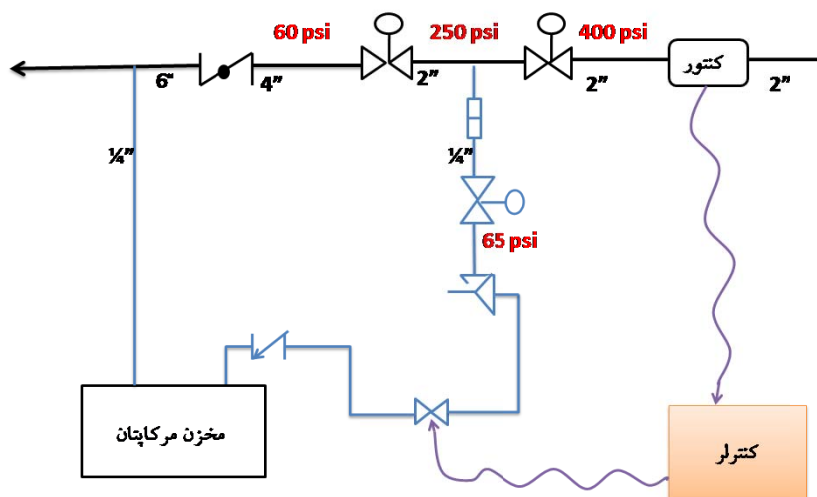
سیستم‌های بوزنی کنارگذر در شرایطی گاز را به خوبی بودار نمی‌کند و ممکن است خطراتی را برای مصرف‌کنندگان به وجود آورد. سیستم‌های مذکور به کمک ایجاد اختلاف فشار در جریان گاز ماده‌ای بودار را به گاز تزریق می‌نمایند. اختلاف فشار ایجاد شده در گاز و در نتیجه میزان بودهی به آن وابسته به دبی جریان می‌باشد. طراحی سیستم‌های متداول بوزنی بر این اساس است که اختلاف فشار مناسب در جریان با عبوردبی حداقل برابر با ۳۰ درصد ظرفیت ایستگاه تامین می‌گردد. به عبارتی با کاهش دبی عبوری از ایستگاه به کمتر از ۳۰ درصد ظرفیت، مقدار مناسب ماده بوزا به خط اضافه نمی‌شود. در مناطق گرمسیر و در فصول گرم با کاهش مصرف گاز، اختلاف فشار کافی ایجاد نشده و بوزنی به گاز از حالت استاندارد خارج می‌گردد. در شکل ۱ شماتیکی از سیستم بوزنی متداول ارائه شده‌است. در این سیستم‌ها با تنظیم شیر پروانه‌ای در دبی‌های مناسب میزان افت لازم در حدود ۴-۵ psi در جریان تولید شده و با هدایت بخشی از گاز به درون مخزن مرکاپتان، فرآیند بودهی گاز تکمیل می‌گردد. روش متداول دیگر استفاده از سیستم‌های پالسی بوده که هزینه‌های نگهداری و تعمیرات بالا نیز از محدودیت‌های این سیستم‌ها می‌باشد از اینرو نمی‌توان آنها را جایگزین مناسبی برای سیستم‌های بوزنی کنارگذر به‌شمار آورد. برای رفع مشکلات سیستم بوزنی کنارگذر طراحی در شرکت گاز استان خوزستان ارائه و اجرا گردیده است. در ادامه خلاصه‌ی طرح پیشنهادی ارائه شده و جزئیات این طرح در پیوست ارائه گردیده‌است.



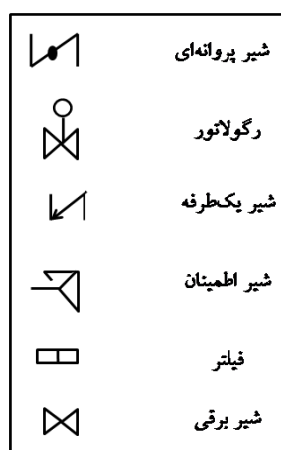
شکل ۱: شمایی از سیستم کنارگذر قدیمی

- شرح چگونگی تامین نیاز یاراه حل مسئله:

در این طرح یک انشعاب (در شکل ۲ با رنگ آبی نشان داده شده) قبل از رگولاتور دوم که فشار خط ۲۵۰ psi می‌باشد، گرفته می‌شود. اجزای نصب شده بر روی این انشعاب مشتمل بر فیلتر، رگولاتور، شیر اطمینان، شیر برقی و شیر یک‌طرفه می‌باشند. جریان گرفته شده از خط اصلی با فشار ۲۵۰ psi در رگولاتور فشارش تا ۶۵ psi کاهش می‌یابد. این فشار همواره پشت شیر برقی نگه‌داشته می‌شود تا با دریافت پالس از کنترلر در زمان مناسب باز شده و فشار ۶۵ psi را به ورودی مخزن مرکاپتان اعمال نموده و منجر به تزریق مرکاپتان به جریان گاز گردد. بدین وسیله اختلاف فشار ۵ psi همواره دو طرف مخزن مرکاپتان اعمال می‌شود. کنترلر از طریق دریافت میزان دبی عبوری از کنترولر به شیر برقی فرمان می‌دهد. و میزان بودهی به گاز به راحتی قابل تنظیم می‌باشد. در شکل ۲ شمایی از سیستم کنارگذر اصلاح شده نشان داده شده و راهنمای وسایل بکار رفته در این طرح در شکل ۳ آورده شده‌است.



شکل ۲: شمایی از سیستم کنارگذر اصلاح شده



شکل ۳: راهنمای مندرجات طرح

۵- آیا اطلاع دقیقی از نیازهای شرکت گاز (اعم از نیازهای کالایی و غیره) دارید؟ (در صورت پاسخ مثبت منبع آن را ذکر فرمایید)

توسط کارشناس مربوطه تکمیل گردد.

۶- آیا فهرست کالاهای مورد نیاز (خرید خارجی) شرکت ملی گاز در سایت (<http://igs.nigc.ir/>) را بررسی نموده اید؟ اگر طرح شما مربوط به کالای خاصی از این فهرست است نام و شماره رمز آن را بنویسید.

4299 MESC GAS ODORISER UNIT

۷- آیا برآوردی از تعداد مصرف سالانه و ارزش ریالی کالای مورد نظر در شرکت گاز در اختیار دارید؟

توسط کارشناس مربوطه تکمیل گردد.

۸- طرح/کالای ساخت شما در حال حاضر در چه مرحله ای از تولید و مصرف است؟

طرح ساخته شده و در برخی از ایستگاه‌های تقلیل فشار استان خوزستان استفاده می‌شود.

۹- آیا در طرح / کالای مورد نظر استانداردهای مرتبط را مورد توجه قرار داده اید؟ (ذکر نمایید)

تجهیزات مشترک بین طرح پیشنهادی و سیستم‌های بوزنی متداول شرکت گاز، مطابق با استانداردهای تعریف شده‌ی شرکت گاز تهیه شده‌اند. از جمله‌ی این تجهیزات که در شکل ۲ نشان داده شده، به موارد زیر می‌توان اشاره کرد:

- کنتور (مطابق با کنتور استفاده شده در سیستم بوزنی پالسی)
- مخزن مرکاپتان (مطابق با کنتور استفاده شده در سیستم بوزنی کنارگذر)
- کنترلر (مطابق با کنتور استفاده شده در سیستم بوزنی پالسی)
- شیر پروانه‌ای و رگولاتورهای استفاده شده در خط اصلی (مطابق با استانداردهای ایستگاه‌های تقلیل فشار)
- سایر تجهیزات بکار رفته همراه مشخصات آنها در پیوست ذکر شده‌است.

۱۰- آیا برای تضمین کیفیت کالای خود آزمایشگاه معتبر داخلی یا خارجی را در نظر گرفته اید؟ (معرفی فرمایید)

پس از بکارگیری این طرح در چند ایستگاه در استان خوزستان، بوزنی گاز به‌خوبی صورت گرفته‌است. گزارشات واحد ایمنی شرکت گاز استان که در پیوست آمده مؤکد این امر می‌باشد. (گزارشات پیوست شود)

۱۱- در مقابل ارائه این طرح / اختراع چه درخواستی از شرکت ملی گاز دارید؟

توسط کارشناس مربوطه تکمیل گردد.

توجه : صرف تکمیل این فرم هیچگونه حقی برای مخترع ایجاد نخواهد نمود و شرکت ملی گاز ایران هیچگونه مسئولیتی را در این زمینه نخواهد پذیرفت.

تاریخ :

نام و امضاء مخترع/سازنده :

ج بارهای حرارتی و برودتی فضاها

در این قسمت بارهای حرارتی و برودتی هر یک از فضاها ارائه شده است. در بخش نخست وضعیت جاری ساختمانها و در بخش بعدی با اعمال عایق حرارتی بر روی سقف محاسبات انجام شده است.

TABLE 1.1.A. COMPONENT LOADS FOR SPACE " bath " IN ZONE " Zone 1 "						
	DESIGN COOLING			DESIGN HEATING		
	COOLING DATA AT Aug 1700 COOLING OA DB / WB 45.8 °C / 32.8 °C OCCUPIED T-STAT 23.9 °C			HEATING DATA AT DES HTG HEATING OA DB / WB 2.6 °C / 0.0 °C OCCUPIED T-STAT 22.0 °C		
		Sensible (W)	Latent (W)		Sensible (W)	Latent (W)
SPACE LOADS	Details			Details		
Window & Skylight Solar Loads	1 m ²	72	-	1 m ²	-	-
Wall Transmission	16 m ²	532	-	16 m ²	515	-
Roof Transmission	0 m ²	0	-	0 m ²	0	-
Window Transmission	1 m ²	61	-	1 m ²	57	-
Skylight Transmission	0 m ²	0	-	0 m ²	0	-
Door Loads	0 m ²	0	-	0 m ²	0	-
Floor Transmission	10 m ²	0	-	10 m ²	0	-
Partitions	0 m ²	0	-	0 m ²	0	-
Ceiling	10 m ²	467	-	10 m ²	435	-
Overhead Lighting	20 W	18	-	0	0	-
Task Lighting	20 W	19	-	0	0	-
Electric Equipment	0 W	0	-	0	0	-
People	5	309	300	0	0	0
Infiltration	-	215	355	-	190	0
Miscellaneous	-	0	0	-	0	0
Safety Factor	0% / 0%	0	0	0%	0	0
>> Total Zone Loads	-	1693	656	-	1197	0

TABLE 1.1.B. ENVELOPE LOADS FOR SPACE " bath " IN ZONE " Zone 1 "						
	Area (m ²)	U-Value (W/(m ² -°K))	Shade Coeff.	COOLING	COOLING	HEATING
				TRANS	SOLAR	TRANS
				(W)	(W)	(W)
S EXPOSURE						
WALL	11	1.692	-	375	-	374
WINDOW 1	1	4.200	0.811	61	72	57
W EXPOSURE						
WALL	4	1.692	-	157	-	141

TABLE 1.2.A. COMPONENT LOADS FOR SPACE " bedroom1 " IN ZONE " Zone 1 "						
	DESIGN COOLING			DESIGN HEATING		
	COOLING DATA AT Jul 1700 COOLING OA DB / WB 45.8 °C / 32.8 °C OCCUPIED T-STAT 23.9 °C			HEATING DATA AT DES HTG HEATING OA DB / WB 2.6 °C / 0.0 °C OCCUPIED T-STAT 22.0 °C		
		Sensible (W)	Latent (W)		Sensible (W)	Latent (W)
SPACE LOADS	Details			Details		
Window & Skylight Solar Loads	2 m ²	148	-	2 m ²	-	-
Wall Transmission	18 m ²	592	-	18 m ²	578	-
Roof Transmission	0 m ²	0	-	0 m ²	0	-
Window Transmission	2 m ²	210	-	2 m ²	196	-
Skylight Transmission	0 m ²	0	-	0 m ²	0	-
Door Loads	0 m ²	0	-	0 m ²	0	-
Floor Transmission	12 m ²	0	-	12 m ²	0	-
Partitions	0 m ²	0	-	0 m ²	0	-
Ceiling	12 m ²	555	-	12 m ²	517	-
Overhead Lighting	22 W	21	-	0	0	-
Task Lighting	22 W	21	-	0	0	-
Electric Equipment	60 W	60	-	0	0	-
People	2	135	70	0	0	0
Infiltration	-	0	0	-	0	0
Miscellaneous	-	0	0	-	0	0
Safety Factor	0% / 0%	0	0	0%	0	0
>> Total Zone Loads	-	1741	70	-	1290	0

TABLE 1.2.B. ENVELOPE LOADS FOR SPACE " bedroom1 " IN ZONE " Zone 1 "						
	Area (m ²)	U-Value (W/(m ² ·K))	Shade Coeff.	COOLING	COOLING	HEATING
				TRANS (W)	SOLAR (W)	TRANS (W)
N EXPOSURE						
WALL	6	1.692	-	191	-	204
WINDOW 1	2	4.200	0.811	210	148	196
E EXPOSURE						
WALL	11	1.692	-	401	-	374

TABLE 1.3.A. COMPONENT LOADS FOR SPACE " bedroom2 " IN ZONE " Zone 1 "						
	DESIGN COOLING			DESIGN HEATING		
	COOLING DATA AT Jul 1600 COOLING OA DB / WB 46.6 °C / 32.9 °C OCCUPIED T-STAT 23.9 °C			HEATING DATA AT DES HTG HEATING OA DB / WB 2.6 °C / 0.0 °C OCCUPIED T-STAT 22.0 °C		
		Sensible (W)	Latent (W)		Sensible (W)	Latent (W)
SPACE LOADS	Details			Details		
Window & Skylight Solar Loads	2 m ²	597	-	2 m ²	-	-
Wall Transmission	8 m ²	272	-	8 m ²	256	-
Roof Transmission	0 m ²	0	-	0 m ²	0	-
Window Transmission	2 m ²	214	-	2 m ²	196	-
Skylight Transmission	0 m ²	0	-	0 m ²	0	-
Door Loads	0 m ²	0	-	0 m ²	0	-
Floor Transmission	12 m ²	0	-	12 m ²	0	-
Partitions	0 m ²	0	-	0 m ²	0	-
Ceiling	12 m ²	565	-	12 m ²	517	-
Overhead Lighting	0 W	0	-	0	0	-
Task Lighting	0 W	0	-	0	0	-
Electric Equipment	0 W	0	-	0	0	-
People	0	0	0	0	0	0
Infiltration	-	0	0	-	0	0
Miscellaneous	-	0	0	-	0	0
Safety Factor	0% / 0%	0	0	0%	0	0
>> Total Zone Loads	-	1649	0	-	968	0

TABLE 1.3.B. ENVELOPE LOADS FOR SPACE " bedroom2 " IN ZONE " Zone 1 "						
	Area (m ²)	U-Value (W/(m ² ·K))	Shade Coeff.	COOLING	COOLING	HEATING
				TRANS (W)	SOLAR (W)	TRANS (W)
E EXPOSURE						
WALL	8	1.692	-	272	-	256
WINDOW 1	2	4.200	0.811	214	597	196

TABLE 1.4.A. COMPONENT LOADS FOR SPACE " bedroom3 " IN ZONE " Zone 1 "						
	DESIGN COOLING			DESIGN HEATING		
	COOLING DATA AT Sep 1900 COOLING OA DB / WB 40.7 °C / 31.1 °C OCCUPIED T-STAT 23.9 °C			HEATING DATA AT DES HTG HEATING OA DB / WB 2.6 °C / 0.0 °C OCCUPIED T-STAT 22.0 °C		
		Sensible (W)	Latent (W)		Sensible (W)	Latent (W)
SPACE LOADS	Details			Details		
Window & Skylight Solar Loads	2 m ²	558	-	2 m ²	-	-
Wall Transmission	6 m ²	203	-	6 m ²	204	-
Roof Transmission	0 m ²	0	-	0 m ²	0	-
Window Transmission	2 m ²	169	-	2 m ²	196	-
Skylight Transmission	0 m ²	0	-	0 m ²	0	-
Door Loads	0 m ²	0	-	0 m ²	0	-
Floor Transmission	12 m ²	0	-	12 m ²	0	-
Partitions	0 m ²	0	-	0 m ²	0	-
Ceiling	12 m ²	447	-	12 m ²	517	-
Overhead Lighting	24 W	22	-	0	0	-
Task Lighting	24 W	23	-	0	0	-
Electric Equipment	60 W	60	-	0	0	-
People	2	144	120	0	0	0
Infiltration	-	0	0	-	0	0
Miscellaneous	-	0	0	-	0	0
Safety Factor	0% / 0%	0	0	0%	0	0
>> Total Zone Loads	-	1626	120	-	916	0

TABLE 1.4.B. ENVELOPE LOADS FOR SPACE " bedroom3 " IN ZONE " Zone 1 "						
	Area (m ²)	U-Value (W/(m ² ·K))	Shade Coeff.	COOLING	COOLING	HEATING
				TRANS	SOLAR	TRANS
				(W)	(W)	(W)
S EXPOSURE						
WALL	6	1.692	-	203	-	204
WINDOW 1	2	4.200	0.811	169	558	196

TABLE 1.5.A. COMPONENT LOADS FOR SPACE "corridor" IN ZONE "Zone 1"						
SPACE LOADS	DESIGN COOLING			DESIGN HEATING		
	COOLING DATA AT Jul 1600 COOLING OA DB / WB 46.6 °C / 32.9 °C OCCUPIED T-STAT 23.9 °C			HEATING DATA AT DES HTG HEATING OA DB / WB 2.6 °C / 0.0 °C OCCUPIED T-STAT 22.0 °C		
	Details	Sensible (W)	Latent (W)	Details	Sensible (W)	Latent (W)
Window & Skylight Solar Loads	0 m ²	0	-	0 m ²	-	-
Wall Transmission	0 m ²	0	-	0 m ²	0	-
Roof Transmission	0 m ²	0	-	0 m ²	0	-
Window Transmission	0 m ²	0	-	0 m ²	0	-
Skylight Transmission	0 m ²	0	-	0 m ²	0	-
Door Loads	0 m ²	0	-	0 m ²	0	-
Floor Transmission	10 m ²	0	-	10 m ²	0	-
Partitions	0 m ²	0	-	0 m ²	0	-
Ceiling	10 m ²	471	-	10 m ²	430	-
Overhead Lighting	40 W	35	-	0	0	-
Task Lighting	40 W	37	-	0	0	-
Electric Equipment	0 W	0	-	0	0	-
People	2	121	120	0	0	0
Infiltration	-	0	0	-	0	0
Miscellaneous	-	0	0	-	0	0
Safety Factor	0% / 0%	0	0	0%	0	0
>> Total Zone Loads	-	664	120	-	430	0

TABLE 1.5.B. ENVELOPE LOADS FOR SPACE "corridor" IN ZONE "Zone 1"						
	Area	U-Value	Shade	COOLING TRANS	COOLING SOLAR	HEATING TRANS
	(m ²)	(W/(m ² ·K))	Coeff.	(W)	(W)	(W)

TABLE 1.6.A. COMPONENT LOADS FOR SPACE "dinning room" IN ZONE "Zone 1"						
	DESIGN COOLING			DESIGN HEATING		
	COOLING DATA AT Jul 1600 COOLING OA DB / WB 46.6 °C / 32.9 °C OCCUPIED T-STAT 23.9 °C			HEATING DATA AT DES HTG HEATING OA DB / WB 2.6 °C / 0.0 °C OCCUPIED T-STAT 22.0 °C		
		Sensible (W)	Latent (W)		Sensible (W)	Latent (W)
SPACE LOADS	Details			Details		
Window & Skylight Solar Loads	7 m ²	863	-	7 m ²	-	-
Wall Transmission	30 m ²	1046	-	30 m ²	981	-
Roof Transmission	0 m ²	0	-	0 m ²	0	-
Window Transmission	7 m ²	642	-	7 m ²	587	-
Skylight Transmission	0 m ²	0	-	0 m ²	0	-
Door Loads	0 m ²	0	-	0 m ²	0	-
Floor Transmission	54 m ²	0	-	54 m ²	0	-
Partitions	0 m ²	0	-	0 m ²	0	-
Ceiling	54 m ²	2535	-	54 m ²	2316	-
Overhead Lighting	149 W	141	-	0	0	-
Task Lighting	743 W	720	-	0	0	-
Electric Equipment	1100 W	1038	-	0	0	-
People	5	284	158	0	0	0
Infiltration	-	0	0	-	0	0
Miscellaneous	-	0	0	-	0	0
Safety Factor	0% / 0%	0	0	0%	0	0
>> Total Zone Loads	-	7270	158	-	3884	0

TABLE 1.6.B. ENVELOPE LOADS FOR SPACE "dinning room" IN ZONE "Zone 1"						
	Area (m ²)	U-Value (W/(m ² ·K))	Shade Coeff.	COOLING	COOLING	HEATING
				TRANS (W)	SOLAR (W)	TRANS (W)
N EXPOSURE						
WALL	8	1.692	-	246	-	263
WINDOW 1	5	4.200	0.811	428	266	391
W EXPOSURE						
WALL	14	1.692	-	535	-	469
E EXPOSURE						
WALL	8	1.692	-	265	-	249
WINDOW 1	2	4.200	0.811	214	597	196

TABLE 1.7.A. COMPONENT LOADS FOR SPACE " kitchen " IN ZONE " Zone 1 "						
	DESIGN COOLING			DESIGN HEATING		
	COOLING DATA AT Jul 1600 COOLING OA DB / WB 46.6 °C / 32.9 °C OCCUPIED T-STAT 23.9 °C			HEATING DATA AT DES HTG HEATING OA DB / WB 2.6 °C / 0.0 °C OCCUPIED T-STAT 22.0 °C		
		Sensible (W)	Latent (W)		Sensible (W)	Latent (W)
SPACE LOADS	Details			Details		
Window & Skylight Solar Loads	1 m ²	46	-	1 m ²	-	-
Wall Transmission	18 m ²	664	-	18 m ²	588	-
Roof Transmission	0 m ²	0	-	0 m ²	0	-
Window Transmission	1 m ²	62	-	1 m ²	57	-
Skylight Transmission	0 m ²	0	-	0 m ²	0	-
Door Loads	3 m ²	389	-	3 m ²	308	-
Floor Transmission	24 m ²	0	-	24 m ²	0	-
Partitions	0 m ²	0	-	0 m ²	0	-
Ceiling	24 m ²	1122	-	24 m ²	1025	-
Overhead Lighting	48 W	41	-	0	0	-
Task Lighting	95 W	88	-	0	0	-
Electric Equipment	476 W	449	-	0	0	-
People	4	292	533	0	0	0
Infiltration	-	0	0	-	0	0
Miscellaneous	-	0	0	-	0	0
Safety Factor	0% / 0%	0	0	0%	0	0
>> Total Zone Loads	-	3153	533	-	1977	0

TABLE 1.7.B. ENVELOPE LOADS FOR SPACE " kitchen " IN ZONE " Zone 1 "						
	Area (m ²)	U-Value (W/(m ² ·°K))	Shade Coeff.	COOLING	COOLING	HEATING
				TRANS	SOLAR	TRANS
				(W)	(W)	(W)
W EXPOSURE						
WALL	17	1.692	-	636	-	558
WINDOW 2	1	4.200	0.811	62	46	57
S EXPOSURE						
WALL	1	1.692	-	28	-	30
DOOR	2	4.800	-	214	-	196
DOOR GLASS	1	5.800	0.880	123	51	113

نتایج ارائه شده در قسمت فوق بر اساس حالت جاری ساختمان‌ها می‌باشد. نتایج حاصل از اعمال عایق حرارتی پشم‌شیشه در ادامه ارائه خواهد شد.

TABLE 1.1.A. COMPONENT LOADS FOR SPACE " bath " IN ZONE " Zone 1 "						
	DESIGN COOLING			DESIGN HEATING		
	COOLING DATA AT Aug 1700			HEATING DATA AT DES HTG		
	COOLING OA DB / WB 45.8 °C / 32.8 °C			HEATING OA DB / WB 2.6 °C / 0.0 °C		
OCCUPIED T-STAT 23.9 °C			OCCUPIED T-STAT 22.0 °C			
		Sensible	Latent		Sensible	Latent
SPACE LOADS	Details	(W)	(W)	Details	(W)	(W)
Window & Skylight Solar Loads	1 m ²	72	-	1 m ²	-	-
Wall Transmission	16 m ²	532	-	16 m ²	515	-
Roof Transmission	0 m ²	0	-	0 m ²	0	-
Window Transmission	1 m ²	61	-	1 m ²	57	-
Skylight Transmission	0 m ²	0	-	0 m ²	0	-
Door Loads	0 m ²	0	-	0 m ²	0	-
Floor Transmission	10 m ²	0	-	10 m ²	0	-
Partitions	0 m ²	0	-	0 m ²	0	-
Ceiling	10 m ²	318	-	10 m ²	296	-
Overhead Lighting	20 W	18	-	0	0	-
Task Lighting	20 W	19	-	0	0	-
Electric Equipment	0 W	0	-	0	0	-
People	5	309	300	0	0	0
Infiltration	-	215	355	-	190	0
Miscellaneous	-	0	0	-	0	0
Safety Factor	0% / 0%	0	0	0%	0	0
>> Total Zone Loads	-	1544	655	-	1058	0

TABLE 1.1.B. ENVELOPE LOADS FOR SPACE " bath " IN ZONE " Zone 1 "						
				COOLING	COOLING	HEATING
	Area	U-Value	Shade	TRANS	SOLAR	TRANS
	(m ²)	(W/(m ² ·°K))	Coeff.	(W)	(W)	(W)
S EXPOSURE						
WALL	11	1.692	-	375	-	374
WINDOW 1	1	4.200	0.811	61	72	57
W EXPOSURE						
WALL	4	1.692	-	157	-	141

TABLE 1.2.A. COMPONENT LOADS FOR SPACE " bedroom1 " IN ZONE " Zone 1 "						
	DESIGN COOLING			DESIGN HEATING		
	COOLING DATA AT Jul 1800			HEATING DATA AT DES HTG		
	COOLING OA DB / WB 44.5 °C / 32.5 °C			HEATING OA DB / WB 2.6 °C / 0.0 °C		
OCCUPIED T-STAT 23.9 °C			OCCUPIED T-STAT 22.0 °C			
		Sensible	Latent		Sensible	Latent
SPACE LOADS	Details	(W)	(W)	Details	(W)	(W)
Window & Skylight Solar Loads	2 m ²	160	-	2 m ²	-	-
Wall Transmission	18 m ²	604	-	18 m ²	578	-
Roof Transmission	0 m ²	0	-	0 m ²	0	-
Window Transmission	2 m ²	202	-	2 m ²	196	-
Skylight Transmission	0 m ²	0	-	0 m ²	0	-
Door Loads	0 m ²	0	-	0 m ²	0	-
Floor Transmission	12 m ²	0	-	12 m ²	0	-
Partitions	0 m ²	0	-	0 m ²	0	-
Ceiling	12 m ²	363	-	12 m ²	352	-
Overhead Lighting	24 W	22	-	0	0	-
Task Lighting	24 W	23	-	0	0	-
Electric Equipment	60 W	60	-	0	0	-
People	2	135	70	0	0	0
Infiltration	-	0	0	-	0	0
Miscellaneous	-	0	0	-	0	0
Safety Factor	0% / 0%	0	0	0%	0	0
>> Total Zone Loads	-	1569	70	-	1125	0

TABLE 1.2.B. ENVELOPE LOADS FOR SPACE " bedroom1 " IN ZONE " Zone 1 "						
	Area	U-Value	Shade	COOLING	COOLING	HEATING
	(m ²)	(W/(m ² ·°K))	Coeff.	TRANS	SOLAR	TRANS
				(W)	(W)	(W)
N EXPOSURE						
WALL	6	1.692	-	193	-	204
WINDOW 1	2	4.200	0.811	202	160	196
E EXPOSURE						
WALL	11	1.692	-	411	-	374

TABLE 1.3.A. COMPONENT LOADS FOR SPACE " bedroom2 " IN ZONE " Zone 1 "						
	DESIGN COOLING			DESIGN HEATING		
	COOLING DATA AT Jul 1600			HEATING DATA AT DES HTG		
	COOLING OA DB / WB 46.6 °C / 32.9 °C			HEATING OA DB / WB 2.6 °C / 0.0 °C		
OCCUPIED T-STAT 23.9 °C			OCCUPIED T-STAT 22.0 °C			
		Sensible	Latent		Sensible	Latent
SPACE LOADS	Details	(W)	(W)	Details	(W)	(W)
Window & Skylight Solar Loads	2 m ²	597	-	2 m ²	-	-
Wall Transmission	8 m ²	272	-	8 m ²	256	-
Roof Transmission	0 m ²	0	-	0 m ²	0	-
Window Transmission	2 m ²	214	-	2 m ²	196	-
Skylight Transmission	0 m ²	0	-	0 m ²	0	-
Door Loads	0 m ²	0	-	0 m ²	0	-
Floor Transmission	12 m ²	0	-	12 m ²	0	-
Partitions	0 m ²	0	-	0 m ²	0	-
Ceiling	12 m ²	385	-	12 m ²	352	-
Overhead Lighting	0 W	0	-	0	0	-
Task Lighting	0 W	0	-	0	0	-
Electric Equipment	0 W	0	-	0	0	-
People	0	0	0	0	0	0
Infiltration	-	0	0	-	0	0
Miscellaneous	-	0	0	-	0	0
Safety Factor	0% / 0%	0	0	0%	0	0
>> Total Zone Loads	-	1468	0	-	803	0

TABLE 1.3.B. ENVELOPE LOADS FOR SPACE " bedroom2 " IN ZONE " Zone 1 "						
				COOLING	COOLING	HEATING
	Area	U-Value	Shade	TRANS	SOLAR	TRANS
	(m ²)	(W/(m ² ·°K))	Coeff.	(W)	(W)	(W)
E EXPOSURE						
WALL	8	1.692	-	272	-	256
WINDOW 1	2	4.200	0.811	214	597	196

TABLE 1.4.A. COMPONENT LOADS FOR SPACE " bedroom3 " IN ZONE " Zone 1 "						
	DESIGN COOLING			DESIGN HEATING		
	COOLING DATA AT Oct 2000			HEATING DATA AT DES HTG		
	COOLING OA DB / WB 34.7 °C / 28.5 °C			HEATING OA DB / WB 2.6 °C / 0.0 °C		
OCCUPIED T-STAT 23.9 °C			OCCUPIED T-STAT 22.0 °C			
		Sensible	Latent		Sensible	Latent
SPACE LOADS	Details	(W)	(W)	Details	(W)	(W)
Window & Skylight Solar Loads	2 m ²	759	-	2 m ²	-	-
Wall Transmission	6 m ²	177	-	6 m ²	204	-
Roof Transmission	0 m ²	0	-	0 m ²	0	-
Window Transmission	2 m ²	114	-	2 m ²	196	-
Skylight Transmission	0 m ²	0	-	0 m ²	0	-
Door Loads	0 m ²	0	-	0 m ²	0	-
Floor Transmission	12 m ²	0	-	12 m ²	0	-
Partitions	0 m ²	0	-	0 m ²	0	-
Ceiling	12 m ²	205	-	12 m ²	352	-
Overhead Lighting	24 W	22	-	0	0	-
Task Lighting	24 W	23	-	0	0	-
Electric Equipment	60 W	60	-	0	0	-
People	2	144	120	0	0	0
Infiltration	-	0	0	-	0	0
Miscellaneous	-	0	0	-	0	0
Safety Factor	0% / 0%	0	0	0%	0	0
>> Total Zone Loads	-	1503	120	-	751	0

TABLE 1.4.B. ENVELOPE LOADS FOR SPACE " bedroom3 " IN ZONE " Zone 1 "						
				COOLING	COOLING	HEATING
	Area	U-Value	Shade	TRANS	SOLAR	TRANS
	(m ²)	(W/(m ² ·°K))	Coeff.	(W)	(W)	(W)
S EXPOSURE						
WALL	6	1.692	-	177	-	204
WINDOW 1	2	4.200	0.811	114	759	196

TABLE 1.5.A. COMPONENT LOADS FOR SPACE "corridor" IN ZONE "Zone 1"						
	DESIGN COOLING			DESIGN HEATING		
	COOLING DATA AT Jul 1600			HEATING DATA AT DES HTG		
	COOLING OA DB / WB 46.6 °C / 32.9 °C			HEATING OA DB / WB 2.6 °C / 0.0 °C		
OCCUPIED T-STAT 23.9 °C			OCCUPIED T-STAT 22.0 °C			
		Sensible	Latent		Sensible	Latent
SPACE LOADS	Details	(W)	(W)	Details	(W)	(W)
Window & Skylight Solar Loads	0 m ²	0	-	0 m ²	-	-
Wall Transmission	0 m ²	0	-	0 m ²	0	-
Roof Transmission	0 m ²	0	-	0 m ²	0	-
Window Transmission	0 m ²	0	-	0 m ²	0	-
Skylight Transmission	0 m ²	0	-	0 m ²	0	-
Door Loads	0 m ²	0	-	0 m ²	0	-
Floor Transmission	10 m ²	0	-	10 m ²	0	-
Partitions	0 m ²	0	-	0 m ²	0	-
Ceiling	10 m ²	321	-	10 m ²	293	-
Overhead Lighting	40 W	35	-	0	0	-
Task Lighting	40 W	37	-	0	0	-
Electric Equipment	0 W	0	-	0	0	-
People	2	121	120	0	0	0
Infiltration	-	0	0	-	0	0
Miscellaneous	-	0	0	-	0	0
Safety Factor	0% / 0%	0	0	0%	0	0
>> Total Zone Loads	-	514	120	-	293	0

TABLE 1.5.B. ENVELOPE LOADS FOR SPACE "corridor" IN ZONE "Zone 1"						
				COOLING	COOLING	HEATING
	Area	U-Value	Shade	TRANS	SOLAR	TRANS
	(m ²)	(W/(m ² ·°K))	Coeff.	(W)	(W)	(W)

TABLE 1.6.A. COMPONENT LOADS FOR SPACE "dinning room" IN ZONE "Zone 1"						
SPACE LOADS	DESIGN COOLING			DESIGN HEATING		
	COOLING DATA AT Jul 1600			HEATING DATA AT DES HTG		
	COOLING OA DB / WB 46.6 °C / 32.9 °C			HEATING OA DB / WB 2.6 °C / 0.0 °C		
OCCUPIED T-STAT 23.9 °C			OCCUPIED T-STAT 22.0 °C			
		Sensible	Latent		Sensible	Latent
	Details	(W)	(W)	Details	(W)	(W)
Window & Skylight Solar Loads	7 m ²	863	-	7 m ²	-	-
Wall Transmission	30 m ²	1046	-	30 m ²	981	-
Roof Transmission	0 m ²	0	-	0 m ²	0	-
Window Transmission	7 m ²	642	-	7 m ²	587	-
Skylight Transmission	0 m ²	0	-	0 m ²	0	-
Door Loads	0 m ²	0	-	0 m ²	0	-
Floor Transmission	54 m ²	0	-	54 m ²	0	-
Partitions	0 m ²	0	-	0 m ²	0	-
Ceiling	54 m ²	1725	-	54 m ²	1576	-
Overhead Lighting	149 W	141	-	0	0	-
Task Lighting	743 W	720	-	0	0	-
Electric Equipment	1100 W	1038	-	0	0	-
People	5	284	158	0	0	0
Infiltration	-	0	0	-	0	0
Miscellaneous	-	0	0	-	0	0
Safety Factor	0% / 0%	0	0	0%	0	0
>> Total Zone Loads	-	6460	158	-	3144	0

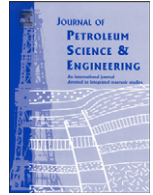
TABLE 1.6.B. ENVELOPE LOADS FOR SPACE "dinning room" IN ZONE "Zone 1"						
	Area	U-Value	Shade	COOLING	COOLING	HEATING
	(m ²)	(W/(m ² ·°K))	Coeff.	TRANS	SOLAR	TRANS
				(W)	(W)	(W)
N EXPOSURE						
WALL	8	1.692	-	246	-	263
WINDOW 1	5	4.200	0.811	428	266	391
W EXPOSURE						
WALL	14	1.692	-	535	-	469
E EXPOSURE						
WALL	8	1.692	-	265	-	249
WINDOW 1	2	4.200	0.811	214	597	196

TABLE 1.7.A. COMPONENT LOADS FOR SPACE " kitchen " IN ZONE " Zone 1 "						
	DESIGN COOLING			DESIGN HEATING		
	COOLING DATA AT Jul 1600			HEATING DATA AT DES HTG		
	COOLING OA DB / WB 46.6 °C / 32.9 °C			HEATING OA DB / WB 2.6 °C / 0.0 °C		
OCCUPIED T-STAT 23.9 °C			OCCUPIED T-STAT 22.0 °C			
		Sensible	Latent		Sensible	Latent
SPACE LOADS	Details	(W)	(W)	Details	(W)	(W)
Window & Skylight Solar Loads	1 m ²	46	-	1 m ²	-	-
Wall Transmission	18 m ²	664	-	18 m ²	588	-
Roof Transmission	0 m ²	0	-	0 m ²	0	-
Window Transmission	1 m ²	62	-	1 m ²	57	-
Skylight Transmission	0 m ²	0	-	0 m ²	0	-
Door Loads	3 m ²	389	-	3 m ²	308	-
Floor Transmission	24 m ²	0	-	24 m ²	0	-
Partitions	0 m ²	0	-	0 m ²	0	-
Ceiling	24 m ²	763	-	24 m ²	697	-
Overhead Lighting	48 W	41	-	0	0	-
Task Lighting	95 W	88	-	0	0	-
Electric Equipment	476 W	449	-	0	0	-
People	4	292	533	0	0	0
Infiltration	-	0	0	-	0	0
Miscellaneous	-	0	0	-	0	0
Safety Factor	0% / 0%	0	0	0%	0	0
>> Total Zone Loads	-	2795	533	-	1650	0

TABLE 1.7.B. ENVELOPE LOADS FOR SPACE " kitchen " IN ZONE " Zone 1 "						
				COOLING	COOLING	HEATING
	Area	U-Value	Shade	TRANS	SOLAR	TRANS
	(m ²)	(W/(m ² ·°K))	Coeff.	(W)	(W)	(W)
W EXPOSURE						
WALL	17	1.692	-	636	-	558
WINDOW 2	1	4.200	0.811	62	46	57
S EXPOSURE						
WALL	1	1.692	-	28	-	30
DOOR	2	4.800	-	214	-	196
DOOR GLASS	1	5.800	0.880	123	51	113

د مقالات ارسالی دفتر گاز

در این بخش مقالات عنوان شده به ترتیب ارائه می گردد.



The accuracy and efficiency of a reduced-order model for transient flow analysis in gas pipelines

M. Behbahani-Nejad^{*}, Y. Shekari

Mechanical Engineering Department, Shahid Chamran University, Ahvaz, 61355-148, Iran

ARTICLE INFO

Article history:

Received 30 November 2008

Accepted 10 May 2010

Keywords:

reduced-order modeling

eigenmode

natural gas

transient flow

ABSTRACT

A reduced-order modeling approach for natural gas transient flow in pipelines is proposed. The Euler equations are considered as the governing equations and solved numerically using the implicit Steger–Warming flux vector splitting method (FSM). Next, the linearized form of the equations is derived and the corresponding eigensystem is obtained. Then, a few dominant flow eigenmodes are used to construct an efficient reduced-order model. Two well-known test cases are presented to demonstrate the accuracy and the computational efficiency of the proposed method. The results obtained using the proposed reduced-order model, are in good agreement with those of the direct numerical method. Moreover, it is shown that the proposed reduced-order model is more efficient than the conventional numerical techniques for transient flow analysis of natural gas in pipelines.

© 2010 Elsevier B.V. All rights reserved.

1. Introduction

Dynamic behavior of natural gas flows in long pipelines is characterized by large time constants, sometimes several hours. The reasons are frictional effects and the large storage capacity of the pipelines. Transients in such complex and large scale systems can be satisfactorily described by the non-homogeneous, nonlinear hyperbolic, inviscid Euler system of conservation laws in one dimensional form (Tentis et al., 2003). Under isothermal conditions, the continuity and momentum equations along with an equation of state, constitute the governing equations describing transient flow in natural gas pipelines.

Traditional methods for numerical analysis of the governing equations are the Method of Characteristics (MOC) (Yow, 1971) and several finite difference schemes such as explicit finite differences (Rachford and Dupont, 1974) and implicit schemes (Wylie et al., 1971). Recent relevant studies used higher resolution explicit Total Variation Diminishing (TVD) Methods for the solution of sharp discontinuities fronts (Zhou and Adewumi, 1995). Recently, the Method of Lines (MOL) has been used with an adaptive mesh for numerical analysis of transient natural gas flows (Tentis et al., 2003). However, one prefers a numerical method which is not only accurate but also with low computational cost.

Reduced-order modeling (ROM) is recently known as an efficient computational technique for unsteady flow analysis. Eigenmodes of the flow are used to construct reduced-order models similar to the normal mode commonly used in structural dynamics. The advantage of a modal approach is that one may construct a reduced-order model by retaining only a few of the original modes. Eigenanalysis of unsteady potential flows about flat airfoils, cascades and wings have been applied by Hall (1994). Romanowski and Dowell (1996) applied ROM to subsonic unsteady flows, based on the Euler equations, around a NACA 0012 airfoil. ROM of unsteady viscous flow in a compressor cascade based on the coupled potential flow and boundary-layer approximation has been applied by Florea et al. (1998), and the status of ROM for unsteady aerodynamic systems has been reviewed by Dowell (1996) and Dowell et al. (1997). Eshfahian and Behbahani-Nejad (2002) applied ROM to the subsonic unsteady flows about complex configurations using a boundary element method. They indicated that the zero eigenvalues of the unsteady model are equal to the number of elements that lie on the body. Behbahani-Nejad et al. (2005) proposed another ROM approach without the static correction requirement based on the boundary element method. They showed that if the zero eigenvalues are removed, ROM can give satisfactory results without the static correction.

Although ROM is a well-known numerical technique, it is not yet applied for transient compressible flow analysis in gas transmission pipelines. In the present work this approach is chosen to achieve an efficient computational scheme for natural gas transient pipe flows. First, the non-homogeneous Euler equations under isothermal

^{*} Corresponding author.

E-mail addresses: bnmorteza@scu.ac.ir (M. Behbahani-Nejad), shekari124@yahoo.com (Y. Shekari).

condition are numerically solved using the implicit Steger–Warming flux vector splitting method and their results are compared with the available experimental data. Next, they are linearized about the steady state condition and the linearized flow results are compared with the corresponding nonlinear ones. Then, the eigensystem of the linearized transient flow is derived and the eigenvalues and eigenvectors are calculated. Based on the above eigenanalysis, a few dominant eigenmodes are used to construct a reduced-order model. Next, the results of the present ROM are compared with those of the direct numerical schemes and its accuracy and efficiency is discussed. Finally, the paper is concluded with some comments about the proposed eigenanalysis and ROM for natural gas transient flow in pipelines.

2. Governing equations

The dynamics of natural gas flow in a long pipeline under isothermal conditions are governed using the Euler equations along with a source term due to the pipe friction effect (Zhou and Adewumi, 1995). In conservative form they are

$$\frac{\partial \mathbf{Q}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{E}(\mathbf{Q})}{\partial x} - \mathbf{H}(\mathbf{Q}) = 0 \quad (1)$$

where

$$\mathbf{Q} = \begin{pmatrix} \rho \\ \rho u \end{pmatrix} \quad \mathbf{E}(\mathbf{Q}) = \begin{pmatrix} \rho u \\ \rho u^2 + c^2 \rho \end{pmatrix} \quad \mathbf{H}(\mathbf{Q}) = \begin{pmatrix} 0 \\ -\frac{\rho f_g u |u|}{2D} \end{pmatrix} \quad (2)$$

In the above equations c is isothermal sound speed, ρ is gas density, u is axial gas velocity, D is diameter of the pipe and f_g is the pipe friction factor.

3. CFD model

The implicit Steger–Warming flux vector splitting method (FSM) is used as the numerical scheme. The finite difference form of the method in delta formulation is (Hoffman and Chiang, 2000):

$$-\left(\frac{\Delta t}{\Delta x} \mathbf{A}_{j-1}^+\right) \Delta \mathbf{Q}_{j-1} + \left(\mathbf{I} + \frac{\Delta t}{\Delta x} (\mathbf{A}_j^+ - \mathbf{A}_j^-) - \Delta t \mathbf{B}_j\right) \Delta \mathbf{Q}_{j-1} + \left(\frac{\Delta t}{\Delta x} \mathbf{A}_{j+1}^-\right) \Delta \mathbf{Q}_{j+1} = -\frac{\Delta t}{\Delta x} (\mathbf{E}_j^+ - \mathbf{E}_{j-1}^+ + \mathbf{E}_{j+1}^- - \mathbf{E}_j^-) + \Delta t \mathbf{H}_j \quad (3)$$

where

$$\Delta \mathbf{Q} = \mathbf{Q}^{n+1} - \mathbf{Q}^n \quad (4)$$

and \mathbf{I} is the identity matrix, \mathbf{A} and \mathbf{B} are Jacobean matrices which are defined as:

$$\mathbf{A} = \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial \mathbf{Q}}, \quad \mathbf{B} = \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial \mathbf{Q}} \quad (5)$$

Moreover, \mathbf{A}^+ and \mathbf{A}^- are respectively the positive and negative parts of the Jacobean matrix \mathbf{A} , namely:

$$\mathbf{A}^+ = \begin{pmatrix} \frac{c^2 - u^2}{2c} & \frac{u + c}{2c} \\ \frac{(u + c)^2 (c - u)}{2c} & \frac{(u + c)^2}{2c} \end{pmatrix} \quad \mathbf{A}^- = \begin{pmatrix} \frac{u^2 - c^2}{2c} & \frac{c - u}{2c} \\ \frac{(u + c)(c - u)^2}{2c} & -\frac{(c - u)^2}{2c} \end{pmatrix} \quad (6)$$

In addition, \mathbf{E}^+ and \mathbf{E}^- are the positive and negative parts of the flux vector \mathbf{E} which are represented as:

$$\mathbf{E}^+ = \begin{pmatrix} \frac{\rho(u + c)}{2} \\ \frac{\rho(u + c)^2}{2} \end{pmatrix} \quad \mathbf{E}^- = \begin{pmatrix} \frac{\rho(u - c)}{2} \\ \frac{\rho(u - c)^2}{2} \end{pmatrix} \quad (7)$$

When Eq. (3) is applied to each grid point, a block tridiagonal system of algebraic equations is obtained. This equations system is solved at each time step, and results in $\Delta \mathbf{Q}$. Next, \mathbf{Q} at the advanced time step can be calculated using Eq. (4).

4. Linearized finite difference equations

To do the eigenanalysis and construct a reduced-order model based on the flow eigenmodes, it is necessary to linearize the finite difference equations. For linearization, the flow field variables at each time step are considered as:

$$\mathbf{Q}^{n+1} = \mathbf{Q}^o + \hat{\mathbf{Q}}^{n+1} \quad (8)$$

where \mathbf{Q}^o is the corresponding steady state value and $\hat{\mathbf{Q}}$ is a small perturbation about it. Substituting Eq. (8) into Eq. (3) and doing some manipulations yields:

$$-\left(\frac{\Delta t}{\Delta x} \mathbf{A}_{j-1}^{o+}\right) \hat{\mathbf{Q}}_{j-1}^{n+1} + \left(\mathbf{I} + \frac{\Delta t}{\Delta x} (\mathbf{A}_j^{o+} - \mathbf{A}_j^{o-}) - \Delta t \mathbf{B}_j^o\right) \hat{\mathbf{Q}}_j^{n+1} + \left(\frac{\Delta t}{\Delta x} \mathbf{A}_{j+1}^{o-}\right) \hat{\mathbf{Q}}_{j+1}^{n+1} = \hat{\mathbf{Q}}_j^n \quad (9)$$

The above linearized equation can be represented as:

$$\mathbf{W}^o \hat{\mathbf{Q}}^{n+1} = \mathbf{I} \hat{\mathbf{Q}}^n + \mathbf{V}^{n+1} \quad (10)$$

where \mathbf{V} is a vector consisting the imposed values by the boundary conditions and \mathbf{W}^o is the coefficient matrix which made by the left hand side terms of Eq. (10). The finite difference Eq. (9) is the linearized form of FSM and therefore it is referred as linearized FSM.

5. Eigenanalysis and ROM

For zero forcing function, \mathbf{V} , one can set $\hat{\mathbf{Q}}_i = x_i \exp(\lambda_i t)$ and $z_i = \exp(\lambda_i \Delta t)$ to obtain the following generalized eigenvalue problem:

$$z_i \mathbf{W}^o \mathbf{x}_i = \mathbf{I} \mathbf{x}_i \quad (11)$$

where λ_i and z_i are i th eigenvalues in λ -plane and z -plane, respectively, and \mathbf{x}_i is the corresponding eigenvector. More generally Eq. (11) can be rewritten as:

$$\mathbf{Z} \mathbf{W}^o \mathbf{X} = \mathbf{I} \mathbf{X} \quad (12)$$

where \mathbf{Z} is a diagonal matrix containing the eigenvalues and \mathbf{X} is a matrix with columns that are the right eigenvectors. On the other hand, the left eigenvectors satisfy the following relation.

$$(\mathbf{W}^o)^T \mathbf{Y} \mathbf{Z} = \mathbf{I} \mathbf{Y} \quad (13)$$

where \mathbf{Y} is a matrix with columns that are the left eigenvectors. If the eigenvectors are normalized suitable, they satisfy the orthogonality conditions:

$$\mathbf{Y}^T \mathbf{W}^o \mathbf{X} = \mathbf{I} \quad (14)$$

$$\mathbf{Y}^T \mathbf{I} \mathbf{X} = \mathbf{Z}$$

The dynamic behavior of the fluid can be represented as the sum of the individual eigenmodes, that is,

$$\hat{Q} = Xc \tag{15}$$

where c is the vector of normal mode coordinates. Substitution of Eq. (15) into Eq. (10), premultiplying by Y^T and making use of the orthogonality condition, gives a set of N uncoupled equations for the modal coordinates c ,

$$c^{n+1} = Zc^n + Y^T V^{n+1} \tag{16}$$

Now one may construct a reduced-order model by retaining only a few dominant eigenmodes. Low frequency eigenmodes are activated earlier the others and hence they are dominant. Thus, the dominant eigenmodes are those that their corresponding eigenvalues in λ -plane have small imaginary parts.

For many situations, the above procedure cannot give satisfactory results and one must apply the static correction (Hall, 1994). To apply the static correction, the unsteady solution is decomposed into two parts. One part is equivalent to the response of the system if the disturbance is quasi-steady, and the other part is the dynamic part. Next, the dynamic part is determined via reduced-order modeling. Therefore, the quasi-steady solution should be obtained for each time step that alters the efficiency of reduced-order modeling. Behbahani-Nejad et al. (2005) have shown that when there is no zero eigenvalue, there is no quasi-steady eigenmode and thus, it is likely to construct a reduced-order model without the static correction requirement.

6. Results and discussions

In this section the results are presented and discussed to validate the numerical techniques and the proposed ROM. Two well-known test cases are considered and their results are compared.

6.1. Test case 1

The first test case is a gas pipeline with 91.44 m length and 0.61 m in diameter. This test case has been investigated by Zhou and Adewumi (1995) and Dempsey et al. (1972). The pipeline initial gas pressure is 4.136 MPa and the acoustic wave speed of 348.1 m s^{-1} . The friction factor is 0.03 and the downstream is closed. The upstream inflow begins to increase linearly and reaches 17 MMSCMD (million standard cubic meters per day) at 0.145 s, then decreases again linearly to zero at 0.29 s and remains constant. Fig. 1 illustrates this test case along with its boundary conditions, schematically.

The computational domain consists 101 grid points equally spaced along the pipeline. Fig. 2 shows the pressure time changes at the pipeline inlet. As is shown in the figure, the results obtained by the present FSM and linearized FSM are in good agreement with those of Zhou and Adewumi and the experimental data. However, there are some differences between the present FSM results with those of Zhou and Adewumi. But, when the computational results are compared with the experiments, it seems that all of them have the nearly similar acceptable errors. The gas flow rate time history at the midpoint of pipeline is depicted in Fig. 3. As is illustrated, satisfactory results are obtained by the present FSM. Moreover, Fig. 4 shows that the same

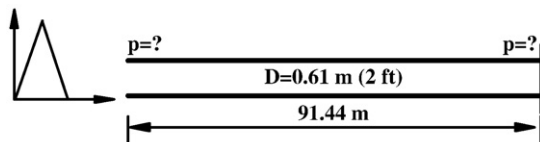


Fig. 1. Geometry of the pipeline and its B. Cs (case 1).

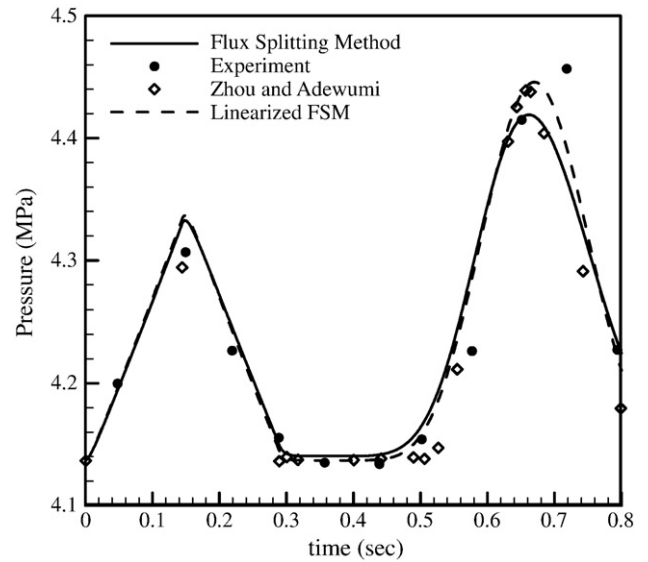


Fig. 2. Comparison of pressure history at the inlet of the pipeline (case 1).

behavior is resulted when the present FSM is applied for the outlet pressure time history.

The interesting point is the accuracy of the results of the present linearized FSM. As is shown in the figures, the linearized FSM can predict the transient behavior of the flow characteristics as nearly accurate as the nonlinear models. Thus, one can construct a reduced-order model based on the linearized equations to estimate the transient flow characters in gas pipelines more efficiently.

At the moment, the present eigenanalysis results are discussed. The eigensystem has 202 eigenvalues since there are 101 grid points in the computational domain and two unknowns at each node. The eigenvalues of the present eigenanalysis in z -plane are shown in Fig. 5. The first 100 eigenvalues in λ -plane are illustrated in Fig. 6. As is shown in Fig. 5, this eigensystem has no zero eigenvalue in the z -plane and therefore one can get satisfactory results without the static correction requirement. On the other hand, Fig. 6 illustrates that the real part of all eigenvalues are negative. From physical point of view, it means that the present numerical technique is stable.

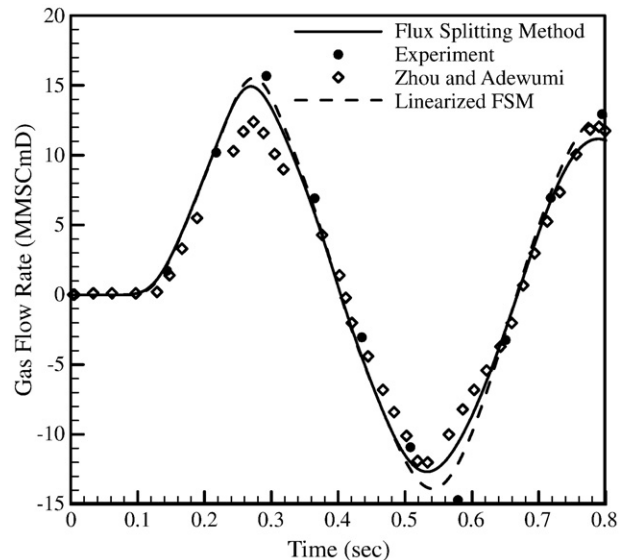


Fig. 3. Comparison of gas flow rate history at midpoint (case 1).

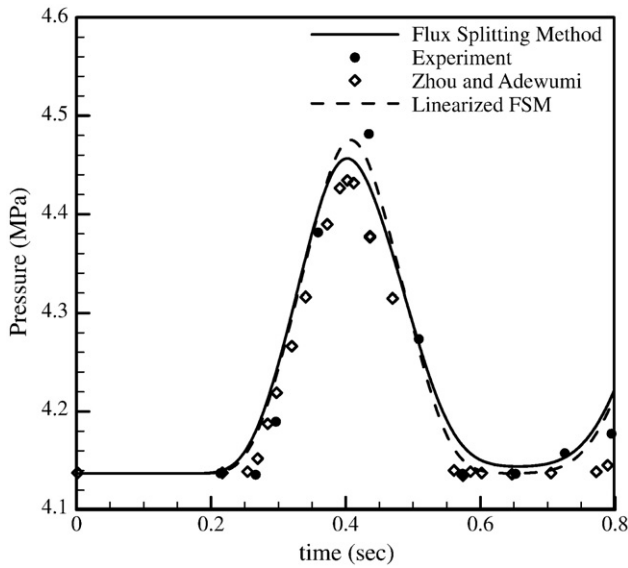


Fig. 4. Comparison of pressure history at the outlet of the pipeline (case 1).

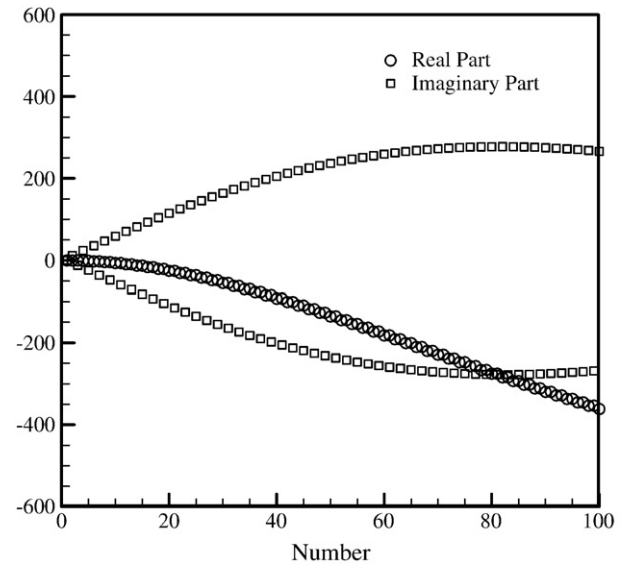


Fig. 6. The first 100 modes in λ -plane (case 1).

The eigenvalues discussed in the preceding paragraph are used to construct a reduced-order model. As there is no zero eigenvalue, it is expected that the present reduced-order model for natural gas transient flow gives satisfactory results without the static correction. The inlet pressure and the midpoint gas flow rate time histories are shown in Figs. 7 and 8, respectively. It is observed that the results of present ROM with all eigenmodes are absolutely the same as those obtained by the direct method. On the other hand, ROM with 5 eigenmodes results in some relative errors at the beginning times but when more eigenmodes are considered, the results of proposed ROM will be more and more accurate. The same behavior is observed in Fig. 9 for the pressure time history at the pipe outlet. As is shown, it seems that 10 eigenmodes are enough to get satisfactory results using the proposed ROM.

According to the authors' experiences in reduced-order modeling, the number of modes that are excited for any given transient depends on the forcing function reduced frequency (the given transient reduced frequency). If the forcing function is harmonic with low reduced frequency, one can perhaps get satisfactory results using just one eigenmode (Esfahanian and Behbahani-Nejad, 2002).

On the other hand, if the reduced frequency is high, the large numbers of modes are excited and it is necessary to take into account much more eigenmodes to predict the transient.

To study the efficiency of the proposed ROM, CPU times are presented in Table 1. Since CPU time is relatively low for this test case, it is also normalized by the direct computational time and is presented as well. As is indicated in the table, the normalized computational times for the proposed ROM are about 0.25 and 0.375 when 5 and 10 eigenmodes are considered, respectively. It maybe seems that the time saving is not very dramatic. However, the motivation for the present work was to show that the reduced-order models indeed work well for the use in pipelines calculations. Moreover, it is expected that the reduced-order models are more efficient when they are applied for vast networks.

6.2. Test case 2

A 72259.5 m long pipeline of 0.2 m diameter is considered as another test case as is shown in Fig. 10. The above test case, in which its experimental results are available, has been studied by Taylor et al.

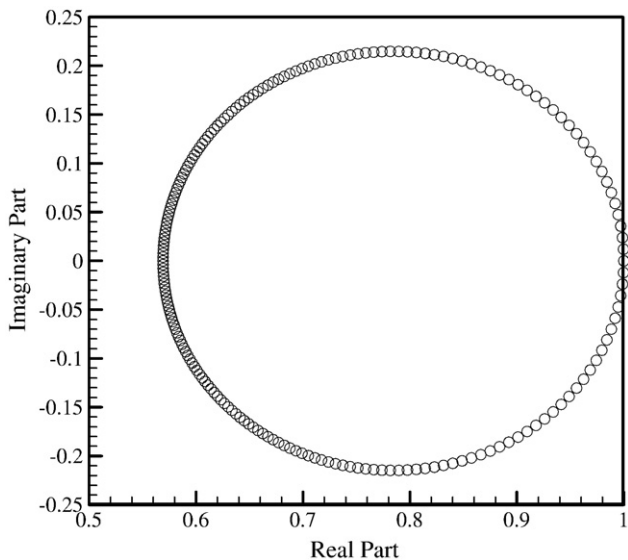


Fig. 5. Eigenvalues in z -plane (case 1).

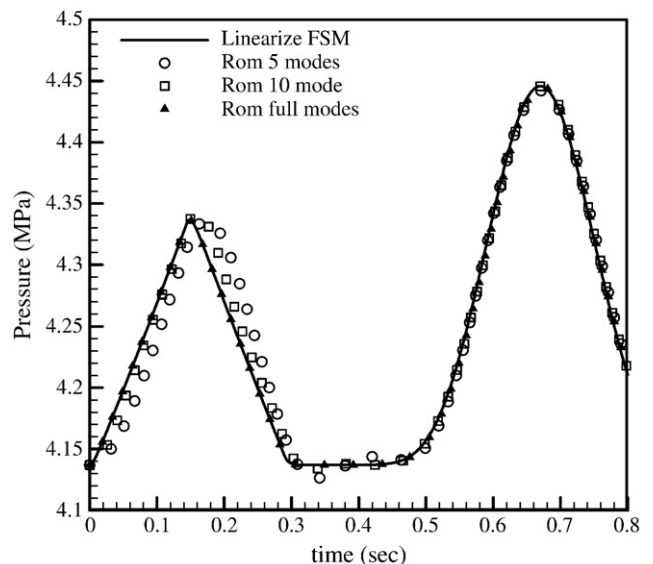


Fig. 7. Comparison of pressure history at the inlet of the pipeline (case 1).

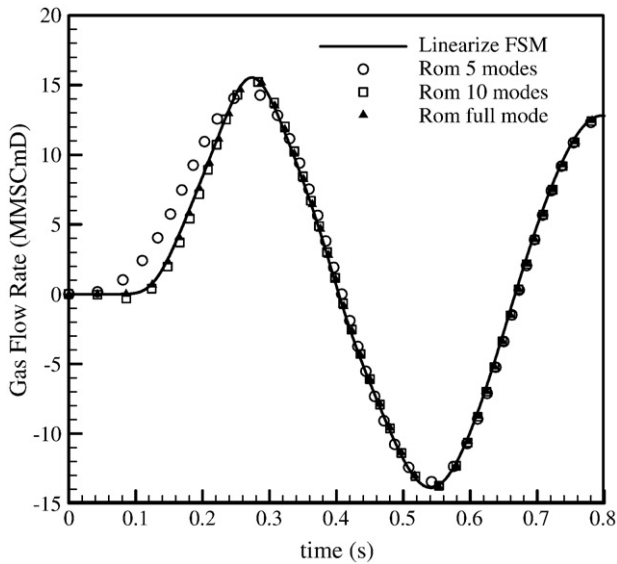


Fig. 8. Comparison of gas flow rate history at midpoint (case 1).

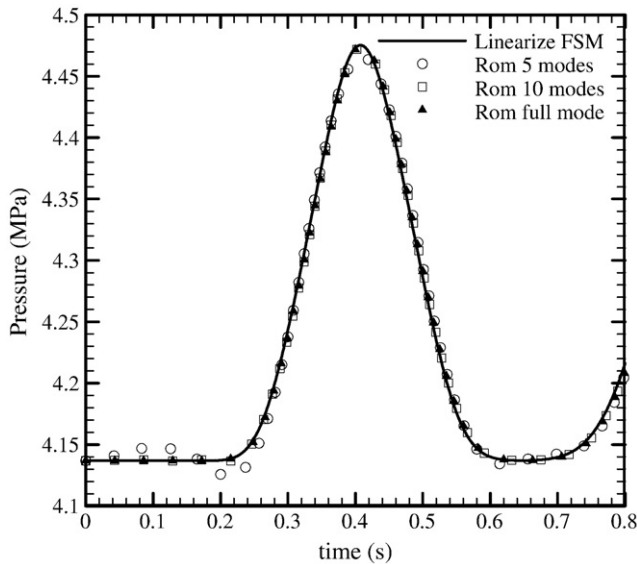


Fig. 9. Comparison of pressure history at the outlet of the pipeline (case 1).

(1962), Zhou and Adewumi (1995), and also by Tentis et al. (2003). The pipeline transports natural gas of 0.675 specific gravity at 10 °C. The gas viscosity is $11.84 \times 10^{-6} \text{ kg m}^{-1} \text{ s}^{-1}$ while the pipeline wall roughness is 0.617 mm. At the pipeline's inlet, the gas pressure and

Table 1
Efficiency analysis of proposed ROM.

Case	Time interval (s)	Number of nodes	Method	CPU time (s)	CPU time (normalized)
1	0.001	100	Direct	0.25	1.0
			ROM	0.09375	0.25
			5 Modes		
			ROM	0.0625	0.375
2	1.00	1000	Direct	253	1.0
			ROM	73	0.289
			4 Modes		
			ROM	83	0.328
			5 Modes		

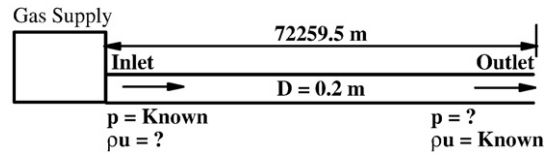


Fig. 10. Geometry of the pipeline and its B. Cs (case 2).

density are kept constant at 4.14 MPa, whereas the pipe's mass flow rate at the outlet varies with a 24-h cycle, corresponding to changes in consumer demand within a day as illustrated in Fig. 11.

The computational domain is discretized into 1000 segments. Fig. 12 illustrates the present results of FSM along with those of Tentis et al. (2003), Zhou and Adewumi (1995), and Taylor et al. (1962) for pressure time changes at the pipe outlet. Again, the accuracy of present linearized FSM is an interesting point and the linearized FSM can predict the transient flow behavior as nearly accurate as the nonlinear models. In Fig. 13 the gas pressure at some different points are presented and compared with those by Zhou and Adewumi

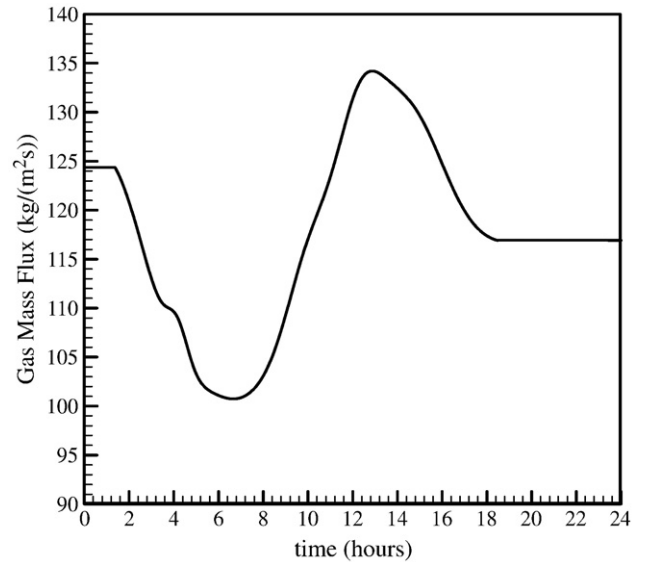


Fig. 11. Imposed outlet mass flux (case 2).

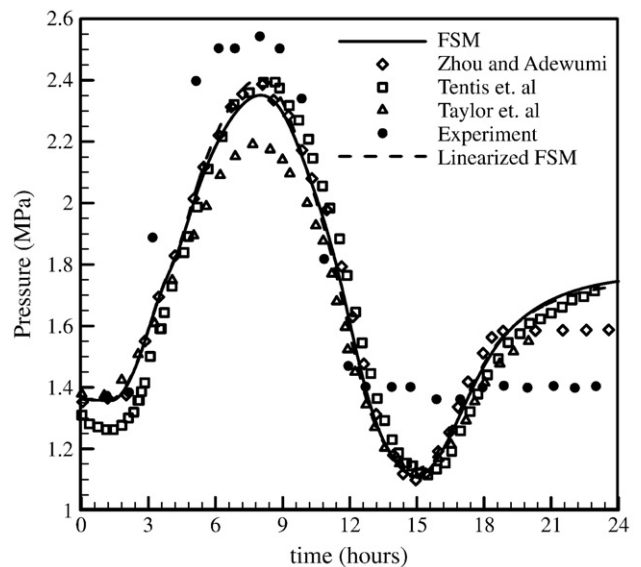


Fig. 12. Comparison of pressure history at the outlet of the pipeline (case 2).

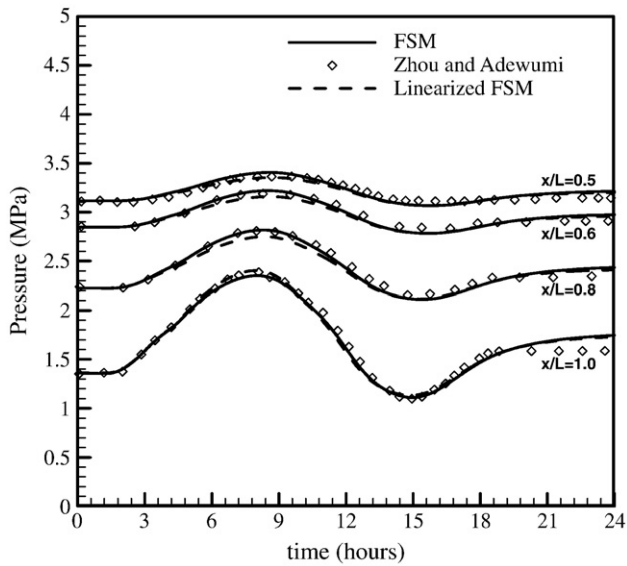


Fig. 13. Comparison of pressure history at different points of the pipeline (case 2).

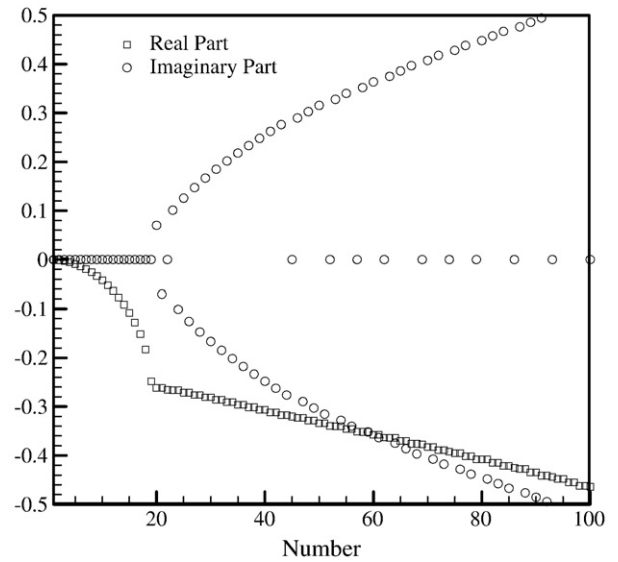


Fig. 15. The first 100 modes in λ -plane (case 2).

(1995). It is observed that the present results are in relatively good agreement with those obtained by the others.

Next, the results of the present eigenanalysis are discussed. The computational domain has 1001 grid points therefore, there are 2002 eigenvalues. The eigenvalues of the present eigenanalysis in z -plane are shown in Fig. 14. The first 100 eigenvalues in λ -plane are illustrated in Fig. 15. As is shown in the figures, it is again observed that the eigensystem has no zero eigenvalue in the z -plane and the real part of all eigenvalues is negative. Thus, it is expected that one can get satisfactory results using the proposed ROM.

The eigenvalues discussed in the preceding paragraph are used to construct a reduced-order model. Fig. 16 shows the pressure time history at the pipe outlet. It is observed that the results of the present ROM with only 4 or 5 eigenmodes are in excellent agreement with those of the direct numerical method. The similar results are obtained for the pressure time changes at some another points along the pipe and are shown in Fig. 17. Finally, the efficiency of the proposed ROM are confirmed when its CPU times are compared with the direct method. As

is presented in Table 1, the normalized computational times for this test case are about 0.289 and 0.328 for 4 and 5 eigenmodes, respectively.

7. Conclusion

The linearized forms of the governing equations can give satisfactory results with an enough degree of accuracy in many natural gas transient pipe flows. In the present work, they are used to construct a proper reduced-order model. The proposed eigenanalysis show that there is no zero eigenvalue in the z -plane and therefore it is likely to construct reduced-order models without the static correction requirement. On the other hand, it is shown that the real part of all eigenvalues in z -plane is negative. Thus, the numerical stability of the proposed method is confirmed. Consequently, the proposed ROM can be used to analyze transient flow of natural gas in pipelines with sufficient accuracy and without the static correction requirement. The obtained results indicate that

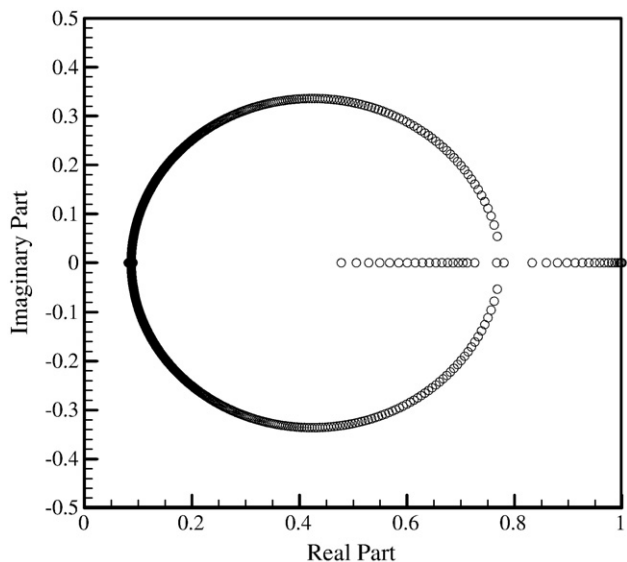


Fig. 14. Eigenvalues in z -plane (case 2).

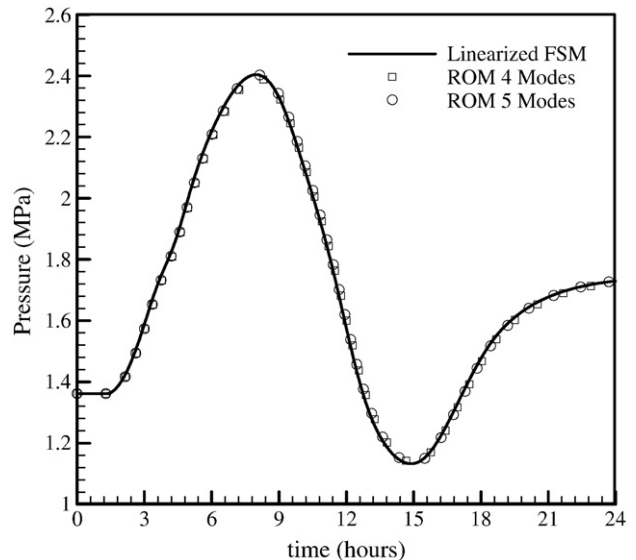


Fig. 16. Comparison of pressure history at outlet (case 2).

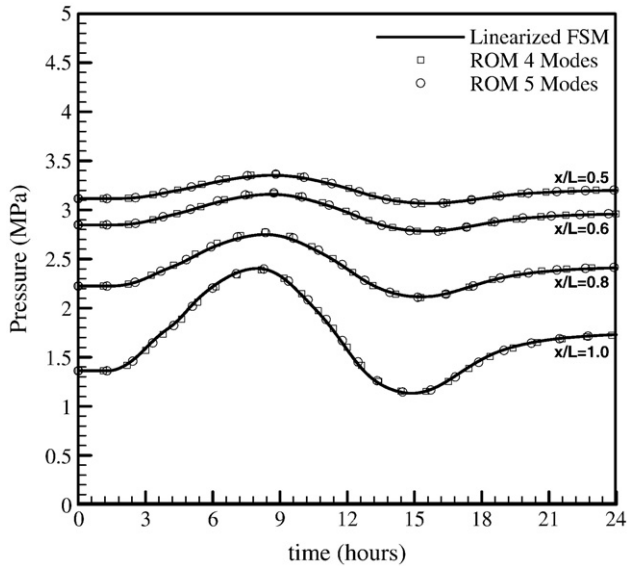


Fig. 17. Comparison of pressure history at outlet (case 2).

the proposed model is computationally more efficient than the direct numerical method. Moreover, the results show that the proposed reduced-order model can analyze natural gas transient flows with sufficient accuracy.

Acknowledgements

Khuzestan Gas Company and Shahid Chamran University are acknowledged for providing technical, administrative, and financial assistance.

References

- Behbahani-Nejad, M., Haddadpour, H., Esfahanian, V., 2005. Reduced-order modeling of unsteady flows without static correction requirement. *J. Aircr.* 42 (4), 882–886.
- Dempsey, R.J., Rachford, H.H., Nolen, J.S., 1972. Gas Supply Analysis—States of the Arts. Paper Presented at AGA Conf, San Francisco.
- Dowell, E.H., 1996. Eigenmode analysis in unsteady aerodynamics: reduced order models. *AIAA J.* 34 (8), 1578–1588.
- Dowell, E.H., Hall, K.C., Romanowski, M.C., 1997. Eigenmode analysis in unsteady aerodynamics: reduced order models. *Appl. Mech. Rev.* 50 (6), 371–385.
- Esfahanian, V., Behbahani-Nejad, M., 2002. Reduced order modeling of unsteady flows about complex configurations using the boundary element method. *ASME J. Fluids Eng.* 124 (4), 988–993.
- Florea, R., Hall, K.C., Cizmas, P.G., 1998. Reduced-order modeling of unsteady viscous flow in a compressor cascade. *AIAA J.* 36, 1039–1048.
- Hall, K.C., 1994. Eigenanalysis of unsteady flows about airfoils, cascades, and wings. *AIAA J.* 32, 2426–2432.
- Hoffman, A.K., Chiang, S.T., 2000. *Computational Fluid Dynamics For Engineers*. Wichita, Kansas.
- Rachford, H.H., Dupont, T.A., 1974. A fast highly accurate means of modeling transient flow in gas pipelines by variational methods. *Soc. Petrol. Eng. J.* 356–362.
- Romanowski, M.C., Dowell, E.H., 1996. Reduced order Euler equations for unsteady aerodynamic flows: numerical techniques. *AIAA paper* 96-0528.
- Taylor, T.D., Wood, N.E., Power, J.E., 1962. A computer simulation of gas flow in long pipelines. *Soc. Pet. Eng. Trans. AIME* 225, 297–302.
- Tentis, E., Margaris, D., Papanikas, D., 2003. Transient gas flow simulation using an adaptive method of lines. *C.R. Mecanique* 331, 481–487.
- Wylie, E.B., Stoner, M.A., Streeter, V.L., 1971. Network system transient calculations by implicit methods. *Soc. Petrol. Eng. J.* 356–362 Dec.
- Yow, W., 1971. *Analysis and Control of Transient Flow in Natural Gas Piping Systems*. Ph.D. Thesis, The University of Michigan.
- Zhou, J., Adewumi, M.A., 1995. Simulation of transient flow in natural gas pipelines. 27th Annual Meeting Pipeline Simulation Interest Group (PSIG), Albuquerque, New Mexico.

ESDA2010-24433

TRANSIENT FLOW SIMULATION IN NATURAL GAS PIPELINES USING THE STATE SPACE MODEL

M. Behbahani-Nejad
Assistant Professor,
Mechanical Engineering
Department
Shahid Chamran University,
Ahvaz, Iran, 61355-148
Email: bnmorteza@scu.ac.ir

A.Ghanbarzadeh
Assistant Professor,
Mechanical Engineering
Department
Shahid Chamran University,
Ahvaz, Iran, 61355-148
Email:
Ghanbarzadeh.A@scu.ac.ir

R. Alamian
M. Sc. student, Mechanical
Engineering Department
Shahid Chamran University,
Ahvaz, Iran, 61355-148
Email:
rezvanalamian@gmail.com

ABSTRACT

A transient flow simulation for gas pipelines and networks is proposed. The proposed transient flow simulation is based on the state space equations. The equivalent transfer functions of the nonlinear governing equations are derived for different boundary conditions types. Next, the state space equations are derived from the transfer functions. To verify the accuracy of the proposed simulation, the results obtained are compared with those of the conventional finite difference schemes (such as total variation diminishing algorithms, method of lines, and other finite difference implicit and explicit schemes). The effect of the flow inertia is incorporated in this simulation. The accuracy and computational efficiency of the proposed method are discussed for a single gas pipeline and a sample gas network.

Keywords: *transient flow, transfer function, state space, natural gas, gas pipeline.*

I.INTRODUCTION

Natural gas transportation and distribution are commonly accomplished in many countries through the gas pipelines and networks. Due to the on-line controlling and reasons that are incidental or/and accidental to the operation of gas transmission pipelines or networks, transient flows do commonly arise. Thus, pipeline operations are actually transient processes and in fact steady state operations are rarity in practice. The governing equations for a transient subsonic flow analysis of natural gas in pipelines are a set of two nonlinear hyperbolic partial differential equations. Many algorithms and numerical methods such as implicit and explicit finite differences, method of characteristics and so on, have been applied by several researchers for transient

flow in gas pipelines [1]–[6]. However, almost all of these conventional schemes are time consuming especially for gas network analysis.

Some of investigators [1], [2] have neglected inertia term in momentum equation to linearize partial differential set of equations. But, it will result in loss of accuracy. Yow introduced the concept of inertia multiplier to partially account the effect of the inertia term [3]. Osiaacz et al. simulated transient gas flow with isothermal assumption without neglecting any terms in momentum equation for gas networks [4]. Kiuchi used an implicit method to analyze unsteady gas networks at isothermal conditions [6]. Also, Dukhovnaya and A. Michael [7], and Zhou and Adewumi [8] did flow simulation with the same assumptions and using TVD schemes. Tentis et al. have used an adaptive method of lines to simulate the transient gas flow in pipelines [9]. Ke and Ti analyzed isothermal transient gas flow in the pipeline networks using the electrical models for the loops and nodes [10]. Recently, Gonzales et al. [11] have used MATLAB-Simulink and prepared some S-functions to simulate transient flow in gas networks. At their work, two simplified models have derived containing Crank-Nicolson algorithm and method of characteristics. Reddy et al. [12] have proposed an efficient transient flow simulation for gas pipelines and networks using the transfer functions in Laplace domain. They derived the equivalent transfer functions for the governing equations and then, using the convolution theorem, they obtained the series form of the output in the time domain. Behbahani-nejad and Bagheri [13] prepare a MATLAB-Simulink library to simulate the transient flow in gas pipelines and networks. They derived the transfer functions of a single pipeline to develop a MATLAB-Simulink library and then extended it for a gas pipeline network simulation.

In the present study, the state space equations are employed for simulation of transient flow in gas pipelines and networks. For this purpose, the mathematical model of the transient flow in a gas pipeline is presented. Next, the flow transfer functions are derived based on the mathematical model. Finally, the state space equations are obtained using the transfer functions and are employed to analyze transient flow in a gas pipeline and a gas network.

II. MATHEMATICAL MODEL

The set of partial differential equations describing the general one-dimensional compressible gas flow dynamics through a pipeline under isothermal conditions is obtained by applying the conservation of mass, momentum and an equation of state relating the pressure, density and the temperature. For a general pipe as shown in Fig. 1., these hyperbolic partial differential equations are [14]

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u^2 + P)}{\partial x} = -\frac{\rho u |u|}{2D} f - \rho g \sin \alpha \quad (2)$$

$$P = \rho Z R_g \quad (3)$$

where ρ is the gas density, P is the pressure, u is the gas axial velocity, g is the gravitational acceleration, α is the pipe inclination, f is the friction coefficient, Z is the gas compressibility factor, and D is the pipeline diameter.

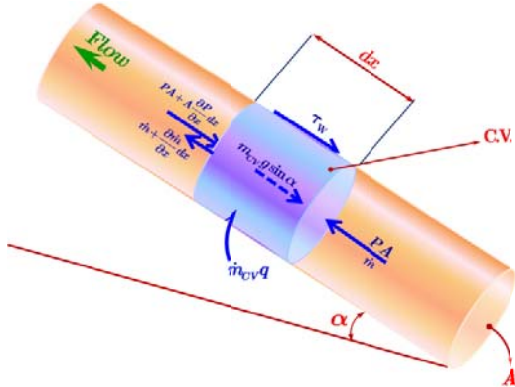


Fig. 1. A control volume in a general gas pipeline

The governing equations in matrix form are

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial F}{\partial x} = R \quad (4)$$

where

$$F = \begin{bmatrix} \rho u \\ \rho u^2 + P \end{bmatrix}, \quad R = \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{\rho u |u|}{2D} f - \rho g \sin \alpha \end{bmatrix} \quad (5)$$

Another form of the relations (1) and (2) versus the gas pressure and the mass flow rate can be written as [14]

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{P}{(1 + \hat{k}P)RT} \right) + \frac{1}{A} \frac{\partial \dot{m}}{\partial x} = 0 \quad (6)$$

$$\frac{\partial P}{\partial x} = -\frac{1}{A} \frac{\partial \dot{m}}{\partial x} - RT \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{(1 + \hat{k}P)}{AP} \dot{m} \right) - \frac{f}{2DA} \frac{\dot{m} |\dot{m}|}{P} (1 + \hat{k}P) RT - g \frac{\Delta h}{L} \frac{P}{(1 + \hat{k}P)RT} \quad (7)$$

where \dot{m} shows the mass flow rate and \hat{k} is an experimental parameter which is used to compute the compressibility factor, i.e.

$$Z = 1 + \hat{k}P \quad (8)$$

III. FLOW TRANSFER FUNCTIONS

To obtain the flow transfer functions, P_0 , T_0 , A_0 , and ρ_0 are considered as the reference values and the nonlinear partial differential equations (6) and (7) are linearized about them. Moreover, these reference values are also considered to define the corresponding dimensionless variables expressed as

$$\begin{aligned} \xi &= \frac{x}{L} \\ t^* &= \frac{tc}{L} \\ P^* &= \frac{P}{P_0} \\ \dot{m}^* &= \frac{\dot{m}c}{P_0 A_0} \\ u^* &= \frac{u_0}{c} \end{aligned} \quad (9)$$

where u_0 is the average gas velocity in the pipe and is calculated as [14]

$$u_0 = \frac{(\dot{m}_{in} + \dot{m}_{out})Z_0 RT_0}{(P_{in} + P_{out})A_0} \quad (10)$$

When the governing equations (6) and (7) are linearized and the nondimensional variables are used, with some mathematical manipulations one obtains [14]

$$\frac{\partial \Delta \dot{m}^*}{\partial \xi} = -\frac{\partial \Delta P^*}{\partial t^*} \quad (11)$$

$$[1 - u^{*2}] \frac{\partial \Delta P^*}{\partial \xi} - \frac{\partial \Delta \dot{m}^*}{\partial t^*} + 2u^* \frac{\partial \Delta P^*}{\partial t^*} - |u^*| f L^* \Delta \dot{m}^* + \left\{ \frac{f L^*}{2} u^* |u^*| - \frac{g \Delta h}{c^2} \right\} \Delta P^* \quad (12)$$

where

$$\Delta P^* = P^* - P_0^* \quad (13)$$

$$\Delta \dot{m}^* = \dot{m}^* - \dot{m}_0^* \quad (14)$$

Since for the practical subsonic transient flows $u^* = u_0/c \ll 1$, one can omit u^{*2} at the left hand side of (12). Taking the Laplace transform of (11) and (12), yields the following two coupled linear ordinary differential equations

$$\frac{\partial \Delta \dot{m}^*(s)}{\partial \xi} = -s \Delta P^*(s) \quad (15)$$

$$\frac{\partial \Delta P^*(s)}{\partial \xi} = -[|u^*| f L^* - s] \Delta \dot{m}^*(s) + \left\{ \frac{f L^*}{2} u^* |u^*| - \frac{g \Delta h}{c^2} + 2u^* s \right\} \Delta P^*(s) \quad (16)$$

After imposing the boundary conditions, the above system of ODE can be solved. For example, if the gas pressure at the inlet and the mass flow rate at the pipe outlet are specified as functions of time, the above system of ODE results in [14]

$$\begin{cases} \Delta P_{out}^*(s) = e^{\gamma/2} \frac{2b}{2b \cosh(b) - \gamma \sinh(b)} \Delta P_{in}^*(s) \\ \quad - \frac{2\alpha \sinh(b)}{2b \cosh(b) - \gamma \sinh(b)} \Delta M_{out}^*(s) \\ \Delta M_{in}^*(s) = \frac{2\beta \sinh(b)}{2b \cosh(b) - \gamma \sinh(b)} \Delta P_{in}^*(s) \\ \quad + e^{-\gamma/2} \frac{2b}{2b \cosh(b) - \gamma \sinh(b)} \Delta M_{out}^*(s) \end{cases} \quad (17)$$

where α , β , b and γ are defined in annex A. After Taylor-expansion of the hyperbolic terms in (17), the simplified transfer functions are

$$\begin{cases} \Delta P_{out}^*(s) = F_{P_{out}, P_{in}} \Delta P_{in}^*(s) + F_{P_{out}, M_{out}} \Delta M_{out}^*(s) \\ \Delta M_{in}^*(s) = F_{M_{in}, P_{in}} \Delta P_{in}^*(s) + F_{M_{in}, M_{out}} \Delta M_{out}^*(s) \end{cases} \quad (18)$$

where

$$F_{P_{out}, P_{in}}(s) = k_1 \frac{1}{1 + a_1 s} \quad (19)$$

$$F_{M_{in}, P_{in}}(s) = \frac{c_1}{1 + \hat{a}_1 s} \quad (20)$$

$$F_{P_{out}, M_{out}}(s) = -k_2 \frac{1 + b_1 s}{1 + \hat{a}_1 s} \quad (21)$$

$$F_{M_{in}, M_{out}}(s) = \frac{1}{1 + d_1 s} \quad (22)$$

The coefficients of the above expansions are also presented in annex A. For other types of the boundary conditions, similar relations can be obtained.

IV. STATE SPACE MODEL

When the flow transfer functions are obtained, they are used to derive the state space equations for transient analysis. The block diagram of the model is shown in Fig. 2. shows also the selected variables as states of the system (x_1 to x_4), two inputs, gas pressure at the inlet and mass flow rate at the outlet, and two outputs, the outlet pressure and the inlet gas flow rate. So the state space equations are

$$\dot{x}_1 = \frac{-1}{a_1} x_1 + \frac{k_1}{a_1} P_{in} \quad (23)$$

$$\dot{x}_2 = \frac{-1}{\hat{a}_1} x_2 + \frac{1}{\hat{a}_1} P_{in} \quad (24)$$

$$\dot{x}_3 = \frac{-1}{\hat{a}_1} x_3 - \frac{k_2}{\hat{a}_1} M_{out} \quad (25)$$

$$\dot{x}_4 = \frac{-1}{d_1} x_4 + \frac{1}{d_1} M_{out} \quad (26)$$

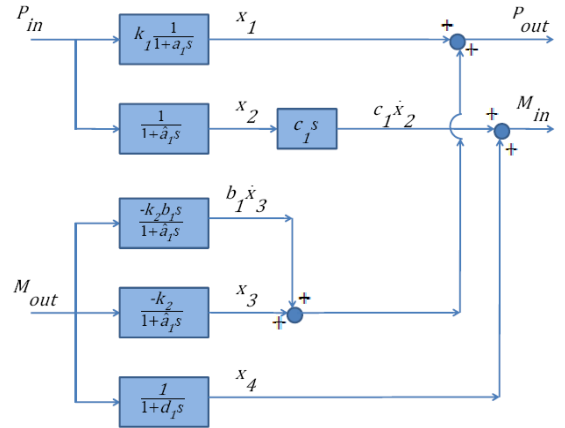


Fig.2. Block diagram of model when the inlet pipeline pressure and the outlet gas flow rate are inputs

Outputs of the systems can be written as follows

$$P_{out} = x_1 + \left(1 - \frac{b_1}{\hat{a}_1}\right) x_3 - \frac{b_1 k_2}{\hat{a}_1} M_{out} \quad (27)$$

$$M_{in} = -\frac{c_1}{\hat{a}_1}x_2 + x_4 - \frac{c_1}{\hat{a}_1}P_{in} \quad (28)$$

For other boundary conditions, similar models can be made.

The proposed approach is now extended to simulate a gas network. A typical network which has been studied by Osiadacz [4], Ke and Ti [10], and Behbahani-nejad and Bagheri [13] is considered and simulated with the present approach. Fig. 3. shows schematic of this network. The accuracy of the obtained results of the proposed simulation are discussed in the next section.

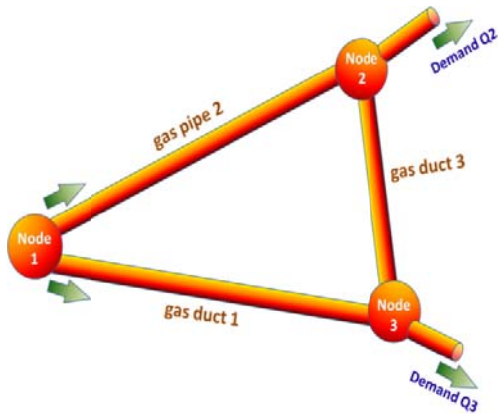


Fig. 3. The gas pipeline network

V. RESULTS AND DISCUSSIONS

The results of the proposed transient simulation are compared with the obtained results of Reddy et al. [12] for a single pipeline. In order to verify the accuracy of the present state space model, a 8000 m long pipeline of 0.406 m diameter with an elevation of 1 m was considered as a test case. The pipeline transports natural gas with 0.675 specific gravity at 27°C. The gas viscosity is $1 \times 10^{-5} N \cdot sec/m^2$, while the pipeline wall roughness is 0.046 mm. At the pipeline's inlet, the gas pressure is kept constant at 6 MPa, whereas the pipe's mass flow rate at the outlet varies with a 6000-sec cycle, corresponding to changes in consumer demand within 6000 sec as is depicted in Fig. 4.

Figure 5. illustrates the present results of state space model for mass flow rate time changes at the pipe inlet, along with the obtained results by Reddy et al. [12]. It can be seen that there is good agreement and both models produce identical results.

A 72259.5 m long pipeline of 0.2 m diameter was considered as another case test. The experimental data is available for this problem and has been studied by Taylor et al. [15], Zhou and Adewumi [8], Tentis et al. [9], and also Behbahani-nejad and Bagheri [13]. The pipeline transports natural gas of 0.675 specific gravity at 10°C. The gas viscosity is $1.1831 \times 10^{-5} N \cdot sec/m^2$, while the pipeline wall roughness is 0.617 mm and isothermal sound speed equals 367.9 m/s. At the pipeline's inlet, the gas pressure is kept constant at 4.205 MPa, whereas the pipe's mass flow rate at the outlet varies with

a 24-hour cycle, corresponding to changes in consumer demand within a day as is depicted in Fig. 6.

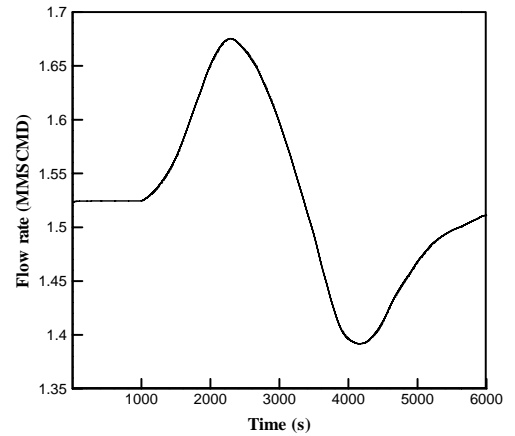


Fig. 4. A 6000-sec irregular flow imposed at the pipe outlet

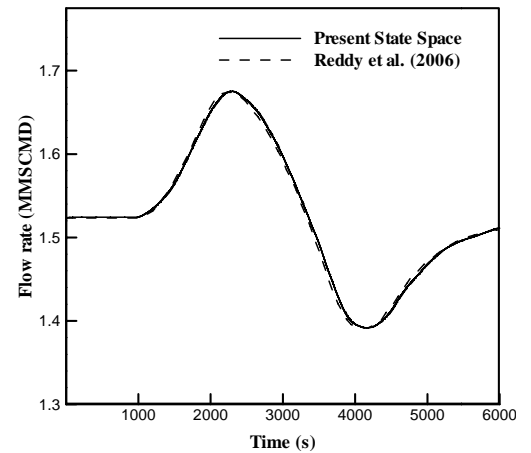


Fig. 5. Comparison of mass flow rate time history at the inlet

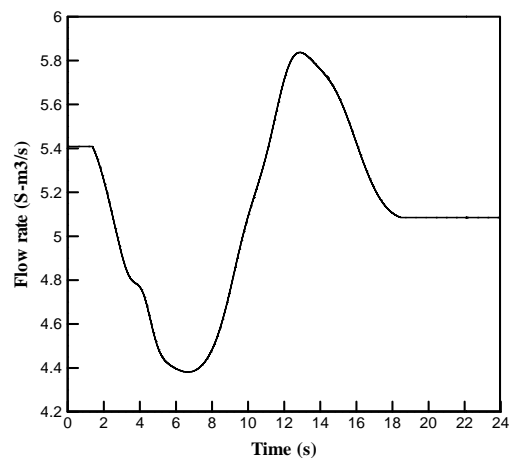


Fig. 6. A 24-hour irregular flow imposed at the pipe outlet

Figure 7. illustrates the results of present state space model for pressure time changes at the pipe outlet, along with those of the others [8], [9], [15] and the experimental results. The results of present state space model is comparable with other results and behaves like nonlinear finite difference models.

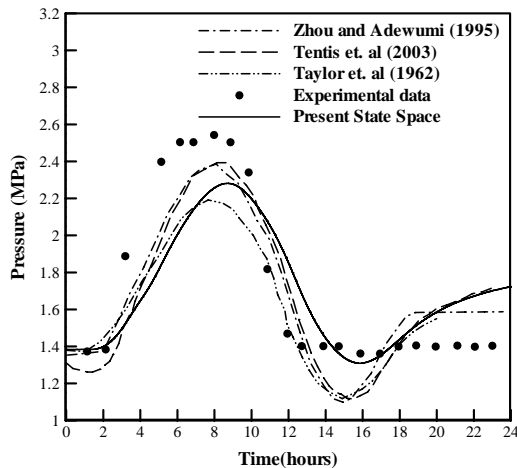


Fig. 7. Comparison of pressure time history at the outlet

Finally, a typical network as shown in Fig. 3. was considered to validate the results of the present gas network simulation. The geometrical data of the network is introduced in Table I and the gas demand at the nodes 2 and 3 are illustrated in Fig. 8. The pressure source in the network is node 1 which is maintained at a constant pressure of 5 MPa. The gas specific gravity is approximately 0.6, the operational temperature is $5^{\circ}C$, and the friction factor is considered to be constant and equal to 0.003. The present simulation results are compared with those obtained by Osiadacz [4], Ke and Ti [10], and Behbahani-nejad and Bagheri [13] in Figs. 9. and 10. The obtained results are in good agreement with the others.

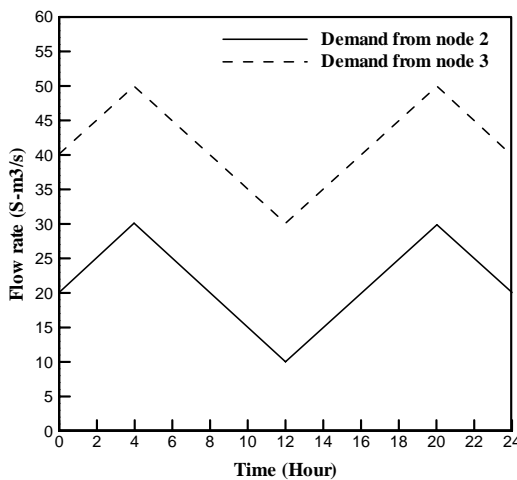


Fig. 8. Demands versus time for nodes 2 and 3 of the simulated network

Gas Pipe ID	From node	To node	Diameter (m)	Length (km)
1	1	3	0.6	80
2	1	2	0.6	90
3	2	3	0.6	100

Table 1. Pipe geometrical data for the considered network

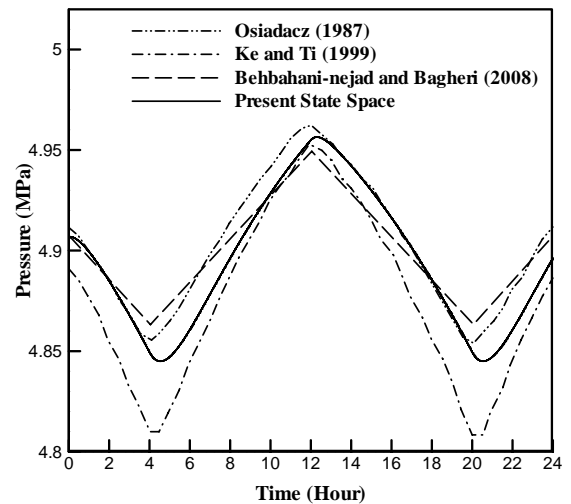


Fig. 9. Outlet pressure results for nodes 2

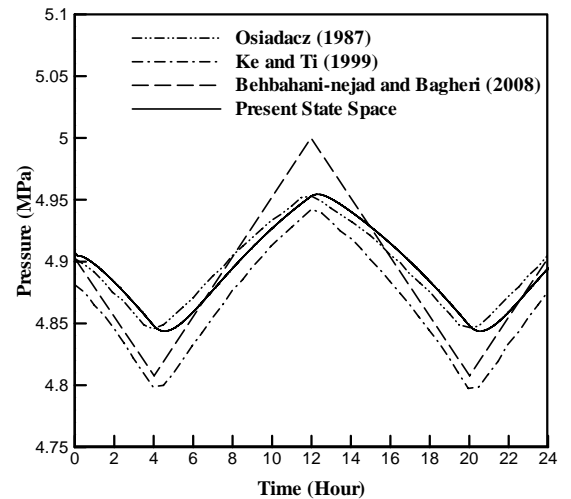


Fig. 10. Outlet pressure results for nodes 3

VII. CONCLUSION

The proposed simulation can be applied to analyze the transient flow of natural gas in pipelines and networks with a sufficient accuracy. Since the proposed simulation is used the state space of the transient gas flows, it is more computationally efficient than the other finite difference methods. On the other hand, one can assemble the state space equations of all the

network pipes to simulate the dynamic behavior of a gas network. So the state space model can be used efficiently for more complicated networks. However, because the present simulation is based on the flow state space equations, it only can give the endpoints results, not those distributions along the pipelines.

ACKNOWLEDGMENTS

Khuzestan Gas Company and Shahid Chamran University are acknowledged for providing technical, administrative, and financial assistance.

REFERENCES

- [1] Wylie, E. B., Stoner, M. A., and Streeter, V. L., 1971, "Network Transient Calculation by Implicit methods", *Soc. Pet Eng. J.*, 356-362.
- [2] Luongo, C. A., October 1986, "An Efficient Program for Transient Flow Simulation in Natural Gas Pipelines", 15th Annual Meeting Pipeline Simulation Interest Group (PSIG), New Orleans.
- [3] Yow, W., 1971, "Analysis and Control of Transient Flow in Natural Gas Piping System", Ph.D. dissertation, U. of Michigan, Ann Harbor.
- [4] Osiadacz, A. J., 1987, "Simulation and Analysis of Gas Networks", E. & F.N. Spon, London.
- [5] Ibraheem, S. O. and Adewumi, M. A., 1996, "Higher-Resolution Numerical Solution for 2-D Transient Natural Gas Pipeline Flows", *Soc. of Petroleum Eng.*, SPE 35626, pp. 473-482.
- [6] Kiuchi, T., 1994, "An Implicit Method for Transient Gas Flow in Pipe Networks", *Int. J. Heat and Fluid Flow*, Vol. 15, No. 5, pp. 378-383.
- [7] Dukhovnaya, Y. and Michael, A., 2000, "Simulation of non-isothermal transient in gas/condensate pipelines using TVD schemes", *Petroleum and Natural Gas Eng.*, The Pennsylvania State University, USA.
- [8] Zhou, J. and Adewumi, M. A., 1996, "Simulation of Transient Flow in Natural Gas Pipelines", the Pennsylvania State University, Petroleum and Natural Gas Engineering, GRI-PA 16802.
- [9] Tentis, E., Margaris, D., and Papanikas, D., 2003, "Transient gas flow simulation using an Adaptive Method of Lines", *U. of Patras, C. R. Mechanics J.*, pp. 481-487.
- [10] Ke, S. L. and Ti, H. C., 1999, "Transient analysis of isothermal gas flow in pipeline network", *chemical eng. J.*, 169-177.
- [11] Gonzales, A. H., De La Cruz, J. M., Andres-Toro, B. D., and Risco-Martin, J. L., 2009, "Modeling and simulation of a gas distribution pipeline network", *Applied Mathematical Modelling*, Volume 33, Issue 3, Pages 1584-1600.
- [12] Reddy, H. P., Narasimhan, S., and Bhallamudi, S. M., 2006, "Simulation and State Estimation of Transient Flow in Gas Pipeline Networks Using a Transfer Function Model", Department of Chemical Engineering and Department of Civil Engineering, Indian Inst. of Technology, Madras, Chennai-600036, India.
- [13] Behbahani-Nejad, M. and Bagheri, A., 2010, "The accuracy and efficiency of a MATLAB-Simulink library for transient flow simulation of gas pipelines and networks", *Journal of Petroleum Science and Engineering*, Volume 70, Issues 3-4, Pages 256-265.
- [14] Kralik, J., Stiegler, P., Vostry, Z., Zavorka, J., 1998, "Dynamic modeling of large scale networks with application to gas distribution", 1st ed., Inst. of Information Theory and Automation of the Czechoslovak Academy of Sciences Prague, Czechoslovakia, ELSEVIER Amsterdam-Axford.
- [15] Taylor, T. D., Wood, N. E., and Power, J. E., 1962, "A Computer Simulation of Gas Flow in Long Pipelines", *Soc. Pet. Eng. J.*, *Trans. AIME*, 225, pp. 297-302.

ANNEX A

In this annex, the algebraic expressions of the parameters used in (17) and (19)-(28) are presented. α , β , γ and b which are used in (17) are stated as [14]

$$\alpha(s) = \alpha_1 + \alpha_2 s \quad (\text{A-1})$$

$$\beta(s) = \beta_1 s \quad (\text{A-2})$$

$$\gamma(s) = \gamma_1 + \gamma_2 s \quad (\text{A-3})$$

$$b(s) = \sqrt{\gamma^2 + 4\alpha\beta}/2 \quad (\text{A-4})$$

where

$$\begin{aligned} \alpha_1 &= |u^*|fL^*, & \alpha_2 &= L/c, & \beta_1 &= L/c, \\ \gamma_1 &= \frac{fL^*}{2}u^*|u^*| - \frac{g\Delta h}{c^2}, & \gamma_2 &= 2u^*L/c \end{aligned} \quad (\text{A-5})$$

The other parameters which have been used in (19)-(28) are [13]

$$\hat{a}_1 = e^{\frac{\gamma_1}{2}} \left\{ \frac{1}{2} \alpha_1 \alpha_2 \left(1 - \frac{1}{6} \gamma_1 + \frac{1}{24} \gamma_1^2 - \frac{1}{240} \gamma_1^3 + \dots \right) - \frac{\gamma_2}{2} \right\} \quad (\text{A-6})$$

$$k_1 = e^{\gamma_1} \quad (\text{A-7})$$

$$a_1 = \hat{a}_1 - \frac{1}{2} \gamma_2 \quad (\text{A-8})$$

$$k_2 = e^{\frac{\gamma_1}{2}} \alpha_1 \left(1 + \frac{1}{24} \gamma_1^2 + \frac{1}{1920} \gamma_1^4 \right) \quad (\text{A-9})$$

$$b_1 = \frac{\alpha_2}{\alpha_1} + \frac{\left(\alpha_1 \beta_1 + \frac{1}{12} \gamma_1 \gamma_2 \right) \left(1 + \frac{1}{40} \gamma_1^2 \right)}{1 + \frac{1}{4} \gamma_1^2 + \frac{1}{320} \gamma_1^4} \quad (\text{A-10})$$

$$c_1 = e^{\frac{\gamma_1}{2}} \beta_1 \left(1 + \frac{1}{24} \gamma_1^2 + \frac{1}{1920} \gamma_1^4 \right) \quad (\text{A-11})$$

$$d_1 = \hat{a}_1 + \frac{1}{2} \gamma_2 \quad (\text{A-12})$$

Manuscript Number: JNGSE-D-11-00005

Title: A State Space Model for Transient Flow Simulation in Natural Gas Pipelines and Networks

Article Type: Full Length Article

Keywords: Transient Flow; Transfer Function; State Space; Natural Gas; Gas Pipeline.

Corresponding Author: Mr. Rezvan Alamian, Master of Science

Corresponding Author's Institution: Shahid Chamran University of Ahvaz

First Author: Rezvan Alamian, Master of Science

Order of Authors: Rezvan Alamian, Master of Science; Morteza Behbahani-Nejad, PhD; Afshin Ghanbarzadeh, PhD

Abstract: A new transient flow simulation for gas pipelines and networks is proposed. The proposed transient flow simulation is based on the state space equations which are derived from the transfer function equations. The transfer function model cannot be used for complicated networks because it is too difficult to transform the resulting complex transfer function to the time domain. However, one can apply a state space model for a large and complex network. For a state space model, the equivalent transfer functions of the nonlinear governing equations are derived for different boundary condition types. The effect of the flow inertia is incorporated in this simulation as well. Then, the state space equations are derived from the flow transfer functions. To verify the accuracy of the proposed simulation, the obtained results are compared with those of the conventional finite difference methods such as total variation diminishing algorithms, method of lines, and other implicit and explicit schemes. The accuracy and computational efficiency of the proposed method are discussed for a single gas pipeline and a sample gas network with different boundary conditions.

*Research Highlights

> A new transient flow simulation for gas pipelines and networks is proposed. > The proposed transient flow simulation is based on the state space equations. > This model gives satisfactory results. > Also, it is more computationally efficient than the other finite difference methods. > The state space model can be used efficiently to analyze more complicated networks.

A State Space Model for Transient Flow Simulation in Natural Gas Pipelines and Networks

R. Alamian¹

Shahid Chamran University, Ahvaz, Iran, 61355-148

Email: rezvanalamian@gmail.com

M. Behbahani-Nejad²

Shahid Chamran University, Ahvaz, Iran, 61355-148

Email: bnmorteza@scu.ac.ir

A. Ghanbarzadeh³

Shahid Chamran University, Ahvaz, Iran, 61355-148

Email: Ghanbarzadeh.A@scu.ac.ir

Abstract

A new transient flow simulation for gas pipelines and networks is proposed. The proposed transient flow simulation is based on the state space equations which are derived from the transfer function equations. The transfer function model cannot be used for complicated networks because it is too difficult to transform the resulting complex transfer function to the time domain. However, one can apply a state space model for a large and complex network. For a state space model, the equivalent transfer functions of the nonlinear governing equations are

¹ M.Sc. Student. Mechanical Engineering Department.

² Assistant Professor. Mechanical Engineering Department.

³ Assistant Professor, Mechanical Engineering Department.

1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
49
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60
61
62
63
64
65

1 derived for different boundary condition types. The effect of the flow inertia is incorporated in
2 this simulation as well. Then, the state space equations are derived from the flow transfer
3 functions. To verify the accuracy of the proposed simulation, the obtained results are compared
4 with those of the conventional finite difference methods such as total variation diminishing
5 algorithms, method of lines, and other implicit and explicit schemes. The accuracy and
6 computational efficiency of the proposed method are discussed for a single gas pipeline and a
7 sample gas network with different boundary conditions.

8 *Keywords*—Transient Flow; Transfer Function; State Space; Natural Gas; Gas Pipeline.

9 **1. Introduction**

10 Natural gas transportation and distribution are commonly accomplished in many countries
11 through the gas pipelines and networks. Due to the on-line controlling and reasons that are
12 incidental or/and accidental to the operation of gas transmission pipelines or networks, transient
13 flows do commonly arise. Thus, pipeline operations are actually transient processes and in fact,
14 steady state operations are rare in practice. The governing equations for a transient subsonic flow
15 analysis of natural gas in pipelines are a set of two nonlinear hyperbolic partial differential
16 equations. Many algorithms and numerical methods such as implicit and explicit finite
17 differences, method of characteristics, etc. have been applied by several researchers for transient
18 flow in gas pipelines (Wylie et al., 1971; Luongo, 1986; Yow, 1971; Osiadacz, 1987; Ibraheem
19 and Adewumi, 1996; Kiuchi, 1994). However, almost all of these conventional schemes are time
20 consuming, especially for gas network analysis.

21 Some of the investigators (Wylie et al., 1971; Luongo, 1986) have neglected the inertia term
22 in momentum equation to linearize partial differential set of equations. However, it will result in

1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
49
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60
61
62
63
64
65

1 loss of accuracy. Yow (1971) introduced the concept of inertia multiplier to partially account the
2 effect of the inertia term. Osiadacz (1987) simulated transient gas flow with isothermal
3 assumption without neglecting any terms in momentum equation for gas networks. Kiuchi
4 (1994) used an implicit method to analyze unsteady gas networks at isothermal conditions. Also,
5 Zhou and Adewumi (1996) and Dukhovnaya and Adewumi (2000) did flow simulation with the
6 same assumptions and by using TVD schemes. Tentis et al. (2003) have used an adaptive method
7 of lines to simulate the transient gas flow in pipelines. Ke and Ti (1999) analyzed isothermal
8 transient gas flow in the pipeline networks using the electrical models for the loops and nodes.
9 Recently, Gonzales et al. (2009) have used MATLAB-Simulink and prepared some S-functions
10 to simulate transient flow in gas networks. At their work, two simplified models have been
11 derived containing Crank-Nicolson algorithm and method of characteristics. Reddy et al. (2006)
12 have proposed an efficient transient flow simulation for gas pipelines and networks using the
13 transfer functions in Laplace domain. They derived the equivalent transfer functions for the
14 governing equations and then, using the convolution theorem, they obtained the series form of
15 the output in the time domain. Recently, two efficient and relatively accurate approaches were
16 proposed for natural gas transient flow analysis (Behbahani-Nejad and Shekari, 2010;
17 Behbahani-Nejad and Bagheri, 2010). Behbahani-Nejad and Shekari (2010) proposed a reduced
18 order modeling approach for natural gas transient flow in pipelines. They derived the linearized
19 form of the Euler equations and obtained the corresponding eigensystem. Then, they used a few
20 dominant flow eigenmodes to construct an efficient reduced-order model. Behbahani-Nejad and
21 Bagheri (2010) prepared a MATLAB-Simulink library to simulate the transient flow in gas
22 pipelines and networks. They derived the transfer functions of a single pipeline to develop a
23 MATLAB-Simulink library and then extended it for a gas pipeline network simulation. In

1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
49
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60
61
62
63
64
65

1 another study, Behbahani-Nejad et al. (2010) applied a state space model to analyze natural gas
2 transient flow. Although the state space models were used for diverse applications (Margaria et
3 al., 2001; Pearson and Kotta, 2004; Berendrecht et al., 2006; Rueda and Rodríguez, 2010;
4 McCausland et al., 2011), there is a rarity in applying this model for natural gas pipelines. In the
5 latest study, Behbahani-Nejad et al (2010) simulated the transient flow in gas pipelines and
6 networks by the state space model. They used a state space model with known inlet gas pressure
7 and outlet gas flow rate and they got satisfactory results.

8 In the present study, state space equations are employed to simulate transient flow in gas
9 pipelines and networks. First, the mathematical model of the transient flow in a gas pipeline is
10 presented. Then, the flow transfer functions for different boundary conditions are derived based
11 on the mathematical model. Next, the state space equations are obtained using the transfer
12 functions and are employed to analyze transient flow in a gas pipeline and a gas network.
13 Finally, the obtained results are discussed and the paper concluded with the abilities of the
14 proposed state space model for simulation of transient flow in natural gas pipelines and
15 networks.

16 **2. Mathematical Model**

17 The set of partial differential equations describing the general one-dimensional compressible gas
18 flow dynamics through a pipeline under isothermal conditions is obtained by applying the
19 conservation of mass, momentum and an equation of state relating the pressure, density and
20 temperature. For a typical pipeline as shown in Fig.1, these hyperbolic partial differential
21 equations are (Kralik et al., 1998)

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u^2 + P)}{\partial x} = -\frac{\rho u |u|}{2D} f - \rho g \sin \alpha \quad (2)$$

$$P = \rho Z R_g \quad (3)$$

1 where ρ is the gas density, P is the pressure, u is the gas axial velocity, g is the gravitational
 2 acceleration, α is the pipeline inclination, f is the friction coefficient, Z is the gas
 3 compressibility factor, and D is the pipeline diameter.

4 The governing equations in matrix form are

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial F}{\partial x} = R \quad (4)$$

5 where

$$F = \begin{bmatrix} \rho u \\ \rho u^2 + P \end{bmatrix}, \quad R = \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{\rho u |u|}{2D} f - \rho g \sin \alpha \end{bmatrix} \quad (5)$$

6 Another form of the relations (1) and (2) versus the gas pressure and the mass flow rate can be
 7 written as (Kralik et al., 1998)

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{P}{(1 + \hat{k}P)RT} \right) + \frac{1}{A} \frac{\partial \dot{m}}{\partial x} = 0 \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial P}{\partial x} = & -\frac{1}{A} \frac{\partial \dot{m}}{\partial x} - RT \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{(1 + \hat{k}P)}{AP} \dot{m} \right) - \frac{f}{2DA} \frac{\dot{m} |\dot{m}|}{P} (1 + \hat{k}P) RT \\ & - g \frac{\Delta h}{L} \frac{P}{(1 + \hat{k}P)RT} \end{aligned} \quad (7)$$

8 where \dot{m} shows the mass flow rate and \hat{k} is an experimental parameter which is used to compute
 9 the compressibility factor, i.e.

$$F = \begin{bmatrix} \rho u \\ \rho u^2 + P \end{bmatrix}, \quad R = \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{\rho u |u|}{2D} f - \rho g \sin \alpha \end{bmatrix} \quad (8)$$

3. Flow Transfer Functions

To obtain the flow transfer functions, P_0 , T_0 , A_0 , and ρ_0 are considered as the reference values and the nonlinear partial differential equations (6) and (7) are linearized with regard to them. Moreover, these reference values are also considered to define the corresponding dimensionless variables expressed as

$$\xi = \frac{x}{L}, \quad t^* = \frac{tc}{L}, \quad P^* = \rho^* = \frac{P}{P_0}, \quad \dot{m}^* = \frac{\dot{m}c}{P_0 A_0}, \quad u^* = \frac{u_0}{c} \quad (9)$$

where u_0 is the average gas velocity in the pipe and is calculated as (Kralik et al., 1998)

$$u_0 = \frac{(\dot{m}_{in} + \dot{m}_{out})Z_0RT_0}{(P_{in} + P_{out})A_0} \quad (10)$$

When the governing equations (6) and (7) are linearized and the nondimensional variables are used, with some mathematical manipulations one obtains (Kralik et al., 1998)

$$\frac{\partial \Delta \dot{m}^*}{\partial \xi} = -\frac{\partial \Delta P^*}{\partial t^*} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} [1 - u^{*2}] \frac{\partial \Delta P^*}{\partial \xi} - \frac{\partial \Delta \dot{m}^*}{\partial t^*} + 2u^* \frac{\partial \Delta P^*}{\partial t^*} - |u^*| f L^* \Delta \dot{m}^* \\ + \left\{ \frac{f L^*}{2} u^* |u^*| - \frac{g \Delta h}{c^2} \right\} \Delta P^* \end{aligned} \quad (12)$$

where

$$\Delta P^* = P^* - P_0^* \quad (13)$$

$$\Delta \dot{m}^* = \dot{m}^* - \dot{m}_0^* \quad (14)$$

1
2
3
4 1 Since for the practical subsonic transient flows $u^* = u_0/c \ll 1$, one can omit u^{*2} at the left hand
5
6
7 2 side of (12). Taking the Laplace transform of (11) and (12), yields the following two coupled
8
9
10 3 linear ordinary differential equations

$$\frac{\partial \Delta \dot{m}^*(s)}{\partial \xi} = -s \Delta P^*(s) \quad (15)$$

$$\frac{\partial \Delta P^*(s)}{\partial \xi} = -[|u^*| f L^* - s] \Delta \dot{m}^*(s) + \left\{ \frac{f L^*}{2} u^* |u^*| - \frac{g \Delta h}{c^2} + 2u^* s \right\} \Delta P^*(s) \quad (16)$$

11
12
13
14
15
16
17
18
19 4 After imposing the boundary conditions, the above system of ODE can be solved. For example,
20
21
22 5 if the gas pressure at the inlet and the mass flow rate at the pipe outlet are specified as functions
23
24
25 6 of time, the above system of ODE results in (Kralik et al., 1998)

$$\begin{cases} \Delta P_{out}^*(s) = e^{\gamma/2} \frac{2b}{2b \cosh(b) - \gamma \sinh(b)} \Delta P_{in}^*(s) \\ \quad - \frac{2\alpha \sinh(b)}{2b \cosh(b) - \gamma \sinh(b)} \Delta M_{out}^*(s) \\ \Delta M_{in}^*(s) = \frac{2\beta \sinh(b)}{2b \cosh(b) - \gamma \sinh(b)} \Delta P_{in}^*(s) \\ \quad + e^{-\gamma/2} \frac{2b}{2b \cosh(b) - \gamma \sinh(b)} \Delta M_{out}^*(s) \end{cases} \quad (17)$$

26
27
28
29
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39 7 where α , β , b and γ are defined in appendix A. After Taylor-expansion of the hyperbolic terms
40
41
42 8 in (17), the simplified transfer functions are

$$\begin{cases} \Delta P_{out}^*(s) = F_{P_{out}, P_{in}} \Delta P_{in}^*(s) + F_{P_{out}, M_{out}} \Delta M_{out}^*(s) \\ \Delta M_{in}^*(s) = F_{M_{in}, P_{in}} \Delta P_{in}^*(s) + F_{M_{in}, M_{out}} \Delta M_{out}^*(s) \end{cases} \quad (18)$$

43
44
45
46
47
48 9 Where

$$F_{P_{out}, P_{in}}(s) = k_1 \frac{1}{1 + a_1 s} \quad (19)$$

$$F_{M_{in}, P_{in}}(s) = \frac{c_1}{1 + \hat{a}_1 s} \quad (20)$$

$$F_{P_{out},M_{out}}(s) = -k_2 \frac{1 + b_1 s}{1 + \hat{a}_1 s} \quad (21)$$

$$F_{M_{in},M_{out}}(s) = \frac{1}{1 + d_1 s} \quad (22)$$

1 The coefficients of the above expansions are also presented in appendix A. For other types of the
2 boundary conditions, following relations are derived.

3 For known inlet and outlet gas flow rates, the derived equations are as below

$$\begin{cases} \Delta P_{in}^*(s) = \frac{1}{F_{M_{in},P_{in}}} \Delta M_{in}^*(s) + \frac{F_{M_{in},M_{out}}}{F_{M_{in},P_{in}}} \Delta M_{out}^*(s) \\ \Delta P_{out}^*(s) = \frac{F_{P_{out},P_{in}}}{F_{M_{in},P_{in}}} \Delta M_{in}^*(s) + \\ \left(F_{P_{out},M_{out}} - \frac{F_{P_{out},P_{in}} F_{M_{in},M_{out}}}{F_{M_{in},P_{in}}} \right) \Delta M_{out}^*(s) \end{cases} \quad (23)$$

4 For known inlet and outlet gas pressures, the derived equations are as below

$$\begin{cases} \Delta M_{out}^*(s) = -\frac{F_{P_{out},P_{in}}}{F_{P_{out},M_{out}}} \Delta P_{in}^*(s) + \frac{1}{F_{P_{out},M_{out}}} \Delta P_{out}^*(s) \\ \Delta M_{in}^*(s) = \left(F_{M_{in},P_{in}} - \frac{F_{P_{out},P_{in}} F_{M_{in},M_{out}}}{F_{P_{out},M_{out}}} \right) \Delta P_{in}^*(s) + \\ \frac{F_{M_{in},M_{out}}}{F_{P_{out},M_{out}}} \Delta P_{out}^*(s) \end{cases} \quad (24)$$

5 For known inlet gas flow rate and outlet gas pressure, the derived equations are as below

$$\begin{cases} \Delta P_{in}^*(s) = \frac{-F_{P_{out},M_{out}}}{F_{P_{out},P_{in}} F_{M_{in},M_{out}} - F_{M_{in},P_{in}} F_{P_{out},M_{out}}} \Delta M_{in}^*(s) \\ + \frac{F_{M_{in},M_{out}}}{F_{P_{out},P_{in}} F_{M_{in},M_{out}} - F_{M_{in},P_{in}} F_{P_{out},M_{out}}} \Delta P_{out}^*(s) \\ \Delta M_{out}^*(s) = \frac{F_{P_{out},P_{in}}}{F_{P_{out},P_{in}} F_{M_{in},M_{out}} - F_{M_{in},P_{in}} F_{P_{out},M_{out}}} \Delta M_{in}^*(s) \\ - \frac{F_{M_{in},P_{in}}}{F_{P_{out},P_{in}} F_{M_{in},M_{out}} - F_{M_{in},P_{in}} F_{P_{out},M_{out}}} \Delta P_{out}^*(s) \end{cases} \quad (25)$$

6 Transfer function models are used by Reddy et al. (2006), Gonzales et al. (2009) and
7 Behbahani-Nejad and Bagheri (2010). Although the answers by this method are good in

1 comparison to other methods, this method cannot be applied to a complicated network. Fig. 2
 2 shows a MATLAB-simulink transfer function model which is used for a triangle network by
 3 Behbahani-Nejad and Bagheri (2010). It seems complicated somehow. Now it can be imagined
 4 how complicated and bewildering would be if this model is used for a network consisting of
 5 hundreds of pipelines. However, this problem is well solvable in the state space model. The
 6 number of pipelines used in the network makes no difference in simulating of the state space
 7 model. The equations of each pipeline have to be written consequently in this model. This
 8 method is explained widely in the subsequent sections.

9 **4. State Space Model**

10 When the flow transfer functions are obtained, they are used to derive the state space equations
 11 for transient analysis. The block diagram of the model shown in Fig. 3 also shows the selected
 12 variables as states of the system(x_1 to x_4), two inputs, gas pressure at the inlet and mass flow
 13 rate at the outlet, two outputs, the outlet pressure and the inlet gas flow rate. Thus, the state space
 14 equations are

$$\dot{x}_1 = \frac{-1}{a_1} x_1 + \frac{k_1}{a_1} P_{in} \quad (26)$$

$$\dot{x}_2 = \frac{-1}{\hat{a}_1} x_2 + \frac{1}{\hat{a}_1} P_{in} \quad (27)$$

$$\dot{x}_3 = \frac{-1}{\hat{a}_1} x_3 - \frac{k_2}{\hat{a}_1} M_{out} \quad (28)$$

$$\dot{x}_4 = \frac{-1}{d_1} x_4 + \frac{1}{d_1} M_{out} \quad (29)$$

15 Outputs of the systems can be written as follows

$$P_{out} = x_1 + \left(1 - \frac{b_1}{\hat{a}_1}\right)x_3 - \frac{b_1 k_2}{\hat{a}_1} M_{out} \quad (30)$$

$$M_{in} = -\frac{c_1}{\hat{a}_1} x_2 + x_4 - \frac{c_1}{\hat{a}_1} P_{in} \quad (31)$$

1 For other boundary conditions similar relations can be obtained, which are mentioned in
 2 appendix B.

3 The proposed approach is now extended to simulate a gas network. Two different schemes
 4 are applied for transient analysis of this network. The first one is based on a trial and error
 5 algorithm while the second one solves the network directly. In the first method, the outlet mass
 6 flow rates at some nodes are guessed and then they are corrected via some iteration until
 7 convergence. In the second method, the model is simulated directly; however, the interior nodes
 8 mass flow rates which are needed at each time are obtained from the earlier time step. In both of
 9 these methods the known inlet pressure and outlet mass flow rate model is used; however, in the
 10 second method where there is a loop in the networks, the known inlet and outlet pressure model
 11 is applied in the loop. The accuracy of the obtained results of the proposed simulation is
 12 discussed in the next section.

13 **5. Results and Discussions**

14 In this section three different test case are considered to investigate the accuracy of proposed
 15 simulation model. The first test case is a 8000 *m* long pipeline of 0.406 *m* diameter which has
 16 been studied by Reddy et al. (2006). The pipeline transports natural gas with 0.675 specific
 17 gravity at 27°C. The gas viscosity is 1×10^{-5} *N.sec/m²*, while the pipeline wall roughness is
 18 0.046 *mm*. At the pipeline's inlet, the gas pressure is kept constant at 6 *MPa*, whereas the pipe's
 19 mass flow rate at the outlet varies with a 6000-sec cycle, corresponding to changes in consumer

1 demand as depicted in Fig. 5. Figure 6 illustrates the obtained results for mass flow rate time
2 changes at the pipe inlet along with the corresponding ones by Reddy et al. (2006). It is shown
3 that there is good agreement and two methods give nearly identical results.

4 A 72259.5 m long pipeline of 0.2 m diameter is considered as the second test case. The
5 experimental data is available for this problem and has been studied by Taylor et al. (1962),
6 Zhou and Adewumi (1996), Tentis et al. (2003), and also Behbahani-Nejad and Bagheri (2010).
7 The pipeline transports natural gas of 0.675 specific gravity at 10°C. The gas viscosity is
8 $1.1831 \times 10^{-5} \text{ N}\cdot\text{sec}/\text{m}^2$, the pipeline wall roughness is 0.617 mm and the isothermal sound
9 speed equals 367.9 m/s. At the pipeline's inlet, the gas pressure is kept constant at 4.205 MPa,
10 whereas the pipe's mass flow rate at the outlet varies with a 24-hour cycle, corresponding to
11 changes in consumer demand within a day as is depicted in Fig. 7. Figure 8 illustrates the results
12 of the present state space model for pressure time changes at the pipe outlet, along with those of
13 the others (Zhou and Adewumi, 1996; Tentis et al., 2003; Taylor et al., 1962) and the
14 experimental results. The results of the present state space model are comparable with the other
15 results and behave like nonlinear finite difference models.

16 The third test case is a typical network as shown in Fig. 4 and it is considered to demonstrate
17 the proposed method ability for gas network transient analysis. This network has been studied by
18 Osiadacz (1987), Ke and Ti (1999), and Behbahani-Nejad and Bagheri (2010). The geometrical
19 data of the network is introduced in Table 1 and the gas demand at the nodes 2 and 3 are
20 illustrated in Fig. 9. The pressure source in the network is node 1, which is maintained at a
21 constant pressure of 5 MPa. The gas specific gravity is approximately 0.6, the operational
22 temperature is 5°C, and the friction factor is considered to be constant and equal to 0.003.

23 As mentioned in the previous section, Two different schemes are applied for transient

1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
49
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60
61
62
63
64
65

1 analysis of this network. Figures 10 and 11 show the obtained results from the proposed model
2 and those obtained by Osiadacz (1987), Ke and Ti (1999), and Behbahani-Nejad and Bagheri
3 (2010). The obtained results are in good agreement with the others. As it can be seen, the state
4 space results are between the other answers. In another word, the present state space model can
5 give comparable results with those obtained from other methods.

6 Regarding the computational time of the proposed state space model, Table 2 shows CPU
7 time to simulate the considered network with and without trial and error algorithms. With
8 considering that these two methods' answers are very close and looking to the CPU times, one
9 can easily conclude that the direct method is much more efficient.

10 Finally, for investigating the ability of the state space model for different problems, the
11 second test case is simulated by two different boundary conditions. In the first case, the inlet and
12 outlet mass flow rates are supposed to be known. The calculated outlet pressure by this method,
13 which is mentioned in section 4 is compared by the previous one and is shown in Fig. 12. In the
14 second case, the inlet and outlet pressures are considered to be known. The calculated outlet
15 mass flow rate by this method is compared by the corresponding one and it is shown in Fig. 13.
16 The results of the present state space model show that it works well and provides good accuracy
17 when it applies for different problems.

18 **6. Conclusion**

19 The proposed simulation can be applied to analyze the transient flow of natural gas in pipelines
20 and networks with sufficient accuracy. Since the proposed simulation uses a state space model of
21 the transient gas flow, it is more computationally efficient than the other finite difference
22 methods. Moreover, it is not a difficult task to simulate transients in gas networks using the

1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
49
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60
61
62
63
64
65

1 proposed model. One can assemble the state space equations of all the network pipes to simulate
2 the dynamic behavior of a gas network. Thus, the state space model can be used efficiently to
3 analyze more complicated networks. However, as the present simulation is based on the flow
4 state space equations, it can only give the results at the endpoints, not those distributions along
5 the pipelines.

6 **7. Acknowledgement**

7 Khuzestan Gas Company and Shahid Chamran University are acknowledged for providing
8 technical, administrative, and financial assistance.

9 **8. References**

10 Wylie, E. B., Stoner, M. A., and Streeter, V. L., 1971, Network Transient Calculation by Implicit
11 methods, Soc. Pet Eng. J., pp. 356-362.

12 Luongo, C. A., 1986, An Efficient Program for Transient Flow Simulation in Natural Gas
13 Pipelines, 15th Annual Meeting Pipeline Simulation Interest Group (PSIG), New Orleans.

14 Yow, W., 1971, Analysis and Control of Transient Flow in Natural Gas Piping System, Ph.D.
15 dissertation, U. of Michigan, Ann Harbor.

16 Osiadacz, A. J., 1987, Simulation and Analysis of Gas Networks, E. & F.N. Spon, London.

17 Ibraheem, S. O. and Adewumi, M. A., 1996, Higher-Resolution Numerical Solution for 2-D
18 Transient Natural Gas Pipeline Flows, Soc. of Petroleum Eng., SPE 35626, pp. 473-482.

19 Kiuchi, T., 1994, An Implicit Method for Transient Gas Flow in Pipe Networks, Int. J. Heat and
20 Fluid Flow, Vol. 15, No. 5, pp. 378-383.

21 Zhou, J. and Adewumi, M. A., 1996, Simulation of Transient Flow in Natural Gas Pipelines, the

1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
49
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60
61
62
63
64
65

1 Pennsylvania State University, Petroleum and Natural Gas Engineering, GRI-PA 16802.

2
3
4
5
6
7 2 Dukhovnaya, Y. and Adewumi, M. A., 2000, Simulation of non-isothermal transient in
8
9 3 gas/condensate pipelines using TVD schemes, Petroleum and Natural Gas Eng., The
10
11 4 Pennsylvania State University, USA.

12
13
14 5 Tentis, E., Margaris, D., and Papanikas, D., 2003, Transient gas flow simulation using an
15
16 6 Adaptive Method of Lines, U. of Patras, C. R. Mechanics J., pp. 481–487.

17
18
19 7 Ke, S. L. and Ti, H. C., 1999, Transient analysis of isothermal gas flow in pipeline network,
20
21 8 chemical eng. J., pp. 169-177.

22
23
24 9 Gonzales, A. H., De La Cruz, J. M., Andres-Toro, B. D., and Risco-Martin, J. L., 2009,
25
26 10 Modeling and simulation of a gas distribution pipeline network, Applied Mathematical
27
28 11 Modelling, Volume 33, Issue 3, pp. 1584-1600.

29
30
31 12 Reddy, H. P., Narasimhan, S., and Bhallamudi, S. M., 2006, Simulation and State Estimation of
32
33 13 Transient Flow in Gas Pipeline Networks Using a Transfer Function Model, Department of
34
35 14 Chemical Engineering and Department of Civil Engineering, Indian Inst. of Technology,
36
37 15 Madras, Chennai-600036, India.

38
39
40
41 16 Behbahani-Nejad, M. and Shekari, Y., 2010, The accuracy and efficiency of a reduced-order
42
43 17 model for transient flow analysis in gas pipelines, Journal of Petroleum Science and Engineering,
44
45 18 Volume 73, Issues 1-2, pp. 13-19

46
47
48 19 Behbahani-Nejad, M. and Bagheri, A., 2010, The accuracy and efficiency of a MATLAB-
49
50 20 Simulink library for transient flow simulation of gas pipelines and networks, Journal of
51
52 21 Petroleum Science and Engineering, Volume 70, Issues 3-4, pp. 256-265.

53
54
55 22 Gabriella Margaria, Eva Riccomagno, Michael J. Chappell, Henry P. Wynn, 2001, Differential
56
57 23 algebra methods for the study of the structural identifiability of rational function state-space

1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
49
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60
61
62
63
64
65

1 models in the biosciences, *Mathematical Biosciences*, Volume 174, Issue 1, pp. 1-26

2 Pearson, R. K., Kotta, Ü., 2004, Nonlinear discrete-time models: state-space vs. I/O

3 representations, *Journal of Process Control*, Volume 14, Issue 5, pp. 533-538

4 Berendrecht, W.L., Heemink, A.W., van Geer, F.C., J.C. Gehrels, F.C., 2006, A non-linear state

5 space approach to model groundwater fluctuations, *Advances in Water Resources*, Volume 29,

6 Issue 7, pp. 959-973

7 Cristina Rueda, Pilar Rodríguez, 2010, State space models for estimating and forecasting

8 fertility, *International Journal of Forecasting*, Volume 26, Issue 4, pp. 712-724

9 William J. McCausland, Shirley Miller, Denis Pelletier, 2011, Simulation smoothing for state–

10 space models: A computational efficiency analysis, *Computational Statistics & Data Analysis*,

11 Volume 55, Issue 1, pp. 199-212

12 Behbahani-Nejad, M., Ghanbarzadeh, A., Alamian, A., Transient Flow Simulation in Natural

13 Gas Pipelines Using the State Space Model, ASME2010 10th Biennial Conference on

14 Engineering Systems Design and Analysis, ESDA2010-24433, Istanbul, Turkey.

15 Kralik, J., Stiegler, P., Vostry, Z., Zavorka, J., 1998, Dynamic modeling of large scale networks

16 with application to gas distribution, 1st ed., Inst. of Information Theory and Automation of the

17 Czechoslovak Academy of Sciences Prague, Czechoslovakia, ELSEVIER Amsterdam-Axford.

18 Taylor, T. D., Wood, N. E., and Power, J. E., 1962, A Computer Simulation of Gas Flow in Long

19 Pipelines, *Soc. Pet. Eng. J., Trans. AIME*, 225, pp. 297-302.

Appendix A

In this appendix, the algebraic expressions of the parameters used in (17) and (19)-(28) are presented. α , β , γ and b which are used in (17) are stated as (Kralik et al., 1998)

$$\alpha(s) = \alpha_1 + \alpha_2 s \quad (\text{A.1})$$

$$\beta(s) = \beta_1 s \quad (\text{A.2})$$

$$\gamma(s) = \gamma_1 + \gamma_2 s \quad (\text{A.3})$$

$$b(s) = \sqrt{\gamma^2 + 4\alpha\beta}/2 \quad (\text{A.4})$$

Where

$$\alpha_1 = |u^*|fL^* \quad , \quad \alpha_2 = \frac{L}{c} \quad , \quad \beta_1 = \frac{L}{c} \quad , \quad \gamma_1 = \frac{fL^*}{2}u^*|u^*| - \frac{g\Delta h}{c^2} \quad , \quad \beta_1 = \frac{L}{c} \quad (\text{A.5})$$

The other parameters which have been used in (19)-(28) are (Behbahani-Nejad and Bagheri, 2010)

$$\hat{a}_1 = e^{\frac{\gamma_1}{2}} \left\{ \frac{1}{2} \alpha_1 \alpha_2 \left(1 - \frac{1}{6} \gamma_1 + \frac{1}{24} \gamma_1^2 - \frac{1}{240} \gamma_1^3 + \dots \right) \right\} - \frac{\gamma_2}{2} \quad (\text{A.6})$$

$$k_1 = e^{\gamma_1} \quad (\text{A.7})$$

$$a_1 = \hat{a}_1 - \frac{1}{2} \gamma_2 \quad (\text{A.8})$$

$$k_2 = e^{\frac{\gamma_1}{2}} \alpha_1 \left(1 + \frac{1}{24} \gamma_1^2 + \frac{1}{1920} \gamma_1^4 \right) \quad (\text{A.9})$$

$$b_1 = \frac{\alpha_2}{\alpha_1} + \frac{\left(\alpha_1 \beta_1 + \frac{1}{12} \gamma_1 \gamma_2 \right) \left(1 + \frac{1}{40} \gamma_1^2 \right)}{1 + \frac{1}{4} \gamma_1^2 + \frac{1}{320} \gamma_1^4} \quad (\text{A.10})$$

$$c_1 = e^{\frac{\gamma_1}{2}} \beta_1 \left(1 + \frac{1}{24} \gamma_1^2 + \frac{1}{1920} \gamma_1^4 \right) \quad (\text{A.11})$$

1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
49
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60
61
62
63
64
65

$$d_1 = \hat{a}_1 + \frac{1}{2}\gamma_2$$

(A.12)

1

Appendix B

In this appendix, state space relations for other boundary conditions rather than known inlet gas pressure and outlet gas mass flow rate are presented.

For known inlet and outlet gas flow rates, the state space equations are

$$\dot{x}_1 = \frac{1}{c_1 d_1} M_{in} - \frac{1}{c_1 d_1} M_{out} \quad (\text{B.1})$$

$$\dot{x}_2 = x_1 - \frac{1}{d_1} x_2 + \frac{1}{c_1} M_{in} - \frac{\hat{a}_1}{c_1 d_1} M_{out} \quad (\text{B.2})$$

$$\dot{x}_3 = \frac{k_1}{a_1 c_1 d_1 \hat{a}_1} M_{in} - \frac{k_1}{a_1 c_1 d_1 \hat{a}_1} M_{out} \quad (\text{B.3})$$

$$\begin{aligned} \dot{x}_4 = x_3 - \frac{1}{a_1 d_1 \hat{a}_1} x_6 + k_1 \left(\frac{2}{a_1 c_1 d_1} + \frac{1}{a_1 c_1 \hat{a}_1} \right) M_{in} \\ - \left[\frac{k_2 (\hat{a}_1 - b_1)}{a_1 d_1 \hat{a}_1^2} + \frac{2k_1}{a_1 c_1 d_1} \right] M_{out} \end{aligned} \quad (\text{B.4})$$

$$\begin{aligned} \dot{x}_5 = x_4 - \left(\frac{1}{a_1 d_1} + \frac{1}{a_1 \hat{a}_1} + \frac{1}{d_1 \hat{a}_1} \right) x_6 + k_1 \left(\frac{\hat{a}_1}{a_1 c_1 d_1} + \frac{2}{a_1 c_1} \right) M_{in} \\ - \left[\frac{k_2 (\hat{a}_1 - b_1) (a_1 + d_1)}{a_1 d_1 \hat{a}_1^2} + \frac{k_1 \hat{a}_1}{a_1 c_1 d_1} \right] M_{out} \end{aligned} \quad (\text{B.5})$$

$$\dot{x}_6 = x_5 - \left(\frac{1}{a_1} + \frac{1}{d_1} + \frac{1}{\hat{a}_1} \right) x_6 + \frac{k_1 \hat{a}_1}{a_1 c_1} M_{in} - \frac{k_2 (\hat{a}_1 - b_1)}{\hat{a}_1^2} M_{out} \quad (\text{B.6})$$

Outputs of the systems can be written as follows

$$P_{in} = x_2 - \frac{\hat{a}_1}{c_1} P_{in} \quad (\text{B.7})$$

$$P_{out} = x_6 - \frac{b_1 k_2}{\hat{a}_1} M_{out} \quad (\text{B.8})$$

For known inlet and outlet gas pressures, the state space equations are

$$\dot{x}_1 = \frac{-1}{a_1 b_1} x_2 + \frac{k_1}{k_2 a_1 b_1} P_{in} + \frac{\hat{a}_1 - b_1}{k_2 a_1 b_1^2} P_{out} \quad (\text{B.9})$$

$$\dot{x}_2 = x_1 - \left(\frac{1}{a_1} + \frac{1}{b_1}\right)x_2 + \frac{k_1\hat{a}_1}{k_2a_1b_1}P_{in} + \frac{\hat{a}_1 - b_1}{k_2b_1^2}P_{out} \quad (\text{B.10})$$

$$\dot{x}_3 = \frac{-1}{a_1b_1d_1\hat{a}_1}x_6 + \frac{-k_2c_1 + k_1\hat{a}_1}{k_2a_1b_1d_1\hat{a}_1^2}P_{in} - \frac{1}{k_2a_1b_1d_1\hat{a}_1}P_{out} \quad (\text{B.11})$$

$$\begin{aligned} \dot{x}_4 = x_3 - & \left(\frac{1}{a_1b_1d_1} + \frac{1}{a_1b_1\hat{a}_1} + \frac{1}{a_1d_1\hat{a}_1} + \frac{1}{b_1d_1\hat{a}_1}\right)x_6 \\ & + \left[\frac{-c_1}{\hat{a}_1^2}\left(\frac{1}{a_1b_1} + \frac{1}{a_1d_1} + \frac{1}{b_1d_1}\right) + \frac{2k_1}{k_2a_1b_1d_1}\right]P_{in} \\ & - \frac{1}{k_2b_1d_1}\left[\frac{2}{a_1} + \frac{1}{\hat{a}_1}\right]P_{out} \end{aligned} \quad (\text{B.12})$$

$$\begin{aligned} \dot{x}_5 = x_4 - & \left(\frac{1}{a_1b_1} + \frac{1}{a_1d_1} + \frac{1}{b_1d_1} + \frac{1}{a_1\hat{a}_1} + \frac{1}{b_1\hat{a}_1} + \frac{1}{d_1\hat{a}_1}\right)x_6 \\ & + \left[\frac{-c_1}{\hat{a}_1^2}\left(\frac{1}{a_1} + \frac{1}{b_1} + \frac{1}{d_1}\right) + \frac{k_1\hat{a}_1}{k_2a_1b_1d_1}\right]P_{in} \\ & - \frac{1}{k_2b_1d_1}\left[\frac{\hat{a}_1}{a_1} + 2\right]P_{out} \end{aligned} \quad (\text{B.13})$$

$$\dot{x}_6 = x_5 - \left(\frac{1}{a_1} + \frac{1}{b_1} + \frac{1}{d_1} + \frac{1}{\hat{a}_1}\right)x_6 - \frac{c_1}{\hat{a}_1^2}P_{in} - \frac{\hat{a}_1}{k_2b_1d_1}P_{out} \quad (\text{B.14})$$

1 Outputs of the systems can be written as follows

$$M_{out} = x_2 - \frac{\hat{a}_1}{b_1k_2}P_{out} \quad (\text{B.15})$$

$$M_{in} = x_6 + \frac{c_1}{\hat{a}_1}P_{in} \quad (\text{B.16})$$

2 For known outlet gas pressure and inlet gas flow rate, the state space equations are

$$\dot{x}_1 = \frac{-k_1}{k_2a_1b_1c_1d_1}x_4 + \frac{1}{a_1b_1c_1d_1}\left(1 - \frac{k_1}{k_2c_1}\right)M_{in} + \frac{1}{k_2a_1b_1c_1d_1}P_{out} \quad (\text{B.17})$$

$$\begin{aligned} \dot{x}_2 = x_1 - & \left(\frac{1}{a_1b_1d_1} + \frac{2k_1\hat{a}_1}{k_2a_1b_1c_1d_1}\right)x_4 \\ & + \left(\frac{1}{a_1b_1c_1} + \frac{1}{a_1c_1d_1} + \frac{1}{b_1c_1d_1} - \frac{2k_1\hat{a}_1^2}{k_2a_1b_1c_1^2d_1}\right)M_{in} \\ & + \left(\frac{1}{k_2b_1c_1d_1} + \frac{2\hat{a}_1}{k_2a_1b_1c_1d_1}\right)P_{out} \end{aligned} \quad (\text{B.18})$$

$$\begin{aligned}\dot{x}_3 = x_2 &- \left(\frac{1}{a_1 b_1} + \frac{1}{a_1 d_1} + \frac{1}{b_1 d_1} + \frac{k_1 \hat{a}_1^2}{k_2 a_1 b_1 c_1 d_1} \right) x_4 \\ &+ \left(\frac{1}{a_1 c_1} + \frac{1}{b_1 c_1} + \frac{1}{c_1 d_1} - \frac{k_1 \hat{a}_1^3}{k_2 a_1 b_1 c_1^2 d_1} \right) M_{in} \\ &+ \left(\frac{2 \hat{a}_1}{k_2 b_1 c_1 d_1} + \frac{\hat{a}_1^2}{k_2 a_1 b_1 c_1 d_1} \right) P_{out}\end{aligned}\quad (\text{B.19})$$

$$\dot{x}_4 = x_3 - \left(\frac{1}{a_1} + \frac{1}{b_1} + \frac{1}{d_1} \right) x_4 + \frac{1}{c_1} M_{in} + \frac{\hat{a}_1^2}{k_2 b_1 c_1 d_1} P_{out}\quad (\text{B.20})$$

$$\dot{x}_5 = \frac{-k_1}{k_2 a_1 b_1 c_1 d_1} x_5 + \frac{k_1}{k_2 a_1 b_1 c_1 d_1} M_{in} + \frac{k_1 \hat{a}_1}{k_2^2 a_1 b_1^2 c_1 d_1} P_{out}\quad (\text{B.21})$$

$$\begin{aligned}\dot{x}_6 = x_5 &- \left(\frac{1}{a_1 b_1 d_1} + \frac{2k_1 \hat{a}_1}{k_2 a_1 b_1 c_1 d_1} \right) x_8 + \left(\frac{k_1}{k_2 a_1 b_1 c_1} + \frac{2k_1 \hat{a}_1}{k_2 a_1 b_1 c_1 d_1} \right) M_{in} \\ &- \left(\frac{\hat{a}_1}{k_2 a_1 b_1^2 d_1} + \frac{2k_1 \hat{a}_1^2}{k_2^2 a_1 b_1^2 c_1 d_1} - \frac{1}{k_2 a_1 b_1 d_1} \right) P_{out}\end{aligned}\quad (\text{B.22})$$

$$\begin{aligned}\dot{x}_7 = x_6 &- \left(\frac{1}{a_1 b_1} + \frac{1}{a_1 d_1} + \frac{1}{b_1 d_1} + \frac{k_1 \hat{a}_1^2}{k_2 a_1 b_1 c_1 d_1} \right) x_8 \\ &+ \left(\frac{2k_1 \hat{a}_1}{k_2 a_1 b_1 c_1} + \frac{k_1 \hat{a}_1^2}{k_2 a_1 b_1 c_1 d_1} \right) M_{in} \\ &+ \left(\frac{\hat{a}_1}{k_2 b_1^2 d_1} + \frac{\hat{a}_1}{k_2 a_1 b_1^2} - \frac{1}{k_2 a_1 b_1} - \frac{1}{k_2 b_1 d_1} \right) P_{out}\end{aligned}\quad (\text{B.23})$$

$$\dot{x}_8 = x_7 - \left(\frac{1}{a_1} + \frac{1}{b_1} + \frac{1}{d_1} \right) x_8 + \frac{k_1 \hat{a}_1^2}{k_2 a_1 b_1 c_1} M_{in} + \left(\frac{\hat{a}_1}{k_2 b_1^2} - \frac{1}{k_2 b_1} \right) P_{out}\quad (\text{B.24})$$

1 Outputs of the systems can be written as follows

$$P_{in} = x_4 + \frac{\hat{a}_1}{c_1} M_{in}\quad (\text{B.25})$$

$$M_{out} = x_8 - \frac{\hat{a}_1}{b_1 k_2} P_{out}\quad (\text{B.26})$$

2

Figure1

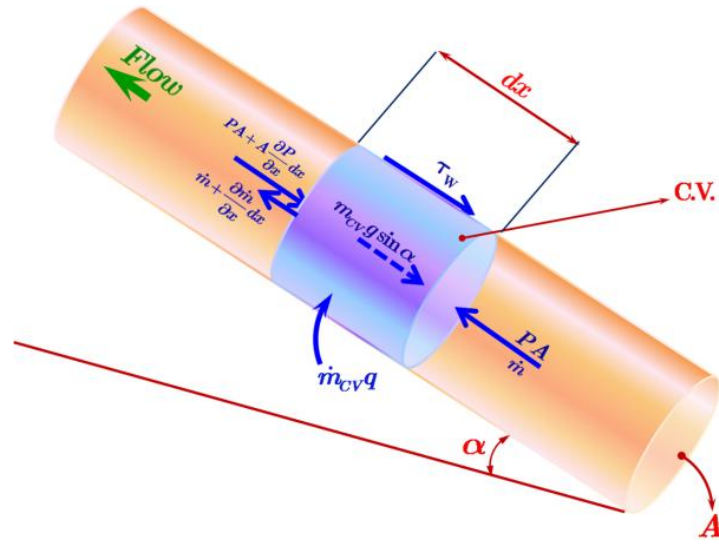


Fig.1. A control volume in a general gas pipeline

Figure2

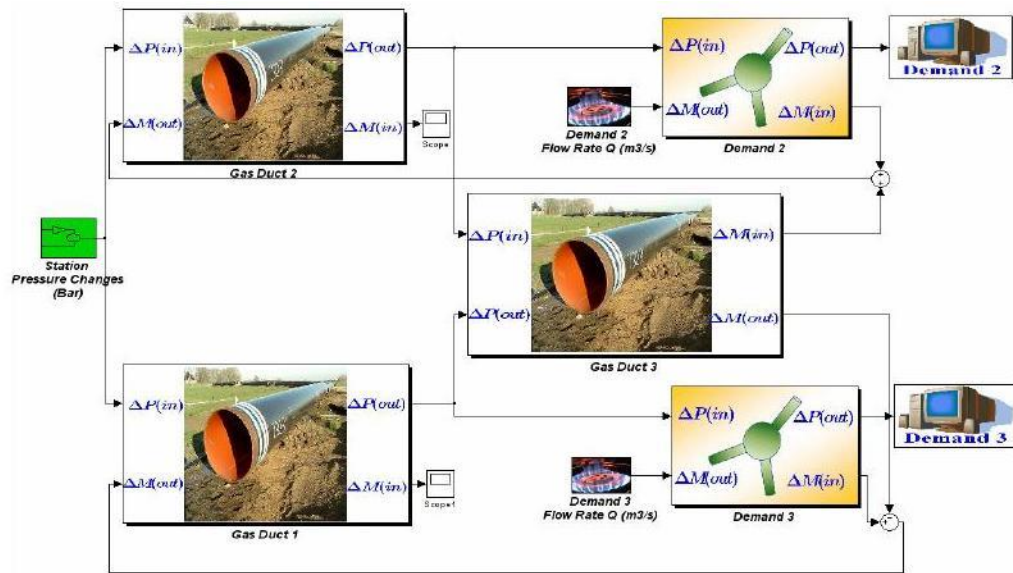


Fig.2. Simulink model of a gas pipeline network

Figure3

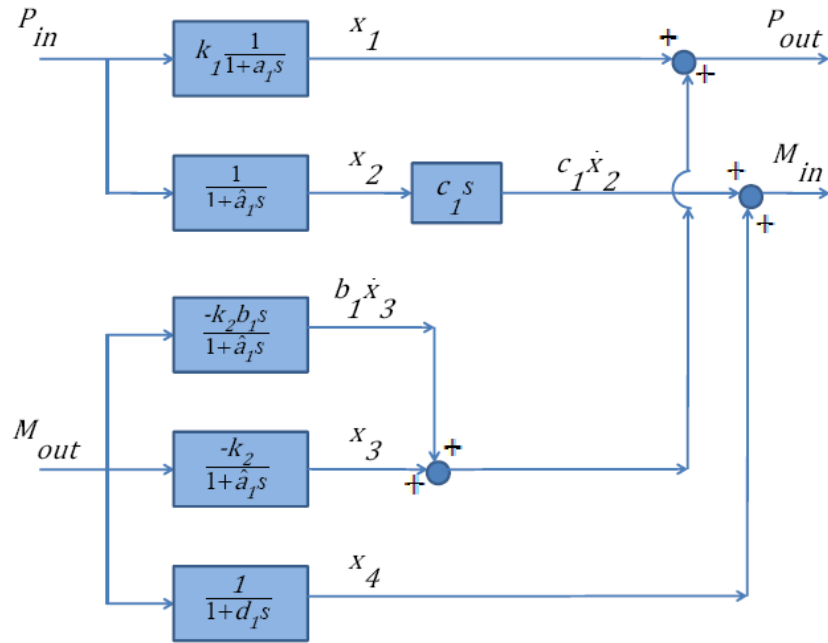


Fig.3. Block diagram of model when the inlet pipeline pressure and the outlet gas flow rate are inputs

Figure4

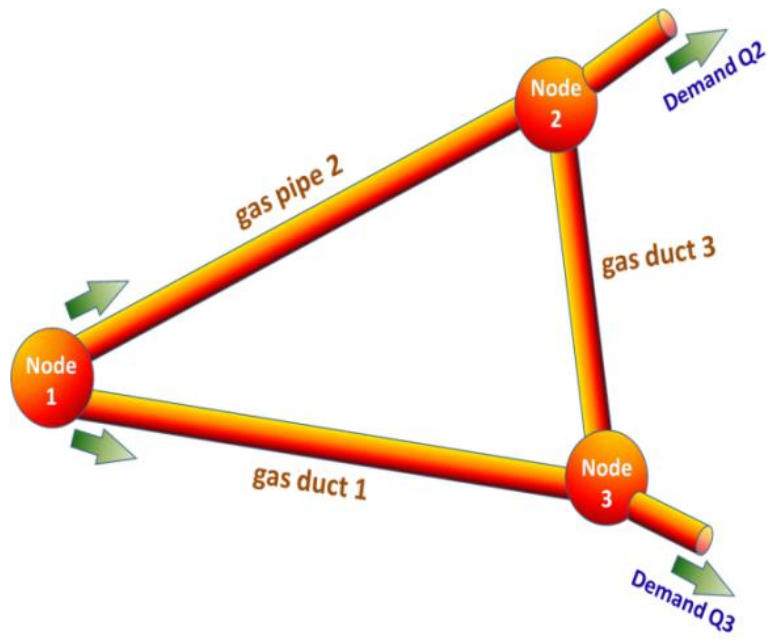


Fig.4. The gas pipeline network

Figure5

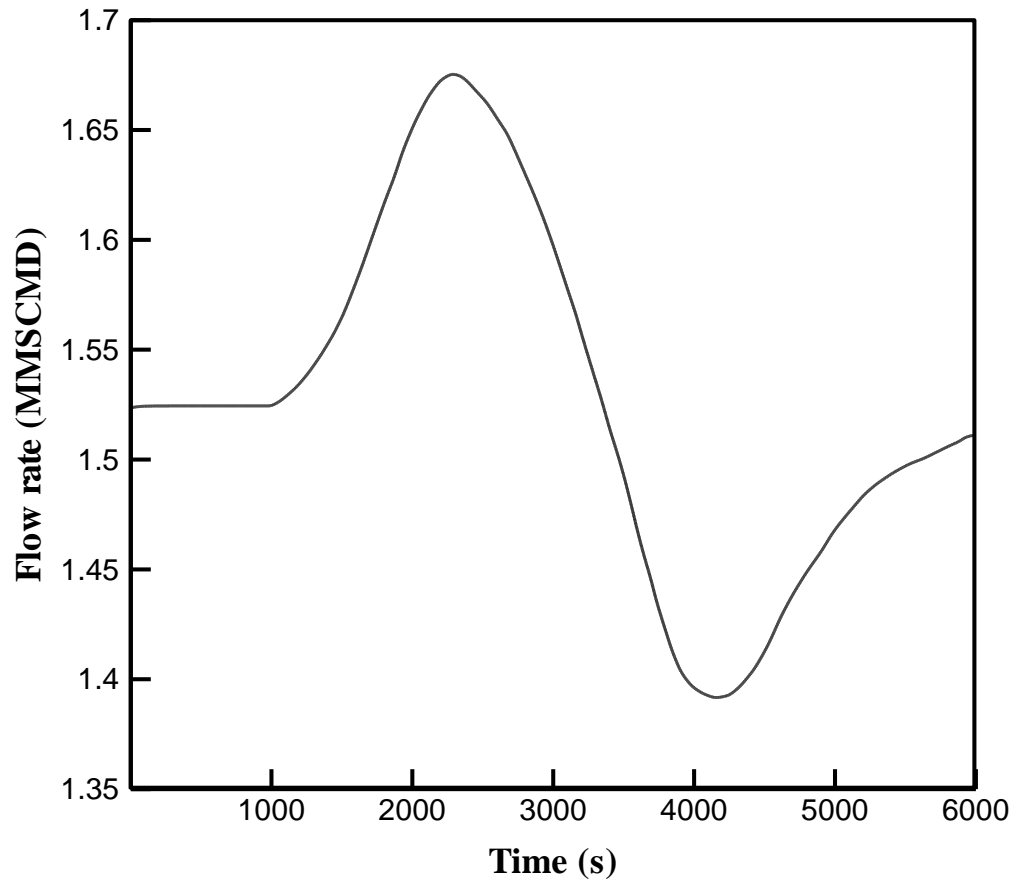


Fig.5. A 6000-sec irregular flow imposed at the pipe outlet

Figure6

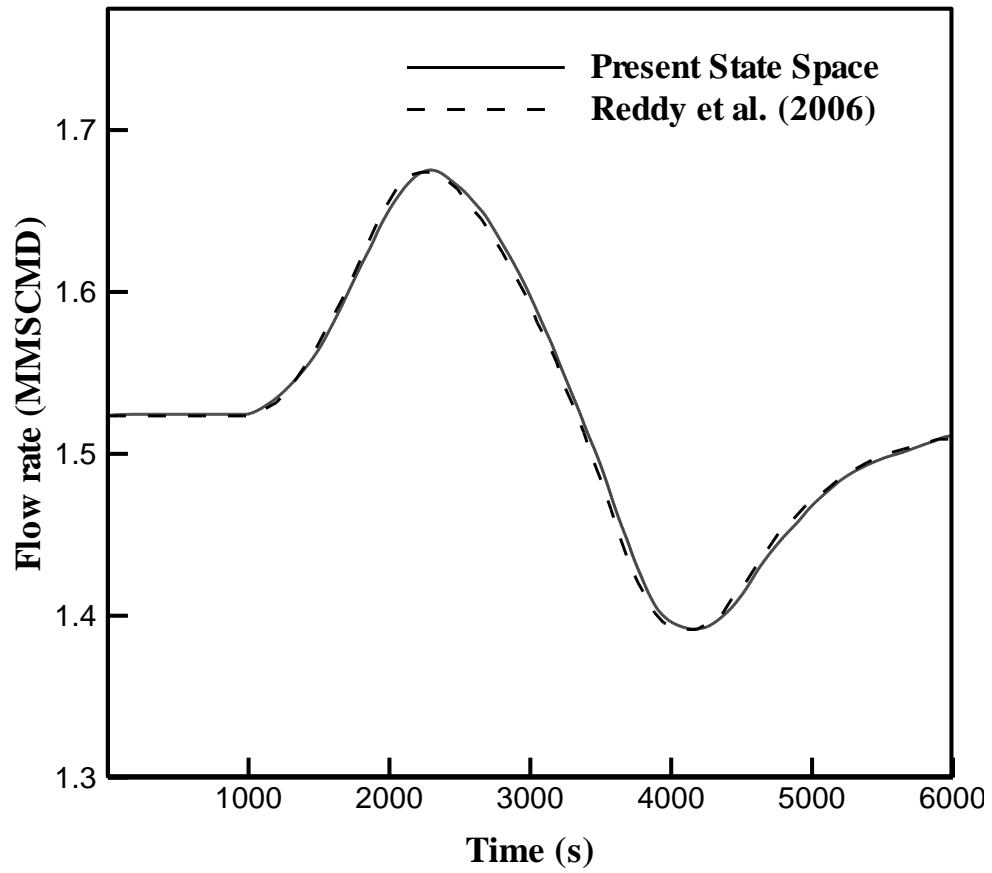


Fig.6. Comparison of mass flow rate time history at the inlet

Figure7

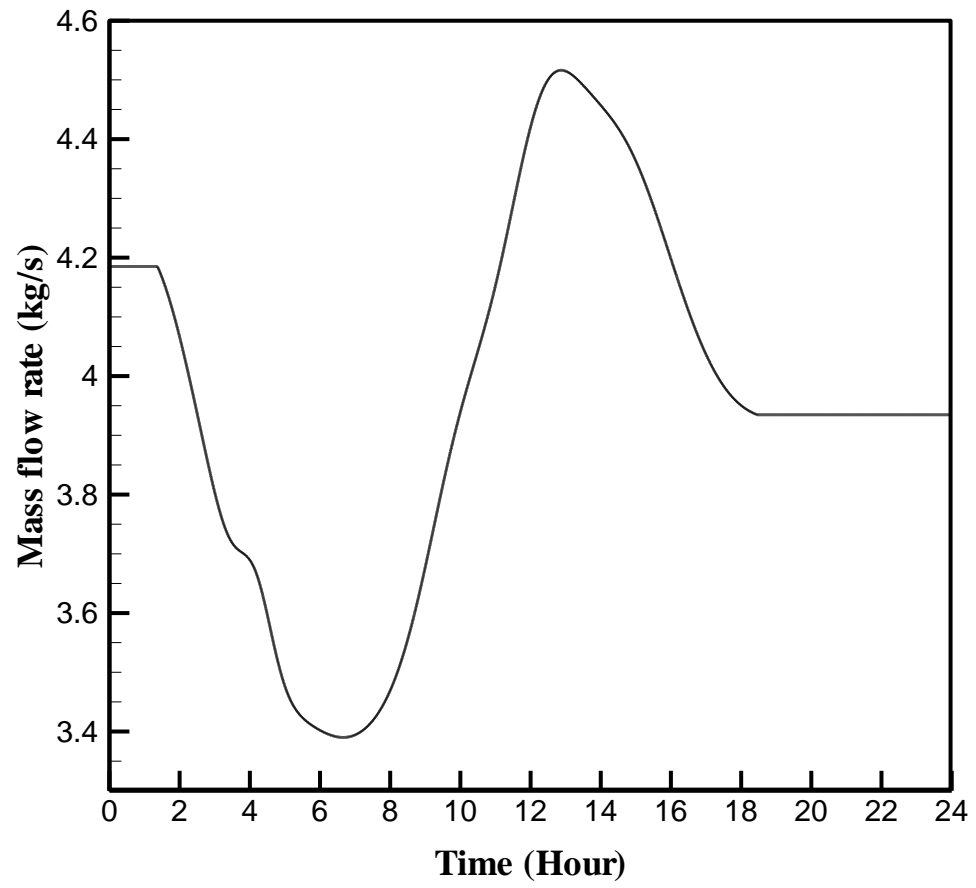


Fig.7. A 24-hour irregular flow imposed at the pipe outlet

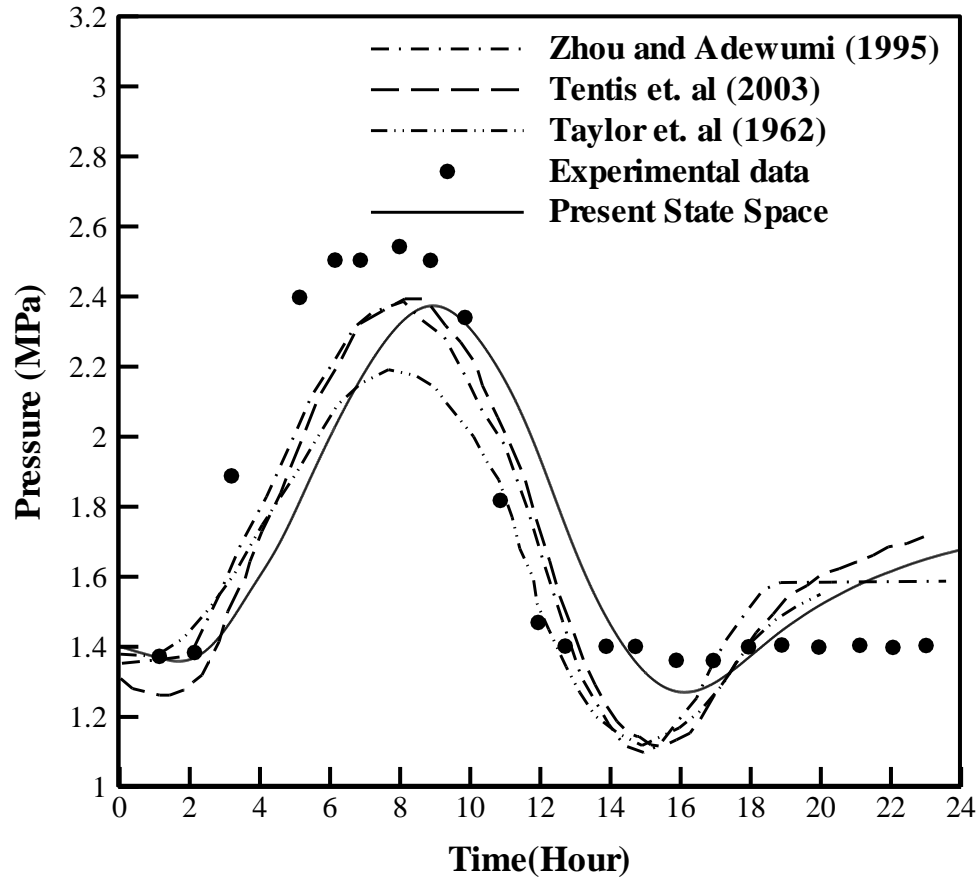


Fig. 8. Comparison of pressure time history at the outlet

Figure9

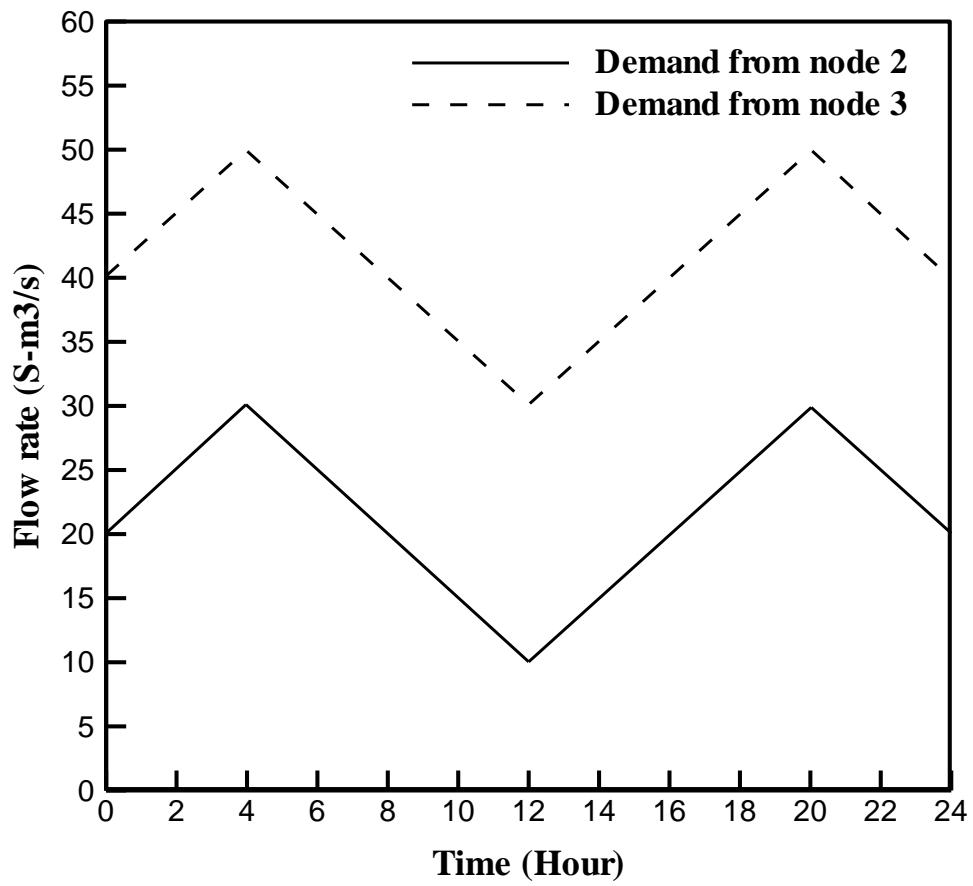


Fig. 9. Demands versus time for nodes 2 and 3 of the simulated network

Figure10

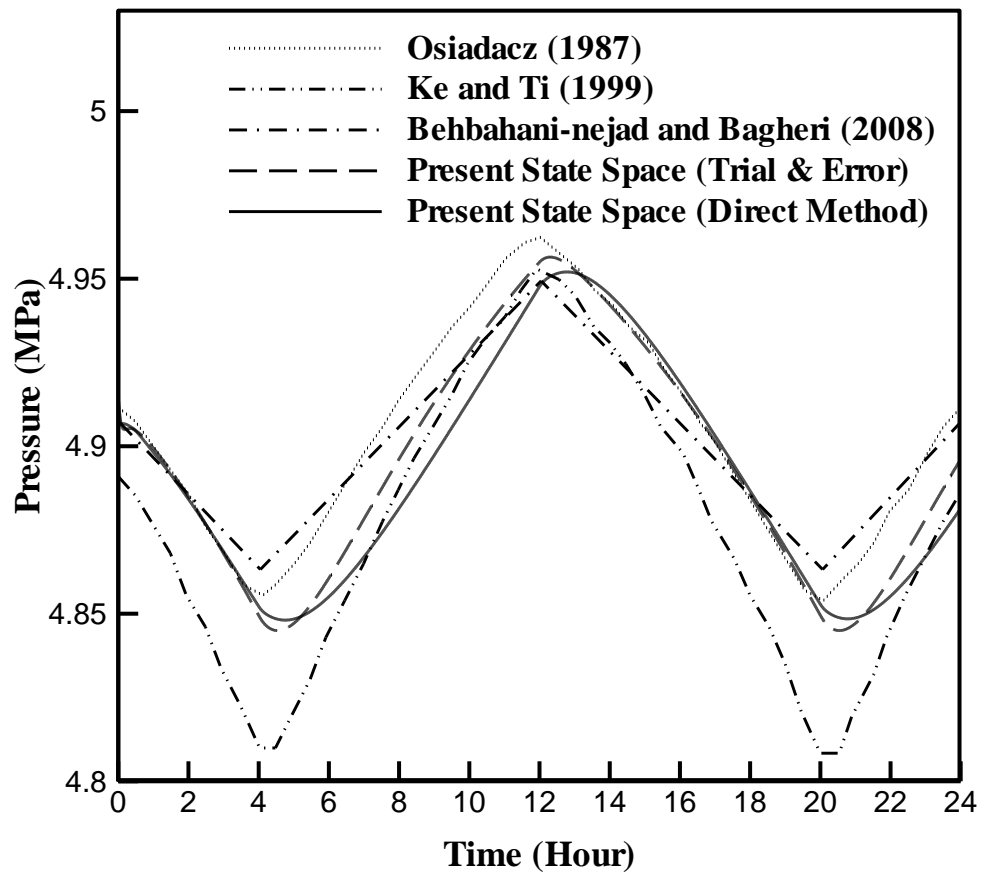


Fig.10. Outlet pressure results for node 2

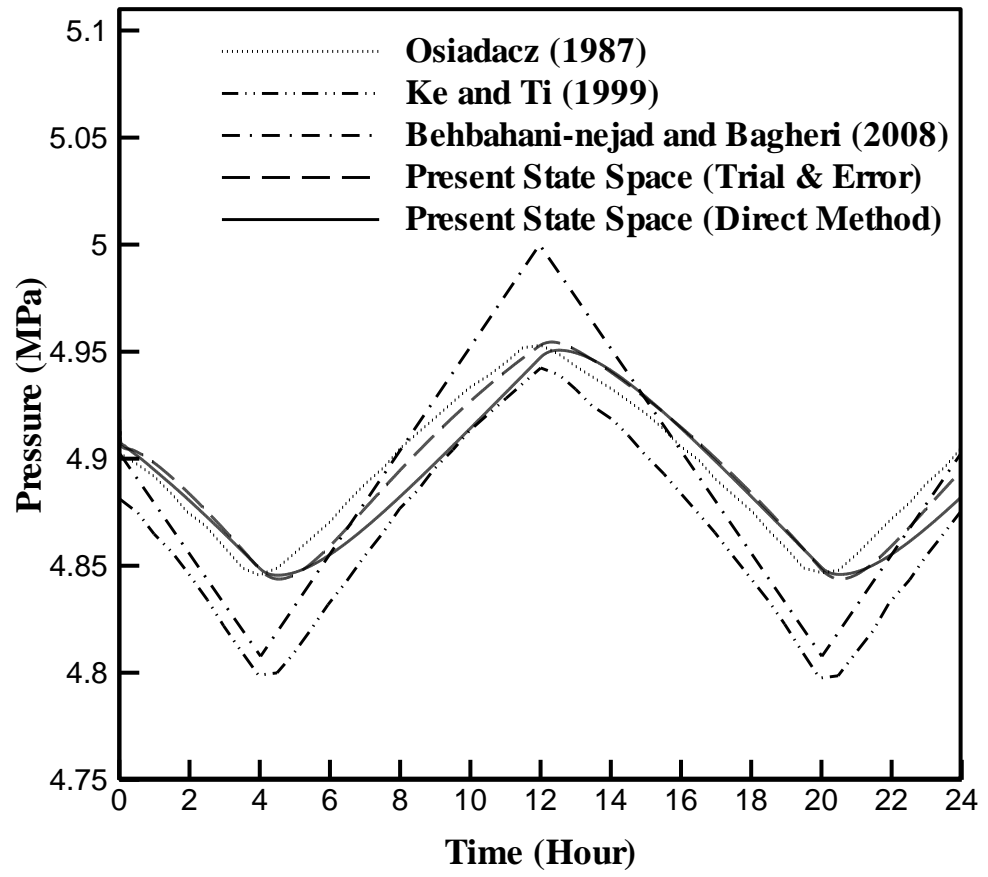


Fig.11. Outlet pressure results for node 3

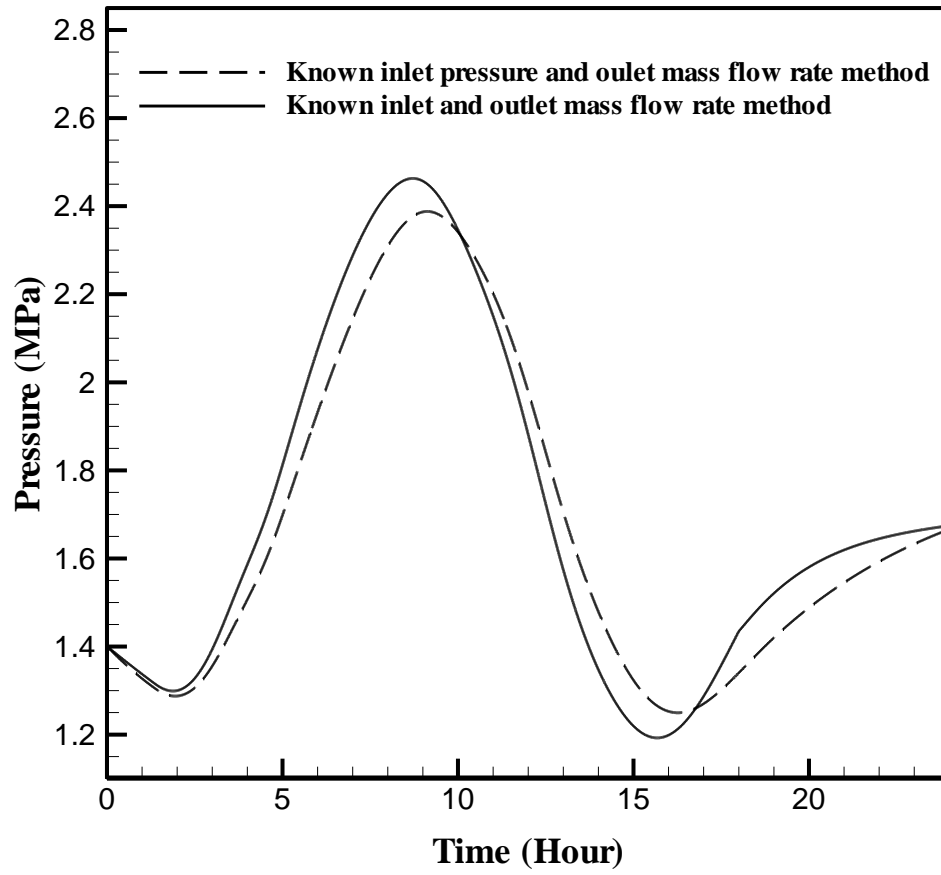


Fig. 12. Comparison of pressure time history at the outlet

Figure13

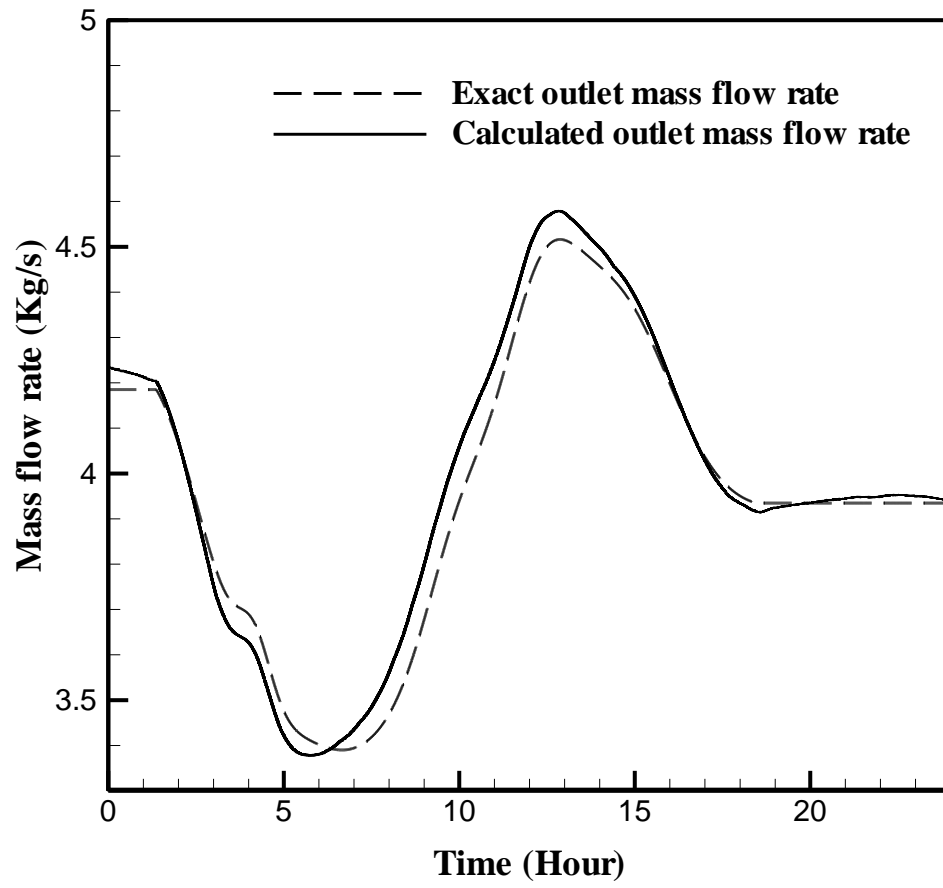


Fig.13. Comparison of mass flow rate time history at the outlet

Table 1 Pipe geometrical data for the considered network

Gas Pipe ID	From node	To node	Diameter (m)	Length (km)
1	1	3	0.6	80
2	1	2	0.6	90
3	2	3	0.6	100

Table 2 CPU time for network simulation

	Direct Method	Trial & Error Method	Transfer Function Method (Behbahani-Nejad and Bagheri, 2010)	Implicit Steger-Warming FSM Method (Behbahani-Nejad and Bagheri, 2010)
CPU Time (Second)	0.73	1492	27.2	41400