



دانشگاه شهید چمران اهواز
دفتر پژوهش شرکت گاز استان خوزستان

گزارش سالیانه فعالیت‌های انجام‌شده در سال ۱۳۸۷

KHGCRO YR 1387

۲۹ فروردین‌ماه ۱۳۸۸

گزارش سالانه فعالیت‌های ۱۳۸۷	عنوان
KHGCRO YR 1387	کد گزارش
۱۳۸۸ / ۱ / ۲۹	تاریخ
دکتر مرتضی بهبهانی‌نژاد، عضو هیئت علمی گروه مهندسی مکانیک دانشگاه شهید چمران مهندسی مازیار چنگیزیان، دانشجوی دکتری مهندسی مکانیک دانشگاه شهید چمران مهندس حمید دارابی، کارشناسی ارشد فرآوری و انتقال گاز دانشگاه صنعت نفت اهواز خانم فروزنده عمید، کارشناس شیمی کاربردی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد کرج	تدوین کنندگان
در این گزارش شرح فعالیت‌های سال ۱۳۸۷ دفتر پژوهش شرکت گاز استان خوزستان ارائه شده است. در ابتدا فعالیت‌های مرتبط با تکمیل نرم‌افزار انتخاب کتورها تشریح شده است. پس از آن به فعالیت‌های مربوط به ایستگاه‌های تقلیل فشار و اندازه‌گیری با تاکید بر ایستگاه‌های کابینتی و زیرزمینی پرداخته شده است. در ادامه فعالیت‌هایی که در ارتباط با مدل‌سازی جریان غیردائم گاز درون خطوط لوله و شبکه انجام شده است، مورد بحث قرار گرفته است. خلاصه مقالات تدوین شده که به همایش‌های معتبر علمی ارسال و ارائه شده است، در قالب فصلی جداگانه در ادامه مطالب آمده است. سپس فعالیت‌های مرتبط با ایجاد غرفه و شرکت در نمایشگاه هفته پژوهش مورد بحث قرار گرفته و در نهایت سایر فعالیت‌هایی که بصورت موردی ارجاع شده و تعریف شده‌اند ارائه شده است.	چکیده

فهرست مطالب

۱	مقدمه
۳	طراحی نرم افزار انتخاب کنتور
۳	۱.۲ گنجاندن بخش دبی سنج دیافراگمی در نرم افزار
۸	۲.۲ دبی سنج توربینی
۱۰	۳.۲ شرکت های مختلف ارائه دهنده دبی سنج های توربینی
۱۱	۱.۳.۲ شرکت توس و متک
۱۲	۲.۳.۲ شرکت DMS
۱۶	۳.۳.۲ شرکت Emerson
۱۸	۴.۳.۲ شرکت IMAC
۲۱	۵.۳.۲ شرکت FMC
۲۵	۶.۳.۲ شرکت Elster
۳۲	۷.۳.۲ شرکت BELL
۳۹	۸.۳.۲ شرکت Flow Technology
۴۱	۹.۳.۲ شرکت Tancy Investment Group
۴۵	۱۰.۳.۲ شرکت MUELLER
۴۶	۱۱.۳.۲ شرکت HOFFER
۵۳	۱۲.۳.۲ شرکت Equimeter
۵۷	۱۳.۳.۲ شرکت RMG
۶۰	۱۴.۳.۲ شرکت Instromet
۶۲	۱۵.۳.۲ شرکت ACTARIS
۶۴	۱۶.۳.۲ شرکت i-Meter
۶۷	۴.۲ گنجاندن بخش دبی سنج توربینی در نرم افزار
۷۲	۵.۲ بخش تصحیحات اعمال شده به نرم افزار
۷۷	۶.۲ کلیات نرم افزار انتخاب کنتور
۷۹	۷.۲ نصب نرم افزار انتخاب دبی سنج
۷۹	۱.۷.۲ راهنمای نصب

- ۸۰..... منابع ۸.۲
- ۸۲..... ۳ ایستگاه‌های تقلیل فشار و اندازه‌گیری
- ۸۴..... ۱۱.۳ استانداردهای کلی ایستگاه‌های تقلیل فشار و اندازه‌گیری
- ۸۴..... ۱.۱.۳ معیار عملکرد در استانداردهای ایستگاه تقلیل فشار
- ۸۵..... ۲.۱.۳ آماده ساختن سایت برای نصب ایستگاه‌های استاندارد
- ۸۵..... ۳.۱.۳ مونتاژ و نصب استاندارد ایستگاه‌ها
- ۸۶..... ۴.۱.۳ تشکیل کمیسیون و تست یک ایستگاه تقلیل فشار گاز و اندازه‌گیری
- ۸۶..... ۵.۱.۳ تجدید بنای سایت
- ۸۶..... ۶.۱.۳ تدوین یک گزارش کامل و مستند سازی
- ۸۶..... ۷.۱.۳ موقعیت ایستگاه‌ها
- ۸۷..... ۸.۱.۳ طرح اولیه ایستگاه
- ۸۷..... ۹.۱.۳ دیگر فرضیات
- ۸۸..... ۱۲.۳ استانداردهای ایمنی ایستگاه‌ها
- ۸۸..... ۱.۲.۳ محیط‌های پرخطر
- ۸۸..... ۲.۲.۳ محافظت پرسنل
- ۸۸..... ۳.۲.۳ محافظت در برابر آتش
- ۸۹..... ۴.۲.۳ خطر رعد و برق و اتصال زمین در ایستگاه
- ۹۰..... ۵.۲.۳ روشنایی
- ۹۰..... ۶.۲.۳ خروجی‌ها و حصارکشی‌ها
- ۹۱..... ۷.۲.۳ هواکش و تخلیه
- ۹۱..... ۸.۲.۳ سیستم قطع فعالیت
- ۹۲..... ۹.۲.۳ مارک‌زنی
- ۹۲..... ۱۳.۳ استانداردهای سازه‌های ایستگاه‌ها
- ۹۲..... ۱.۳.۳ ساختمان‌ها
- ۹۳..... ۲.۳.۳ سازه‌های زیرزمینی
- ۹۴..... ۳.۳.۳ ارتعاشات لوله‌ای
- ۹۴..... ۴.۳ استانداردهای محافظت در برابر خوردگی ایستگاه‌ها
- ۹۵..... ۵.۳ استانداردهای تجهیزات الکتریکی ایستگاه‌ها

۹۵	۶.۳ استانداردهای فاضلاب ایستگاه‌ها
۹۵	۱.۶.۳ سیالات فرآیندی
۹۵	۲.۶.۳ روان‌آبهای بارانی
۹۵	۳.۶.۳ آبهای روغنی
۹۶	۴.۶.۳ هرزآب
۹۶	۵.۶.۳ تجهیزات زیرزمینی
۹۶	۷.۳ استانداردهای تجهیزات داخلی ایستگاه‌های تقلیل فشار
۹۹	۱.۷.۳ استانداردهای فیلترسازی گاز
۱۰۶	۲.۷.۳ استانداردهای واحد گرمکن
۱۱۵	۳.۷.۳ استانداردهای طراحی واحد بوزنی به گاز
۱۳۴	۴.۷.۳ استانداردهای دبی‌سنج‌ها
۱۳۷	۵.۷.۳ استانداردهای لوله‌کشی ایستگاه‌ها
۱۴۱	۶.۷.۳ استانداردهای رگولاتورها
۱۴۶	۷.۷.۳ ظرف‌های تحت فشار
۱۴۶	۸.۷.۳ شیرهای ایستگاه
۱۴۶	۸.۳ ایستگاه‌های کابینتی
۱۴۷	۱.۸.۳ مقایسه ایستگاه‌های کابینتی و مسطح از لحاظ تجهیزات و ابعاد
۱۵۱	۲.۸.۳ مزایا، محدودیت‌ها و ملاحظات لازم جهت استفاده از ایستگاه‌های کابینتی
۱۵۳	۳.۸.۳ تحلیل فرآیندی جریان در یک TBS کابینتی و مسطح
۱۶۳	۱۹.۳ ایستگاه‌های زیرزمینی
۱۶۴	۱.۹.۳ مدل BD-RMG 470 - Krysalis
۱۶۵	۲.۹.۳ مدل RMG 470 "Krysalis" PN 16
۱۶۶	۳.۹.۳ مدل BD - RMG „Krysalis 19
۱۶۸	۴.۹.۳ مدل BD - RMG „mini-Krysalis 19
۱۶۸	۵.۹.۳ مدل RMG -UKA 280 „Vector
۱۶۹	۶.۹.۳ مدل RMG 402 „Vector
۱۷۰	۷.۹.۳ مدل RMG-UKA 680 „Vector
۱۷۱	۸.۳.۹ مدل RMG - UKA „Krysalis 16
۱۷۴	۱۰.۳ طراحی ایستگاه‌های اندازه‌گیری به روش آلتراسونیک

۱۷۵	.....۱۰.۳.۱ مشخصه‌های USM
۱۷۶	.....۱۰.۳.۲ ملاحظات کلی طراحی USM
۱۷۷	.....۱۰.۳.۳ ملاحظات طراحی سایت استفاده از USM
۱۷۸	.....۱۰.۳.۴ ملاحظات مربوط به طراحی و مونتاژ لوله USM
۱۸۰	.....۱۰.۳.۵ ملاحظات بهم متصل کردن لوله‌ها
۱۸۱	.....۱۰.۳.۶ ملاحظات داده‌ای در فرستنده USM
۱۸۲	.....۱۰.۳.۷ تشکیلات فرستنده USM
۱۸۲	.....۱۰.۳.۸ ملاحظات داده‌های کامپیوتری جریان
۱۸۳	.....۱۰.۳.۹ تشکیلات کامپیوتر جریان
۱۸۴	.....۱۰.۳.۱۰ اندازه و ابعاد USM
۱۸۵	.....۱۰.۳.۱۱ مواد ساخت USM
۱۸۶	.....۱۰.۳.۱۲ شکل دهنده پروفیل جریان
۱۸۷	.....۱۰.۳.۱۳ ملاحظات کنترل ولوها و شیرهای رگولاتوری
۱۸۸	.....۱۰.۳.۱۴ اهدرها
۱۹۰	.....۱۰.۳.۱۵ لوله‌کشی لوله اندازه‌گیر
۱۹۳	.....۱۱.۳ منابع
۱۹۴	.....۴ بررسی روشهای حل جریان غیردائم گاز
۱۹۶	.....۴.۱ روشهای حل دقیق برای تحلیل جریان غیردائم گاز
۲۰۳	.....۴.۱.۱ روش لکس - فردریش
۲۰۴	.....۴.۱.۲ روش لکس - وندروف
۲۰۵	.....۴.۱.۳ روش مککورمک
۲۰۶	.....۴.۱.۴ روش رازانوف (برستین - میرین)
۲۰۷	.....۴.۱.۵ الگوریتم وارمینگ-کاتلر-لومکس (WKL)
۲۰۸	.....۴.۱.۶ روشهای مرتبه سوم تنظیم شده
۲۱۰	.....۴.۱.۷ روش ذوزنقهای (TCIM)
۲۱۱	.....۴.۱.۸ روش گادانوف
۲۱۷	.....۴.۱.۹ روش رو
۲۲۳	.....۴.۱.۱۰ روش تقریب اوشر

۲۲۴	..... ۱۱.۱.۴ الگوریتم انکوئیست - اوشر
۲۲۶	..... ۱۲.۱.۴ الگوریتم‌های پادبادسوی مرتبه دوم به بالا
۲۳۵	..... ۱۳.۱.۴ الگوریتم پادبادسوی مرتبه دوم فروم
۲۳۷	..... ۱۴.۱.۴ روش انتقال تصحیحی شار (FCT)
۲۳۹	..... ۱۵.۱.۴ روشهای با دقت تحلیل بالا
۲۶۴	..... ۱۶.۱.۴ روش کاملاً ضمنی فرمولاسیون دلتا در تحلیل رفتار غیردائم
۲۶۸	..... ۱۷.۱.۴ ارائه خلاصه نتایجی از روشهای بحث شده
۲۶۸	..... ۱۸.۱.۴ مقایسه نتایج روشهای عددی با حل دقیق (دسته اول)
۲۸۲	..... ۱۹.۱.۴ مقایسه نتایج روش ضمنی دلتا با الگوریتم TVD (دسته دوم)
۲۸۸	..... ۲. روش توابع تبدیل در حل جریان غیردائم گاز
۳۰۳	..... ۱۳. ارائه نتایج و بحث روی آنها
۳۰۵	..... ۱.۳.۴ تغییرات متناوب دبی خروجی (نمونه اول)
۳۰۸	..... ۲.۳.۴ تغییرات غیر متناوب در دبی خروجی (نمونه دوم)
۳۰۹	..... ۳.۳.۴ گذر آهسته جریان گاز با دبی خروجی متغیر (نمونه سوم)
۳۱۲	..... ۴.۳.۴ شرایط غیردائم با تغییر ناگهانی دبی ورودی (نمونه چهارم)
۳۱۴	..... ۵.۳.۴ شرایط غیردائم با تغییر ناگهانی فشار ورودی (نمونه پنجم)
۳۱۵	..... ۶.۳.۴ شرایط غیردائم با تغییر ناگهانی فشار خروجی (نمونه ششم)
۳۲۱	..... ۴. مراجع
۳۲۳	..... ۵ شرکت در سمینارها و کنفرانس‌های داخلی و خارجی و مقالات ارائه شده
۳۲۳	..... ۱.۵ نمایشگاه نفت و گاز
۳۲۴	..... ۱.۱.۵ توس متک
۳۲۵	..... ۲.۱.۵ شرکت شاتل پارس
۳۲۶	..... ۳.۱.۵ شرکت KOBOLD
۳۲۷	..... ۴.۱.۵ گروه مهرکاناز
۳۲۸	..... ۵.۱.۵ شرکت Endress+Hauser
۳۲۸	..... ۶.۱.۵ شرکت آزمون متمم
۳۲۹	..... ۲.۵ دومین همایش گاز ایران

- ۱.۲.۵ شبیه سازی سه بعدی سیستم حفاظت کاتدیک لوله های گاز مدفون در خاک به روش
المان مرزی (چکیده)..... ۳۳۰
- ۲.۲.۵ تحلیل جریان گذرای گاز طبیعی با استفاده از توابع تبدیل و مقایسه نتایج آن با روش های
عددی غیردائم (چکیده)..... ۳۳۰
- ۳.۵کنگره‌ی جهانی علوم، مهندسی و تکنولوژی آلمان..... ۳۳۱
- ۱.۳.۵ کتابخانه سیمولینکی برای شبیه‌سازی جریان غیردائم گاز درون شبکه (چکیده)..... ۳۳۲
- ۲.۳.۵ مدل‌سازی رتبه کاسته جریان غیردائم گاز درون لوله‌ها (چکیده)..... ۳۳۲
- ۴.۵دوازدهمین کنفرانس دینامیک شاره‌ها..... ۳۳۳
- ۱.۴.۵ نقش تصحیح استاتیکی در مدل‌سازی رتبه‌کاسته جریان گذرا درون خطوط لوله گاز
طبیعی (چکیده)..... ۳۳۳
- ۵.۵کنفرانس بین‌المللی مهندسی مکانیک ۳۳۴
- ۱.۵.۵ تحلیل ویژه جریان گذرای گاز طبیعی درون خطوط لوله (چکیده)..... ۳۳۴
- ۶.۵دومین کنفرانس لوله و خطوط انتقال نفت و گاز..... ۳۳۴
- ۱.۶.۵ مقایسه روش المان مرزی و روش مدار معادل در مدل‌سازی عددی سیستم‌های حفاظت
کاتدیک خطوط لوله (چکیده)..... ۳۳۵
- ۲.۶.۵ دقت و سرعت محاسباتی روش‌های عددی مختلف برای تحلیل جریان گذرای گاز طبیعی
(چکیده)..... ۳۳۶
- ۶فعالیت‌های انجام شده در هفته پژوهش ۳۳۷**
- ۱.۶.۱غرفه هفته پژوهش..... ۳۳۷
- ۲.۶.۲سمینارهای هفته پژوهش..... ۳۴۶
- ۳.۶.۳منابع..... ۳۴۷
- ۷سایر فعالیت‌ها ۳۴۸**
- ۱.۷.۱مصارف نوین گاز طبیعی..... ۳۴۸
- ۱.۱.۷.۱.۱مباران الکترونیکی لوله‌های پلی اتیلن ضخیم با قطر (PE- Xe)..... ۳۴۸
- ۲.۱.۷.۲.۱.۷ اتصال به اینترنت از طریق گاز..... ۳۵۰
- ۲.۷.۲.۱.۷ تکمیل بانک اطلاعاتی پژوهشگران داخلی..... ۳۵۱
- ۱.۲.۷.۲.۱.۷ دانشگاه تهران..... ۳۵۱

۳۵۲	.....	۲.۲.۷ دانشگاه صنعتی شریف
۳۵۲	.....	۳.۲.۷ دانشگاه تربیت مدرس
۳۵۳	.....	۴.۲.۷ دانشگاه اراک
۳۵۳	.....	۵.۲.۷ دانشگاه ارومیه
۳۵۳	.....	۶.۲.۷ دانشگاه اصفهان
۳۵۴	.....	۷.۲.۷ دانشگاه امیرکبیر
۳۵۴	.....	۸.۲.۷ دانشگاه ایلام
۳۵۴	.....	۹.۲.۷ دانشگاه بابل
۳۵۴	.....	۱۰.۲.۷ دانشگاه بوعلی سینا
۳۵۵	.....	۱۱.۲.۷ دانشگاه تبریز
۳۵۵	.....	۱۲.۲.۷ دانشگاه تربیت معلم
۳۵۵	.....	۱۳.۲.۷ دانشکده نفت تهران
۳۵۵	.....	۱۴.۲.۷ دانشگاه رازی کرمانشاه
۳۵۶	.....	۱۵.۲.۷ دانشگاه زنجان
۳۵۶	.....	۱۶.۲.۷ دانشگاه سیستان و بلوچستان
۳۵۶	.....	۱۷.۲.۷ دانشگاه شاهد
۳۵۷	.....	۱۸.۲.۷ دانشگاه شهرکرد
۳۵۷	.....	۱۹.۲.۷ دانشگاه شهید باهنر کرمان
۳۵۷	.....	۲۰.۲.۷ دانشگاه شهید بهشتی
۳۵۸	.....	۲۱.۲.۷ دانشگاه شهید چمران
۳۵۸	.....	۲۲.۲.۷ دانشگاه شیراز
۳۵۸	.....	۲۳.۲.۷ دانشگاه صنعتی اصفهان
۳۵۹	.....	۲۴.۲.۷ دانشگاه صنعتی سهند تبریز
۳۵۹	.....	۲۵.۲.۷ دانشگاه صنعتی شیراز
۳۶۰	.....	۲۶.۲.۷ دانشگاه علم و صنعت
۳۶۰	.....	۲۷.۲.۷ دانشگاه فردوسی مشهد
۳۶۰	.....	۲۸.۲.۷ دانشگاه کاشان
۳۶۱	.....	۲۹.۲.۷ دانشگاه کردستان
۳۶۱	.....	۳۰.۲.۷ دانشگاه گیلان

- ۳۶۱ دانشگاه لرستان ۳۱.۲.۷
- ۳۶۲ دانشگاه خواجه نصیر طوسی ۳۲.۲.۷
- ۳۶۲ دانشکده نفت اهواز ۳۳.۲.۷
- ۳۶۲ دانشکده نفت آبادان ۳۴.۲.۷
- ۳۶۲ دانشگاه یزد ۳۵.۲.۷
- ۳۶۳ بررسی روش‌های مدل‌سازی عددی سیستم‌های حفاظت کاتدیک (روش مدار معادل) ۳۷.۲.۷
- ۳۶۳ مروری بر روش المان‌مرزی در مدل‌سازی CP ۱.۳.۷
- ۳۶۵ روش مدار معادل در مدل‌سازی CP ۲.۳.۷
- ۳۶۹ منابع ۳.۳.۷
- ۳۶۹ بررسی روش‌های عددی جهت اندازه‌گیری دبی جریان در دبی‌سنج‌ها ۴.۷.۲
- ۳۷۰ اندازه‌گیری علمی جریان ۱.۴.۷
- ۳۷۱ روش‌های عددی در علم اندازه‌گیری جریان ۲.۴.۷
- ۳۷۱ تحلیل محاسباتی میدان جریان قبل از دبی‌سنج ۳.۴.۷
- ۳۷۳ تحلیل محاسباتی دبی‌سنج‌ها ۴.۴.۷
- ۳۷۷ شبیه‌سازی Monte Carlo در ارزیابی خطای تخمینی اندازه‌گیری ۵.۴.۷
- ۳۷۷ منابع ۶.۴.۷
- ۳۷۹ پوشش‌های مقاوم جهت استفاده در محیط‌های آلوده به مشتقات نفتی ۵.۷.۲
- ۳۷۹ انتخاب روکش مناسب ۵.۷.۱
- ۳۸۲ جمع‌بندی ۵.۷.۲
- ۳۸۳ منابع ۵.۷.۳
- ۳۸۴ پیوست الف. جداول مربوط به استاندارد سازی گرمکن (مربوط به N.I.G.C) ۳۸۴
- پیوست ب. شبیه‌سازی سه‌بعدی سیستم حفاظت کاتدیک لوله‌های گاز مدفون در خاک به روش المان
مرزی (مقاله) ۳۹۰
- پیوست پ. تحلیل جریان گذرای گاز طبیعی با استفاده از توابع تبدیل و مقایسه نتایج آن با روش‌های
عددی غیردائم (مقاله) ۴۰۱
- پیوست ت. کتابخانه سیمولینکی برای شبیه‌سازی جریان غیردائم گاز درون شبکه (مقاله) ۴۰۷

- پیوست ث. مدل‌سازی رتبه کاسته جریان غیردائم گاز درون لوله‌ها (مقاله)..... ۴۱۸
- پیوست ج. نقش تصحیح استاتیکی در مدل‌سازی رتبه کاسته جریان گذرا درون خطوط لوله گاز طبیعی (مقاله)..... ۴۲۴
- پیوست چ. تحلیل ویژه جریان گذرای گاز طبیعی درون خطوط لوله (مقاله)..... ۴۲۶
- پیوست ح. مقایسه روش المان‌مرزی و روش مدار معادل در مدل‌سازی عددی سیستم‌های حفاظت کاتدیک خطوط لوله..... ۴۳۲
- پیوست خ. دقت و سرعت محاسباتی روش‌های عددی مختلف برای تحلیل جریان گذرای گاز طبیعی (مقاله)..... ۴۴۲
- پیوست د. غرفه دفتر پژوهش شرکت گاز استان خوزستان از نمای دورین..... ۴۵۲
- پیوست ر. سمینارهای ارائه شده در هفته پژوهش..... ۴۵۶
- پیوست ز. استاندارد انتخاب روکش IGS..... ۴۶۴

فهرست شکل‌ها

- شکل ۲-۱: صفحه اول نرم‌افزار ۵
- شکل ۲-۲: صفحه ورود اطلاعات عملیاتی دبی سنج ۶
- شکل ۲-۳: صفحه Flow Meter Type Selection ۶
- شکل ۲-۴: صفحه مربوط به دبی‌سنج‌های دیافراگمی انتخاب شده ۷
- شکل ۲-۵: خصوصیات دبی‌سنج دیافراگمی انتخاب شده ۸
- شکل ۲-۶: دبی‌سنج توربینی ۸
- شکل ۲-۷: دبی‌سنج از نوع Paddlewheel ۹
- شکل ۲-۸: نمایی از طرز عملکرد دبی‌سنج توربینی ۹
- شکل ۲-۹: دبی‌سنج سری CPT شرکت DMS ۱۲
- شکل ۲-۱۰: دبی‌سنج سری EQZ شرکت DMS ۱۳
- شکل ۲-۱۱: دبی‌سنج سری Lx & Gx شرکت DMS ۱۵
- شکل ۲-۱۲: دبی‌سنج سری TBZ شرکت DMS ۱۵
- شکل ۲-۱۳: دبی‌سنج سری TBX شرکت DMS ۱۵
- شکل ۲-۱۴: دبی‌سنج Daniel® Gas Turbine شرکت Emerson ۱۷
- شکل ۲-۱۵: دبی‌سنج Daniel® Mini Gas Turbine شرکت Emerson ۱۷
- شکل ۲-۱۶: دبی‌سنج American Meter Turbine Gas شرکت IMAC ۱۸
- شکل ۲-۱۷: دبی‌سنج Q-Series شرکت IMAC ۱۹
- شکل ۲-۱۸: دبی‌سنج SZ Turbine Gas شرکت IMAC ۲۰
- شکل ۲-۱۹: دبی‌سنج High Capacity Turbine شرکت IMAC ۲۰
- شکل ۲-۲۰: دبی‌سنج Rebuilt Turbine Gas شرکت IMAC ۲۱
- شکل ۲-۲۱: دبی‌سنج سری GT شرکت FMC ۲۲
- شکل ۲-۲۲: دبی‌سنج سری W شرکت FMC ۲۳
- شکل ۲-۲۳: دبی‌سنج سری WC/WG شرکت FMC ۲۳
- شکل ۲-۲۴: دبی‌سنج سری WH شرکت FMC ۲۴
- شکل ۲-۲۵: دبی‌سنج‌های Series SM-RI شرکت Elster ۲۷
- شکل ۲-۲۶: دبی‌سنج سری TRZ2 شرکت Elster ۲۹
- شکل ۲-۲۷: دبی‌سنج سری Q75 شرکت Elster ۳۰
- شکل ۲-۲۸: دبی‌سنج سری Q شرکت Elster ۳۱

- شکل ۲-۲۹: دبی سنج سری QA / QAe شرکت Elster ۳۱
- شکل ۲-۳۰: دبی سنج سری Flow Conditioners شرکت Elster ۳۲
- شکل ۲-۳۱: مدل‌های مختلف دبی سنج‌های 1/2" BSP, 3/4" BSP. شرکت Bell ۳۵
- شکل ۲-۳۲: مدل‌های مختلف دبی سنج‌های 2" BSP, 1 1/2" BSP, 1" BSP شرکت Bell ۳۵
- شکل ۲-۳۳: مدل‌های مختلف دبی سنج‌های 3/4" Screwed, 1" Screwed, 1 1/4" Screwed, 1 شرکت Bell ۳۷
- شکل ۲-۳۴: مدل‌های مختلف دبی سنج‌های 1/2" Screwed, 2" Screwed, 2" Flanged شرکت Bell ۳۷
- شکل ۲-۳۵: مدل‌های مختلف دبی سنج‌های ۳ Flanged شرکت Bell ۳۹
- شکل ۲-۳۶: دبی سنج‌های گازی توربینی FT Series شرکت Flow Technology ۴۰
- شکل ۲-۳۷: دبی سنج‌های گازی توربینی FTO Series شرکت Flow Technology ۴۱
- شکل ۲-۳۸: دبی سنج‌های گازی توربینی TBQC Series شرکت Tancy Investment Group ۴۲
- شکل ۲-۳۹: دبی سنج‌های گازی توربینی TBQ Series شرکت Tancy Investment Group ۴۳
- شکل ۲-۴۰: دبی سنج‌های گازی توربینی TBQJ Series شرکت Tancy Investment Group ۴۴
- شکل ۲-۴۱: دبی سنج‌های گازی توربینی TBQZ Series شرکت Tancy Investment Group ۴۵
- شکل ۲-۴۲: دبی سنج‌های گازی توربینی GTS Series شرکت MUELLER ۴۶
- شکل ۲-۴۳: دبی سنج‌های گازی توربینی HO Series شرکت HOFFER ۴۷
- شکل ۲-۴۴: دبی سنج‌های گازی توربینی MF Series شرکت HOFFER ۴۸
- شکل ۲-۴۵: دبی سنج‌های گازی توربینی HP Series شرکت HOFFER ۴۹
- شکل ۲-۴۶: دبی سنج‌های گازی توربینی WING NUT Series شرکت HOFFER ۵۰
- شکل ۲-۴۷: دبی سنج‌های گازی توربینی WAFER Series شرکت HOFFER ۵۱
- شکل ۲-۴۸: دبی سنج‌های گازی توربینی PREMIER Series شرکت HOFFER ۵۲
- شکل ۲-۴۹: دبی سنج‌های گازی توربینی PREMIER Series شرکت HOFFER ۵۲
- شکل ۲-۵۰: دبی سنج‌های گازی توربینی AUTOCLAVE Series شرکت HOFFER ۵۳
- شکل ۲-۵۱: دبی سنج‌های گازی توربینی 4" to 12" Mark II شرکت Equimeter ۵۴
- شکل ۲-۵۲: دبی سنج‌های گازی توربینی 2" & 3" Mark IIE شرکت Equimeter ۵۵
- شکل ۲-۵۳: دبی سنج‌های گازی توربینی 2" & 3" T-10 شرکت Equimeter ۵۶
- شکل ۲-۵۴: دبی سنج‌های گازی توربینی 2" & 3" TPL-9 شرکت Equimeter ۵۷
- شکل ۲-۵۵: دبی سنج‌های گازی توربینی سری TRZ 03 شرکت RMG ۵۸
- شکل ۲-۵۶: دبی سنج‌های گازی توربینی سری TRZ 03-TE/L شرکت RMG ۵۹

- شکل ۲-۵۷: دبی‌سنج‌های گازی توربینی سری TRZ 03 L شرکت RMG..... ۶۰
- شکل ۲-۵۸: دبی‌سنج‌های گازی توربینی سری "Q" و "QIC" شرکت Instromet..... ۶۱
- شکل ۲-۵۹: دبی‌سنج‌های گازی توربینی سری X-XIC شرکت Instromet..... ۶۲
- شکل ۲-۶۰: دبی‌سنج‌های گازی توربینی سری Fluxi 2000/TZ شرکت ACTARIS..... ۶۳
- شکل ۲-۶۱: دبی‌سنج‌های گازی توربینی سری MZ شرکت ACTARIS..... ۶۴
- شکل ۲-۶۲: دبی‌سنج‌های گازی توربینی سری iMTM-CT شرکت i-Meter..... ۶۵
- شکل ۲-۶۳: صفحه اول نرم‌افزار..... ۶۷
- شکل ۲-۶۴: صفحه ورود اطلاعات عملیاتی دبی‌سنج..... ۶۸
- شکل ۲-۶۵: صفحه Flow Meter Type Selection..... ۶۹
- شکل ۲-۶۶: صفحه مربوط به شرکت‌های مختلف دارای دبی‌سنج‌های توربینی..... ۷۰
- شکل ۲-۶۷: صفحه مربوط به اطلاعات دسترسی به شرکت مختلف دارای دبی‌سنج‌های توربینی..... ۷۰
- شکل ۲-۶۸: مدل‌های ارائه شده توسط شرکت DMS..... ۷۱
- شکل ۲-۶۹: خصوصیات دبی‌سنج انتخاب شده EQZ شرکت DMS..... ۷۱
- شکل ۲-۷۰: فرمت نهائی صفحه ابتدایی نرم‌افزار..... ۷۲
- شکل ۲-۷۱: صفحه نحوه محاسبه سرعت گاز در لوله اتصالی به کنتور..... ۷۳
- شکل ۲-۷۲: صفحه نحوه محاسبه ضریب تراکم پذیری گاز..... ۷۴
- شکل ۲-۷۳: صفحه جدید ورود اطلاعات..... ۷۵
- شکل ۲-۷۴: صفحه تبدیل واحد نرم‌افزار..... ۷۶
- شکل ۲-۷۵: صفحه جدید انتخاب نوع کنتور..... ۷۶
- شکل ۲-۷۶: شکل جدید صفحه شرکت‌های سازنده دبی‌سنج‌های توربینی..... ۷۷
- شکل ۲-۷۷: فایل‌های موجود در بسته نرم‌افزاری..... ۷۹
- شکل ۲-۷۸: صفحه اول مربوط به نصب نرم‌افزار..... ۷۹
- شکل ۲-۷۹: صفحه اعلام مسیری که نرم‌افزار قرار است در آن نصب گردد..... ۸۰
- شکل ۲-۸۰: صفحه اعلام نصب با موفقیت نرم‌افزار..... ۸۰
- شکل ۳-۱: یک ایستگاه تقلیل فشار ۴۰۰ به ۶۰ با ظرفیت ۲۰۰۰۰ متر مکعب بر ساعت..... ۹۸
- شکل ۳-۲: شماتیک یک ایستگاه تقلیل فشار..... ۹۸
- شکل ۳-۳: اجزاء مختلف فیلتر ایستاده گاز..... ۱۰۰
- شکل ۳-۴: یک فیلتر گاز خشک از نوع QMC..... ۱۰۰
- شکل ۳-۵: یک فیلتر گاز خشک از نوع QHC..... ۱۰۱

- شکل ۳-۶: اجزاء مختلف فیلتر جداکننده ۱۰۲
- شکل ۳-۷: اجزاء گرمکن غیرمستقیم گاز ۱۰۶
- شکل ۳-۸: سیستم کنترل و جرقه‌زن مشعل در گرمکن‌ها ۱۰۷
- شکل ۳-۹: شماتیک بودارکننده ۱۱۵
- شکل ۳-۱۰: نقشه شماتیک بودارکن گاز ۱۲۰
- شکل ۳-۱۱: نمایی از یک دیتاشیت بودارکن تزریقی ۱۲۸
- شکل ۳-۱۲: شماتیکی از یک دبی‌سنج توربینی ۱۳۴
- شکل ۳-۱۳: شماتیکی از یک رگولاتور صنعتی ۱۴۵
- شکل ۳-۱۴: نمونه‌ای از ایستگاه CGS مسطح ۱۴۷
- شکل ۳-۱۵: نمونه‌ای از ایستگاه TBS مسطح ۱۴۷
- شکل ۳-۱۶: نقشه‌ی تیپ یک نمونه TBS مسطح ۱۴۸
- شکل ۳-۱۷: نمونه‌ای از ایستگاه TBS کابینتی ۱۴۹
- شکل ۳-۱۸: نقشه‌ی تیپ یک نمونه TBS کابینتی ۱۵۰
- شکل ۳-۱۹: محدوده‌ی لازم قبل از کنتور توربینی ۱۵۲
- شکل ۳-۲۰: شماتیکی از یک رگولاتور صنعتی ۱۵۵
- شکل ۳-۲۱: شماتیکی از یک رگولاتور محوری ۱۵۷
- شکل ۳-۲۲: شماتیکی از یک رگولاتور شات آف نوع SLAM ۱۵۷
- شکل ۳-۲۳: نمونه‌ای از یک ایستگاه TBS با ظرفیت ۴۰۰ مترمکعب بر ساعت ۱۵۸
- شکل ۳-۲۴: نمونه‌ای از یک ایستگاه TBS با یک رگولاتور ۱۵۹
- شکل ۳-۲۵: نمونه‌ای از یک ایستگاه TBS شبیه سازی شده توسط نرم‌افزار PIPESYS ۱۵۹
- شکل ۳-۲۶: تغییرات فشار جریان گاز در طول مسیر یک ایستگاه TBS کابینتی یا مسطح ۱۶۰
- شکل ۳-۲۷: تغییرات سرعت جریان گاز در طول مسیر یک ایستگاه TBS کابینتی یا مسطح ۱۶۱
- شکل ۳-۲۸: تغییرات دمای جریان گاز در طول مسیر یک ایستگاه TBS کابینتی یا مسطح ۱۶۱
- شکل ۳-۲۹: تغییرات دمای خروجی نسبت به اختلاف فشار ورود و خروج یک ایستگاه TBS کابینتی یا مسطح ۱۶۲
- شکل ۳-۳۰: تغییرات دمای خروجی نسبت به تغییرات دبی جریان گاز یک ایستگاه TBS کابینتی یا مسطح ۱۶۲
- شکل ۳-۳۱: تغییرات دمای خروجی نسبت به تغییرات دمای ورودی گاز یک ایستگاه TBS کابینتی یا مسطح ۱۶۳

- شکل ۳-۳۲: نمایی از یک ایستگاه زیرزمینی BD-RMG 470 - Krysalis ۱۶۵
- شکل ۳-۳۳: نمایی از یک ایستگاه زیرزمینی RMG 470 "Krysalis" PN 16 ۱۶۶
- شکل ۳-۳۴: نمایی از یک ایستگاه زیرزمینی BD - RMG „Krysalis 19 ۱۶۷
- شکل ۳-۳۵: شماتیکی از یک ایستگاه زیرزمینی BD - RMG „mini-Krysalis 19 ۱۶۸
- شکل ۳-۳۶: نمایی از یک ایستگاه زیرزمینی RMG-UKA 280 „Vector ۱۶۹
- شکل ۳-۳۷: نمایی از یک ایستگاه زیرزمینی RMG-UKA 680 „Vector ۱۷۱
- شکل ۳-۳۸: نمایی از یک ایستگاه زیرزمینی RMG - UKA „Krysalis 16 ۱۷۲
- شکل ۳-۳۹: شماتیکی از یک ایستگاه زیرزمینی شرکت Elster ۱۷۳
- شکل ۳-۴۰: نمایی از یک ایستگاه زیرزمینی مدل Orpheus شرکت Elster ۱۷۴
- شکل ۳-۴۱: طلوعی تازه در صنعت اندازه‌گیری دبی گاز ۱۷۴
- شکل ۳-۴۲: شماتیک یک USM (انتخاب المان‌های یک USM بر حسب کاربرد بسیار مهم است) ۱۷۵
- شکل ۳-۴۳: یک نمونه ایراد در طراحی سایت اندازه‌گیر USM ۱۷۸
- شکل ۳-۴۴: یک نمونه USM با طول ۱۲۶ فوت و وزن ۹۶۰۰۰ پوند با ظرفیت ۵ میلیارد پوند بر سال ۱۸۰
- شکل ۳-۴۵: نمونه‌ای از فرستنده USM - فرستنده اطلاعات به صورت گسسته ۱۸۲
- شکل ۳-۴۶: یک کامپیوتر کامل جریان ۱۸۴
- شکل ۳-۴۷: سوراخ‌های داخلی به نحوی تعبیه می‌شوند که ناپیوستگی‌ای در جریان رخ ندهد. ... ۱۸۵
- شکل ۳-۴۸: شکل‌دهنده جریان از نوع صفحه متخلخل ضخیم ۱۸۶
- شکل ۳-۴۹: پیچ‌های داخل فلنجی برای دو قسمت ورودی به شکل‌دهنده و شکل‌دهنده به اندازه‌گیر ۱۸۷
- شکل ۳-۵۰: نیازهای لوله‌کشی و سهراهی یک ایستگاه USM ۱۸۸
- شکل ۳-۵۱: شماتیک هدر متصل به USM در سایت ۱۸۹
- شکل ۳-۵۲: نمونه‌ای از اتصال موازی USM ها با یک هدر ۱۸۹
- شکل ۳-۵۳: چهار نمونه از نحوه اتصال هدر و مزایا و معایب آنها ۱۹۰
- شکل ۳-۵۴: لوله‌کشی بالادست یک USM یک جهت ۱۹۱
- شکل ۳-۵۵: قسمت تخلیه USM و نصب چاه حرارتی و پروب تخلیه روی آن ۱۹۱
- شکل ۳-۵۶: محل نصب پروب‌های چاه حرارتی ۱۹۲
- شکل ۳-۵۷: نمونه‌ای از یک سایت اندازه‌گیر کوچک ۱۹۲

- شکل ۴-۱: خطوط مشخصه راسترو (a) و چپرو (b) ۱۹۷
- شکل ۴-۲: بررسی تعریف شرایط اولیه و مرزی در حل مسائل با خطوط مشخصه ۱۹۸
- شکل ۴-۳: انواع تعریف شرایط اولیه و مرزی در مسائل با خطوط مشخصه ۱۹۸
- شکل ۴-۴: حالت واگرایی خطوط مشخصه در یافتن مقادیر u ۲۰۱
- شکل ۴-۵: حالت همگرایی خطوط مشخصه در یافتن مقادیر u ۲۰۱
- شکل ۴-۶: حجم کنترلی برای روش لکس- فردریش ۲۰۵
- شکل ۴-۷: بررسی شماتیک وضعیت استفاده از گره‌های شبکه برای الگوریتم رازانوف ۲۰۷
- شکل ۴-۸: شماتیک وضعیت استفاده از گره‌های شبکه برای الگوریتم WKL ۲۰۸
- شکل ۴-۹: تعیین حجم کنترلی برای روش گادانوف ۲۱۲
- شکل ۴-۱۰: هندسه و حل محلی مسأله ریمان در سطوح مشترک المانها (روش گادانوف) ۲۱۴
- شکل ۴-۱۱: یک تقریب تکهای ثابت حل در مرحله زمانی n ام ۲۱۶
- شکل ۴-۱۲: متوسط‌گیری از مقادیر دچار اغتشاشات بعد از یک گام زمانی ۲۱۷
- شکل ۴-۱۳: دیاگرام موج برای روش رو که به معادله برگر اعمال شود. ۲۱۹
- شکل ۴-۱۴: حل عددی ناپیوستگی به کمک روش رو ۲۲۰
- شکل ۴-۱۵: بررسی حل مسائل با فن انبساطی توسط روش رو ۲۲۱
- شکل ۴-۱۶: فن انبساطی بدست آمده با روش راو و مقایسه آن با نتایج حل دقیق ۲۲۲
- شکل ۴-۱۷: گسسته‌سازی به شیوه الگوریتم پادبادسوی مرتبه دوم ۲۲۸
- شکل ۴-۱۸: گسسته‌سازی سه نقطه ای با $k = -1$ به روش پادبادسوی مرتبه دوم ۲۳۰
- شکل ۴-۱۹: شماتیک تحلیل شارهای عددی برای الگوریتمهای مراتب اول و دوم ۲۳۴
- شکل ۴-۲۰: روش رو مرتبه دوم بدون محدودکننده اعمال شده به معادله برگر ۲۳۵
- شکل ۴-۲۱: گسسته‌سازی مرتبه دوم مکان و زمان ۲۳۶
- شکل ۴-۲۲: بررسی عوامل کلی تولید نوسانات در تحلیلهای عددی ۲۴۰
- شکل ۴-۲۳: شرط انتروپی برای یک ناپیوستگی با سطح Σ ۲۴۳
- شکل ۴-۲۴: وضعیت قرارگیری مقادیر مختلف شار برای دو حالت: $u_R < u_L$ (a) و $u_R > u_L$ (b) ۲۴۴
- شکل ۴-۲۵: بررسی عددی حالت خاصی از نمودار $x - u$ و شامل تغییر علامت r ۲۵۵
- شکل ۴-۲۶: قلمرو محدودکننده برای الگوریتمهای مختلف ۲۵۶
- شکل ۴-۲۷: محدودکننده ونلیر ۲۵۶
- شکل ۴-۲۸: محدودکننده minmod ۲۵۶

- شکل ۴-۲۹: محدودکننده سوپربی (رو)..... ۲۵۸
- شکل ۴-۳۰: محدودکننده‌های کلی نوع β ۲۵۸
- شکل ۴-۳۱: محدودکننده چاکراوارتی و اوشر..... ۲۵۹
- شکل ۴-۳۲: نحوه عملکرد محدود کننده مینمد..... ۲۶۱
- شکل ۴-۳۳: نحوه عملکرد محدود کننده سوپربی..... ۲۶۲
- شکل ۴-۳۴: بررسی اثرات استفاده از محدودکننده‌ها در حل عددی با ۱۲۰ گام زمانی..... ۲۶۳
- شکل ۴-۳۵: مقایسه حل دقیق و حل عددی رو مرتبه دوم اعمال شده به معادله برگر و با محدود کننده مینمد..... ۲۶۴
- شکل ۴-۳۶: مقایسه نتایج روش لکس با حل دقیق..... ۲۷۰
- شکل ۴-۳۷: مقایسه نتایج روش لکس-وندروف با حل دقیق..... ۲۷۰
- شکل ۴-۳۸: مقایسه نتایج روش مککورمک با حل دقیق..... ۲۷۱
- شکل ۴-۳۹: مقایسه نتایج روش اوشر با حل دقیق..... ۲۷۱
- شکل ۴-۴۰: مقایسه نتایج روش رو با حل دقیق..... ۲۷۲
- شکل ۴-۴۱: مقایسه نتایج روش انتقال تصحیحی شار بر حسب تقریب رو با حل دقیق..... ۲۷۲
- شکل ۴-۴۲: مقایسه نتایج روش رازانوف با حل دقیق..... ۲۷۳
- شکل ۴-۴۳: مقایسه نتایج روش ذوزنقه‌های اصلاح شده با حل دقیق..... ۲۷۴
- شکل ۴-۴۴: مقایسه نتایج روش انکوئیست-اوشر با حل دقیق..... ۲۷۴
- شکل ۴-۴۵: مقایسه نتایج روش گادانوف با حل دقیق..... ۲۷۵
- شکل ۴-۴۶: مقایسه نتایج روش فروم مرتبه دوم با حل دقیق..... ۲۷۵
- شکل ۴-۴۷: مقایسه نتایج روش لکس وندروف مرتبه دوم با حل دقیق..... ۲۷۶
- شکل ۴-۴۸: مقایسه نتایج روش رو مرتبه دوم با حل دقیق..... ۲۷۶
- شکل ۴-۴۹: مقایسه نتایج روش انتقال تصحیحی شار با تقریب بوریس-بوک با حل دقیق..... ۲۷۷
- شکل ۴-۵۰: مقایسه نتایج روشهای TVD با محدودکننده چاکراوارتی و حل دقیق..... ۲۷۷
- شکل ۴-۵۱: مقایسه نتایج روشهای TVD با محدودکننده مینمد و حل دقیق..... ۲۷۸
- شکل ۴-۵۲: مقایسه نتایج روشهای TVD با محدودکننده سوپربی و حل دقیق..... ۲۷۸
- شکل ۴-۵۳: مقایسه نتایج روشهای TVD با محدودکننده سویبی و حل دقیق..... ۲۷۹
- شکل ۴-۵۴: مقایسه نتایج روشهای TVD با محدودکننده ونلیر و حل دقیق..... ۲۷۹
- شکل ۴-۵۵: مقایسه نتایج روش WKL با حل دقیق..... ۲۸۰
- شکل ۴-۵۶: مقایسه نتایج روش WKL تنظیم شده با حل دقیق..... ۲۸۰

- شکل ۴-۵۷: تغییرات دبی خروجی بر حسب زمان اعمال شده به حالت دوم ۲۸۳
- شکل ۴-۵۸: مقایسه نتایج محاسبه شده و تجربی برای فشار خروجی لوله در حالت دوم ۲۸۴
- شکل ۴-۵۹: مقایسه نتایج محاسبه شده با نتایج روش خطوط برای فشار خروجی لوله در حالت دوم ۲۸۵
- شکل ۴-۶۰: نتایج روش ضمنی برای فشار در چند نقطه از لوله (حالت دوم) ۲۸۵
- شکل ۴-۶۱: نتایج الگوریتم TVD برای فشار در چند نقطه از لوله (حالت دوم) ۲۸۶
- شکل ۴-۶۲: نتایج الگوریتم ضمنی برای توزیع فشار در کل لوله برای چند زمان خاص (حالت دوم) ۲۸۷
- شکل ۴-۶۳: نتایج الگوریتم TVD برای توزیع فشار در کل لوله برای چند زمان خاص (حالت دوم) ۲۸۷
- شکل ۴-۶۴: شماتیک توابع تبدیل فشار-دبی درون شبکه ۳۰۰
- شکل ۴-۶۵: شماتیک توابع تبدیل دبی-دبی درون شبکه ۳۰۱
- شکل ۴-۶۶: شماتیک یک المان کلی درون شبکه ۳۰۲
- شکل ۴-۶۷: توابع تبدیل از نوع دبی ورودی و خروجی معلوم ۳۰۴
- شکل ۴-۶۸: توابع تبدیل از نوع دبی خروجی و فشار ورودی معلوم ۳۰۴
- شکل ۴-۶۹: توابع تبدیل از نوع دبی ورودی و فشار خروجی معلوم ۳۰۵
- شکل ۴-۷۰: دبی متناوب اعمال شده به خروجی لوله برای مسأله جریان حالت متناوب ۳۰۶
- شکل ۴-۷۱: مدل توابع تبدیل به کار گرفته شده برای مسأله جریان حالت متناوب (نرم‌افزار MATLAB) ۳۰۶
- شکل ۴-۷۲: مقایسه نتایج روش دلتا با روش توابع تبدیل (مسأله جریان حالت متناوب ۳۰٪ تغییرات) ۳۰۷
- شکل ۴-۷۳: مقایسه نتایج روش دلتا با روش توابع تبدیل (مسأله جریان حالت متناوب ۵٪ تغییرات) ۳۰۷
- شکل ۴-۷۴: دبی خروجی غیر منظم اعمال شده به مدل توابع تبدیل ۳۰۹
- شکل ۴-۷۵: مقایسه نتایج روش توابع تبدیل با الگوریتم ضمنی دلتا برای حالت دبی خروجی غیر منظم ۳۰۹
- شکل ۴-۷۶: تغییرات دبی خروجی بر حسب زمان اعمال شده به حالت دوم ۳۱۰
- شکل ۴-۷۷: مقایسه نتایج روش توابع تبدیل با الگوریتم ضمنی دلتا برای نمونه سوم ۳۱۱
- شکل ۴-۷۸: مقایسه نتایج روش توابع تبدیل با روشهای TVD و آزمایشگاهی برای نمونه سوم .. ۳۱۱

- شکل ۴-۷۹: مقایسه نتایج روش توابع تبدیل با روش خطوط برای نمونه سوم ۳۱۲
- شکل ۴-۸۰: مدل سیمپولینکی روش توابع تبدیل برای نمونه سوم ۳۱۲
- شکل ۴-۸۱: مقایسه نتایج بدست آمده از روش توابع تبدیل و روش دلتا برای فشار ورودی نمونه چهارم ۳۱۳
- شکل ۴-۸۲: مقایسه نتایج بدست آمده از روش توابع تبدیل و روش دلتا برای فشار خروجی نمونه چهارم ۳۱۳
- شکل ۴-۸۳: مقایسه نتایج بدست آمده از روش توابع تبدیل و روش دلتا برای دبی ورودی نمونه پنجم ۳۱۴
- شکل ۴-۸۴: مقایسه نتایج بدست آمده از روش توابع تبدیل و روش دلتا برای فشار خروجی نمونه پنجم ۳۱۴
- شکل ۴-۸۵: شماتیک مدل نوع دبی- فشار برای چهار حالت جریان غیردائم (نمونه ششم) ۳۱۶
- شکل ۴-۸۶: مقایسه نتایج روش توابع تبدیل و روش عددی برای فشار ورودی (حالت پنجم کار ژو-آدومی) ۳۱۷
- شکل ۴-۸۷: مقایسه نتایج روش توابع تبدیل و روش عددی برای دبی خروجی (حالت پنجم کار ژو-آدومی) ۳۱۷
- شکل ۴-۸۸: مقایسه نتایج روش توابع تبدیل و روش عددی برای فشار ورودی (حالت ششم کار ژو-آدومی) ۳۱۸
- شکل ۴-۸۹: مقایسه نتایج روش توابع تبدیل و روش عددی برای دبی خروجی (حالت ششم کار ژو-آدومی) ۳۱۸
- شکل ۴-۹۰: نحوه محاسبه مقادیر نهایی حالت غیردائم از مقادیر اختلافی محاسبه شده در مدل ... ۳۱۹
- شکل ۴-۹۱: مقایسه نتایج روش توابع تبدیل و روش عددی برای فشار ورودی (حالت هفتم کار ژو-آدومی) ۳۲۰
- شکل ۴-۹۲: مقایسه نتایج روش توابع تبدیل و روش عددی برای دبی خروجی (حالت هفتم کار ژو-آدومی) ۳۲۰
- شکل ۴-۹۳: مقایسه نتایج روش توابع تبدیل و روش عددی برای فشار ورودی (حالت هشتم کار ژو-آدومی) ۳۲۱
- شکل ۴-۹۴: مقایسه نتایج روش توابع تبدیل و روش عددی برای دبی خروجی (حالت هشتم کار ژو-آدومی) ۳۲۱
- شکل ۵-۱: کاتالوگ شرکت توس و متک ۳۲۴

- شکل ۵-۲: زمینه فعالیت‌های شرکت‌هایی که شاتل پارس نماینده انحصاری آنها می‌باشد. ۳۲۵
- شکل ۵-۳: زمینه فعالیت‌های شرکت‌هایی که شاتل پارس نماینده انحصاری آنها می‌باشد. ۳۲۶
- شکل ۵-۴: پراکندگی شعبات و نمایندگی‌های شرکت KOBOLD در سرتاسر دنیا ۳۲۷
- شکل ۶-۱: بروشور معرفی دفتر پژوهش شرکت گاز-۱ ۳۳۹
- شکل ۶-۲: بروشور معرفی دفتر پژوهش شرکت گاز-۲ ۳۳۹
- شکل ۶-۳: پوستر شماره ۱ معرفی زمینه‌های تحقیقاتی دفتر پژوهش ۳۴۱
- شکل ۶-۴: پوستر شماره ۲ معرفی زمینه‌های تحقیقاتی دفتر پژوهش ۳۴۲
- شکل ۶-۵: نقشه خطوط گاز اروپا و بخشی از خاورمیانه ۳۴۳
- شکل ۶-۶: نقشه خطوط انتقال گاز و نفت ایران ۳۴۴
- شکل ۶-۷: نقشه خطوط انتقال گاز استان خوزستان ۳۴۵
- شکل ۶-۸: نقشه شبکه توزیع گاز شهرستان اهواز ۳۴۶
- شکل ۷-۱: نمونه مدل‌سازی عددی حفاظت کاتدیک به صورت دوبعدی ۳۶۵
- شکل ۷-۲: نمونه مدل‌سازی عددی حفاظت کاتدیک به صورت سه‌بعدی ۳۶۵
- شکل ۷-۳: نحوه‌ی پیاده‌سازی مقاومت‌ها در طول لوله و در اتصال آن به الکترولیت ۳۶۶
- شکل ۷-۴: منحنی پلاریزاسیون ۳۶۸
- شکل ۷-۵: نمونه‌ای از حوزه مورد مطالعه جریان قبل از دبی سنج‌ها ۳۷۳
- شکل ۷-۶: نمونه از تحلیل‌های عددی سرعت در مکان‌های مختلف لوله ۳۷۳
- شکل ۷-۷: اصول عملکردی یک دبی‌سنج ریزش گردابه با یک مرز فراصوت پشت جسم ضخیم ۳۷۴
- شکل ۷-۸: منحنی فشار اندازه‌گیری شده در یک دبی‌سنج گردابه‌ای ۳۷۵

فهرست جدول‌ها

جدول ۱-۲: مشخصات دبی‌سنج‌های دیافراگمی	۴
جدول ۲-۲: محدوده دقت دبی‌سنج‌های شرکت توس و متک	۱۱
جدول ۳-۲: مشخصات دبی‌سنج مدل SM-RI-X	۲۶
جدول ۴-۲: مشخصات دبی‌سنج مدل SM-RI-HT	۲۷
جدول ۵-۲: مشخصات دبی‌سنج مدل SM-RI-P	۲۸
جدول ۶-۲: مشخصات دبی‌سنج مدل TRZ2	۲۹
جدول ۷-۲: محصولات مختلف Turbine-Gas-Meter شرکت Bell	۳۳
جدول ۸-۲: محصولات مختلف GFT-Turbine-Gas-Meter شرکت Bell	۳۴
جدول ۹-۲: محصولات مختلف TXB-Digital-Turbine-Gas-Meter شرکت Bell	۳۶
جدول ۱۰-۲: مدل‌های مختلف Quantometer-Gas-Flow-Turbine-Meter	۳۸
جدول ۱۱-۲: سایر مشخصات سری TRZ 03 شرکت RMG	۵۸
جدول ۱۲-۲: سایر مشخصات سری TRZ 03-TE/L شرکت RMG	۵۹
جدول ۱۳-۲: سایر مشخصات سری TRZ 03 L شرکت RMG	۶۰
جدول ۱۴-۲: مشخصات سری Q و QIC شرکت Instromet	۶۱
جدول ۱۵-۲: مشخصات سری X-XIC شرکت Instromet	۶۲
جدول ۱۶-۲: سایر مشخصات سری iMTM-CT شرکت i-Meter	۶۶
جدول ۱۷-۲: مشخصات سایزهای مختلف سری iMTM-CT شرکت i-Meter	۶۶
جدول ۱۸-۲: مشخصات سایزهای مختلف کتورهای توربینی	۷۸
جدول ۱-۳: مشخصات و اطلاعات اندازه بدنه فیلترهای خشک	۱۰۲
جدول ۱-۴-۴: بررسی ماکزیمم خطای روشهای عددی	۲۸۲
جدول ۲-۴-۴: بررسی زمان مورد نیاز روشهای عددی برای محاسبه فشار خروجی در لوله	۳۰۸
جدول ۱-۷: معرفی علائم اختصاری استفاده شده در متن	۳۷۹
جدول ۲-۷: مشخصات روکش‌های تایید شده	۳۸۰
جدول ۳-۷: پوشش‌های خارجی مورد استفاده خطوط لوله، اتصالات و خطوط سرویس ($OD < 24''$)	۳۸۱

۱ مقدمه

در این گزارش عمده فعالیت‌های انجام‌شده توسط دفتر پژوهش گاز در سال ۱۳۸۷ تشریح شده‌است. سرفصل‌های انجام‌شده در سال عبارت از موارد ذیل می‌باشند.

- طراحی نرم‌افزار انتخاب کنتور

در ادامه‌ی فعالیت‌های سال گذشته مرتبط با دستگاه‌های اندازه‌گیری دبی در صنایع گاز با توجه به تعدد دبی‌سنج‌ها و قابلیت‌های متفاوت آنها در زمینه اندازه‌گیری، به منظور سهولت در امر انتخاب کنتور نرم‌افزاری تدوین و به بخش مربوطه در شرکت گاز تقدیم شد.

- ایستگاه‌های تقلیل فشار و اندازه‌گیری گاز

در این سرفصل نیز با معرفی اجزای موجود در ایستگاه‌های تقلیل فشار و ارائه استانداردهای مرتبط، ایستگاه‌های مسطح، کابینتی و زیرزمینی معرفی شده و قابلیت‌ها، مزایا و معایب هر یک مورد بحث و بررسی قرار گرفت.

- بررسی روش‌های حل جریان غیر دائم گاز

این مبحث نیز با توجه به نیاز مبرم برای ارائه حل‌های غیر دائم جریان گاز به سرفصل‌های کاری دفتر پژوهش اضافه گردید. در این راستا انواع روش‌های مدل‌سازی معرفی شده و کاربردی‌ترین آن به عنوان روش مدل‌سازی انتخاب و چندین نمونه مسئله‌ی جریان غیردائم مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته‌است.

- شرکت در کنفرانس‌ها و سمینارهای داخلی و خارجی و مقالات ارائه شده

در این بخش نیز خلاصه‌ای از مقالات ارائه‌شده‌ی دفتر پژوهش در سمینارها و کنفرانس‌های داخلی و بین‌المللی همراه با معرفی مختصر کنفرانس‌ها ارائه شده‌است.

- هفته پژوهش
- در این فصل نیر فعالیت‌های انجام شده در هفته پژوهش که شامل برگزاری غرفه دفتر پژوهش و ارائه‌ی سمینارهای مرتبط با گاز در این هفته می‌باشد، ارائه 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.
 - مصارف نوین گاز طبیعی
 - تکمیل بانک اطلاعاتی پژوهشگران داخلی
 - بررسی روش‌های مدل‌سازی عددی سیستم‌های حفاظت کاتدیک (روش مدار معادل)
 - بررسی روش‌های عددی جهت اندازه‌گیری دبی جریان در دبی‌سنج‌ها
 - پوشش‌های مقاوم جهت استفاده در محیط‌های آلوده به مشتقات نفتی

۲ طراحی نرم افزار انتخاب کنتور

در فعالیت‌های سال گذشته، نرم‌افزاری برای انتخاب دبی‌سنج‌های مختلف در صنایع گاز طراحی اولیه شد. در طراحی ابتدایی این نرم‌افزار که نمایی از محیط اجرایی آن در گزارش بهمن ماه ۸۶ آورده شد، اطلاعات ورودی لازم برای انتخاب دبی‌سنج مانند بازه دما، فشار، دبی، ... دبی‌سنج مورد نظر کاربر در داخل محیط برنامه‌نویسی نرم‌افزار، گنجانده شده‌است. در ادامه طراحی نرم‌افزار انتخاب دبی‌سنج، تصمیم گرفته شد تا با توجه به اینکه در شبکه گاز شهری استفاده از دبی‌سنج‌های گازی دیافراگمی و توربینی کاربرد زیادی دارد، کارایی نرم‌افزار با توجه به بانک اطلاعاتی موجود در گزارش‌های سال ۸۶ (در زمینه کنتورهای دیافراگمی) و همچنین اطلاعاتی که در سال ۸۷ در مورد کنتورهای توربینی بدست آمد، ارتقاء داده‌شود. ضمناً در این فصل به معرفی شرکت‌های سازنده داخلی و خارجی دبی‌سنج‌های توربینی گازی پرداخته می‌شود. علاوه بر این، کلیاتی از نرم‌افزار انتخاب کنتور طراحی شده و روش نصب آن آورده شده‌است.

۱.۲ گنجاندن بخش دبی‌سنج دیافراگمی در نرم‌افزار

با توجه به محصولات شرکت‌های سازنده این دبی‌سنج‌ها، این نوع دبی‌سنج‌ها در محدوده‌های استاندارد یکسانی ساخته می‌شوند که در جدول ذیل این استانداردها آورده شده‌است.

جدول ۱-۲: مشخصات دبی سنج‌های دیافراگمی

Model	Temperature (c)	Maximum Pressure(bar)	Accuracy	Flow (m3/h)
G 1.6	-20 to 50	0.5 (steel) 1 (Aluminum)	$\pm 3\%$ for $Q_{min} < Q < 2Q_{max}$ $\pm 2\%$ for $2Q_{min} < Q < Q_{max}$	0.016-3
G 2.5	-20 to 50	0.5	$\pm 3\%$ for $Q_{min} < Q < 2Q_{max}$ $\pm 2\%$ for $2Q_{min} < Q < Q_{max}$	0.025-4
G 4	-20 to 50	0.5	$\pm 3\%$ for $Q_{min} < Q < 2Q_{max}$ $\pm 2\%$ for $2Q_{min} < Q < Q_{max}$	0.04-6
G 6	-20 to 50	0.5	$\pm 3\%$ for $Q_{min} < Q < 2Q_{max}$ $\pm 2\%$ for $2Q_{min} < Q < Q_{max}$	0.06-10
G 10	-20 to 50	0.5	$\pm 3\%$ for $Q_{min} < Q < 2Q_{max}$ $\pm 2\%$ for $2Q_{min} < Q < Q_{max}$	0.1-16
G 16	-20 to 50	0.5	$\pm 3\%$ for $Q_{min} < Q < 2Q_{max}$ $\pm 2\%$ for $2Q_{min} < Q < Q_{max}$	0.16-25
G 25	-20 to 50	0.5	$\pm 3\%$ for $Q_{min} < Q < 2Q_{max}$ $\pm 2\%$ for $2Q_{min} < Q < Q_{max}$	0.25-40
G 40	-20 to 50	0.5	$\pm 3\%$ for $Q_{min} < Q < 2Q_{max}$ $\pm 2\%$ for $2Q_{min} < Q < Q_{max}$	0.4-65
G 65	-20 to 50	0.5	$\pm 3\%$ for $Q_{min} < Q < 2Q_{max}$ $\pm 2\%$ for $2Q_{min} < Q < Q_{max}$	0.65-100
G 100	-20 to 50	0.5	$\pm 3\%$ for $Q_{min} < Q < 2Q_{max}$ $\pm 2\%$ for $2Q_{min} < Q < Q_{max}$	1-160
G4 (High Pressure)	-20 to 50	Up to 25	$\pm 3\%$ for $Q_{min} < Q < 2Q_{max}$ $\pm 2\%$ for $2Q_{min} < Q < Q_{max}$	0.04-6
G 6 (High Pressure)	-20 to 50	Other pressure on request	$\pm 3\%$ for $Q_{min} < Q < 2Q_{max}$ $\pm 2\%$ for $2Q_{min} < Q < Q_{max}$	0.06-10

بنابراین همانطور که در جدول ۱-۲ مشاهده می‌شود، در انتخاب دبی سنج‌های دیافراگمی پارامترهای دما، فشار، دبی و Accuracy را مد نظر قرار داده شده است. حال قسمت مربوط به اضافه شدن این بخش در نرم افزار در ادامه آورده شده است.

همانطور که در گزارش اسفند ۸۶، صفحه اول نرم افزار نشان داده شده بود، در اینجا هم این صفحه در شکل ۱-۲ آمده است.



شکل ۲-۱: صفحه اول نرم افزار

با کلیک بر دکمه `input flow meter data` صفحه `Input data` ظاهر می شود (شکل ۲-۲). همانطور که در شکل پیداست، در قسمت ورود اطلاعات مربوط به دما، فشار و دبی این قابلیت به نرم افزار اضافه شده تا کاربر بتواند اطلاعات ورودی با واحدهای مختلف را وارد نماید.

Input Data

Gas Physical Property

Gas Type: Clean Gas

Gas Gravity: 0.6

Gas Flow Specifications

	Minimum Bound	Nominal	Maximum Bound
Flow Bound	500	600	700
Pressure Bound	1	5	7
Temperature Bound	-1	25	50

Instrument Specifications

Pipe Size (Inch): 3

Accuracy of full Scale: 1 %

Rangeability: 6

Relative Cost: Low

<< Main Next >>

شکل ۲-۲: صفحه ورود اطلاعات عملیاتی دبی سنج

با وارد کردن اطلاعات ورودی و زدن دکمه Next کاربر وارد صفحه Flow Meter Type Selection می شود (شکل ۲-۳). در این شکل همانطور که با دایره قرمز رنگ مشخص شده، بخش مربوط به دبی سنج دیافراگمی آورده شده است. در این قسمت مانند بقیه دبی سنج ها اگر شرایط داده شده در صفحه Input Data، شامل شرایط عملیاتی دبی سنج مورد نظر باشد دکمه جلوی دبی سنج Yes می شود.

Variable Area Flow Meter

Material: Glass Tube Yes

Differential Pressure Flow Meter

Segmental Edged Orifice No

Segmental Wedge Orifice No

Venturi No

Flow Nozzle and Tubes No

Pitot Tubes No

Elbow No

Oscillatory Flow Meter

Vortex Shedding No

Vortex Precession No

Turbine Flow Meter

Turbine No

Ultrasonic Flow Meter

Transient Time No

Target Flow Meter

Target Yes

Mass Flow Meter

Thermal Dispersion No

Coriolis Type No

Positive Displacement Flow Meter

Positive Displacement No

Diaphragm Flow Meter

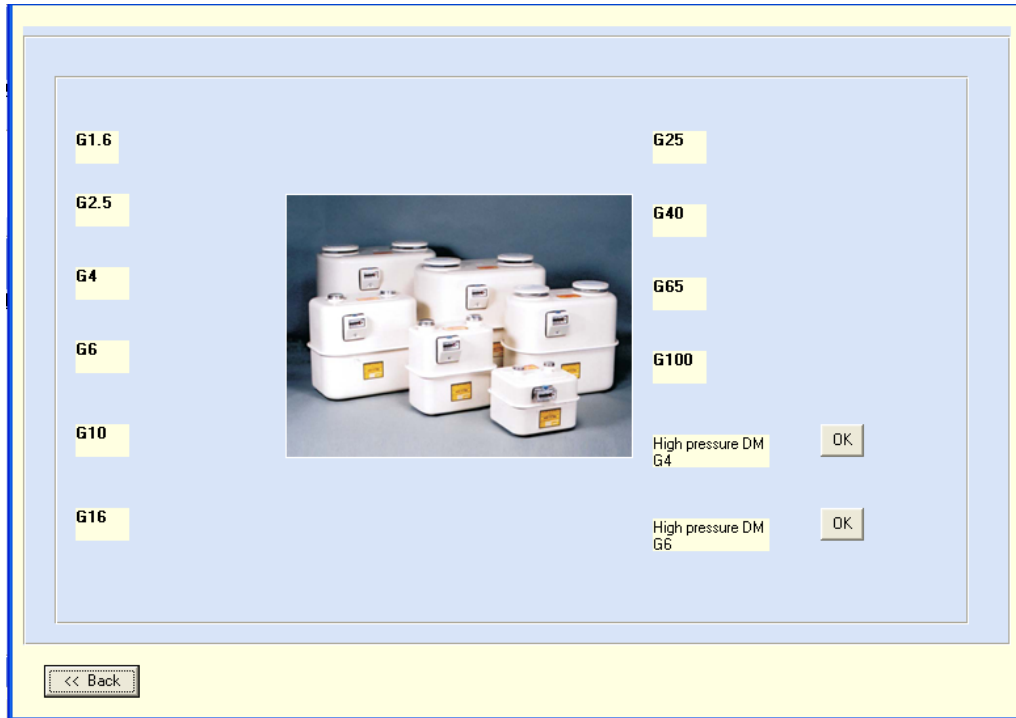
Yes

Calculation for this flow meter based on, Flow, temperature and pressure in previous page

<< Back <<Start Choose Flow Meter>> Exit

شکل ۲-۳: صفحه Flow Meter Type Selection

حال در این قسمت اگر کاربر بخواهد با توجه به شرایط عملیاتی مورد نظرش دبی سنج دیافراگمی مناسب را پیدا کند، دکمه Yes که جلوی کاربر نمایان شده را می فشارد. با زدن این دکمه Yes (در شکل ۲-۳) با دایره قرمز رنگ مشخص شده است) کاربر وارد صفحه Diaphragm Flow Meter می شود (شکل ۲-۴).



شکل ۲-۴: صفحه مربوط به دبی سنج های دیافراگمی انتخاب شده

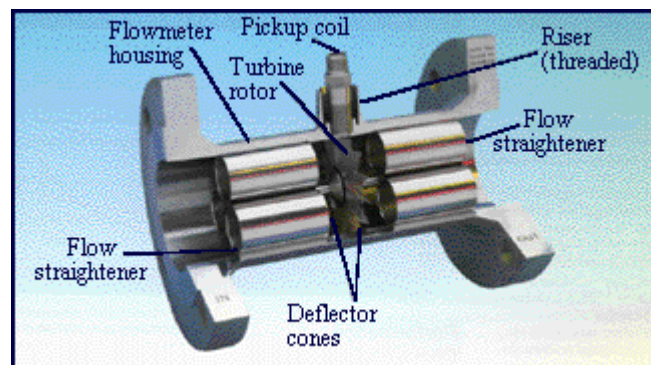
همانطور که در شکل پیداست، در روبروی مدل های پذیرفته شده توسط نرم افزار، دکمه OK ظاهر می شود. با فشردن دکمه OK ظاهر شده، دیگر خصوصیات دبی سنج انتخاب شده آورده می شود (شکل ۲-۵).

Parameter	Value
Temperature (C)	-20 to 50
Pressure max (bar)	Up to 25
Accuracy	± 3 % : $Q_{min} < Q < 2Q_{max}$ ± 2 % : $2Q_{min} < Q < Q_{max}$
Flow (m3/hr)	0.04 to 6

شکل ۲-۵: خصوصیات دبی سنج دیافراگمی انتخاب شده

۲.۲ دبی سنج توربینی

این نوع دبی سنج از نوع دبی سنج‌هایی است که دارای بخش متحرک می‌باشد و در دو نوع توربینی و paddlewheel می‌باشد. در نوع توربینی جهت پره‌ها عمود بر جهت جریان (شکل ۲-۶) و در نوع paddlewheel جهت پره‌ها در موازات جریان می‌باشد (شکل ۲-۷).

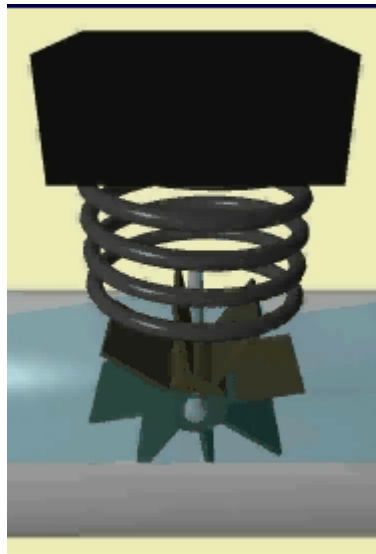


شکل ۲-۶: دبی سنج توربینی



شکل ۲-۷: دبی سنج از نوع Paddlewheel

در هر دو دبی سنج، سرعت سیال متناسب با سرعت زاویه‌ای سیال در نظر گرفته می‌شود. پره‌ها از جنسی انتخاب می‌شوند که در آنها مواد مغناطیسی بکار برده شده‌است. با چرخش پره‌ها به وسیله جریان سیال، ایجاد یک شار مغناطیسی در یک میدان مغناطیس می‌شود (شکل ۲-۸). هر شار ایجاد پالسی می‌کند که با اندازه‌گیری تعداد پالس‌ها به وسیله یک سنسور، سرعت سیال محاسبه می‌شود.



شکل ۲-۸: نمایی از طرز عملکرد دبی سنج توربینی

از مزایای این دبی سنج می‌توان گفت:

- برای بازه وسیعی از مقدار جریان کاربرد دارد.
- دقت اندازه‌گیری در آن بسیار بالا است.

- برای سیالات مختلف با جنس های متنوع ساخته می شود.
- به خاطر سبکی پره ها، در شرایطی که جریان ناگهان تغییر می کند امکان اندازه گیری دقیق وجود دارد.

از معایب آن، ایجاد افت فشار در جریان سیال می باشد.

۳.۲ شرکت های مختلف ارائه دهنده دبی سنج های توربینی

در گزارش اسفندماه ۸۶ محصولات شرکت های مختلف سازنده دبی سنج های دیافراگمی معرفی گردید. برای تکمیل نرم افزار و گنجاندن انواع مدل دبی سنج های شرکت های سازنده مختلف، در اینجا معرفی شرکت های سازنده دبی سنج توربینی انجام می گردد. از جمله شرکت های سازنده در زمینه دبی سنج های توربینی عبارتند از:

- شرکت توس و متک
- DMS
- Emerson
- IMAC
- FMC
- Elster
- BELL
- Flow Technology
- Tancy Investment Group
- MUELLER
- HOFFER
- Equimeter
- RMG
- Instromet
- ACTARIS
- i-Meter

۱.۳.۲ شرکت توس و متک

این شرکت با بهره‌گیری از کادری متخصص و تجهیزات نرم‌افزاری و سخت‌افزاری مورد نیاز، در زمینه تولید کنتورهای توربینی گاز و دیگر محصولات مرتبط با خدمات اندازه‌گیری از جمله تصحیح‌کننده‌های الکترونیکی حجم/جریان گاز، با مشارکت شرکت Vemm tec آلمان (که خود دارنده تکنولوژی تولید کنتورهای گاز Daniel آمریکا می‌باشد) به عنوان سهامدار خارجی در قالب شرکت Joint Venture فعالیت می‌نماید.

دبی‌سنج‌های توربینی گاز IGTM (International Gas Turbine Meter) شرکت توس و متک دارای دو مدل CT و IM می‌باشد. دبی‌سنج‌های IGTM-CT برای دقت‌های بالا و نوع IGTM-IM دارای قیمتی اقتصادی‌تر و دقتی قابل قبول هستند. محدوده دقت دو مدل در جدول ۲-۲ آمده است.

جدول ۲-۲: محدوده دقت دبی‌سنج‌های شرکت توس و متک

Model	Accuracy%
IGTM-CT	1% for 0.2 Qmax - Qmax±
	2% for Qmin- 0.2 Qmax±
IGTM-IM	0.5% for 0.2 Qmax - Qmax±
	1% for Qmin- 0.2 Qmax±

محصولات این شرکت شامل دبی‌سنج‌های توربینی در اندازه‌های ۲"، ۳"، ۴"، ۶" و کلاسهای ۱۵۰# الی ۶۰۰# و محدوده اندازه‌گیری G40 الی G6500 می‌باشد که مربوط به محدوده جریان حجمی $8(m^3/hr) - 10000(m^3/hr)$ بوده قابل تحویل می‌باشند. این فلومترها از جنس فولاد کربنی یا فولاد ضد زنگ با فلنج‌های ANSI و DIN در محدوده ANSI 150-600RF و PN10-PN100 ساخته می‌شود.

محدوده استاندارد دبی‌سنج‌های IGTM (Ranreability) برای سایزهای بالاتر از (3") DN80 بهتر از 20:1 (Q_{max}/Q_{min}) می‌باشد که این عدد کارایی استاندارد در شرایط هوای محیط است. در سایزهای کوچکتر از 3" در طراحی‌های خاص یا با گازهای با جرم حجمی کوچکتر از 0.6 محدوده اندازه‌گیری کاهش می‌یابد. به طوری که دبی‌سنج‌های با محدوده تغییر 30:1 یا بالاتر، طبق سفارش قابل ساخت می‌باشد.

تحت شرایط عادی دبی‌سنج‌های IGTM جهت کار در محدوده دمایی $10^{\circ}C$ تا $60^{\circ}C$ طراحی شده‌اند.

۲.۳.۲ شرکت DMS

شرکت DMS یک شرکت اروپائی است که در زمینه سیستم های اندازه گیری انرژی، گاز و آب فعالیت می کند، مشخصات این شرکت در ذیل آورده شده است.

The Lodge, Mansfield Road, Eastwood, Nottingham NG16 3AQ

Tel: 01773 534 555 Fax: 01773 534 666

<http://www.dmsltd.com/Diaphragm/58>

Email: sales@dmsltd.com

مدل های مختلف دبی سنج توربینی این شرکت عبارتند از:

- سری CPT

شکل این سری دبی سنج ها در زیر آورده شده است.



شکل ۲-۹: دبی سنج سری CPT شرکت DMS

مشخصات مدل های مختلف این دبی سنج هم در ذیل داده شده است.

- مدل CPT50

Available Models:

CPT50/Q40 – 6-65m³/hr Flow Rate

CPT50/Q65 – 10-100m³/hr Flow Rate

Connection: DN50 Wafer Pattern Connection

Pulse Output Standard with Meter

- مدل CPT80

Available Models:

CPT80/Q100 – 8-160m³/hr Flow Rate

CPT80/Q160 – 13-250m³/hr Flow Rate

Connection: DN80 Wafer Pattern Connection

Pulse Output Standard with Meter

- مدل CPT100

Available Models:

CPT100/Q160 – 13-250m³/hr Flow RateCPT100/Q250 – 20-400m³/hr Flow RateCPT100/Q400 – 32-600m³/hr Flow Rate

Connection: DN100 Wafer Pattern Connection

Pulse Output Standard with Meter

- مدل CPT150

Available Models:

CPT150/Q400 – 32-600m³/hr Flow RateCPT150/Q650 – 50-1000m³/hr Flow RateCPT150/Q1000 – 80-1600m³/hr Flow Rate

Connection: DN150 Wafer Pattern Connection

Pulse Output Standard with Meter

- سری EQZ

شکل این سری دبی سنج ها در زیر آورده شده است.



شکل ۲-۱۰: دبی سنج سری EQZ شرکت DMS

مشخصات مدل های مختلف این دبی سنج در ذیل داده شده است.

- مدل EQZ40

Available Models:

EQZ40/Q16 – 3-25m³/hr Flow RateEQZ40/Q25 – 4-40m³/hr Flow RateEQZ40/Q40 – 5-65m³/hr Flow RateEQZ40/Q65 – 6-100m³/hr Flow Rate

Connection: DN40 1.5" Screwed Connection

Pulse Output Standard with Meter

• مدل EQZ50

Available Models:

EQZ50/Q16 – 3-25m³/hr Flow Rate
 EQZ50/Q25 – 4-40m³/hr Flow Rate
 EQZ50/Q40 – 5-65m³/hr Flow Rate
 EQZ50/Q65 – 6-100m³/hr Flow Rate
 EQZ50/Q100 – 10-160m³/hr Flow Rate
 Connection: DN50 2” Screwed Connection
 PN16 Flanged Connection
 Pulse Output Standard with Meter

• مدل EQZ80

Available Models:

EQZ80/Q65 – 10-100m³/hr Flow Rate
 EQZ80/Q100 – 12-160m³/hr Flow Rate
 EQZ80/Q160 – 15-250m³/hr Flow Rate
 EQZ80/Q250 – 20-400m³/hr Flow Rate
 Connection: DN80 3” Flanged Connection
 Pulse Output Standard with Meter

• مدل EQZ100

Available Model:

EQZ100/Q65 – 13-160m³/hr Flow Rate
 EQZ100/Q100 – 15-250m³/hr Flow Rate
 EQZ100/Q160 – 20-400m³/hr Flow Rate
 EQZ100/Q250 – 25-650m³/hr Flow Rate
 Connection: DN80 3” Flanged Connection
 Pulse Output Standard with Meter

• مدل Lx & Gx

از بین این مدل‌ها، مدل Lx برای اندازه گیری جریان مایعات کاربرد بیشتری دارد و Gx صرفاً برای گازها استفاده می‌شود. شکل این سری دبی‌سنج‌ها در زیر آورده شده است.



شکل ۱۱-۲: دبی سنج سری Lx & Gx شرکت DMS

• مدل TBX & TBZ

شکل های این سری دبی سنج ها در زیر آورده شده است.



شکل ۱۲-۲: دبی سنج سری TBZ شرکت DMS



شکل ۱۳-۲: دبی سنج سری TBX شرکت DMS

Emerson شرکت ۳.۳.۲

شرکت Emerson یک کمپانی آمریکایی است که در زمینه سیستم‌های اندازه‌گیری گاز فعالیت می‌کند. این شرکت دارای ۲۶۵ شعبه در سرتاسر دنیا است. مشخصات دوشعبه این شرکت در ذیل آورده شده‌است.

Emerson U.S. and World Headquarters
Emerson Electric Co.
8000 West Florissant Avenue, P.O. Box 4100
St. Louis MO 63136
United States
Phone: +1 314 553 2000
Web: www.emerson.com

Emerson Middle East Corporate Headquarters
Emerson Electric Middle East
P.O. Box 17034, Jebel Ali Free Zone
Dubai
United Arab Emirates
Phone: +971 4 883 5828

مدل‌های مختلف دبی سنج توربینی این شرکت عبارتند از:

- سری Daniel® Gas Turbine Flow meter

مشخصات این مدل در ذیل داده شده‌است.

Key features/benefits:

- Wide rangeability
- maintaining accuracy with different flow rates
- Fewer moving parts
- providing lower maintenance and downtime
- Two standard independent pulse outputs
- External lubrication system

Key industries/applications:

- Custody transfer
- City gates
- Power plants
- Distribution



شکل ۲-۱۴: دبی سنج Daniel® Gas Turbine شرکت Emerson

• سری Daniel® Mini Gas Turbine Flow meter

مشخصات این مدل در ذیل داده شده است.

Key features/benefits:

- Small size
- light weight
- easier installation in limited space applications
- High resolution
- High repeatability
- High rangeability
- Vertical or horizontal installation

Key industries/applications:

- Gate stations for measuring lowest peak loading
- Compressor stations
- Fuel gas



شکل ۲-۱۵: دبی سنج Daniel® Mini Gas Turbine شرکت Emerson

۴.۳.۲ شرکت IMAC

IMAC^۱ یک شرکت آمریکایی در زمینه ساخت دبی سنج های گازی می باشد. مشخصات آن در ذیل آورده شده است.

IMAC is a stocking distributor of American Meter Gas Meters. Large Quantities are kept in stock at all times.

History:

IMAC Systems, Inc. was established in 1978 by Donald E. Kohart Sr. with the help of Junius (Jay) Wilson, William Somers and Robert Calhoun. Five expansions and 25+ years later IMAC Systems, Inc. owns and occupies a modern 33,000 square ft. facility on the Delaware River in Tullytown, PA.

<http://www.imacsystems.com>

انواع دبی سنج های این شرکت در ذیل معرفی می گردد.

• American Meter Turbine Gas Meter

مشخصات اصلی این مدل در ذیل داده شده است.

- Capacity: 500-140,000 scfh
- Max Operating Pressure: 175 PSIG
- Applications: Indoor or outdoor use



شکل ۲-۱۶: دبی سنج American Meter Turbine Gas شرکت IMAC

• Q-Series

مشخصات اصلی این مدل در ذیل داده شده است.

- High capacity 4" or 6" turbine gas meter
- Environmental temp. range 20°F to 140°F
- Gas temp. range 0-120°F
- Heavy duty construction

¹ International measurement & control system

- ANSI 150 flanged connections
- No-load magnetic coupling
- Maintenance free
- Mounts in vertical or horizontal orientation
- Dual low frequency pulse output

Q-400 Gas Meter:

- Capacity: 1000-25000 scfh
- Max Operating Pressure: 175 PSIG
- Applications: Indoor or outdoor use



شکل ۱۷-۲: دبی سنج Q-Series شرکت IMAC

• SZ Series

مشخصات اصلی این مدل در ذیل داده شده است.

- Maintenance free
- Lightweight, aluminum construction
- Operating Temp. 0°F - +140°F
- Rangeability 20 - 1
- Permanently lubricated bearings
- Low frequency / high frequency pulse output standard
- Rugged mechanical index rotatable through 360°
- Self Supporting Line Mount Design
- Mount in Any Position
- Capacity: 70-15,000 scfh
- Max Operating Pressure: 175 PSIG
- Applications: Indoor or outdoor use



شکل ۲-۱۸: دبی سنج SZ Turbine Gas شرکت IMAC

• High Capacity Turbine Meters

مشخصات اصلی این مدل در ذیل داده شده است.

- Capacity: High
- Max Operating Pressure: N/A
- Applications: Indoor or outdoor use



شکل ۲-۱۹: دبی سنج High Capacity Turbine شرکت IMAC

• Rebuilt Turbine Gas Meter

مشخصات اصلی این مدل در ذیل داده شده است.

- American Turbine Meters in all sizes
- Sensus (formerly: Rockwell / Equitable / Pittsburg / EMCO / Invensys / Equimeter)
- Capacity: 500 to 140,000 SCFH
- Max Operating Pressure: 175 PSIG
- Applications: Indoor or outdoor use



شکل ۲-۲۰: دبی سنج Rebuilt Turbine Gas شرکت IMAC

۵.۳.۲ شرکت FMC

یک شرکت آمریکائی دیگر در زمینه ساخت دبی سنج های گازی می باشد. مشخصات آن در ذیل آورده شده است.

Headquarters

FMC Technologies
1803 Gears Rd
Houston TX 77067
Phone: 281 591 4000
Fax: 281 591 4102
Email: corporate.info@fmcti.com

Chicago Office

200 E Randolph
Chicago IL 60601
Phone: 312 861 6000
Fax: 312 861 6176

Email: corporate.info@fmcti.com

انواع دبی سنج های این شرکت در ذیل معرفی می گردد.

• سری GT

مشخصات اصلی این مدل در ذیل داده شده است.

Features:

- Three Rotors
- One Body suits
- more applications
- without reduction or expansion fittings.
- One Piece Cartridge Internals with integral flow straighteners
- ease of maintenance.
- Tungsten Carbide Bearing System
- long service life.
- Stainless Steel/Tungsten Carbide Construction
- corrosion-free service



شکل ۲-۲۱: دبی سنج سری GT شرکت FMC

• سری W

مشخصات اصلی این مدل در ذیل داده شده است.

Features/Benefits:

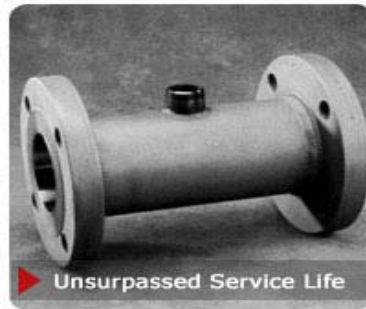
- Rotor Supports - have up and downstream flow straightening vanes to enhance accuracy.
- Helical Cast Rotor - in a heavy duty stainless steel (CD4MCu) design for durability and long service life.
- Journal Bearings and Thrust Balls - are Tungsten Carbide and provide long service life in severe applications.
- Stainless Steel Body and Wetted Parts - provide years of corrosion free service.

Options:

- Rulon Bearings - for highly acidic or caustic solutions.
- Extended Temperature Range - from -200°F to 800°F (-130°C to 426°C).
- Process Connections - available include flanged MNPT (1/2" and 3" only), grooved (victualic), BSP, Wafer, and others.

General Specifications:

- Linearity 1,2: $\pm 0.5\%$ Over-stated Range.
- Repeatability 1,2: $\pm 0.05\%$.
- Maximum Over range: 125% of flow rate for intermittent periods.



شکل ۲-۲۲: دبی سنج سری W شرکت FMC

• سری WC/WG

مشخصات اصلی این مدل در ذیل داده شده است.

Linearity:

- WC: $\pm 0.5\%$
- WG: $\pm 1\%$

Repeatability:

- $\pm 0.05\%$

Pressure Rating:

- 3/4" NPT 7,500 psi 1.0" - 2.0" NPT 5,000 psi *Flange Class determines rating for flanged meters.

Temperature Rate of Bearing:

- Tungsten -40° F to 300° F (-40° C to 149° C) Rulon -40° F to 250° F (-40° C to 121° C)
- High Temperature -200° F to 800° F (-130°C to 426°C)

Connections:

- W3 - Threaded
- W4 - Flanged ANSI Raised Face
- W6 - Grooved
- W9 - Wafer (2" only)



شکل ۲-۲۳: دبی سنج سری WC/WG شرکت FMC

• سری WH

مشخصات اصلی این مدل در ذیل داده شده است.

Features/Benefits:

- Rotor Supports – heavy-duty upstream and downstream flow straightening for increased accuracy and durability.
- Helical Cast Rotor – cast from a highly wear-resistant stainless steel for durability and long service life.
- Journal Bearings and Thrust Balls – Tungsten Carbide bearing surfaces are extremely durable and reliable.
- All Stainless Steel Construction – All wetted parts are highly corrosion resistant stainless steel ensuring years of corrosion free service.
- Also available in wafer style.

General Specifications:

End Connection/Pressure Rating (CWP):

- 1" NPT..... 5000 psig (34,473 Pa) 1" & 2" wafer as per connection flange rating to ANSI 1500 lbs

Temperature Rating:

- -40°F to 228°F (-40°C to 109°C)
- *Limited by pick-up coil; consult factory for temperatures outside this range.

Linearity:

- $\pm 1.0\%$ over stated range

Repeatability:

- $\pm 0.05\%$

Maximum Overrange:

- 125% of flow rate for intermittent periods



شکل ۲-۲۴: دی‌سنج سری WH شرکت FMC

۶.۳.۲ شرکت Elster

شرکت Elster یک کمپانی آلمانی است، که در زمینه سیستم‌های اندازه‌گیری گاز فعالیت می‌کند. دارای ۳۸ شعبه در سرتاسر دنیا است و مشخصات شعبه ایران این شرکت در ذیل آورده شده‌است.

Iran

Pilary Co. Ltd.No. 47, Miremad St.Mottahary Ave.Tehran 15878-33113 Iran

P.O.Box: 15815-1135

Tel. +98 21 8875-5664 / +98 21 8875-6344

Fax +98 21 8875-1857

info@pilary.com

ACC & EI Co. 46 Keshavarz Blvd. Suite #2Tehran 14167 Iran

Moe Alizadeh

Tel. +98 21 892 1621

Fax +98 21 892 1620/+98 21 890 4755

info@elster.com

www.elster-instromet.com

انواع دبی‌سنج‌های این شرکت در ذیل معرفی می‌گردد.

Series SM-RI •

مدل SM-RI-X •

مشخصات اصلی این مدل در جدول زیر داده شده‌است.

جدول ۲-۳: مشخصات دبی سنج مدل SM-RI-X

Meter type		SM-RI-X
Diameter	mm inch	50 - 750 2 - 30
Flow range size		G 40 - G 25000
Qmax	m ³ /h cfh	65 - 40000 2300 - 1,400,000
Rangeability	p = 0 bar g p = 20 bar g p = 50 bar g	1:20 1:50 1:100
Max. error of reading (Qt - Qmax)	1 bar g (Qt = 0.2 Qmax)	±0.5 %
Max. error of reading (Qt - Qmax)	> 5 bar g	±0.5 %
Repeatability	% of reading	< 0.1 %
Upstream straight pipe		2 DN
Downstream straight pipe		2 DN
Type approval		yes
Body material		spheroidal cast iron (up to PN 16), steel
Meter body length		3 DN
Flange ratings	PN ANSI	10 - 100 125 - 900
Pressure range	MPa g bar g psi g	0 - 10 0 - 100 0 - 1450
Temperature range	ambient process	-10 to +65 °C -10 to +65 °C
Ingress protection		IP 44 / IP 67
Index	standard optional	multi-index Encoder S1
LF-sensor	standard	1
HF-sensor	optional	2
Lubrication	standard optional optional	oil pump automatical oil injection

• مدل SM-RI-HT

مشخصات اصلی این مدل در جدول ذیل داده شده است.

جدول ۲-۴: مشخصات دبی سنج مدل SM-RI-HT

Meter type		SM-RI-HT
Diameter	mm inch	150 - 200 6 - 8
Flow range size		G 1000 - G 1600
Qmax	m ³ /h cfh	1600 - 2500 56000 - 88000
Rangeability	p = 0 bar g	1:20
Max. error of reading (Qt - Qmax)	1 bar g (Qt = 0.2 Qmax)	±0.5 %
Repeatability	% of reading	< 0.1 %
Upstream straight pipe		2 DN
Downstream straight pipe		2 DN
Type approval		acc. ISO 9951
Body material		spheroidal cast iron (up to PN 16), steel
Meter body length		3 DN
Flange ratings	PN ANSI	100 600
Pressure range	MPa g bar g psi g	0.8 - 8.95 8 - 89.5 115 - 1300
Temperature range	ambient process	-10 to +65 °C -10 to +170 °C
Ingress Protection		IP 67
LF-sensor	standard	-
HF-sensor	optional	2
Lubrication		oil pump

• مدل SM-RI-P



شکل ۲-۲۵: دبی سنج های Series SM-RI شرکت Elster

مشخصات اصلی این مدل در جدول ذیل داده شده است.

جدول ۲-۵: مشخصات دبی سنج مدل SM-RI-P

Meter type		SM-RI-P
Diameter	mm inch	50 - 250 2 - 10
Flow range size		G 40 - G 2500
Qmax	m ³ /h cfh	65 - 4000 5800 - 141,000
Rangeability	p = 0 bar g p = 20 bar g p = 50 bar g	1:20 1:50 1:100
Max. error of reading (Qt - Qmax)	1 bar g (Qt = 0.2 Qmax)	±0.5 %
Repeatability	% of reading	< 0.1 %
Upstream straight pipe		2 DN
Downstream straight pipe		2 DN
Type approval		yes
Body material		steel ASTM A 350 LF2
Meter body length		range dependant
Flange ratings	PN ANSI	10 - 100 125 - 600
Pressure range	MPa g bar g psi g	0 - 13 0 - 130 0 - 1885
Temperature range	ambient process	-10 to +65 °C -20 to +65 °C
Ingress Protection		IP 61
LF-sensor	standard	-
HF-sensor	optional	2
Lubrication	standard	2 x oil pump

• سری TR22



شکل ۲-۲۶: دبی سنج سری TRZ2 شرکت Elster

مشخصات اصلی این سری در جدول زیر داده شده است.

جدول ۲-۶: مشخصات دبی سنج مدل TRZ2

Type		TRZ2
Diameter	mm inch	50 - 150 2 - 6
Flow range size	metric imperial	G 65 - G 1000
Qmax	m ³ /h cfh	100 - 1600 3500 - 56500
Rangeability	p = 0 bar g	1:20 (1:30)
Max. error of reading (Qt - Qmax)	1 bar g (Qt = 0.2 Qmax)	±1 %
Max. error of reading (Qt - Qmax)	> 5 bar g (Qt = 0.2 Qmax)	±0.5 %
Repeatability	% of reading	<0.1 %
Upstream straight pipe		2 DN
Downstream straight pipe		2 DN
Type approval		yes
Body material		spheroidal graphite cast iron
Meter body length		3 DN
Flange ratings	PN ANSI	10 - 100 150 - 600
Pressure range	MPa g bar g psi g	0 - 10 0 - 100 0 - 1450
Temperature range	ambient process	-20 to +70 °C -20 to +60 °C
Lubrication	standard optional	permanent oil pump

• سری Q75

مشخصات اصلی این سری در ذیل آورده شده است

- Pressure ratings: ANSI 125 to ANSI 600 and ND 10 to ND 100. Higher pressure ratings on request.
- Nominal diameters: 50 mm (2") to 600 mm (24"). Larger sizes on request
- Flow rates: Up to 25,000 m³/h (900,000 cfh) (line conditions).
- Measurement range: 1: 20 at atmospheric conditions*.
- Installation: Up to 200 mm (8") both vertical and horizontal; over 200 mm horizontal only.
- Repeatability: better than $\pm 0.1\%$.
- Measuring accuracy: Between q and $0.2 q \pm 2\%$ **Between $0.2 q$ and $q \pm 1\%$ **.
- Temperature range: - 10°C to + 65°C / 15o F to 150 o F. Other emperature ranges on request.



شکل ۲-۲۷: دبی سنج سری Q75 شرکت Elster

• سری Q

مشخصات اصلی این سری در ذیل داده شده است

- Rangeability : 1 : 20
- Flow ranges : 6 - 1,600 m³/h (210 - 56,500 ft³/h)
- Diameters : DN 50 - 150
- Pressure rates : PN 10 - 100, ANSI 150 – 600



شکل ۲-۲۸: دبی سنج سری Q شرکت Elster

• سری QA / QAe

مشخصات اصلی این سری در ذیل داده شده است

- Rangeability: up to 1:20
- Flow ranges: 1.6 - 1,600 m³/h (56 - 56,000 ft³/h)
- Diameters: DN 25 - 150
- Pressure rates: PN 4, PN 16, ANSI 150
- Gas temperature QA: -10°C to +60°C (14° to 140°F)
- Ambient temperature QA: -20°C to +70°C (-4° to 158°F)
- Ambient- / gas temperature QAe: 0°C to +50°C (32° to 122°F)



شکل ۲-۲۹: دبی سنج سری QA / QAe شرکت Elster

• سری Flow Conditioners

مشخصات اصلی این سری در ذیل داده شده است.

- Flow-optimized
- Pressure levels: PN 10 - ANSI 600
- Nominal diameters: DN 50 - DN 400
- Gas-/ambient temperature -20°C C to +60°C
- Two different designs

-types K 2 and K 3 in a wedge attachment

-types BLN with 1 and 2 plates

- Type BLN can be supplied in a version which would be installed in the pipe any additional attachments in without using the pipe
- Simple installation
- Can be mounted in any position In accordance with DIN EN ISO 5167-1
- Alternative: pipe bundle flow conditioners on request



شکل ۲-۳۰: دبی سنج سری Flow Conditioners شرکت Elster

۷.۳.۲ شرکت BELL

شرکت BELL یک کمپانی انگلیسی است که در زمینه سیستم‌های اندازه‌گیری گاز فعالیت می‌کند. مشخصات این شرکت در ذیل آورده شده است.

Bell Flow Systems Ltd, registered in England and Wales, registered number 3386045
Registered Address: Unit 7 Swan Business Centre Osier Way Buckingham Bucks
MK,181TB,Great,Britain

+44 (0) 1280 817304  +44 (0) 1280 817185

 mail@bellflowsystems.co.uk

مدل‌های مختلف این شرکت از مواد مختلفی از جمله: PVC, PVDF, Nylon, Stainless Steel, Aluminum and bronze ساخته شده‌اند. بنابراین علاوه بر کاربردهای استاندارد به منظور موادخورنده در محیط‌های ایمن و پرخطر مناسب هستند. دبی‌سنج‌های توربینی این شرکت به سه دسته تقسیم می‌شوند. حال انواع مدل‌های این شرکت معرفی می‌گردد.

• GFT-Turbine-Gas-Meter-models

- TXB-Digital-Turbine-Gas-Meter-models
- Quantometer-Gas-Flow-Turbine-Meter-models

این مدل ها شامل محصولات مختلف می باشند که در جدول ذیل داده شده است.

جدول ۲-۷: محصولات مختلف Turbine-Gas-Meter شرکت Bell

مدلها	تعداد محصولات
GFT-Turbine-Gas-Meter-models	19 Products
Screw Connection Gas Flow Turbines	7 Products
Flange Connection Gas Flow Turbines	7 Products
Wafer Connection Gas Flow Turbine	5 Products
TXB-Digital-Turbine-Gas-Meter-models	7 Products
Quantometer-Gas-Flow-Turbine-Meter-models	14 Products
CPT Gas Quantometers	14 Products

مشخصات اصلی دبی سنج های GFT Gas Turbine در ذیل آمده است.

- ساخته شده از St/Steel
- صحت (در محدوده خطی): $\pm 2.0\%$ (ضمناً بهتر از 0.5% وقتی از "F112-P" استفاده شود)
- تکرارپذیری (Repeatability): $\pm 0.2\%$
- محدوده دمایی: -30°C to $+120^{\circ}\text{C}$ (350°C Option)
- سایر مشخصات محصولات مختلف از سری مدل های GFT-Turbine-Gas-Meter در ذیل آمده است.

جدول ۲-۸: محصولات مختلف GFT-Turbine-Gas-Meter شرکت Bell

مشخصات	محصولات
	<u>Screw Connection Gas Flow Turbines</u>
St/Steel Construction, Screwed Connections 0.3 - 4.2 m3/Hr	1/2" BSP Gas Flow Turbine
St/Steel Construction, Screwed Connections 0.5 - 7 m3/Hr	1/2" BSP Gas Flow Turbine
St/Steel Construction, Screwed Connections 1 - 14 m3/Hr	3/4" BSP Gas Flow Turbine
St/Steel Construction, Screwed Connections 2.5 - 35 m3/Hr	3/4" BSP Gas Flow Turbine
St/Steel Construction, Screwed Connections 5 - 70 m3/Hr	1" BSP Gas Flow Turbine
St/Steel Construction, Screwed Connections 10 - 140 m3/Hr	1 1/2" BSP Gas Flow Turbine
St/Steel Construction, Screwed Connections 18 - 252 m3/Hr	2" BSP Gas Flow Turbine
	<u>Flange Connection Gas Flow Turbines</u>
St/Steel Construction, Flanged Connections 2.5 - 35 m3/Hr	3/4" Flanged Gas Flow Turbine
St/Steel Construction, Flanged Connections 5 - 70 m3/Hr	1" Flanged Gas Flow Turbine
St/Steel Construction, Flanged Connections 10 - 140 m3/Hr	1 1/2" PN16 Flanged Gas Flow Turbine
St/Steel Construction, Flanged Connections 18 - 252 m3/Hr	2" Flanged Gas Flow Turbine
St/Steel Construction, Flanged Connections 35 - 490 m3/Hr	3" Flanged Gas Flow Turbine
St/Steel Construction, Flanged Connections 70 - 980 m3/Hr	4" Flanged Gas Flow Turbine
St/Steel Construction, Flanged Connections 140 - 1960 m3/Hr	6" Flanged Gas Flow Turbine

<u>Wafer Connection Gas Flow Turbine</u>	
<u>3/4" Wafer Style Gas Flow Turbine</u>	(43 mm R.F. Diameter) St/Steel Construction, Wafer Fitting 2.5 - 35 m3/Hr
<u>1" Wafer Style Gas Flow Turbine</u>	(52 mm R.F. Diameter) St/Steel Construction, Wafer Fitting 5 - 70 m3/Hr
<u>1 1/2" Wafer Style Gas Flow Turbine</u>	(73 mm R.F. Diameter) St/Steel Construction, Wafer Fitting 10 - 140 m3/Hr
<u>2" Wafer Style Gas Flow Turbine</u>	(92 mm R.F. Diameter) St/Steel Construction, Wafer Fitting 18 - 252 m3/Hr
<u>3" Wafer Style Gas Flow Turbine</u>	(127 mm R.F. Diameter) St/Steel Construction, Wafer Fitting 35 - 490 m3/Hr

شکل مدل های $\frac{1}{2}$ " BSP, $\frac{3}{4}$ " BSP برای نمونه در زیر داده شده است.



شکل ۲-۳۱: مدل های مختلف دبی سنج های $\frac{3}{4}$ " BSP, $\frac{1}{2}$ " BSP شرکت Bell

شکل مدل های 1 " BSP, $1\frac{1}{2}$ " BSP, 2 " BSP برای نمونه در زیر داده شده است.



شکل ۲-۳۲: مدل های مختلف دبی سنج های 1 " BSP, $1\frac{1}{2}$ " BSP, 2 " BSP شرکت Bell

مشخصات عمده دبی سنج های TXB Gas Turbine در ذیل آمده است.

- نمایشگر دیجیتالی LCD دار (Rate/Total/Re-set Total)
- امکان خروجی پالسی (Open Collector) (امکان کنترل صفحه نمایشگر امکان پذیر است)
- افت فشار پایینتر نسبت به مدل های رقیب به کمک IGE/UP/2، کمتر از 45Pa در 50m³/h،
- دقت بالا ($\pm 1\%$ حجمی در حالت full scale)
- قابل نصب در هر موقیتی هستند
- دارای باتری لثیمی با ۷ سال کارکرد مداوم
- همراه با کارایی تصحیح دما/فشار (اختیاری)
- متراکم و وزن سبک
- قابل راه اندازی با جریانات کمتر از 0.5m³/h تا 300m³/h
- مناسب برای گاز طبیعی، LPG، هوا و غیره

سایر مشخصات محصولات مختلف دبی سنج های از نوع TXB-Digital-Turbine-Gas-Meter در ذیل آمده است.

جدول ۲-۹: محصولات مختلف TXB-Digital-Turbine-Gas-Meter شرکت Bell

مشخصات	محصولات
Qmin 1.5 Qmax 30 m ³ /h Record flow rates less than 0.05m ³ /h Aluminium Alloy Construction	3/4" Screwed Digital Gas Flow Turbine
Qmin 1.5 Qmax 30 m ³ /h Aluminium Alloy Construction	1" Screwed Digital Gas Flow Turbine
Qmin 1.5 Qmax 30 m ³ /h Aluminium Alloy Construction	1 1/4" Screwed Digital Gas Flow Turbine
Qmin 1.5 Qmax 30 m ³ /h Aluminium Alloy Construction	1 1/2" Screwed Digital Gas Flow Turbine
Qmin 10 Qmax 100 m ³ /h Aluminium Alloy Construction	2" Screwed Digital Gas Flow Turbine
Qmin 12.5 Qmax 150 m ³ /h Aluminium Alloy Construction	2" Flanged Digital Gas Flow Turbine
Qmin 30 Qmax 300 m ³ /h St/St Construction	3" Flanged Digital Gas Flow Turbine

شکل مدل های 3/4" Screwed, 1" Screwed, 1 1/4" Screwed, 1 1/2" Screwed, 2" Flanged Screwed, 2" Flanged برای نمونه در زیر داده شده است.



شکل ۲-۳۳: مدل های مختلف دبی سنج های 3/4" Screwed , 1" Screwed , 1 1/4" Screwed, 1 1/2" Screwed, 2" Flanged Screwed, 2" Flanged شرکت Bell

شکل مدل های ۳" Flanged برای نمونه در زیر داده شده است.



شکل ۲-۳۴: مدل های مختلف دبی سنج های ۳" Flanged شرکت Bell

دبی سنج های گازی توربینی CPT Quantometro بر اساس میزان چرخش پره خود که متناسب با میزان نرخ جریان گاز می باشد، کار می کنند. مشخصات اصلی این دبی سنج ها در ذیل آمده است. دارای پره های آلومینیومی هستند که این مسئله باعث ایجاد تیغه های باریکتر و دارای دقت بالاتر در مقایسه با پره های پلاستیکی بیشتر مدل های رقیب می شود. دارای کارایی بهتر و افت فشار پایین تری در مقایسه با سایر دبی سنج های رقیب، به کمک IGE/UP/2، هستند.

جدول ۲-۱۰: مدل های مختلف Quantometer-Gas-Flow-Turbine-Meter

مشخصات	محصولات
SKU: CPT50G40 Qmin 6 Qmax 65 m ³ /h price: UK£825.00	<u>Quantometro Mechanical Gas Meter 50mm</u>
SKU: CPT50G65 Qmin 10 Qmax 100 m ³ /h price: UK£825.00	<u>Quantometro Mechanical Gas Meter 50mm</u>
SKU: CPT80G100 <u>Qmin 8 Qmax 160 m³/h</u> price: UK£908.00	<u>Quantometro Mechanical Gas Meter 80mm</u>
SKU: CPT80G250 Qmin 20 Qmax 400 m ³ /h UK£908.00	<u>Quantometro Mechanical Gas Meter 80mm</u>
SKU: CPT80G160 Qmin 13 Qmax 250 m ³ /h UK£908.00	<u>Quantometro Mechanical Gas Meter 80mm</u>
SKU: CPT100G160 Qmin 13 Qmax 250 m ³ /h UK£1046.00	<u>Quantometro Mechanical Gas Meter 100mm</u>
SKU: CPT100G250 Qmin 20 Qmax 400 m ³ /h price: UK£1046.00	<u>Quantometro Mechanical Gas Meter 100mm</u>
SKU: CPT100G400 Qmin 32 Qmax 650 m ³ /h price: UK£1046.00	<u>Quantometro Mechanical Gas Meter 100mm</u>
SKU: CPT150G400 Qmin 32 Qmax 650 m ³ /h price: UK£1574.00	<u>Quantometro Mechanical Gas Meter 150mm</u>
SKU: CPT150G650 Qmin 50 Qmax 1000 m ³ /h price: UK£1574.00	<u>Quantometro Mechanical Gas Meter 150mm</u>
SKU: CPT150G1000 Qmin 80 Qmax 1600 m ³ /h price: UK£1648.00	<u>Quantometro Mechanical Gas Meter 150mm</u>
SKU: CPT 200G1000 Qmin 80 Qmax 1600 m ³ /h price: UK£2960.00	<u>Quantometro Mechanical Gas Meter 200mm</u>
SKU: CPT 200G1600 Qmin 130 Qmax 2500 m ³ /h price: UK£2960.00	<u>Quantometro Mechanical Gas Meter 200mm</u>
SKU: CPT 200G2500 Qmin 200 Qmax 4000 m ³ /h price: UK£2960.00	<u>Quantometro Mechanical Gas Meter 200mm</u>

شکل مدل هایی از این نمونه در زیر داده شده است.



شکل ۲-۳۵: مدل های مختلف دبی سنج های گازی توربینی CPT Quantometro شرکت Bell

ضمناً بروشور دبی سنج های این شرکت همراه گزارشات ماهیانه بصورت فایل داده شده است.

۸.۳.۲ شرکت Flow Technology

شرکت Flow Technology یک کمپانی آمریکائی است که محصولات این شرکت در رده های گوناگون دبی سنج ها ارائه شده است. مشخصات این شرکت در ذیل آمده است.

Tempe, Arizona one block south of Warner Road (the nearest major intersection is arner Road and Priest Drive. The facility is half a mile east of I-10 and the Warner Road exit)

By Phone:

Telephone: +1 480 240 3400

Fax: +1 480 240 3401

By Mail:

FTI Flow Technology Inc.

8930 South Beck Ave

Suite #107 Tempe, AZ 85284

<http://www.ftimeters.com>

اصلی ترین مزایای دبی سنج های این شرکت شامل موارد زیر می شود:

- دقت بالا
- زمان پاسخ سریع
- خیلی متراکم و جمع و جور بودن
- ایده آل برای ویسکوزیته های پایین تر از 500 cSt
- قابل استفاده برای مایعات و گازها

- امکان طراحی دبی سنج‌ها طبق درخواست مشتری

ضمناً این شرکت دارای سری‌های گوناگونی از دبی سنج‌های مورد نیاز صنایع مختلف می‌باشد. بطوری که هم اکنون این شرکت دارای دو مدل دبی سنج توربینی گازی است.

• FT Series

این دبی سنج‌ها در صنایع گوناگون خودرو، هوا فضا، سیستم‌های کنترل زیردریا و همچنین در صنایع گاز قابل استفاده می‌باشند. مهمترین مشخصات این سری در ذیل آورده شده‌است.

- Designed for a wide range of liquid and gas applications
- Accuracy: $\pm 0.25\%$
- Repeatability: $\pm 0.05\%$ (liquid) and $\pm 0.1\%$ (gas) of reading.
- Excellent speed of response
- Linearity: $\pm 0.1\%$ (100:1) with linearizing electronics
- Liquid Flow Rates: 0.03 to 1,500 GPM (0.11 to 5,677 LPM)
- Gas Flow Rates: 0.09 to 1,500 ACFM (2.55 to 42,480 ALPM)
- Materials of Construction: 316 SS housing and 430F SS rotor
- End Fittings: NPT, AN (MS), Hose Barb, ANSI Flanges, SAE, Tri-Clamp
- Max Pressures: 2000 Bar (30,000 psi), dependant on size and fitting
- Custom Engineered Solutions Available on Request

شکل این سری دبی سنج‌ها در زیر نشان داده شده‌است.



شکل ۲-۳۶: دبی سنج‌های گازی توربینی FT Series شرکت Flow Technology

• FTO Series

این سری دبی سنج‌ها برای اندازه‌گیری نرخ‌های جریان خیلی پایین مایع یا گاز استفاده می‌شوند. این وسایل اندازه‌گیری به دقت بالا و حساس به جریان‌ات پایین، توانایی اندازه‌گیری جریان‌ات کم در حد 0.001 GPM در مایعات و 0.0015 ACFM در گازها را دارند. ضمناً مهمترین مشخصات این سری در ذیل آورده شده‌است.

- Low flow instrument grade flow meter for both liquid and gas
- Accuracy: $\pm 0.25\%$
- Repeatability: $\pm 0.1\%$ of reading
- Linearity: $\pm 0.1\%$ (100:1) with linearizing electronics
- Liquid Flow Rates: 0.001 to 2.0 GPM (3.78 to 7,570 mLPM)
- Gas Flow Rates: 0.0015 to 0.3 ACFM (2.55 to 510 ALPH)
- Materials of Construction: 316 SS housing and 17-4PH SS rotor
- End Fittings: Female NPT, AN (MS), and ANSI Flanges
- Bearings: Pivot (sapphire jewel), ball, and journal
- Compact Size: 3 inch face-to-face with NPT and MS connections
- Custom Engineered Solutions Available on Request
-

شکل این سری دبی سنج‌ها در زیر نشان داده شده است.



شکل ۲-۳۷: دبی سنج‌های گازی توربینی شرکت Flow Technology

ضمناً بروشور دبی سنج‌های این شرکت همراه گزارشات ماهیانه بصورت فایل داده شده است.

۹.۳.۲ شرکت Tancy Investment Group

Tancy Investment Group Co., Ltd، یک شرکت چینی است که دارای تنوع محصولات مطلوبی است. مشخصات این شرکت در ذیل آمده است.

Company Name:	Tancy Investment Group Co., Ltd.
Street Address:	Road1.Industry Zone.Lingxi Town.Cangnan
City:	Wenzhou
Province/State:	Zhejiang
Country/Region:	China
Zip:	325800
Telephone:	86-577-64839680
Fax:	86-577-64839090
Website:	http://www.alibaba.com , http://tancyinstrument.en.alibaba.com/

دبی سنج‌های توربینی گازی این شرکت در زیر معرفی می‌شوند.

• TBQC Series CPU Card Turbine Gas Flow meter

این مدل دارای کارایی پایدار و قابل اعتمادی می باشد. از جمله خصوصیات بخش کنترل شیر این سری شامل: طراحی با افت فشار صفر با بکارگیری شیر توپی و قطر اسمی شیر معادل با قطر لوله، شیر باز و بسته با اطمینان بالا و بسته شدن فوری شیر هنگامی که باطری در حال ضعیف شدن می باشد. سایر مشخصات این مدل از سایت این شرکت قابل دیدن می باشد.

شکل این سری دبی سنجها در زیر نشان داده شده است.



شکل ۲-۳۸: دبی سنجهای گازی توربینی TBQC Series شرکت Tancy Investment Group

• TBQ Gas Turbine Flow meter

مشخصات این سری در ذیل آورده شده است:

- محدوده جریان: $2.5 \sim 6500 \text{ m}^3/\text{h}$ با قطر اسمی: DN25 ~ DN300mm
- محدوده فشار: 0 ~ 1.6 MPa (در سایر فشارها می توان درخواست داده شود)
- دمای سیال: $-20\text{C} \sim +60\text{C}$
- دمای محیط: $-30\text{C} \sim +50\text{C}$
- میزان Explosion-proof: EXDIIBT4 EXIAIICT4 (TBQZ)
- درجه حفاظت: IP65
- محدوده کاربرد این دبی سنج در اندازه گیری گازهای طبیعی شهری، گاز طبیعی شبکه خطوط توزیع و انتقال، گاز سوختی صنایع نفتی، شیمیایی و برق و ایستگاه تنظیم گاز سوختی

شکل این سری دبی سنج‌ها در زیر نشان داده شده است.



شکل ۲-۳۹: دبی سنج‌های گازی توربینی TBQ Series شرکت Tancy Investment Group

• TBQJ Gas Turbine Flow meter

مشخصات این سری شامل موارد زیر می‌شود:

- طراحی استادانه سازه عبور جریان، جلوگیری از جریان گاز بین شفت‌ها و بهبود بسیار زیاد در سازگاری medium دبی سنج‌های توربینی
- طراحی منحصر به فرد سازه‌ای ضد ضربه و آب‌بندی شده جهت اطمینان از عملکرد قابل اطمینان و مدت زیاد بدون روغن کاری کردن محورها
- بکارگیری تکنیک آزمایشی غیرمغناطیسی در عوض بخش‌های حساس مغناطیسی برای جلوگیری از وجود نیروی مغناطیسی و بهبود تست حساسیت و کاهش بیشتر سرعت شروع
- طراحی ساختمانی مستقل، قابلیت تعویض خوب و مناسب و راحت برای نگهداری و تعمیر
- مجهز به یکسوکننده با کارایی خوب و نیاز کم برای خطوط مستقیم جلو و عقب. (Forward >> 2DN, Backward >> 1DN)

شکل این سری دبی سنج‌ها در زیر نشان داده شده است.



شکل ۲-۴: دبی سنج های گازی توربینی TBQJ Series شرکت Tancy Investment Group

• TBQZ Gas Turbine Flow meter

مشخصات کامل این مدل به شرح زیر می باشد:

- این مدل می تواند دما و فشار medium را اندازه گیری کند و بطور اتوماتیک ضرایب فشرده سازی (z factors) را تصحیح کند و دما و فشار را هم مستقیماً با اندازه گیری جریان حجمی استاندارد و حجم کل عوض می کند.
- استفاده از یک سنسور نوع جدید، جریان ابتدایی پایین، افت فشار کم، دقت بالا، عملکرد مطمئن، طول عمر کارکرد بالا
- با استفاده از تکنولوژی بسیار پیشرفته micro-processing، دبی سنج جامع تر، دقیق تر و قابل اطمینان تر است
- با استفاده از تکنولوژی پیشرفته micro-dissipation، کم مصرف و دارای قابلیت کار با انرژی داخلی و خارجی را دارد (به کمک دسته ای از باتری های لیتیومی داخلی که می توانند بیش از ۵ سال عمر کنند)
- مطابق با سیگنال فرکانس جریان، ضریب اندازه گیری می تواند در ۸ مرحله مدرج شود.
- مقاوم در برابر فرسایش، دارای نمایشگر LCD خیلی واضح و راحت برای خواندن
- می تواند مستقیماً به کامپیوتر وصل شود. بدین ترتیب هر کامپیوتر توسط رابط RS485 می تواند تنها با ۲ سیم ارتباطی به ۳۲ دبی سنج وصل گردد. بنابراین برای مدیریت و برای نصب آسان و ارزان می باشد.
- سر این دبی سنج می تواند ۱۸۰ درجه بچرخد بدین ترتیب کارکردن با این وسیله و نصب آن آسان است.

شکل این سری دبی سنجها در زیر نشان داده شده است.



شکل ۲-۴: دبی سنجهای گازی توربینی TBQZ Series شرکت Tancy Investment Group

۱۰.۳.۲ شرکت MUELLER

این شرکت یک کمپانی آمریکائی است که محصولات آن در رده های گوناگون دبی سنجها و کنترلرها ارائه شده است. مشخصات این شرکت در ذیل آمده است.

New Hope, MN

5104 Hillsboro Avenue North, New Hope, MN 55428

Tel. 763-531-2222, Fax. 763-31-9278

Cedar Rapids

520 50th AVE DR SW, Cedar Rapids, IA 52404, Tel. 319-365-1196, Fax. 319-365-923

Website: <http://www.muellersales.com>

این شرکت دارای سری های گوناگونی از دبی سنجهای مورد نیاز صنایع مختلف می باشد. بطوری که هم اکنون این شرکت دارای یک مدل دبی سنج توربینی گازی است.

• GTS Series

این سری جدید از کنتورهای توربینی از سالها تجربیات کاربردی به خوبی بهره برده است. این مسئله باعث بهبود کارایی و کاهش هزینه نگهداری و حق مالکیت این مدل شده است. این دبی سنجها یک خروجی مکانیکی برای تنوع زیاد از وسایل کمکی مثل تصحیح کننده های حجم اصلی و ... ارائه داده است. این دبی سنجها در مدل های فشارپایین، متوسط و بالا در سایزهای ۳ اینچ تا ۱۲ اینچ موجود است. مهمترین مشخصات این سری در ذیل آورده شده است.

- مدل‌های با میزان ظرفیت‌های وسیع با کاهش قطر رانش دبی سنج می‌تواند باعث ذخیره اساسی در لوله کشی، پیوندهای لوله و شیرهای بلوکی و غیره می‌شود.
- مدل‌های با نیرو محرکه مکانیکی برای استفاده با تصحیح‌کننده‌های P&T یا مدل‌های با خروجی پالسی الکترونیکی برای اتصال مستقیم به کامپیوترهای رایج است
- تصحیح دمایی الکترونیک با فاکتور فشاری ثابت و شش ماه ذخیره اطلاعات
- سیستم روغن‌کاری Flush-Type برای شستشوی یاتاقان‌های اصلی در حالی که دبی سنج در حال کار است.
- موتورهای آلومینیومی برای مدل‌های فشار بالا و برای دبی‌سنج‌های با خروجی‌های پالسی فرکانس بالا
- یک سیستم چرخ دنده‌ای به نام Gear Train برای همه انواع سایزها که قطعات یدکی موجود را کاهش می‌دهد.
- منحنی صحت سه نقطه‌ای (Three-Point) که به شکل استاندارد آماده شده
- منحنی صحت سه نقطه‌ای به شکل اختیاری
- منحنی‌های صحت فشار پایین و بالا موجود است

شکل این سری دبی‌سنج‌ها در زیر نشان داده شده است.



شکل ۲-۴: دبی‌سنج‌های گازی توربینی GTS Series شرکت MUELLER

۱۱.۳.۲ شرکت HOFFER

شرکت HOFFER که یک کمپانی امریکایی است و در زمینه سیستم‌های اندازه‌گیری گاز فعالیت می‌کند. مشخصات این شرکت در ذیل آورده شده است.

Hoffer Flow Controls, Inc. 107 Kitty Hawk Lane, Elizabeth City NC 27909
Office: (252) 331-1997 ~ 1-800-628-4584 ~ Fax: (252) 331-2886 ~ Email:
info@hofferflow.com, Web site: <http://www.hofferflow.com>

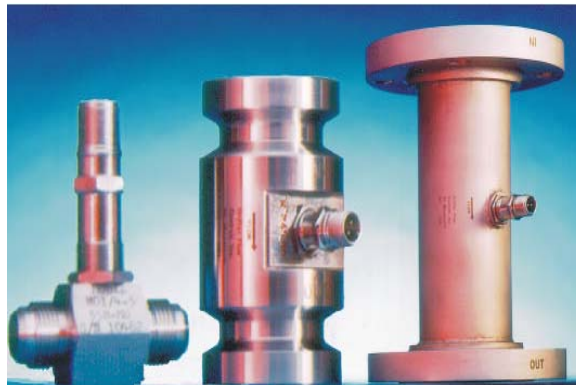
انواع دبی سنج‌های این شرکت در ذیل معرفی می‌گردد.

• HO SERIES

مشخصات اصلی این مدل در ذیل داده شده‌است.

- هزینه پایین
- صحت اندازه‌گیری خوب (Repeatability: +/-0.25% , Linearity: ±1%)
- فراهم کردن نرخ جریان وسیع 0.15 تا 12000 ACFM
- تنوع زیاد اتصالات فرایندی موجود است
- کارکردن در محدوده وسیعی از دما و فشار (-400°F to +350°F)
- استفاده از یاتاقان‌های گلوله‌ای سرامیکی مرکب که باعث عمر بالاتر آن می‌شود.
- ماده سازنده آن به شکل استاندارد 316 stainless steel است.
- سایز دبی سنج ۱/۴ تا ۱۲ اینچ

شکل این سری دبی سنج‌ها در زیر نشان داده شده‌است.



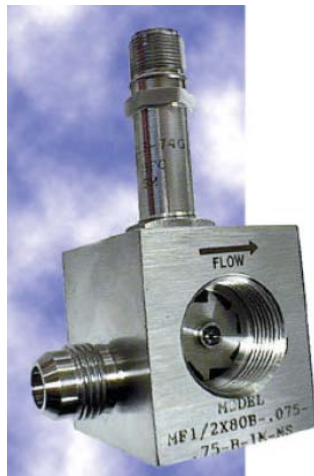
شکل ۲-۳: دبی سنج‌های گازی توربینی HO Series شرکت HOFFER

• MF SERIES

وسایل جدیدی با ظرفیت اندازه‌گیری جریان‌ات کم هستند. بطوری که برای مصارف صنعتی و آزمایشگاهی، جهت رفع نیاز برای اندازه‌گیری دقیق جریان‌ات نرخ پایین کاربرد بسیاری دارند. این سری از دبی سنج‌های شرکت HOFFER برای جریان‌های تمییز، مایعات با ویسکوزیته پایین و متوسط و کاربردهای اندازه‌گیری گاز استفاده می‌شوند. سایر مشخصات این سری در زیر آورده شده‌است.

- نوع اتصالات نهایی: 8-33656-1/2" MS (در سایر سایزها درخواست لازم است)
- محدوده فشار عملیاتی: 1000 PSI (استاندارد)، 6000 PSI (اختیاری)
- محدوده دمای عملیاتی: -450 to +450° F Mag. Pickup و - High Temp. Pickup 450 to +850° F
- متریال ساخت:
- بدنه (316 Stainless Steel)
- یاتاقان: (خودروغن کاری) Ceramic Hybrid Ball Bearings، (اختیاری)
- Sleeve Tungsten Carbide، (اختیاری) Carbon Composite Sleeve
- موتور: (استاندارد) 17.4 PH، (اختیاری) 430 Stainless Steel، (اختیاری) Ni 200
- درپوش: (استاندارد) Rulon-J
- صحت اندازه گیری (Linearity: ±2% , Repeatability: +/-0.25%)
- فراهم کردن نرخ جریان وسیع 0.005 تا 1 ACFM
- سایز دبی سنج 1/2 اینچ

شکل این سری دبی سنجها در زیر نشان داده شده است.



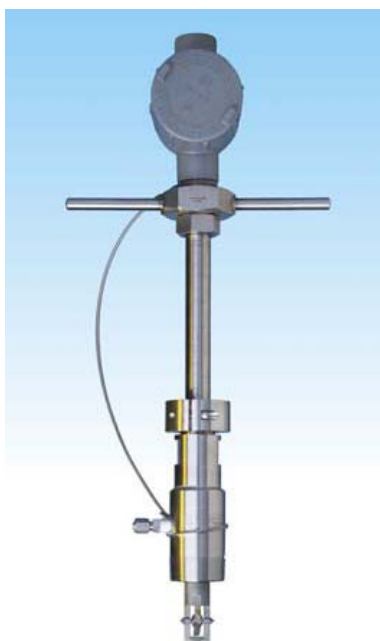
شکل ۲-۴: دبی سنجهای گازی توربینی MF Series شرکت HOFFER

• HP SERIES

این سری دبی سنجها برای اندازه گیری جریانهای گاز و مایع در خطوط لوله قطر متوسط تا زیاد با دقت های ذاتی و با قیمت های بسیار پایینتر از دبی سنج های in-line می باشند. سایر مشخصات این سری در زیر آورده شده است.

- هزینه پایین
- افت فشار پایین
- محدوده جریان وسیع برای گازها (5 تا ۲۵۰ FPS)
- صحت بسیار خوب (Repeatability: +/-0.25% , Linearity: ±2%)
- برای خطوط لوله با قطر ۴ تا ۷ اینچ (در سایر سایزها بایستی درخواست داده شود)
- انعطاف پذیری اتصال فرآیندی
- ممکن است بدون متوقف کردن خدمات نصب یا از فعایت حذف شود.
- محدوده دمای عملکرد استاندارد ۲۰- تا ۴۰۰ °F +
- ماکزیمم فشار عملیاتی: مدل قابل تنظیم فشار پایین 150 PSI و مدل ثابت ۲۵۰۰ PSI و مدل قابل تنظیم فشار بالا 2500 PSI (وابسته به اتصال فرآیندی و دما)
- سایز دبی سنج ۴ تا ۷۲ اینچ

شکل این سری دبی سنجها در زیر نشان داده شده است.



شکل ۲-۴۵: دبی سنجهای گازی توربینی HP Series شرکت HOFFER

• WING NUT SERIES

این سری دبی سنجها برای اندازه گیری جریانات گاز و مایع می باشند. سایر مشخصات این سری در زیر آورده شده است.

- دقت خطی $\pm 1\%$ روی محدوده جریان ۱۰:۱ (بطور نمونه)
- تکرار پذیری $\pm 0.25\%$
- محدوده دمایی -450 to $+350^{\circ}\text{F}$ در حالت استاندارد
- متریال ساخت : بدنه (4130 high chrome alloy steel) و داخل (Stainless steel)
- فراهم کردن نرخ جریان وسیع ۲.۵ تا ۶۰۰ ACFM
- سایز دبی سنج ۱ تا ۳ اینچ

شکل این سری دبی سنجها در زیر نشان داده شده است.



شکل ۲-۶: دبی سنجهای گازی توربینی WING NUT Series شرکت HOFFER

• WAFER SERIES

این سری دبی سنجها برای اندازه گیری جریانهای گاز و مایع می باشند. سایر مشخصات این سری در زیر آورده شده است.

- صحت اندازه گیری (Linearity: $\pm 1\%$, Repeatability: $\pm 0.25\%$)
- فراهم کردن نرخ جریان وسیع 0.15 تا 12000 ACFM
- سایز دبی سنج 1/4 تا ۱۲ اینچ

شکل این سری دبی سنجها در زیر نشان داده شده است.



شکل ۲-۴۷: دبی سنج های گازی توربینی WAFFER Series شرکت HOFFER

• PREMIER SERIES

این سری دبی سنج ها برای اندازه گیری جریان های گاز و مایع می باشند. بطوری که برای همه انواع گازهای غیرخورنده همچون استیلن، دی اکسید کربن، هیدروژن، هوا و گاز طبیعی مناسب می باشد. سایر مشخصات این سری در زیر آورده شده است.

- صحت اندازه گیری (Repeatability: +/-0.1% , Linearity: ±0.5%)
- محدوده دمای عملکرد -450 to +350°F
- محدوده فشار عملکرد ANSI flanges 150# through 2500#
- فراهم کردن نرخ جریان وسیع 0.15 تا 12000 ACFM
- سایز دبی سنج 1/4 تا ۱۲ اینچ
- متریال ساخت :
- بدنه (316 Stainless Steel)
- یاتاقان: (خودروغن کاری) Ceramic Hybrid Ball Bearings
- موتور: (استاندارد) 17.4 PH stainless steel
- اتصالات: Carbon steel (استاندارد) و 316 stainless steel (اختیاری)

شکل این سری دبی سنج ها در زیر نشان داده شده است.



شکل ۲-۴۸: دبی سنج‌های گازی توربینی PREMIER Series شرکت HOFFER

• PREMIER SERIES

مشخصات این سری در زیر آورده شده است.

- هزینه پایین
- صحت اندازه‌گیری خوب (Repeatability: +/-0.1% , Linearity: ±0.5%)
- فراهم کردن نسبت نرخ جریان وسیع ۱۰:۱ تا ۱۰۰:۱
- افت فشار ۴ تا ۵ PSI در ماکزیمم نرخ جریان خطی در یک CSTK
- کارکردن در محدوده وسیعی از دما و فشار (-40°F to +350°F)
- استفاده از یاتاقان‌های گلوله‌ای سرامیکی مرکب و درپوش یاتاقان‌های شامل کاربید تنگستن و کربن سخت
- ماده سازنده آن به شکل استاندارد 316 stainless steel است.
- سایز دبی سنج ۱/۴ تا ۱۲ اینچ

شکل این سری دبی سنج‌ها در زیر نشان داده شده است.



شکل ۲-۴۹: دبی سنج‌های گازی توربینی PREMIER Series شرکت HOFFER

AUTOCLAVE SERIES •

این سری دبی سنجها برای اندازه گیری جریانات گاز و مایع می باشند. سایر مشخصات این سری در زیر آورده شده است.

- صحت اندازه گیری (Repeatability: +/-0.25% , Linearity: ±1%)
- فراهم کردن نرخ جریان وسیع 0.15 تا 43 ACFM
- سایز دبی سنج ۱/۴ تا ۱ اینچ

شکل این سری دبی سنجها در زیر نشان داده شده است.



شکل ۲-۵۰: دبی سنجهای گازی توربینی AUTOCLAVE Series شرکت HOFFER

۱۲.۳.۲ شرکت Equimeter

این شرکت فروشنده عمده تجهیزات اندازه گیری گازی و تجهیزات تنظیم کننده فشار از سال ۱۸۸۶ می باشد. در حال حاضر میلیونها اندازه گیر گازی در همه انواع کاربردها از تولیدات سکوهاای دریایی فشار بالا تا آپارتمانهای چندواحد در سرویس هستند. مشخصات این شرکت آمریکایی در ذیل آورده شده است.

805 Liberty Boulevard
 P.O. Box 528
 DuBois, PA 15801
 800-375-8875
 Fax (814) 375-8460
<http://www.equimeter.com>

انواع دبی سنجهای این شرکت در ذیل معرفی می گردد.

- 4" – 12" Mark II Turbo-Meters

مشخصات اصلی این مدل در ذیل آورده شده است.

- زاویه تیغه روتور ۳۰ و ۴۰ درجه موجود است. بدین ترتیب دو منحنی فازی کارایی مجزا برای هر سایز اندازه گیر ایجاد می کند.
- یک یا دو خروجی پالسی بوسیله سنسورهای نوک تیغه باعث قدرت تفکیک بالا و سیگنال های اضافی در عملکرد قابل اطمینان این دبی سنج ها دارد.
- عامل اندازه گیری این دبی سنج ها یک واحد مدرج و قابل تعویض است. در نتیجه امکان تعمیر، به روز کردن و مدرج کردن این واحدها بدون حذف دبی سنج از خط وجود دارد.

سایر مشخصات این مدل در کاتالوگ های این شرکت قابل مشاهده است. شکل این سری دبی سنج ها در زیر نشان داده شده است.



شکل ۲-۵۱: دبی سنج های گازی توربینی 4" to 12" Mark II شرکت Equimeter

- Mark IIE 2" & 3" Turbo-Meters

جدیدترین عضو از خانواده Mark II، 2" Mark IIE and 3" Mark IIE، به طور کلی دارای مشخصات ذیل می باشد.

- ۴ نرخ فشاری (۲۴۰، ۲۷۵، ۷۲۰ و ۱۴۴۰ PSIG)
- طراحی End-entry با واحد اندازه گیری قابل تعویض
- خروجی پالسی بوسیله تکنولوژی سنسور لبه تیغه
- خروجی پالسی اضافی موجود است

- روغندان نصب شده روی دبی سنج و روغندان اتوماتیک موجود است
- بالاترین فشار مدرج شده تا ۹۰۰ PSI است
- روتورهای آلومینیومی

شکل این سری دبی سنجها در زیر نشان داده شده است.



شکل ۲-۵۲: دبی سنجهای گازی توربینی 2" & 3" Mark IIE شرکت Equimeter

• 2" & 3" T-10 Turbo-Meters

این نوع دبی سنجها برای اندازه گیری دقیقتر در انتقال و تولید گاز کاربرد دارند. طراحی متراکم و قوی این اندازه گیرها همراه با بازخوانهای دیجیتالی مستقیم آنها حوزه داده های اندازه گیری دقیق و قابل اطمینانی فراهم می کند. زمینه کاربرد این دبی سنجها برای ظرفیت های اسمی ۱۰۰۰۰ CFH در 4 ounces فشار ورودی است. زمینه های پیشنهاد شده شامل موارد زیر است:

- اندازه گیری مستقیم سر چاهی روی چاه های گازی
- ایستگاه های مجاور شهر
- دستگاه های اندازه گیری صنعتی
- انشعاب گازی از جداکننده های تولیدی
- جداکننده های آزمایشی
- اندازه گیری های امتحانی
- اندازه گیری های آزمایشی برای ساختن نسبت های گازی به نفتی
- اندازه گیری گاز سوخت کمپرسورها

شکل این سری دبی سنجها در زیر نشان داده شده است.



شکل ۲-۵۳: دبی سنج‌های گازی توربینی T-10 3" & 2" شرکت Equimeter

• 2" & 3" TPL-9 Turbo-Meters

مشخصات اصلی این مدل در ذیل آورده شده است.

- ظرفیت اسمی این دبی سنج در 2 kpa فشار ورودی، (9000 SCFH (216 MSCFD) یا در واحد متریک (6100 Nm³/day (255 Nm³/h است. در فشارهای ورودی بالاتر ظرفیت‌های اندازه‌گیری به طور مستقیم با ضریب قانون فشار بویلی افزایش می‌یابد.
- بدنه‌ها و اتصالات این دبی سنج‌ها مطابق با مشخصات ANSI برای ۳۰۰، ۱۵۰، ۶۰۰ PSI از استیل ساخته شده است.
- این مدل زمان از کارافتگی را مینیمم می‌کند و لیست قطعات یدکی را ساده‌تر می‌کند.
- سیستم روغن کاری خارجی یا تاقان‌ها فراهم است
- نسبت ظرفیت اندازه‌گیری ماکزیمم به مینیمم جریان (Rangeability) در دقت +/- 1% در شرایط فشار ورودی ثابت و در فشار پایین ۱۰:۱ می‌باشد.

شکل این سری دبی سنج‌ها در زیر نشان داده شده است.



شکل ۲-۵۴: دبی سنج‌های گازی توربینی TPL-9 3" & 2" شرکت Equimeter

۱۳.۳.۲ شرکت RMG

این شرکت یک کمپانی آلمانی است که محصولات آن در رده‌های گوناگون دبی‌سنج‌ها و کنترل‌ها ارائه شده‌است. این شرکت با آدرس اینترنتی www.rmg.de دارای سری‌های گوناگونی از دبی‌سنج‌های مورد نیاز صنایع مختلف بوده که در این میان سه مدل دبی‌سنج توربینی گازی مورد بحث قرار می‌گیرد.

- سری TRZ 03

بطور کلی این سری از کنتورها برای گاز طبیعی و موادگازی غیرخورنده مناسب هستند، اما مدل خاصی از این سری برای گازهای خورنده نیز کاربرد دارد. از دیگر مشخصات این نوع می‌توان به شماره‌گر مکانیکی نشان‌دهنده کل جریان گاز عبوری بر حسب واحدهای حجمی (مترمکعب)، دقت اندازه‌گیری بالا، جریان گاز افقی یا عمودی و امکان اتصال به یک وسیله اندازه‌گیری کمکی (مثل integrator یا load recorder) اشاره کرد. ضمناً سری TRZ 03E هم موجود است که بدون شاخص مکانیکی و با خروجی الکتریکی برای سیستم‌های کامپیوتری کار می‌کند. سایر مشخصات این سری مطابق با استاندارد اروپایی PTB^۲ در جدول ذیل آورده شده است. همچنین شکل ۲-۵۵ این سری از دبی‌سنج‌ها را نشان می‌دهد.

² Physikalisch -Technische Bundesanstalt

جدول ۲-۱۱: سایر مشخصات سری TRZ 03 شرکت RMG

Max. service pressure pmax	100 bar
Meter sizes	G 40 to G 16000 (from Qmax 65 m ³ /h to Qmax 25000 m ³ /h)
Max. measuring range	1:50
Connections	DN 50 to DN 600 flanged to DIN PN 10, PN 16, PN 25, PN 40, PN 64, PN 100 and flanged to ANSI 150, ANSI 300, ANSI 600



شکل ۲-۵۵: دبی سنج‌های گازی توربینی سری TRZ 03 شرکت RMG

- سری TRZ 03-TE/L

از مشخصات خاص این سری از کنتورها می‌توان به واحد جمع‌کننده الکتریکی (با عمر مفید حداقل ۶ سال)، فرستنده پالسی LF و HF در بالای کنتور، خروجی مداوم (به کمک یک منبع تأمین‌کننده انرژی خارجی) و محافظ انفجار (II 2 G EEx ib II C T4) اشاره کرد. همچنین برای گاز طبیعی و موادگازی غیرخورنده مناسب هستند. از دیگر مشخصات این نوع نشان‌دهنده جریان، دقت اندازه‌گیری بالا، جریان گاز افقی یا عمودی و مناسب بودن برای گاز طبیعی و موادگازی غیرخورنده می‌باشد. ضمناً سایر مشخصات این سری مطابق با استاندارد اروپایی PTB در جدول ذیل آورده شده است. شکل ۲-۵۶ نمونه‌ای از این سری دبی سنج‌ها را نشان می‌دهد.

جدول ۲-۱۲: سایر مشخصات سری TRZ 03-TE/L شرکت RMG

Max. service pressure pmax	100 bar
Meter sizes	G 100 to G 16000 (from Qmax 160 m ³ /h to Qmax 25000 m ³ /h)
Max. measuring range	1:50
Connections	DN 80 to DN 600 flanged to DIN PN 10, PN 16, PN 25, PN 40, PN 64, PN 100 and flanged to ANSI 150, ANSI 300, ANSI 600



شکل ۲-۵۶: دبی سنج‌های گازی توربینی سری TRZ 03-TE/L شرکت RMG

- سری TRZ 03 L

تفاوت عمده این سری از کنتورها با سری‌های قبل مطابقت با راهنمای صنعتی G13 (معادل با تست IR-32/8 راهنمای OIML) و عدم نیاز به لوله ورودی اضافی حتی برای آشفستگی‌های زیاد جریان می‌باشد. از طرفی دیگر برای گاز طبیعی و مواد گازی غیرخورنده مناسب هستند، اما مدل خاصی از این سری برای گازهای خورنده نیز کاربرد دارد. از دیگر مشخصات این نوع می‌توان به شماره‌گر مکانیکی نشان‌دهنده کل جریان گاز عبوری بر حسب واحدهای حجمی (مترمکعب)، دقت اندازه‌گیری بالا، جریان گاز افقی یا عمودی، امکان اتصال به یک وسیله اندازه‌گیری کمکی (مثل integrator یا load recorder) به پیوست خروجی می‌باشد. ضمناً سایر مشخصات این سری مطابق با استاندارد اروپایی PTB درجدول ذیل آورده شده‌است. شکل ۲-۵۷ نمونه‌ای از این سری دبی سنج‌ها را نشان می‌دهد.

جدول ۲-۱۳: سایر مشخصات سری TRZ 03 L شرکت RMG

Max. service pressure pmax	100 bar
Meter sizes	G 40 to G 10000 (from Qmax 65 m ³ /h to Qmax 16000 m ³ /h)
Max. measuring range	1:50
Connections	DN 50 to DN 600 flanged to DIN PN 10, PN 16, PN 25, PN 40, PN 64, PN 100 and flanged to ANSI 150, ANSI 300, ANSI 600



شکل ۲-۵۷: دبی سنج‌های گازی توربینی سری TRZ 03 L شرکت RMG

سایر مشخصات این مدل‌ها در کاتالوگ‌های ضمیمه شده این شرکت در CD ضمیمه گزارشات ماهیانه قابل مشاهده است.

۱۴.۳.۲ شرکت Instromet

اطلاعاتی از مدل‌های مختلف شرکت Instromet که یک شرکت آمریکایی است و در زمینه سیستم‌های اندازه‌گیری گاز فعالیت می‌کند در این قسمت ارائه می‌شود. این شرکت یکی از برجسته‌ترین شرکت‌های سازنده تجهیزات اندازه‌گیری و کنترل گازی در جهان بوده و بیش از ۲۰ کارخانه سازنده و دفاتر فروش بین‌المللی و نمایندگی در بیش از ۴۰ کشور دارد. آدرس اینترنتی شرکت مذکور www.instrometinc.com بوده و در ادامه محصولات آن مورد بررسی قرار می‌گیرد.

• سری Q و QIC

این سری از کنتورها برای همه انواع گازهای خورنده کاربرد دارد. از دیگر مشخصات این نوع می‌توان به خروجی‌های استاندارد LF و HF اشاره کرد. همچنین این سری دبی سنج‌ها به یک پمپ روغن همراه مجهز هستند که بدینوسیله روغن می‌تواند درحالی که کنتور درحال کار

است به یاتاقانها اضافه گردد. ضمناً سایر مشخصات این سری در جدول ذیل آورده شده است. شکل ۵۸-۲ نمونه ای از این سری دبی سنجها را نشان می دهد.

جدول ۱۴-۲: مشخصات سری Q و QIC شرکت Instromet

Accuracy:	± 0.5% uncertainty
Diameters:	2", 3", 4", 6", 8", 10", 12", 16", 20", 24", 30"
Flange Ratings:	PN10 - PN100, ANSI150# - ANSI600#
Frequency Transducer:	1 or more proximity probes
Index:	Multi index with LF pulse output
Pressure:	up to 100bar (1,450 psi)
Ranges:	3,500ACFH - 900,000ACFH
Turn-Down Ratio:	1:20 at atmospheric pressure (larger range at higher pressures)
Spec. Sheet / Brochure:	Turbine Gas Meter Type Q Brochure



شکل ۵۸-۲: دبی سنجهای گازی توربینی سری "Q" و "QIC" شرکت Instromet

• سری X-XIC

این سری از کنتورها نیز برای همه انواع گازهای خورنده کاربرد دارد. از دیگر مشخصات این نوع می توان به خروجی های استاندارد LF و HF اشاره کرد. همچنین این سری دبی سنجها، Conditioner های جریانی دارای لیسانس X4X را همراه دارند. ضمناً سایر مشخصات این سری در جدول ذیل آورده شده است. شکل ۵۹-۲ نمونه ای از این سری دبی سنجها را نشان می دهد. سایر مشخصات این مدلها و کاتالوگهای ضمیمه شده این شرکت در CD همراه گزارشات ماهیانه قابل مشاهده است.

جدول ۲-۱۵: مشخصات سری X-XIC شرکت Instromet

Accuracy:	±.5% uncertainty (±.25% for larger at high pressure)
Diameters:	2", 3", 4", 6", 8", 10", 12", 16", 20", 24", 30"
Flange Ratings:	PN10 - PN100, ANSI150# - ANSI600#
Flow Conditioner:	Built-in X4X®, fulfills ISO 9951 with only 2D upstream piping
Frequency Transducer:	1 or more proximity probes
Index:	Multi index with LF pulse output
Pressure:	up to 100bar (1,450 psi)
Ranges:	G40 - G25,000
Turn-Down Ratio:	1:20 at atmospheric pressure (larger range at higher pressures)
Spec. Sheet / Brochure:	Turbine Gas Meter Type X Brochure



شکل ۲-۵۹: دبی سنج های گازی توربینی سری X-XIC شرکت Instromet

۱۵.۳.۲ شرکت ACTARIS

این شرکت یکی از سردسته های جهانی در طراحی و ساخت کتورها و سیستم های وابسته برای بازارهای الکتریکی، گازی، آبی و حرارتی است. محصولات و سیستم های ابداعی این شرکت در برگیرنده آخرین تکنولوژی ها برای نایل شدن به نیازهای کارفرماهای سیستم های آبی و انرژی و خدمات همگانی و شرکت های صنعتی است. قابل ذکر است که تنها امکان ارتباطی وب سایت این شرکت <http://www.actaris.com> می باشد. در ادامه انواع دبی سنج های این شرکت معرفی می گردد.

• سری Fluxi 2000/TZ

این سری از کنتورها که برای گازهای طبیعی و انواع گازهای فیلترشده و غیرخورنده کاربرد دارد می تواند جریانات گاز متوسط تا زیاد را در فشار پایین، متوسط یا بالا اندازه گیری کند. چون این سری دبی سنجها دارای دقت های خیلی زیاد متجاوز از نیازهای استاندارد و حساسیت پایین به اختلالات در جریانات گاز هستند، برای همه انواع کاربردهای مرتبط با توزیع و انتقال گاز بهینه شده اند. در شکل ۲-۶۰ نمونه ای از این سری دبی سنجها نشان داده شده است. از ویژگی های بارز این سری کنتورها می توان به موارد زیر اشاره کرد:

- رفتار عالی در فشارهای بالا
- کمترین افت فشار
- دارای تأییدیه PTB با یک لوله مستقیم ورودی 2 DN، و لوله با اختلالات شدید جریانی خروجی 0 DN
- برآورده کردن همه استانداردهای بین المللی و جاری اروپا
- وجود گزینه های مختلف: نظیر پمپ روغن، فرستنده های پالسی و...
- محدوده جریان کاربرد: از 8 m³/h تا 10000 m³/h
- اتصالات: DN50 to DN500 mm ,Flanging: ISO PN10 to ISO PN110, ANSI150 to ANSI600



شکل ۲-۶۰: دبی سنج های گازی توربینی سری Fluxi 2000/TZ شرکت ACTARIS

• سری MZ

این سری از کنتورها که برای گازهای طبیعی و سایرگازها و انواع گازهای فیلترشده و غیرخورنده کاربرد دارد، می تواند جریانات گاز کم تا متوسط و زیاد را در فشار پایین، متوسط یا بالا اندازه گیری کند. ضمناً با گزینه های اضافی مختلف و مناسبی که همراه با آنها موجود هستند، از جمله پمپ روغن و یک مدل پوشش PTFE این سری از دبی سنجها را برای

کارهای اندازه گیری سنگین مناسب کرده است. سایر مشخصات این سری در ذیل آورده شده است.

- وجود گزینه های مختلف: نظیر پمپ روغن، فرستنده ها و مدلی برای گازهای مهاجم
- محدوده جریان کاربرد از $6 \text{ m}^3/\text{h}$ تا $10000 \text{ m}^3/\text{h}$
- اتصالات: DN50 to DN400 mm ,Flanging: ISO PN10 to ISO PN110, ANSI150 to ANSI600
- دقت اندازه گیری بالا
- دو عدد فرستنده فرکانس پایین که به شکل استاندارد نصب شده است.

همچنین در شکل ۶۱-۲ نمونه ای از این سری دبی سنج ها نشان داده شده است. سایر مشخصات این مدل ها در کاتالوگ های ضمیمه شده این شرکت در CD ضمیمه گزارشات ماهیانه قابل مشاهده است.



شکل ۶۱-۲: دبی سنج های گازی توربینی سری MZ شرکت ACTARIS

۱۶.۳.۲ شرکت i-Meter

نماینده این شرکت هلندی در ایران که محصولاتی در رده های گوناگون دبی سنج و کنتور دارد شرکت صنایع پارا است که در تهران، خیابان سمیه، پلاک ۸، طبقه چهارم واقع شده است. تلفن شرکت فوق الذکر ۸۸۱۴۱۰۰۱-۹ و شماره فاکس آن ۸۸۸۳۸۳۳۳ بوده و در ادامه انواع دبی سنج های آن مورد بحث قرار می گیرد.

- سری iMTM- CT

بنا به ادعای شرکت سازنده، مزیت های این سری کنتورها عبارتند از:

- هزینه‌های تولید پایین‌تر، که این منجر به قیمت نازل‌تر محصول می‌شود
- هزینه پایین‌تر در طراحی ایستگاه این سری به خریدار آینده اجازه می‌دهد تا با یک RMC ساده که در یک بدنه کنتوری یکسان به لحاظ G-rating تقویت می‌گردد، تقاضای گاز را افزایش بدهد. بنابراین از افزایش گران و پیچیده سایز یک کنتور که با کنتورهای مرسوم کار می‌کنند دوری می‌شود.
- تعمیر آسان در محل با جایگزینی یک RMC از پیش کالیبره شده نو با G-rating یکسان یا G-rating دیگر
- کاهش هزینه تعمیر با حذف کردن تنها RMC و برگرداندن آن برای پیاده کردن کامل و برای تعمیر، و بنابراین دوری کردن از این زمان طولانی و غیرقابل قبول زمان تدارک برای تعمیر و اوراق کردن کامل کنتورهای مرسوم
- افزایش زمان عمر با استفاده از یک سیستم روغن که نه تنها روغن را دریاتاقان‌ها و همه قطعات محرک تازه کرده، بلکه همه گرد و خاک‌ها را نیز خارج می‌کند.
- کاهش حساسیت به شرایط سخت گاز با حفاظت بهبود یافته یاتاقان‌های اصلی در برابر گرد و خاک
- مناسب برای ساخت محلی، نصب و تولید مطابق با دستورالعمل‌ها و سطوح کیفی محلی در حالی که هنوز بالاترین قابلیت اعتماد، کارایی و دقت اندازه‌گیری را حفظ می‌کند.

ضمناً شکل ۲-۶۲ نمونه‌ای از این سری دبی‌سنج‌ها را نشان می‌دهد.



شکل ۲-۶۲: دبی‌سنج‌های گازی توربینی سری iMTM-CT شرکت i-Meter

سایر مشخصات این سری در جدول ۲-۱۶ و جدول ۲-۱۷ آورده شده‌است.

جدول ۲-۱۶: سایر مشخصات سری iMTM-CT شرکت i-Meter

Applications:	Media: natural gas, town gas, propane, inert gases. Industry: Gas supply, heating manufacturers, chemical industry
Pressure ratings:	Pressure ratings for PN10/16 and ANSI 150. Various flanges are available on request. (DIN Flanges, ANSI Flanges, JIS Flanges and others)
Nominal diameters:	50 mm (2") to 200 mm (8"). Larger sizes on request.
Measuring range:	20: 1 minimum or better at atmospheric conditions up to 50: 1 at higher densities.
Flow rates:	8 m ³ /h up to 4000 m ³ /h
Repeatability:	better than 0,1 %
Measuring accuracy:	0,2 Q _{max} to Q _{max} : ± 1 % or better Q _{min} to 0,2Q _{max} : ± 2 % or better
Temperature range:	Standard : -25°C to + 60°C On request : -40°C to + 80°C

جدول ۲-۱۷: مشخصات سایزهای مختلف سری iMTM-CT شرکت i-Meter

Pipe Size		G-rating	Measurement Range (m ³ /h) Q _{min} -Q _{max}	Height Frequency (Hz)	Overall Length (mm)	Pressure Rating	Body Material
mm	inch						
50	2"	G40 G65 G100	13-65 10-100 16-160	200-400	150	ANSI 150 DIN PN 10/16	Aluminium GGG40 Carbon Steel
80	3"	G100 G160 G250 G400	16-160 25-250 20-400 32-650	200-300	240	ANSI 150 DIN PN 10/16	Aluminium GGG40 Carbon Steel
100	4"	G160 G250 G400 G650	25-250 20-400 32-650 50-1000	200-300	300	ANSI 150 DIN PN 10/16	Aluminium GGG40 Carbon Steel
150	6"	G400 G650 G1000 G1600	32-650 50-100 80-1600 130-2500	100-200	450	ANSI 150 DIN PN 10/16	Aluminium GGG40 Carbon Steel
200	8"	G650 G1000 G1600 G2500	50-1000 80-1600 130-2500 200-4000	75-150	600	ANSI 150 DIN PN 10/16	Aluminium GGG40 Carbon Steel

۴.۲ گنجاندن بخش دبی سنج توربینی در نرم افزار

در ادامه طراحی نرم افزار انتخاب دبی سنج، تصمیم گرفته شد تا با توجه به اینکه در شبکه گاز شهری استفاده از دبی سنج های گازی توربینی کاربرد زیادی دارد، کارایی نرم افزار ارتقاء داده شود. بدین ترتیب دیتاهای شرکت های مختلف که در گزارش فعالیت های ماهیانه قبل گردآوری شده بود را کدنویسی کرده و به بخش دبی سنج های توربینی این نرم افزار افزودیم. حال نرم افزار را اجرا کرده و وارد صفحه اول نرم افزار (شکل ۲-۶۳) می شویم.



شکل ۲-۶۳: صفحه اول نرم افزار

در این صفحه با کلیک بر دکمه **Input flow meter data** صفحه **Input data** ظاهر می شود (شکل ۲-۶۴). همانطور که در شکل پیداست، در این قسمت اطلاعات مربوط به دما، فشار و دبی و سایر اطلاعات لازمه را در صفحه **Input Data** وارد می کنیم. نمایی از این صفحه در حالتی که در نرم افزار وارد شده را در شکل زیر داریم.

The screenshot shows a software window titled "Input Data" with a blue border. It is divided into three main sections:

- Gas Physical Property:**
 - Gas Type: Clean Gas (dropdown menu)
 - Gas Gravity: 0.6 (text input)
- Gas Flow Specifications:**

	Minimum Bound	Nominal	Maximum Bound
Flow Bound	500	6000	700
Pressure Bound	1	5	7
Temperature Bound	-1	25	50
- Instrument Specifications:**
 - Pipe Size (Inch): 3 (text input)
 - Accuracy of full Scale: 1 % (text input)
 - Rangeability: 16 (text input)
 - Relative Cost: Medium (dropdown menu)

At the bottom of the window, there are two buttons: "<< Main" and "Next >>".

شکل ۲-۶۴: صفحه ورود اطلاعات عملیاتی دبی سنج

با وارد کردن اطلاعات ورودی و زدن دکمه Next کاربر وارد صفحه Flow Meter Type Selection می شود (شکل ۲-۶۵). در این شکل همانطور که با دایره قرمز رنگ مشخص شده، بخش مربوط به دبی سنج توربینی آورده شده است. در این قسمت مانند بقیه دبی سنج ها اگر شرایط داده شده در صفحه Input Data، شامل شرایط عملیاتی دبی سنج مورد نظر باشد دکمه جلوی دبی سنج Yes می شود.

The screenshot shows a software window titled "Flow Meter Type Selection". It contains several panels for selecting flow meter types. The "Turbine Flow Meter" panel has its "Yes" button highlighted with a red circle. Other panels include "Variable Area Flow Meter", "Differential Pressure Flow Meter", "Oscillatory Flow Meter", "Mass Flow Meter", "Positive Displacement Flow Meter", "Ultrasonic Flow Meter", and "Diaphragm Flow Meter". Navigation buttons at the bottom are "<< Back", "<<Start Choose Flow Meter>>", and "Exit".

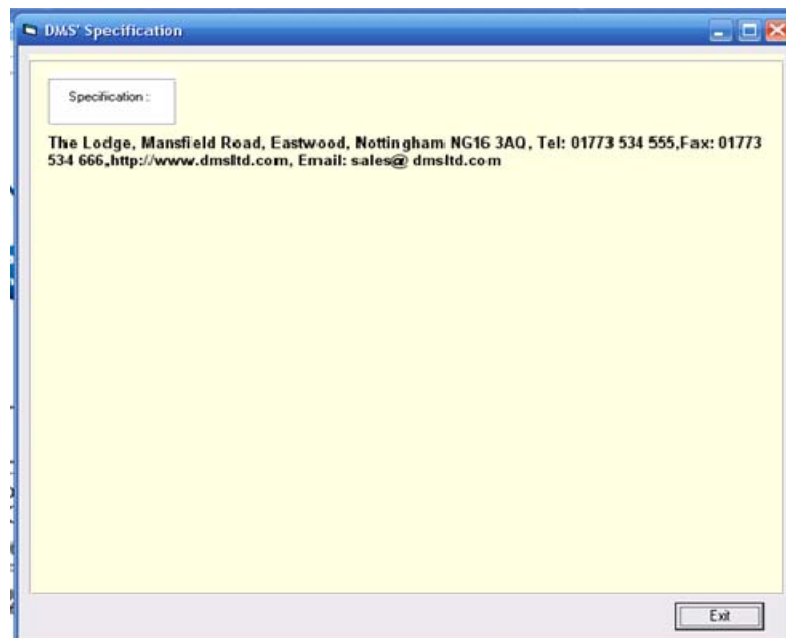
شکل ۲-۶۵: صفحه Flow Meter Type Selection

حال در این قسمت اگر کاربر بخواهد با توجه به شرایط عملیاتی مورد نظرش دبی سنج مناسب را از شرکت‌های مختلف پیدا کند، دکمه Yes که جلوی کاربر نمایان شده را می‌فشارد. با زدن دکمه Yes (در شکل ۲-۶۵) با دایره قرمز رنگ مشخص شده‌است) کاربر وارد صفحه Turbine Flow Meter می‌شود (شکل ۲-۶۶).



شکل ۲-۶۶: صفحه مربوط به شرکت های مختلف دارای دبی سنج های توربینی

همانطور که در شکل پیداست، برخی از شرکت هایی که توانسته بودیم اطلاعاتشان را گردآوری کنیم، دیده می شود. در این صفحه با فشردن روی آرم هر شرکت، اطلاعات دسترسی به آنها آورده می شود (شکل ۲-۶۷).

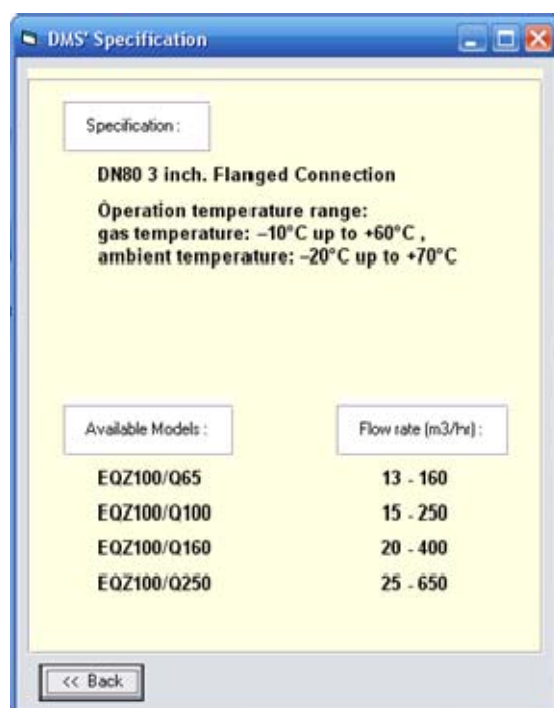


شکل ۲-۶۷: صفحه مربوط به اطلاعات دسترسی به شرکت مختلف دارای دبی سنج های توربینی

ضمناً مدل‌های مختلف دبی‌سنج‌های توربینی آنها با کلیک روی دکمه Models آنها توسط نرم‌افزار ظاهر می‌شود. برای مثال کلیه مدل‌های ارائه شده توسط شرکت DMS در شکل ۶۸-۲ پیداست، و در روبروی مدل‌های پذیرفته شده توسط نرم‌افزار، دکمه OK ظاهر می‌شود. با فشردن دکمه OK ظاهر شده، دیگر خصوصیات دبی‌سنج انتخاب شده آورده می‌شود (شکل ۶۹-۲).



شکل ۶۸-۲: مدل‌های ارائه شده توسط شرکت DMS



شکل ۶۹-۲: خصوصیات دبی‌سنج انتخاب شده EQZ شرکت DMS

۵.۲ بخش تصحیحات اعمال شده به نرم افزار

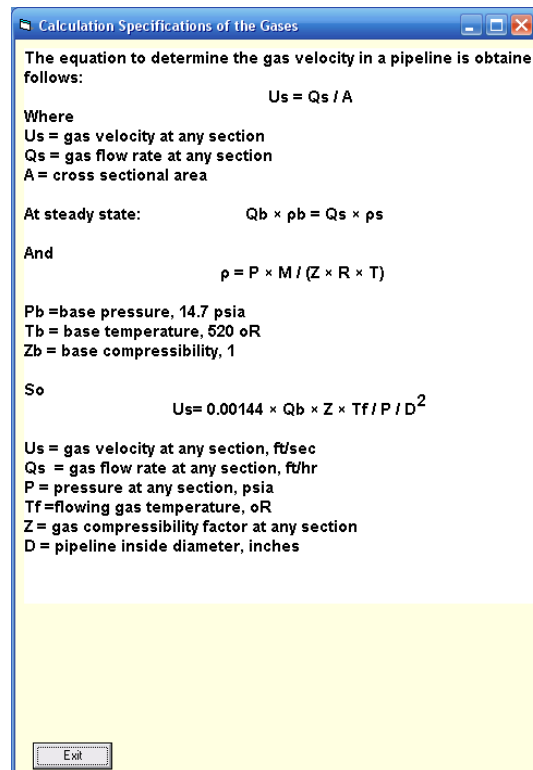
از آنجایی که بایستی در این نرم افزار به دنبال ایجاد خصوصیات جدیدی بود. در این بخش درحدامکان اشکالات موجود بررسی خواهد شد.

اولین اصلاح انجام شده در شکل ظاهری صفحه اول نرم افزار بود که فرمت نهائی این صفحه در شکل ۷۰-۲ آورده شده است.



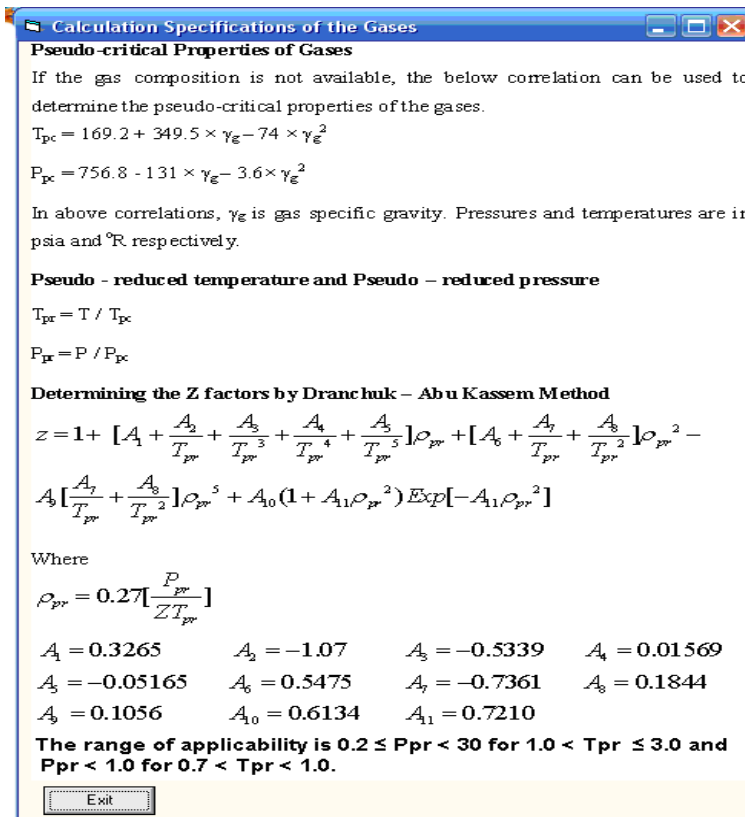
شکل ۷۰-۲: فرمت نهائی صفحه ابتدایی نرم افزار

همان طور که مشاهده می شود روش تعیین سرعت گاز در یک خط لوله که به کنتور متصل خواهد شد در نرم افزار گنجانده شده است. بدین ترتیب که پس از کلیک روی آیکون مربوطه در صفحه اول نرم افزار، کاربر وارد صفحه جدیدی مطابق با شکل ۷۱-۲ می گردد. سرعت گاز در هر بخش لوله نسبت دبی جریان به سطح مقطع عبوری است. در این صفحه مقدار سرعت گاز در حالت استاندارد با توجه به روابط حالت پایا قابل تبدیل به سرعت در شرایط عملیاتی می باشد. در رابطه ساده شده انتهای صفحه، سرعت واقعی گاز بر اساس دبی حالت استاندارد خط لوله، دما و فشار عملیاتی، قطر خط لوله و ضریب تراکم پذیری گاز محاسبه می شود.



شکل ۲-۷۱: صفحه نحوه محاسبه سرعت گاز در لوله اتصالی به کتور

همچنین آیکون نحوه محاسبه دمای بحرانی (TPC)، فشار بحرانی (PPC)، دمای کاهش یافته (TPR)، فشارکاهش یافته (PPR)، و ضریب تراکم پذیری گاز (Z) در صفحه اول نرم افزار اضافه گردید. این صفحه در شکل ۲-۷۲ آورده شده است. بدین ترتیب که با دانستن مقدار دانسیته نسبی یک گاز با روابط ارائه شده، ابتدا مقدار دمای بحرانی و فشار بحرانی گاز محاسبه می شود سپس با دانستن مقدار دما و فشار عملیاتی، عباراتی تحت عنوان دمای کاهش یافته و فشار کاهش یافته محاسبه می گردد. بعد از این مرحله با استفاده از معادله و ضرایب ثابت ارائه شده مقدار و ضریب تراکم پذیری گاز بدست خواهد آمد. در انتهای صفحه محدوده کاربرد معادله ارائه شده نشان داده شده است که باید به این نکته توجه شود.



شکل ۲-۷۲: صفحه نحوه محاسبه ضریب تراکم پذیری گاز

از جمله اشکالاتی دیگری که در ارائه به شرکت گاز استان توجه داده شد، حذف پارامتر هزینه از معیارهای انتخاب دبی سنج بود. در نتیجه آیکون تعیین هزینه نسبی (Relative cost) در صفحه ورود اطلاعات حذف گردید و اما خصوصیت دیگری که به نرم افزار اضافه شد، تعیین شدن اتوماتیکی میزان سرعت جریان گاز در دبی سنج است. که این پارامتر با کوچک ترین تغییر در دانسیته نسبی، دبی، فشار، دما و قطر لوله متصل به دبی سنج دائما در صفحه Input data قابل مشاهده توسط کاربر می باشد.

مشکل دیگر نرم افزار که در حال حاضر برطرف شده است، تعیین محدوده اندازه گیری (Rangeability) پس از وارد کردن بیشترین و کمترین دبی قابل اندازه گیری بطور اتوماتیک توسط نرم افزار است؛ اما از آنجایی که مقدار دبی ماکزیمم کنتور تابع دبی اسمی کنتور است، با فرض عملکرد کنتور در ۸۰ درصد ظرفیتش (طبق درخواست شرکت گاز استان) مقدار دبی ماکزیمم بدست می آید. از طرف دیگر با وارد کردن دبی حداقل کنتور توسط کاربر که همچون دبی اسمی بر اساس شرایط استاندارد است، نرم افزار اقدام به محاسبه محدوده اندازه گیری فشار بالا (Rangeability(MHP)) می کند که در شرایط فشار وارد شده توسط کاربر است. اما از آنجایی که غالباً این فشار مقدار بالایی دارد، محدوده اندازه گیری تعیین شده بسیار بالاتر از شرایط فشار پایین

است که از آن برای محاسبه G-rate کنتور استفاده می کنند. پس بدین ترتیب محدوده اندازه گیری فشارپایین (Rangeability (MLP)) که نسبت محدوده اندازه گیری فشاربالا به مجذور حاصل ضرب دانسیته نسبی در فشارگاز است، در نرم افزار دیده شد. فشار گاز برحسب بار در اینجا اعمال می شود. از دیگر اصلاحات انجام شده در صفحه ورود اطلاعات کاربر، امکان مشاهده دبی اسمی و دبی حداکثر در شرایط غیر استاندارد است که این امکان نیز ایجاد شده است. برای تبدیل بین شرایط استاندارد و غیراستاندارد دبی حداکثر و اسمی، از ضریب کلی کنتور استفاده شده است که مقدار آن توسط نرم افزار در شرایط دمایی، فشار و دانسیته ای مختلف گاز تغییر می کند و توسط کاربر قابل مشاهده است. ضمناً ضریب فشاری (FP) (نسبت فشار عملیاتی بر حسب psia به فشار استاندارد ۱۴.۷ psia)، ضریب دمایی (FT) (نسبت دمای استاندارد ۵۲۰R به دمای عملیاتی بر حسب R) و عکس ضریب تراکم پذیری (1/Z) نیز مشاهده می شود.

دیگر خصوصیتی که به نرم افزار اضافه شد، مقدار دبی حداقل کنتور در شرایط غیراستاندارد می باشد. این مقدار از تصحیح مقدار دبی حداقل کنتور در شرایط استاندارد با ضرب در ضریب کلی کنتور و مجذور حاصل ضرب دانسیته نسبی در فشارگاز بدست می آید. در اینجا نیز فشار گاز برحسب بار اعمال می شود.

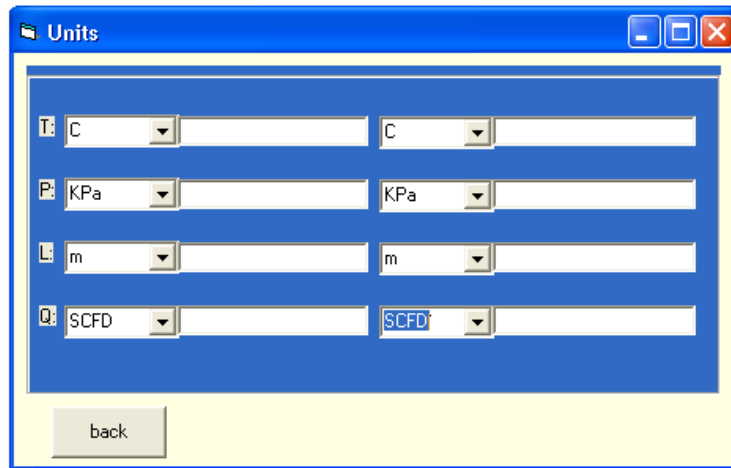
ضمناً برای راحتی کاربران امکان اعمال مقدار فشار محیطی و انجام تبدیل واحدها در صفحه ورود اطلاعات قرار داده شده است. فرمت جدید صفحه ورود اطلاعات (Input data) در شکل ۲-۷۳ آورده شده است. صفحه تبدیل واحد نیز در شکل ۲-۷۴ نشان داده شده است.

The screenshot shows the 'Input Data' window with the following fields and values:

Gas Physical Property		Instrument Specifications		Tpc (R)		Tpr	
Gas Type	Clean Gas	Pipe Size (Inch)	3	352.26	1.48	Ppc (Psia)	676.9
Gas Gravity	0.6	Accuracy of full Scale	1 %	Z (Compressibility)	0.961	Ppr	0.39
Environmental Pressure		14.615		Fp	18.006	Ft	1
Gas Flow Specifications		1 / Z (Compressibility factor)		1.0406		Total factor of meter	
Flow Bound	SCMh	Minimum Bound	73.62	Nominal	3747.4	Maximum Bound	4684.25
Pressure Bound	Psig	0.25	250	300	Q actual (CMh)	200.004	
Temperature Bound	F	-1	60	70	Q Min (CMh)	13	
				Q Max (CMh)			250
				Rangeability (MHP)			63.63
				Rangeability (MLP)			19.23
				Gas Velocity			39.993

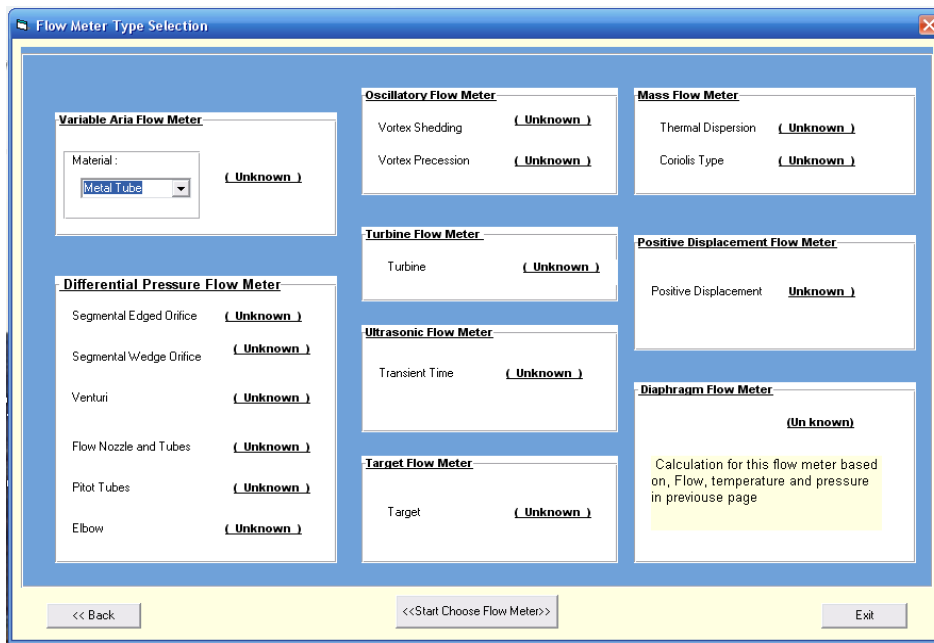
Navigation buttons: << Main, Next >>, Units

شکل ۲-۷۳: صفحه جدید ورود اطلاعات



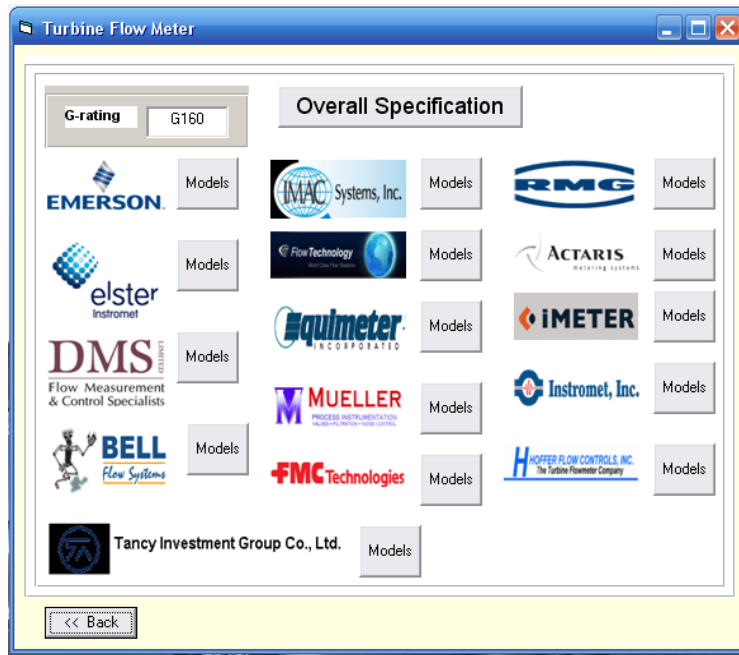
شکل ۲-۷۴: صفحه تبدیل واحد نرم افزار

از دیگر تصحیحات اعمال شده، قراردادن حالت پیش فرض Material کنتورهای Variable area در حالت Metal tube است که در شکل ۲-۷۵ این تغییر قابل مشاهده می باشد.



شکل ۲-۷۵: صفحه جدید انتخاب نوع کنتور

ضمناً با جمع آوری اطلاعات شرکت های سازنده دیگر دبی سنج های توربینی به تکمیل نرم افزار پرداخته شده است. بطوریکه صفحه مربوط به شرکت های سازنده دبی سنج های توربینی به شکل زیر در آمد. همان گونه که در شکل ۲-۷۶ ملاحظه می شود امکان پیشنهاد اندازه کنتور توربینی مناسب توسط نرم افزار به کاربر داده شده است. قابل ذکر است که سایز ذکر شده مطابق با جدول ۲-۱۸ براساس استاندارد PTB اروپا آورده شده است.



شکل ۲-۷۶: شکل جدید صفحه شرکت های سازنده دبی سنج های توربینی

۶.۲ کلیات نرم افزار انتخاب کنتور

در این بخش به منظور جمع بندی کلیه مواردی که تاکنون برای تدوین نرم افزار استفاده شده است قابلیت های فعلی نرم افزار تشریح می شود. این نرم افزار در حال حاضر قابلیت انتخاب انواع کنتورهای دیافراگمی و توربینی مورد استفاده در صنایع گازرسانی را دارا می باشد. در این نرم افزار برای آشنایی ابتدایی کاربران توضیح کلی از کاربردهای انواع دبی سنج ها و شماتیک آنها آورده شده است. همچنین این نرم افزار می تواند بر اساس خصوصیات مورد نظر کاربر، نوع کنتور مناسب را پیشنهاد دهد. این خصوصیات که همگی توسط کاربر بایستی در ابتدا به نرم افزار داده شود شامل موارد زیر می باشد:

- خصوصیات گاز
- فشار محیطی
- شرایط عملیاتی کنتور یعنی دبی، دما و فشار اسمی
- دقت اندازه گیری
- سایز خطلوله ای که قرار است کنتور روی آن نصب گردد

در این نرم افزار بعد از وارد کردن اطلاعات اولیه لازم امکان مشاهده پارامترهای مختلفی مثل سرعت جریان گاز عبوری در واحدهای مختلف، دبی اسمی، دبی حداقل و دبی حداکثر کنتور در

شرایط غیراستاندارد، ضریب فشاری (FP)، ضریب دمایی (FT) و ضریب تراکم پذیری (1/Z)، خصوصیات مختلف گاز مورد نظر مثل دمای بحرانی، فشار بحرانی، دمای کاهش یافته، فشار کاهش یافته و ضریب تراکم پذیری آن و همچنین محدوده جریان فشار بالا و فشار پایین وجود دارد.

جدول ۲-۱۸: مشخصات سایزهای مختلف کتورهای توربینی

G-rating	Pipe Size	Qmax (m3/h)	Qmin(m3/h) ,B=30	Qmin(m3/h) ,B=20	Qmin(m3/h) ,B=10	Qmin(m3/h) ,B=5
G 16	2"	25	-	-	-	5
G 25	2"	40	-	-	-	8
G 40	2"	65	-	-	6	13
G 65	2"	100	-	5	10	20
G 100	3"	160	-	8	16	32
G 160	3"	250	8	13	25	50
G 160	4"	250	-	13	25	50
G 250	3"	400	13	20	40	80
G 250	4"	400	-	20	40	80
G 250	6"	400	-	20	40	80
G 400	4"	650	20	32	65	130
G 400	6"	650	-	32	65	130
G 400	8"	650	-	32	65	130
G 650	6"	1000	32	50	100	200
G 650	8"	1000	32	50	100	200
G 1000	6"	1600	50	80	160	320
G 1000	8"	1600	-	80	160	320
G 1000	10"	1600	-	80	160	320
G 1600	8"	2500	80	130	250	500
G 1600	10"	2500	80	130	250	500
G 2500	10"	4000	130	200	400	800
G 2500	12"	4000	-	200	400	800
G 4000	12"	6500	200	320	650	1300
G 4000	16"	6500	-	320	650	1300
G 6500	16"	10000	320	500	1000	2000
G 6500	20"	10000	-	500	1000	2000
G 10000	20"	16000	-	800	1600	3200
G 10000	24"	16000	-	800	1600	3200
G 16000	24"	25000	-	1300	2500	5000

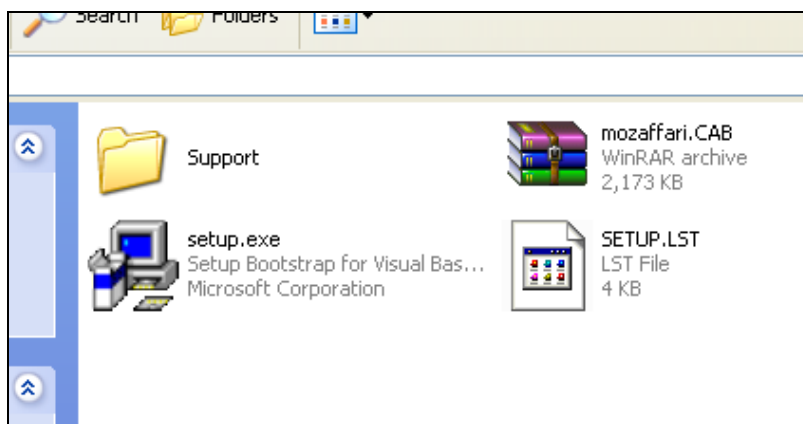
بعد از انتخاب کتور مناسب توسط نرم افزار امکان مشاهده خصوصیات کلی کتور مناسب، سایز مطلوب و شرکت های سازنده این نوع کتورها در برنامه وجود دارد. شایان ذکر است که اطلاعات شرکت های متعدد تولیدکننده های کتورهای توربینی و دیافراگمی که مورد نیاز شرکت گاز استان می باشند، در نرم افزار گنجانده شده است. بدین ترتیب کاربر می تواند ضمن مشاهده انواع مدل های شرکت های مختلف، مدل مناسبی را که توسط نرم افزار پیشنهاد می شود و همچنین خصوصیات این مدل ها را ملاحظه کند. علاوه بر آن، امکانات جانبی دیگری نظیر تبدیل واحد پارامترهای مختلف در نرم افزار گنجانده شده است.

۷.۲ نصب نرم افزار انتخاب دبی سنج

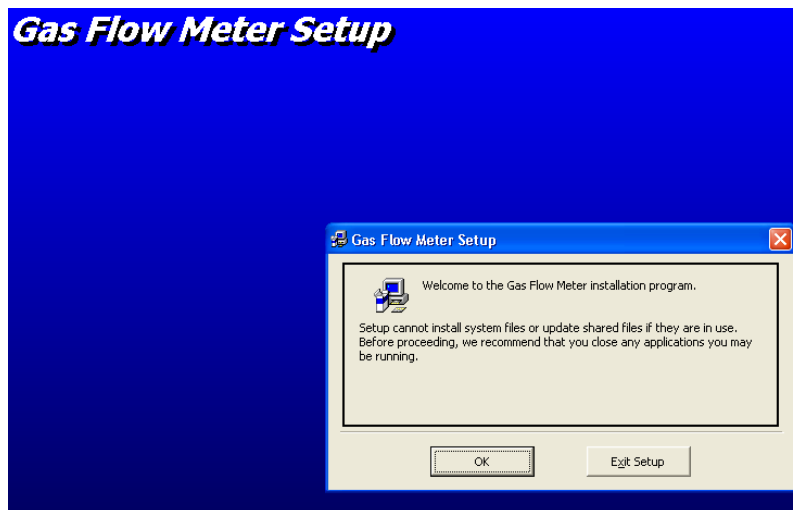
برای استفاده از این نرم افزار، در ابتدا بایستی این نرم افزار مانند هر نرم افزار دیگر نصب گردد. فایل حاوی نصب نرم افزار همراه گزارش می باشد.

۱.۷.۲ راهنمای نصب

فایل حاوی بسته نرم افزار شامل یک فایل با اسم Setup می باشد. با کلیک بر روی این فایل (شکل ۲-۷۷)، صفحه جدیدی نمایان می شود (شکل ۲-۷۸) که در این مرحله بر روی دکمه OK کلیک می شود.

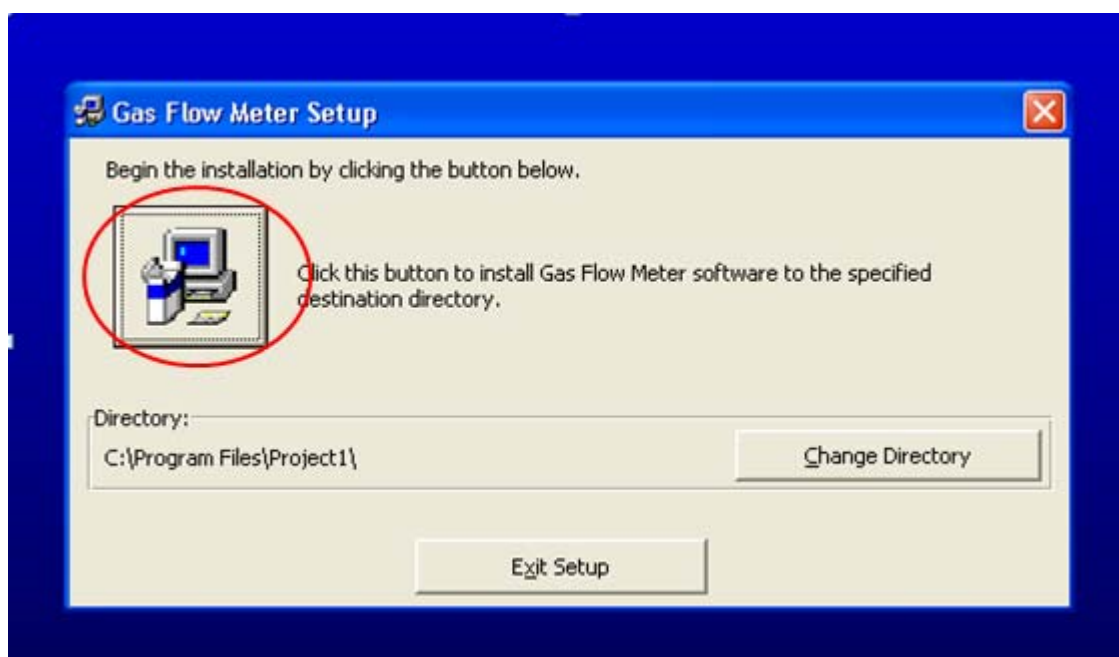


شکل ۲-۷۷: فایل های موجود در بسته نرم افزاری



شکل ۲-۷۸: صفحه اول مربوط به نصب نرم افزار

در مرحله بعد با کلیک بر روی دکمه OK صفحه جدیدی نمایان می شود که در آن از کاربر مسیری را که نرم افزار می خواهد نصب شود پرسیده می شود (شکل ۲-۷۹).



شکل ۲-۷۹: صفحه اعلام مسیری که نرم افزار قرار است در آن نصب گردد.

همانطور که در شکل بالا نمایان می‌باشد، با کلیک بر روی قسمتی که در شکل ۲-۷۹ با دایره قرمز مشخص شده، نرم افزار شروع به نصب می‌کند تا پیغام نصب با موفقیت ظاهر شود (شکل ۲-۸۰).



شکل ۲-۸۰: صفحه اعلام نصب با موفقیت نرم افزار

۸.۲ منابع

[۱] گزارش ماهیانه فعالیت‌های انجام شده در اردیبهشت ماه ۱۳۸۷، KHGCRO MR 1387-01، دفتر پژوهش شرکت گاز استان خوزستان، خردادماه ۱۳۸۷

- [۲] گزارش ماهیانه فعالیت‌های انجام شده در مردادماه ۱۳۸۷، KHGCRO MR 1387-04، دفتر پژوهش شرکت گاز استان خوزستان، شهریورماه ۱۳۸۷
- [۳] گزارش ماهیانه فعالیت‌های انجام شده در شهریورماه ۱۳۸۷، KHGCRO MR 1387-05، دفتر پژوهش شرکت گاز استان خوزستان، مهرماه ۱۳۸۷
- [۴] گزارش ماهیانه فعالیت‌های انجام شده در مهرماه ۱۳۸۷، KHGCRO MR 1387-06، دفتر پژوهش شرکت گاز استان خوزستان، آبان‌ماه ۱۳۸۷
- [۵] گزارش ماهیانه فعالیت‌های انجام شده در آبان‌ماه ۱۳۸۷، KHGCRO MR 1387-07، دفتر پژوهش شرکت گاز استان خوزستان، آذرماه ۱۳۸۷

۳ ایستگاه‌های تقلیل فشار و اندازه‌گیری

ایستگاه‌های گاز با اهداف متفاوتی ساخته می‌شوند. دسته‌بندی این ایستگاه‌ها با توجه به کاربرد آنها مشتمل بر موارد ذیل است.

- ایستگاه‌های تقلیل فشار شهری CGS

فشار گاز را از ۱۰۰۰ Psi تا حد فشار گاز ورودی به شهر (معمولاً ۲۵۰ Psi) پایین می‌آورند.

- ایستگاه‌های تقلیل فشار ناحیه‌ای TBS

فشار گاز را از فشار گاز ورودی به شهر (معمولاً ۲۵۰ Psi) به میزان قابل عبور در لوله‌کشی گاز شهری پایین می‌آورند.

- ایستگاه‌های تقلیل فشار CGS/TBS

فشار گاز را از ۱۰۰۰ Psi به میزان قابل عبور در لوله‌کشی گاز شهری پایین می‌آورند. این ایستگاه‌ها عموماً در ظرفیت‌های پایین و برای استفاده در روستاها به کار می‌روند.

- ایستگاه‌های اندازه‌گیری جریان گاز METERING

در یک فشار مشخص، دبی گاز را در دما و فشارکاری و محیط اندازه‌گیری می‌کنند.

- ایستگاه‌های فیلتراسیون

جهت تصفیه گاز ورودی به یک سیستم به کار می‌رود و در ورودی سیستم نصب می‌گردند.

همچنین بر اساس نوع استقرار، تقسیم‌بندی ذیل برای ایستگاه‌ها وجود دارد:

- ایستگاه‌های کابینتی

- ایستگاه‌های مسطح

- ایستگاه‌های زیرزمینی

اجزای اصلی ایستگاه‌های تقلیل فشار اعم از CGS، TBS و CGS/TBS با توجه به هدف مشترک آنها در کاهش فشار مشتمل بر موارد ذیل می‌باشد.

۱. شیرها اعم از توپی، اطمینان، مخروطی و شیر قطع

۲. فیلتر گاز خشک

۳. رگولاتور

۴. دبی‌سنج گاز

شایان ذکر است که CGSها علاوه بر موارد فوق دارای دستگاه بودهی به گاز نیز می‌باشند. بخش اصلی ایستگاه‌های اندازه‌گیری، دبی‌سنج گاز همراه با شیر آلات مربوطه بوده و بخش اصلی فیلتراسیون نیز فیلتر و تجهیزات مرتبط با آن می‌باشد.

در این ایستگاه‌ها محدوده‌ی دبی ورودی از ۴۰۰ تا ۲،۰۰۰،۰۰۰ متر مکعب استاندارد بر ساعت بوده و محدوده‌ی فشار ورودی بین ۱۵۰ تا ۱۴۰۰ پوند بر اینچ مربع و فشار خروجی بین ۶۰ تا ۲۵۰ پوند بر اینچ مربع می‌باشد. با توجه به اهمیت ایمنی و رعایت مسائل استاندارد در کلیه‌ی صنایع وابسته به نفت و گاز، ایستگاه‌های گازی اعم از تقلیل، اندازه‌گیری و فیلتراسیون نیز از این قاعده مستثنی نبوده و هر یک از این ایستگاه‌ها استانداردهای مرتبط به خود را دارا می‌باشند. در این استانداردها با توجه به محدوده‌ی فشار و دبی کاری، تجهیزات قابل استفاده در هر یک از موارد فوق معرفی شده‌است.

یقیناً تک‌تک اجزای یک ایستگاه، اعم از فیلترها، هیترها(گرم‌کن)، شیرهای کنترلی، دبی‌سنج‌ها، رگولاتورها، بودارکننده و لوله‌کشی و بنا کردن یک ایستگاه و بالطبع طراحی آن شامل استانداردهای خاص خود می‌باشد و بدون بررسی این اجزا عملاً غیر ممکن است. بدین ترتیب مباحثی که در این فصل بدان پرداخته می‌شود مشتمل بر موارد ذیل است.

- تعاریف، ملاحظات و استانداردها کلی در زمینه‌ی طراحی ایستگاه‌های تقلیل فشار و

- ایستگاه‌های اندازه‌گیری

- استانداردهای اجزای داخلی ایستگاه‌ها

- ایستگاه‌های کابینتی

- ایستگاه‌های زیرزمینی

- استانداردهای طراحی ایستگاه‌های اندازه‌گیری آلتراسونیک

شایان ذکر است آنچه که در این فصل به آن پرداخته شده‌است مواردی می‌باشد که با جستجوهای فراوان اینترنتی پیدا شده و در بخش مراجع این فصل به آنها اشاره شده‌است.

۱.۳ استانداردهای کلی ایستگاه‌های تقلیل فشار و اندازه‌گیری

جهت طراحی، نصب، نگهداری و تعمیر اجزای مختلف یک شبکه تولید و انتقال گاز طبیعی نیاز به رعایت یکسری استاندارد می‌باشد تا بتوان طبق آن استانداردها از سوی شرکت سازنده و برای مشتری یا خریدار آن قطعات و تجهیزات در تمامی مراحل فوق (از طراحی تا تعمیر) اقدام نمود. در ادامه به برخی از این استانداردها که در مورد ایستگاه‌های تقلیل فشار و اندازه‌گیری می‌باشد، اشاره خواهد شد.

۱.۱.۳ معیار عملکرد در استانداردهای ایستگاه تقلیل فشار

جهت مکان‌دهی و مشخص کردن کامل ایستگاه‌های تقلیل فشار و ایستگاه‌های اندازه‌گیری، سندسازی و انجام فرایندهای مربوط به مونتاژ تجهیزات و تأسیسات ایستگاهی، یکسری استاندارد به شرح زیر وجود دارد:

- تعیین مکان و تفسیر فرایندهای شرکتی برای مونتاژ و نصب ایستگاه‌های تقلیل فشار استاندارد، رگولاتورها، وسایل اندازه‌گیری و تجهیزات جانبی در جهت و در ارتباط با نیازهای خاص صنعتی.
- محدوده: نصب، مجوز، اطلاعات تولیدکننده، گواهی‌نامه انجام تست، مقررات کارکرد تجهیزات، فرآیندهای ایمن، فرآیندهای کار.
- محدود کردن مقررات و دستورالعمل‌های کاری طبق فرایندهای شرکت.
- تعیین خطرهای امنیتی، محیطی و بالقوه در ارتباط با پروسه‌های شرکتی.
- تعیین و تشریح تجهیزات و مواد برای عیب‌یابی و اشکالات در عملکرد درست در رابطه با تجهیزات ایستگاه‌های تقلیل فشار و اندازه‌گیری و بر حسب نوع و تابع عملکرد.

محدوده: شیرآلات، لوله‌ها، فیلترها، محافظ لوله‌ها، رگولاتورها، اندازه‌گیرها، گسکیت‌ها، پیچ‌ها، گیج‌ها (شاخص‌ها)، نقاط ارزیابی^۳، رنگ‌کاری، تجهیزات تست، ابزارآلات و فیت‌کننده‌ها.

- تشریح تجهیزات بر اساس خطرهای بالقوه‌ی کاربرد نادرست و یا عملکرد ناصحیح، و تشریح اینکه چگونه از آنها بر اساس فرآیندهای کارخانه‌ای پیش‌گیری کنیم.
 - تعیین تجهیزات اساسی طبق فرآیندهای کارخانه.
- محدوده: واحد صنعتی، ابزارآلات، مواد، مستندسازی، پرسنل، تجهیزات ارتباطی.

۲.۱.۳ آماده ساختن سایت برای نصب ایستگاه‌های استاندارد

این جزء شامل قسمت‌های زیر می‌شود:

- تعیین خطرهای ایمنی، جداسازی، حذف و یا حداقل کاهش آنها در فرآیندهای مربوط
- محدوده: موانع ترددی موجود، تجهیزات محافظتی شخصی، خروجی‌ها و راه‌های عبور، محیط‌های فرار گاز و تخلیه‌ای، آتش، انفجار، خفگی، کنترل ترافیک موقت، محافظ محیطی و وسایل و امور کاوش و حفاری.
- آماده ساختن، مدیریت و موقعیت دادن به تجهیزات نصبی و مواد طبق دستورالعمل سازنده.

۳.۱.۳ مونتاژ و نصب استاندارد ایستگاه‌ها

این جزء شامل قسمت‌های زیر می‌شود:

- سوار نمودن و نصب استاندارد ایستگاه‌های تقلیل فشار و اندازه‌گیری و وسایل جانبی مطابق با دستورالعمل سازنده.
- محدوده: روغن‌کاری، کالیبراسیون، تنظیمات شیر اطمینان، فیلترها، خوردگی و دیگر مشخصات سایت.
- استفاده تجهیزات نصبی مطابق با کاتالوگ سازنده
 - تنظیم و تأیید قطعات و اجزا مطابق دستورالعمل سازنده
 - مونتاژ و نصب

³ Test points

۴.۱.۳ تشکیل کمیسیون و تست یک ایستگاه تقلیل فشار گاز و اندازه‌گیری

این جزء شامل قسمت‌های زیر می‌شود:

- تخلیه کامل ایستگاه مطابق با دستورالعمل سازنده و فرایند شرکت و بر اساس نیاز محدوده: بخارات زائد، شیرهای اطمینان، رگولاتورها، وسایل اندازه‌گیری، تنظیمات فشار، رباطها و تست‌کننده‌ها.
- تست کردن ایستگاه‌های تقلیل فشار و اندازه‌گیری بر حسب نیاز و مطابق با دستورالعمل سازنده.
- محدوده: بخارات زائد، شیرهای اطمینان، رگولاتورها، وسایل اندازه‌گیری، تنظیمات فشار، رباطها و تست‌کننده‌ها.

۵.۱.۳ تجدید بنای سایت

این جزء به منظور تدوین استاندارد در زمینه تجدید بنای یک سایت گازی بوده و شامل قسمت‌های زیر است:

- ذخیره کردن تجهیزات و مواد در مکانی امن و مطمئن بلافاصله پس از اقدام یا منظم و مرتب کردن آنها طبق دستور سازنده.
- برداشتن ابزارآلات، تجهیزات و مواد از داخل سایت بر اساس نیاز فرآیندی.
- دوباره برپا کردن و ایمن‌سازی سایت کاری.

۶.۱.۳ تدوین یک گزارش کامل و مستند سازی

- ارتباط‌دهی اطلاعات به دیگر قسمت‌های داخلی و خارجی مطابق نیاز موجود.
- فرآیندسازی و کامل کردن وقایع به همراه مستندسازی طبق دستورالعمل شرکت.

۷.۱.۳ موقعیت ایستگاه‌ها

ایستگاه‌ها بایستی برپایه خواصی بنا شوند که دارای جواز و لیسانس مربوط هستند. از طرفی در انتخاب موقعیت سایت یک ایستگاه موارد ذیل باید در نظر گرفته شوند:

- سازگاری ساختار و عملکرد ایستگاه با لازمه‌ها و نیازهای معلوم و موجود طراحی آتی.

- کمپنه بودن ضربه صدایی و دیگر انتشارات امواج از سایت روی همسایگان موجود یا آتی ایستگاه صرفنظر از مقررات محدودیت برای محیط مسکونی همجوار.
- مشارکت و بکارگیری خصوصیات و موارد طبیعی (مثل گل و گیاه) با یا بدون در نظر گرفتن چشم‌اندازهای ساختمانی در طراحی جهت کاهش ضربات و آسیب‌های زیست‌محیطی و آلودگی‌های صوتی روی همسایگان ایستگاه و نیز زیباسازی ایستگاه
- مقرر کردن دسترسی مداوم به سایت
- کاهش تهدیدات و تداخلات خارجی مانند برخورد خودرو به سایت به هر نحو ممکن.
- اختصاص احتمال خطر برای همسایگان سایت در مورد آتش یا آزادسازی سیالات.
- مناسب بودن وضعیت ارتباطات صدایی و داده‌ای در محوطه ایستگاه (دیتا و صوتی مخابراتی)

۸.۱.۳ طرح اولیه ایستگاه

برای جلوگیری از خطر انتشار و شیوع آتش، بایستی فواصل ممیزی مناسبی از لوله‌کشی و تجهیزات ایستگاه تا ساختمان‌های مجاور، درختکاری و حاشیه جاده‌های اطراف در نظر گرفته شوند. به منظور جلوگیری از انتشار و ارتباط آتش به بیرون این حصارها، فاصله‌ای حداقل به اندازه ۱۵ متر باید بین حصارکشی و ساختمان ایستگاه پمپ یا کمپرسور پیش‌بینی گردد. بهمین منظور باید حداقل فاصله‌ی ۱۵ متری بین حصار و محل نصب شیرهای رگولاتوری، آزادکننده و قطع جریان در نظر گرفته شود. هیچ گونه مواد قابل اشتعالی در فاصله ۱۰ متری از ایستگاه‌ها و بناهای مربوط به پمپ و کمپرسور یا ایستگاه‌های تقلیل فشار و اندازه‌گیر نبایستی حضور داشته باشند. همچنین فضای باز کافی (حداقل ۴ متر بین تجهیزات ایستگاهی) برای جابجایی وسایل اطفاء حریق بایستی در نظر گرفته شوند.

۹.۱.۳ دیگر فرضیات

دیگر فرضیات به صورت مجموعه زیر برای هر ایستگاه در نظر گرفته شوند:

- فاصله بین ادوات و تجهیزات
- امنیت و ایمنی
- کنترل آلودگی ایجاد شده توسط ایستگاه
- کنترل صوت و سر و صدا

- هواکش و فاضلاب
- دفع و تجزیه مایعات

۲.۳ استانداردهای ایمنی ایستگاه‌ها

جهت ایجاد و حفظ ایمنی در یک ایستگاه نکات و موارد ذیل لازم‌الاجرا هستند:

۱.۲.۳ محیط‌های پرخطر

حوزه محیط‌های پرخطر برای هر سایت ایستگاهی باید مطابق استانداردهای AS2430.1 و AS2430.3 تعیین شوند بگونه‌ای که هیچ خطری برای عموم در آنسوی حصار ایستگاه باقی نماند (مگر اینکه از حضور عموم در سطوح و محیط‌هایی فراتر از حصار با اخذ تأییدیه جلوگیری شود).

۲.۲.۳ محافظت پرسنل

یکی دیگر از موارد محافظتی که در طراحی ایستگاه باید رعایت گردد، محافظت پرسنل و بازدیدکننده سایت از هرگونه خطر است. این محافظت می‌بایست با ترکیب طرح اولیه، ایزولاسیون مناسب، گارد، تجهیزات ایمنی مؤثر و طراحی مناسب ساختمانی ایجاد گردد. هنگامیکه ایمنی کامل با استفاده از تجهیزات امکانپذیر نباشد، وسایل محافظتی پرسنل باید در تعداد مناسب و در کیفیتی خوب فراهم و در اختیارشان قرار گیرد.

۳.۲.۳ محافظت در برابر آتش

موارد ذیل بایستی برای محافظت در برابر آتش مد نظر واقع شوند:

- تهیه و نصب تجهیزات اطفای حریق مناسب، پیشرفته و به روز
 - ایجاد سیستم‌های تشخیص دود، گاز و آتش در ساختمان‌های محل تجمع گاز و بخارات گازی و نیز در ساختمان‌های پمپ و کمپرسور.
- کلیه این سیستم‌ها باید با شروع به کار ایستگاه فعال شده و شامل هشداردهنده‌های (آلارم‌های) محلی یا کنترل از راه دور (ریموت)، خاموش‌کن اتوماتیک، اطفاء خودکار، سیستم کاهش فشار اضطراری و سیستم خاموشی اضطراری (ESD)^۴ باشند؛ تا هنگامیکه شرایط ایمن به ایستگاه به طور کامل بازنگشته است راه‌اندازی ایستگاه مقدور نباشد.

⁴ Emergency Shut Down (ESD) system

- وجود سیستم‌های تأمین قدرت برای زمان‌هایی که منبع تأمین توان ایستگاه به هر دلیل اضطراری‌ای از مدار خارج گشته است.
- عایق‌کاری یا حتی‌المقدور خنک‌کاری سطوح داغ کمپرسورها و ماشین‌ها جهت جلوگیری از آتش گرفتن گاز، بخارات و مواد قابل اشتعالی که یا وجود دارند یا جهت جلوگیری از بالاروی قدرت انفجار مخلوط‌های گازی تخلیه می‌گردند.
- کنترل گیاه‌کاری و رشد و نمو گل و گیاه که بعنوان یک خطر آتش‌سوزی به حساب نیایند.
- کنترل مایعات قابل اشتعال

۴.۲.۳ خطر رعد و برق و اتصال زمین^۵ در ایستگاه

لوله‌کشی و سایر تجهیزات ایستگاهی بایستی به طور کامل و مناسب با زمین اتصال الکتریکی داده شوند تا تخلیه ولتاژها و بارهای القایی را تا مرز ایمنی صورت دهند. همچنین تجهیزات کارگاهی، ابزارآلات و حصار و حفاظ ایستگاه می‌بایست به طور کامل با زمین اتصال داده شده تا از برق‌گرفتگی پرسنل به هنگام القای الکتریکی این وسایل جلوگیری به عمل آید.

طراحی سیستم اتصال با زمین ایستگاه و لوله‌کشی‌های آن بایستی با سیستم‌های حفاظت کاتدیک و حفاظت در برابر خوردگی لوله‌های مدفون در ایستگاه سازگار باشد؛ این سازگاری و محافظت را می‌توان با ایزولاسیون و عایق‌کاری الکتریکی لوله‌ی زیرزمینی مرتبط با وسایل انحراف الکتریکی ایجاد کرد.

آسیب رعد و برق به تجهیزات گفته شده در بالا و یا خطرات آن برای پرسنل از چهار راه متداول ناشی می‌گردد:

- برخورد مستقیم رعد و برق به تجهیزات زمینی ایستگاه
- برخورد رعد و برق به حواشی تجهیزات زمینی در ایستگاه
- برخورد صاعقه به نزدیکی لوله‌های انتقال گاز
- برخورد صاعقه به منبع تغذیه ورودی الکتریکی یا کنداکتورهای مخابراتی

در واقع حذف کلی و صددرصد خطراتی که متوجه پرسنل در حال ایستادن در مجاورت اجزای فلزی ایستگاه می‌باشند، نشدنی و غیر عملی است، چون برای این کار پوشش‌های اتصال زمین بسیار

⁵ Earthing

وسیع‌ی مورد نیاز است که با آن وجود روش ذکر شده تنها به صورت جزئی مؤثر خواهد بود. مخصوصاً در مواردی که خاکهای با مقاومت ویژه بالا وجود دارند، هنوز پتانسیل‌های خطرناکی می‌تواند پیرامون سیستم‌های وسعتی از حیث زمین در ایستگاه وجود داشته باشند و از طرفی مقاومت ظاهری (امپدانس) کندانکتور ممکن است اجازه ظهور ولتاژهای قابل توجهی را بین تأسیسات لوله و زمین بدهد. هنگامیکه صدای رعد به گوش رسید کلیه افرادی که بیرون مشغول فعالیت هستند بایستی از مکان‌های قابل انفجار دور شده و به دنبال سرپناهی مناسب بگردند. حفاظی که باید دنبال آن بود بایستی حداقل یک سرپوش نرمال را شامل شود؛ یا یک وسیله با بدنه کاملاً فلزی مثل ماشین یا کامیونی را پیدا نمود که سرپوش آن فلزی بوده و خود پرسنل با فلزات آن وسیله تماسی نیابند.

حفاظت از لوله‌ها و تجهیزات ایستگاه با نصب یک سیستم خاموش‌کن مغناطیسی مناسب امکان‌پذیر خواهد بود. نوعاً این سیستم شامل یک یا چند میله صاعقه‌گیر در بالاترین نقاط سازه، کندانکتورهای به سمت پایین مناسب، الکترودهای اتصال به زمین و اتصال منفی تجهیزاتی می‌شود. رعدوبرق‌هایی را که به‌خاطر برخورد با منبع تغذیه برق ورودی یا کندانکتورهای ارتباطاتی نفوذ می‌کنند، می‌توان با استفاده از یک گیره (محدودکن) ولتاژ مناسب تخفیف اثر داد. جزئیات طراحی چنین سیستم‌های محافظ رعد و برق در AS/NZS 1768 یافت می‌گردد.

انتقال انرژی از برخورد صاعقه‌ها به زمین در نزدیک‌های خط لوله می‌تواند بوسیله‌ی نصب اتصال به زمین مناسب کم‌اثر شود. جزئیات بیشتر این حفاظت از لوله در AS/NZS 4853 یافت می‌گردد.

۵.۲.۳ روشنایی

روشنایی مناسب در مناطق و راهروها، در خروجی، دورتادور مناطق حساس پمپ و کمپرسور، و گرداگرد تجهیزات کنترلی باید تعبیه گردند.

همچنین در یک ساختمانی که اتوماتیک‌وار سیستم کنترلی ایستگاه تجهیزات برقی و تغذیه‌ای آن را خاموش می‌کند، روشنایی اضطراری باید ایجاد گردد.

۶.۲.۳ خروجی‌ها و حصارکشی‌ها

ایستگاه‌ها باید با حصارهایی با ویژگی‌های ذیل ضمیمه گردند:

- نداشتن ارتفاع کمتر از ۲ متر؛
- محدودکننده‌ی ورودهای غیرمجاز؛
- نداشتن ورودی کمتر از ۲ متر (آنچنانکه مسیرهای گریز بسیار مجزا از هم فراهم گردند)

- ارائه علامت‌های ممنوعیت و هشدارهای مناسب روی هر دو طرف مطابق AS 1319.

دروازه ورود پرسنل بایستی حداقل ۶۰ متر از بین حصار بوده و باید قابلیت باز شدن بدون نیاز به کلید از داخل را داشته باشد. حداقل یکی از دروازه‌های ورودی باید آنچنان ساخته شده و اندازه‌بندی شود که دسترسی به آمبولانس‌ها و تجهیزات آتش‌نشانی با اطمینان انجام گیرد. از سویی فراهم نمودن خروجی‌های اضطراری که معادل با درهای دیگر هستند لازم است.

۷.۲.۳ هواکش و تخلیه

جایی که گاز قابل اشتعال به اتمسفر تخلیه می‌شود، مکان سیستم‌های تخلیه باید جهت بادهای غالب مورد توجه بوده و نیز کمتر کردن ورود هوا به تجهیزات موتورهای احتراقی مورد ملاحظه قرار گیرد. سطوحی که تمرکز کم گاز ممکن است موجب خطر یا مزاحمتی در عملکرد شود نیز باید مورد بررسی قرار گیرند.

۸.۲.۳ سیستم قطع فعالیت

هر ایستگاه باید با سیستمی که اجزاء ایستگاه را به‌طور امنی مجزا می‌نماید یا کل ایستگاه را از داشتن پتانسیل خطرناکی دور نگه می‌دارد، تجهیز گردد. معمولاً سیستم خاموشی یا قطع فعالیت با یک ساختار سلسله‌مراتبی تکمیل می‌شود. بالاترین سطح این کار ایجاد یک قطع‌کننده اضطراری ایستگاه یا ESD^۶ است که ارتباط میان ایستگاه و فعالیت منبع تغذیه و ابزار تحویل آنرا را قطع می‌نماید. همچنین این سیستم برای یک ایستگاه می‌تواند تخلیه فشاری آن باشد. سطوح پایین‌تر در این سیستم شامل توقف واحدها، تجزیه و قطع ارتباط اجزا، و توقف فعالیت واحد بدون تخلیه فشاری می‌شود. سیستم قطع فعالیت می‌بایست به‌طور مناسبی و به شکل اتوماتیک، محلی و کنترل از راه دور تجهیز گردد. شیرهای ایزولاسیون باید در خارج ساختمان یا حصار قرار گیرند تا افزایش شدت آتش‌سوزی‌ها با کنار رفتن منبع سوختی از میان برده شود. لازم به ذکر است که در جاییکه سیستم قطع به شکل اتوماتیک طراحی می‌گردد، نتیجه و اثر انقطاع یکدفعه‌ای تغذیه‌ای در فرایندهای پایین‌دست باید مدنظر قرار گیرند.

⁶ Emergency Shut Down

۹.۲.۳ مارک‌زنی

تجهیزات و لوله‌کشی‌ها بایستی رنگ زده شده و یا مارک گردند آنچنان که ایمنی فعالیت ایستگاه با کاملاً مشخص نمودن محتویات، هدف و عملکرد داخل ایستگاه فراهم شده و بالاتر رود. این کار با موارد ذیل همراه است:

- تعیین و شناسایی موقعیت شیرها و کنترل‌گرهای اضطراری
- تعیین محتویات نوع لوله‌کشی مطابق با AS 1345.

۳.۳ استانداردهای سازه‌های ایستگاه‌ها

سازه‌ها شامل ساختمان‌ها و فونداسیون‌ها شده و باید مطابق با استانداردهای استرالیایی طراحی شوند. برای هر طراحی بارهای باد و زمین‌لرزه باید در نظر گرفته شوند.

۱.۳.۳ ساختمان‌ها

ساختمان‌ها باید مطابق با استانداردهای ذیل طراحی گردند:

- مواد استفاده شده در ساختمان‌ها که شامل تجهیزات نیز می‌شود نباید از مواد سوختنی و قابل اشتعال بوده و مطابق با AS 1530.1 باشند.
- روشنایی محوطه ساختمان‌ها باید برای دسترسی به سایت در شب و نگهداری و تعمیرات در آن هنگام مناسب باشد. برای این امر و برای نور داخل و خارج ساختمان بایستی به ترتیب از استانداردهای AS 1680.2.1 و AS 1158.1 استفاده کرد.
- یک سیستم روشنایی اضطراری که مستقل از هر قطع‌کننده اتوماتیک فعالیت ایستگاه است باید در هر ساختمان استفاده گردد.
- چندین خروجی اضطراری برای بیرون رفتن پرسنل در مواقع خطر احتمالی بدون هجوم به یک درب لازم است.
- مسافت در نظر گرفته شده از هر نقطه از ساختمان تا نزدیک‌ترین خروجی باید کمتر از ۲۵ متر بوده و این مسافت باید در امتداد خط مرکزی راهروها، راه‌پله‌ها و گذرگاه‌ها اندازه‌گیری شود.

- درب‌های اضطراری فرار از خطر احتمالی باید از نوع لولایی بوده، از داخل به بیرون باز شده و هیچ نیازی به کلید برای باز شدن نداشته باشند. همچنین بایستی چنین درهایی مارک زده شده و همواره از کیپ‌شدگی آنها جلوگیری بعمل آید.
- تهویه مناسب باید در اتاق‌های کمپرسور، پمپ و دیگر اتاق‌های ساختمان که دارای هیدرکربن هستند فراهم گردد تا پرسنل به واسطه انباشته شدن بخارات و گازهای قابل اشتعال یا سمی در معرض خطر قرار بگیرند.
- سیستم تهویه باید برای مایعاتی که ممکن است داخل ساختارهای تجهیزاتی آزاد شوند نیز مناسب بوده و باید خصوصیت‌های ذیل را نیز دارا باشد:
 - تخلیه به یک مکان ایمن
 - آگروز ایمن و خروج کلیه گازها و بخارات قابل اشتعال
 - جلوگیری از تماس‌های منابع جرقه‌زنی در داخل
 - دارای وسایل چک نمودن فعالیت این سیستم در خارج از ساختمان
 - محدود کننده ورود مواد خارجی

۲.۳.۳ سازه‌های زیرزمینی

- گودال‌ها و دیگر سازه‌های زیرزمینی که به نحوی مواد هیدرکربنی را در خود دارند باید به‌گونه‌ای مکان‌دهی، طراحی و بنا شوند که موارد ذیل در آنها فراهم و تجهیز گردیده باشند:
- محدود نمودن تنش‌ها روی لوله‌ها و اجزای لوله‌ای
 - محافظت لازم قطعات
 - حفاظت کافی و محدودیت قطعات داخل سازه
 - حفاظت در برابر جرقه و آتش‌سوزی تصادفی مایعات اشتعال‌پذیر داخل سازه
 - محافظت از آسیب‌های وارده به اجزا در برابر بارهای روی پوشش گودال‌ها (مانند رفت و آمد و دیگر بارهای خارجی)
 - جلوگیری از ورودهای غیرمجاز به داخل سازه
 - وجود مکان کافی و نصب پربازده و مؤثر با لحاظ تعمیرات و نگهداری سیستم مطابق استانداردهای مهندسی طراحی

دقت کافی در طراحی گودال و درپوش آن باید مبذول داشته شود تا در هنگام برداشتن یا تعویض درپوش گودال، این درب به داخل نیفتد.

شیرها باید به گونه‌ای قرار داده شوند که به هنگام دسترسی به گودال‌های زیرزمینی، محورهای آنها خطری مثل سر خوردن یا افتادن ایجاد نکنند.

هر سازه‌ی تجهیزاتی که دارای حجم داخلی کمتر از ۶ مترمکعب است و هیچ تجهیزاتی از آن بالای سطح زمین قرار نمی‌گیرد، باید تهویه و درزبندی شود.

تجهیزات عایق‌بندی و درزگیری باید شامل خصوصیات ذیل باشند:

- غیر قابل نفوذ برای ورود گاز و بخارات قابل اشتعال
- مجهز به شیرهای اطمینان خلأ و فشاری
- مجهز به پوشش، در یا دریچه برای هر سوراخ به‌نحو غیر قابل نفوذ برای گاز یا بخارات اشتعال‌پذیر
- داشتن امکانات تست فضا و اتمسفر داخل بدون نیاز به باز نمودن در یا پوشش

۳.۳.۳ ارتعاشات لوله‌ای

فعالیت تجهیزات ایستگاهی ممکن است باعث ارتعاش و ایجاد شکست ناشی از خستگی در لوله‌ها و محافظ آنها شود؛ از این رو طراحی خط لوله باید فرکانس‌های صوتی‌ای که با فرکانس‌های مکانیکی کمپرسور و لوله‌کشی ایستگاه منطبق هستند را حذف نماید. این طراحی بایستی نیروهای ناشی از ضربان و ارتعاشات فشاری را با مهارکردن ارتعاش لوله بوسیله گیره‌های متداول کم کرده و در سطحی مجاز از تنش ابقا نماید؛ گیره‌ها و مهارهای خط لوله باید به گونه‌ای باشند که همزمان با این مهار در برابر تنش، باید به جابجایی‌های ناشی از گرمایش لوله توجه نموده و لوله را برای این مورد آزاد گذاشت.

۴.۳ استانداردهای محافظت در برابر خوردگی ایستگاه‌ها

سیستم‌های محافظت در برابر خوردگی باید به لوله‌کشی ایستگاه و تجهیزات و به صورت سازگار با دوام طراحی اعمال شوند.

هنگامی که طراحی ایستگاه نیاز به لوله‌های فشار زیر زمین دارد، تجهیزاتی باید مهیا گردند تا محافظت از خوردگی خارجی آنها را انجام دهند؛ این امر ممکن است با یک سیستم حفاظت کاتدیک شبیه حفاظت لوله‌های اصلی همراه باشد.

۵.۳ استانداردهای تجهیزات الکتریکی ایستگاه‌ها

تجهیزات الکتریکی باید کاملاً سازگار با استاندارد AS 3000 یا هر استاندارد مورد تأیید دیگر باشند.

۶.۳ استانداردهای فاضلاب ایستگاه‌ها

سایت مربوط به ایستگاه باید به گونه‌ای طراحی گردد که از آلوده کردن خارج ایستگاه توسط مایعات جاری جلوگیری کند. به طور کلی، طراحی ایستگاه باید قادر به تفکیک مایعات کثیف و تمیز روان‌آبهای باران، آب‌روغن‌ها و سیالات عملکرد ایستگاه به شرح ذیل باشد.

۱.۶.۳ سیالات فرآیندی

سیالات فرآیندی ناشی از شیرهای تخلیه، سیستم‌های اطمینانی فشار، و نشت از تجهیزات باید جدا شده و به یک مخزن انتقال داده شوند؛ به گونه‌ای که به فرآیند بازگشته و یا به تانکی مناسب جهت امحا فرستاده شوند.

۲.۶.۳ روان‌آبهای بارانی

سایت ایستگاه باید برای جدا کردن روان‌آبهای باران در سطوحی که مرتبط با آلودگی توسط کار تجهیزات و تأسیسات نیستند و آبهایی که احتمال آلودگی دارند طراحی گردد. کلیه آبهای غیرآلوده باید به محیطی مناسب خارج سایت تخلیه گشته و آبهای آلوده نیز باید طی مسیری مجزاکننده جهت جلوگیری از خروج آنها از سایت تخلیه گردند؛ اگر خطر بیشتر بودن حجم روان‌آبهای آلوده از ظرفیت این مجزاکننده احساس شود باید شیری در نقطه تخلیه تعبیه گردد تا بقیه مایعات داخل نگهداشته شوند.

۳.۶.۳ آبهای روغنی

یک سیستم آب روغنی برای تجهیزاتی که عملکردشان پتانسیل تخلیه مخلوط آب و روغن را دارد باید فراهم گردد. آب‌روغن‌ها باید طی فرآیندی به جداسازی آب و روغن خود وارد گردند. کیفیت آب تخلیه‌ای باید معرفی و تأیید گردد.

ظرفیت سیستم ذخیره و تجزیه آب‌روغن‌ها باید مناسب و مطابق با بزرگترین مقدار از میان حجم روان‌آبهای سیستم آتش‌خاموش‌کن، روان‌آبهای باران و روان‌آبهای تجهیزاتی باشد. این سیستم همچنین باید به گونه‌ای طراحی گردد که از ورود مخلوط‌های هوا و بخارات انفجاری به داخل

سیستم فاضلاب جلوگیری نماید. همچنین سیستم فاضلاب باید به گونه‌ای باشد که با تله‌های آتشی طراحی گردیده و بتواند از انتشار آتش درون سیستم دفع فاضلاب جلوگیری بعمل آورد.

۴.۶.۳ هرزآب

هرزآبها و دیگر زباله‌های امور بهداشتی باید در راهی تأیید شده جمع‌آوری، فرآوری و تخلیه شوند.

۵.۶.۳ تجهیزات زیرزمینی

در جاییکه سازه‌های تجهیزاتی تاحدی یا کاملاً زیر زمین قرار می‌گیرند و طغیان آب یا سیلاب‌ها ممکن است فعالیت ایمن آنها را مورد تهدید قرار دهد، یک سیستم دفع فاضلاب مناسب و تأیید شده باید نصب گردد. این سیستم دفع فاضلاب باید مناسب برای سیال داخل خط لوله و شرایط ایستگاه باشد. از سویی، ابزارآلات متصل به سیستم کنترل تجهیزات باید برای مانیتور کردن عملکرد امن سیستم دفع فاضلاب تجهیزات زیرزمینی نصب و راه‌اندازی گردد.

۷.۳ استانداردهای تجهیزات داخلی ایستگاه‌های تقلیل فشار

همواره با توجه به نوع کاربرد و فشار گاز ورودی به ایستگاه، نوع ایستگاه انتخاب می‌شود و با توجه به پارامترهای اصلی زیر طراحی ایستگاه تقلیل فشار انجام می‌پذیرد:

- فشار و دمای عملیاتی گاز ورودی
- فشار و دمای عملیاتی گاز خروجی
- فشار طراحی و تست
- سرعت گاز داخل لوله
- مقدار جریان حجمی گاز

یک ایستگاه تقلیل فشار بسته به نوع تقلیل (فشار ورودی به خروجی) و ظرفیت آن دارای جزئیات فیزیکی و هندسی مخصوص در اجزای خود است؛ اما در عین حال و در شکل کلی، تمامی این مدل ایستگاه‌ها از حیث شکل ظاهری و نوع اجزا یکسان می‌باشند. برای نمونه یک ایستگاه تقلیل فشار ۴۰۰ به ۶۰ پوند بر اینچ مربعی با ظرفیت ۲۰۰۰۰ متر مکعب بر ساعت (شکل ۳-۱)، دارای اجزای زیر از حیث لوله‌کشی می‌باشد:

- شیر عایقی از نوع مخروطی^۷
- شیر عایقی از نوع توپی^۸
- فیلتر خشک عمودی (ایستاده) گاز
- سیستم بودار کننده^۹
- شیر کنترلی
- شیر سماوری
- رگولاتور
- شیر اطمینان قطع‌کننده جریان^{۱۰}
- شیر اطمینان تخلیه گاز^{۱۱}
- دبی‌سنج توربینی گاز
- شاخص اندازه‌گیر دما
- شاخص اندازه‌گیر فشار

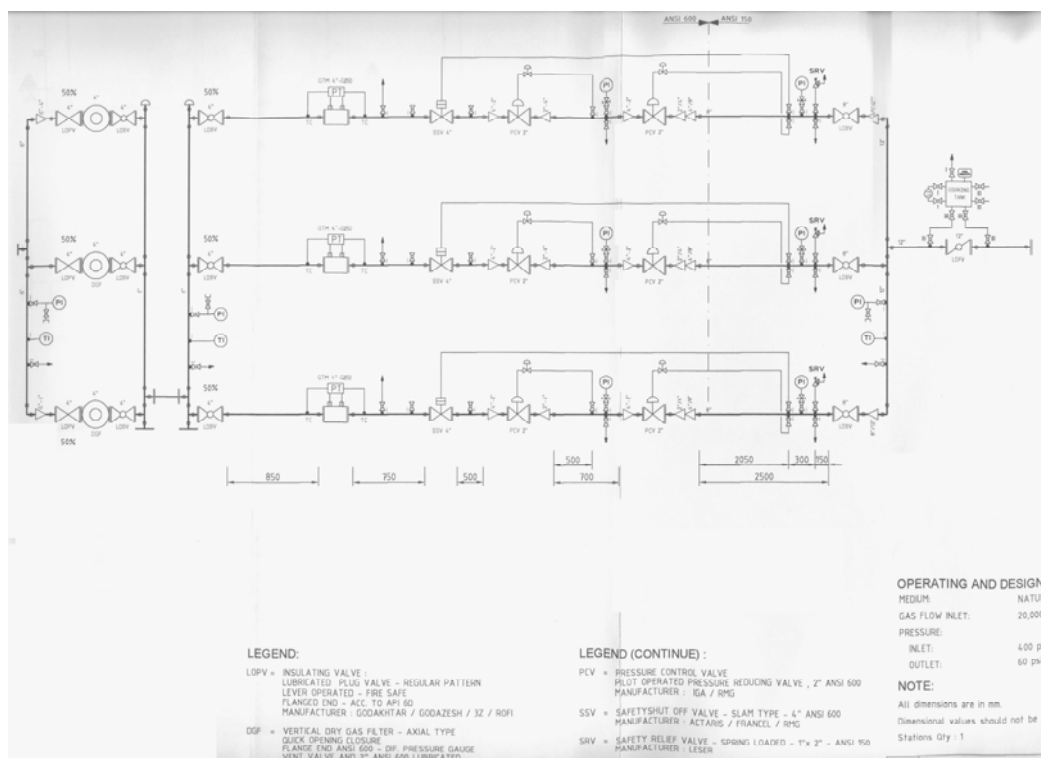
⁷ Plug insulating valve

⁸ Ball insulating valve

⁹ Odorizing system

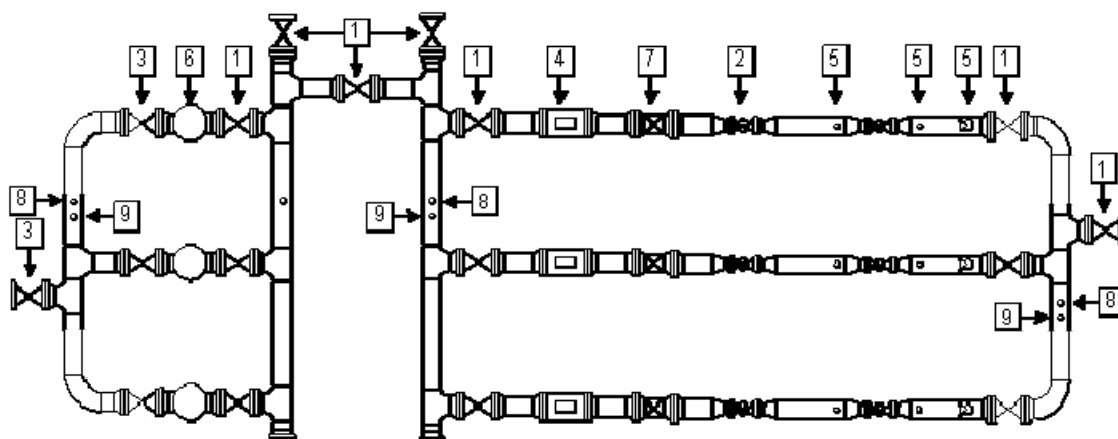
¹⁰ Safety shut off valve

¹¹ Safety relief valve



شکل ۳-۱: یک ایستگاه تقلیل فشار ۴۰۰ به ۶۰ با ظرفیت ۲۰۰۰۰ متر مکعب بر ساعت

علاوه بر موارد بالا، می‌توان به لوله‌کشی‌ها هم اشاره نمود که قطر مناسب هم برای آنها و هم برای شیرآلات به نوع ایستگاه و نوع تقلیل فشار بستگی دارد. بعنوان نمونه برای مدل ایستگاه تقلیل فشاری که در بالا اشاره شده است می‌توان به استفاده از سه شیر توپی عایقی ۴ اینچی در ورودی و سه شیر مشابه ۸ اینچی در خروجی اشاره کرد. این امر بخاطر استفاده از شیرهای کنترلی و رگولاتوری با تغییر قطر در مسیرهای سه‌گانه‌ی انتقال گاز (یک مسیر برای مسیر آماده‌باش^{۱۲}) در ایستگاه تقلیل فشار می‌باشد (شکل ۳-۲).



شکل ۳-۲: شماتیک یک ایستگاه تقلیل فشار

(۱- شیر توپی؛ ۲- رگولاتور؛ ۳- شیر سماوری؛ ۴- کنتور گاز؛ ۵- شیر اطمینان؛ ۶- فیلتر گاز خشک؛ ۷- شیر قطع جریان؛ ۸- فشارسنج؛ ۹- دماسنج)

در ادامه این گزارش استانداردهای مربوط به طراحی اجزای داخلی ایستگاه‌های تقلیل فشار شامل فیلترها، هیترها (گرمکن)، بودارکننده‌ها، دبی‌سنج‌ها، رگولاتورها، لوله‌کشی ایستگاه‌ها و غیره، اشاره خواهد شد.

لازم به ذکر است که این استانداردها مستقیماً از مرکز تدوین استاندارد شرکت گاز گرفته شده‌اند. همچنین در تدوین استانداردهای فوق‌الذکر و استانداردهای دیگری که تا کنون در گزارشات دفتر (مربوط به بحث ایستگاه‌ها) ذکر شده‌اند.

۱.۷.۳ استانداردهای فیلترسازی گاز

جهت جداسازی ذرات زاید و ناخواسته از گاز طبیعی و تحویل سالم آن به مصرف‌کننده می‌بایست طی چند مرحله فیلتراسیون روی گاز صورت پذیرد. ذرات گفته شده گاه به دلیل برش مقطعی از لوله‌ی انتقال گاز و جوش مجدد آن در محیطی که لوله در آن مدفون است وارد گاز می‌گردند. فیلترهای موجود در فرایند انتقال و توزیع گاز طبیعی بر دو دسته کلی ذیل هستند:

- فیلتر گاز خشک

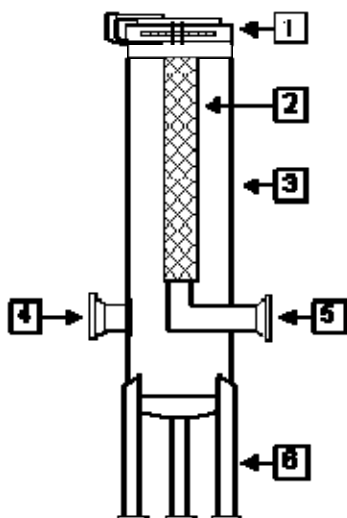
- فیلتر جدا کننده (سپریتور)

فیلتر گاز خشک یکی از جداکننده‌های کاربردی در صنعت گاز بوده که خود ایستا می‌باشد و برای جداسازی ذرات جامد تا قطر ۵ میکرون از گاز خشک استفاده می‌شود. جداسازی در داخل فیلتر با استفاده از المنت کارتریج قابل تمیز شدن که از جنس پلی پروپیلن می‌باشد انجام می‌شود. شماتیک و اجزای داخلی یک فیلتر از این نوع مطابق شکل ۳-۳ می‌باشند. سایر مشخصات این فیلتر عبارتند از:

- محدوده ظرفیت گاز ورودی: از ۱۵۰ تا ۱۰۰,۰۰۰ متر مکعب استاندارد بر ساعت

- محدوده اندازه: از ۲ اینچ تا ۱۲ اینچ

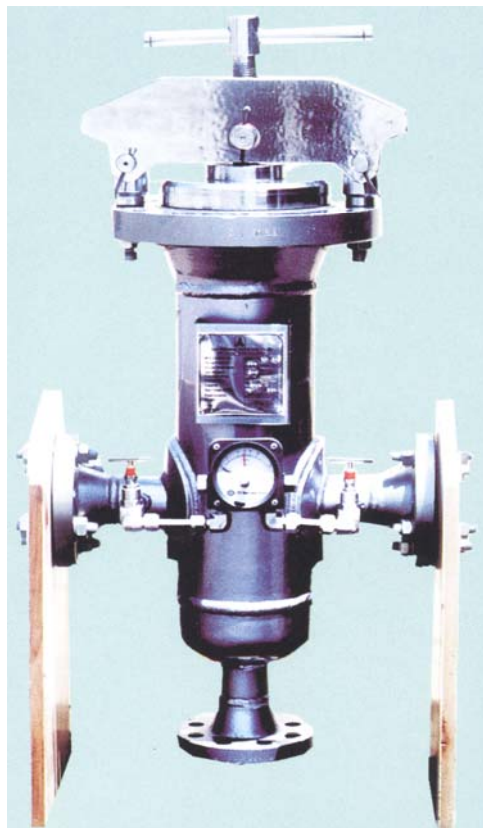
- دسته بندی فشاری: ۱۵۰، ۳۰۰ و ۶۰۰ پوند بر اینچ مربع



شکل ۳-۳: اجزاء مختلف فیلتر ایستاده گاز

(۱- درب فیلتر؛ ۲- المنت کارتریج؛ ۳- بدنه؛ ۴- نازل ورودی؛ ۵- نازل خروجی؛ ۶- پایه)

در دو شکل ذیل هم انواعی از این فیلتر (ساخت شرکت آذرپژوهان اندیش) آورده شده است.



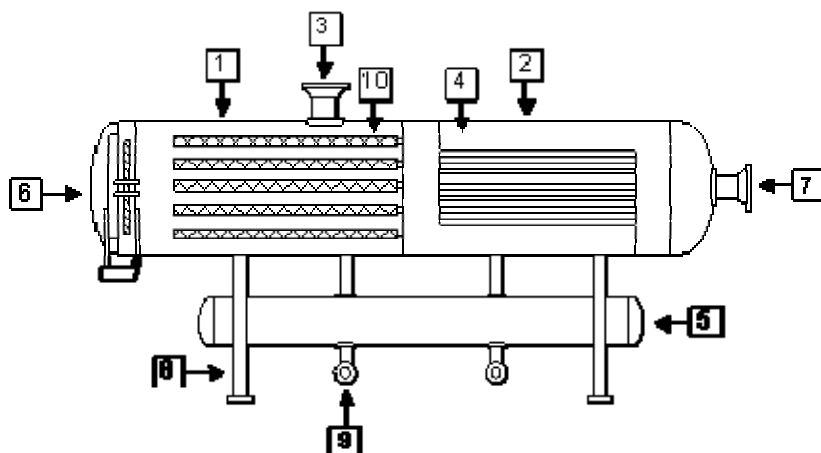
شکل ۳-۴: یک فیلتر گاز خشک از نوع QMC



شکل ۳-۵: یک فیلتر گاز خشک از نوع QHC

اما فیلتر جداکننده (سپری‌تور) بصورت افقی بوده و نصب شده بر روی پایه‌ای مناسب ساخته می‌شود که با استفاده از المنت کارتریج و صفحات فلزی موج دار، ذرات جامد و مایع را از گاز جدا می‌کند بطوریکه مقدار مایع در داخل گاز طبیعی نباید از ۰.۱ گالن در هر هزار فوت مکعب استاندارد گاز (۱۳.۳۶۶ متر مکعب مایع در هر یک میلیون متر مکعب استاندارد گاز) تجاوز کند. مقدار جریان گاز، فشار عملیاتی و درجه حرارت عملیاتی عوامل مهمی در طراحی و سایز جداکننده‌ها هستند و یکی از مهمترین عوامل در راندمان کلی فیلترها، که معمولاً نادیده گرفته می‌شود، طول المنت است. شماتیک این نوع فیلترها همانند شکل ۳-۶ می‌باشد. سایر مشخصات این فیلتر عبارتند از:

- راندمان جداسازی برای ذرات مایع تا قطر ۵ میکرون و ذرات جامد تا قطر ۳ میکرون ۱۰۰٪ می‌باشد.
- محدوده ظرفیت گاز ورودی: از ۵۰۰۰ تا ۱،۰۰۰،۰۰۰ متر مکعب استاندارد بر ساعت
- محدوده اندازه: از ۳ اینچ تا ۲۰ اینچ
- دسته‌بندی فشاری: ۱۵۰، ۳۰۰ و ۶۰۰ پوند بر اینچ مربع.



شکل ۳-۶: اجزاء مختلف فیلتر جداکننده

۱- محل نصب المنت؛ ۲- محل نصب صفحات فلزی موج دار؛ ۳- نازل ورودی گاز؛ ۴- صفحات فلزی موج دار؛ ۵- محل جمع‌آوری مایعات؛ ۶- درب فیلتر؛ ۷- نازل خروجی گاز؛ ۸- پایه؛ ۹- دریچه تخلیه؛ ۱۰- المنت کارتریج

برای دانستن اینکه چه استانداردهایی در حال حاضر در شرکت گاز ایران برای فیلترسازی گاز مورد استفاده قرار می‌گیرد، به وبسایت مخصوص این استانداردها مراجعه شده و مواردی که در ادامه می‌آیند از مجموعه استانداردهای واحد امور تدوین استانداردهای این شرکت (IGS-PM-105(0)) مورد جمع‌بندی قرار گرفته‌اند:

- فیلتر گاز خشک بایستی از نوع پایه‌دار و ایستاده باشد.
- شیر(های) تخلیه مایعات برای این نوع فیلتر لازم هستند.
- اختلاف فشارسنج‌های نوع مدرج در فیلترهای گاز خشک مورد نیاز است.
- بدنه فیلتر متناسب با نرخ فشار می‌باشد (جدول ۳-۱):

جدول ۳-۱: مشخصات و اطلاعات اندازه بدنه فیلترهای خشک

Pressure Rating	Body Size (in.)
ASA 150	10
ASA 300	6
ASA 600	4

بدنه فیلتر بایستی دارای دسته مناسب برای جابجایی راحت باشد.

- فیلترها بایستی مطابق با آخرین کدها و استانداردهای مخازن تحت فشار و بویلرهای ASME مراحل طراحی، تولید، بازرسی و تست را طی کنند. در نظر داشتن این نکته ضروری است که ظروف این فیلترها گاه در زیر آفتاب و باران مستقیم قرار می‌گیرند.
- فیلترها باید به گونه‌ای طراحی گردند که مقاوم در برابر بارهای وارده از زمین‌لرزه، فشار داخلی مخزن، ضربه بیرونی، وزن مخزن فیلتر، باد و دمای محیطی باشند.
- فیلترها بایستی بتوانند ذرات جامد کمتر از ۵ میکرون را توسط کارتریج یکبار مصرف خود جدا کنند. این کارتریج توسط یک سبد دو لایه (دو دیواره) استیل کادمیومی و به صورت داخلی و خارجی محافظت می‌شود.
- المنت کارتریج بهتر است که از نوع باز بوده و از فیبر پلی‌پروپیلنی بافته شده و فایبرگلاس‌های رزینی یا هر جنس معادل اینها ساخته شود.
- المان فیلتری می‌بایست به شکلی محکم بسته شود تا از عبور کنارگذر^{۱۳} ذرات جامد کمتر از ۵ میکرون از حیث اندازه جلوگیری کند.
- فیلترها بایستی به گونه‌ای طراحی شوند که افت فشار تمیز مربوط به فلنج تا فلنج در آنها حداقل (کمتر از ۲ پوند بر اینچ مربع) بوده و این افت برای حالت کثیف در حدود ۱۰ پوند باشد؛ در حالیکه مقاومت در برابر اختلاف فشار وارده حدود ۲۵ پوند بر اینچ مربع باشد.
- کلیه فیلترها می‌بایست به گونه‌ای سوراخ خورده باشند که قابلیت باز و بسته شدن سریع را داشته و بتوان در اسرع وقت نسبت به نیاز تعویض احتمالی کارتریج در آنها اقدام نمود. این باز و بسته کردن فیلتر باید بدون نیاز به هیچ دانش خاص و یا وسایل بالابرنده‌ای و نیز در تمامی جهات (چرخشی) برای بیرون کشیدن قابل انجام باشد.
- فیلتر می‌بایست دارای یک شیر تخلیه مناسب بوده تا قبل از باز نمودن بسته‌بندی آن، آنرا از فشار خالی نمود.
- شیرهای تخلیه مایعات گفته شده در بالا بایستی به صورت فلنج در انتها و روغنکاری شده بوده و مطابق استاندارد BS 1570 و API 6.D برای شیرهای مخروطی باشند. اندازه این شیر باید حداقل ۲ اینچ برای اندازه بدنه ۶ اینچ و بزرگتر بوده و برای اندازه‌های بدنه ۴ اینچ به پایین شیرهای ۱ اینچی مناسب‌اند.

¹³ By-pass

- فشارسنج‌ها برای هر دو خط با فشار بالا و پایین می‌باشند توسط شیرهای سوزنی متصل گردند. نمایشگر این فشارسنج‌ها از ۰ تا ۲۵ پوند باشد.
- شرکت تولیدی نباید قبل از دریافت طرح یا نقشه نوع فیلتر از مشتری شروع به ساخت نماید.
- با توجه به اینکه باد و زمین‌لرزه همزمان رخ نمی‌دهند بایستی محاسبه بار وارده بر فیلتر بر اساس بزرگترین این دو و بر حسب نوع منطقه جغرافیایی محل نصب فیلتر صورت پذیرد.
- ظروف فیلتراسیون و قطعات سنگین مربوط به آنها بایستی دارای وسایل مناسب و حلقه‌های پایه جانبی برای بلند کردن و راست کردن فیلتر در مواقع جابجایی باشند.
- ماکزیمم سرعت در فیلتر و نیز در المنت کارتریج و ورودی و خروجی فیلتر نبایستی از ۲۰ متر بر ثانیه بیشتر گردد.
- فیلترها باید به گونه‌ای طراحی شوند که نسبت مساحت سطوح خارجی آنها به سطوح داخلی و قسمت سوراخ نباید کمتر از ۸ شود. به عبارت دیگر حاصل تقسیم طول المان به قطر آن باید بزرگتر یا مساوی ۲ باشد.
- فیلترها باید به گونه‌ای طراحی شوند که سطح مقطع قسمت حلقوی بین کیس فیلتر و المنت آن بزرگتر از سطح مقطع سوراخ داخلی المنت باشد.
- کلیه صفحات فلنج‌کاری شده و اتصالات می‌بایست به نحو مطلوبی در برابر زنگ‌زدگی در فرایندهای حرارتی ساخت فیلتر مثل جوشکاری‌ها محافظت شوند.
- رنگ‌کاری، ساچمه‌پاشی و ماسه‌زنی فیلترها باید مطابق با استاندارد سوئیسی S.I.S 05590-LATES T بوده و دارای یک پوشش روی-کرومات با ضخامت خشک ۳ میلی‌متر به همراه پوششی میانی از اکسید آهن میکادار خاکستری با ضخامت ۲.۵ میلی‌متر باشند.
- علاوه بر حق لازم و اجباری بازرسی کدهای ASME توسط مشتری، بازرسی کلیه قطعات و مواد نیز بر حسب نیاز مجاز می‌باشد.
- قبل از بازرسی نهایی، کلیه تفاله‌ها و سرباره‌های ذوب، مواد زائد، خرده‌ریزها، سنگ‌ریزه‌ها، تکه‌های جوشکاری، مواد نفتی و دیگر مواد خارجی باید کاملاً استخراج گردند.
- آزمون رادیوگرافی روی ظرف فیلتر باید مطابق با استاندارد ASME صورت پذیرد.

• حتماً بایستی صفحه نام و مشخصاتی روی فیلتر جوش بخورد؛ این صفحه شامل مشخصات زیر است:

- نام تولیدکننده
- مدل و نوع فیلتر
- اندازه فیلتر
- فشار کاری فیلتر
- فشار طراحی فیلتر
- فشار تست فیلتر
- دمای کاری فیلتر
- وزن فیلتر

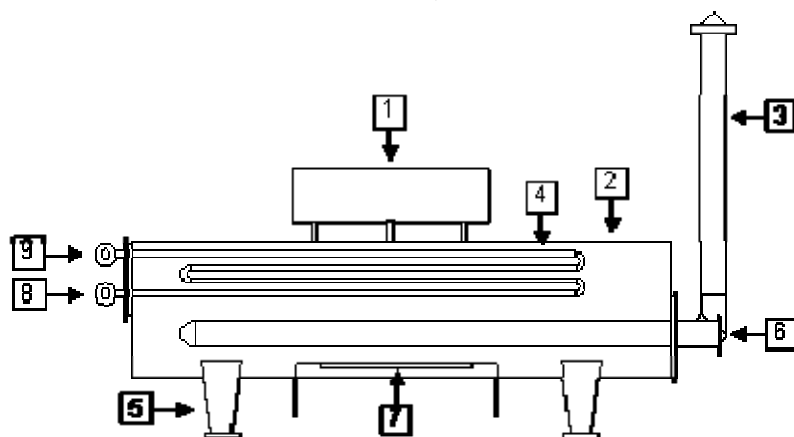
- قطعات قابل انفکاک بایستی بعد از تنش‌زدایی نصب گردند.
- کلیه سطوح داخلی و خارجی قبل از بسته‌بندی و احیاناً حمل با کشتی باید خشک شده و کلیه مایعات مربوط به تست‌های مختلف خارج گردند.
- به هنگام بسته‌بندی، کلیه گسکت‌ها و واشرهای آزاد در بسته‌بندی‌های چوبی جداگانه قرار داده می‌شوند.
- تمام بسته‌بندی‌ها بایستی مناسب برای ذخیره در انبار فیلترها به مدت حداقل ۳ ماه قبل از نصب باشند.
- دفترچه‌های راهنمای استفاده و راهنمای نگهداری و تعمیر فیلتر به همراه لیست کاملی از قطعات و مواد بکار رفته در فیلتر و نقشه طراحی آنها بایستی در بسته‌بندی ارائه گردد.
- نتایج تحلیل شیمیایی و مکانیکی کلیه قطعات در بسته‌بندی ارائه گردند.
- نتیجه تست‌های رادیوگرافی و معیارهای تنش سیستم به همراه مکان انجام تست‌ها در بسته‌بندی معین گردند.
- کلیه اسنادسازی و موارد بالا که در بسته‌بندی قرار می‌گیرند باید به زبان انگلیسی باشند.

۲.۷.۳ استانداردهای واحد گرمکن^{۱۴}

گرمکن‌های غیر مستقیم گاز (شکل ۳-۷) معمولاً تمام اتوماتیک بوده و برای گرم کردن گاز طبیعی قبل از کاهش فشار در ایستگاه‌های تقلیل فشار گاز استفاده می‌شوند.

این دستگاه شامل یک حمام (آب، نمک اتکتیک، روغن داغ) می‌باشد که برای جداسازی لوله‌ گاز از لوله‌ آتش که قابل جابجایی است به کار می‌رود. حرارت از لوله‌ آتش به حمام و از حمام به لوله‌ گاز منتقل شده و بدین ترتیب، لوله‌ گاز از شعله‌ مستقیم در امان است. مجموعه‌ داخل بدنه‌ گرمکن در شرایط اتمسفریک قرار دارند.

از طرفی، بدلیل انتقال حرارت و چرخش مناسب سیال داخل حمام، لوله‌ آتش در پایین‌ترین قسمت داخل بدنه قرار داده می‌شود. این مجموعه با فیبر سرامیکی یا فایبرگلاس عایق شده تا در مقابل شوک‌های شدید مکانیکی و حرارتی مقاوم باشد.

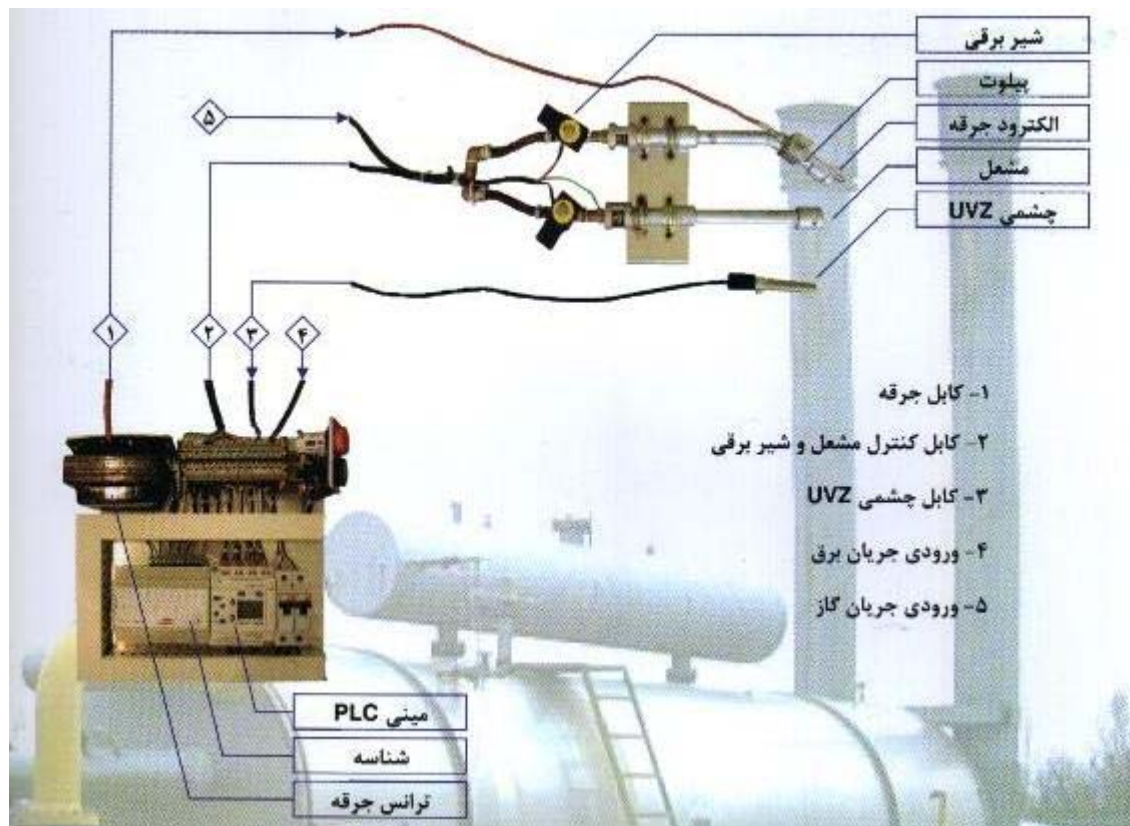


شکل ۳-۷: اجزاء گرمکن غیرمستقیم گاز

(۱- مخزن انبساط؛ ۲- بدنه؛ ۳- دودکش؛ ۴- مجموعه لوله؛ ۵- پایه؛ ۶- مشعل و لوله آتش؛ ۷- لوله پیش گرم سوخت مشعل؛ ۸- ورودی گاز؛ ۹- خروجی گاز)

سیستم کنترلی جدیدی طراحی شده است (شکل ۳-۸) که کنترل درجه حرارت محلول داخل بدنه، درجه حرارت گاز طبیعی خروجی از لوله، باز و بسته شدن شیر برقی روی مسیر سوخت مشعل، باز و بسته شدن شیر برقی روی مسیر سوخت پیلوت و سطح مایع داخل مخزن انبساط را انجام می‌دهد. مسیر سوخت مشعل شامل فیلتر گاز خشک، رگولاتور گاز، شیر اطمینان، کنترل کننده درجه حرارت و سایر اقلام مورد نیاز می‌باشد. طراحی و ساینز کردن دستگاه بر اساس IGS و با استفاده از نرم افزار PROHeater صورت می‌پذیرد. روش کار این سیستم‌ها به این صورت است که مینی PLC نشان داده شده در شکل، با یک واسطه (interface) چشمی UVZ را شناخته و در صورت خاموشی شعله

مشعل، این چشمی سیستم کنترل را فعال نموده و جرقه زدن اتوماتیک توسط ترانس آغاز شده تا پیلوت روشن گردد. بعد از این مرحله، شیر گاز مجدداً باز شده و مشعل روشن می‌گردد.



شکل ۳-۸: سیستم کنترل و جرقه‌زن مشعل در گرمکن‌ها

سایر مشخصات این گرمکن‌های غیر مستقیم عبارتند از:

- محدوده ظرفیت گاز ورودی: از ۱۰۰۰ تا ۲۵۰,۰۰۰ متر مکعب استاندارد بر ساعت
- دسته بندی فشاری: ۶۰۰ پوند بر اینچ مربع

در مورد استانداردهایی که برای این واحد از ایستگاه بایستی رعایت شود و برای دانستن اینکه چه استانداردهایی در حال حاضر در شرکت گاز ایران برای بوزنی به گاز مورد استفاده قرار می‌گیرد، به وبسایت مخصوص این استانداردها مراجعه شده و مواردی که در ادامه می‌آیند از مجموعه استانداردهای واحد امور تدوین استانداردهای این شرکت (IGS-MS-PM-104(1)) مورد جمع‌بندی قرار گرفته‌اند:

- نکات کلی استانداردسازی گرمکن‌ها

- گرمکن باید پایه‌دار و کامل و آماده در هنگام حوادث غیرمترقبه و عملکردهای مراقبت‌نشده باشد.

- مقاومت ساختاری پایه‌ها باید مناسب برای مقاومت در برابر نیروهای جابجایی بوده و از نوعی مونتاژ استیل برخوردار باشند که در هنگام جابجا کردن و یا دست‌کاری سیستم گرمکن، آسیبی به پایه‌ها نرسد.
- دسته‌های گرمکن بایستی از حیث استحکام مناسب برای بالا بردن و بلند کردن هیتز بدون آسیب رساندن به آن باشند.
- شیر اطمینان بایستی مستقیماً از جعبه آتش گرمکن خارج شده و آن جعبه نیز با حبس‌کننده مشعل تجهیز شده باشد.
- ساختار گرمکن باید به‌گونه‌ای باشد که جعبه آتش و سیم‌پیچ در خلاف جهت هم خارج شوند.
- در ساختمان گرمکن، یک شیر تخلیه به‌همراه یک فیلتر خشک با دقت ۳ میکرون برای سوخت گاز لازم است.
- قسمت‌های الکتریکی بایستی مقاوم در برابر باران و گرد و خاک باشند.
- شار حرارتی برای لوله آتشی نبایستی از مقدار ۳۳۰۰۰ کیلوکالری بر ساعت بر متر مربع تجاوز نماید.

• کدها و استانداردها

کدها و استانداردهای عمومی و مرتبط این سیستم عبارتند از:

- کلیه فلنج‌کاری‌ها و لوله‌کاری‌های فولادی مطابق استاندارد ANSI-B16.5 انجام گیرند.
- جوش‌کاری‌ها و فیت‌کاری‌ها بایستی مطابق با استاندارد ANSI-B16.11 انجام پذیرند.
- استاندارد مواد مورد استفاده در گرمکن

مواد مصرفی باید مطابق با استانداردهای زیر استفاده گردند:

- سیم‌پیچ‌ها و هدرها مطابق با استاندارد ASTM A-53 Grade B
- فیت‌کاری‌ها طبق استاندارد ASTM A-234
- فلنج‌ها مطابق استاندارد ASTM A-105 یا ASTM A-181
- پوسته، تانک انبساط، محافظ‌ها، دودکش و پایه‌ها مطابق ASTM SA-336
- لوله آتش سیستم مطابق استاندارد ASTM A-53 با ضخامت دیواره یک‌چهارم اینچ برای قطرهای ۲۴ اینچ به پایین و ضخامت ۰.۳۱۲ اینچ برای قطرهای ۲۶ اینچ به بالا
- استاندارد مربوط به پوسته گرمکن

استاندارد مربوط به پوسته گرمکن به شرح ذیل هستند:

- یک مخزن انبساطی در بالای پوسته گرمکن گاز بایستی با اتصال و آب‌بندی مناسب نصب گردد.
- یک شیر توپی ۲ اینچی بایستی با فلنجی کور شده (سرپوشیده) در زیر پوسته برای اهداف تخلیه‌ای تعبیه گردد.
- پوسته می‌بایست با عایق‌کاری فایبرگلاس (دارای ضخامت ۵۰ میلی‌متر) عایق‌بندی شده و بجز کلگی‌های گرمکن با یک پوشش آلومینیومی محافظت گردد.
- استانداردهای سیم‌پیچ
 - سیم‌پیچ بایستی قابلیت جداکردن را دارا بوده و بعلاوه در برابر انبساط گرمایی محافظت شود. همچنین ماکزیمم سرعت مجاز برای گازهای عبوری نباید از ۲۰ متر بر ثانیه تجاوز کند.
- استانداردهای مشعل گرمکن
 - مشعل‌های گرمکن می‌بایست در موارد ذیل نیز استانداردسازی شوند:
 - هر مشعل باید با شمعک و سیستم کنترل مجزا تجهیز گردد.
 - مشعل و شمعک باید از گاز پیش‌گرم شده استفاده کنند.
 - روزه مناسب روی گرمکن باید به گونه‌ای تعبیه گردد که عملکرد مشعل و شمعک از بیرون گرمکن براحتی قابل مشاهده باشد.
 - تمیزکاری مشعل باید راحت و با کمترین نیاز به بازکردن سیستم انجام شود.
 - قطع‌کننده‌ی اتوماتیک جریان گاز برای مشعل و شمعک باید با وسیله قطع دستی آن نیز مجهز گردد.
 - مشعل‌ها و شمعک‌ها باید قابلیت جداشدن از گرمکن را داشته باشند.
 - شمعک بایستی با الکتروود جرقه‌زنی و پروب تشخیص شعله‌اش قابل جداشدن باشد.
 - ماکزیمم سرعت مجاز گاز عبوری از مشعل ۲۰ متر بر ثانیه می‌باشد.
 - یک محبوس‌کننده شعله از جنس فلز مقاوم در برابر خوردگی باید برای محافظت در برابر حوادث غیرمترقبه تعبیه گردد.
 - شمعک باید جرقه‌زنی نرمی داشته و باعث پایداری شعله در تمامی مودهای کارکرد گرمکن شود.
- استانداردهای کنترل و ابزار دقیق مربوط به گرمکن

استانداردهای کنترل و ابزار دقیق مربوط به گرمکن مطابق موارد ذیل می‌باشند:

- کنترل‌کننده‌ها، کتاکتورها، سویچ‌کننده‌ها و تشخیص‌دهنده‌ها باید به‌طور مجزا سوار شده، تست گشته و کالیبره گردند. تمامی این تجهیزات به‌همراه میکروسوئیچرها باید در جعبه‌ای مونتاژ گشته و درب آن جعبه قفل شود. پایانه‌های (ترمینال‌های) الکتریکی باید با یک پیچ قفل‌کن مجهز باشند.
- گرمکن‌ها بایستی برای نگهداری دمایی خاص در گاز و بخارات آن به‌هنگام خروج از سیستم اتوماتیک کنترل شوند.
- کنترل فرایند اساساً باید مطابق با دیاگرام کنترلی P & I باشد.
- کلیه شیرهای اطمینان تخلیه و قطع جریان باید از حیث خرابی ایمن باشند.
- هر ابزار دقیقی باید با یک صفحه مشخصات به‌طور منفرد معرفی شود.
- محافظت از ابزارآلات کنترلی در برابر باران، گردوخاک و یخ‌زدگی می‌بایستی به‌طور کامل انجام پذیرد.
- ابزارآلات کنترلی بایستی برای مقاومت در برابر ماکزیمم فشار و دمای پیش‌بینی شده طراحی شوند.
- شرایط تحت کنترلی باید برای هر کنترل‌کننده‌ی فرایندی فراهم گردد.
- تشخیص‌دهنده‌ی دما باید از نوع دو فلزی و دارای صفحه‌ی مدرج ۱۰۰ میلی‌متری بوده و سربسته و عایق‌بندی شده باشد.
- فشارسنج‌ها باید از نوع لوله استیلی و چرخ‌دنده‌ی دوار استیلی و ضدزنگ بوده و دارای قطر صفحه‌ی مدرج ۱۰۰ میلی‌متر باشند. هردو مقیاس bar و psi در صفحه آنها باید وجود داشته باشند.
- شیر تخلیه مناسبی برای اجازه انجام تست باید نصب گردد.
- شیرهای کنترلی می‌بایست متشکل از اجزای فولادی آهنگری یا ریخته‌گری شده بوده و کمترین اندازه بدنه 3/4 in می‌باشد.
- جعبه کنترلی باید با باتری ۱۲ ولت جریان مستقیم (DC) تغذیه شده و برای ابقای مشعل جرقه‌زنی اتوماتیک، باز شدن شیر سلنوئیدی شمعی و دوباره روشن شدن شمعی در صورت خاموشی احتمالی مشعل لازم است.
- شیرهای اصلی و قطع‌کن جریان به‌هنگام خاموشی مشعل باید بسته شوند.
- منبع تغذیه ۱۲ ولتی گرمکن بایستی با یک شارژکن برقی ۲۲۰ ولت AC و ۵۰ هرتز تجهیز گردد.

- استانداردهای لوله آگزوز

استانداردهایی که باید برای طراحی آگزوز در نظر گرفته شوند عبارتند از:

- آگزوزی که در نظر گرفته می‌شود بایستی با ارتفاع و قطری مناسب برای ماکزیمم نیازهای اولیه طرح گرمکن و با حداقل ۳ میلی‌متر ضخامت دیواره تعبیه گردد.
- وسیله و ابزاری که مانع به پایین برگشتن دودها شده و از جنس فلز سبک مقاوم در برابر خوردگی ساخته می‌شود باید بر روی دودکش نصب نمود.
- دودکش باید به‌گونه‌ای طراحی گردد که گرمکن در بین ۲۵ تا ۱۰۰٪ بازدهی طراحی فعالیت داشته باشد.
- آگزوز باید دارای یک محافظ برای جلوگیری از سوختن دست در تماس‌های اتفاقی به بدنه آن داشته باشد.
- سه اتصال برای نصب نمونه‌گیر گاز، خروجی سنج اولیه، دماسنج روی دودکش باید تعبیه گردد.
- برای دودکش، هواکش مناسب باید در نظر گرفته شود.
- سه حلقه باید روی دودکش برای نصب سیم‌های مهار جهت محافظت در برابر قدرت باد باید در نظر گرفته شود. حلقه‌های مشابه برای بلندکردن دودکش باید در آن تعبیه گردد.
- جهت خارج ساختن خاروخاشاک و گردو خاک، یک فلنج کور شده مناسب باید در پایینترین نقطه آگزوز تعبیه گردد.
- تست گرمکن

استانداردهایی جهت تست یک گرمکن نیز وجود دارد که در ذیل می‌آیند:

- سیم‌پیچ‌های گرمکن می‌بایست قبل از محموله‌شدن مطابق با استانداردهای ASME تست گردند. خریدار حداقل ۳۰ روز قبل از تست باید مطلع گردد.
- علاوه بر تست‌های ASME برای نمونه‌گیری‌های هیدرواستاتیک، اندازه‌گیری‌ها و موارد زیر روی گرمکن باید انجام گیرند:
- آب شیر تجاری که با یک پرده ۱۰۰ مشی بدون عوامل خیس‌کننده اضافی فیلتر می‌شود با ایجاد موانع زنگ‌زدگی یا رنگ‌های فلورسنت بعنوان ماده انجام تست هیدرواستاتیک انتخاب گردد.
- فشار وزن مرده هر ۱۵ دقیقه ثبت گردد.

- قبل از تست همه روزنه‌ها کور شده، بسته گشته یا کلاهیک‌گذاری شود.
- هر سیم‌پیچ گرمکن باید مقاوم در برابر فشار بدون حضور شکست، نشت، آشفته‌گی و یا اعوجاج در طول تست باشد.
- به هنگام اجازه مونتاژ بدون نشت، تست باید مورد تأیید خریدار قرار گیرد.
- گرمکن‌ها باید برای نشتی و مقاومت در برابر بار کامل (هنگام پر شدن از آب) تست گردند.
- موارد ذیل باید به صورت اطلاعات جامع در اختیار خریدار قرار گیرد:
 - تاریخ انجام تست
 - شماره سفارش خرید و کالا
 - مقصد بار و محموله (موقعیت خریدار)
 - شماره سریال سیم‌پیچ
 - امضای شاهد تست فروشنده و/یا نماینده خریدار
 - دوره انجام تست
 - دمای محیطی
 - اطلاعات فشارهای وزن مرده
- مختصری از نتایج انجام تست شامل کلیه شکستگی‌ها و ترمیم‌های آنها در صورت وجود عیوب
- تست‌های الکتریکی و ابزار دقیق باید شامل بارها، سیگناها و هر آلارم ابزاری شبیه‌سازی باشند.
- استانداردهای رنگ‌کاری
 - درمورد رنگ‌کاری باید استاندارد سوئدی 055900 Grade SA3 رعایت شده و پوشش باید از جنس سیلیکات روی با ضخامت فیلم ۱۵۰ میکرون باشد.
 - نظارت و بازرسی
 - در مورد نظارت و بازرسی نیز استانداردهای زیر باید مورد ملاحظه واقع شوند:
 - به نماینده مجاز خریدار باید فرصت و اجازه گواهی در مورد تست اجزای گرمکن داده شود.
 - در موعد بازرسی رادیوگراف‌ها باید برای نماینده مجاز خریدار مهیا گردند.

- تولیدکننده باید کلیه استانداردهای مربوط به بویلر و ظرف فشار ASME را در بازرسی رعایت نماید.
- هر گرمکن قبل از بارگیری و محموله‌سازی توسط نماینده مجاز خریدار بازرسی گردد.
- گواهینامه بازرسی مواد با گزارش تست باید به N.I.G.C تحویل داده شود.
- مارک کردن

استانداردهای مارک نمودن گرمکن‌ها به شرح ذیل هستند:

- هر گرمکن باید با صفحه مشخصات همیشگی مربوط به نحوه مقاومت در برابر خوردگی مجهز شود. این صفحه باید بعد از تحویل و نصب به راحتی قابل رؤیت باشد.
- هر مارک‌سازی روی گرمکن باید مطابق ASME و شامل اطلاعات ذیل باشد:
 - نام سازنده گرمکن
 - سال تولید
 - شماره سریال
 - جذب گرمایی روی سیم‌پیچ (بر حسب Kcal/H یا Btu/H)
 - تعداد سیم‌پیچ‌ها و تعداد مسیرهای جریان
 - ضخامت دیواره سیم‌پیچ، قطر بیرونی و تعداد لوله‌های سیم‌پیچ در طرح
 - مساحت سطح بیرونی کویل (سیم‌پیچ)
 - وزن کویل
 - فشار تست هیدرواستاتیک
 - شماره سفارش خرید
 - وزن پوسته (خالی و پر) بر حسب کیلوگرم
 - ظرفیت حمام آبی (لیتر)
 - ظرفیت (lit) مخزن انبساطی
- داده‌ها و نقشه‌ها
- مواردی که در ذیل می‌آیند در مراحل سفارش و خرید باید برای خریدار فراهم گردند:
 - دیتاشیت (اطلاعات) N.I.G.C تکمیل شده توسط فروشنده

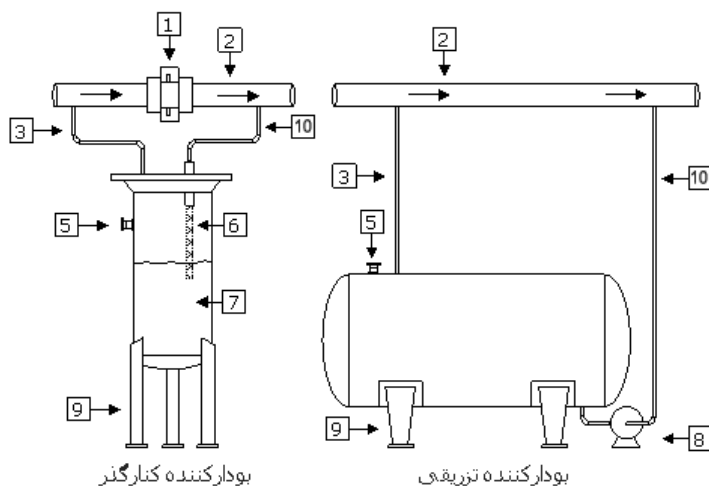
- طرح‌های مدیریتی حاوی ابعاد و وزن‌ها
- نماهایی داخلی و سطح مقطعی از داخل گرمکن
- لیستی از یدکی‌های پوشیده شده و بسته‌بندی شده با قیمت واحدشان که بطور پیشنهادی و دستورالعملی اولیه برای دو سال فعالیت سیستم لازم هستند.
- ارائه ترتیب‌دهی نهایی و جزئیات نقشه‌ها
- کاتالوگ‌های مفهومی و دیتای تکنیکال ابزارآلات فراهم شده
- دستورالعمل‌های نصب و راه‌اندازی
- راهنماهای نگهداری سیستم
- مشخصه‌ها و استانداردهای بسته‌بندی
- مشخصه‌ها و استانداردهای بسته‌بندی گرمکن حمام آبی غیرمستقیم مطابق دستورالعمل N.I.G.C به شرح ذیل می‌باشند:
- همه ابزارآلات کنترل و ابزار دقیق باید در جعبه‌های چوبی و با اندازه مناسب بسته‌بندی شوند.
- کلیه خطوط حسگر (بجز آنهایی که با ابزارآلات بسته‌بندی می‌شوند) باید از حالت مونتاژ باز شده و با پوشش مناسب و به‌صورت پیچیده در مواد پلاستیکی گرداگرد پوسته گرمکن قرار داده شوند طوری که در طول جابجایی آسیبی نبینند.
- بسته‌بندی پوسته لازم نیست.
- کلیه قطعاتی از گرمکن که به‌شکل مجزا بسته‌بندی شده‌اند باید با خود گرمکن محموله‌سازی شده و حمل و نقل گردند.
- پس از تأیید تست مجزا کردن باید صورت پذیرد.
- تولیدکننده بایستی مطلوبیت قطعات و عملکرد تجهیزات گرمکن را گارانتی (ضمانت) نماید.
- دوره گارانتی باید یک سال پس از به جریان افتادن گرمکن یا ۱۸ ماه پس از محموله‌سازی گرمکن و تاریخ حمل آن (هرکدام که زودتر اتفاق افتادند) باشد.
- لازم است تولیدکننده نسبت به تعمیر و جایگزینی هر قطعه و تجهیزاتی که معیوب هستند در دوره گارانتی اقدام نماید.
- در پیوست الف گزارش این ماه برخی از جداول مربوط به استانداردهای گرمکن (مربوط به N.I.G.C) ارائه می‌گردند.

۳.۷.۳ استانداردهای طراحی واحد بوزنی به گاز

گاز طبیعی در حالت اصلی خود بدون بو بوده و بودار کردن گاز طبیعی به منظور حفاظت از مصرف‌کننده انجام می‌گیرد و در اصل نشان‌دهنده نشتی گاز است. معمولاً این کار با استفاده از دو نوع متفاوت بودار کننده به شرح زیر انجام می‌شود:

- بودارکننده نوع کنارگذر^{۱۵}
- بودارکننده نوع تزریقی^{۱۶}
- بودارکننده نوع قاشقکی^{۱۷}

بودارکننده‌های کنارگذر (by-pass) بر اساس فرآیند جذب عمل می‌کنند به‌طوری‌که جریان گاز ناچیزی از خط لوله اصلی وارد بودار کننده شده و سپس گاز بودار شده به خط لوله اصلی برمی‌گردد و با قسمت اصلی جریان گاز مخلوط می‌شود طوری که نهایتاً مقدار مجاز ادورانت در لوله اصلی گاز باید در حدود ۱۰ تا ۲۵ میلی‌گرم در هر متر مکعب استاندارد گاز باشد. یک اریفیس در خط لوله اصلی گاز نصب شده تا اختلاف فشار بین ۱ تا ۳ پوندبراینچ مربع ایجاد کند. این اختلاف فشار باعث فعالیت ادورایزر (بودارکننده) شده و همچنین رابطه مستقیمی بین مقدار جریان کنار گذر و جریان اصلی گاز ایجاد می‌کند.



شکل ۳-۹: شماتیک بودارکننده

- (۱- اریفیس بزرگ؛ ۲- خط لوله اصلی؛ ۳- ورودی گاز؛ ۴- خروجی گاز؛ ۵- ورودی مایع بودار کننده؛ ۶- فنیله؛ ۷- مایع بودار کننده؛ ۸- پمپ تزریق؛ ۹- پایه)

¹⁵ By-pass odorizer

¹⁶ Injection odorizer

¹⁷ Meter driven odorizer

اما در بودارکننده‌های تزریقی مقدار مشخصی از مادهٔ بودار کننده (۱۰ تا ۲۵ میلی گرم در هر متر مکعب گاز) توسط پمپ به خط لولهٔ اصلی تزریق می‌شود. با توجه به تعداد پالس‌های ارسالی از کنتورهای گاز به کنترل پانل، فرمان تزریق توسط کنترل پانل به پمپ ارسال می‌گردد. شماتیک یک بودارکننده مطابق شکل ۳-۹ می‌باشد.

استانداردهای مربوط به بودارکننده‌های مختلف در ادامه می‌آید. در مورد بودارکننده کنارگذر باید استانداردهای ذیل مطابق امور تدوین استانداردهای شرکت گاز (IGS-PM-100(0)) رعایت گردند:

• استانداردها و کدهای بودارکننده کنارگذر

کدها و استانداردهای عمومی و مرتبط این سیستم عبارتند از:

- کلیه فلنج‌کاری‌ها و لوله‌کاری‌های فولادی مطابق استاندارد ANSI-B16.5 انجام گیرند.
- جوش‌کاری‌ها و فیت‌کاری‌ها بایستی مطابق با استاندارد ANSI-B16.11 انجام پذیرند.
- نیازمندی‌های کلی‌ای که لازم هستند در طراحی چنین بودارکننده‌ای اتخاذ گردند به شرح زیرند:
- این مدل از بودارکننده‌ها باید بتوانند در زیر نور مستقیم آفتاب و باران فعالیت نمایند.
- مقاومت در برابر فشار داخلی سیستم بوزنی، وزن ظرف، باد، زمین‌لرزه، ضربه و دما از لازمه‌های طراحی بودار کننده است.
- ماکزیمم ظرفیت باید ۱۰۰۰۰ مترمکعب استاندارد گاز بر ساعت باشد.
- با استفاده از جریان به‌عنوان کنترل، یک شیر پروانه‌ای فلنج‌شده در خط اصلی برای ایجاد اختلاف فشار مناسب لازم است.
- شیر پروانه‌ای باید با فلنج‌های لازم و پیچ‌های میله‌ای توسط تولیدکننده فراهم گردد.
- تانک بودارکننده باید از استیل کرینی ASTM A516 Grade 70 که با اپوکسی ۳۰۰ میکرون پوشیده می‌شود ساخته شود (مطابق BS 5493).
- تانک بودارکننده باید با شیرهای اطمینان مناسب (مطابق با استانداردهای ASME) همراه با شیرهای بلوکی (شیر چندقلو) قابل قفل و فیلتر مناسب زغالی تجهیز شود.
- شیر تخلیه باید با فیلتر زغالی مناسب کامل شود.
- کلیه واحدهای بوزنی باید پایه و دسته‌های مناسب برای دستکاری، حمل و نقل و جابجایی داشته باشند.
- ماکزیمم فشار کار مناسب باید توسط پوسته و کلگی سیستم و خصوصیات آنها محدود گردد.

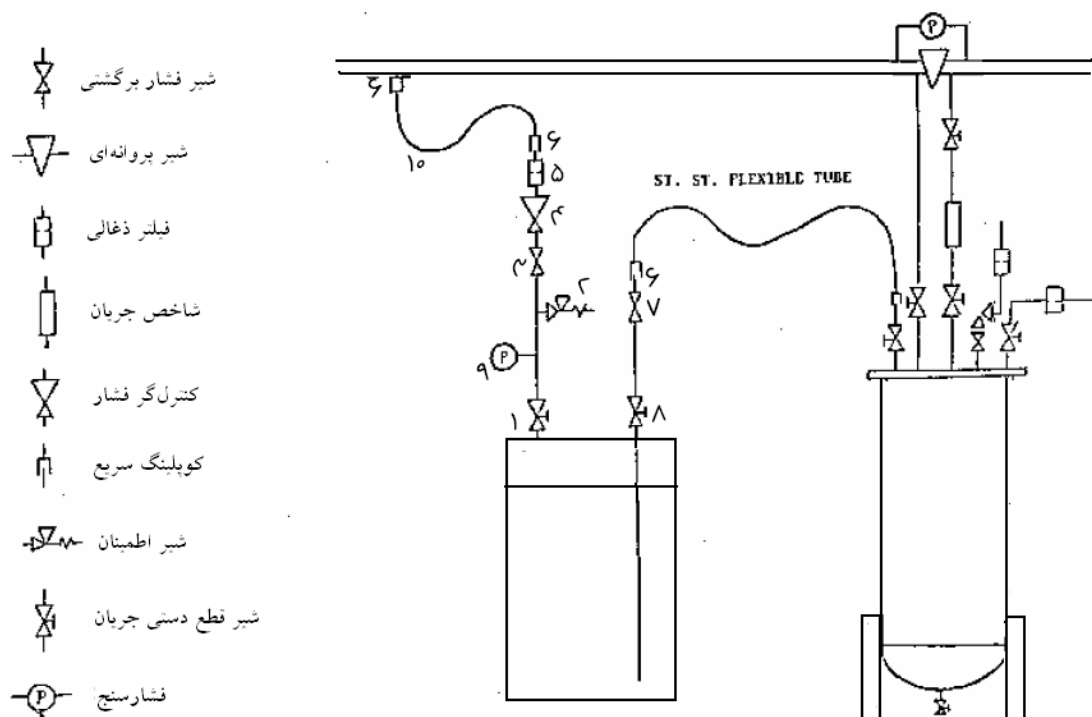
- تولید و ساخت واحد بوزنی نبایستی قبل از وصول اجازه خریدار درباره نقشه‌ها و محاسبات طرح‌ها شروع شود.
- کلیه قطعات فشاری و غیرفشاری‌ای که مستقیماً به پوسته جوش خورده‌اند یا به هر طریق غیر قابل جدا شدن هستند یا باید با مواد اضافی مقاوم در برابر خوردگی باشند یا از خود مواد مقاوم در خوردگی تولید شوند. قطعات فشاری قابل تعویض از این قضیه مستثنی هستند.
- موقعیت و کمترین اندازه جوش از نازل‌ها و دیگر اتصالات باید مطابقت با نیازهای تعریف‌شده در کدهای کاربردی بوده و هر مقاومت خوردگی لازم برای اتصالات بالا نیز مطابق با کد همان نوع اتصالات باشد.
- سوراخ‌کاری در پوسته و کلگی باید مطابق با کدهای کاربردی و مناسب برای فشار و دمای نوشته شده روی ظرف بوزنی باشد.
- ظرف بوزنی باید تجهیزات اولیه‌ای را بمنظور دسترسی داشتن به داخل ظرف برای بازرسی داشته باشد.
- بودارکن کنارگذر باید بوسیله پایه‌ها یا دسته‌های مناسب تجهیز گردد.
- لوله‌کشی مدل ۳۱۶ استیل ضدزنگ باید استفاده شود.
- هر مخزن بوزنی باید با موتناژ مناسب تجهیز شود. شیشه گیج (شاخص) باید تمیز باقی مانده و خوانا باشد؛ نباید این شاخص در اثر عملکرد بوزنی و یا اشعه آفتاب لکه‌دار گردد و توسط یک محافظ مناسب تجهیز شود.
- شاخص فشاری باید برای تنظیم درست فشار در طول شیر پروانه‌ای آماده باشد
- تانک‌های بودارکن باید برای جریان ماکزیمم و سه ماه فعالیت مداوم اندازه‌زده و طراحی شود. (به عبارتی هر تانک بایستی در فواصل سه ماهه تخلیه گردد)
- کلیه جوش‌ها باید با فرآیند جوش فلز حفاظت شده یا جوش اتوماتیک / نیمه‌اتوماتیک با الکترودهای سازگار با مواد ساخت ظرف بوزن و مطابق با کدهای کاربردی مناسب انجام شوند.
- تولیدکننده باید ساخت و کیفیت الکترودهای جوش را جهت پیشنهاد در ساخت بوزن مشخص کند. بدون اجازه و تأیید خریدار و قبل از آن جوش‌کاری‌ها نباید انجام گیرند.
- کلیه نازل‌ها، سوراخ‌های ورود و اتصال‌های کوچک با استحکام‌سازی‌شان باید با جوش‌های مناسب به ظرف بوزنی متصل گردند.

- جوش‌های جانبی باید طوری واقع شوند که بازرسی ظرف بوزنی براحتی انجام پذیرد.
- عملیات حرارتی مطابق با استانداردهای ASME برای ظروف تحت فشار باشد.
- کلیه سطوح فلنجی و یا اتصالات پیچی باید از زنگ‌زدگی و اکسایش به هنگام عملیات حرارتی محافظت شوند.
- اگر فلنج جوشی به کار رفته باشد بعد از برطرف کردن تنش، جوشکاری مجاز نمی‌باشد.
- ماده بودار کننده باید تتراهیدروتیوفن (با فرمول شیمیایی C₄H₈S) یا مرکپتان باشد.
- نرخ بوزنی برای T.H.T. (تتراهیدروتیوفن) بین ۱۵ تا ۲۵ میلی‌گرم برای هر متر مکعب استاندارد گاز است.
- نرخ بودارکن برای مرکپتان بین ۱۰ تا ۲۰ میلی‌گرم برای هر متر مکعب استاندارد گاز است. ترکیبات مرکپتان به صورت ۸۰٪ مرکپتان ایزوپروپیل و ۱۰٪ مرکپتان N-پروپیل و ۱۰٪ مرکپتان ترتیاری بوتیل است.
- به نماینده مجاز خریدار باید فرصت و اجازه گواهی در مورد تست اجزای بودارکن داده شود.
- تولیدکننده باید کلیه استانداردهای مربوط به بویلر و ظرف فشار ASME را در بازرسی رعایت نماید.
- علاوه بر حق لازم و اجباری بازرسی کدهای ASME توسط مشتری، بازرسی کلیه قطعات و مواد نیز بر حسب نیاز مجاز می‌باشد.
- قبل از بازرسی نهایی، کلیه تفاله‌ها و سربارهای ذوب، مواد زائد، خرده‌ریزها، سنگریزه‌ها، تکه‌های جوشکاری، مواد نفتی و دیگر مواد خارجی باید کاملاً استخراج گردند.
- آزمون رادیوگرافی روی ظرف بوزنی باید مطابق با استاندارد ASME صورت پذیرد.
- هر بوزن کنارگذر قبل از بارگیری و محموله‌سازی توسط نماینده مجاز خریدار بازرسی شده و نکات مناسب درباره بازرسی توسط فروشنده تحویل مشتری گردد.
- گواهینامه بازرسی مواد با گزارش تست باید به N.I.G.C تحویل داده شود؛ بعلاوه فروشنده باید دسترسی آزاد و آسانی به خریدار جهت امور گواهی داشته باشد.
- بوزن‌ها بایستی مطابق با آخرین کدها و استانداردهای مخازن تحت فشار و بویلرهای ASME مراحل طراحی، تولید، بازرسی و تست را طی کنند.
- کلیه تست‌ها باید شماره سفارش و نام خریدار را شامل شوند.

- در مورد رنگ‌کاری باید استاندارد سوئدی sts 055900 Grade SA3 رعایت شده و پوشش باید از جنس سیلیکات روی با ضخامت فیلم ۱۵۰ میکرون باشد.
- به نماینده مجاز خریدار باید فرصت و اجازه گواهی در مورد تست اجزا داده شود.
- در موعد بازرسی رادیوگراف‌ها باید برای نماینده مجاز خریدار مهیا گردند.
- تولیدکننده باید کلیه استانداردهای مربوط به بویلر و ظرف فشار ASME را در بازرسی رعایت نماید.
- هر سیستم بوزنی باید با صفحه مشخصات همیشگی مربوط به نحوه مقاومت در برابر خوردگی مجهز شود. این صفحه باید بعد از تحویل و نصب به راحتی قابل رؤیت باشد.
- هر مارک‌سازی روی گرمکن باید مطابق ASME و شامل اطلاعات ذیل باشد:
 - نام سازنده گرمکن
 - سال تولید
 - شماره سریال
 - فشار تست هیدرواستاتیک
 - فشار طراحی
 - فشار تنظیم شیر اطمینان (Kg/cm²)
 - دمای طراحی
 - شماره سفارش خرید
 - وزن تانک (خالی و پر) بر حسب کیلوگرم
 - ظرفیت تانک (lit)
- دیتاشیت (اطلاعات) N.I.G.C تکمیل شده توسط فروشنده باید ارائه گردد.
- طرح‌های مدیریتی حاوی ابعاد و وزن‌ها باید ارائه گردند.
- لیستی از یدکی‌های پوشیده شده و بسته‌بندی شده با قیمت واحدشان که بطور پیشنهادی و دستورالعملی اولیه برای دو سال فعالیت سیستم لازم هستند.
- ترتیب‌دهی نهایی و جزئیات نقشه‌ها ارائه گردند.
- کاتالوگ‌های مفهومی و دیتای تکنیکال ابزارآلات فراهم شده باید ارائه شوند.
- حتماً دستورالعمل‌های نصب و راه‌اندازی به خریدار داده شوند.
- راهنماهای نگهداری سیستم به خریدار تحویل داده شوند

- برای هر بودارکن گاز بسته‌بندی بایستی مطابق با دستورالعمل حفاظتی، بسته‌بندی، و مارک‌سازی N.I.G.C باشد.
- کلیه سطوح داخلی و خارجی قبل از بسته‌بندی و احياناً حمل با کشتی باید خشک شده و کلیه مایعات مربوط به تست‌های مختلف خارج گردند.
- به هنگام بسته‌بندی، کلیه فلنج‌های باز با پوشش‌های استیلی مناسب محافظت شده و سوراخ‌های شیردار با درپوش‌هایی که به داخل آنها پیچ خورده است محافظت گردند.
- تولیدکننده بایستی مطلوبیت قطعات و عملکرد تجهیزات گرمکن را گارانتی (ضمانت) نماید.
- دوره گارانتی باید یک سال پس از به جریان افتادن گرمکن یا ۱۸ ماه پس از محموله‌سازی گرمکن و تاریخ حمل آن (هرکدام که زودتر اتفاق افتادند) باشد.
- لازم است تولیدکننده نسبت به تعمیر و جایگزینی هر قطعه و تجهیزاتی که معیوب هستند در دوره گارانتی اقدام نماید.

در شکل ۳-۱۰ نقشه تیپی از یک بودارکن کنارگذر ارائه شده است.



شکل ۳-۱۰: نقشه شماتیک بودارکن گاز

- استانداردها و کدهای بودارکننده تزریقی

در مورد بودارکن نوع تزریقی موارد و استانداردهای ذیل (برگرفته از امور تدوین استانداردهای شرکت گاز و با کد IGS-PM-101(0) باید رعایت گردند:

- کلیه فلنج‌کاری‌ها و لوله‌کاری‌های فولادی مطابق استاندارد ANSI-B16.5 انجام گیرند.
- جوش‌کاری‌ها و فیت‌کاری‌ها بایستی مطابق با استاندارد ANSI-B16.11 انجام پذیرند.
- گسکت‌ها مطابق با استاندارد ANSI-B 16.20 و پیچ‌کاری‌ها مطابق با استاندارد

ANSI-B 18.2 و B 2.2

نیازمندی‌های کلی‌ای که لازم هستند در طراحی چنین بودارکننده‌ای اتخاذ گردند به شرح زیرند:

- طراحی و تولید بودارکننده باید برای نصب بیرون از ساختمانی و نیز شرایط ناسازگار محیطی در طول سال مناسب باشد
- مقاومت در برابر فشار داخلی سیستم بوزنی، وزن ظرف، باد، زمین‌لرزه، ضربه و دما از لازمه‌های طراحی بودارکننده است.
- تانک بودارکننده باید از استیل کربنی ASTM A516 Grade 70 که با اپوکسی ۳۰۰ میکرون پوشیده می‌شود ساخته شود (مطابق استاندارد N.I.O.C یعنی IPS-M-TP-215,220 & 225 (1993).
- کلیه واحدهای بوزنی باید پایه و دسته‌های مناسب برای دستکاری، حمل و نقل و جابجایی داشته باشند.
- ماکزیمم فشار کار مناسب باید توسط پوسته و کلگی سیستم و خصوصیات آنها محدود گردد.
- تولید و ساخت واحد بوزنی نبایستی قبل از وصول اجازه خریدار درباره نقشه‌ها و محاسبات طرح‌ها شروع شود.
- کلیه قطعات فشاری و غیرفشاری‌ای که مستقیماً به پوسته جوش خورده‌اند یا به هر طریق غیر قابل جدا شدن هستند یا باید با مواد اضافی مقاوم در برابر خوردگی باشند یا از خود مواد مقاوم در خوردگی تولید شوند. قطعات فشاری قابل تعویض از این قضیه مستثنی هستند.
- موقعیت و کمترین اندازه جوش از نازل‌ها و دیگر اتصالات باید مطابقت با نیازهای تعریف‌شده در کدهای کاربردی بوده و هر مقاومت خوردگی لازم برای اتصالات بالا نیز مطابق با کد همان نوع اتصالات باشد.
- شیر تخلیه و فیلتر زغالی مناسب باید تعبیه گردند.

- تانک بودارکن تزریقی باید به‌گونه‌ای طراحی گردد که مقدار لازم ماده بودار برای یک ماه فعالیت مداوم ایستگاه دروازه شهری CGS (گزارش مهرماه ۸۷) در ماکزیمم دبی خط در خود ذخیره سازد.
- بودارکن باید به‌گونه‌ای طراحی گردد که دوز مشخصی از ماده بودار را به خط گاز تزریق نموده و این طراحی بر اساس دبی فعالیت کامل انجام گیرد.
- ماکزیمم فشار کاری تانک بودار کننده باید روی ۳۰ پوند بر اینچ مربع باشد.
- واحد فشار در این بودارکن شامل موارد ذیل شود:
 - یک کویلینگ سه‌چهارم اینچ برای عایق‌کاری و تخلیه سریع
 - یک فیلتر
 - یک کنترل‌کننده فشار با خروجی ۵ پوندبراینچ مربع نسبی
 - یک شیر اطمینان سه‌چهارم اینچ
 - فشارسنج
- کلیه مؤلفه‌های کنترلی باید در جعبه کنترلی مقاوم در برابر انفجار قرار داده شوند.
- یک فیلتر ۵ میکرونی باید در بالادست پمپ تزریق تعبیه گردد.
- هر بودارکن تزریقی باید با یک بورت اندازه‌گیری مناسب برای کالیبراسیون پمپ و نیز یک شاخص سطح فعلی تانک مناسبت و تطابق داده شود؛ این امور نباید در برابر اثرات عملکرد بوزنی و یا اشعه آفتاب لکه‌دار گردند و توسط یک محافظ مناسب تجهیز شوند.
- کلیه قطعات در تماس با ماده بودارکن باید مقاوم در برابر این ماده باشند.
- پمپ تزریق باید به گونه‌ای اندازه‌سنجی شود که ماکزیمم نرخ تزریق ۲۵ میلی‌گرم بودارکن را برای هر مترمکعب استاندارد جریان گاز فراهم نماید.
- کنترل‌ها باید با استفاده از سیگنال‌های دریافتی از دبی‌سنج (توربینی یا اوریفیسی) برای کنترل پمپ بکار گرفته شوند.
- هر بودارکن باید با یک واحد تولید پالس اضطراری کامل شود که در حالت‌های خرابی و از کار افتادگی در پالس‌های اصلی سیستم، این پالس اضطراری وظیفه راه‌اندازی دستی واحد را برعهده گیرد.

- پمپ تزریق باید از نوع سلنوییدی که با دیافراگم هیدرولیکی بدون آب‌بند کار می‌کند، باشد.
- یک نازل تزریق‌کن برای فیت‌کردن خط اصلی برای هر واحد فراهم گردد.
- نازل تزریق‌کن باید با یک شیر غیربرگشتی توپی ۳/۴ اینچ (برای دبی‌های ۵۰۰۰ مترمکعب استاندارد بر ساعت به بالا) و یا ۱/۲ اینچ (برای دبی‌های زیر ۵۰۰۰ SCM³H) و یک شیر قطع جریان مناسب همراه با یک لوله سوراخ‌دار تزریق (برای یک تزریق یکنواخت ماده بودار به جریان گاز) تجهیز گردد.
- پمپ، کابینت کنترل و سوئیچ اتوماتیک/دستی تغییر باید در مقابل انفجار مقاوم باشند. (مطابق با کلاس EEX e II T4)
- سیستم باید به گونه‌ای طراحی و تجهیز گردد که بوسیله منبع تغذیه ۲۲۰ ولت AC و ۵۰ هرتز تک‌فاز کار کند.
- پیوستگی برقی بوسیله ابزار و امکاناتی که کاربر سیستم بودارکننده فراهم می‌سازد خواهد انجام گرفت.
- سیستم UPS باید با منابع برقی محلی بر اساس اطلاعات تولیدکننده و نیز بر اساس استانداردهای نفتی ایران (IPS) و به شماره 1994 (0)-176-EL-IPS-M طراحی و تجهیز گردد.
- محدوده دمای کاری محیط باید از ۲۹- تا ۶۰+ درجه سانتیگراد در نظر گرفته شود. (مگر آنکه در دیتاشیت در حدودی دیگر باشد).
- سوراخ‌کاری در پوسته و کلگی باید مطابق با کدهای کاربردی و مناسب برای فشار و دمای نوشته شده روی ظرف بوزنی باشد.
- ظرف بوزنی باید تجهیزات اولیه‌ای را بمنظور دسترسی داشتن به داخل ظرف برای بازرسی داشته باشد.
- بودارکن تزریقی باید بوسیله پایه‌ها یا دسته‌های مناسب تجهیز گردد.
- لوله‌کشی مدل ۳۱۶ استیل ضدزنگ باید استفاده شود.

- هر مخزن بوزنی باید با مونتاژ مناسب تجهیز شود. شیشه گیج (شاخص) باید تمیز باقی مانده و خوانا باشد؛ نباید این شاخص در اثر عملکرد بوزنی و یا اشعه آفتاب لکه‌دار گردد و توسط یک محافظ مناسب تجهیز شود.
- شاخص فشاری باید برای تنظیم درست فشار در طول شیر پروانه‌ای آماده باشد
- تانک‌های بودارکن باید برای جریان ماکزیمم و سه ماه فعالیت مداوم اندازه‌زده و طراحی شود. (به عبارتی هر تانک بایستی در فواصل سه ماهه تخلیه گردد)
- کلیه جوش‌ها باید با فرآیند جوش فلز حفاظت شده یا جوش اتوماتیک/ نیمه‌اتوماتیک با الکترودهای سازگار با مواد ساخت ظرف بوزن و مطابق با کدهای کاربردی مناسب انجام شوند.
- تولیدکننده باید ساخت و کیفیت الکترودهای جوش را جهت پیشنهاد در ساخت بوزن مشخص کند. بدون اجازه و تأیید خریدار و قبل از آن جوش‌کاری‌ها نباید انجام گیرند.
- کلیه نازل‌ها، سوراخ‌های ورود و اتصال‌های کوچک با استحکام‌سازی‌شان باید با جوش‌های مناسب به ظرف بوزنی متصل گردند.
- جوش‌های جانبی باید طوری واقع شوند که بازرسی ظرف بوزنی براحتی انجام پذیرد.
- عملیات حرارتی مطابق با استانداردهای ASME برای ظروف تحت فشار باشد.
- کلیه سطوح فلنجی و یا اتصالات پیچی باید از زنگ‌زدگی و اکسایش به هنگام عملیات حرارتی محافظت شوند.
- اگر فلنج جوشی به کار رفته باشد بعد از برطرف کردن تنش، جوشکاری مجاز نمی‌باشد.
- ماده بودار کننده باید تتراهیدروتیوفن (با فرمول شیمیایی C₄H₈S) یا مرکاپتان باشد.
- نرخ بوزنی برای T.H.T. (تتراهیدروتیوفن) بین ۱۵ تا ۲۵ میلی‌گرم برای هر متر مکعب استاندارد گاز است.
- نرخ بودارکن برای مرکاپتان بین ۱۰ تا ۲۰ میلی‌گرم برای هر متر مکعب استاندارد گاز است. ترکیبات مرکاپتان به‌صورت ۸۰٪ مرکاپتان ایزوپروپیل و ۱۰٪ مرکاپتان N- پروپیل و ۱۰٪ مرکاپتان ترتیاری بوتیل است.

- در تزریق ماده بودارکننده، علاوه بر کلیه استانداردهای اجباری قبل در صورت لزوم همه مواد و تولیدات باید مطابق با گفته‌های تزریق خریدار باشد.
- تولیدکننده باید به‌طور منصفانه خریدار را از آمادگی انجام کلیه تست‌های تزریقی لازم و مطابق با کدها و مشخصه‌های صنعت قبل از بازدید این تست‌ها مطلع سازد.
- به نماینده مجاز خریدار باید فرصت و اجازه گواهی در مورد تست اجزای بودارکننده داده شود.
- تولیدکننده باید کلیه استانداردهای مربوط به بویلر و ظرف فشار ASME را در بازرسی رعایت نماید.
- علاوه بر حق لازم و اجباری بازرسی کدهای ASME توسط مشتری، بازرسی کلیه قطعات و مواد نیز بر حسب نیاز مجاز می‌باشد.
- قبل از بازرسی نهایی، کلیه تفاله‌ها و سرباره‌های ذوب، مواد زائد، خرده‌ریزها، سنگریزه‌ها، تکه‌های جوشکاری، مواد نفتی و دیگر مواد خارجی باید کاملاً استخراج گردند.
- آزمون رادیوگرافی روی ظرف بوزنی باید مطابق با استاندارد ASME صورت پذیرد.
- هر بوزن تزریقی قبل از بارگیری و محموله‌سازی توسط نماینده مجاز خریدار بازرسی شده و نکات مناسب درباره بازرسی توسط فروشنده تحویل مشتری گردد.
- گواهینامه بازرسی مواد با گزارش تست باید به N.I.G.C تحویل داده شود؛ بعلاوه فروشنده باید دسترسی آزاد و آسانی به خریدار جهت امور گواهی داشته باشد.
- بوزن‌ها بایستی مطابق با آخرین کدها و استانداردهای مخازن تحت فشار و بویلرهای ASME مراحل طراحی، تولید، بازرسی و تست را طی کنند.
- کلیه تست‌ها باید شماره سفارش و نام خریدار را شامل شوند.
- درمورد رنگ‌کاری باید استاندارد سوئدی sts 055900 Grade SA3 رعایت شده و پوشش باید از جنس سیلیکات روی با ضخامت فیلم ۱۵۰ میکرون باشد.
- به نماینده مجاز خریدار باید فرصت و اجازه گواهی در مورد تست تزریق داده شود.
- تولیدکننده باید کلیه استانداردهای مربوط به بویلر و ظرف فشار ASME را در بازرسی رعایت نماید.

- بودارکننده نوع تزریقی باید به صورت زیر تست گردد:
- بازرسی دیداری باید شامل اطلاعاتی از مهارت، رنگ‌کاری، مونتاژ و تولید باشد.
- گواهی‌نامه تست باید شامل گواهی در مورد مقاوم‌بودن پمپ، جعبه کنترلی، سوئیچ‌ها و دیگر قطعات الکتریکی در برابر انفجار به همراه گواهی تأیید اجزای کنترلی و شیر اطمینان باشد.
- تست عملکرد سیستم نیز باید برای محدوده‌ی ظرفیت موردنیاز و نیز فشار مشخص شده باشد. این تست به همراه تست‌های مربوط به شیر اطمینان و تست عملکرد انجام گیرد. نهایتاً باید به گواهی N.I.G.C. رسیده و گواهی‌نامه آن نیز به تأیید این شرکت برسد.
- هر سیستم بوزنی باید با صفحه مشخصات همیشگی مربوط به نحوه مقاومت در برابر خوردگی مجهز شود. این صفحه باید بعد از تحویل و نصب به راحتی قابل رؤیت باشد.
- هر مارک‌سازی روی گرمکن باید مطابق ASME و شامل اطلاعات ذیل باشد:
 - نام سازنده گرمکن
 - سال تولید
 - شماره سریال
 - شماره مدل و نوع پمپ
 - ماکزیمم ظرفیت پمپ تزریق (لیتر بر ساعت)
 - ماکزیمم حجم تاب‌خوردگی پمپ تزریق بر هر ضربه (سنتی متر مکعب)
 - سرعت پمپ تزریق (برحسب تعداد ماکزیمم ضربه بر ساعت)
 - ماکزیمم فشار تزریق پمپ (bar)
 - ولتاژ و فرکانس منبع تغذیه
 - دبی گاز (متر مکعب استاندارد بر ساعت)
 - ماکزیمم فشار عملکرد واقعی
 - ظرفیت تانک (lit)
- دیتاشیت (اطلاعات) N.I.G.C تکمیل شده توسط فروشنده باید ارائه گردد.
- دیاگرام جریان و ساختار عملکرد بایستی بر روی یک صفحه فلزی دائمی و به صورت پاک‌نشده حک گردد که این صفحه روی جعبه کنترل برای خریدار تعبیه می‌گردد.

- طرح‌های مدیریتی حاوی ابعاد و وزن‌ها باید ارائه گردند.
 - حتماً دستورالعمل‌های نصب و راه‌اندازی به خریدار داده شوند.
 - راهنماهای نگهداری سیستم بودارکننده به خریدار تحویل داده شوند
 - برای هر بودار کن گاز بسته‌بندی بایستی مطابق با دستورالعمل حفاظتی، بسته‌بندی، و مارک‌سازی N.I.G.C باشد.
 - کلیه سطوح داخلی و خارجی قبل از بسته‌بندی و احیاناً حمل با کشتی باید خشک شده و کلیه مایعات مربوط به تست‌های مختلف خارج گردند.
 - به هنگام بسته‌بندی، کلیه فلنج‌های باز با پوشش‌های استیلی مناسب محافظت شده و سوراخ‌های شیردار با درپوش‌هایی که به داخل آنها پیچ خورده است محافظت گردند..
 - تولیدکننده بایستی مطلوبیت قطعات و عملکرد تجهیزات گرمکن را گارانتی (ضمانت) نماید.
 - دوره گارانتی باید یک سال پس از به جریان افتادن گرمکن یا ۱۸ ماه پس از محموله‌سازی گرمکن و تاریخ حمل آن (هرکدام که زودتر اتفاق افتادند) باشد.
 - لازم است تولید کننده نسبت به تعمیر و جایگزینی هر قطعه و تجهیزاتی که معیوب هستند در دوره گارانتی اقدام نماید.
- در شکل ۳-۱۱ نمایی از یک دیتاشیت بودارکن نوع تزریقی نمایش داده شده است که باید برای هر بودارکن تزریقی تکمیل گردد.

1. MAX. & MIN. LINE PRESSURE KG/CM² PSIA.
2. MAX. & MIN. GAS TEMP DEG.C.
3. MAX. GAS FLOW SCM/H
4. DIAMETER OF GAS LINE INCH
5. TYPE OF THE GAS METER : () TURBINE () ORIFICE
6. ODORANT : MERCAPTAN
7. ODORANT CONCENTRATION 10 -25MG. PER SCM
8. INSTALLATION : OUTDOOR
9. INPUT SIGNAL (DIGITAL :) , (ANALOG :)
10. RELIEF VALVE SET PRESSURE 2.4 KG/CM² = 35 PSIA
11. MAX. DISTANCE FROM GAS METER TO CONTROL CABINET METERS
12. MAX. AMBIENT TEMP. DEG.C.
13. MIN. AMBIENT TEMP. DEG.C.
14. MAX. SUN TEMP. DEG.C.
15. MAX. RELATIVE HUMIDITY %
16. MAX. WIND VELOCITY KM/H
17. TOTAL ANNUAL RAINFALL MM
18. INDENT NO.ITEM NO.

شکل ۳-۱۱: نمایی از یک دیتاشیت بودارکن تزریقی

• استانداردها و کدهای بودارکننده قاشقکی

در ادامه به ارائه استانداردهای مربوط به بودارکن نوع قاشقکی پرداخته می‌شود. این استانداردها مطابق با دستورالعمل‌های مرکز امور تدوین استاندارد شرکت ملی گاز و با شماره IGS-PM-102 (0) می‌باشند. کدها و استانداردهای عمومی و مرتبط این سیستم عبارتند از:

- کلیه فلنج‌کاری‌ها و لوله‌کاری‌های فولادی مطابق استاندارد ANSI-B16.5 انجام گیرند.
- جوش‌کاری‌ها و فیت‌کاری‌ها بایستی مطابق با استاندارد ANSI-B16.11 انجام پذیرند.
- اتصالات چفتی و جوشی مطابق استاندارد ANSI- B16.11 انتخاب می‌گردند.
- واشرها (گسکت‌ها) مطابق با استاندارد ANSI-B 16.20 و پیچ و مهره‌ها مطابق ANSI-B 18.2 , B 2.2 انتخاب و طراحی می‌گردند.
- سایر قطعات به‌کار رفته در طراحی این بودار به‌شرح ذیل استانداردسازی و انتخاب می‌گردند:

➤ شیرآلات: NIGC-IGS-MS-PL-010, 019

➤ لوله‌کشی: ANSI-B31.8, B31.3

➤ رنگ‌کاری: NIOC-IPS-E-TP-100

➤ لوله فولادی بدون درز: ASTM A106

➤ پوشش‌های اپوکسی: NIOC-IPS-M-TP-215, 220, 225 (1993)

اما نیازمندی‌های کلی‌ای که لازم هستند در طراحی چنین بودارکننده‌ای اتخاذ گردند به شرح

زیرند:

- این مدل از بودارکننده‌ها باید بتوانند در زیر نور مستقیم آفتاب و باران فعالیت نمایند.
- مقاومت در برابر فشار داخلی سیستم بوزنی، وزن ظرف، باد، زمین‌لرزه، ضربه و دما از لازمه‌های طراحی بودار کننده است.
- ماکزیمم ظرفیت باید ۱۰۰۰۰ مترمکعب استاندارد گاز بر ساعت باشد.
- آلیاژ مس، برنز، روی و نظایر آنها که در مقابل انواع بودارکن خورده می‌گردند نباید در ساخت اجزا و قطعاتی که در تماس با ماده بودارکننده هستند، استفاده گردند.
- شیرها مربوط به پر و خالی نمودن مخازن اصلی و ایمنی و شیر مابین تانک ذخیره و تانک مربوط به محفظه کنتور و نیز شیر تخلیه گاز باید از نوع توپی و با بدنه فولاد کربنی با توپک و ساقه فولاد ضد زنگ یا آلیاژ غیر آهن با پوشش گرم باشند.
- ظرفیت مخازن بودارکننده به شرح ذیل می‌باشند:
- برای حداکثر ظرفیت ایستگاه بین ۱۰۰۰۰ و ۲۰۰۰۰ متر مکعب بر ساعت، ظرفیت تقریب مخازن اصلی و ایمنی ۱۰۰۰ لیتر،
- برای حداکثر ظرفیت ایستگاه بین ۳۰۰۰۰ و ۵۰۰۰۰ متر مکعب بر ساعت، ظرفیت تقریب مخازن اصلی و ایمنی ۱۵۰۰ لیتر، و
- برای حداکثر ظرفیت ایستگاه بین ۸۰۰۰۰ و ۲۰۰۰۰۱ متر مکعب بر ساعت، ظرفیت تقریب مخازن اصلی و ایمنی ۲۰۰۰ لیتر.
- سازنده موظف است اقلام ذیل را برای نصب دستگاه بودار کننده در فاصله حدود ۵ متر از خط به شرح زیر آماده نماید:
- یک عدد شیر با رقم دقیق #300
- ۲ عدد شیر سوزنی $\frac{3}{4}$ اینچ
- ۱ عدد مهره و ماسوره پیچی $\frac{3}{4}$ اینچ
- ۱ عدد فلنج $\frac{3}{4}$ اینچی #300
- ۲ عدد زانویی پیچی $\frac{3}{4}$ اینچی #300

➤ شیر توپی #300 و با اندازه $\frac{3}{4}$ اینچی مابین تانک ذخیره و تانک محفظه کنتور جهت جلوگیری از تخلیه تانک محفظه به‌هنگام پرنمودن تانک ذخیره (مطابق IGS-MS-PL-010)

- دستگاه بودارکننده قاشقکی می‌بایست برای تمام دامنه‌های فشار، ظرفیت‌ها و کیفیت‌های مندرج در متن تست‌ها مورد بازرسی قرار گرفته و در این تست می‌توان با رعایت نکات ایمنی مربوط به زنگ نزدن در انبار بجای ماده بودار کننده از آب استفاده کرد؛ کلیه وسایل برای انجام این تست از قبیل دمنده هوا، وسایل اندازه‌گیری حجم هوا و حجم تزریقی آب باید توسط سازنده فراهم گردند.
- شیر پروانه‌ای باید با فلنج‌های لازم و پیچ‌های میله‌ای توسط تولیدکننده فراهم گردد.
- تانک بودارکننده باید از استیل کربنی ASTM A516 Grade 70 که با اپوکسی ۳۰۰ میکرون پوشیده می‌شود ساخته شود (مطابق BS 5493).
- تانک بودارکننده باید با شیرهای اطمینان مناسب (مطابق با استانداردهای ASME) همراه با شیرهای بلوکی (شیر چندقلو) قابل قفل و فیلتر مناسب زغالی تجهیز شود.
- شیر تخلیه باید با فیلتر زغالی مناسب کامل شود.
- کلیه واحدهای بوزنی باید پایه و دسته‌های مناسب برای دستکاری، حمل و نقل و جابجایی داشته باشند.
- ماکزیمم فشار کار مناسب باید توسط پوسته و کلگی سیستم و خصوصیات آنها محدود گردد.
- تولید و ساخت واحد بوزنی نبایستی قبل از وصول اجازه خریدار درباره نقشه‌ها و محاسبات طرح‌ها شروع شود.
- کلیه قطعات فشاری و غیرفشاری‌ای که مستقیماً به پوسته جوش خورده‌اند یا به‌هرطریق غیر قابل جدا شدن هستند یا باید با مواد اضافی مقاوم در برابر خوردگی باشند یا از خود مواد مقاوم در خوردگی تولید شوند. قطعات فشاری قابل تعویض از این قضیه مستثنی هستند.
- موقعیت و کمترین اندازه جوش از نازل‌ها و دیگر اتصالات باید مطابقت با نیازهای تعریف‌شده در کدهای کاربردی بوده و هر مقاومت خوردگی لازم برای اتصالات بالا نیز مطابق با کد همان نوع اتصالات باشد.
- لوله‌کشی مدل ۳۱۶ استیل ضدزنگ باید استفاده شود.

- ظرف بوزنی باید تجهیزات اولیه‌ای را بمنظور دسترسی داشتن به داخل ظرف برای بازرسی داشته باشد.
- سوراخ‌کاری در پوسته و کلگی باید مطابق با کدهای کاربردی و مناسب برای فشار و دمای نوشته شده روی ظرف بوزنی باشد.
- بودارکن فاشقکی باید بوسیله پایه‌ها یا دسته‌های مناسب تجهیز گردد.
- هر مخزن بوزنی باید با موتتاژ مناسب تجهیز شود. شیشه گیج (شاخص) باید تمیز باقی مانده و خوانا باشد؛ نباید این شاخص در اثر عملکرد بوزنی و یا اشعه آفتاب لکه‌دار گردد و توسط یک محافظ مناسب تجهیز شود.
- شاخص فشاری باید برای تنظیم درست فشار در طول شیر پروانه‌ای آماده باشد
- تانک‌های بودارکن باید برای جریان ماکزیمم و سه ماه فعالیت مداوم اندازه‌زده و طراحی شود. (به عبارتی هر تانک بایستی در فواصل سه ماهه تخلیه گردد)
- کلیه جوش‌ها باید با فرآیند جوش فلز حفاظت شده یا جوش اتوماتیک / نیمه‌اتوماتیک با الکترودهای سازگار با مواد ساخت ظرف بوزن و مطابق با کدهای کاربردی مناسب انجام شوند.
- تولیدکننده باید ساخت و کیفیت الکترودهای جوش را جهت پیشنهاد در ساخت بوزن مشخص کند. بدون اجازه و تأیید خریدار و قبل از آن جوش‌کاری‌ها نباید انجام گیرند.
- کلیه نازل‌ها، سوراخ‌های ورود و اتصال‌های کوچک با استحکام‌سازی‌شان باید با جوش‌های مناسب به ظرف بوزنی متصل گردند.
- جوش‌های جانبی باید طوری واقع شوند که بازرسی ظرف بوزنی براحتی انجام پذیرد.
- عملیات حرارتی مطابق با استانداردهای ASME برای ظروف تحت فشار باشد.
- کلیه سطوح فلنجی و یا اتصالات پیچی باید از زنگ‌زدگی و اکسایش به هنگام عملیات حرارتی محافظت شوند.
- اگر فلنج جوشی به کار رفته باشد بعد از برطرف کردن تنش، جوشکاری مجاز نمی‌باشد.
- ماده بودار کننده باید تتراهیدروتیوفن (با فرمول شیمیایی C₄H₈S) یا مرکاپتان باشد.
- نرخ بوزنی برای T.H.T. (تتراهیدروتیوفن) بین ۱۵ تا ۲۵ میلی‌گرم برای هر متر مکعب استاندارد گاز است.

- نرخ بودارکن برای مرکاپتان بین ۱۰ تا ۲۰ میلی‌گرم برای هر متر مکعب استاندارد گاز است. ترکیبات مرکاپتان به صورت ۸۰٪ مرکاپتان ایزوپروپیل و ۱۰٪ مرکاپتان N-پروپیل و ۱۰٪ مرکاپتان ترتیاری بوتیل است.
- به نماینده مجاز خریدار باید فرصت و اجازه گواهی در مورد تست اجزای بودارکن داده شود.
- تولیدکننده باید کلیه استانداردهای مربوط به بویلر و ظرف فشار ASME را در بازرسی رعایت نماید.
- علاوه بر حق لازم و اجباری بازرسی کدهای ASME توسط مشتری، بازرسی کلیه قطعات و مواد نیز بر حسب نیاز مجاز می‌باشد.
- قبل از بازرسی نهایی، کلیه تفاله‌ها و سرباره‌های ذوب، مواد زائد، خرده‌ریزها، سنگریزه‌ها، تکه‌های جوشکاری، مواد نفتی و دیگر مواد خارجی باید کاملاً استخراج گردند.
- آزمون رادیوگرافی روی ظرف بوزنی باید مطابق با استاندارد ASME صورت پذیرد.
- هر بوزن قاشقکی قبل از بارگیری و محموله‌سازی توسط نماینده مجاز خریدار بازرسی شده و نکات مناسب درباره بازرسی توسط فروشنده تحویل مشتری گردد.
- گواهینامه بازرسی مواد با گزارش تست باید به N.I.G.C تحویل داده شود؛ بعلاوه فروشنده باید دسترسی آزاد و آسانی به خریدار جهت امور گواهی داشته باشد.
- بوزن‌ها بایستی مطابق با آخرین کدها و استانداردهای مخازن تحت فشار و بویلرهای ASME مراحل طراحی، تولید، بازرسی و تست را طی کنند.
- کلیه تست‌ها باید شماره سفارش و نام خریدار را شامل شوند.
- در مورد رنگ‌کاری باید استاندارد (0) IPS-E-TP-100 رعایت شود.
- به نماینده مجاز خریدار باید فرصت و اجازه گواهی در مورد تست اجزا داده شود.
- در موعد بازرسی رادیوگراف‌ها باید برای نماینده مجاز خریدار مهیا گردند.
- تولیدکننده باید کلیه استانداردهای مربوط به بویلر و ظرف فشار ASME را در بازرسی رعایت نماید.
- هر سیستم بوزنی باید با صفحه مشخصات همیشگی مربوط به نحوه مقاومت در برابر خوردگی مجهز شود. این صفحه باید بعد از تحویل و نصب به راحتی قابل رؤیت باشد.
- هر مارک‌سازی روی گرمکن باید مطابق ASME و شامل اطلاعات ذیل باشد:

- نام سازنده گرمکن
 - سال تولید
 - شماره سریال
 - حداکثر توان تزریق ماده بودار به گاز بر حسب میلی‌لیتر در ساعت
 - فشار طراحی و کارکرد
 - ظرفیت تانک‌های اصلی و ایمنی (lit)
 - فشار تنظیم شیر اطمینان (Kg/cm²)
 - دمای طراحی
 - شماره سفارش خرید
 - دیتاشیت (اطلاعات) N.I.G.C تکمیل شده توسط فروشنده باید ارائه گردد.
 - لیستی از یدکی‌های پوشیده شده و بسته‌بندی شده با قیمت واحدشان که بطور پیشنهادی و دستورالعملی اولیه برای دو سال فعالیت سیستم لازم هستند.
 - ترتیب‌دهی نهایی و جزئیات نقشه‌ها ارائه گردند.
 - کاتالوگ‌های مفهومی و دیتای تکنیکال ابزارآلات فراهم شده باید ارائه شوند.
 - حتماً دستورالعمل‌های نصب و راه‌اندازی به خریدار داده شوند.
 - راهنماهای نگهداری سیستم به خریدار تحویل داده شوند
 - برای هر بودار کن گاز بسته‌بندی بایستی مطابق با دستورالعمل حفاظتی، بسته‌بندی، و مارک‌سازی N.I.G.C باشد.
 - کلیه سطوح داخلی و خارجی قبل از بسته‌بندی و احیاناً حمل با کشتی باید خشک شده و کلیه مایعات مربوط به تست‌های مختلف خارج گردند.
 - به هنگام بسته‌بندی، کلیه فلنج‌های باز با پوشش‌های استیلی مناسب محافظت شده و سوراخ‌های شیردار با درپوش‌هایی که به داخل آنها پیچ خورده است محافظت گردند.
 - تولیدکننده بایستی مطلوبیت قطعات و عملکرد تجهیزات گرمکن را گارانتی (ضمانت) نماید.
 - دوره گارانتی باید یک سال پس از به جریان افتادن گرمکن یا ۱۸ ماه پس از محموله‌سازی گرمکن و تاریخ حمل آن (هرکدام که زودتر اتفاق افتادند) باشد.
- لازم است تولید کننده نسبت به تعمیر و جایگزینی هر قطعه و تجهیزاتی که معیوب هستند در دوره گارانتی اقدام نماید.

۴.۷.۳ استانداردهای دبی سنج‌ها

در مورد استانداردهایی که برای این واحد از ایستگاه بایستی رعایت شود به وب‌سایت مخصوص این استانداردها مراجعه‌شده و مواردی که در ادامه می‌آیند از مجموعه استانداردهای واحد امور تدوین استانداردهای شرکت گاز (IGS-ES-IN-100(0) و IGS-M-IN-102(1) استخراج و مورد جمع‌بندی قرار گرفته‌اند.

- استاندارد نوع دستگاه اندازه‌گیری حجم گاز طبیعی

این استاندارد دربرگیرنده حداقل شرایط عمومی مورد نیاز جهت نوع دستگاه اندازه‌گیری حجمی گاز طبیعی در ایستگاه‌های تقلیل و اندازه‌گیری فشار گاز می‌باشد:

- برای اندازه‌گیری مصارف گاز ایستگاه‌های درون شهری (TBS) می‌توان در مواقع ضروری و نیاز و بصورت مقطعی، از کنتورهای توربینی قابل حمل استفاده نمود.
- برای اندازه‌گیری مصارف گاز ایستگاه‌های ورودی روستاها تا 5000 SCM/H باید از کنتور توربینی و بیش از آن از کنتور روزه‌ای استفاده نمود.
- برای اندازه‌گیری مصارف گاز ایستگاه‌های ورودی (CGS) می‌بایستی از کنتورهای روزه‌ای استفاده نمود.



شکل ۳-۱۲: شماتیکی از یک دبی‌سنج توربینی

استانداردهای شرایط طراحی دبی‌سنج‌های توربینی شامل موارد ذیل می‌باشد:

- دبی‌سنج بایستی با کیفیت کاری بالا، با بخش‌های محرک ساده و بدون استرس‌های مختلف باشد.
- همه بخش‌های دبی‌سنج بایستی در برابر خوردگی از جمله حمله پیوسته گاز طبیعی خشک بودار شده مقاوم باشد.
- دبی‌سنج بایستی یک تیکه، گازبندی شده و با قابلیت حفظ دقت اندازه‌گیری تحت کل محدوده عملکردی باشد.
- دبی‌سنج بایستی دارای قابلیت ثبت ظرفیت تعیین شده در مینیمم فشار ورودی باشد و هیچ اضافه بار ظرفیتی نبایستی در سائز کردن دبی‌سنج در نظر گرفته شود.
- برای راحتی تعمیر و نگهداری، دبی‌سنج توربینی از نوع برداشت از بالا (Top Removal) پیشنهاد شده است.
- افت فشار در سرتاسر دبی‌سنج در ظرفیت مجاز و فشار ورودی ۱۸ Mbar نبایستی از ۵ Mbar تجاوز کند (برای گاز با چگالی نسبی ۱/۶۵).
- دقت دبی‌سنج بایستی برای ظرفیت‌های تا ۲۰٪ ظرفیت ماکزیمم، ۲٪ ± و برای ظرفیت‌های بالای ۲۰٪ ظرفیت ماکزیمم، ۱٪ ± باشد.
- شاخص بایستی دیجیتالی و از نوع قرائت مستقیم باشد.
- دامنه تغییرات مصرفی (Rangeability) دبی‌سنج در فشار ورودی ۱۸ Mbar بایستی برای ظرفیت‌های تا ۱۶۰ مترمکعب بر ساعت، ۱۰:۱ و برای ظرفیت‌های بالای ۱۶۰ مترمکعب بر ساعت، ۲۰:۱ باشد.

استانداردهای تست و بازرسی دبی‌سنج‌های توربینی نیز شامل موارد ذیل می‌باشد:

- منحنی کارایی دبی‌سنجی بایستی برای هر دبی‌سنج مطابق با شماره سریال سازنده پیش‌بینی شده باشد.
- هر دبی‌سنج بایستی تحت فشار هوا (PNEUMATICALLY) با ۱/۲۵ برابر ماکزیمم فشار عملکردش هنگامی که در آب غرق شده است، تست شده باشد.

- بدنه هر دبی‌سنج بایستی تحت فشار آب (HYDRAULICALLY) با ۱/۵ برابر ماکزیمم فشار عملکردش تست شده‌باشد.
- بایستی منحنی عملکرد منتشرشده توسط اداره استاندارد کشور برای هر دبی‌سنج پیش‌بینی شده‌باشد.
- استانداردهای رنگ‌کاری دبی‌سنج‌های توربینی نیز شامل موارد ذیل می‌باشد:
 - سطح خارجی دبی‌سنج بایستی کاملاً با حذف کردن همه زنگ‌هایش تمییز شده‌باشد.
 - سطوح رنگ شده بایستی بطورکامل عاری از گریس، شن و دیگر مواد خارجی باشد.
 - دبی‌سنج بایستی با مطابق با استاندارد BS-5493 (1977) REFERENCE NO.SD3 با ضخامت کل ۱۰۰ میکرون رنگ شده‌باشد.
 - مشخصات رنگ بایستی مطابق با مرجع NO. DF OF BS-5493(1977) باشد.
 - رنگ نهایی بایستی آلومینیومی مطابق با ASA-49 باشد.
- استانداردهای علامت‌گذاری دبی‌سنج‌های توربینی نیز شامل موارد ذیل می‌باشد:
 - هر دبی‌سنج بایستی دارای نوشته‌های ذیل باشد:
 - نام سازنده
 - نوع مدل
 - شماره سریال سازنده
 - میزان سایز فشاری
 - ظرفیت اسمی بر حسب SCM/H
 - ظرفیت در فشار ورودی ۱۸ Mbar
 - ظرفیت محور خروجی بر حسب CM/REV
 - تاریخ کالیبراسیون
 - ماکزیمم فشار عملکرد
 - دستور خرید و شماره اقلام جنس
 - سال تولید
- این نوشته‌ها بایستی مستقیماً قابل رویت، به آسانی خوانا، و تحت شرایط معمولی استفاده از دبی‌سنج پاک نشدنی باشند.

استانداردهای بسته‌بندی دبی‌سنج‌های توربینی مطابق دستورالعمل N.I.G.C به شرح ذیل می‌باشند:

- هر دبی‌سنج بایستی در یک جعبه مقوایی نازک بسته‌بندی شده‌باشد.
- جعبه‌های مقوایی نازک بایستی در محفظه‌های چوبی با اندازه مناسب و با شرایط لازم جهت بلندکردن توسط بالابرنده، بسته‌بندی شده‌باشد.

۵.۷.۳ استانداردهای لوله‌کشی ایستگاه‌ها

در ارتباط با استاندارد لوله‌کشی ایستگاه‌های تقلیل فشار گاز شهری جستجوهای اینترنتی بسیاری انجام گرفت. مواردی که در ادامه می‌آیند از مجموعه استانداردهای واحد امور تدوین استانداردهای این شرکت (IGS-E-CS-410) استخراج و مورد جمع‌بندی قرار گرفته‌اند. نکته قابل توجه در این زمینه، این است که موارد کلی ذکر شده نه تنها قابل اعمال به ایستگاه‌های گاز شهری بلکه قابل اعمال به ایستگاه‌های تقویت فشار نیز می‌باشند.

• کدها و استانداردها

طراحی، ساخت و تست کردن همه لوله‌کشی‌ها در ایستگاه‌ها و خطوط لوله تاسیسات مرتبط، بایستی مطابق با کدها و استانداردهایی ذیل باشد:

- کتاب راهنمای ASME، بخش ۱ و ۲، آخرین ویرایش
- کتاب راهنمای انجمن استانداردهای ملی آمریکا برای سیستم‌های لوله‌کشی انتقال و توزیع گاز، بخش B31.8.
- جامعه مهندسين مکانیک آمریکا برای کدهای دیگ بخار و ظروف فشاری، بخش VIII، آخرین ویرایش
- استانداردهای شغلی ایمنی و سلامت
- برای طراحی لوله‌کشی بخار، آب، نفت و هوا: کد B31.3 انجمن استانداردهای ملی آمریکا برای لوله‌کشی پالایشگاه نفت، آخرین ویرایش
- ساخت و آزمایش بر طبق ASME، بخش ۱۹۲ و ANSE B31.8، آخرین ویرایش
- استاندارد ۱۱۰۴ صنعت نفت آمریکا برای جوشکاری خطوط لوله و تاسیسات مرتبط
- استاندارد ۶۰ صنعت نفت آمریکا برای شیرهای لوله‌کشی
- کدهای زیر بایستی بکار رود:

	ANSI B2.1
پیچ‌های لوله	
flange لوله چدنی و fitting های لبه دار	ANSI B16.1
flange لوله استیلی و fitting های لبه دار با ضمیمه‌ها	ANSI B16.5
Fitting های فولاد نرم با جوشکاری درزی	ANSI B16.9
اندازه شیرهای آهنی رودرو و سرهم پیوسته	ANSI B16.10
fitting های استیلی ساختگی، جوشکاری دوراهی لوله و پیچ دار	ANSI B16.11
plug های لوله آهنی، عایق‌ها و مهره‌های پشت گیر (lock nuts) با پیچ‌های لوله	ANSI B16.14
واشرهای غیرفلزی برای flange های لوله	ANSI B16.21
flange های لوله‌کشی قطر بزرگ	MSS-SP-44
fitting های با معیار بالا جوشکاری شده	MSS-SP-75
ابعاد شیر چدنی	ANSI B16.1
کربن استیل	ASTM A216 WCB or A105
کربن استیل دما پایین	ASTM A352 LCB or A350 LFI
فولاد فشرده و قابل انعطاف	ASTM A126 or A335
برنز	ASTM B61 or B62
چدن گرده‌ای	ASTM 395 Gr 60- 45-15 or A445
مشخصات برای خطوط لوله به سختی آزمایش شده	API 5LX
برای اندازه‌گیری گاز طبیعی توسط اریفیس	AGA Committee Report #3

همه کدها، استانداردها و مقررات که در اینجا ارجاع داده شده بایستی آخرین ویرایش باشند.

• اگر مقررات داخلی از کدهای ANSI، ASME، یا API بالا تخطی کنند، اصلاحاتی

بر روی مقررات، قوانین و کدهای کشور می‌بایستی انجام شود.

• استاندارد مواد مورد استفاده در لوله‌کشی ایستگاه‌ها

مواد مصرفی باید مطابق با استانداردهای زیر استفاده گردند:

• تنها لوله‌ها، شیرها و اتصالات از جنس استیل در ایستگاه‌ها مجاز می‌باشند، البته این

قاعدگی کلی، به سیستم‌های خیلی فشار پایین (60 psig) و زیر آن محدود نمی‌شود.

- مواد استفاده شده باید مطابق با مشخصات کد ASTM و API لیست شده باشند.
- لوله‌ها و اجزاء لوله‌کشی باید مطابق با استانداردهای ساخت و ابعادی کاربردی API MSS، ANSI یا معادل آنها باشند.
- مواد استفاده شده همان گونه که در استاندارد MSS SP-25 تعیین شده که باید شامل نام و علامت تجاری سازنده باشد، علامت‌گذاری شود.
- در این مشخصات، اندازه لوله بر حسب اینچ نشان داده می‌شود و قطر اسمی لوله را بیان می‌کند. درجه بندی لوله‌ها با علامت "#"، که مشخص کننده استاندارد ANSI است نه فشار واقعی، نشان داده می‌شود. ضمناً میزان فشار کاری با "lb" نشان داده می‌شود.
- سایز لوله‌ها، اتصالات، flangهای کاهش‌دهنده و شیرآلات با سایز اسمی خطوط لوله نشان داده خواهد شد.
- همه شیرآلات ۲" و بزرگتر می‌بایستی مطابق با استاندارد API 6D ساخته شوند، "مشخصات برای شیرهای دروازه‌ای (Gate)، توپی (Ball)، پلاگ (Plug) و یکطرفه (Check)"
- ماده بدنه شیر بایستی مطابق با مشخصات ذیل باشد:
 ASTM A216 WCB or A105 کربن استیل
 ASTM A352 LCB or A350 LFI کربن استیل دما پایین
 ASTM A126 or A335 فولاد فشرده و قابل انعطاف
 ASTM B61 or B62 برنز
 ASTM 395 Gr 60-45-15 or A445 چدن گرده ای
- همه flangeهای با قطر اسمی بالاتر از ۱۶" بایستی با استاندارد MSS-SP-44 سفارش داده شود. ضمناً flangeهای دما پایین بایستی مطابق با استاندارد ASTM 350 LF2 بجای A105 سفارش داده شود.
- مواد سازنده ظروف بایستی مطابق استاندارد ASTM A515, Gr. 70 یا ASTM A516, Grade 70 باشد مگر اینکه طور دیگر مشخص شده باشد.
- سطوح flangeهای استیلی بایستی دنداندار باشند (هم مرکز یا حلزونی) مگر اینکه طور دیگر ذکر شود.

- جداول مواد لزوماً شامل میزان مجاز خوردگی نمی‌شود. هنگامی که این مقدار مشخص شود، ماده تعیین شده بایستی با کدهای صحیح برای همخوانی با میزان فشار بررسی گردد.
 - شیرهای برنزی و آهنی بایستی بسته‌بندی استاندارد سازنده را داشته‌باشند.
 - واشرهای کلاهیکی بایستی مطابق استاندارد سازنده‌باشند مگر اینکه طور دیگر ذکر شود.
 - استاندارد علائم و اختصارات مورد استفاده در لوله‌کشی ایستگاه‌ها
- اولین سری از فهرست علائم باید مطابق با استانداردهای مندرج در زیر استفاده گردند:

#	—	ANSI rating
ASB	—	asbestos
BB	—	bronze body
B-NS	—	buna-N seat
BT	—	bronze trim
Btmp	—	bore to match pipe
DBB	—	double block and bleed
DSA	—	double submerged arc (weld)
ff	—	full face (gasket)
FF	—	flat face
Flgls	—	flangeless (valves)
FS	—	Forged steel
IB	—	iron body
ID	—	iron disc
IS	—	inside screw
HTIP	—	high tensile iron plug
GR	—	Grade
LB	—	pounds per square inch
LF	—	lube fittings
Lr	—	Lever
NPT	—	national pipe thread
NTP	—	notched throttle plate
OS&Y	—	outside screw and yoke
RF	—	raised face
RS	—	rising stem
RTFS	—	reinforced Teflon seats
Sch	—	Schedule
SHHB	—	solid hex, head bull (plug)
Smls	—	Seamless
SO	—	slip-on
SS	—	soft seat

SSS	–	stainless steel stem
SST	–	stainless steel trim
Std	–	Standard
SW	–	socket weld
SWD	–	solid wedge disc
W/	–	With
WG	–	worm gear
Wch	–	Wrench
Wt	–	Weight
wtmp	–	wall to match pipe
UB	–	unions bonnet
Unions w/IS	–	unions with integral seats

دومین سری از فهرست علائم نیز باید مطابق با استانداردهای مندرج در زیر استفاده گردند:

G	–	gas	ASME Guide, Part 192
SG	–	starting gas	ASME Guide, Part 192
FG	–	fuel gas	ASME Guide, Part 192
PG	–	power gas	ASME Guide, Part 192
EG	–	pilot gas	ASME Guide, Part 192
FA	–	free air	ASME Guide, Part 192
IA	–	instrument air	ANSI B31.3
UA	–	utility air	ANSI B31.3
LO	–	tube oil	ANSI B31.3
E	–	exhaust	ANSI B31.3
DW	–	domestic water	ANSI B31.3
GW	–	raw water	ANSI B31.3
JW	–	jacket water	ANSI B31.3
D	–	drains	ANSI B31.3
V	–	vents	ANSI B31.3

۶.۷.۳ استانداردهای رگولاتورها

در ارتباط با استاندارد رگولاتورهای ایستگاه‌های تقلیل فشار گاز جستجوهای اینترنتی بسیاری انجام گرفت. مواردی که در ادامه می‌آیند از مجموعه استانداردهای واحد امور تدوین استانداردهای این شرکت (IGS-MS-IN-210(0)) استخراج و مورد جمع‌بندی قرار گرفته‌اند. استانداردهای شرایط طراحی و کاری رگولاتورها شامل موارد ذیل می‌باشد:

- رگولاتور بایستی بخش‌های محرک ساده و تنش‌زدایی شده داشته‌باشد و به منظور نائل شدن به پایداری عملکردی و دقت مداوم رگولاتور روی یک دوره زمانی و روی یک محدوده شرایط عملکردی با کمترین میزان تعمیر، بایستی از مواد باکیفیت ساخته‌شود.
- رگولاتور بایستی برای نصب در هوای آزاد مناسب باشد و همه بخش‌هایش باید نسبت به خوردگی اتمسفریک (ATMOSPHERIC) و همچنین حمله پیوسته گاز طبیعی بودار شده و متانول مقاوم باشد.
- محدوده فشار ورودی (۲۵۰-۴۰۰ psig)، و فشار خروجی (۶۰-۲۵۰ psig)
- محدوده دمای محیطی برای رگولاتور، ۲۹- تا ۶۰ درجه سانتیگراد یا ۲۰- تا ۱۴۰ درجه فارنهایت است.
- حجم استاندارد در ۱/۰۱۳ بار (۱۴/۶۹۶ psia) و ۱۵/۶ درجه سانتیگراد (۶۰ F) اندازه‌گیری شود.
- عملکرد رگولاتور بایستی مطابق با موارد ذیل باشد:
- فشار خروجی رگولاتور در نرخ جریان مشخص شده و فشار ورودی ۲۵۰ psig، روی $17/5 \pm 0/7$ مگابار تنظیم شود.
- فشار خروجی رگولاتور نبایستی در تغییرات جریان بین ظرفیت صفر و کامل رگولاتور و در فشارهای ورودی (۲۵۰-۴۰۰ psig)، بالاتر از ۲۳/۷ مگابار یا پایین‌تر از ۱۵ مگابار شود.
- رگولاتور بایستی با ابزار قطع کردن فشار پایین، ابزار قطع کردن فشار بالا و شیر اطمینان داخلی تجهیز شود.
- محدوده‌های نصب سه ابزار ایمنی رگولاتور شامل موارد ذیل می‌شوند:
 - محدوده تنظیم قطع کننده فشار پایین، $8/7 \pm 1/2$ مگابار
 - محدوده تنظیم قطع کننده فشار بالا، $42/3 \pm 2/5$ مگابار
 - محدوده تنظیم شیر ایمنی داخلی، $62/3 \pm 7/5$ مگابار
- اتصالات ورودی و خروجی رگولاتور بایستی همراستا باشند. ضمناً جهت جریان بایستی بطور ثابت روی بدنه شیر برجسته شود.

- اتصالات ورودی و خروجی و منفذ رگولاتور بایستی مطابق با استاندارد ANSI B 1.20.1 باشند.

نحوه کنترل و سرویس رگولاتورهای ایستگاه‌های تقلیل فشار گاز عبارت است از:

- شیرهای قبل و بعد از رگولاتور را بسته، گاز موجود در طرفین رگولاتور را از طریق شیرهای تخلیه، خارج نمائید. در نتیجه فشار از دو طرف رگولاتور برداشته خواهد شد.
 - اگر فشار از لوله‌های حسگر به رگولاتور اعمال نمی‌شود، لوله‌های حسگر را باز نموده و با تمیزکردن و سپس رفع گرفتگی‌ها امکان عبور جریان گاز را فراهم نمائید.
 - رگولاتور را باز نموده و قسمت‌های مختلف آنرا بازدید نمائید.
 - اگر دیافراگم رگولاتور، اریفیس، سیت، پلاک، فنر و دیگر قطعات فرسوده می‌باشد، آنها را تعویض نمائید.
 - اگر قسمت فیدر پیلوت رگولاتور (دیافراگم-ORING-فنر) دچار مشکل شود آن قسمت را بازدید و قسمت معیوب را تعمیر یا تعویض کنید.
 - پس از تعمیر قسمت‌های مختلف رگولاتور، آنرا در محل خود نصب نمائید.
 - شیرهای قبل و بعد از رگولاتور را باز نمائید.
 - فشار خروجی رگولاتور را تنظیم کنید و پس از آزمایش نشتی، آنرا در سرویس قرار دهید.
- مواد سازنده رگولاتور باید مطابق با استانداردهای زیر باشند:
- مواد سازنده بدنه شیر بایستی چدنی و مطابق استاندارد ANSI B16.4 CLASS 125 باشد.
 - مواد پوسته‌های دیافراگمی بایستی از آلومینیوم حدیده‌ای و مطابق استاندارد ASTM B 85 باشد. ضمناً پوسته دیافراگمی بایستی آنقدر مقاوم باشد که فشار ۷۵۰ مگابار را تحمل نماید.
 - دیافراگم که از مواد مصنوعی مختلفی تشکیل شده است بایستی هموزن و بدون تخلخل، شن و ماسه، تاول‌ها و نقص‌ها باشد.
- اطلاعات زیر بایستی بطور ثابت روی ورقه اصلی دیافراگم نشان داده شود:

- نام سازنده یا مارک تجاری

- شماره پیمانه

- تاریخ ساخت
 - فنرها، تنه‌ها، اهرم‌بندی شیر و تیغه منفذ خروجی بایستی همواره از یک ماده مقاوم در برابر خوردگی مثل STAINLESS STEEL یا استیل‌های روکش‌دار ضدخوردگی ساخته‌شود.
 - اریفیس رگولاتور بایستی از برنج و مطابق استاندارد ASTM B16 یا فولاد ضد زنگ ۳۱۶ ساخته شود.
 - پیچ اریفیس شیر بایستی مانع خروج گاز بشود.
 - رگولاتور بایستی تا حرارت ۱۲۱ درجه سانتیگراد را تحمل کند بدون اینکه بر روی مانع خروج گاز شدن این پیچ‌ها اثر بگذارد.
 - پیچ‌ها (بجز پیچ‌های تنظیمی) و مهره‌ها بایستی از فولاد ضد زنگ یا استیل روکش‌دار ضدزنگ باشند. شیار داخل پیچ و مهره‌ها بایستی مطابق استاندارد ANSI B1.1 باشد.
 - همه پیچ‌های تنظیمی، سرپوش‌ها، صفحه دیافراگم، دیسک شیر و دهانه شیر اطمینان بایستی از مواد مناسبی ساخته‌شود تا قابلیت تحمل شرایط ناسازگار مکانیکی، شیمیایی و گرمایی را داشته باشند. این شرایط شامل موارد زیر می‌شود:
 - بازو بسته شدن کامل برای ۱۰۰ بار (برای پیچ‌های تنظیمی و سرپوش‌ها)
 - دمای پایین و بالای ۲۹- و ۱۰۰ درجه سانتیگراد برای ۲۴ ساعت
 - گاز طبیعی بودار شده
 - همچنین رنگ‌آمیزی رگولاتورها باید مطابق با استانداردهای زیر باشد:
 - سطح رگولاتور بایستی بصورت صحیح آماده‌سازی و تمیز شده‌باشد تا عملیات بعدی و رنگ‌آمیزی یکنواخت را اجازه‌دهد.
 - بدنه آلومینیومی رگولاتور که در معرض هوا قرار می‌گیرد بایستی یک پوشش از جنس کروم داشته‌باشد.
 - سطح داخلی رگولاتور بایستی یک پوشش لعابی و رنگ‌آمیزی با ضخامت خشک ۱۰+۵۰ میکرون داشته‌باشد.
 - رنگ نهایی بایستی خاکستری مطابق با استاندارد ANSI Z55.1، با رنگ شماره ۴۹ یا معادلش، باشد.
- استانداردهای علامت‌گذاری رگولاتورها نیز شامل موارد ذیل می‌باشد:

- هر رگولاتور بایستی دارای نوشته‌های به فارسی یا انگلیسی نوشته شده ذیل باشد:
- نام سازنده یا علامت تجاری آن
- شماره سریال سازنده، نوع و شماره مدل
- شماره N.I.G.C P/O
- ظرفیت رگولاتور بر حسب SCM/H
- سال تولید
- محدوده فشار ورودی و خروجی
- اندازه اریفیس
- نشانه برجسته‌شده NIGC روی بدنه شیر
- کیفیت خوانایی و چسبندگی بودن مواد علامت‌گذاری نبایستی تحت تاثیر گرما، نور خورشید و رطوبت واقع شوند.
- استانداردهای بسته‌بندی رگولاتورها مطابق دستورالعمل N.I.G.C به شرح ذیل می‌باشند:
- هر رگولاتور بایستی در یک کیسه پلاستیکی بسته‌بندی شده باشد.
- هر کیسه پلاستیکی بایستی در یک جعبه مقوایی نازک جاداده شود.
- جعبه‌های مقوایی نازک بایستی در صندوق‌های چوبی با اندازه مناسب و با شرایط لازم جهت بلندکردن توسط بالابرنده، بسته‌بندی شده باشد.



شکل ۳-۱۳: شماتیکی از یک رگولاتور صنعتی

۷.۷.۳ ظرف‌های تحت فشار

مخازن تحت فشار باید با AS 1210 مطابقت داشته‌باشند.

۸.۷.۳ شیرهای ایستگاه

شیرهای ایزولاسیون ایستگاه و کنارگذر^{۱۸} آن باید در هر واحد دبی‌سنجی، رگولاسیون، پمپ و یا کمپرسور نصب گردند؛ آنچنانکه ایزوله‌کردن ایستگاه سریعاً اجرا گردد. چنین شیرهایی باید از حیث اطمینان و ایمنی اثبات شده‌باشند.

شیرهای ایزولاسیونی که در روی زمین نصب گشته و باعث جداکردن کل یا قسمتی از یک ایستگاه می‌گردند، در موقع خطر یا حالت اضطراری باید ایمن در برابر آتش و مطابق با استاندارد باشند. موقعیت شکست و مود اتز کار افتادگی هر شیر به هنگام فرآیند طراحی باید مشخص گردد. لازم به ذکر است که شیرهای زیر شیر اطمینان باید در موقعیت باز خود قفل گردند. لازم است که شیرهای کنارگذر مناسب در قسمت‌های پمپ، کمپرسور و دبی‌سنج ایستگاه نصب گردند.

همچنین خط لوله‌ای که حامل سوخت به یک قسمتی از ایستگاه می‌باشد باید به یک شیر ایزولاسیونی که در موقعیتی با دسترسی آسان و در خارج ساختمان نصب گردیده، تجهیز شود. ملاحظاتی هم باید برای فراهم نمودن یک شیر کنارگذر فشاری در کنار هر شیر ایزولاسیون ایستگاه مد نظر قرار داده‌شود.

۸.۳ ایستگاه‌های کابینتی

در این بخش مروری بر ایستگاه‌های کابینتی و بررسی مزایا و معایب این ایستگاه‌ها ارائه شده‌است. مباحثی را که در این بخش بدان پرداخته می‌شود مشتمل بر موارد ذیل است.

- مقایسه ایستگاه‌های کابینتی و مسطح از لحاظ تجهیزات و ابعاد
- مزایا، محدودیت‌ها و ملاحظات لازم جهت استفاده از ایستگاه‌های کابینتی
- تحلیل فرآیندی جریان گاز در یک TBS کابینتی و مسطح

موارد فوق در ادامه شرح داده شده‌اند.

۱.۸.۳ مقایسه ایستگاه‌های کابینتی و مسطح از لحاظ تجهیزات و ابعاد

ایستگاه‌هایی که در ابتدای فصل بدان‌ها اشاره شد از لحاظ ساخت و نحوه‌ی نصب تجهیزات به دو دسته‌ی کلی زیر تقسیم‌بندی می‌شوند.

- ایستگاه‌های مسطح

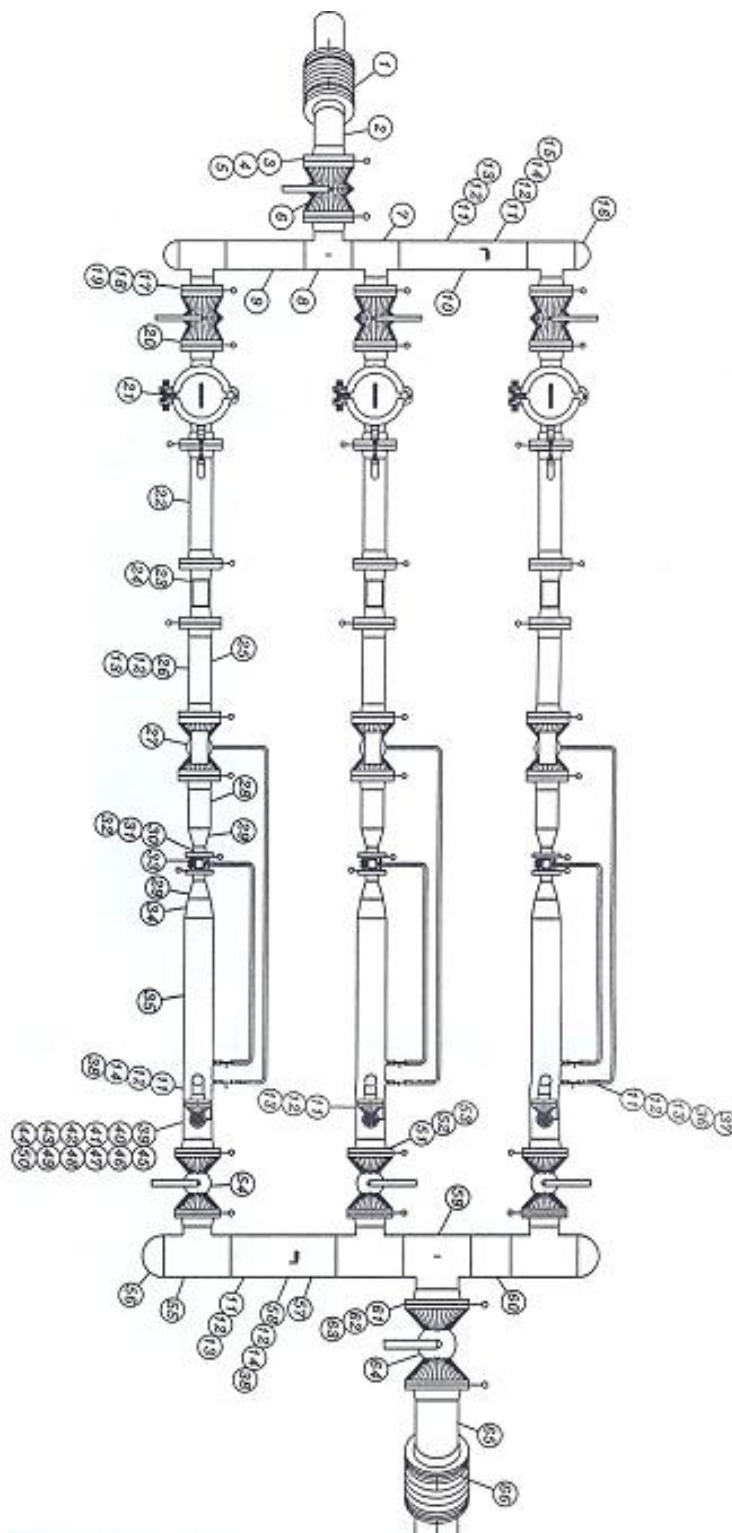
ایستگاه‌های مسطح، همان نوع متداول ایستگاه‌هاست که تاکنون مورد استفاده قرار می‌گرفته‌است. در شکل ۳-۱۴، شکل ۳-۱۵ و شکل ۳-۱۶ نمونه‌ای از ایستگاه‌های مسطح ارائه شده‌است.



شکل ۳-۱۴: نمونه‌ای از ایستگاه CGS مسطح



شکل ۳-۱۵: نمونه‌ای از ایستگاه TBS مسطح



شکل ۳-۱۶: نقشه‌ی تیپ یک نمونه TBS مسطح

• ایستگاه‌های کابینتی

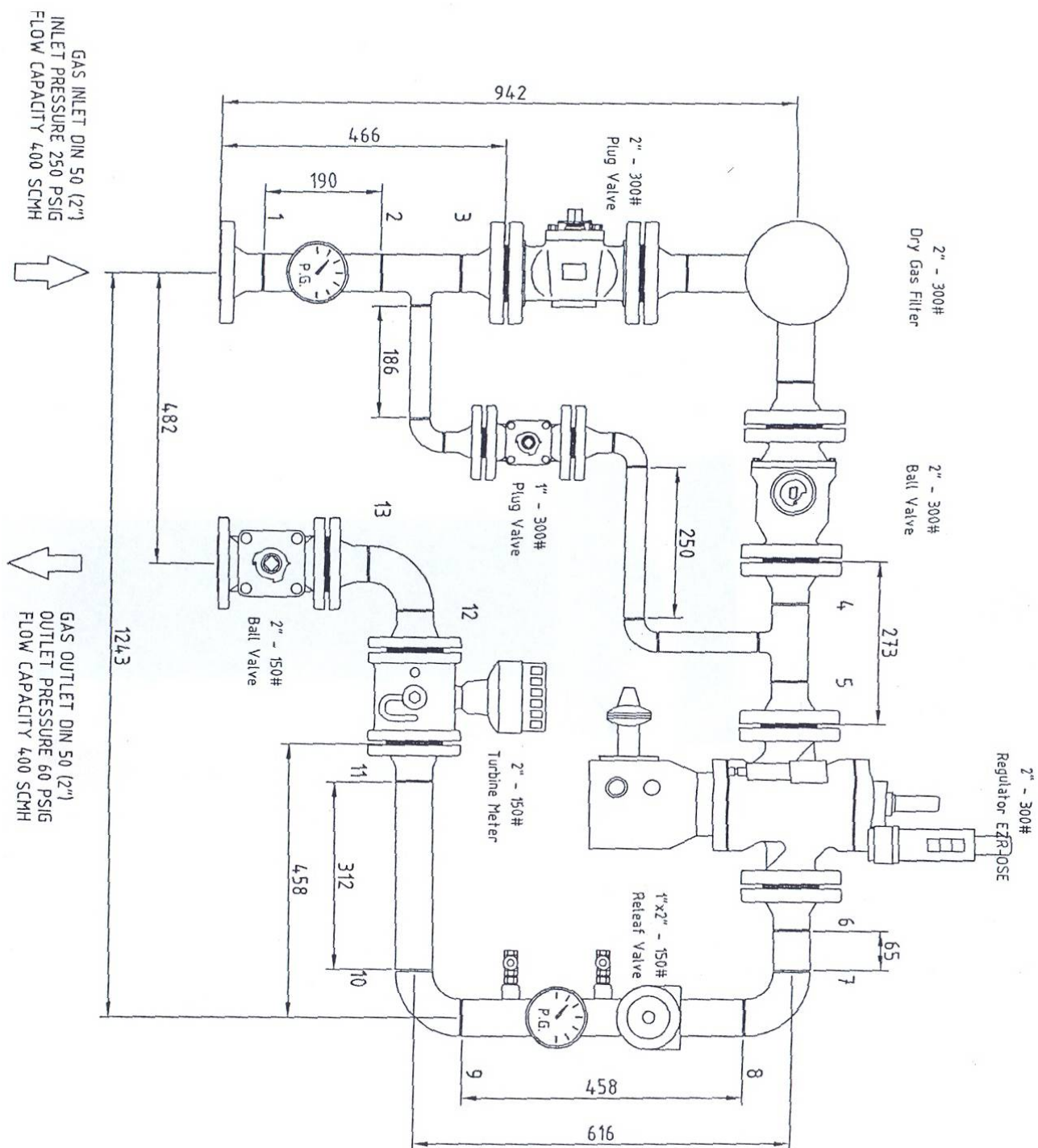
در این نوع ایستگاه‌ها اجزای یک ایستگاه مسطح به صورت فشرده در کنار هم قرار گرفته و کلیه بخش‌ها در یک محفظه‌ی کابینتی نگهداری می‌شود. شکل ۳-۱۷ و شکل ۳-۱۸ نمونه‌ای از این ایستگاه‌ها را نشان می‌دهند.



شکل ۳-۱۷: نمونه‌ای از ایستگاه TBS کابینتی

همانگونه که در پیش اشاره شد، با توجه به محدوده‌ی کاری ایستگاه، در طراحی، پیاده‌سازی و اجرای ایستگاه‌ها استانداردهایی موجود است که اجزای این ایستگاه‌ها اعم از شیرآلات، دبی‌سنج‌ها و رگولاتورها طبق آن استانداردها انتخاب و جایگذاری می‌شوند. از اینرو با توجه به اینکه نحوه‌ی نصب (مسطح/کابینتی) تاثیری در فرآیند و هدف تاسیس ایستگاه نداشته از اینرو تجهیزات به‌کاربرده‌شده در این دو نوع ایستگاه نیز یکسان بوده و از یک الگو انتخاب می‌شوند. به عنوان مثال چنانچه قرار باشد یک TBS فشار گاز با دبی ۴۰۰ مترمکعب بر ساعت را از ۲۵۰ Psi به ۶۰ Psi برساند، طبق استاندارد می‌بایست از شیرهای ۲ اینچ کلاس ۳۰۰ قبل از رگولاتور و از شیرهای ۲ اینچ کلاس ۱۵۰ بعد از رگلاتور استفاده نمود. این استاندارد برای هر دو مدل مسطح و کابینتی لازم‌الاجرا بوده و تنها در مدل کابینتی با حذف لوله‌های بین اتصالات ایستگاه کوچکتر شده و در فضای کمتری قابل اجرا می‌باشد. همانگونه که در اشکال فوق مشاهده می‌شود ایستگاه TBS مسطحی که فضایی معادل با ۳ در ۵ را اشغال می‌نماید را می‌توان در یک کابینت با ابعاد ۱ در ۲ گنجاند. البته با توجه به دبی و فشار کاری ایستگاه ابعاد نیز تغییر می‌نمایند. از آنجا که با افزایش دبی گاز سایز لوله‌ها و دیگر تجهیزات نیز افزایش می‌یابد، استفاده از این ایستگاه‌ها در دبی‌های بالای ۲۰۰۰۰ متر مکعب استاندارد بر ساعت توصیه نمی‌شود. نمونه‌ای از TBS های کابینتی با دبی ۲۰۰۰۰ متر مکعب استاندارد دارای

ابعادی برابر با ۴/۵ متر طول، ۱/۵ متر عرض و ۳/۵ متر ارتفاع می‌باشد. در بخش آبی مزایا و معایب این نوع ایستگاه‌ها بیشتر مورد بحث قرار می‌گیرد.



شکل ۳-۱۸: نقشه‌ی تیپ یک نمونه TBS کابینتی

۲.۸.۳ مزایا، محدودیت‌ها و ملاحظات لازم جهت استفاده از ایستگاه‌های کابینتی

همانگونه که در بخش قبل اشاره شد، کاهش فضای لازم برای نصب ایستگاه از مهم‌ترین مزیت‌های ایستگاه‌های کابینتی می‌باشد. به‌طور کل مزیت‌های این نوع ایستگاه‌ها نسبت به ایستگاه‌های مسطح را می‌توان موارد ذیل برشمرد.

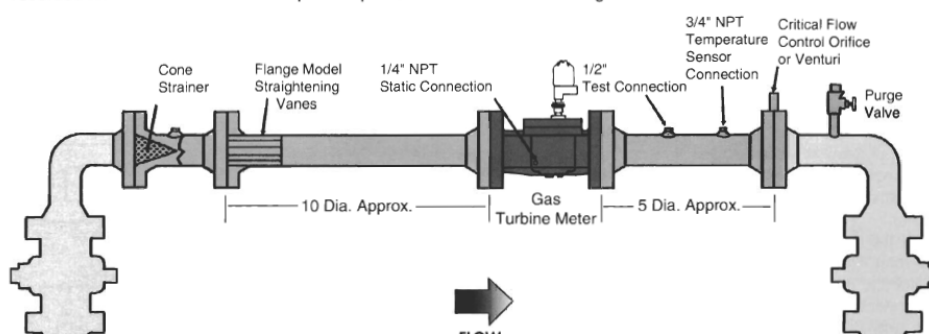
- نیاز به فضای نصب کمتر نسبت به ایستگاه‌های نوع مسطح
 - سهولت بیشتر در حمل و نقل و نصب ایستگاه
 - کاهش هزینه‌های مربوط به ساخت ساختمان ایستگاه
 - امکان کنترل بیشتر صدا در مواقعی که موقعیت نصب ایستگاه در محل‌های مسکونی باشد.
- با وجود مزایای فوق‌الذکر در اغلب موارد، قیمت تمام‌شده ایستگاه‌های کابینتی نسبت به ایستگاه‌های با ظرفیت مشابه از نوع مسطح کمتر می‌باشد. لذا امروزه در اکثر کشورهای اروپایی از این نوع ایستگاه‌ها جهت مصارف صنعتی و شهری استفاده می‌شود و تمایل به استفاده از این نوع ایستگاه‌ها در کشور نیز در حال افزایش می‌باشد.
- با توجه به مطالعات انجام‌شده و بررسی ایستگاه‌های کابینتی موارد زیر به‌عنوان معایب و یا ملاحظات که در استفاده از این ایستگاه‌ها باید در خاطر داشت، مطرح می‌شود.

- عدم سهولت رفع عیب و یا مونتاژ و دیمونتاژ ایستگاه
- با توجه به قرارگیری اتصالات در فضایی بسیار کوچکتر از ایستگاه‌های مسطح و تنگ‌چین‌شدن آنها در کنار هم، یکی از معایب اساسی این ایستگاه‌ها دشواری دسترسی تعمیرکار و یا سرویس‌کار ایستگاه می‌باشد. این امر با توجه به نیاز مداوم ایستگاه برای بازرسی و سرویس در بلند مدت آزار دهنده و چه بسا منجر به عدم رعایت استانداردهای لازم در سرویس و تعمیر قطعات شود. در این بین با توجه به شرکت‌های متعدد داخلی که در این زمینه فعال هستند مشاهده می‌شود که برخی از آنان محصولات خود را با افزایش سهولت در دسترسی به تجهیزات داخلی ایستگاه معرفی کرده‌اند و می‌توان امید داشت در آینده‌ای نه‌چندان دور با حفظ اندازه ایستگاه، این مشکل را تا حدی مرتفع نمود.
- قطع کامل مسیر در زمان تعمیر و سرویس ایستگاه
- در طراحی و استفاده از ایستگاه‌های کابینتی، با توجه به وجود تنها یک خط عبور جریان، استفاده از ایستگاه عملاً در زمان سرویس و تعمیر قطعات مختل می‌شود. مطابق با شکل ۳-۱۸

تنها مسیر بای‌پس در نظر گرفته شده در ایستگاه، مسیری است که برای تعویض فیلتر لحاظ شده تا در حین تعویض اختلالی در جریان صورت نگیرد از اینرو برای تعویض و تعمیر سایر قطعات می‌بایست کل جریان ورودی و خروجی قطع گردد که این مشکل می‌بایست به‌نحوی برطرف شود.

• دقت در انتخاب دبی‌سنج گاز

دبی‌سنج‌های متعددی در اندازه‌ی دبی گاز در صنایع گازی مورد استفاده قرار می‌گیرند. یکی از پرکاربردترین آنها در ایستگاه‌ها نوع دبی‌سنج توربینی می‌باشد. این دبی‌سنج در کنار تمامی مزایایی که دارد دارای محدودیت‌هایی در استفاده نیز می‌باشد. بمنظور اندازه‌گیری دبی جریان به‌کمک این کنتور با دقت قابل قبول، جریان ورودی حتی‌الامکان می‌بایست فاقد چرخش و جریان‌های گردابی باشد. به‌عبارت دیگر هر چه جریان یکنواخت‌تر باشد، دقت کنتور بالاتر بوده و در غیر این‌صورت نیاز به اعمال تصحیحاتی به عدد قرائت شده از روی کنتور می‌باشد. به منظور اطمینان از یکنواختی جریان ورودی به این کنتورها استانداردهای مرتبط توصیه می‌کنند در فاصله‌ای برابر با حداقل ۱۰ برابر قطر لوله ورودی به کنتور هیچ گونه تغییر در مسیر جریان (زانویی، سه‌راهی و مانند این‌ها) و هیچ‌گونه اتصالات دیگری اعم از انواع شیرها و غیره قرار نگیرد. در شکل ۳-۱۹ محدودی لازم به صورت شماتیک نشان‌داده شده‌است.



شکل ۳-۱۹: محدودی لازم قبل از کنتور توربینی

با توجه به موارد فوق همانگونه که در شکل ۳-۱۸ مشاهده می‌شود، از آنجا که کنتور این ایستگاه از نوع توربینی با ورودی ۲ اینچ بوده و با توجه به عدم رعایت فاصله‌ی لازم در ورودی کنتور که حدوداً برابر با ۵۰۸ (۱۰×۲×۲/۵۴) میلیمتر می‌باشد، ایجاد خطا در مقدار دبی اندازه‌گیری شده توسط کنتور، امری دور از انتظار نیست. از اینرو جهت اطمینان از صحت دبی قرائت‌شده می‌بایست تمهیداتی در نظر گرفت که این مورد را مرتفع نماید. این تمهیدات می‌تواند شامل بر تعویض کنتور و به عبارتی انتخاب کنتور مناسب با شرایط حاضر باشد. از جمله موارد دیگر می‌توان به بررسی خطای

ایجاد شده در دبی پرداخت و با انجام تصحیح بدون تغییر کنتور دبی صحیح را محاسبه نمود. تامین فاصله‌ی ورودی تا کنتور نیز می‌تواند یکی دیگر از روش‌های برطرف کردن خطا باشد.

با بررسی‌های انجام‌گرفته و مطالعه‌ی مزایا و معایب این نمونه ایستگاه‌ها می‌توان به این نتیجه رسید که استفاده از این ایستگاه‌ها در دبی‌های کمتر از ۲۰۰۰۰ مترمکعب در ساعت با توجه به نیاز به فضای بسیار کمتر از نمونه‌های مسطح، مطلوب می‌باشد. این قضیه با توجه به رشد روزافزون جمعیت و افزایش تراکم هر منطقه و نیز افزایش بهای زمین بیش از پیش باید مورد توجه قرار گیرد. در این راستا بدون شک محدودیت‌ها و مشکلاتی وجود دارد که با کار کارشناسی و ارائه‌ی ایده‌های جدید قابل رفع و یا به حداقل رساندن می‌باشند.

۳.۸.۳ تحلیل فرآیندی جریان در یک TBS کابینتی و مسطح

ایستگاه‌های تقلیل فشار گاز بخش مهمی از سیستم گازرسانی بوده که با اشکال و تجهیزات متفاوت طراحی و نصب می‌گردند و با پیشرفت علوم و فن آوری، ساخت این تجهیزات به طور مرتب تغییر و ارتقا می‌یابد. در یک تقسیم‌بندی کلی جهت هماهنگی مشخصات گاز موجود در خطوط لوله با مشخصات گاز مورد نیاز مصرف‌کنندگان، ایستگاه‌های تقلیل فشار گاز در سایزها و انواع متفاوت و با محدودیت‌های ظرفیتی و فشاری متنوعی مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرد.

بدین ترتیب با توجه به نوع کاربرد و فشار گاز ورودی به ایستگاه، نوع ایستگاه گاز انتخاب می‌شود و با توجه به پارامترهای اصلی زیر طراحی ایستگاه تقلیل فشار گاز انجام می‌گیرد:

- فشار و دمای عملیاتی گاز ورودی
- فشار و دمای عملیاتی گاز خروجی
- فشار طراحی و تست
- سرعت گاز داخل لوله
- مقدار جریان حجمی گاز

اجزای اصلی ایستگاه‌های گاز نیز به شرح زیر می‌باشد:

- | | | |
|------------------|----------------|------------------|
| ۱. شیر توپی | ۲. رگولاتور | ۳. شیر مخروطی |
| ۴. کنتور گاز | ۵. شیر اطمینان | ۶. فیلتر گاز خشک |
| ۷. شیر قطع جریان | ۸. فشارسنج | ۹. دماسنج |

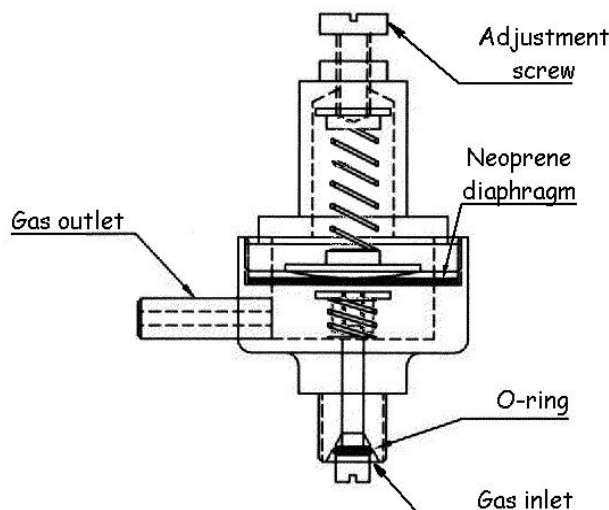
در ایستگاه‌هایی که ظرفیت آنها بیش از پنج هزار متر مکعب در ساعت بوده و تداوم گاز رسانی حیاتی می‌باشد، تعداد و خطوط ایستگاه‌ها بیش از یک خط خواهد بود. معمولا در اینگونه موارد ظرفیت هر خط در صدی از ظرفیت کل ایستگاه می‌باشد. تقسیم حداکثر ظرفیت ایستگاه بین چند خط به دلایل زیر صورت می‌پذیرد:

- میزان مصرف به حداکثر ظرفیت ایستگاه برسد .
- هنگام بروز اشکال فنی از قطع کامل گاز جلوگیری به عمل آید .
- انتخاب تجهیزات با ظرفیت بالا سبب عدم دقت در مصارف کم می‌شود .
- خطاهای اندازه‌گیری حجم گاز کاهش می‌یابد .

ضمنا در ایستگاه‌های دارای یک خط، جهت بعضی از تجهیزات خط کنار گذر طراحی می‌گردد تا هنگام تعمیرات در امر گازرسانی وقفه ای ایجاد نگردد.

این ایستگاه‌ها ضمنا بسته به موقعیت محل می‌تواند بصورت کابینتی (compact) و مسطح (flat) تولید گردند. با این تفاوت که در نوع مسطح هر خط ایستگاه می‌تواند دارای یک رگولاتور محوری و یک شیر قطع کن باشد و یا بجای آنها از یک رگولاتور شات آف نوع SLAM نصب گردد. اما در نوع کابینتی به علت فضای کمتر در هر خط تنها یک رگولاتور شات آف نوع SLAM نصب می‌گردد.

از آنجاییکه مهمترین بخش ایستگاه‌های تقلیل فشار بخش رگولاتور یا تنظیم کننده فشار جریان گاز می‌باشد لازم است در اینجا، در مورد اصول تئوریک تنظیم و یا تقلیل فشار اشاره مختصری انجام پذیرد. گاز بعد از عمل فیلتراسیون وارد بخش کاهش فشار و یا تنظیم فشار می‌گردد که در آن هدف، کاهش فشار موجود در شبکه به فشار مورد نیاز مصرف کننده می‌باشد. رگلاتور دستگامی است که در صورت تغییر جریان گاز می‌تواند میزان فشار آن را در حد معینی کنترل نماید. شماتیکی از یک رگلاتور صنعتی در شکل ۳-۲۰ نشان داده شده است.



شکل ۳-۲۰: شماتیکی از یک رگولاتور صنعتی

رگلاتورها از نظر ساختمانی در انواع فنری و پیلوت دار عرضه می‌گردند. در رگلاتورهای پیلوت دار تغییرات فشار خروجی با نیروی فنر در رگلاتورمتری دیگر به نام پیلوت مقایسه شده و نتیجه آن به صورت فشار گاز به دیافراگم رگلاتور اصلی اعمال می‌گردد و به عبارت دیگر تغییرات فشار خروجی تقویت شده و سپس باعث تغییر وضعیت شیر مانع می‌گردد. پیلوت عبارت است از یک رگلاتور فنری که از فشار ورودی تغذیه شده و متناسب با میزان فشردگی فنر خود فشار خروجی را مهیا می‌سازد. این فشار به عنوان فشار فرمان روی رگلاتور اصلی اعمال می‌شود. از مشخصه‌های فنی که در انتخاب رگلاتورها اهمیت بسیار دارد ظرفیت آنها می‌باشد که رابطه مستقیم با فشار ورودی و خروجی و چگالی گاز و شکل بدنه آن دارد به طوریکه نسبت بین فشار ورودی (P_1) و خروجی (P_2) تعیین کننده نوع جریان خروجی رگلاتور می‌باشد و اگر نسبت $P_2 < P_1/2$ باشد جریان کاملاً بحرانی و $P_2 = P_1/2$ جریان بحرانی و $P_2 > P_1/2$ جریان غیر بحرانی خواهد بود. اگر ضریب ثابت رگلاتور (k) به ساختمان رگلاتور و نوع سیال عبوری بستگی داشته باشد معادله کلی جریان در رگلاتورها به صورت $Q = K (P_2 (P_1 - P_2))^{1/2}$ است. که با توجه به آن و جداول موجود به راحتی می‌توان ظرفیت رگلاتور را در فشارهای مورد نظر بدست آورد.

معمول ترین رگولاتورهایی که امروزه در صنعت گاز و به ویژه در ایستگاه های تقلیل فشار کشور به کار گرفته می شوند از نوع محوری و شات آف می باشند. از جمله مزایای این نوع رگولاتورها شامل موارد زیر می‌شود:

- ساختار ساده آنها که در آن فقط یک المان متحرک وجود دارد.
- عملکرد آرام آنها در مقایسه با انواع شیرهای کف فلزی (Orifice Type – Globe Type)

- سیستم کنترل آن به صورت Pilot بوده که موجب افزایش دقت عمل آن می‌گردد.
- بالا بودن محدوده اندازه‌گیری یا Rangability ، (۱:۱۰۰)
- وسیع بودن دامنه ساخت آن از ۱ اینچ تا ۱۲ اینچ (ANSI cl.150-600)
- ارزان بودن
- قابلیت کاربری آن در شیرهای تقلیل فشار (P.R.V: Pressure Reducing Valve) و شیرهای اطمینان (Relief or B.P.V. : Back Pressure Valve)
- اما رگولاتورهای نوع محوری علی‌رغم مزایای زیاد آنها، معایبی هم دارند که از جمله می‌توان :
 - حداقل اختلاف فشار لازم جهت عملکرد صحیح شیر، با تغییر ضخامت و تغییر خاصیت الاستیسیته لاستیک درون شیر، تغییر می‌کند.
 - اندازه و ظرفیت شیر با وضعیت لاستیک درون شیر تغییر می‌کند.
 - کش آمدن لاستیک درون شیر گاهی موجب بسته شدن (shut off) شیر می‌گردد.
 - تعمیرات شیر مشکل بوده و برای تعمیرات، لازم است شیر از جای خود باز شود و خط جریان گاز بسته شود .
 - بعضی از مدل های آن استاندارد ANSI را پوشش نمی‌دهد بنابراین لازم است اصلاحاتی در لوله کشی مربوطه انجام پذیرد.
 - و رگولاتورهای شات آف نوع SLAM که اغلب مورد توجه کلیه سازندگان قرار می‌گیرند از مزایای زیر نیز برخوردار می‌باشند:
 - تعمیرات ساده تر به خاطر اینکه عنصر قابل تعویض در بالای شیر اصلی قرار دارد و نیاز به بازکردن شیر از خط اصلی نمی‌باشد.
 - حداقل افت فشار جهت بازکردن کامل مجرای شیر ثابت می‌باشد به دلیل اینکه عنصر قابل انعطاف آن در اثر باز شدن شیر افزایش طول نمی‌دهد (کش نمی‌آید)
 - عکس‌العمل سریع شیر در مقابل تغییرات فشار به دلیل به کار بردن شبکه بافته شده ارتجاعی (دیافراگم)
 - یک دیافراگم برای کلیه افت فشارها کافی می‌باشد.

نمونه ای از پرکاربردترین رگولاتورهایی که امروزه در صنعت گاز و به ویژه در ایستگاه‌های تقلیل فشار به کار گرفته می شوند در شکل ۳-۲۱ و شکل ۳-۲۲ نشان داده شده است.



شکل ۳-۲۱: شماتیکی از یک رگولاتور محوری



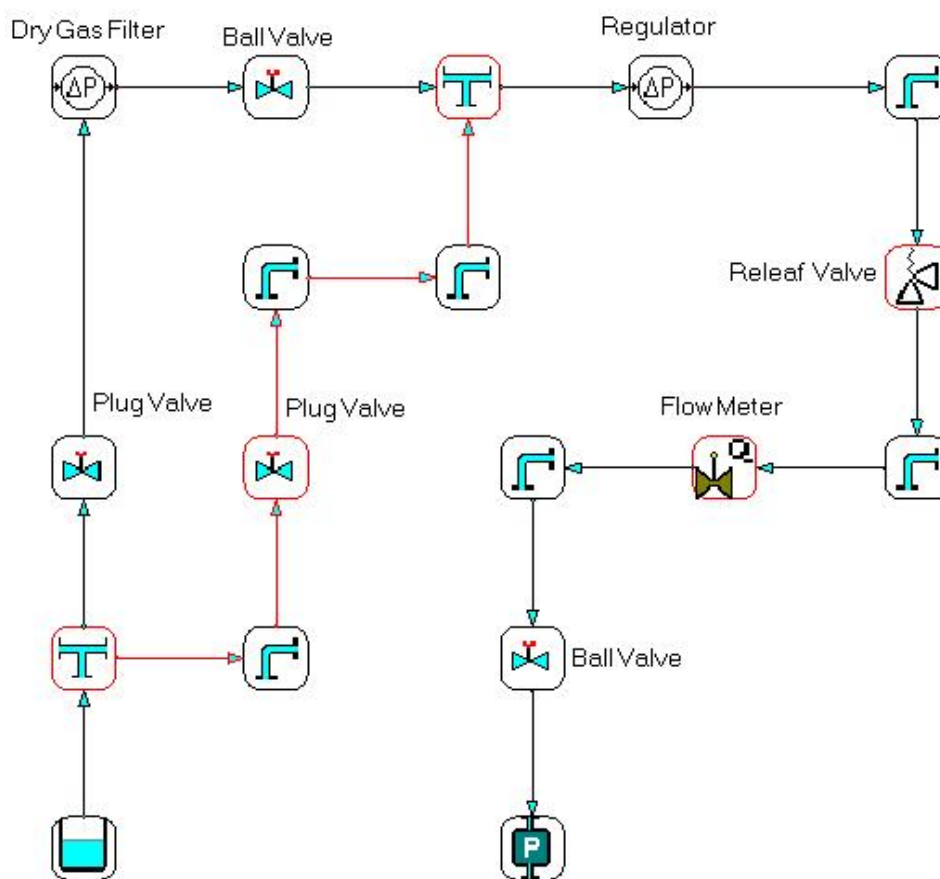
شکل ۳-۲۲: شماتیکی از یک رگولاتور شات آف نوع SLAM

پس با توجه به اینکه عضو اصلی در تعیین فرآیند گاز درون ایستگاه، رگولاتور می‌باشد، انتظار بر این است که از دیدگاه فرآیندی تفاوتی مابین ایستگاه‌های مسطح و کابینتی که از یک نوع رگولاتور استفاده می‌کنند، وجود نداشته باشد.

حال برای شبیه‌سازی یک مسئله نمونه، یک ایستگاه TBS (250/60-400) مورد بررسی قرار می‌گیرد. ایستگاه فوق یک ایستگاه تقلیل فشار است که در ابعاد کوچک ساخته شده و به علت حجم و وزن کم آن قابلیت حمل و نصب و بهره برداری نسبتاً آسانی دارد. در نقشه این ایستگاه عموماً یک خط اصلی و یک خط فرعی در نظر گرفته شده که خط فرعی دارای اندازه ۱ اینچ می‌باشد و این ایستگاه بسته به موقعیت محل می‌تواند در دو نوع

مسطح یا کابینتی تولید گردد. در شکل ۳-۱۸، نمونه‌ای از یک ایستگاه TBS با ظرفیت ۴۰۰ هزار مترمکعب بر ساعت ارائه شده‌است.

به منظور شبیه‌سازی ایستگاه موردنظر، از نرم‌افزار PSFF و PIPESYS استفاده شده که تا حدی می‌توانند یک ایستگاه تقلیل فشار را شبیه‌سازی و تحلیل نمایند. نمونه‌ای از این ایستگاه TBS که با نرم‌افزار PSFF شبیه‌سازی شده در شکل ۳-۲۳ نشان داده شده‌است. قابل ذکر است که نرم‌افزار مربوطه در گزارشات مهر و بهمن سال ۸۵ بطور کامل تشریح شده‌است. در نقشه این ایستگاه خط فرعی (Bypass) در نظر گرفته شده با رنگ قرمز مشخص می‌باشد.



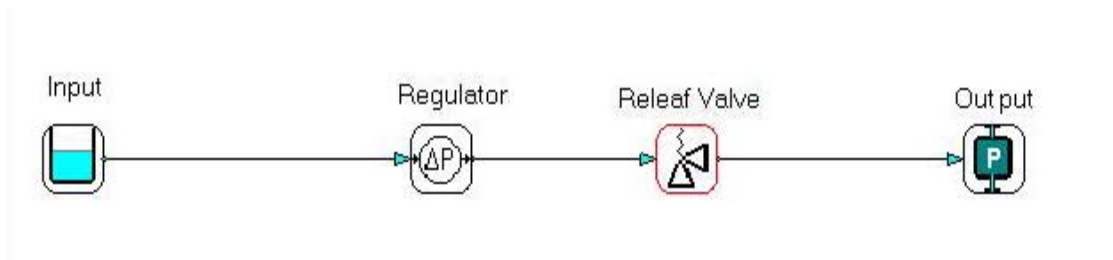
شکل ۳-۲۳: نمونه‌ای از یک ایستگاه TBS با ظرفیت ۴۰۰ مترمکعب بر ساعت

حال برای اینکه این ایستگاه TBS را در حالت کابینتی یا مسطح از نظر فرایندی تحلیل نمود نیاز به فرضیات خاصی می‌باشد. این فرضیات به گونه‌ای هستند که ضمن ساده‌سازی تا حد ممکن مساله، آنرا نیز از واقعیت دور نمی‌کنند. برای مثال از جمله فرضیات در نظر گرفته شده شامل موارد زیر می‌باشد:

- انتخاب Typical Natural Gas به عنوان سیال ورودی

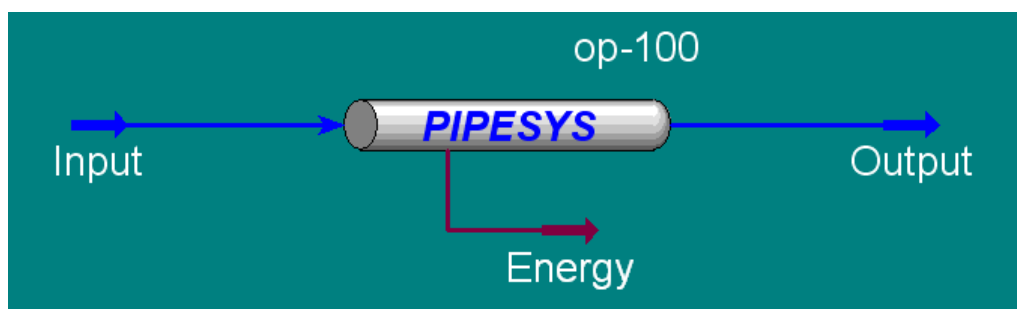
- دمای ورودی ۳۰ درجه سانتیگراد
- فشار ورودی ۲۵۰ psig
- دمای محیط ۴۵ درجه سانتیگراد
- صرف‌نظر از افت فشار در Valve ها (به دلیل ۱۰۰ درصد باز بودن آنها)
- صرف‌نظر از افت فشار در فیلتر
- صرف‌نظر از افت فشار در دبی سنج

بدین ترتیب در یک ایستگاه تقلیل فشار قطعه اصلی رگولاتور است که کار افت فشار را انجام می‌دهد. لذا ایستگاه TBS مسئله با یک رگولاتور تنها شبیه سازی شد. این ایستگاه شبیه سازی شده با نرم افزار PSFF در شکل ۳-۲۴ نشان داده شده است.



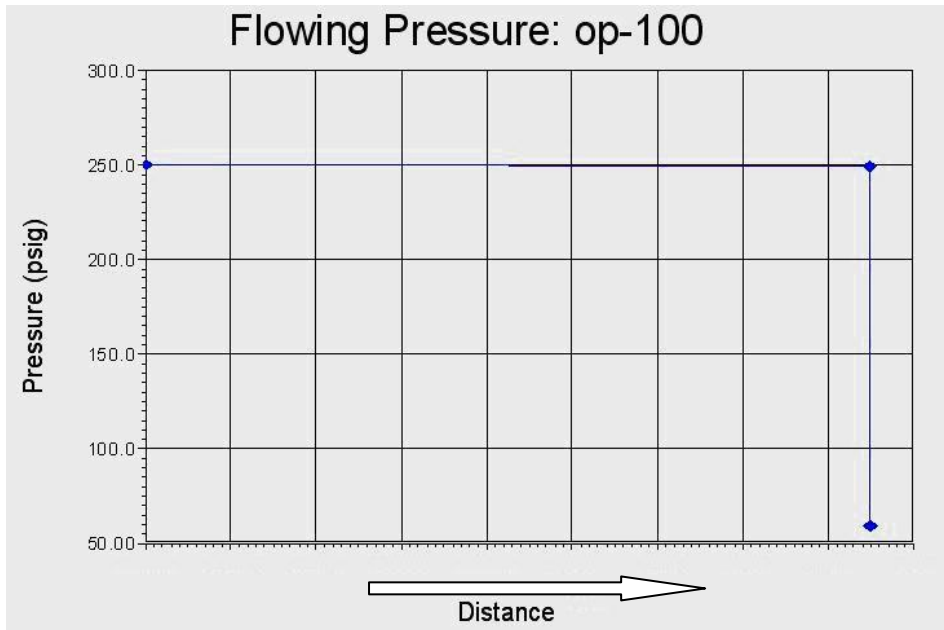
شکل ۳-۲۴: نمونه‌ای از یک ایستگاه TBS با یک رگولاتور

حال از آنجایی که تحلیل‌های صورت گرفته شده بایستی در جهت بررسی اثرات تغییرات ورودی ایستگاه روی خروجی آن باشد و در تحلیل‌های مسئله در نرم‌افزار PSFF با محدودیت‌هایی مواجه بودیم، لذا از نرم‌افزار دیگری بنام PIPESYS به منظور تحلیل استفاده شد. بدین ترتیب نمونه‌ای از شبیه‌سازی انجام شده توسط این نرم‌افزار در شکل ۳-۲۵ آورده شده است.



شکل ۳-۲۵: نمونه‌ای از یک ایستگاه TBS شبیه سازی شده توسط نرم‌افزار PIPESYS

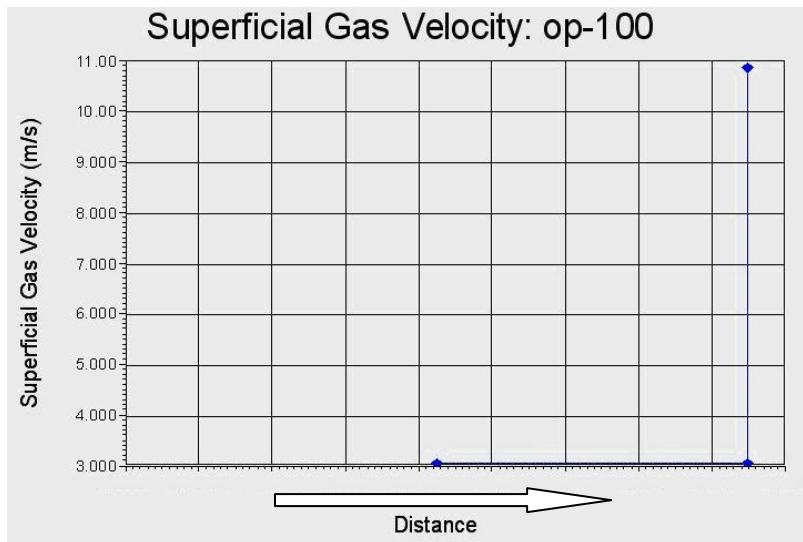
بعد از شبیه‌سازی فرآیند، پارامترهای اصلی این ایستگاه تقلیل فشار گاز بررسی شده‌است. اولین پارامتر بررسی‌شده تغییرات فشار جریان در طول مسیر یک ایستگاه TBS کابینتی یا مسطح است. نتایج این بررسی در شکل ۳-۲۶ ارائه شده‌است.



شکل ۳-۲۶: تغییرات فشار جریان گاز در طول مسیر یک ایستگاه TBS کابینتی یا مسطح

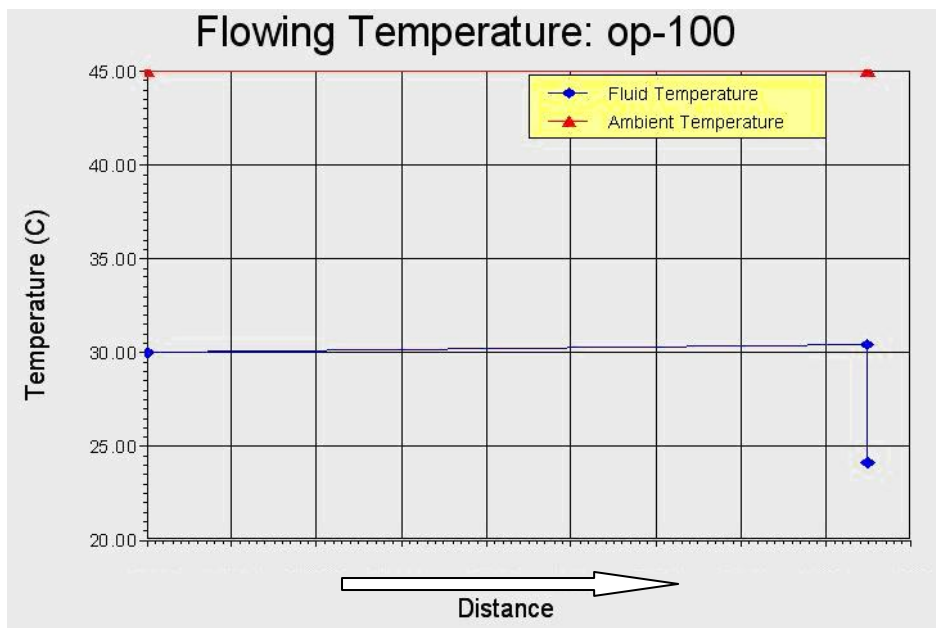
همان‌طور که در شکل بالا مشاهده می‌شود، تقریباً تغییرات فشاری در طول مسیر لوله‌ها تا قبل از ورود گاز به رگولاتور وجود ندارد و پس از رگولاتور است که افت ناگهانی فشار ایجاد می‌شود و پس از آن نیز ثابت می‌ماند. قابل توجه است که بدلیل ثابت بودن فشار پس از رگولاتور ادامه فرآیند در اینجا نشان داده نشده‌است.

نکته بعدی تغییرات سرعت گاز می‌باشد که در طول مسیر تقریباً وجود ندارد و پس از ورود گاز به رگولاتور است که افزایش ناگهانی سرعت داریم و پس از آن نیز ثابت می‌ماند. این پارامتر در طراحی خطوط لوله اهمیت دارد که در شکل ۳-۲۷ نشان داده شده‌است.



شکل ۳-۲۷: تغییرات سرعت جریان گاز در طول مسیر یک ایستگاه TBS کابینتی یا مسطح

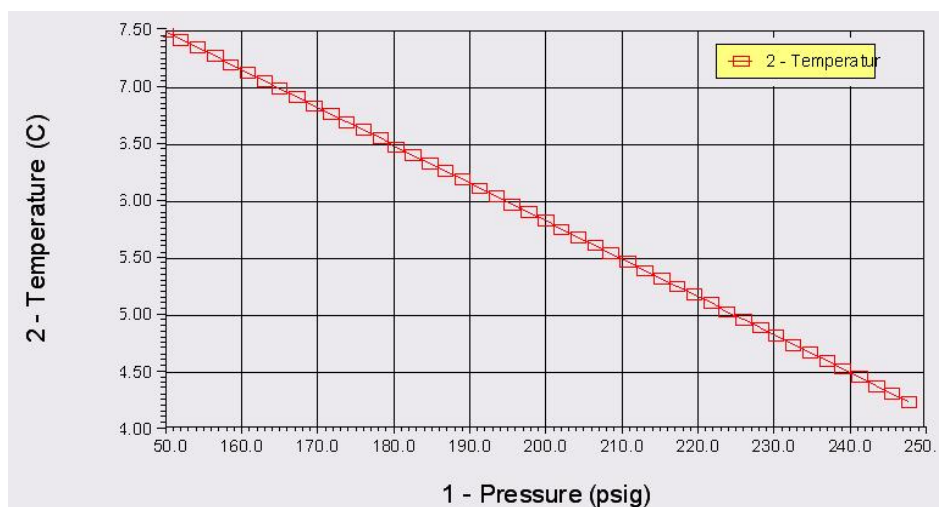
پارامتر بعدی تغییرات دمای گاز می‌باشد که نتایج مربوط به آن در شکل ۳-۲۸ نشان داده شده‌است.



شکل ۳-۲۸: تغییرات دمای جریان گاز در طول مسیر یک ایستگاه TBS کابینتی یا مسطح

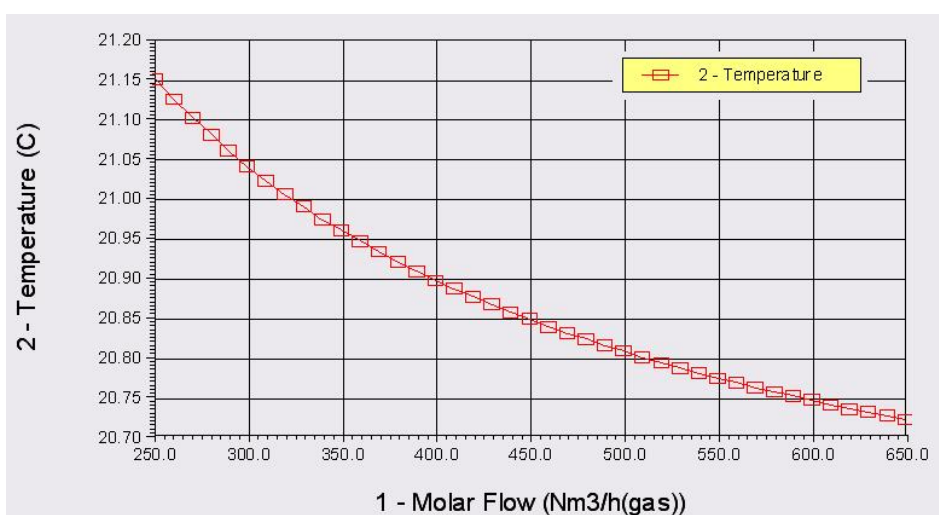
همان‌طور که از شکل مشاهده می‌شود، در اثر تبادل حرارت لوله‌ها با محیط اطراف افزایش دمای بسیار ناچیزی در طول مسیر گاز بوجود می‌آید و پس از ورود گاز به رگولاتور افزایش ناگهانی دما ایجاد می‌شود و پس از رگولاتور نیز تقریباً افزایش چندانی نمی‌یابد. همان‌طور که قبلاً گفته شد، طی فرآیند تقلیل فشار گاز، دمای گاز کاهش می‌یابد. اما آنچه مسلم است این مقدار کاهش به اختلاف فشار بین ورود و خروج و همچنین دمای ورودی بستگی دارد.

شکل ۳-۲۹ تغییرات دمای خروجی را نسبت به اختلاف فشار ورود و خروج با توجه به ثابت بودن فشار خروجی نشان می‌دهد.



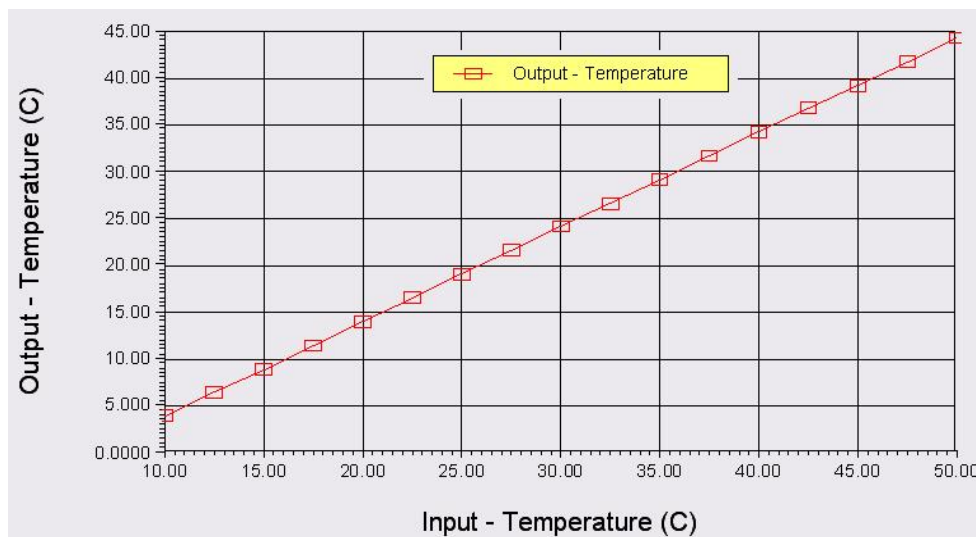
شکل ۳-۲۹: تغییرات دمای خروجی نسبت به اختلاف فشار ورود و خروج یک ایستگاه TBS کابینتی یا مسطح

همانطور که در شکل ۳-۲۹ مشاهده می‌شود با افزایش اختلاف فشار، اختلاف دمای اولیه و ثانویه زیاد می‌شود. این موضوع به آنتالپی ثابت بودن فرایند رگولاتور مربوط می‌شود. زیرا کاهش دما در آن به ضریب ژول-تامسون بستگی دارد. قابل توجه است که این ضریب تابع فشار می‌باشد. همچنین تغییرات دمای خروجی نسبت به تغییرات دبی جریان گاز یک ایستگاه TBS کابینتی یا مسطح نیز که با استدلال مشابه قابل توجیه است در شکل ۳-۳۰ نشان داده شده است.



شکل ۳-۳۰: تغییرات دمای خروجی نسبت به تغییرات دبی جریان گاز یک ایستگاه TBS کابینتی یا مسطح

ضمناً تغییرات دمای خروجی نسبت به تغییرات دمای جریان گاز یک ایستگاه TBS کابینتی یا مسطح در شکل ۳-۳۱ نشان داده شده است. آنچه این شکل نشان می‌دهد افزایش دمای خروجی گاز با افزایش دمای ورودی است در صورتیکه سایر پارامترهای موثر ثابت بمانند.



شکل ۳-۳۱: تغییرات دمای خروجی نسبت به تغییرات دمای ورودی گاز یک ایستگاه TBS کابینتی یا مسطح

۹.۳ ایستگاه‌های زیرزمینی

از دیگر مواردی که در این بخش آورده شده است جمع‌آوری اطلاعاتی در مورد ایستگاه‌های تقلیل فشار گاز زیرزمینی بوده است. نتایج بررسی‌ها نشان می‌دهد در این مورد هنوز مطالعات زیادی صورت نگرفته است. در ادامه، محصولات چند شرکت که در این زمینه در وبسایت خود محصولاتی ارائه داده‌اند آورده شده است.

یکی از این شرکت‌ها، کمپانی آلمانی RMG است که محصولات آن در رده‌های گوناگون تجهیزات صنایع گاز و ایستگاه‌های تقلیل فشار گاز ارائه شده است. این شرکت با آدرس اینترنتی www.rmg.de دارای سری‌های گوناگونی از ایستگاه‌های تقلیل فشار بوده که در این میان مدل‌های زیرزمینی در ذیل مورد بحث قرار می‌گیرد. از خصوصیات کلی انواع مدل‌های زیرزمینی این شرکت، به موارد زیر می‌توان اشاره کرد:

- همه عناصر ایستگاه‌های متداول کاهش فشار گاز را دارا می‌باشند.
- طراحی کاملاً زیر خاک آن، نصب در مکان‌های شهری یا روستایی را اجازه می‌دهد.

- میزان سروصدا کاهش می‌یابد.
 - تعمیر و نگهداری آسانی دارند.
 - هزینه خرید محل نصب را حداقل می‌کنند.
 - از تخریب و آسیب جلوگیری می‌کنند.
- سایر مشخصات انواع مدل‌های این شرکت در ادامه آورده شده‌است.

۱.۹.۳ مدل BD-RMG 470 - Krysalis

این واحد کنترلی زیرزمینی گاز بنا به ادعای شرکت سازنده دارای مشخصات ذیل می‌باشد:

- مناسب برای گازهای DVGW G 260، و دیگر گازهای درخواست شده
- روش ساخت آسان
- ماکزیمم فشار ورودی: ۷ بار
- محدوده فشار خروجی: ۰/۰۲ تا ۰/۰۷۵ بار
- محدوده قطع شدن زیاد شدن فشار (Overpressure cut-off): ۰/۰۳۵ تا ۰/۲ بار
- محدوده اطمینان داخلی (Internal relief): ۰/۰۳ تا ۰/۱۲ بار
- محدوده دمایی عملکرد: ۲۰- تا ۶۰+ درجه سانتیگراد
- اتصالات:

PN16 / DIN 2633

Inlet: DN 150

Outlet: DN 200

شایان ذکر است که DIN^{۱۹} مخفف استاندارد صنایع آلمان به زبان انگلیسی است. نمایی از این مدل ایستگاه زیرزمینی در شکل ۳-۳۲ نشان داده شده‌است.

¹⁹ Deutsche Industrie-Norm 'German Industrial Standard'



شکل ۳-۳۲: نمایی از یک ایستگاه زیرزمینی BD-RMG 470 - Krysalis

۲.۹.۳ مدل RMG 470 "Krysalis" PN 16

این واحد کنترلی زیرزمینی گاز بنا به ادعای شرکت سازنده دارای مشخصات ذیل می‌باشد:

- مطابق با استاندارد DVGW VP 702 ساخته شده‌است.
- برای گاز طبیعی و همه مواد گازی غیر خورنده مناسب‌است.
- همه بخش‌های در حال کار در یک بدنه چدنی نشکن نصب شده‌است.
- روش ساخت آسان
- تأیید شده توسط DIN-DVGW
- ماکزیمم فشار ورودی، ۱۶ بار
- محدوده فشار خروجی ، ۰/۰۲ تا ۴ بار
- محدوده قطع شده زیاد شدن فشار (Overpressure cut-off)، Wdo، ۰/۰۳ تا ۴۰ بار
- محدوده قطع شده زیاد شدن فشار (Overpressure cut-off)، Wdu، ۰/۰۰۵ تا ۴۰ بار

- محدوده اطمینان داخلی (Internal relief)، ۰/۰۴ تا ۸ بار
- محدوده دمایی عملکرد: ۲۰- تا ۶۰+ درجه سانتیگراد
- انواع مدلها: active-slam
- اتصالات:

PN16 / DIN 2633 and ANSI 150
Inlet: DN 100
Outlet: DN 150

نمایی از این مدل ایستگاه زیرزمینی در شکل ۳-۳۳ نشان داده شده است.



شکل ۳-۳۳: نمایی از یک ایستگاه زیرزمینی RMG 470 "Krysalis" PN 16

۳.۹.۳ مدل ۱۹ "Krysalis" RMG - BD

این واحد کنترلی زیرزمینی گاز بنا به ادعای شرکت سازنده دارای مشخصات ذیل می‌باشد:

- همه عناصر در حال کار به آسانی قابل تعویض است.
- مناسب برای گازهای DVGW G 260، و دیگر گازهای درخواست شده
- همه لوله‌های جریان هوا و سیستم تهویه در یک لوله تهویه بالای زمین جمع شده‌اند.
- اتاق فیلتر مجزا این امکان را ایجاد می‌کند که تعمیرات فیلتر بدون حذف واحد کنترل اصلی انجام شود.

- همه بخشهای در حال کار در یک بدنه فولادی سخت نصب شده‌است.
- ماکزیمم فشار ورودی: ۱۹ بار
- محدوده فشار خروجی بالا، حداکثر تا ۷ بار
- حداقل افت فشار: ۰/۵ بار
- ضریب نرخ جریان، ۳ مترمکعب بر ساعت
- انواع مدلها: Slam/Active, Monitor Active, Slam/Monitor/Active
- اتصالات:

Flange PN 16/ ANSI 150
 Inlet: DN 100 and DN 200
 Outlet: DN 150 and DN 200

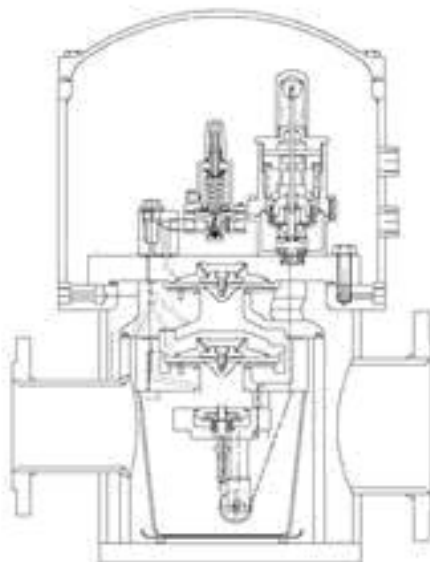
نمایی از این مدل ایستگاه زیرزمینی در شکل ۳-۳۴ نشان داده شده‌است.



شکل ۳-۳۴: نمایی از یک ایستگاه زیرزمینی Krysalis 19 „RMG - BD

۴.۹.۳ مدل 19 mini-Krysalis ,, BD - RMG

این واحد زیرزمینی دارای همه مشخصات مدل 19 Krysalis ,, BD - RMG می‌باشد. شماتیکی از این مدل ایستگاه زیرزمینی در شکل ۳-۳۵ نشان داده شده است.



شکل ۳-۳۵: شماتیکی از یک ایستگاه زیرزمینی 19 mini-Krysalis ,, BD - RMG

۵.۹.۳ مدل 280 Vector ,, RMG - UKA

این واحد کنترلی زیرزمینی گاز بنا به ادعای شرکت سازنده دارای مشخصات ذیل می‌باشد:

- همه عناصر در حال کار به آسانی قابل تعویض است.
- مناسب برای گازهای DVGW G 260، و دیگر گازهای درخواست شده
- همه لوله های جریان هوا و سیستم تهویه در یک لوله تهویه بالای زمین جمع شده اند.
- همه بخش های در حال کار در یک بدنه فولادی سخت نصب شده است.
- رگولاتور با مکانیسم عملکرد مستقیم (direct acting)
- ماکزیمم فشار ورودی، ۴ بار
- محدوده فشار خروجی بالا، ۰/۰۱ تا ۰/۱۳۸ بار
- محدوده دمایی عملکرد: ۱۵- تا ۶۰+ درجه سانتیگراد
- اندازه رگولاتور، ۵۰ تا ۸۰ میلی متر

- انواع مدلها: active-slam
- ویژگی اختیاری: شیر اطمینان برای فشارهای بیشتر و کمتر از حد مجاز
- اتصالات:

Flange nach PN 16/ DIN 2633, ANSI 150

Inlet: DN 80, DN 100, DN 150

Outlet: DN 80, DN 100, DN 150

نمایی از این مدل ایستگاه زیرزمینی در شکل ۳-۳۶ نشان داده شده است.



شکل ۳-۳۶: نمایی از یک ایستگاه زیرزمینی RMG-UKA 280 „Vector

۶.۹.۳ مدل RMG 402 „Vector

این واحد کنترلی زیرزمینی گاز بنا به ادعای شرکت سازنده دارای مشخصات ذیل می باشد:

- مناسب برای گازهای DVGW G 260، و دیگر گازهای درخواست شده
- همه لوله های جریان هوا و سیستم تهویه در یک لوله تهویه بالای زمین جمع شده اند.
- همه بخشهای در حال کار در یک بدنه فولادی سخت نصب شده است.
- ماکزیمم فشار ورودی، ۱۹ بار
- محدوده فشار خروجی بالا، ۰/۰۲ تا ۴ بار

- محدوده نصب شیر قطع کننده ایمنی، ۰/۰۵ تا ۴/۵ بار
- محدوده دمایی عملکرد: ۱۵- تا ۶۰+ درجه سانتیگراد
- انواع مدلها: active-slam
- ویژگی اختیاری: شیر قطع کننده ایمنی برای فشارهای بیشتر و کمتر از حد مجاز
- اتصالات:

Flange PN 16/DIN 2633, ANSI 150

Inlet: DN 50

Outlet: DN 80

۷.۹.۳ مدل RMG-UKA 680 ,,Vector

این واحد کنترلی زیرزمینی گاز بنا به ادعای شرکت سازنده دارای مشخصات ذیل می‌باشد:

- مناسب برای گازهای DVGW G 260، و دیگر گازهای درخواست شده
- همه لوله‌های جریان هوا و سیستم تهویه در یک لوله تهویه بالای زمین جمع شده‌اند.
- همه بخش‌های در حال کار در یک بدنه فولادی سخت نصب شده‌است.
- برای مواجه شدن با فشار ورودی پایین و اختلاف فشار حداقل با توان بالا طراحی شده‌است.
- ماکزیمم فشار ورودی، ۷ بار
- محدوده فشار خروجی، ۰/۰۱۸ تا ۰/۰۸ بار
- اندازه واحد کنترل، ۱۵۰ میلی‌متر
- انواع مدلها: Slam/Active, Monitor Active, Slam/Monitor/Active
- ویژگی اختیاری: شیر قطع کننده ایمنی و رگولاتور مدل RMG 642
- اتصالات:

Flange PN 16

Inlet: DN 200, DN 250, DN 300

Outlet: DN 200, DN 250, DN 300

نمایی از این مدل ایستگاه زیرزمینی در شکل ۳-۳۷ نشان داده شده است.



شکل ۳-۳۷: نمایی از یک ایستگاه زیرزمینی RMG-UKA 680 „Vector

۸.۹.۳ مدل RMG - UKA „Krysalis 16

این واحد کنترلی زیرزمینی گاز بنا به ادعای شرکت سازنده دارای مشخصات ذیل می‌باشد:

- همه عناصر در حال کار به آسانی قابل تعویض است.
- مناسب برای گازهای DVGW G 260، و دیگر گازهای درخواست شده
- ماکزیمم فشار ورودی: ۱۶ بار
- محدوده فشار خروجی بالا، ۰/۰۲ تا ۴ بار با رگولاتور مدل RMG 402 and RMG 620
- حداقل افت فشار ۰/۵ بار
- محدوده قطع شدن زیاد شدن فشار (Overpressure cut-off)، Wdo، ۰/۰۴ تا ۴/۵ بار
- محدوده قطع شدن زیاد شدن فشار (Overpressure cut-off)، Wdu، ۰/۰۰۵ تا ۰/۳ بار
- محدوده اطمینان داخلی (Internal relief)، ۰/۰۴ تا ۸ بار
- ضریب نرخ جریان، ۱/۵ مترمکعب بر ساعت
- اتصالات:

Flange PN 16/ ANSI 150

Inlet: DN 100

Outlet: DN 150

نمایی از این مدل ایستگاه زیرزمینی در شکل ۳-۳۸ نشان داده شده است.



شکل ۳-۳۸: نمایی از یک ایستگاه زیرزمینی Krysalis 16, RMG - UKA

شرکت دیگر، کمپانی آلمانی Elster است که در زمینه سیستم‌های اندازه‌گیری گاز و ایستگاه‌های تقلیل فشار گاز فعالیت می‌کند. این شرکت که دارای ۳۸ شعبه در سرتاسر دنیا از جمله ایران است دارای سری‌های گوناگونی از ایستگاه‌های تقلیل فشار زیرزمینی با طراحی‌های خیلی ساده تا بسیار پیشرفته بوده که در ادامه مورد بحث قرار می‌گیرند. قابل ذکر است، آدرس اینترنتی به‌مراه سایر اطلاعات از شعبه ایران آن در گزارش مردادماه ۸۷ دفتر آورده شده است.

از خصوصیات کلی انواع مدل‌های زیرزمینی بنا به ادعای این شرکت، به موارد زیر می‌توان اشاره کرد:

- سروصدای کمتری باشد.
- هزینه‌های خرید ایستگاه پایینتر است.
- هزینه‌های محفظه‌سازی حذف می‌شود.
- خطر تخریب ایستگاه کاهش می‌یابد یا حذف می‌گردد.
- آسانی مکان‌یابی و نقشه‌کشی ایستگاه
- کاهش آلودگی‌های زیست‌محیطی

نمایی از یک مدل ایستگاه زیرزمینی ساده این شرکت در شکل ۳-۳۹ نشان داده شده است.



شکل ۳-۳۹: شماتیکی از یک ایستگاه زیرزمینی شرکت Elster

ضمناً از خصوصیات خاص انواع مدل‌های زیرزمینی مدل Orpheus، به موارد زیر می‌توان اشاره کرد:

- تعدادی از واحدهای تقلیل فشار کاملاً جامع را شامل می‌شوند که برای نصب در زیر زمین طراحی شده‌اند.
 - کاربردهای وسیعی دارند، بطوریکه ممکن است برای فشارهای ورودی از محدوده ۱۴۰ میلی‌بار تا ۱۹ بار با ظرفیت‌های تا ماکزیمم ۱۰۰۰۰۰۰ استاندارد مترمکعب بر ساعت استفاده شوند.
 - سری ۴، Orpheus، برای کاربردهای توزیع و محفظه‌سازی کوچکتر تا ماکزیمم ظرفیت ۴ بار مناسب است.
 - سری ۱۰، Orpheus، برای کاربردهای بزرگتر مناسب است.
 - این واحدها که بخوبی آزمایش شده‌اند بمنظور تعمیر و نگهداری راحتتر از یک نوع کاتریج و ساختمان راه ورود از بالا (top-entry) استفاده می‌کنند.
- نمایی از یک مدل ایستگاه زیرزمینی مدل Orpheus در شکل ۳-۴۰ نشان داده شده است.



Series 10 Orpheus

شکل ۳-۴۰: نمایی از یک ایستگاه زیرزمینی مدل Orpheus شرکت Elster

۱۰.۳ طراحی ایستگاه‌های اندازه‌گیری به روش آلتراسونیک

با وجود اینکه طراحی ایستگاه‌های اندازه‌گیری آلتراسونیک برای خیلی‌ها هنوز تلاشی جدید است، اما در واقع این امر به خوبی در صنعت گاز، کاربردی شده است. اندازه‌گیری دبی جریان به روش آلتراسونیک^{۲۰} (USM) دارای چندین ملاحظه است که در بخش حاضر به مهم‌ترین و اصلی‌ترین آیتم‌ها در این باره اشاره می‌شود.



شکل ۳-۴۱: طلوعی تازه در صنعت اندازه‌گیری دبی گاز

²⁰ Ultra-Sonic flow Meter

۱.۱۰.۳ مشخصه‌های USM

یک وسیله اندازه‌گیری بر اساس مشخصه‌های عملکرد در کاربرد، انتخاب می‌گردد. فلومتر آلتراسونیک USM وسیله اندازه‌گیری با دقت بالا برای محاسبه بازه وسیعی از دبی‌های جریان از مقادیر کم تا زیاد می‌باشد. این وسایل اندازه‌گیری اغلب قابلیت جایگزینی و برابری با چندین اوریفیس موازی را دارند. از لحاظ دیواره لوله، این وسایل بسیار مقاوم‌تر از اغلب اندازه‌گیرها هستند. این وسایل می‌توانند مقادیر کم دبی یا نرخ جریان‌ات با سرعت بالای عملکرد درون لوله را بدون هیچ‌گونه خوردگی اندازه بگیرند. بعلاوه، دبی‌سنج‌های آلتراسونیک در مقایسه با تکنولوژی‌های با دقت بالای مرسوم، در موارد محاسبه دبی گاز‌نم‌دار عملکرد قابل توجهی داشته و در مواردی که فشار بالا وجود دارد، خوب عمل می‌کنند. بعنوان نمونه برخی از آنها در پاشش و تزریق گاز با فشار ۱۰۰۰۰ پوند بر اینچ مربع کار می‌کنند. به هر حال، قابل توجه است که تنها تعداد کمی طراحی لوله اندازه‌گیر و قالب طرح وسیله برای انواع کاربردها لازم می‌باشند.



شکل ۳-۴: شماتیک یک USM (انتخاب المان‌های یک USM بر حسب کاربرد بسیار مهم است)

۲.۱۰.۳ ملاحظات کلی طراحی USM

ملاحظات زیادی بایستی در انتخاب و طراحی USM استاندارد در نظر گرفته شوند که در ذیل به برخی از مهمترین آنها اشاره می‌شود:

- تطابق این USM با کاربرد مورد نظر
- ضریب ایمنی
- کالیبراسیون روی وسیله
- یک‌جهته یا دو‌جهته بودن
- کمترین هزینه و بیشترین بازدهی
- تطابق فضای موجود با طول USM
- ملاحظات نزدیکی به شیر کنترل جریان
- افت فشار
- مشخصات لوله USM (شامل تولرانس سوراخ، زبری سطوح، نحوه قرارگیری لوله جهت محاسبه دبی، شاخص گذاری و ...)
- مشخصه‌های مربوط به مواد، ضد زنگ بودن، پوشش نیکلی
- مشخصات رنگ‌کاری
- تست و سندسازی وسیله (یعنی تست اشعه X، H-stat، تیزی و ...)
- مکان و تعداد نقاط کالیبره کردن وسیله
- ماکزیمم مجاز برای صدای محیطی
- عایق‌کاری شیرها و سوراخ وسیله
- پیشنهادات لوله‌کشی از سوی تولیدکننده
- نوع فلنج (RTJ یا RF)
- زانویی و لوله‌های تخلیه

- سه‌راهی‌های کاهش صدا
- استانداردهای موافق با مکانیک وسیله
- استانداردهای موافق با ماهیت اندازه‌گیری وسیله
- استانداردهای موافق با ایمنی وسیله
- نیازهای خاص قراردادی و پیمانی
- نظارت و بازرسی سریع
- گواهی بر صحت کالیبراسیون

۳.۱۰.۳ ملاحظات طراحی سایت استفاده از USM

در زیر چند مشخصه که لازم است در طراحی ایستگاه استفاده از USM رعایت شود مرور می‌گردند:

- وجود اتاق تمیزکردن ایستگاه USM
- وجود فضای باز برای تخلیه و خارج کردن ابزارها
- نصب افقی مطلق بدون افتادگی
- نیازها و لازمه‌های وزنی و محافظ دستگاه
- ایزولاسیون و عایق‌کاری لوله اندازه‌گیر
- ملاحظات زمین
- ایجاد فضای مناسب برای فلنج‌ها در هنگام جوشکاری‌ها
- نحوه دسترسی به وسایل و تجهیزات سرویس‌دهنده
- درجه ایمنی محیط سایت
- جمع‌کننده اضافات و ضایعات وسیله (blow down)
- خیز و بلندشدن سر وسیله (Header)
- کانال‌کشی
- کنترل دسترسی‌ها، حصارکشی

- فاضلاب

- سرپناه، حفاظ‌ها و میزان نور سایت

در هنگام طراحی و نصب المان‌های مختلف ایستگاه‌ها توجه به نکات و ملاحظات بسیار ضروری است؛ به عنوان نمونه در شکل ۳-۴۳ برای نصب منبسط‌کننده گاز به دلیل جوشکاری نزدیک شیر، لقی مناسب در نظر گرفته نشده است و این یک نوع ایراد اساسی در طراحی سایت چنین ایستگاه‌هایی است.



شکل ۳-۴۳: یک نمونه ایراد در طراحی سایت اندازه‌گیر USM

۴.۱۰.۳ ملاحظات مربوط به طراحی و مونتاژ لوله USM

لوله اندازه‌گیر جزء جدایی‌ناپذیر یک USM بوده و به عنوان نماینده میزان سطح کارایی نهایی دستگاه شناخته می‌شود. بدون استفاده از طراحی و فرآیندهای مونتاژ با کیفیت، به راحتی ایستگاه اندازه‌گیری به مخاطره خواهد افتاد. در ادامه به برخی از ملاحظات و استانداردهای مربوط به مونتاژ و طراحی لوله دبی سنج آلتراسونیک اشاره می‌شود:

- صاف کردن طول لوله مطابق استاندارد AGA

- مشخصات مواد به کاررفته (A106، X52، ...)

- مناسب بودن قطر سوراخ دستگاه
- صاف کردن محل‌های سایش (فرزکاری) یا جوشکاری
- تطبیق و هم‌تراز بودن لوله با دستگاه اندازه‌گیر
- تناسب و هم‌ترازی پین‌های لوله به وسیله
- راحت بودن در بازکردن و در آوردن فلنج‌ها و نوع فلنج (RF یا RTJ)
- نصب مرکزی و محوری
- نصب چاه حرارتی مطابق AGA 9
- مشخصات گسکت‌ها و پیچ‌ها
- اصلاح و انجام الگوهای فروشنده درباره کالیبراسیون آچارها و گشتاورها
- قابلیت اندازه‌گیری
- پوشش‌ها و رنگ‌های مخصوص
- انجام تست‌های مکانیکی، تست هیدرو و تست اشعه X
- مستندسازی، رادیوگراف‌ها، هیدرو-چارت‌ها
- خوردگی

هم‌ترازی از تناسب قطر سوراخ مهم‌تر می‌باشد. به عنوان نمونه AGA 9 اجازه اتصال لوله به اندازه‌گیر را به میزان رعایت $\pm 1.0\%$ می‌دهد. این بدان معنی است که برای یک سوراخ ۱۱/۷۵ اینچی، این مقدار برابر تقریباً $\pm 0.117\%$ (معادل یک‌هشتم اینچ) می‌باشد که این اختلاف بزرگ است. لازم به ذکر است که USM‌ها به‌خوبی قادر به اندازه‌گیری جریان در حالت‌های هم‌مرکز با لوله بوده ولی حالت‌هایی که در آنها مرکزهای وسیله و لوله بر هم منطبق نیست می‌توانند منشأ تولید خطاهای بزرگی در حدود ۰.۱ یا ۰.۲٪ شوند. علت این عدم تناسب مراکز در عدم استفاده از تکنیک‌های اجبار در هم‌ترازی محورها و بستن پیچ و مهره‌ها در فلنج نشأت می‌گیرد. همچنین اضافه شدن هر کدام از تولرانس‌های بین قطر داخلی سوراخ‌ها و قطر خارجی پیچ‌ها باعث غیرهم‌مرکزیت می‌گردد.

همچنین تعدادی از ایستگاه‌های اندازه‌گیری USM صدای بسیار بلندی را گزارش کرده‌اند. یک گسکت فلزی فرمانند در این ایستگاه‌ها برای مشاهده اغتشاشات دبی توسط انحرافات زمانی متناوب ترنسدیوسر استفاده می‌شد که در آنها حلقه محافظ داخلی وجود ندارد. گشتاور فلنجی (یا گشتاورهای مازاد ممکن) مارپیچ فلزی سیستم را با فشار به داخل سوراخ و جریان عبوری حرکت می‌دهد. اینها انواعی از مسائلی هستند که در موقع عملکرد سیستم باید توسط طراحان در نظر گرفته شده و در انتخاب قطعات این زمینه و نیز در مشخصه‌های مونتاژ توسط آنها دقت شود. اگر مدیر پروژه و یا طراح ایستگاه نتوانند مونتاژگر لوله سیستم اندازه‌گیر را جهت بازرسی نقاط گفته شده ببینند، می‌توان از بررسی‌کننده‌های قابل اطمینان که دارای دانش این وسایل هستند کمک گرفت.

۳.۱۰.۵ ملاحظات بهم متصل کردن لوله‌ها

- لوله‌کشی درست در هر دو انتهای لوله
- زانویی‌ها در داخل و خارج ایستگاه
- بزرگی یا کوچکی شعاع زانویی‌ها
- هم‌مرکزیت تقلیل‌دهنده‌ها و تقویت‌کننده‌ها
- مکان رگولاتورها و شیرهای کنترلی
- قطر هدر و قطر لوله
- زاویه خیز و تیزی هدر
- شیرهای عایق اتصال
- شیرهای کنارگذر^{۲۱} و آب‌بندی آنها



شکل ۳-۴: یک نمونه USM با طول ۱۲۶ فوت و وزن ۹۶۰۰۰ پوند با ظرفیت ۵ میلیارد پوند بر سال

²¹ bypass

۶.۱۰.۳ ملاحظات داده‌ای در فرستنده USM

در ذیل لیستی نمونه از داده‌هایی که مستقیماً از فرستنده USM بازیابی می‌شود ارائه می‌گردد:

- دبی حجمی (ACF یا SCF)
- نرخ انرژی
- صورت عملکرد و وقایع ساعتی
- صورت عملکرد و وقایع روزانه
- گزارشات بازرسی
- وضعیت کیفی اطلاعات سیستم
- تصدیق و تأییدیه عملکرد USM
- دمای اندازه‌گیر
- فشار اندازه‌گیر
- سرعت متوسط اندازه‌گیر
- فرکانس اندازه‌گیر
- جهت جریان
- امکانات عیب‌یابی

در شکل ۳-۴۵ نمونه‌ای از ارسال‌کننده با حالت گسسته اطلاعات USM نشان داده شده است.

بازای هر خط I/O قطعات مجزای کارت کامپیوتری وجود دارد.



شکل ۳-۴۵: نمونه‌ای از فرستنده USM - فرستنده اطلاعات به صورت گسسته

۷.۱۰.۳ تشکیلات فرستنده USM

در یک فرستنده دبی سنج آلتراسونیک تشکیلات زیر وجود دارد:

- سیم‌کشی منبع تغذیه
- سیستم UPS
- سیم‌کشی سیگنال
- سیم‌کشی فرستنده گسسته (R&T)
- سیم‌کشی ارتباطی
- محافظت کاتدیک

۸.۱۰.۳ ملاحظات داده‌های کامپیوتری جریان

طراح بایستی در ابتدا و قبل از مشخص کردن انتخاب سخت‌افزار برای کامپیوتر جریان، همه دسته‌بندی‌ها و مقادیر اندازه‌گیری که نیاز است از سیستم اندازه‌گیری جریان بازخوانی شود تعیین کند.

در ادامه لیست نمونه‌ای از اطلاعاتی را که می‌توان مستقیماً از کامپیوتر جریان بازخوانی نمود ارائه می‌گردد:

- دبی حجمی (ACF یا SCF)
- نرخ انرژی
- صورت عملکرد و وقایع ساعتی
- صورت عملکرد و وقایع روزانه
- گزارشات بازرسی
- گزارشات خطا
- پروتکل‌های ارتباطی
- فرمت‌های گزارشاتی
- اتفاق افتادن هشدار USM
- میزان و وضعیت باتری

۹.۱۰.۳ تشکیلات کامپیوتر جریان

در یک کامپیوتر جریان دبی سنج آلتراسونیک تشکیلات زیر وجود دارد:

- سیم‌کشی منبع تغذیه
- سیستم UPS
- سیم‌کشی سیگنال
- سیم‌کشی فرستنده گسسته (R&T)
- سیم‌کشی ارتباطی
- محافظت کاتدیک
- کابل‌ها و مجاری کامپیوتر جریان به فرستنده گسسته
- کابل‌ها و مجاری کامپیوتر جریان به پنل کنترل

در شکل ۳-۶ یک کامپیوتر کامل جریان که به فرستنده متصل می‌شود، نشان داده شده‌است.



شکل ۳-۶: یک کامپیوتر کامل جریان

ملاحظات کلی طراحی یک ایستگاه اندازه‌گیری در بالا آورده شد. در ادامه برخی از تصمیمات طراحی که قبل از انتخاب یا مشخص کردن سخت‌افزار کار گرفته می‌شوند، ارائه می‌گردند:

۱۰.۱۰.۳ اندازه و ابعاد USM

دو استاندارد اندازه اولیه برای USM وجود دارد: یکی تناسب سوراخ کامل لوله و دیگری قطر کاهش‌ی اندازه‌گیر در مقابل لوله. استفاده از تناسب کامل قطر لوله‌ها باعث عملکرد دقیق بین سرعت‌های ۱ تا ۱۰۰ فوت بر ثانیه می‌شود. از نقطه نظر اقتصادی سرعت‌های زیر ۱ فوت بر ثانیه مرقوم به صرفه نیست. سرعت‌های بالای ۸۰ فوت بر ثانیه هم منجر به فرسایش و خوردگی، ایجاد سریع کثیفی و جرم، مسائل ترک خوردگی و ارتعاشات چاه حرارتی، صدای محیطی بالا تولید شده توسط حالت‌دهنده صدای آلتراسونیک و دیگر موضوعات خواهند شد. سوراخ کامل باعث افت فشار کمتری نسبت به اندازه‌گیرهای با قطر کاهش یافته می‌گردد. انواع اندازه‌گیر با سوراخ کاهش‌ی برای کاربردهایی که گهگاهی اتفاق افتاده و در آنها افت فشار اضافه نگرانی خاصی ایجاد نمی‌کند، استفاده می‌شوند.

یک سایزینگ خوب برای USM-اوریفیس آن است که جریان بازای هر ۲۰۰ پوند بر اینچ مربع را با همان اندازه اوریفیس محاسبه کند. یعنی، برای ۱۰۰۰ پوند بر اینچ مربع نسبی یک USM ۱۲ اینچی در ماکزیمم نسبت بتا بزرگی جریان پنچ اوریفیس ۱۲ اینچی را محاسبه کند. برنامه‌های محاسبه اندازه‌ها در ساخت USMها توسط شرکت‌های تولیدی با محاسبه سرعت، دبی حجمی واقعی و دبی حجمی استاندارد داده می‌شود. نمونه‌ای از محاسبه مربوط به ACFH که ممکن است کاربردی و عملی باشد در زیر ارائه می‌گردد:

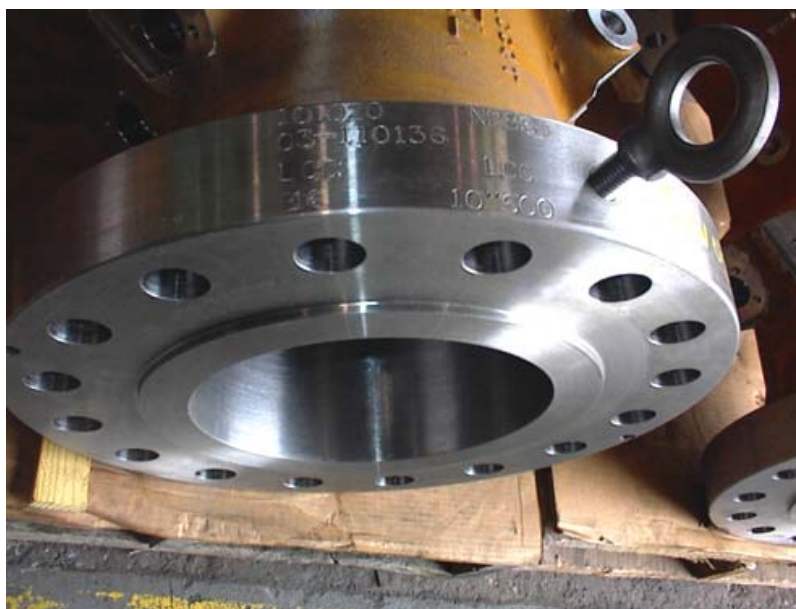
اندازه‌گیر ۱۲ اینچی:

$$12" \text{ meter: Bore} = 11.75"/2 = 5.875 \text{ squared} = 34.515 * 3.14159 (\pi) = 108.433 \text{ sq. ins.} / 144 = 0.753 \text{ sq. ft.} * 100 (\text{fps}) = 75.3 \text{ actual cubic feet/second} * 3600 = 271,080 \text{ actual cubic feet/hour.}$$

لازم به ذکر است که اندازه سیستم، اندازه لوله و اندازه شیر تویی عایق‌کاری سوراخ را می‌دهد. از این رو مشاهده می‌شود که اندازه دستگاه محاسبه آلتراسونیک دبی بسیار مهم است.

۱۱.۱۰.۳ مواد ساخت USM

طراحان در مورد مواد لازم برای USMها باید به این نکته توجه داشته باشند که USMها در مدل‌های LCC، SS316، SS304 و ضدزنگ دوگانه موجود بوده که نوع LCC استیلی را می‌توان با نیکل صفحه‌بندی نمود.



شکل ۳-۴۷: سوراخ‌های داخلی به نحوی تعبیه می‌شوند که ناپیوستگی‌ای در جریان رخ ندهد.

۱۲.۱۰.۳ شکل‌دهنده پروفیل جریان

اندازه‌گیرهای USM چند مسیره اغتشاشات جریان را بیشتر از انواع دیگر تکنولوژی دبی‌سنج تحمل کرده ولی با این حال جریان‌های خوب از جریان‌های بد برای همه انواع دبی‌سنج بهتر است. جریان خوب به جریان یکنواخت، دائم و با پروفیل سرعت متقارن اطلاق شده و جریان بد به جریانی از سیال گفته می‌شود که دارای مومنتوم زاویه‌ای و چرخشی، جریان تقاطعی، چرخش بالک (چرخش حول محور طولی جریان-در یک حالت درب‌بازکن قوطی کنسرو)، جهش (شتاب‌گیری و اتمام شتاب پی در پی در مسیر لوله)، اغتشاشات و آشفتگی و گردابه‌های همراه با هر جزء ترکیب‌شونده باشد.



شکل ۳-۴۸: شکل‌دهنده جریان از نوع صفحه متخلخل ضخیم

شکل‌دهنده‌های جریان در USM در کل یک‌نوع صفحه کلفت متخلخل با چندین سوراخ مطابق شکل ۳-۴۸ هستند. این وسایل قادر به متوقف کردن مومنتوم‌های گردابه‌ای و زاویه‌ای ذکر شده در سطوح کم تا متوسط آنها بوده و اجبار کننده به سمت داشتن یک جریان با پروفیل خوب هستند. وظیفه‌ی اصلی این شکل‌دهنده‌ها مجزا و ایزوله کردن یک اندازه‌گیر از اثرات بی‌درنگ بالادست و هندسه آنها که تابعی مشخص از لوله‌کشی سایت، شیرها، تقلیل‌دهنده‌ها، منبسط‌کننده‌ها، انحناها و

زانویی‌ها هستند، می‌باشد. این ایزولاسیون و اجبار در نوع جریان اطمینان اضافی‌ای را به طراح در آزمایشگاه در زمینه ساخت منطبق‌تر با واقعیت عملکرد سیستم می‌دهد. شکل‌دهنده جریان بایستی دقیق و به گونه‌ای بر روی خط مرکزی لوله نصب شود که هیچ‌گونه نفوذ گسکت (واشر) به سوراخ لوله اتفاق نیفتاده باشد (شکل ۳-۴۸).

لازم به ذکر است که شکل‌دهنده‌های جریان مقدار ناچیزی افت فشار هم ایجاد می‌کنند. در شکل ۳-۴۹ نمونه‌ای از اتصال فلنجی شکل‌دهنده‌ها به بالادست و پایین‌دست نشان داده شده‌است.



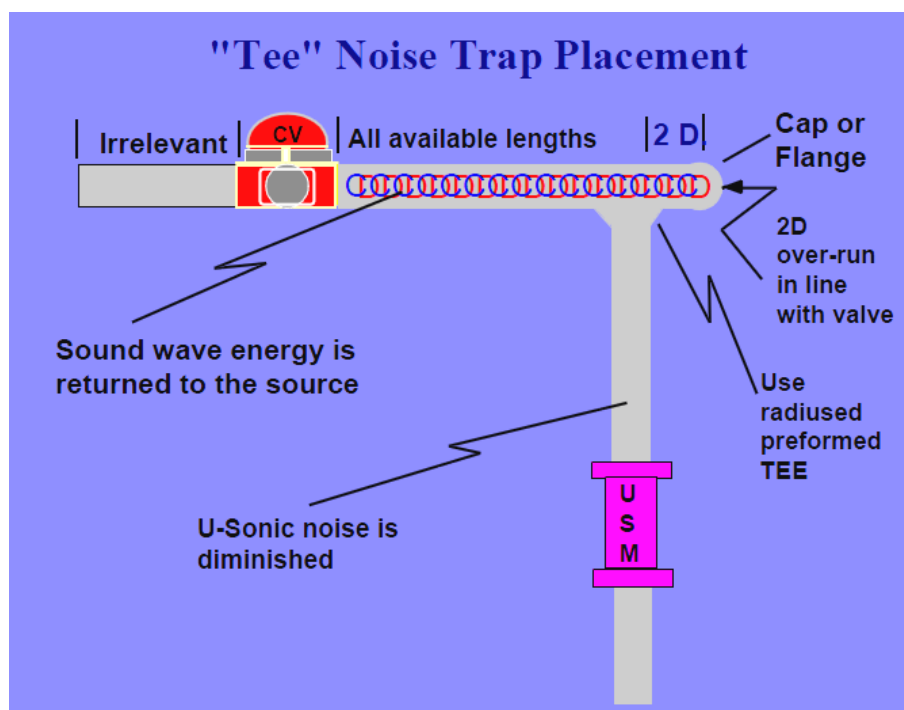
شکل ۳-۴۹: پیچ‌های داخل فلنجی برای دو قسمت ورودی به شکل‌دهنده و شکل‌دهنده به اندازه‌گیر

۳.۱۰.۳ ملاحظات کنترل‌ولوها و شیرهای رگولاتوری

شیرهای رگولاتوری و کنترل جریان می‌توانند تولیدکننده رنج فرکانس آلتراسونیک به هنگام اختلاف فشار مشخص (PSID) در طول شیر باشند. جریان مادون صوتی که از یک شیر خارج می‌گردد هنوز یک فرکانس بالایی (آلتراسونیک) است که از هر دو سر (بالادست و پایین‌دست) انتشار می‌یابد. اختلاف فشار PSID بالا بر روی شیرها ممکن است باعث شوک با ماخ یک در خروجی و فرستادن موج شوکی به پایین‌دست همراه با یک سطح انرژی کمتر تشعشع به بالادست گردد. تله‌هایی که می‌توان برای کاهش و یا حذف نویز در نظر گرفت یکی زانویی‌های ۹۰ درجه و دیگری سه‌راهی‌ها هستند. ملاحظات زیر در این ساختار شیر-اندازه‌گیر در نظر گرفته شوند:

- در صورت امکان شیرها در پایین دست جریان تعبیه گردند.
- فاصله‌هایی بین شیرها و اندازه گیر در نظر گرفته شوند.
- خمیدگی‌ها بین شیرها و اندازه‌گیرها می‌توانند باعث کاهش نویز گردند.
- سهراهی‌ها بسیار وسایل مؤثری برای کاهش نویز هستند.

در مورد نیازهای یک ایستگاه در زمینه سهراهی‌ها و سایر اتصالات نیاز به رایزنی با شرکت تولیدی USM می‌باشد؛ چرا که بین تکنولوژی‌های مختلف و موجود ساخت USM نیازهای مختلفی هم وجود دارد (شکل ۳-۵۰).

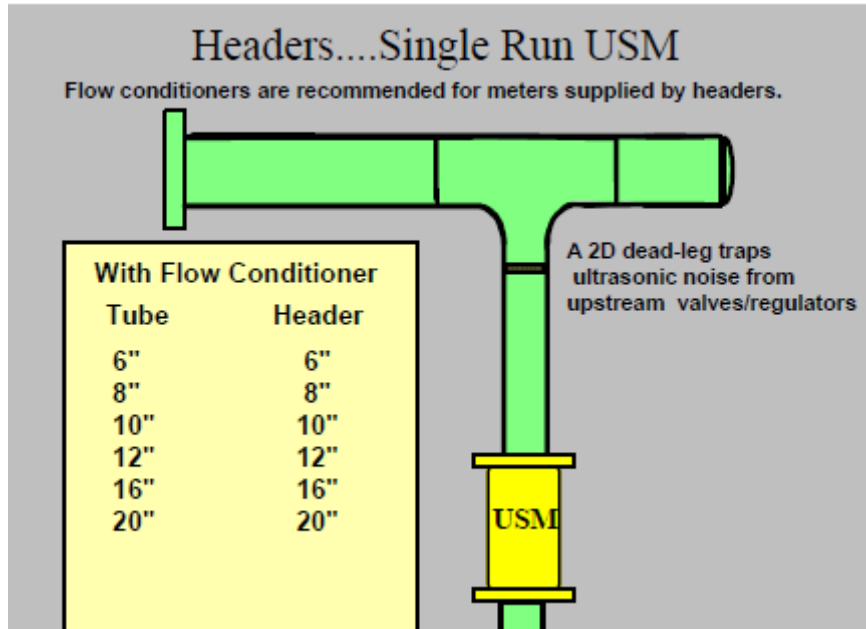


شکل ۳-۵۰: نیازهای لوله‌کشی و سهراهی یک ایستگاه USM

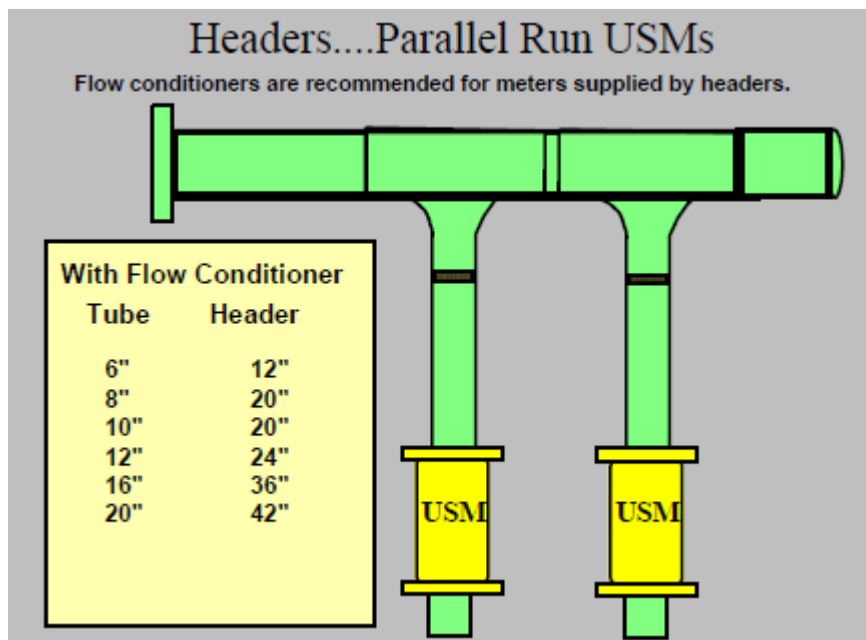
۱۴.۱۰.۳ هدرها

هدرها فرصتی مناسب برای تحویل مناسب جریان‌ات عبوری به اندازه‌گیرها هستند. تعیین اندازه صحیح هدرها هم از لحاظ هزینه‌ها و هم عملکرد حیاتی است. هزینه با افزایش اندازه هدر به سرعت افزایش می‌یابد. از طرفی هدرهای کوچکتر از معمول و یا با اندازه کم، عملکرد هدر را به شدت و مشخصاً پایین می‌آورند. شاید در صنعت سالانه تعداد زیادی هدر با سایز نامتعارف ساخته می‌شود! طراحان ایستگاه‌ها بایستی در مورد بهینه‌سازی لوله‌کشی‌ها و به‌روز درآوردن و اضافه و کم کردن آنها

به‌خوبی آگاه باشند. همچنین درمورد تناسب هدرهای قدیمی با اندازه‌گیرهای جدید، تعیین محدودیت‌ها و جزئیات با طراحان است. در شکل ۳-۵۱ یک نمونه از هدر و USM تکین و در شکل ۳-۵۲ شماتیکی از یک نمونه اتصال موازی (پارالل) USM‌ها با هدر نشان داده شده‌است.

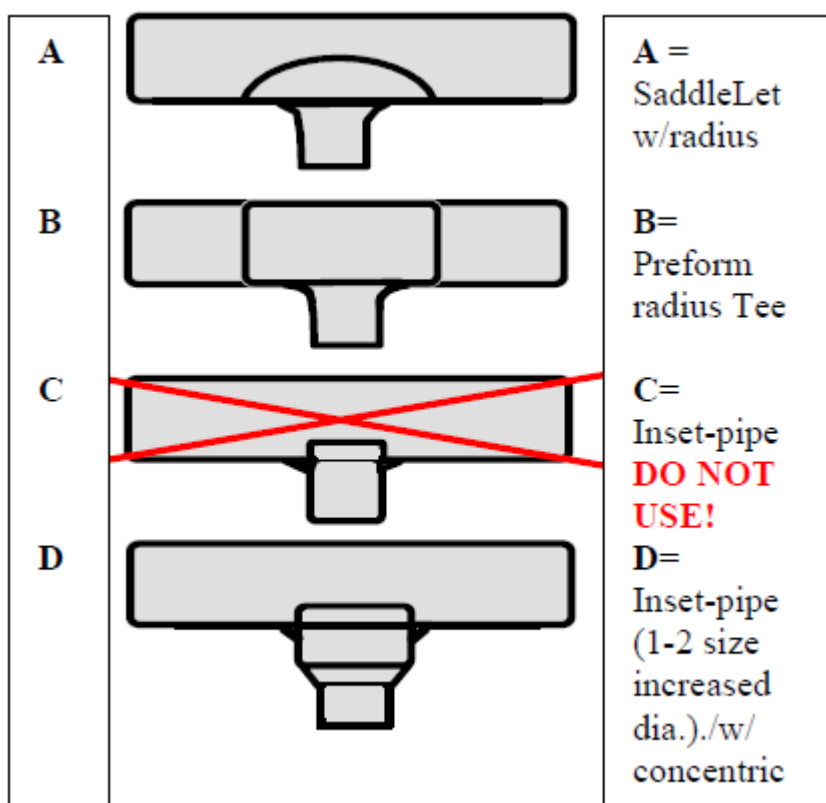


شکل ۳-۵۱: شماتیک هدر متصل به USM در سایت



شکل ۳-۵۲: نمونه‌ای از اتصال موازی USM‌ها با یک هدر

در شکل ۳-۵۳ چهار نمونه از نحوه اتصال هدر به سیستم اندازه‌گیری و لوله‌کشی خروجی نشان داده شده است. وقتی برای این چهار نمونه، پایداری جریان عبوری از هدر به سمت اندازه‌گیر مورد ارزیابی واقع می‌گردد، می‌توان متوجه این نکته شد که نمونه‌های A و B برای خروجی‌های روان و آرام جریان مناسب بوده و شاید استفاده از نمونه A آسانتر و ارزاتر برای کار با هدرهای بزرگتر و به تبع آن نمونه B آسانتر و ارزاتر برای کاربردهای کوچک باشد. اما نمونه C جریانی ناپایدار را موجب می‌شود که دلیل آن اتصال تیز به جای شعاعی است. کاربردی‌ترین نمونه اتصال در صنعت با چندین حالت ساخت، نمونه D می‌باشد. طراح USM می‌بایست با توجه به این نکات در انتخاب هدر و اتصال مناسب آن به اندازه‌گیر اقدام نماید.

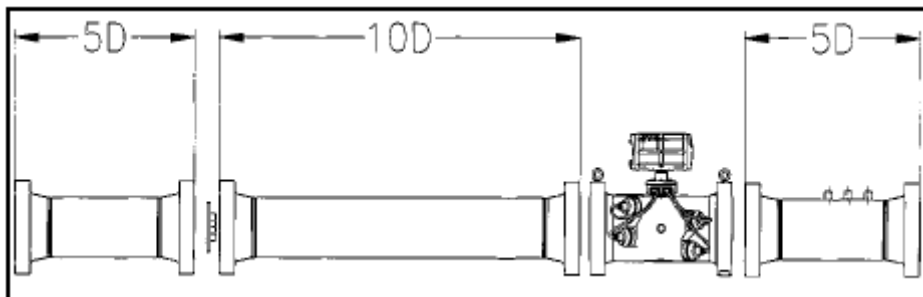


شکل ۳-۵۳: چهار نمونه از نحوه اتصال هدر و مزایا و معایب آنها

۱۵.۱۰.۳ لوله‌کشی لوله اندازه‌گیر

لوله اندازه‌گیر نشان‌داده شده در شکل ۳-۵۴ یک اندازه‌گیر چندمسیره و تجهیزات نوعی لازم برای USM یک‌جهته با یک شکل‌دهنده‌ی صفحه کلفت تکین می‌باشد. طراحان بایستی از بین USM‌ها بر اساس پیشنهاد شرکت‌های تولیدکننده آنها، مطابق با استاندارد و پیشنهاد AGA و بر اساس تجربه،

اندازه‌گیر مناسب از حیث ایمنی و کیفیت مونتاژ را جستجو و انتخاب کنند. در شکل ۳-۵۴ یک لوله USM/meter یک‌طرفه با یک ناحیه ته‌نشینی معادل ۵ برابر قطر در جلوی صفحه شکل‌دهنده جریان و یک مقطع معادل ۱۰ برابر قطر بین صفحه و اندازه‌گیر نشان داده می‌شود. ناحیه تخلیه ۵ برابر قطر فضای کافی را برای قراردعی چاه حرارتی در پایین دست و لقی کافی برای نصب و ترکیب‌بندی پیچ‌های فلنج می‌دهد. اما برای USM‌های دوطرفه یک شکل‌دهنده ۱۰ برابر قطر لازم است. در این نوع اندازه‌گیرها چاه حرارتی حداقل باید به اندازه سه برابر قطر از ورودی سیستم فاصله داشته و نوعاً این فاصله بین ۳ تا ۵ برابر قطر است (شکل ۳-۵۵ و شکل ۳-۵۶). شرکت‌های سازنده معمولاً نقشه‌های ترسیمی از مدل‌های آماده و موجود خود را برای راهنمایی استفاده از سه‌راهی نويز و لوله و اندازه‌گیر ارائه می‌دهند.



شکل ۳-۵۴: لوله‌کشی بالادست یک USM یک‌جهته



شکل ۳-۵۵: قسمت تخلیه USM و نصب چاه حرارتی و پروب تخلیه روی آن



شکل ۳-۵۶: محل نصب پروب‌های چاه حرارتی

اندازه‌گیرهای دبی آلتراسونیک وسایل با هندسه، طول و زمان دقیق بوده و توجه به ایستگاه‌های آنها همانند سایر ایستگاه‌های جریان گاز حائز اهمیت می‌باشد. برای نمونه همانطور که در شکل ۳-۵۷ نشان داده شده است برای یک سایت اندازه‌گیر آلتراسونیک کوچک که دارای سه اندازه‌گیر کنترلی و سه پایه تقلیل فشار چند رگولاتوره می‌باشد، کلیه ملاحظات فنی-مهندسی و نگهداری گفته شده و یا حتی استانداردهای طراحی و نصب ذکر شده در بالا باید انجام گیرند تا سایتی ایمن و کارا وجود داشته‌باشد.



شکل ۳-۵۷: نمونه‌ای از یک سایت اندازه‌گیر کوچک

در رابطه با اطلاعات تکمیلی و تکنیکی طراحی و استانداردهای ایستگاه‌های اندازه‌گیر به روش آلتراسونیک تعداد زیادی مقاله داده شده است. به هر حال در مورد ساخت و راه‌اندازی این ایستگاه‌ها همیشه باید به این ضرب‌المثل توجه داشت: دو بار اندازه بگیر و یک بار بُبُر!!!

۱۱.۳ منابع

- [۱] گزارش ماهیانه فعالیت‌های انجام‌شده در شهریورماه ۱۳۸۷، KHGCRO MR 1387-05، دفتر پژوهش شرکت گاز استان خوزستان، مهرماه ۱۳۸۷
- [۲] گزارش ماهیانه فعالیت‌های انجام‌شده در مهرماه ۱۳۸۷، KHGCRO MR 1387-06، دفتر پژوهش شرکت گاز استان خوزستان، آبان‌ماه ۱۳۸۷
- [۳] گزارش ماهیانه فعالیت‌های انجام‌شده در آبان‌ماه ۱۳۸۷، KHGCRO MR 1387-07، دفتر پژوهش شرکت گاز استان خوزستان، آذرماه ۱۳۸۷
- [۴] گزارش ماهیانه فعالیت‌های انجام‌شده در آذرماه ۱۳۸۷، KHGCRO MR 1387-08، دفتر پژوهش شرکت گاز استان خوزستان، دی‌ماه ۱۳۸۷
- [۵] گزارش ماهیانه فعالیت‌های انجام‌شده در دی‌ماه ۱۳۸۷، KHGCRO MR 1387-09، دفتر پژوهش شرکت گاز استان خوزستان، بهمن‌ماه ۱۳۸۷
- [۶] گزارش ماهیانه فعالیت‌های انجام‌شده در بهمن‌ماه ۱۳۸۷، KHGCRO MR 1387-10، دفتر پژوهش شرکت گاز استان خوزستان، اسفندماه ۱۳۸۷

۴ بررسی روش‌های حل جریان غیردائم گاز

یکی از مسائل اساسی در تحلیل جریان گاز درون شبکه‌های گازی بررسی شرایط غیر دائم بر جریان می‌باشد. جهت پی بردن به ماهیت دینامیکی جریان گاز درون لوله‌ها و کنترل لحظه‌ای جریان برحسب فشار یا دبی در سراسر یک شبکه لازم است به حل عددی معادلات حاکم بر آن پرداخته شود که در این روند با معلوم بودن شرایطی از لوله یا شبکه‌ی تحت بررسی، مقادیر دلخواه از پارامترهای جریان سیال از قبیل دما، فشار و دبی آن مشخص خواهند شد. در این راستا بسیاری از روش‌های حل عددی با صرف زمان بسیاری به تحلیل رفتار غیردائم گاز می‌پردازند. برخی از محققین برای کاهش این زمان تحلیل، از برخی پارامترها و جملات در معادلات حاکم صرفنظر کرده‌اند که این امر از دقت تحلیل خواهد کاست. با ترفندی دیگر می‌توان با خطی‌سازی و استفاده از حوزه فرکانسی به کاهش چشم‌گیر زمان محاسبات کمک شایانی نمود. اما این امر مزایا و معایب خاص خود را دارد. یعنی در کنار کاهش زمان انجام محاسبات، استفاده از تکنیک خطی‌سازی و حوزه لاپلاس از یک طرف منوط به کم بودن تغییرات حول وضعیت دائم بوده و از طرف دیگر تنها قادر به تعیین مقادیر در ورودی و خروجی یک المان لوله‌ای می‌باشد و اینکه داخل لوله یا آن المان چه اتفاقاتی در حال انجام است از حیطه این روش خارج می‌باشد.

همانگونه که در فوق اشاره شده جهت بررسی شرایط غیر دائم روش‌های مختلفی مورد استفاده قرار می‌گیرد که هر یک دارای معایب و مزایایی می‌باشند. یکی از این روش‌ها استفاده از توابع تبدیل برای مدل‌سازی شبکه‌های گازرسانی می‌باشد. به‌منظور بررسی قابلیت‌های این روش لازم است که روش‌های عددی مستقیم برای تحلیل جریان غیردائم گاز مورد بحث و بررسی قرار گیرد. لذا عمده روش‌های متداول جریان غیردائم گاز که در واقع در ارتباط با حل معادلات اویلر در حالت هم‌دما و

با در نظر گرفتن اصطکاک بصورت یک عبارت چشمه می‌باشد، مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته و در ادامه روش توابع تبدیل نیز معرفی شده و نتایج حاصل از آن در مقایسه با دیگر روش‌ها ارائه شده است.

با استفاده از فرضیات مختلف، سه دسته مهم در روش‌های تحلیل جریان غیردائم ایجاد می‌شود:

- روش‌های حل معادله جابه‌جایی خطی یک‌بعدی (معادله موج) که خود شامل تقسیم‌بندی زیر است:

- حل دقیق

- حل عددی

- روش‌های عددی حل معادله جابه‌جایی غیرخطی (معادله برگر غیرلزج)

- روش استفاده از توابع تبدیل و استفاده از مدل و حوزه فرکانسی

در بحث استخراج معادلات جریان غیردائم، دسته معادلاتی به شکل هذلولوی نتیجه می‌شوند که اگر این جریان را به شکل غیرلزج در نظر بگیریم، با تعریف کمیتی مثل M با دانسیته u و بردار شار f ، شکل عمومی این معادلات به صورت

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial f(u)}{\partial x} = 0 \quad (1-4)$$

خواهد شد. از طرفی چون در این معادلات، بردار شار تابعی از دانسیته کمیت می‌باشد، طبق قاعده زنجیره‌ای رابطه

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial f}{\partial u} \frac{\partial u}{\partial x} = 0 \quad (2-4)$$

را داشته و با در نظر گرفتن $a = \partial f / \partial u$ باشد، می‌توان داشت:

$$u_t + au_x = 0 \quad (3-4)$$

معادله استخراج شده همان معادله موج یک‌بعدی با سرعت a می‌باشد؛ البته بیشتر اوقات، معادله

موج یک‌بعدی به شکل زیر

$$u_{tt} = a^2 u_{xx} \quad (۴-۴)$$

ارائه می‌گردد که به راحتی و با مشتق‌گیری می‌توان از معادله (۴-۳) به رابطه (۴-۴) دست یافت. جهت حل رابطه (۴-۳) که به فرم معادله جابه‌جایی در یک‌بعد می‌باشد، روش‌ها و الگوریتم‌های مختلفی وجود دارد؛ این روش‌ها به دو دسته کلی زیر تقسیم‌بندی می‌شوند:

- روش‌های حل دقیق
- الگوریتم‌ها و روش‌های حل عددی

۱.۴ روش‌های حل دقیق برای تحلیل جریان غیردائم گاز

این روش‌ها روی خطوط مشخصه‌ها با ویژگی ثابت u متمرکز می‌باشند. با این ویژگی برای پارامتری مثل u که تابعی از زمان و مکان بوده و می‌تواند نوعی دانسیته یک کمیت خاص باشد، می‌توان نوشت:

$$\frac{du}{dt} = 0 \quad (۵-۴)$$

از این رو

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial u}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial t} = 0 \quad (۶-۴)$$

با مقایسه این رابطه با (۴-۳) می‌توان گفت برای خطوطی که دارای ویژگی ثابت u هستند، شیب برابر با $\partial x / \partial t = a$ بوده و به نام خطوط مشخصه معروف می‌باشند. لذا به این روش‌ها، روش مشخصه‌ها^۱ گفته شده و روی دو دسته مسأله اعمال می‌شوند:

- مسائل مقدار اولیه
- مسائل مقدار اولیه و مرزی

در مورد مسائل مقدار اولیه (مسئله کوشی)، صورت کلی و بیان ریاضی به فرم

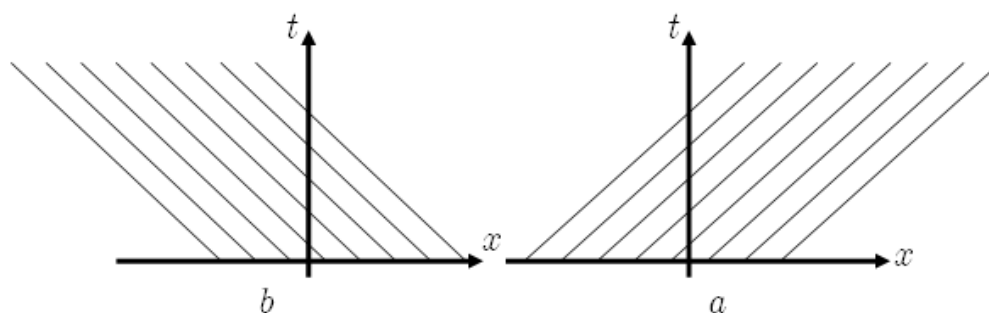
^۱ Method Of Characteristic (MOC)

$$u_t + au_x = 0, \quad u(x, 0) = F(x) \quad (۷-۴)$$

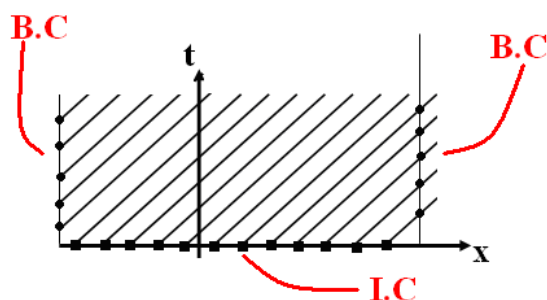
بوده و طرح مسائلی که در آن‌ها علاوه بر شرایط اولیه روی لوله انتقال گاز، شرایط مرزی در زمان-های مختلف هم وجود دارد، به شکل

$$u_t + au_x = 0, \quad u(x, 0) = F(x), \quad u(x_0, t) = G(t) \quad (۸-۴)$$

می‌باشد که $x = x_0$ نقطه‌ای روی لوله گاز (مثلاً ابتدای آن) است؛ البته دقت کنید که چون در روش مشخصه‌ها در صورت داشتن شرایط اولیه می‌توان به اطلاعات سایر نقاط در زمان و مکان‌های دیگر دست یافت، نیاز به دقت کافی برای تعریف شرایط اولیه و مرزی احساس می‌شود. برای ساده‌تر بیان کردن این مسأله مهم، اگر دو شکل کلی خطوط مشخصه‌ها در نظر گرفته شوند، می‌توان به این نتیجه رسید که این دو شکل شامل خطوط مشخصه راست‌رو و چپ‌رو می‌شوند و بترتیب دارای ویژگی $a > 0$ و $a < 0$ هستند (شکل ۱-۴)؛ برای حالت خطوط مشخصه راست‌رو، اگر شرایط مرزی در مرز راست تعریف شود، یا باید درست تعریف شود یا اینکه اصلاً تعریف نشود (چون مطابق شکل ۲-۴ و از لحاظ فیزیکی نیازی به آن نبوده و شرایط اولیه و خطوط مشخصه به استناد ویژگی ثابت u روی خطوط، برای تعریف اطلاعات در آن مرز کافی می‌باشند). به همین ترتیب برای خطوط چپ‌رو که در آن نمونه مسائل نیز نیازی به تعریف شرط مرزی در سمت چپ هندسه مسأله نمی‌باشد.

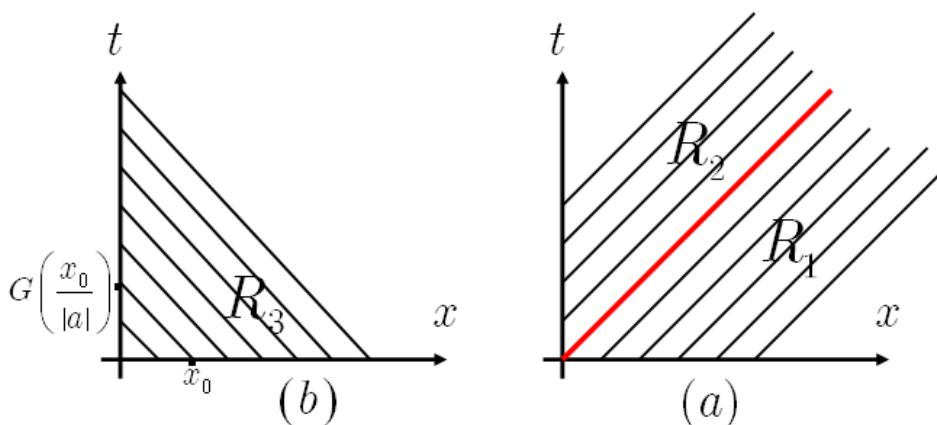


شکل ۱-۴: خطوط مشخصه راست‌رو (a) و چپ‌رو (b)



شکل ۲-۴: بررسی تعریف شرایط اولیه و مرزی در حل مسائل با خطوط مشخصه

جهت روشن‌تر شدن این زمینه شکل ۱-۴ دو حالت شرط مرزی برای خطوط راست‌رو و چپ-رو مشخص شده است. در قسمت a از این شکل، شرط مرزی برای مرز $x = 0$ و خطوط مشخصه با $a > 0$ و در قسمت b آن، برای همان مرز در حالت $a < 0$ مشخص گشته است. طبق این شکل، می‌توان برای شرایط اولیه و مرزی در نواحی R_1 ، R_2 و R_3 روابط ذیل را نوشت.



شکل ۳-۴: انواع تعریف شرایط اولیه و مرزی در مسائل با خطوط مشخصه

$$R_1 : \quad u(x, t) = u(x - at, 0) = F(x - at) \quad (9-4)$$

$$R_2 : \quad u(x, t) = u(0, t - x/a) = G(t - x/a) \quad (10-4)$$

$$R_3 : \left\{ \begin{array}{l} u(x, t) = u(x - at, 0) = f(x - at) \\ \text{if } I.C. : u(x_0, 0) = F(x_0) \text{ then} \\ B.C. : u(0, x_0/|a|) = G(x_0/|a|) \\ \Rightarrow F(x_0) = G(x_0/|a|) \end{array} \right. \quad (11-4)$$

اما برای اینکه به حل مسأله پردازیم، لازم است تا ابتدا پارامترسازی جدیدی را ترتیب دهیم؛ این کار برای معادلات بقایی که ضریب مشتق نسبت به زمان برابر یک و تساوی به صفر ختم می‌گردد، به صورت زیر است:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial x}{\partial \tau} = a, \quad x(0) = s \\ \frac{\partial t}{\partial \tau} = 1, \quad t(0) = 0 \\ \frac{\partial u}{\partial \tau} = 0, \quad u(0) = F \end{array} \right. \quad (12-4)$$

لذا با اعمال شرایط اولیه نوشته شده خواهیم داشت:

$$\left. \begin{array}{l} x = a\tau + s \\ \tau = t \end{array} \right\} \Rightarrow s = x - at \quad \& \quad u = F(s) = F(x - at) \quad (13-4)$$

به جهت جلوگیری از بی‌جواب بودن مسأله لازم است تا شرط عدم تطابق شرایط اولیه با شرایط مرزی چک شود. برای این کار و به بیان ریاضی می‌توان ژاکوبین مسأله را محاسبه و مخالف صفر قرار داد:

$$\left| \begin{array}{cc} \frac{\partial x}{\partial s} & \frac{\partial x}{\partial \tau} \\ \frac{\partial t}{\partial s} & \frac{\partial t}{\partial \tau} \end{array} \right| \neq 0 \Rightarrow \left| \begin{array}{cc} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{array} \right| = 1 \neq 0 \quad (14-4)$$

به دیگر سخن جایی که ژاکوبین صفر می‌شود، نقطه شروع شوک بوده و بایستی برای ادامه زمان‌ها در تحلیل از روشی موسوم به حل ضعیف (تعمیم یافته) استفاده کرد. اما همانطور که می‌بینیم برای معادله یک‌بعدی موج مشکلی وجود نخواهد داشت.

از طرفی خود حل ضعیف که در بالا به آن اشاره شد به دو نوع کلی، یکی برای حل واگرایی خطوط مشخصه و دیگری برای حالت همگرایی آنها تقسیم‌بندی می‌شود. اگر بخواهیم برای این موضوع به طور خلاصه مثالی بیاوریم، بیایید معادله برگر^۱ را بررسی کنیم؛ همانطور که می‌دانیم، این معادله به شکل

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} = 0 \quad (15-4)$$

است؛ در این مسأله $a(u) = u$ می‌باشد. با داشتن شرط اولیه $u(x, 0) = F(x)$ می‌توان خطوط مشخصه مسأله را با استفاده از نمودار شرط اولیه $(F(x) - x)$ و به صورت وارون آن رسم کرد؛ اگر ویژگی خطوط مشخصه را به یاد آوریم متوجه خواهیم شد که این امر به این دلیل است که طبق وضعیت خاص این مسأله داریم:

$$\frac{\partial t}{\partial x} = \frac{1}{a} = \frac{1}{u(x, t)} = \frac{1}{u(x, 0)} = \frac{1}{F(x)} \quad (16-4)$$

در این وضعیت دو حالت زیر رخ می‌دهد.

• حالت واگرایی مشخصه‌ها (فن انبساطی)

• حالت تداخل مشخصه‌ها (شوک)

اگر شرایط اولیه مسأله موج به شکل

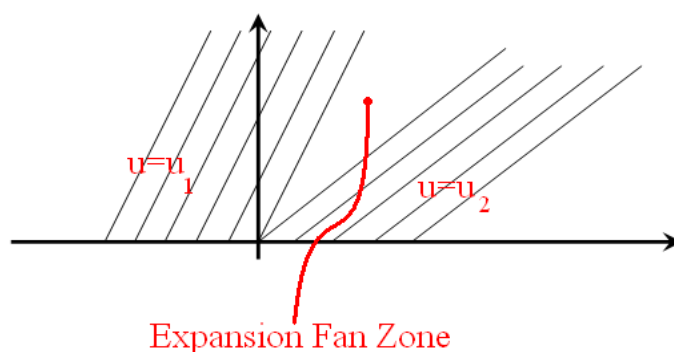
$$u(x, 0) = \begin{cases} u_1 & x < 0 \\ u_2 & x > 0 \end{cases}, \quad a(u_1) < a(u_2) \quad (17-4)$$

باشد آن‌گاه حالت اول رخ خواهد داد (شکل ۴-۴). از سویی هنگامی که برای شرایط اولیه داشته باشیم:

$$u(x, 0) = \begin{cases} u_1 & x < 0 \\ u_2 & x > 0 \end{cases}, \quad a(u_1) > a(u_2) \quad (18-4)$$

¹ Burger's Equation

حالت دوم رخ داده و بایستی به حل ضعیف (تعمیم یافته) برای آن روی آورد (شکل ۴-۵).



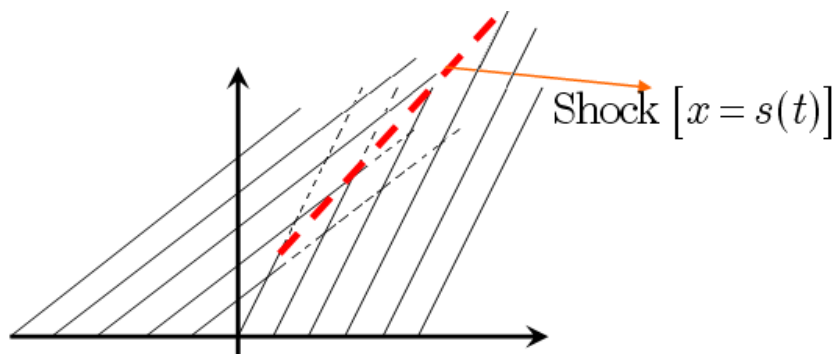
شکل ۴-۴: حالت واگرایی خطوط مشخصه در یافتن مقادیر u

برای محاسبه مقدار u در دو حالت گفته شده، بترتیب دو رابطه زیر را ارائه داده و مراحل اثبات آنها را به کتب دینامیک سیالات محاسباتی ارجاع می‌دهیم. برای حالت اول داریم:

$$\begin{cases} u_1 & x < a(u_1)t \\ g\left(\frac{x}{t}\right) & a(u_1)t < x < a(u_2)t, \quad g = a^{-1} \\ u_2 & x > a(u_2)t \end{cases} \quad (۱۹-۴)$$

با معکوس‌گیری از تابع $a(u)$ و با آرگمان $u = x/t$ تابعی بدست می‌آید که نام آنرا $g(x/t)$ گذاشته‌ایم. برای مثال حاضر این تابع برابر با خود x/t خواهد شد. از طرف دیگر برای حالت دوم و مطابق شکل آن، تداخل خطوط مشخصه باعث تقویت آنها و ایجاد شوکی با شیب ds/dt می‌شود که داریم:

$$\frac{ds}{dt} = \frac{f(u_1) - f(u_2)}{u_1 - u_2} \quad (۲۰-۴)$$



شکل ۴-۵: حالت همگرایی خطوط مشخصه در یافتن مقادیر u

و در آن f شار بوده و یادآوری می‌کنیم که $\partial f / \partial u = a(u)$. برای مقادیر u قبل و بعد این شوک مقادیر بدست آمده از بقیه تحلیل (مطابق شکل) جایگزین می‌گردد که برای این مثال این مقادیر u_1 و u_2 هستند. بدین ترتیب می‌توان در تمام زمان‌ها و مکان‌ها به مقدار u دست یافت. اما در این کار بیشتر قصد مقایسه و تحلیل انواع روش‌های عددی روی معادلات هذلولوی و بقایی را داریم که در ادامه به برخی از آنها اشاره خواهد شد.

روش‌های حل معادله جابه‌جایی غیرخطی (معادله برگر غیرلزج)^۱ در تحلیل جریان غیردائم گاز مسأله مکانیک سیالات معمولی غیرخطی است و در آن حل دستگاهی برای محاسبه فشار، چگالی، دما و سرعت در نقاط مجهول به کار خواهد رفت. در این راستا معادله‌ای که بتواند حالت غیرخطی و فرم کلی معادلات بقا را پوشش دهد، بسیار مفید است. این معادله نه تنها بایستی با خاصیت غیرخطی معادلات متناسب باشد، بلکه باید خواص فیزیکی معادله جریان سیال را هم به صورت یک جمله جابه‌جایی، یک جمله اتلافی (ناشی از لزجت) و یک جمله وابسته به زمان در بر گیرد. برگر (۱۹۴۸) معادله‌ای با این خصوصیات ارائه کرد:

$$\underbrace{\frac{\partial u}{\partial t}}_{\text{Unsteady term}} + \underbrace{u \frac{\partial u}{\partial x}}_{\text{Convective term}} = \underbrace{\mu \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}}_{\text{Viscous term}} \quad (21-4)$$

اگر جمله ویسکوزیته (سمت راست معادله (۲۱-۴)) در نظر گرفته شود، این معادله جابه‌جایی غیر خطی و به فرم سهموی است؛ و اگر از آن جمله صرف‌نظر شود به فرم هذلولوی خواهد بود که کار حاضر هم با این فرض که جریان غیرلزج است ادامه می‌یابد. معادله جابه‌جایی غیرخطی حاصل عبارت خواهد شد از:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} = 0 \quad (22-4)$$

روش‌هایی که برای حل این معادله به کار گرفته خواهند شد، در این بخش ارائه می‌گردند. برای فهم بیشتر موضوع، الگوریتم‌های حجم محدود و اختلاف محدود^۱ مختلفی با بحث روی اثر جملات

¹ Nonlinear Convection Equation (Inviscid Berger Equation)

غیرخطی بحث خواهند شد. معادله (۴-۲۱) را می‌توان بعنوان معادله موج یک‌بعدی غیرخطی در نظر گرفت که هر نقطه روی جبهه این موج می‌تواند با یک سرعت متفاوت منتشر شود. نتیجه تغییر سرعت موج، بهم ریختگی و آشفتگی مشخصه‌ها و فرم راه حل‌های ناپیوستگی شبیه به بحث امواج شوکی در مکانیک سیالات است. اما معادله هذلولوی بحث شده را می‌توان برای راحتی به شکل

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial f}{\partial x} = 0 \quad (۴-۲۳)$$

بیان نمود که در حالت کلی معادلات، u و $f(u)$ به صورت بردار هستند. البته فرم معادله بالا را ممکن است به شکل $u_t + Au_x = 0$ هم مطرح کرد که در آن $A = A(u)$ در حالت کلی، ماتریس ژاکوبین $\partial f_i / \partial u_j$ بوده و برای حالت کار حاضر (حالت خاص) که نسبت طول لوله به قطر آن بسیار زیاد است، می‌توان جریان را روی کل سطح مقطع آن، یک‌جا^۲ و یکنواخت در نظر گرفته و A را به صورت df/du نوشت. معادلات یا دستگاه معادلات ما، به فرم هذلولوی بوده و این بدین معنی است که تمامی مقادیر مشخصه^۳ ماتریس A حقیقی می‌باشند.

در ادامه با روش‌های مختلف حل و چگونگی اعمال آن‌ها در حل معادله غیرخطی و یک‌بعدی جابه‌جایی آشنا شده که این روش‌ها باز به دو دسته حل دقیق و حل عددی تقسیم‌بندی می‌شوند؛ به جهت اختصار، فقط به الگوریتم‌های عددی این زمینه اشاره خواهد شد.

۱.۱.۴ روش لکس - فردریش

روش‌های مرتبه اول بندرت برای حل معادلات هذلولوی به کار می‌روند. روش لکس - فردریش از جمله روش‌های مرتبه اول این زمینه است که در سال ۱۹۵۴ ارائه شد. بیان ریاضی این روش به صورت

$$u_i^{n+1} = \frac{u_{i+1}^n + u_{i-1}^n}{2} - \frac{\Delta t}{\Delta x} \frac{f_{i+1}^n - f_{i-1}^n}{2} \quad (۴-۲۴)$$

^۱ Finite Volume and Finite Difference

^۲ Lumped

^۳ Eigenvalues

می‌باشد. همانطور که بدیهی است برای معادله برگر نوشته شده، $f = u^2/2$ بوده و $A = df/du = u$ می‌باشد. از طرفی با محاسبه ضریب بزرگنمایی می‌توان نوشت:

$$G = \cos \phi - i \frac{\Delta t}{\Delta x} A \sin \phi \quad (25-4)$$

لذا جهت پایداری روش و کوچکتر شدن ضریب بزرگنمایی از یک، باید شرط $|u_{\max} \Delta t / \Delta x| \leq 1$ برقرار باشد که u_{\max} بزرگترین مقدار مشخصه ماتریس A با جزء واحد u می‌باشد. بیان دیگر این الگوریتم و به فرم حجم محدود، به صورت زیر می‌باشد:

$$u_i^{n+1} = u_i^n - \frac{\Delta t}{\Delta x} [f_{i+1/2}^n - f_{i-1/2}^n] \quad (26-4)$$

که در آن حجم کنترلی روش، به حالت نشان داده شده در شکل ۶-۴ است. در نتیجه می‌توان رابطه زیر را استخراج نمود:

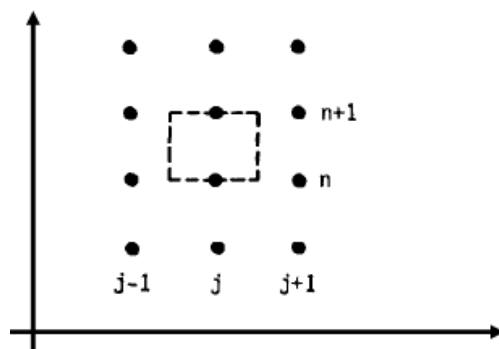
$$f_{i+1/2}^n = \frac{1}{2} \left[f_i + f_{i+1} - \frac{\Delta x}{\Delta t} (u_{i+1} - u_i) \right] \quad (27-4)$$

۲.۱.۴ روش لکس-وندروف

این روش که در سال ۱۹۶۰ ارائه گشت، از جمله اولین روش‌های اختلاف محدود برای معادلات هذلولوی و با مشتقات جزئی بود. فرم کلی این الگوریتم به صورت

$$u_i^{n+1} = u_i^n - \frac{\Delta t}{\Delta x} \frac{f_{i+1}^n - f_{i-1}^n}{2} + \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta t}{\Delta x} \right)^2 \left[A_{i+1/2}^n (f_{i+1}^n - f_i^n) - A_{i-1/2}^n (f_i^n - f_{i-1}^n) \right] \quad (28-4)$$

بوده و محاسبه ماتریس ژاکوبین در وسط بازه‌ها می‌باشد. لذا:



شکل ۶-۴: حجم کنترلی برای روش لکس-فردریش

$$A_{i+1/2} = \frac{(u_i + u_{i+1})}{2}, \quad A_{i-1/2} = \frac{(u_i + u_{i-1})}{2} \quad (۲۹-۴)$$

از طرف دیگر ضریب بزرگنمایی به شکل زیر استخراج می‌گردد:

$$G = 1 - 2 \left(\frac{\Delta t}{\Delta x} A \right)^2 (1 - \cos \phi) - 2i \frac{\Delta t}{\Delta x} A \sin \phi \quad (۳۰-۴)$$

که این به معنی داشتن محدوده پایداری مشابه روش لکس-فردریش برای این الگوریتم است.

یعنی لازمه کوچکتر از یک بودن G اینست که $|(\Delta t / \Delta x) u_{\max}| \leq 1$.

۳.۱.۴ روش مک کورمک

این روش در سال ۱۹۶۹ مطرح گشته و در قالب نوعی پیش‌بینی-اصلاح روش لکس-وندروف بیان

می‌گردد. مرحله اول (مرحله پیش‌بینی) به صورت

$$u_i^* = u_i^n - \frac{\Delta t}{\Delta x} (f_{i+1}^n - f_i^n) \quad (۳۱-۴)$$

و مرحله دوم (مرحله تصحیح) به شکل زیر تعریف می‌گردند:

$$u_i^{n+1} = \frac{1}{2} \left[u_i^n + u_i^* - \frac{\Delta t}{\Delta x} (f_i^* - f_{i-1}^*) \right] \quad (۳۲-۴)$$

که در آن f_i^* را برابر با مقدار $(u_i^*)^2/2$ می‌باشد؛ با ساده کردن این عبارات می‌توان به راحتی فرم اختلاف محدود الگوریتم را به دست آورد. اما برای این روش، شرط پایداری مشابه الگوریتم لکس-وندروف است.

۴.۱.۴ روش رازانوف (برستین-میرین)^۱

فرم کلی این روش مرتبه سوم که بطور همزمان و در سال ۱۹۷۰ توسط رازانوف و برستین-میرین ارائه گشت، دارای سه مرحله است. در مرحله اول داریم:

$$u_{i+1/2}^{(1)} = \frac{1}{2}(u_{i+1}^n + u_i^n) - \frac{1}{3} \frac{\Delta t}{\Delta x} (f_{i+1}^n - f_i^n) \quad (۳۳-۴)$$

اما رابطه مربوط به مرحله دوم به شکل زیر است:

$$u_i^{(2)} = u_i^n - \frac{2}{3} \frac{\Delta t}{\Delta x} (f_{i+1/2}^{(1)} - f_{i-1/2}^{(1)}) \quad (۳۴-۴)$$

و نهایتاً در مرحله سوم داریم:

$$u_i^{n+1} = u_i^n - \frac{1}{24} \frac{\Delta t}{\Delta x} (-2f_{i+2}^n + 7f_{i+1}^n - 7f_{i-1}^n + 2f_{i-2}^n) - \frac{3}{8} \frac{\Delta t}{\Delta x} (f_{i+1}^{(2)} - f_{i-1}^{(2)}) - \frac{\omega}{24} (u_{i+2}^n - 4u_{i+1}^n + 6u_i^n - 4u_{i-1}^n + u_{i-2}^n) \quad (۳۵-۴)$$

که آخرین جمله در مرحله سوم دارای دیفرانسیل مرکزی مرتبه چهارم می‌باشد:

$$(\Delta x)^4 \frac{\partial^4 u}{\partial x^4} = u_{i+2}^n - 4u_{i+1}^n + 6u_i^n - 4u_{i-1}^n + u_{i-2}^n \quad (۳۶-۴)$$

و از طرف دیگر ω پارامتر دلخواهی بوده و برای ایجاد پایداری به روش اضافه گشته است؛ وقتیکه به بررسی پایداری پرداخته می‌شود، ضریب بزرگنمایی به صورت زیر بدست خواهد آمد:

¹ Rusanov (Burstein-Mirin) Algorithm

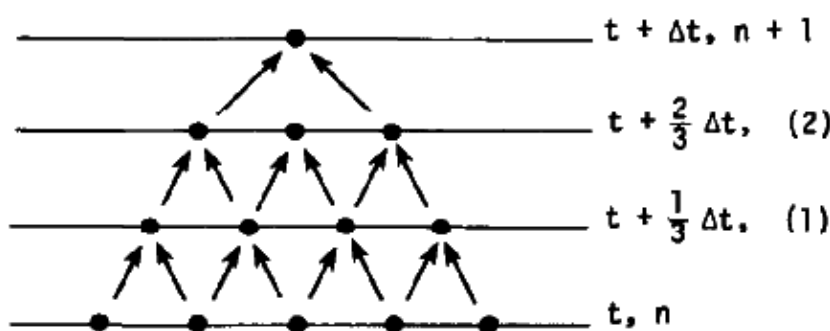
$$G = \left\{ 1 - \left(\frac{\Delta t}{\Delta x} u \right)^2 \frac{\sin^2 \phi}{2} - \frac{\omega}{6} (1 - \cos \phi) \right\} + i \frac{\Delta t}{\Delta x} u \sin \phi \times \quad (37-4)$$

$$\times \left\{ 1 + \frac{1}{3} (1 - \cos \phi) \left[1 - \left(\frac{\Delta t}{\Delta x} u \right)^2 \right] \right\}$$

و به این نتیجه می‌توان رسید که شرط پایداری به صورت

$$\left\{ \begin{aligned} & \left| \left(\frac{\Delta t}{\Delta x} \right) u_{\max} \right| \leq 1, \\ & 4 \left| \left(\frac{\Delta t}{\Delta x} \right) u_{\max} \right|^2 - \left| \left(\frac{\Delta t}{\Delta x} \right) u_{\max} \right|^4 \leq \omega \leq 3 \end{aligned} \right. \quad (38-4)$$

می‌باشد. از سوی دیگر، به طور کلی شماتیک هرمی روی نقاط و گره‌های شبکه برای این روش به صورت شکل ۷-۴ است.



شکل ۷-۴: بررسی شماتیک وضعیت استفاده از گره‌های شبکه برای الگوریتم رازانوف

۵.۱.۴ الگوریتم وارمینگ-کاتلر-لومکس (WKL) ۱

همانطور که قبلاً و در حل معادله موج خطی بیان شد، این روش به صورت مرتبه سوم طرح شده و از روش مک‌کورمک برای دو مرحله اول (تا حدود $(2/3)\Delta t$) و از الگوریتم رازانوف در گام سوم استفاده می‌شود. به طور کلی، مرحله اول این روش به شکل زیر می‌باشد:

$$u_i^{(1)} = u_i^n - \frac{2}{3} \frac{\Delta t}{\Delta x} (f_{i+1}^n - f_i^n) \quad (39-4)$$

به همین ترتیب برای مرحله دوم داریم:

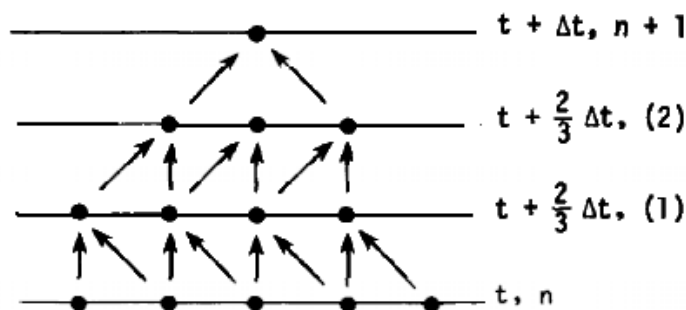
¹ Warming-Kutler-Lomax (WKL) Algorithm

$$u_i^{(2)} = \frac{1}{2} \left[u_i^n + u_i^{(1)} - \frac{2}{3} \frac{\Delta t}{\Delta x} (f_i^{(1)} - f_{i-1}^{(1)}) \right] \quad (40-4)$$

و بالاخره مرحله سوم به شکل زیر نوشته می‌شود:

$$u_i^{n+1} = u_i^n - \frac{1}{24} \frac{\Delta t}{\Delta x} (-2f_{i+2}^n + 7f_{i+1}^n - 7f_{i-1}^n + 2f_{i-2}^n) + \frac{3}{8} \frac{\Delta t}{\Delta x} (f_{i+1}^{(2)} - f_{i-1}^{(2)}) - \frac{\omega}{24} (u_{i+2}^n - 4u_{i+1}^n + 6u_i^n - 4u_{i-1}^n + u_{i-2}^n) \quad (41-4)$$

در هر جای رابطه بالا و برای معادله برگر، f با هر نمادی معادل $u^2/2$ در نظر گرفته می‌شود. محدوده پایداری این روش مشابه روش رازانوف بوده و بعلاوه، معادله بهبودیافته آن هم عیناً معادله‌ای همانند روش رازانوف می‌باشد. از سویی، مزیت این روش بر روش رازانوف در عدم استفاده از نقاط بین سلولی در شبکه (مثل $i + 1/2$) است. شماتیک استفاده از نقاط شبکه برای این روش هم در شکل ۴-۸ نشان داده شده است.



شکل ۴-۸: شماتیک وضعیت استفاده از گره‌های شبکه برای الگوریتم WKL

۶.۱.۴ روش‌های مرتبه سوم تنظیم شده^۱

پارامتر ω که در مرحله سوم دو روش قبل مورد استفاده قرار گرفت، به دلخواه و در محدوده ارضای پایداری انتخاب می‌گردد. سابقاً این پارامتر در ابتدای محاسبات و به طور یکسان در سلول شبکه، انتخاب می‌شد. اما اگر جمله میرایی عددی بر اساس قانون بقا برای مرحله سوم دو روش قبل، به

¹ - Tuned 3rd Order Methods

صورت $\frac{\partial}{\partial x} \left(\omega \frac{\partial^3 \omega}{\partial x^3} \right)$ تعیین گردد، آنگاه ممکن است مقدار ω در طول محاسبات از نقطه به نقطه تغییرات کند و بقای شار اصلاحی در شبکه تضمین شود. بر اساس این رهیافت، جمله حاوی پارامتر ω در آخرین مرحله هر دو روش رازانوف و WKL را می‌توان به صورت

$$\begin{aligned} & \frac{-\omega_{i+1/2}^n}{24} (u_{i+2}^n - 3u_{i+1}^n + 3u_i^n - u_{i-1}^n) + \\ & + \frac{-\omega_{i-1/2}^n}{24} (u_{i+1}^n - 3u_i^n + 3u_{i-1}^n - u_{i-2}^n) \end{aligned} \quad (42-4)$$

نوشت. حالا مقادیر $\omega_{i+1/2}^n$ بر اساس عدد کورانت مؤثر^۱ در شبکه عددی تغییر خواهد کرد. وارمینگ پیشنهاد کرد که برای کاهش خطای اتلافی^۲ یا پخششی^۳ این پارامترها در هر نقطه از شبکه محاسباتی تعیین گردند. با بحث روی معادله بهبود یافته^۴ روش می‌توان نوشت:

$$\begin{aligned} \omega_{i+1/2}^n &= \frac{(4\nu_{i+1/2}^2 + 1)(4 - \nu_{i+1/2}^2)}{5}, \\ \omega_{i-1/2}^n &= \frac{(4\nu_{i-1/2}^2 + 1)(4 - \nu_{i-1/2}^2)}{5} \end{aligned} \quad (43-4)$$

که تنها مقدار نامشخص، اعداد کورانت مؤثر $\nu_{i\pm 1/2}$ هستند. وارمینگ برای این پارامترها پیشنهاد کرد که بر اساس متوسط نقاط استفاده شده در مرحله سوم روش‌های یاد شده، محاسبه گردند؛ یعنی

$$\nu_{i+1/2} = \frac{1}{4} (\lambda_{i+2} + \lambda_{i+1} + \lambda_i + \lambda_{i-1}) \frac{\Delta t}{\Delta x} \quad (44-4)$$

و به طور مشابه

$$\nu_{i-1/2} = \frac{1}{4} (\lambda_{i+1} + \lambda_i + \lambda_{i-1} + \lambda_{i-2}) \frac{\Delta t}{\Delta x} \quad (45-4)$$

که λ_i مقدار مشخصه محلی در گره i ام می‌باشد. البته برای معادله برگر این مقدار درست برابر همان u است.

¹ Effective Courant Number (CFL or ν)

² Dissipative

³ Dispersive

⁴ MDE

۷.۱.۴ روش ذوزنقه‌ای^۱ (TCIM)

این الگوریتم که حالت اختلاف مرکزی زمان و به شکل ضمنی است، در واقع به شکل زیر روی معادله برگر اعمال می‌گردد:

$$u_i^{n+1} = u_i^n - \frac{\Delta t}{2} \left[\left(\frac{\partial f}{\partial x} \right)^n + \left(\frac{\partial f}{\partial x} \right)^{n+1} \right] \quad (۴۶-۴)$$

با تعریف این روش، براحتی قابل درک است که ما نیاز مبرمی به استفاده از تکنیک‌های تکرار یا خطی‌سازی برای حل چنین روش و مسأله غیرخطی خواهیم داشت؛ از این رو بیم و وارمینگ (۱۹۷۶) مدل زیر را پیشنهاد دادند:

$$f^{n+1} \approx f^n + \left(\frac{\partial f}{\partial u} \right)^n (u^{n+1} - u^n) = f^n + A^n (u^{n+1} - u^n) \quad (۴۷-۴)$$

پس

$$u_i^{n+1} = u_i^n - \frac{\Delta t}{2} \left[2 \left(\frac{\partial f}{\partial x} \right)^n + \frac{\partial}{\partial x} \{ A (u_i^{n+1} - u_i^n) \} \right] \quad (۴۸-۴)$$

که اگر مشتقاتی که نسبت به x با اختلاف دیفرانسیل‌های مرکزی مرتبه دوم جایگزین گردند، آن‌گاه پس از ساده‌سازی عبارت زیر را می‌توان نوشت:

$$\begin{aligned} -\frac{\Delta t A_{i-1}^n}{4\Delta x} u_{i-1}^{n+1} + u_i^{n+1} + \frac{\Delta t A_{i+1}^n}{4\Delta x} u_{i+1}^{n+1} &= \\ &= -\frac{\Delta t}{\Delta x} \frac{f_{i+1}^n - f_{i-1}^n}{2} - \frac{\Delta t A_{i-1}^n}{4\Delta x} u_{i-1}^n + u_i^n + \frac{\Delta t A_{i+1}^n}{4\Delta x} u_{i+1}^n \end{aligned} \quad (۴۹-۴)$$

همان‌طور که قبلاً اشاره شد، برای معادله برگر ژاکوبین A المان تکی u را شامل می‌شود. دیده خواهد شد که خطی‌سازی بیم و وارمینگ، منجر به دستگاه معادلات جبری خطی خواهد شد که از نوع سیستم‌های مثلثی و قابل حل با الگوریتم توماس می‌باشد. اما همان‌طور که برای روش مشابه اعمالی به معادله موج یک‌بعدی دیده شد، این الگوریتم برای هر گام زمانی دلخواه پایدار است. البته

^۱ Trapezoidal (CTCS type) method

با اضافه کردن یک جمله ویسکوزیته مصنوعی به شکل دیفرانسیل مرتبه چهارم جهت هموارسازی تحلیل عددی در فرم

$$-\frac{\omega}{8}(u_{i+2}^n - 4u_{i+1}^n + 6u_i^n - 4u_{i-1}^n + u_{i-2}^n) \quad (50-4)$$

دقت الگوریتم بدون تغییر مانده و روند شبیه‌سازی عددی بهتر خواهد شد. حال روش بیم-وارمینگ که عبارت صریح میرایی نوشته شده به آن اضافه گردیده است، برای محدوده $0 < \omega \leq 1$ پایدار خواهد شد؛ همانطور که ملاحظه می‌شود همچنان محدودیتی برای گام زمانی وجود ندارد.

البته روش بیم و وارمینگ استفاده کننده از اختلاف دیفرانسیل رو به عقب هم وجود دارد. برای این، با توجه به معادله غیرخطی برگر و گسسته‌سازی آن به شکل:

$$u^{n+1} = u^n - \Delta t \left(\frac{\partial f}{\partial x} \right)^{n+1} \quad (51-4)$$

اگر مراحل بالا با دیفرانسیل‌گیری رو به عقب مجدداً تکرار گردند، پس از مجزا کردن عبارات گام زمانی جدید از قدیم، رابطه زیر را می‌توان نوشت:

$$\begin{aligned} -\frac{\Delta t A_{i-1}^n}{2\Delta x} u_{i-1}^{n+1} + u_i^{n+1} + \frac{\Delta t A_{i+1}^n}{2\Delta x} u_{i+1}^{n+1} = \\ = -\frac{\Delta t}{\Delta x} \frac{f_{i+1}^n - f_{i-1}^n}{2} - \frac{\Delta t A_{i-1}^n}{2\Delta x} u_{i-1}^n + u_i^n + \frac{\Delta t A_{i+1}^n}{2\Delta x} u_{i+1}^n \end{aligned} \quad (52-4)$$

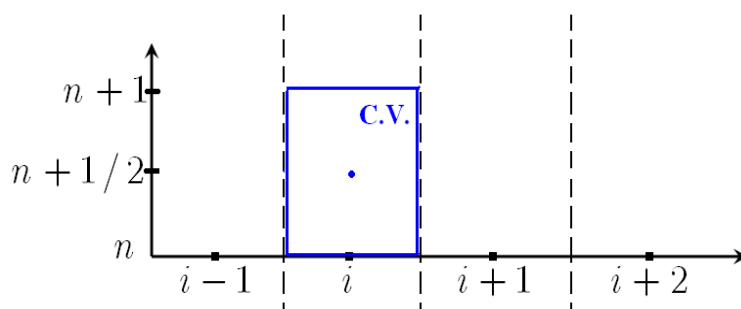
که باز این روش به فرم مثلثی و منجر به حل با استفاده از الگوریتم توماس خواهد شد. از طرفی این روش به تنهایی به صورت بی‌قید و شرط پایدار است؛ اما باز اضافه کردن یک جمله میرایی جهت بهبود نتیجه عددی لازم است.

۸.۱.۴ روش گادانوف^۱

روش‌های عددی‌ای که تاکنون روی معادله برگر اعمال شدند از بسط سری تیلور استفاده می‌نمودند تا تقریبی از مقدار متغیر وابسته را در گام زمانی بعدی بدست آورند. سری‌های تیلور در هر جایی که

¹ Godunov Scheme

شرایط همگرایی این سری‌ها ایجاد می‌شود، خوب کار کرده و تابعی هموار را تقریب می‌زنند. در حقیقت، برای حالتی که از یک روش اختلاف محدود استفاده می‌شود، فرض بر این است که تقریب با این سری‌ها وسیله خوبی برای بدست آوردن تقریب اختلافی برای تابعی پیوسته و حتی الامکان دارای مشتقات پیوسته باشد؛ اما این امر هنگامی که موج شوکی و یا هر ناپیوستگی دیگری وجود داشته باشد صادق نیست. به دیگر سخن در تحلیل‌های عددی می‌توان یک گام به جلو برداشت و تقابل بین روش گسسته‌سازی و خواص فیزیکی را با اعمال اطلاعات از تحلیل‌های دقیق روی معادلات اوایلر در نظر گرفت؛ گادانوف (۱۹۵۹)، همین مسئله را مطرح کرده و با استفاده از روش حجم محدود، حل معادلات بقا و تحلیل مقدار شار را در سطح مشترک سلول‌های شبکه با ارائه حل مسئله ریمان محلی در آن سطح ارائه کرد. در این بخش، به تعریف این دسته از روش‌ها که موسوم به روش‌های گادانوف هستند، پرداخته و به صورت خاص به اعمال این روش‌ها را بر روی معادله برگر پرداخته می‌شود.



شکل ۴-۹: تعیین حجم کنترلی برای روش گادانوف

مجدداً معادله (۴-۲۱) را در حالت غیر لزج و حجم کنترل نشان داده شده در شکل ۴-۹ را در نظر بگیرید؛ در روش گادانوف فرض بر اینست که تحلیل عددی در یک زمان خاص، به صورت تکه‌ای ثابت^۱ روی هر سلول شبکه بوده و با گسترش و تکامل زمان به گام بعدی با استفاده از مرز سلول‌های مجاور انجام پذیرد. اما از طرفی معلوم و بدیهی است که سطح مشترک این نوع سلول‌های تکه به تکه ثابت، دو حالت جریان مختلف را به شکل ناپیوسته (شبیه مسأله ریمان) از هم جدا می‌کند: u_L در طرف چپ و u_R در طرف راست. از این رو می‌توان نتیجه کار را از دوباره حل کردن

^۱ piecewise constant

مسئله با شرایط پیش‌تر، در زمان $t = n\Delta t$ و به صورت فرض داشتن مسئله ریمان محلی^۱ در هر مرز دو سلول، بدست آورد. اما برای اینکه سلول‌ها و سطح تماس آن‌ها در شبکه، به‌طور کامل قابل تحلیل باشند، شرایط خاصی از عدد CFL لازم است. همانگونه که بعداً نشان داده می‌شود، این روش از جمله روش‌های صریح و مرتبه اول از نوع پادبادسو است. بیابید حجم کنترلی از t به $t + \Delta t$ و از $x - \Delta x/2$ به $x + \Delta x/2$ کشیده می‌شود. اگر حجم کنترلی به صورت مرکزی در $(i, n + \frac{1}{2})$ انتخاب شود، تقریب عددی برای متغیر وابسته مسئله به صورت زیر می‌تواند نتیجه گردد:

$$\bar{u}_i^{n+1} = \bar{u}_i^n - \frac{\Delta t}{\Delta x} [f(u_{i+1/2}) - f(u_{i-1/2})] \quad (53-4)$$

که در این معادله، مقدار \bar{u} به صورت

$$\bar{u}_i = \frac{1}{\Delta x} \int_{x-\Delta x/2}^{x+\Delta x/2} u(x, t) dx \quad (54-4)$$

تعریف و متوسط‌گیری می‌شود. از طرفی جمله شار هم مقدار متوسط زمانی شار روی سطوح حجم کنترلی می‌باشد. یعنی

$$f = \frac{1}{\Delta t} \int_t^{t+\Delta t} f dt \quad (55-4)$$

روش گادانوف، به حل یک مسئله ریمان محلی در هر سطح مشترک سلولی می‌پردازد تا مقدار شار لازم را جهت پیشرفت حل عددی در مراحل بعد بدست آورد. از طرفی مسئله ریمان برای حالت خاص معادله برگر به فرم

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{u^2}{2} \right) = 0 \quad (56-4)$$

و با شرایط اولیه

¹ Local

$$u(x, 0) = \begin{cases} u_i & x \leq 0 \\ u_{i+1} & x > 0 \end{cases} \quad (57-4)$$

می‌باشد. هندسه مسأله در شکل ۴-۱۰ ترسیم شده است. در هر سطح اشتراکی بین سلولی و به طور محلی، فن انبساطی یا شوکی شروع شده و با زمان رشد می‌کند. از این رو چندین حالت مختلف برای حل این مسأله ایجاد می‌شود. با نوتاسیون

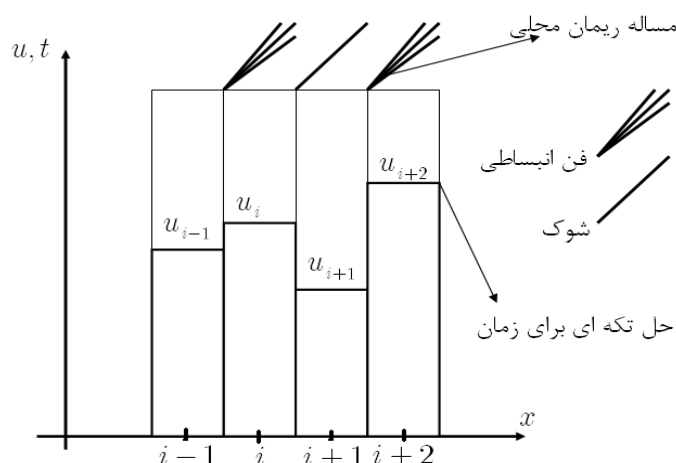
$$c_{i+1/2} = \left(\frac{du}{dt} \right)_{i+1/2} = \frac{u_i + u_{i+1}}{2} \quad (58-4)$$

حالت اول، برای امواج شوک می‌باشد:

$$u_i > u_{i+1};$$

$$u = \begin{cases} u_i & x/t < c_{i+1/2} \\ u_{i+1} & x/t > c_{i+1/2} \end{cases}, \quad (59-4)$$

$$f_{i+1/2} = \begin{cases} \frac{1}{2} u_i^2 & c_{i+1/2} > 0 \\ \frac{1}{2} u_{i+1}^2 & c_{i+1/2} < 0 \end{cases}$$



شکل ۴-۱۰: هندسه و حل محلی مسأله ریمان در سطوح مشترک المان‌ها (روش گادانوف)

و حالت دوم هم حالتی برای بیان فن انبساطی است:

$$u_i < u_{i+1};$$

$$u = \begin{cases} u_i & x/t < u_i \\ x/t & u_i < x/t < u_{i+1} \\ u_{i+1} & x/t > u_{i+1} \end{cases}, \quad (60-4)$$

$$f_{i+1/2} = \begin{cases} 0 & u_i < 0 < u_{i+1} \\ \frac{1}{2} u_i^2 & c_{i+1/2} > 0, u_{i+1} > u_i > 0 \\ \frac{1}{2} u_{i+1}^2 & c_{i+1/2} < 0, u_i < u_{i+1} < 0 \end{cases}$$

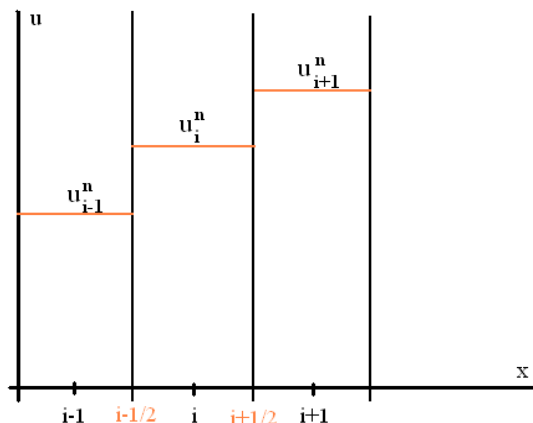
لذا با استناد به رابطه (۴-۵۳)، شارهای لازم برای تحلیل گام زمانی بعدی فراهم خواهند شد. به منظور انجام حل عددی راحت‌تر برای متغیرهای حالت در مرز سلول‌ها و جهت تضمین عدم تداخل امواج در سلول‌های مجاور، حرکت موج تنها در نصف مسافت سلول فرض می‌گردد. در نتیجه محدودیت پایداری برای روش گادانوف به صورت زیر است:

$$\left| u_{\max} \frac{\Delta t}{\Delta x} \right| \leq \frac{1}{2} \quad (61-4)$$

که هر چه مقدار این عبارت به صفر نزدیکتر و از ۰/۵ دورتر باشد نتایج بهتری حاصل می‌گردد. به بیانی بهتر، خلاصه‌تر و در قالب سه مرحله، می‌توان روش گادانوف را توضیح داد. این سه مرحله عبارتند از:

۵. تعیین یک تقریب تکه‌ای ثابت حل در مرحله زمانی n ام، مطابق شکل ۴-۱۱؛ بدین منظور تقریب تکه به تکه ثابت، متوسط حل روی سلول‌ها به اندازه Δx بوده و خطا از مرتبه Δx و روش از نوع مرتبه اول در مکان می‌باشد. باز به جهت تعیین مقادیر u روی هر تکه معادله جابه‌جایی یک‌بعدی را در نظر بگیرید؛ با انتگرال‌گیری می‌توان داشت:

$$\frac{d}{dt} \int_a^b u dx = f(a, t) - f(b, t) \quad (62-4)$$



شکل ۴-۱۱: یک تقریب تکه‌ای ثابت حل در مرحله زمانی n ام

با انتگرال‌گیری مجدد، می‌توان به رابطه زیر رسید:

$$\int_a^b u^{n+1} dx - \int_a^b u^n dx = -\Delta t [f(u(a)) - f(u(b))] \quad (63-4)$$

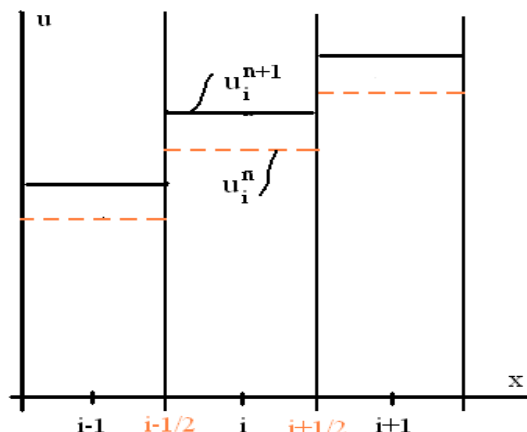
که f متوسط زمانی تابع شار در فواصل $n\Delta t$ و $(n+1)\Delta t$ می‌باشد. با این تعاریف و با ساده کردن رابطه (۶۳-۴) به صورت متوسط‌گیری روی بازه $(i-1/2, i+1/2)$ می‌توان نوشت:

$$\bar{u}_i^{n+1} = \bar{u}_i^n - \frac{\Delta t}{\Delta x} [f(u_{i+1/2}) - f(u_{i-1/2})] \quad (64-4)$$

۶. بدست آوردن حل دقیق مسأله ریمان یک بعدی به شکل محلی در سطح مشترک سلول‌ها و تعیین مقادیر شار عددی از روی آن؛ به طور کلی، این مرحله به مرحله فیزیکی الگوریتم گادانوف معرف است (شکل ۴-۱۰).

۷. متوسط‌گیری از متغیرهای حالت بعد از یک گام زمانی. پس از اتمام مرحله قبل می‌توان نوشت:

$$u^{(R)} = u^{(R)} \left(\frac{x - [i + 1/2] \Delta x}{t - n \Delta t}, u_i^n, u_i^{n+1} \right) \quad (65-4)$$



شکل ۴-۱۲: متوسط‌گیری از مقادیر دچار اغتشاشات بعد از یک گام زمانی

بالانویس R اشاره به حل ریمان دارد؛ با این تحلیل، تقریب جدیدی برای تکه‌های ثابت به دست می‌آید (شکل ۴-۱۲). بیان ریاضی جملات گفته شده به شکل زیر است:

$$\begin{aligned} \bar{u}_i^{n+1} &= \frac{1}{\Delta x} \int_{i-1/2}^{i+1/2} u^{(R)}(x, [n+1]\Delta t) dx \\ \bar{u}_i^{n+1} &= \frac{1}{\Delta x} \int_{-\Delta x/2}^0 u^{(R)}\left(\frac{\xi}{\Delta t}, u_i^n, u_{i+1}^n\right) d\xi + \\ &+ \frac{1}{\Delta x} \int_0^{\Delta x/2} u^{(R)}\left(\frac{\xi}{\Delta t}, u_{i-1}^n, u_i^n\right) d\xi \end{aligned} \quad (66-4)$$

از این به بعد برای راحتی کار، از علامت متوسط‌گیری ($\bar{\quad}$) روی پارامترها صرف‌نظر می‌شود. در الگوریتم توضیح داده شده، برای حالتی که سرعت موج مثبت می‌باشد ($a > 0$)، ناپیوستگی به مقدار $a\Delta t$ و بدون هیچ اصلاحی به سمت راست سلول i ام‌شیفت می‌یابد. از این رو مقدار جدید متوسط روی سلول i ام عبارت است از:

$$u_i^{n+1} = \frac{1}{\Delta x} \int_{i-1/2}^{i+1/2} u^n(x - a\Delta t) dx \quad (67-4)$$

۹.۱.۴ روش رو^۱

حل معادله برگر به وسیله روش گادانوف براحتی انجام گرفت و نتایج خوبی گرفته شد. اما به هر حال، وقتی این روش جهت تحلیل معادلات حاکم بر جریان گاز اعمال می‌گردد، لازم است تا

¹ Roe Scheme

تکنیک‌های تکرار بی‌بازده محاسباتی روی تمامی سلول‌ها، انجام گیرد. رو (۱۹۸۱-۱۹۸۰) یکی از راه-های گریز از این زمینه را ارائه کرد. وی حل مسئله خطی زیر را پیشنهاد داد:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \bar{A} \frac{\partial u}{\partial x} = 0 \quad (68-4)$$

که در آن \bar{A} ماتریس ثابت، به حالت $\partial f / \partial u$ و وابسته به موقعیت محلی است. البته در حالت خاص (اینجا معادله برگر)، ماتریس \bar{A} به صورت اسکالر و تک المانی می‌باشد. ماتریس \bar{A} برای ارضای آنچه که رو آن را خاصیت u نامید، ایجاد شده و باید شرایط زیر را شامل شود:

۱. برای هر u_i و u_{i+1} ،

$$f_{i+1} - f_i = \bar{A}(u_{i+1} - u_i) \quad (69-4)$$

۲. هنگامی که $u = u_i = u_{i+1}$ ، آنگاه

$$\bar{A}(u_i, u_{i+1}) = \bar{A}(u, u) = \frac{\partial f}{\partial u} = u \quad (70-4)$$

شرط اول برای تضمین بازتولید صحیح پرش^۱ در هنگام وقوع ناپیوستگی‌ها بوده و شرط دوم برای ایجاد و تبدیل مقدار صحیحی از ژاکوبین (در این حالت سرعت موج غیرخطی) در نواحی هموار^۲ می‌باشد.

با اعمال روش رو روی معادله برگر \bar{u} مقدار ثابتی بوده و به مقدار متوسط \bar{A} برمی‌گردد. حال

اگر مسأله خطی

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial u}{\partial x} = 0 \quad (71-4)$$

در نظر آورده شود که در آن مقدار \bar{u} برای دو سلول مجاور i و $i+1$ ام از اولین شرط بالا تعیین می‌گردد. یعنی:

¹ jump
² Smooth Regions

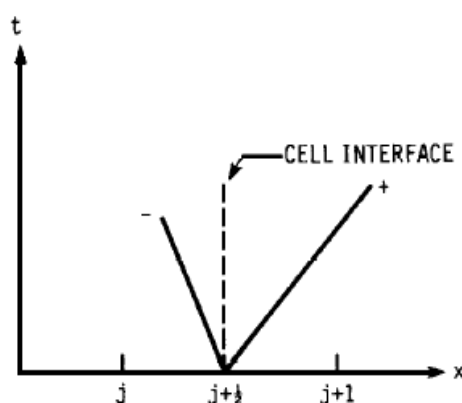
$$\bar{u} = \bar{u}_{i+1/2} = \frac{f_{i+1} - f_i}{u_{i+1} - u_i} \quad (۷۲-۴)$$

لذا معادله برگر منجر به رابطه زیر خواهد شد.

$$\bar{u}_{i+1/2} = \begin{cases} \frac{u_i + u_{i+1}}{2} & \text{for } u_i \neq u_{i+1} \\ u_i & \text{for } u_i = u_{i+1} \end{cases} \quad (۷۳-۴)$$

این اطلاعات، مسأله ریمان غیرخطی را به یک حالت خطی تقلیل داده و روابط رنگین-هوگونیوت مستقیماً رابطه بین پرس در شار و پرس در متغیر وابسته u را برای یک موج می‌دهند. یعنی:

$$f_{i+1} - f_i = \bar{u}_{i+1/2} (u_{i+1} - u_i) \quad (۷۴-۴)$$



شکل ۴-۱۳: دیاگرام موج برای روش رو که به معادله برگر اعمال شود.

در نتیجه، این حل‌کننده ریمان تنها به تشخیص ناپیوستگی‌ها می‌پردازد و قادر به تمییز انبساط-هایی که شامل ناپیوستگی و یا شوک می‌شوند، نیست. به منظور اصلاح این حقیقت، مسأله تقریب ریمان را برای معادله برگر مطابق شکل ۴-۱۳ در نظر بگیرید. برای این حالت به راحتی می‌توان دید که موج یکتایی از سطح مشترک سلول نشأت می‌گیرد. این موج بسته به $\bar{u}_{i+1/2} = dx/dt$ در هر دو جهت مثبت یا منفی قابل انتشار است. با استفاده از تعاریف می‌توان نوشت:

$$f_{i+1/2} - f_i = \bar{u}_{i+1/2}^- (u_{i+1} - u_i) \quad (75-4)$$

یا

$$f_{i+1} - f_{i+1/2} = \bar{u}_{i+1/2}^+ (u_{i+1} - u_i) \quad (76-4)$$

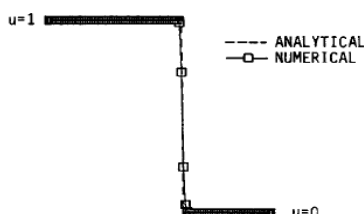
که از این رو شار عددی را می‌توان به فرم متقارن و به حالت زیر نوشت:

$$f_{i+1/2} = \frac{f_i + f_{i+1}}{2} + \frac{1}{2} (\bar{u}_{i+1/2}^- - \bar{u}_{i+1/2}^+) (u_{i+1} - u_i) \quad (77-4)$$

اگر توزیع و انتشار موج را برای دو حالت راست و چپ به صورت مجزا بررسی کنیم، شار عددی در یک رابطه می‌تواند خلاصه شود:

$$f_{i+1/2} = \frac{f_i + f_{i+1}}{2} - \frac{1}{2} |\bar{u}_{i+1/2}| (u_{i+1} - u_i) \quad (78-4)$$

شکل ۴-۱۴ نشان‌دهنده محاسبه انتشار ناپیوستگی توسط روش رو است که نتایج، تطابق خوبی را با حل دقیق نشان می‌دهند.

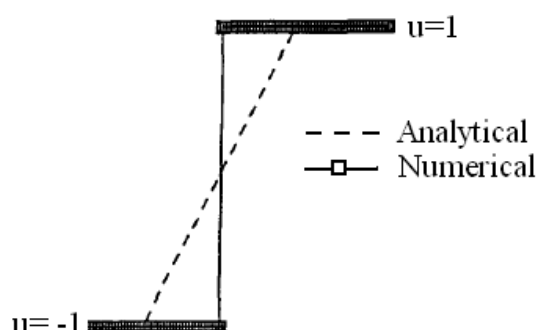


شکل ۴-۱۴: حل عددی ناپیوستگی به کمک روش رو

محدوده پایداری روش رو، مشابه محدوده متداول الگوریتم‌های صریح و به صورت $CFL < 1$ می‌باشد. اما اگر دقت گردد می‌توان متوجه شد که فرمولاسیون رو، به انتشار اختلاف متغیرهای وابسته در دو نقطه‌ای که مابین آن‌ها ناپیوستگی وجود دارد، می‌پردازد که نتیجه این کار ظهور احتمالی شرایط غیر فیزیکی فن انبساطی است؛ در روش برگر مسأله مهم، به صفر رسیدن $\bar{u}_{i+1/2}$ می‌باشد. پدید آمدن این امر در حالت تحول صوتی (نقطه بحرانی $a(u^*) = 0$) بوده و مثال کلاسیک این زمینه، حل روش رو با شرایط اولیه

$$u = \begin{cases} -1 & 0 < x \leq x_0 \\ +1 & x_0 < x \leq L \end{cases} \quad (۷۹-۴)$$

می‌باشد. حل تحلیلی و دقیق این مثال به صورت فن انبساطی متمرکز در $x = x_0$ است که در شکل ۴-۱۵ به همراه حل رو نشان داده شده است؛ در این تحلیل شرایط اولیه به خوبی نمایش داده شده در حالیکه شوک انبساطی نادرست است. این امر همان گونه که پیش از این هم به آن اشاره شد، به خاطر عدم توانایی الگوریتم در قائل شدن تمایز بین شوک‌های تراکمی و انبساطی می‌باشد.



شکل ۴-۱۵: بررسی حل مسائل با فن انبساطی توسط روش رو

در اصل وجود فن انبساطی ناقص شرط انتروپی و مجاز کننده شرایط فیزیکی نادرست است. اولینیک^۱ (۱۹۵۷) و پس از آن لکس (۱۹۷۳) به ارائه شرایطی پرداختند که روش‌های حل ناپیوستگی معادلات هذلولوی باید آنها را ارضا کنند و در بخش‌های بعد به آن اشاره خواهد شد. بیان ساده شرطی که به معادله برگر اعمال می‌شود به صورت زیر است:

$$u_R < \left(\frac{dx}{dt} \right)_{x_0} < u_L \quad (۸۰-۴)$$

که u_L و u_R به ترتیب مقادیر طرف‌های راست و چپ ناپیوستگی هستند. شرایط اولیه برای فن این شرط را نقض می‌کند و باعث حذف شوک‌های انبساطی خواهند شد. یعنی برخلاف روش

^۱ Oleinik

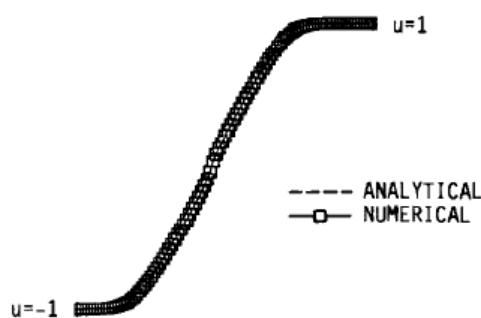
گادانوف، اصلاح عددی لازم است. از جمله روش‌های انجام این عملیات، توسط هارتن و هیمن^۱ (۱۹۸۳) به صورت اصلاح $\bar{u}_{i+1/2}$ ارائه گشته است؛ فرض کنید:

$$\varepsilon = \max\left(0, \frac{u_{i+1} - u_i}{2}\right) \quad (۸۱-۴)$$

آنگاه

$$\bar{u}_{i+1/2} = \begin{cases} \bar{u}_{i+1/2} & \bar{u}_{i+1/2} \geq \varepsilon \\ 0 & \bar{u}_{i+1/2} < \varepsilon \end{cases} \quad (۸۲-۴)$$

حالت تراکمی ($\varepsilon = 0$) بدون تغییر از الگوریتم استفاده می‌کند تا ناپیوستگی را انتشار دهد؛ در حالی که وضعیت فن انبساطی ($\varepsilon = \frac{u_{i+1} - u_i}{2}$) نیازمند تصحیح است. شکل ۴-۱۶ مقایسه حل مثال ذکر شده توسط روش رو با تحلیل دقیق بوده و نشان‌دهنده مطابقت بسیار خوب این دو روش می‌باشد؛ البته این امر از روش مرتبه اولی مثل الگوریتم رو که دارای خاصیت اتلافی و رفتاری هموار (بدون نوسانات) در حل عددی می‌باشد، منطقی به نظر می‌رسد. اصلاح روش رو به شیوه بالا در واقع افزودن مقدار کافی از خاصیت اتلافی در موقعی است که نقطه بحرانی یا صوتی ($a(u^*) = 0$) اتفاق می‌افتد.



شکل ۴-۱۶: فن انبساطی بدست آمده با روش رو و مقایسه آن با نتایج حل دقیق

¹ Harten and Hyman

۱۰.۱.۴ روش تقریب اوسر^۱

این تقریب، نشأت گرفته از روش‌های پادبادسو می‌باشد و از الگوی زیر کار خود را شروع می‌کند:

$$\begin{cases} \text{if } a(u) = \frac{\partial f}{\partial u} \geq 0 \rightarrow \text{FTBS scheme} \\ \text{if } a(u) = \frac{\partial f}{\partial u} < 0 \rightarrow \text{FTFS scheme} \end{cases} \quad (۸۳-۴)$$

برای یک تابع شار که برای آن رابطه $f''(u) > 0$ برقرار است، مقدار بحرانی که به مقدار صوتی^۲ هم معروفست، پارامتری منحصر به فرد بوده و بیان آن با رابطه زیر می‌باشد:

$$a(u^*) = 0 \quad (۸۴-۴)$$

همانطور که پیش از این هم دیده شد، با تعریف این نقطه مشکلات تازه‌ای ایجاد می‌شود؛ چون علامت $a(u)$ در نقطه مذکور تغییر می‌کند، مدیریت روش سخت شده و انتخاب نوع پادبادسو دقت خاصی را می‌طلبد. در این حالت از یک فرآیند سوئیچ استفاده می‌کنیم؛ به این ترتیب که یک تابع سوئیچ به نام $\mu(u)$ و معروف به روش مارمن-کول^۳ به صورت

$$\mu = \begin{cases} 0 & \text{if } a(u) < 0 \text{ or } u < u^* \\ 1 & \text{if } a(u) \geq 0 \text{ or } u \geq u^* \end{cases} \quad (۸۵-۴)$$

تعریف می‌کنیم. از این رو برای قسمت‌های مثبت و منفی شار (ناشی از امواج با شیب دارای همین علامت) می‌توان رابطه‌های زیر را اراده کرد:

$$\begin{cases} f^+(u) = \mu f(u) \\ f^-(u) = (1 - \mu) f(u) \end{cases} \quad (۸۶-۴)$$

که با توجه به روابط بالا می‌توان نوشت:

^۱ Osher Approximation

^۲ sonic value

^۳ Murman-Cole (MC method)

$$f = f^+ + f^- \quad (۸۷-۴)$$

لذا این روش به صورت زیر خواهد شد:

$$u_i^{n+1} = u_i^n - \frac{\Delta t}{\Delta x} [f^+(u_i) - f^+(u_{i-1})] - \frac{\Delta t}{\Delta x} [f^-(u_{i+1}) - f^-(u_i)] \quad (۸۸-۴)$$

۱۱.۱.۴ الگوریتم انکوئیست-اوشر^۱

در بخش معرفی روش راو دیده شد که در آن، هر دو موج تراکمی و انبساطی بوسیله ناپیوستگی‌ها جایگزین شدند. اوشر و انکوئیست (۱۹۸۱-۱۹۸۰) تغییرات متغیر وابسته را در طول امواج به صورت یک تحول پیوسته در مکان بحث کرده و روشی را ایجاد کردند که دارای خاصیت یکنوایی است و هر دو موج تراکمی و انبساطی را به درستی بحث می‌کند. در این روش، ناپیوستگی‌های شوکی در حل دقیق مسأله ریمان با امواج تراکمی ملایم و هموار^۲ جایگزین شده‌ی و ناپیوستگی‌ها اغلب با دو نقطه میانی دوباره حل می‌شوند. محدوده پایداری این تقریب‌زننده حل ریمان، با محدوده پایداری معمول در روش‌های صریح (یعنی $\nu < 1$) مطابقت دارد.

شارهای f^+ و f^- در حالت خاص از این الگوریتم و برای یک تابع شار محدب (کوژ) مثل حالت شار معادله برگر، به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$f^+ = f[\max(u, u^*)], \quad f^- = f[\min(u, u^*)] \quad (۸۹-۴)$$

در این تحلیل، موقعیت نقطه صوتی در سوئیچ شدن انتگرال‌گیری مشخص می‌شود. اما مطابق رابطه (۸۷-۴) شار در هر مکان به صورت جمع سهم امواج عبوری با شیب‌های مثبت و منفی نوشته می‌شود. در هر حالت (کلی)، هرکدام از مؤلفه‌های رابطه یاد شده به صورت زیر محاسبه خواهند شد:

^۱ Enquist-Osher
^۲ Smooth

$$f^+(u) = \int_{\xi=0}^{\xi=u} \mu(\xi) f'(\xi) d\xi \quad (90-ع)$$

$$f^-(u) = \int_{\xi=0}^{\xi=u} [1 - \mu(\xi)] f'(\xi) d\xi$$

در رابطه بالا پارامتر سوئیچ طبق رابطه (۸۵-ع) تعریف گشته و برای معادله برگر عبارت $f(\xi)$ برابر $\xi^2/2$ بیان می‌گردد. با این نوتاسیون و نیز با استفاده از الگوریتم راو، می‌توان شار عددی سطح مشترک سلول‌ها را با شروع از هر دو طرف آن بدست آورد:

$$f_{i+1/2} = f_i + \int_{u_i}^{u_{i+1}} [1 - \mu(\tau)] f'(\tau) d\tau, \quad (91-ع)$$

$$f_{i+1/2} = f_{i+1} - \int_{u_i}^{u_{i+1}} \mu(\tau) f'(\tau) d\tau$$

لذا شار عددی ذکر شده به فرم متقارن خواهد شد:

$$f_{i+1/2} = \frac{f_i + f_{i+1}}{2} - \frac{1}{2} \int_{u_i}^{u_{i+1}} |u| du \quad (92-ع)$$

که مشتق شار، ژاکوبین را ارائه داده و از این رو عبارت سوئیچ با $|u|$ جایگزین می‌گردد. با این تعریف شار در سطح مشترک سلول‌ها، فرم درست معادله برگر به فرم زیر بازنویسی می‌شود که در حالت هم‌علامتی u_i و u_{i+1} می‌توان گفت:

$$f_{i+1/2} = \begin{cases} u_{i+1}^2 / 2 & u_i, u_{i+1} < 0 \\ u_i^2 / 2 & u_i, u_{i+1} > 0 \end{cases} \quad (93-ع)$$

و در موقعیتی که علامت u_i و u_{i+1} مخالف یکدیگر باشد، می‌توان گفت:

$$f_{i+1/2} = \begin{cases} 0 & u_i < 0 < u_{i+1} \\ (u_i^2 + u_{i+1}^2) / 2 & u_i > 0 > u_{i+1} \end{cases} \quad (94-ع)$$

به بیانی دیگر هم می‌توان به شار عددی $f_{i+1/2}$ در این روش دست یافت؛ بدین ترتیب که اگر به فرم زیر شارهای مثبت و منفی تعریف شوند:

$$\begin{cases} f^+(u) = \int_0^u \max[f', 0] d\xi \equiv \int_0^u a^+(\xi) d\xi \\ f^-(u) = \int_0^u \min[f', 0] d\xi \equiv \int_0^u a^-(\xi) d\xi \end{cases} \quad (95-4)$$

آنگاه:

$$\begin{aligned} f_{i+1/2} &= \int_0^{u_i} \mu f'(u) du + \\ &+ \int_0^{u_{i+1}} [1 - \mu] f'(u) du \\ &= \int_0^{u_i} \mu f'(u) du + \\ &+ \int_0^{u_i} [1 - \mu] f'(u) du + \int_{u_i}^{u_{i+1}} [1 - \mu] f'(u) du \\ &= \int_0^{u_i} \mu f'(u) du + \int_0^{u_i} f'(u) du - \\ &- \int_0^{u_i} \mu f'(u) du + \int_{u_i}^{u_{i+1}} [1 - \mu] f'(u) du \end{aligned} \quad (96-4)$$

یا

$$f_{i+1/2} = f_i + \int_{u_i}^{u_{i+1}} [1 - \mu] f'(u) du \equiv f_i + \int_{u_i}^{u_{i+1}} a^-(u) du \quad (97-4)$$

و از این رو برای گام زمانی بعد می‌توان داشت:

$$u_i^{n+1} = u_i^n - \frac{\Delta t}{\Delta x} \left\{ \int_{u_{i-1}}^{u_i} \mu f'(u) du + \int_{u_i}^{u_{i+1}} [1 - \mu] f'(u) du \right\} \quad (98-4)$$

۱۲.۱.۴ الگوریتم‌های پادبادسوی مرتبه دوم به بالا^۱

بعنوان مقدمه‌ای روی این بخش، به این یادآوری می‌پردازیم که مشکل برخی روش‌های پادبادسوی در دارا بودن آن‌ها از یک ضعف حل عددی یا به دیگر سخن، وجود نوسان‌هایی^۲ حول نقطه ناپیوستگی بود؛ به هر حال مراتب بالاتر روش پادبادسو دارای چنین وضعی هستند و همانطور که خواهیم دید، بایستی محدودیت‌هایی همچون انتروپی، تغییرات کلی و یکنوایی حل عددی (برای

¹ Higher-Order Upwind Schemes

² Over- and Under-shoots

هماهنگی با فیزیک مسأله) رعایت شوند. اما تنها راه غلبه بر این محدودیت‌ها و شرایط، استفاده از مؤلفه‌های غیرخطی است. این مؤلفه‌ها و در کنار آنها گسسته‌سازی، بیان‌کننده غیر خطی بودن کامل آنها می‌باشد، حتی اگر این محدودیت‌ها به الگوریتم‌های خطی اعمال شوند.

این مفاهیم اولین بار توسط ون‌لیر^۱ و بوریس-بوک^۲ به ترتیب در سال‌های ۱۹۷۳ و ۱۹۷۶ میلادی، تحت عنوان محدودکننده‌ها^۳ مطرح شد که با کنترل گرادیان‌های حل عددی از بروز نوسانات جلوگیری می‌کردند. اما برای طرح چنین محدودکننده‌ها در روش حل عددی، ابتدا لازم است که الگوریتم‌های مرتبه دوم پادبادسوی موجود را بررسی و مرور کلی کرده و در ادامه آن به بحث این محدودکننده‌ها پردازیم.

در روند اعمال روش‌های اختلاف محدود برای حل معادلات با مشتقات جزئی، با قراردادن نقاط بیشتری در فرم استنسیل^۴، یک تقریب مرتبه بالا بدست خواهد آمد. در روش‌های پادبادسو، یک مشتق درجه اول را می‌توان با دو نقطه به فرم مرتبه اول تقریب زد و این در حالی است که سه نقطه برای یک بیان تقریب مرتبه دوم و ... لازم می‌باشد. به عبارتی می‌توان گفت که الگوریتم‌های با دقت مرتبه دوم و سوم، به ترتیب ناشی از تقریب خطی و سهموی روی هر سلول و دارای خطای قطع^۵ از مرتبه Δx^2 و Δx^3 می‌باشند.

در حل‌کننده‌های ریمان، یک تقریب مرتبه بالا به وسیله مقادیر شار در مرزهای حجم کنترلی بیان می‌شود. البته در رهیافت الگوریتم گادانوف، متغیرهای حالت در حجم کنترلی ثابت فرض می‌شدند که این فرض برای متدهای مرتبه اول کافی است. ونلیر (۱۹۷۹) این ایده را گسترش داد که در هر سلول شبکه، متغیرهای حالت می‌توانند تغییرات داشته باشند. در این ایده هم مجدداً مقادیر متوسط سلولی از حل ریمان برای بیان تغییر فرض شده در هر حجم کنترلی استفاده می‌شود. یقیناً این ایده منجر به یک برون‌یابی با دقت و مرتبه بالاتر در بدست آوردن شار یا متغیرهای حالت در مرزهای

¹ Van-Leer

² Boris & Book

³ Limiters

⁴ Stencil

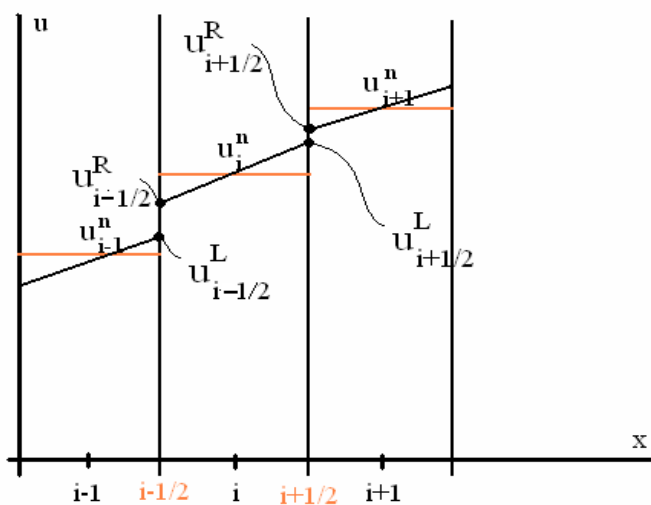
⁵ Truncation Error (T.E.)

سلول‌ها خواهد شد. برای چنین برون‌یابی، ونلیر عبارت "الگوریتم‌های با اختلاف بالادست مرکزی یکنوا برای قوانین بقا"^۱ را ابداع کرد که به اختصار به روش‌های MUSCL معروف هستند.

همانگونه که ذکر شد، در روش مرتبه اول گادانوف، مقدار متوسط متغیر وابسته به صورت مقدار ثابت آن متغیر در سلول شبکه تنظیم می‌شود؛ اما در روش‌های مرتبه بالا، بسته به دقت و مرتبه دلخواه و مطلوب، متغیرهای وابسته به صورت برازش منحنی با یک چندجمله‌ای مرتبه دلخواه در هر سلول، بدست می‌آیند. برای سادگی بحث تقریب تکه‌ای خطی مطابق شکل ۴-۱۷ را در نظر بگیرید. برای سلول i ام بیان تغییرات برای u ، یک تابع موقعیت در سلول می‌باشد و متوسط مقدار u به سلول اختصاص داده می‌شود. با استفاده از سری تیلور برای حجم کنترل می‌توان نوشت:

$$u_{i+1/2} = u_i + \frac{\Delta x}{2}(u_x)_i + \frac{(\Delta x)^2}{8}(u_{xx})_i + \dots \quad (4-99)$$

که مشتقات به صورت متوسط سلولی بدست می‌آیند.



شکل ۴-۱۷: گسسته‌سازی به شیوه الگوریتم پادبادسوی مرتبه دوم

لذا مطابق این بسط تیلور، برای بیان متغیرهای سلول i ام که در آن طرف مقادیر راست و چپ معلوم است، معمولاً برون‌یابی زیر انجام می‌پذیرد:

¹ Monotone Upstream-Centered Schemes for Conservation Laws (MUSCL)

$$\left\{ \begin{aligned} u_{i+1/2}^L &= u_i + \frac{1}{2}(\delta u_i) + \frac{k}{4}(\delta^2 u_i) + \dots \\ &= u_i + \frac{1-k}{4}\delta u_{i-1/2} + \frac{1+k}{4}\delta u_{i+1/2} \\ &= u_i + \frac{1-k}{4}(u_i - u_{i-1}) + \frac{1+k}{4}(u_{i+1} - u_i) \\ u_{i-1/2}^R &= u_i - \frac{1}{2}(\delta u_i) + \frac{k}{4}(\delta^2 u_i) + \dots \\ &= u_i - \frac{1+k}{4}\delta u_{i-1/2} - \frac{1-k}{4}\delta u_{i+1/2} \\ &= u_i - \frac{1+k}{4}(u_i - u_{i-1}) - \frac{1-k}{4}(u_{i+1} - u_i) \end{aligned} \right. \quad (100-4)$$

با مقدار دادن به k ، حالت‌های مختلفی رخ می‌دهد. برای نمونه

$$k = \begin{cases} -1 & \text{upwind scheme} \\ 0 & \text{Fromm's method} \\ 1 & \text{Central differenc} \end{cases} \quad (101-4)$$

همچنین می‌توان پارامتری مثل ε تعریف کرد و هر دو روش مرتبه اول و دوم را با آن پوشش

داد. به بیان دیگر:

$$\left\{ \begin{aligned} u_{i+1/2}^L &= u_i + \frac{\varepsilon}{4}[(1-k)(u_i - u_{i-1}) + (1+k)(u_{i+1} - u_i)] \\ u_{i-1/2}^R &= u_i - \frac{\varepsilon}{4}[(1+k)(u_i - u_{i-1}) + (1-k)(u_{i+1} - u_i)] \end{aligned} \right. \quad (102-4)$$

به همین ترتیب برای $u_{i+1/2}^R$ در طرف راست سطح مشترک می‌توان گفت:

$$u_{i+1/2}^R = u_{i+1} - \frac{\varepsilon}{4}[(1+k)(u_{i+1} - u_i) + (1-k)(u_{i+2} - u_{i+1})] \quad (103-4)$$

حال اگر ε برابر با صفر باشد حالت الگوریتم پادبادسوی مرتبه اول ایجاد شده و با قراردادن

مقادیر مختلف دیگر به جای ε و k دقت‌های مراتب بالا تولید خواهند شد. الگوریتم‌های پادبادسو

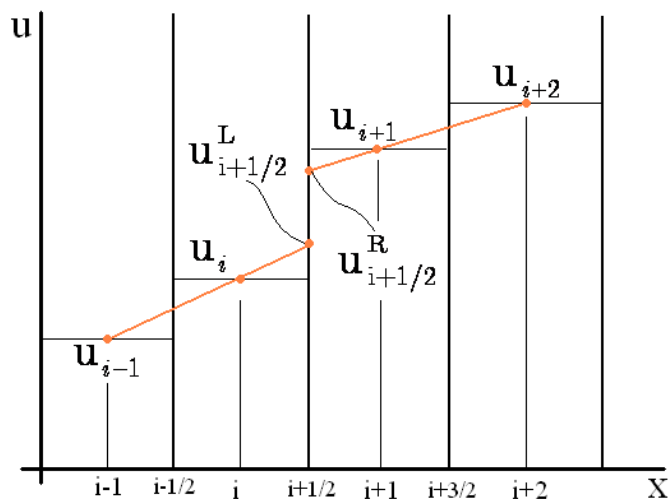
برای حالت برون‌یابی خطی که در آن $k = -1$ و مطابق با شکل ۱۸-۴ است، به صورت زیر خواهد شد:

$$\begin{cases} u_{i+1/2}^L = u_i + \frac{\varepsilon}{2}(u_i - u_{i-1}) \\ u_{i+1/2}^R = u_i - \frac{\varepsilon}{2}(u_{i+2} - u_{i+1}) \end{cases}, k = -1 \quad (104-4)$$

که در آن با فرض $\varepsilon = 1$ دقیقاً به معادلات مرتبه دوم رسیده می‌شود. حالت دیگر، میان‌یابی خطی بین بالادست و پایین‌دست نقطه منظور با $k = 0$ است که برای آن عبارات زیر داده می‌شود:

$$\begin{cases} u_{i+1/2}^R = u_{i+1} - \frac{\varepsilon}{4}(u_{i+2} - u_i) \\ u_{i+1/2}^L = u_i + \frac{\varepsilon}{4}(u_{i+1} - u_{i-1}) \end{cases}, k = 0 \quad (105-4)$$

و مجدداً برای داشتن روش‌های مرتبه دوم می‌بایست حالت $\varepsilon = 1$ را در نظر گرفت.



شکل ۱۸-۴: گسسته‌سازی سه نقطه ای با $k = -1$ به روش پادبادسوی مرتبه دوم

اما اگر $k = 1$ در نظر گرفته شود، عبارات زیر بدست خواهد آمد:

$$\begin{cases} u_{i+1/2}^L = u_i + \frac{\varepsilon}{2}(u_{i+1} - u_i) \\ u_{i-1/2}^R = u_i - \frac{\varepsilon}{2}(u_i - u_{i-1}) \end{cases} \quad (106-ع)$$

به راحتی می‌توان دید که در این حالت و برای الگوریتم‌های مرتبه دوم ($\varepsilon = 1$)، تقریب هر نقطه به صورت میانگین حسابی اعداد همسایه‌اش محاسبه می‌گردد؛ کاراکتر و مشخصه پادبادسو بودن روش حذف شده و الگوریتم مذکور به فرم مرکزی^۱ در می‌آید. لذا در این حالت، ناپیوستگی خاصی در سطح مشترک سلول‌ها وجود نخواهد داشت:

$$\left. \begin{cases} u_{i-1/2}^R = \frac{u_i + u_{i-1}}{2} \\ u_{i+1/2}^R = \frac{u_{i+1} + u_i}{2} \\ u_{i+1/2}^L = \frac{u_{i+1} + u_i}{2} \end{cases} \right\} \rightarrow \text{No discontinuity!}, \quad k = 1 \quad (107-ع)$$

حال یک بار دیگر تمامی ایده‌های بالا را در ذهن مرور کرده و هدف اصلی را که محاسبه شار عددی چنین روش‌هایی (مراتب بالای پادبادسو) می‌باشد، دنبال کنید. این هدف همانگونه که پیش از این به آن اشاره شده است جهت نیل به تحلیل عددی متغیر وابسته در گام‌های زمانی مختلف در معادله برگر می‌باشد. برای انجام این مهم، می‌توان با تعریف شار عددی در روش مرتبه اول شروع کرد:

$$f_{i+1/2} = f(u_i, u_{i+1}) \quad (108-ع)$$

آنگاه شار عددی مرتبه دوم به ترتیب زیر محاسبه خواهد شد:

$$f_{i+1/2}^{(2)} = f(u_{i+1/2}^L, u_{i+1/2}^R) \quad (109-ع)$$

و به همین ترتیب برای نقاط دیگر شبکه تحلیل عددی (مثل $f_{i-1/2}$) کار ادامه می‌یابد. در نتیجه الگوریتم نیمه‌گسسته‌سازی شده پادبادسو، به شکل زیر در خواهد آمد:

¹ central

$$\frac{du_i}{dt} = \frac{-1}{\Delta x} [f_{i+1/2}^{(2)} - f_{i-1/2}^{(2)}] \quad (110-ع)$$

برای نمونه روش مرتبه اول را^۱ را به شکل زیر در نظر بگیرید:

$$f_{i+1/2, Roe}^{(1)} = \frac{1}{2}(f_i + f_{i+1}) - \frac{1}{2}|\bar{A}|_{i+1/2} (u_{i+1} - u_i) \quad (111-ع)$$

بیان مرتبه دوم این روش به حالت زیر در خواهد آمد:

$$f_{i+1/2, Roe}^{(2)} = \frac{1}{2} [f(u_{i+1/2}^L) + f(u_{i+1/2}^R)] - \frac{1}{2} |\bar{A}|_{i+1/2}^{(2)} [u_{i+1/2}^R - u_{i+1/2}^L] \quad (112-ع)$$

همانطور که پیش از این هم به آن اشاره شد، برای حالت معادله برگر مقدار $|\bar{A}|$ به صورت

$|\bar{u}_{i+1/2}|$ بوده و می‌توان عبارت بالا را به شکل زیر ساده کرد:

$$f_{i+1/2, Roe}^{(2)} = \frac{1}{2} [f(u_{i+1/2}^L) + f(u_{i+1/2}^R) - |\bar{u}_{i+1/2}| (u_{i+1/2}^R - u_{i+1/2}^L)] \quad (113-ع)$$

که:

$$|\bar{u}_{i+1/2}| = \frac{f(u_{i+1/2}^R) - f(u_{i+1/2}^L)}{u_{i+1/2}^R - u_{i+1/2}^L} \quad (114-ع)$$

حتی در اینجا دیگر می‌توان یک روش صریح دو مرحله‌ای (پیش‌بینی - اصلاح) را مثل لکس -

وندروف دو مرحله‌ای که تولیدکننده دقت مرتبه دوم در زمان و در مکان است، ایجاد کرد؛ یعنی

مرحله پیش‌بینی به فرم:

$$u_i^{n+1/2} = u_i^n - \frac{\Delta t}{2\Delta x} (f_{i+1/2}^n - f_{i-1/2}^n) \quad (115-ع)$$

¹ Roe scheme

بوده و در آن f شار مرتبه اول می‌باشد. حال برون‌یابی متغیری که پیش از این به آن اشاره شد، به جهت بدست آوردن مقادیر متغیر وابسته روی سطوح مشترک راست و چپ اعمال می‌گردد. در نتیجه:

$$u_{i+1/2}^{L,n+1/2} = u_i^{n+1/2} + \frac{1-k}{4} \delta u_{i-1/2}^{n+1/2} + \frac{1+k}{4} \delta u_{i+1/2}^{n+1/2} \quad (116-ع)$$

$$u_{i+1/2}^{R,n+1/2} = u_i^{n+1/2} - \frac{1+k}{4} \delta u_{i+1/2}^{n+1/2} - \frac{1-k}{4} \delta u_{i+3/2}^{n+1/2}$$

اما مرحله اصلاح به شکل زیر خواهد بود:

$$u_i^{n+1} = u_i^n - \frac{\Delta t}{\Delta x} (f_{i+1/2}^{n+1/2} - f_{i-1/2}^{n+1/2}) \quad (117-ع)$$

که در آن داریم:

$$f_{i+1/2}^{n+1/2} = f(u_{i+1/2}^{L,n+1/2}, u_{i+1/2}^{R,n+1/2}) \quad (118-ع)$$

پایداری این روش وابسته به برون‌یابی استفاده شده برای بیان عبارات شار است. همانگونه که در بخش‌های قبل دیده شد برای روش‌های مرکزی عدد کورانت کمتر از ۱ برای پایداری لازم بود و برای روش‌های پادبادسو، محدوده مقادیر کمتر از عدد کورانت برابر ۲ را نیز می‌توانست شامل شود. لذا الگوریتم‌های پادبادسوی مرتبه بالا، محدودیت پایداری کمتری نسبت به روش‌های مرکزی دارند. در ادامه، به بررسی و مقایسه شار عددی مراتب اول و دوم و روابط مربوط به آنها با توجه به شکل ۴-۱۹ پرداخته می‌شود؛ برای یک شار مرتبه دوم داریم:

$$f_{i+1/2}^{(2)} = f_{i+1/2}^{+b} + f_{i+1/2}^{-f} \quad (119-ع)$$

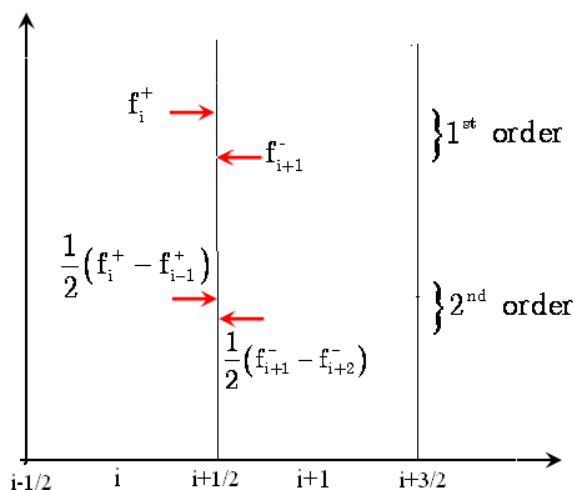
که در آن f و b به ترتیب نماینده اختلاف دیفرانسیلی رو به عقب و رو به جلو هستند. همچنین

داریم:

$$\begin{cases} f_{i+1/2}^{+b} = f_i^+ + \frac{\varepsilon}{4}[(1-k)(f_i^+ - f_{i-1}^+) + (1-k)(f_{i+1}^+ - f_i^+)] \\ f_{i+1/2}^{-f} = f_{i+1}^- - \frac{\varepsilon}{4}[(1+k)(f_{i+1}^- - f_i^-) + (1-k)(f_{i+2}^- - f_{i+1}^-)] \end{cases} \quad (120-ع)$$

لذا از رابطه (۱۱۹-ع) نتیجه گرفته می‌شود که:

$$\begin{aligned} f_{i+1/2}^{(2)} = f_{i+1/2} + \frac{1}{2} \left[\frac{1-k}{2} (f_i - f_{i-1/2}) + \frac{1+k}{2} (f_{i+1} - f_{i+1/2}) \right] + \\ + \frac{1}{2} \left[\frac{1+k}{2} (f_i - f_{i+1/2}) + \frac{1-k}{2} (f_{i+1} - f_{i+3/2}) \right] \end{aligned} \quad (121-ع)$$



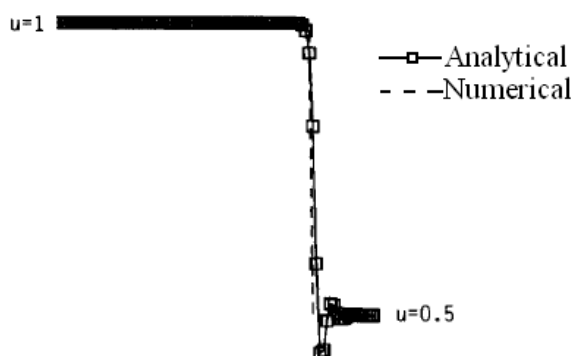
شکل ۴-۱۹: شماتیک تحلیل شارهای عددی برای الگوریتم‌های مراتب اول و دوم

عبارت قبل را به فرم مرکزی هم می‌توان بیان کرد:

$$f_{i+1/2}^{(2)} = \frac{1}{2}(f_i + f_{i+1}) - \frac{1-k}{4}[f_{i+3/2} - 2f_{i+1/2} + f_{i-1/2}] \quad (122-ع)$$

که به ازای تمامی مقادیر k ، صورت نوشته شده حالتی مرتبه دوم داشته و برای خطای قطع به عبارت $TE = (1-k)\Delta x^2 f_{xx} / 4$ می‌توان رسید. حال مجدداً به روش رو مرتبه دوم که در بالا به عبارت آن دست یافته شد، برگردید. شکل ۴-۲۰ نشان‌دهنده نتایج به دست آمده از اعمال روش‌های مرتبه دوم (راو مرتبه دوم) روی معادله برگر بوده و همانگونه که از ماهیت روش‌های مرتبه دوم

انتظار می‌رفت نوسانات در حل عددی بروز یافته‌اند. مطلوب اینست که این نوسانات را حذف و یا کم کرده و وضعیت یکنوایی پروفیل اولیه را حفظ کرد. بهبود نتایج وقتی حاصل می‌شود که با مفهوم محدودکننده‌ها آشنایی پیدا کرده و به جهت کاهش بالاروی‌ها و پایین‌روی‌های^۱ حل عددی، آنها را به الگوریتم اضافه کرد در بخش‌های آتی بیشتر به این مهم پرداخته خواهد شد.



شکل ۴-۲۰: روش دو مرتبه دوم بدون محدودکننده اعمال شده به معادله برگر

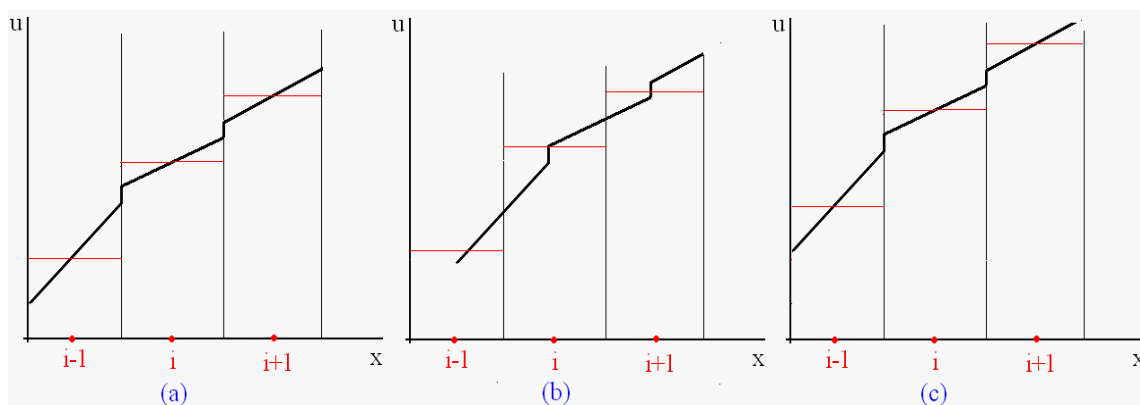
۱۳.۱.۴ الگوریتم پادبادسوی مرتبه دوم فروم^۲

تا اینجا برای روش‌های تحلیل عددی به گسسته‌سازی مکان با دقت مرتبه دوم و بالاتر از آن پرداخته شد، اما این امر برای هردوی زمان و مکان صورت نگرفت. جهت شروع این تحلیل می‌توان روشی با دقت مرتبه اول در زمان و مرتبه دوم در مکان را در نظر گرفت:

$$u_i^{n+1} = u_i^n - \frac{\Delta t}{\Delta x} (f_{i+1/2}^{(2)} - f_{i-1/2}^{(2)}) \quad (۱۲۳-۴)$$

که جملات آن قبلاً فرموله شده‌اند؛ این الگوریتم بی قید و شرط با مشکل ناپایداری مواجه است. از سوی دیگر مطابق شکل ۴-۲۱، انتشار موج با سرعت a و به اندازه $a\Delta t$ پس از هر گام زمانی Δt صورت می‌گیرد؛ در این شکل انتشار موج در سه حالت توزیع اولیه، پس از انتشار و در وضعیت جدید تقریب (تکه‌ای خطی) نشان داده شده است. به بیان ریاضی نیز می‌توان این تقریب را ارائه کرد:

^۱ Over- and Under-shoots
^۲ Fromm-scheme



شکل ۴-۲۱: گسسته‌سازی مرتبه دوم مکان و زمان

(حالت a: توزیع و تقریب اولیه خطی، حالت b: انتشار طی یک گام زمانی، و حالت c: خط جدید تقریب تکه‌ای روی شبکه)

$$u^n(x) = u_i^n + \frac{(x - x_i)(u_{i+1}^n - u_{i-1}^n)}{2\Delta x} \quad x_{i-1/2} < x < x_{i+1/2} \quad (124-4)$$

اگر حل مسئله هذلولوی ریمان به شکل زیر باشد:

$$u(x, t) = u^n(x - at) \quad (125-4)$$

آنگاه رابطه تقریب زمانی در گام بعدی زمان ($n+1$) خواهد شد:

$$u_i^{n+1} = \frac{1}{\Delta x} \int_{x_{i+1/2}}^{x_{i-1/2}} u^n(x - a\Delta t) dx \quad (126-4)$$

پس از انتگرال‌گیری، عبارت بالا به شکل زیر در خواهد آمد:

$$u_i^{n+1} = \frac{\nu}{2} \left[u_{i-1/2}^L + u^n(x_{i-1/2} - a\Delta t) \right] + \frac{(1-\nu)}{2} \left[u_{i-1/2}^R + u^n(x_{i+1/2} - a\Delta t) \right] \quad (127-4)$$

چون این روش از جمله روش‌های با فرض تقارن ($k = 0$ و به صورت مرکزی) می‌باشد، از روابط (۴-۱۰۵) برای حل مسأله ریمان می‌توان نوشت:

$$u_i^{n+1} = u_i^n - \nu(u_i^n - u_{i-1}^n) - \frac{\nu(1-\nu)}{4}(u_{i+1}^n - u_i^n - u_{i-1}^n + u_{i-2}^n) \quad (۴-۱۲۸)$$

این معادله در واقع همان روش فروم (۱۹۶۸) است که برای حل معادله جابه‌جایی یک‌بعدی خطی (مسأله ریمان) کاربرد دارد.

۱۴.۱.۴ روش انتقال تصحیحی شار^۱ (FCT)

همانطور که پیش از این هم اشاره شد، روش FCT، ترکیب دو روش با دقت‌های بالا و پایین است؛ که در آن روش با دقت بالا در نواحی هموار جریان اعمال می‌شود در حالیکه متد با دقت پایین نزدیک ناپیوستگی‌ها (به جهت دستیابی به یک راه حل یکنوا) اعمال می‌گردد. باز مراحل روش FCT به شکل زیر خلاصه می‌شود:

۱. محاسبه شار انتقالی روش با دقت پایین ($f_{i+1/2}^L$).

۲. محاسبه شار انتقالی روش با دقت بالا ($f_{i+1/2}^H$).

۳. محاسبه مقدار انتقالی و پخشی جدید و مرتبه پایین.

$$u_i^{TD} = u_i^n - \frac{\Delta t}{\Delta x_i}(f_{i+1/2}^L - f_{i-1/2}^L) \quad (۴-۱۲۹)$$

۴. تعیین شار ضد پخشی:

$$f_{i+1/2}^{AD} = f_{i+1/2}^H - f_{i+1/2}^L \quad (۴-۱۳۰)$$

۵. عاری کردن مرحله از نوسانات تحلیل عددی:

^۱ Flux-Corrected Transport (FCT)

$$f_{i+1/2}^C = C_{i+1/2} f_{i+1/2}^{AD} \quad \text{where } 0 \leq C_{i+1/2} \leq 1 \quad (131-4)$$

۶. تعیین مقدار جدید u_i^{n+1} . یعنی:

$$u_i^{n+1} = u_i^{TD} - \frac{\Delta t}{\Delta x} (f_{i+1/2}^C - f_{i-1/2}^C) \quad (132-4)$$

اما در ادامه‌ی بحث روش FCT، سعی در ارائه نخستین تکنیک این زمینه را که توسط بوریس و بوک در سال ۱۹۷۳ مطرح گشت، می‌باشد. این تکنیک به صورت روش چند مرحله‌ای بوده و بیان آن در مرحله اول (مرحله پیش‌بینی) به شکل:

$$\text{Predictor : } \bar{u}_i = u_i^n - \frac{\Delta t}{\Delta x} \{f_{i+1/2}^{B-B} - f_{i-1/2}^{B-B}\} \quad (133-4)$$

و در مرحله دوم (اصلاح) به صورت:

$$\text{Corrector : } u_i^{n+1} = \bar{u}_i - \frac{\Delta t}{\Delta x} \{f_{i+1/2}^* - f_{i-1/2}^*\} \quad (134-4)$$

می‌باشد. شماره‌های استفاده شده در این دو مرحله به فرم زیر تعریف می‌شوند:

$$f_{i+1/2}^{B-B} = \frac{f_i^n + f_{i+1}^n}{2} - \frac{\Delta x}{\Delta t} \frac{[4\nu^2 + 1]}{8} (u_{i+1}^n - u_i^n) \quad (135-4)$$

$$f_{i+1/2}^* = \frac{\Delta x}{\Delta t} \times \quad (136-4)$$

$$\min \text{ mod} \left[(\bar{u}_i - \bar{u}_{i-1}), \frac{(\bar{u}_{i+1} - \bar{u}_i)}{8}, (\bar{u}_{i+2} - \bar{u}_{i+1}) \right]$$

لازم به ذکر است که تعریف کلی تابع آماری minmod به صورت زیر می‌باشد:

$$\min \text{ mod} (x, y, z) = \text{sgn} (x) \times \max [0, \min \{|x|, y. \text{sgn} (x), z. \text{sgn} (x)\}] \quad (137-4)$$

۱۵.۱.۴ روش‌های با دقت تحلیل بالا^۱

در بخش‌های قبل دیده شد که الگوریتم‌های پادبادسو به‌تنهایی نمی‌توانند جلوی ایجاد نوسانات حول ناپیوستگی‌ها و ناشی از تحلیل عددی را بگیرند؛ از این رو واضح است که مفاهیم دیگری تبیین شوند تا مکانیزم تولید بالاروی و پایین‌روی^۲ حول وضعیت حل دقیق روشن‌تر و اصلاح گردد.

تحلیل‌های فیزیکی معادلات اوایلر و نویر-استوکس، به هیچ وجه ماهیت ایجاد نقاط اکسترمم در روند تکامل تحلیل را ندارند (این امر حداقل برای جریان یک‌بعدی به‌راحتی قابل اثبات است). از این رو نوسانات تولیدی، به‌خاطر تحلیل‌های عددی انجام شده می‌باشد.

ماهیت نوسانات و دلایل ایجاد آنها

روشی مثل گادانوف (بخش‌های قبل) را که دارای دقت تحلیل مرتبه اول است، در نظر بگیرید؛ گذر از دقت مرتبه اول به دوم، شامل جایگزینی نحوه ارائه متغیرهای حالت از تکه‌ای ثابت روی هر سلول شبکه به تکه‌ای خطی می‌شود. بنابراین نوسانات موقعی شروع می‌شوند که در این بیان‌های تکه‌ای خطی، شیب یک سلول از اختلاف مقادیر متوسط سلول‌های همسایه (کناری) بیشتر شود؛ همانگونه که در شکل ۴-۲۳ ملاحظه می‌شود، اگر شیب سلول i ام خیلی زیاد باشد، حل معادله جابه‌جایی^۳ در گام زمانی $n+1$ ام (که با شیفت دادن به مقدار $a\Delta t$ در گام زمانی n ام بدست می‌آید) منجر به رابطه متوسط سلولی

$$u_i^{n+1} < u_{i-1}^{n+1} \quad (۱۳۸-۴)$$

خواهد شد؛ این در حالی است که این مقادیر در گام زمانی قبل به‌صورت زیر با یکدیگر رابطه داشته‌اند:

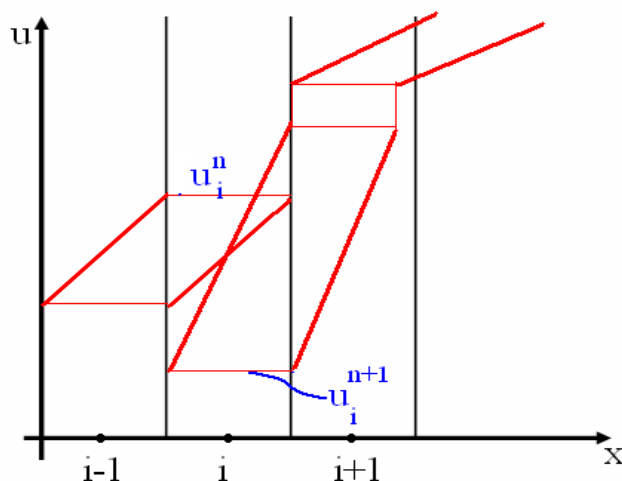
$$u_i^n > u_{i-1}^n \quad (۱۳۹-۴)$$

^۱ High Resolution Schemes

^۲ Over- and Under-shoots

^۳ Convection Equation

و از این رو یک بالاروی^۱ در حل زمان $n+1$ ام رخ خواهد داد. لذا جهت جلوگیری از نوسانات در یک تحلیل عددی بایستی از گرادیان‌های بزرگ جلوگیری شود؛ به دیگر سخن لازم است تا در هر گام زمانی گرادیان‌ها با محدوده درست چک شوند.



شکل ۴-۲۲: بررسی عوامل کلی تولید نوسانات در تحلیل‌های عددی

همانطور که اشاره شد حل معادله برگری که شامل نوسانات ناخواسته نشود منظور و مطلوب ماست و این امر زمانی حاصل می‌شود که شیب متغیرهای استفاده شده در برون‌یابی به صورتی محدود شوند که مقادیر نقطه نهایی در سلول شبکه ایجاد مقدار جدید مینیمم یا ماکزیمم نکند. اگر فرض شود که $u_{i+1}^n > u_{i-1}^n$ باشد، مطلوب در واقع این است که:

$$u_{i-1/2}^R \geq u_{i-1}, \quad u_{i+1/2}^L \leq u_{i+1} \quad (۱۴۰-۴)$$

برای این حالت برون‌یابی، یک کنترل ساده بوسیله محدودکننده‌های شیب قابل اجراست. بدین صورت که

$$u_{i+1/2}^L = u_i + \frac{1-\kappa}{4} \Psi_{i-1/2}^+ \delta u_{i-1/2} + \frac{1+\kappa}{4} \Psi_{i+1/2}^- \delta u_{i+1/2} \quad (۱۴۱-۴)$$

$$u_{i+1/2}^R = u_{i+1} - \frac{1+\kappa}{4} \Psi_{i+1/2}^+ \delta u_{i+1/2} - \frac{1-\kappa}{4} \Psi_{i+3/2}^- \delta u_{i+3/2}$$

¹ Under-shoot

در این معادلات مقادیر $\Psi_i^\pm \delta u_i$ در واقع همان شیب‌های محدود شده هستند. حال تعداد زیادی محدودکننده قابل تعریف بوده و همانطور که در قسمت‌های آتی بخش ۱۵.۱.۴ اشاره خواهد شد، یکی از آن محدودکننده‌ها به صورت زیر می‌باشد:

$$\Psi_{i+1/2}^- \delta u_{i+1/2} = \min \text{mod} \left\{ (u_{i+1} - u_i), \omega (u_i - u_{i-1}) \right\} \quad (142-4)$$

$$\Psi_{i+1/2}^+ \delta u_{i+1/2} = \min \text{mod} \left\{ (u_{i+1} - u_i), \omega (u_{i+2} - u_{i+1}) \right\}$$

در این روابط مقادیر κ مخالف ۱ و محدود مقادیر ω به شکل زیر است:

$$1 \leq \omega \leq \frac{3 - \kappa}{1 - \kappa} \quad (143-4)$$

باید به خاطر داشت که فرآیند عملکرد روش‌های پادبادسوی با دقت تحلیل بالا، شامل جلوگیری از تولید نوسانات با دست‌کاری روی مکانیزم تولید آنهاست. این دست‌کاری‌ها مانند اعمال جملات اتلاف مصنوعی به متدهای مرکزی^۱ هستند که اجازه رشد نوسانات را از الگوریتم حل سلب کرده و آنها را میرا می‌کنند.

گادانوف (۱۹۵۹) برای حل مشکل نوسانات، نشان داد که نهایتاً تمامی روش‌های خطی یکنوا می‌توانند به صورت مرتبه اول باشند؛ از این رو هر فرآیند خطی که گرادیان‌ها در روش مرتبه دوم آنها محدود می‌شوند، نمی‌توانند هدف را برآورده سازند و لذا نیاز به استفاده از فاکتورهای دیگر اصلاح کننده و غیر خطی به نام محدودکننده‌ها احساس خواهد شد. بیان این فاکتورها اولین بار در سال ۱۹۷۳ و توسط ونلیر^۲ مطرح شدند.

از آنجایی که نقش این محدودکننده‌ها، اعمال قید به روش‌های عددی جهت نزدیکی هر چه بیشتر به حل اویلر است، لذا تعریف و تبیین شرایط و خصوصیات ریاضی "غیرنوسانی" معادلات اویلر در ابتدای امر لازم به نظر می‌رسد. این شرایط عبارتند از:

۱. شرط انتروپی

۲. شرط یکنوایی

¹ central

² Van Leer

۳. شرط کاهش تغییرات کلی

شرط اول گفته شده، خیلی مرتبط با تحلیل رفتار نوسانی نیست؛ اما روش‌هایی را که طی آن‌ها انتروپی کاهش یافته و نقض قانون دوم ترمودینامیک تحقق می‌یابد، به‌طور فیزیکی غیرقابل پذیرش دانسته و آن‌را مربوط به حل ضعیف عددی می‌داند؛ جهت تکمیل بحث‌های حاضر گادانوف (۱۹۵۹)، لکس (۱۹۷۳)، ونلیر (۱۹۷۳ و ۱۹۷۹) روی یکنوایی و روش‌های گادانوف مرتبه دوم بحث کرده و ماجدا و اوشر^۱ (۱۹۷۹)، کرندال^۲ (۱۹۸۰) و هارتن (۱۹۸۳) مفهوم TVD را بیان کرده‌اند. ونلیر (۱۹۷۴) بسط متغیر وابسته را به مرزهای سلول‌ها محدود کرد تا بتواند از نوسانات حل عددی جلوگیری نماید. سویبی^۳ (۱۹۸۴) و رو (۱۹۸۵) محدودکننده‌هایی را بر اساس مدل‌های TVD روش لکس-وندروف گسترش دادند، در حالی که هارتن (۱۹۷۸) مفهوم شار اصلاحی را برای رسیدن به همان اثر اعمال کرد. در ادامه به بحث درباره خواص گفته شده خواهیم پرداخت.

شرط انتروپی^۴ برای معادلات غیرلزج

سیستم معادلات غیرلزج (اویلر) از نقطه نظر ریاضی فرم دیفرانسیلی معادلات بقا را ارضا نکرده ولی فرم انتگرالی آن‌ها (یا به‌طور کلی حل ضعیف) را ارضا می‌کند. این تحلیل‌ها، ارضا کننده روابط رنکین-هوغونیوت^۵ می‌باشند؛ اما به‌هر حال چندین روش حل ناپیوستگی وجود دارد که برخی از آنها مفهوم و معنی فیزیکی ندارند.

طبق قانون دوم ترمودینامیک (که بیان می‌کند در هر روند آدیاباتیک واقعی و فیزیکی، انتروپی فقط اجازه افزایش طی تبدیل و انتقال سیستم را دارد) تنها فن‌های انبساطی و شوک‌های تراکمی باقی می‌مانند که بعلت عدم قابلیت تبیین با پدیده‌های فیزیکی متناظر با کاهش انتروپی می‌باشند. از این رو مدل‌های جریان غیرلزج هیچ مکانیزم اتلاف داخلی (همچون اثرات ویسکوزیته) نداشته و لذا شرط دیگری بایستی به سیستم معادلات اضافه و اعمال گردد تا شوک یا ناپیوستگی‌های غیر فیزیکی، رد و حذف شوند. این شرط به‌نام شرط انتروپی معروف است. در یک قانون بقای هذلولوی به‌فرم

¹ Majda and Osher

² Crandall

³ Sweby

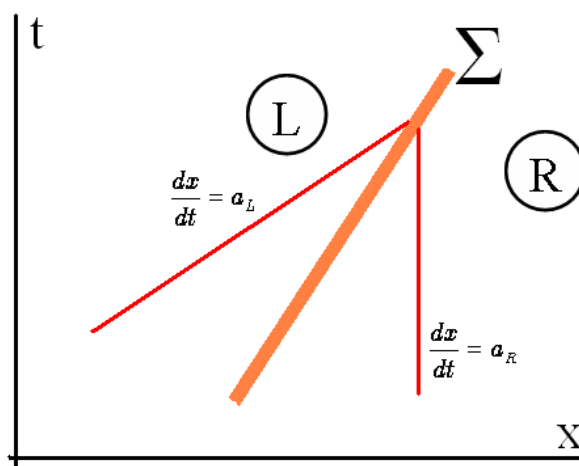
⁴ Entropy Condition

⁵ Rankin-Hogoniout Relations

شرایط باید به گونه‌ای واقع گردند که در حل ناپیوستگی به صورت $u_R < u_L$ ، سرعت موج $a(u) = f_u$ به شکل زیر باشد:

$$a_R = a(u_R) < c < a(u_L) = a_L \quad (۱۴۴-۴)$$

که c سرعت انتشار ناپیوستگی بوده و ارضا کننده روابط رنکین-هوغونیوت می‌باشد؛ u_L و u_R هم مقادیر متغیر وابسته در طرف‌های راست و چپ ناپیوستگی هستند. شرط انتروپی بیان می‌کند که مشخصه‌ها در هر طرف ناپیوستگی با سطح Σ به هم در آن سطح تلاقی یابند (شکل ۴-۲۳). این سطح می‌تواند همان شوک تراکمی باشد.



شکل ۴-۲۳: شرط انتروپی برای یک ناپیوستگی با سطح Σ

برای یک تابع شار به فرم

$$\frac{\partial a(u)}{\partial u} = \frac{\partial^2 f}{\partial u^2} = f_{uu} \quad (۱۴۵-۴)$$

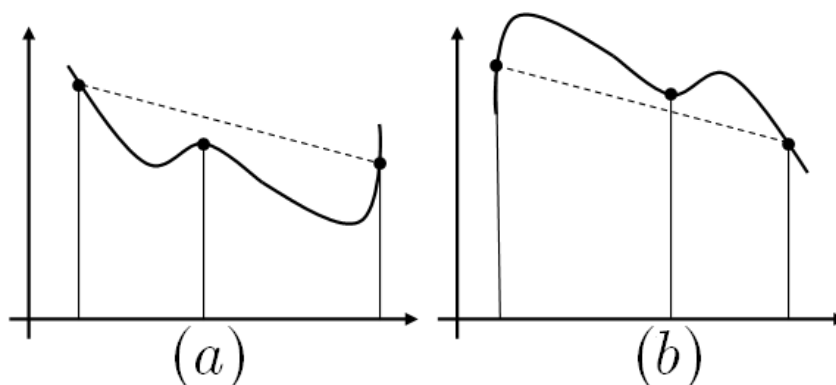
نشان داده می‌شود که شرط انتروپی منجر به حل یکتایی به ازای هر مجموعه از داده‌های (شرایط) اولیه خواهد شد. اما طبق شکل ۴-۲۴ می‌توان شرط انتروپی را برای شار f به صورت زیر تثبیت کرد: اگر $u_R < u_L$ باشد، بایستی:

$$f(\alpha u_R + [1 - \alpha] u_L) \leq \alpha f(u_R) + (1 - \alpha) f(u_L) \quad (146-4)$$

و اگر $u_R > u_L$ باشد، باید داشته باشیم:

$$f(\alpha u_R + [1 - \alpha] u_L) \geq \alpha f(u_R) + (1 - \alpha) f(u_L) \quad (147-4)$$

به عبارت دیگر و از لحاظ هندسی، این شرط بیان می‌کند که برای $u_R < u_L$ ، منحنی $f(u)$ زیر وتر RL در شکل ۴-۲۴ افتاده و برای حالت $u_R > u_L$ این منحنی بالای وتر مذکور واقع می‌شود. توجه داشته باشید که شارهای f در معادلات اوپلر دارای خاصیت تحدب بوده و از طرفی شیب وتر RL، در واقع سرعت انتشار ناپیوستگی اتصال u_R و u_L می‌باشد. از این رو:



شکل ۴-۲۴: وضعیت قرارگیری مقادیر مختلف شار برای دو حالت: (a) $u_R < u_L$ و (b) $u_R > u_L$

$$c = \frac{f(u_R) - f(u_L)}{u_R - u_L}, \quad \begin{cases} a(u_R) < c < a(u_L) & \text{for } u_R < u_L \\ a(u_L) < c < a(u_R) & \text{for } u_R > u_L \end{cases} \quad (148-4)$$

اما بیان هندسی شرط انتروپی، منجر به فرمولاسیونی معروف به شرط اولینیک^۱ یا شرط E می‌شود. یعنی برای هر u بین u_R و u_L و در حالت $u_R < u_L$ ، شیب RP کمتر از شیب RP می‌باشد:

¹ Oleinik Condition

$$\frac{f(u) - f(u_R)}{u - u_R} \leq \frac{f(u_L) - f(u_R)}{u_L - u_R} \leq \frac{f(u_L) - f(u)}{u_L - u} \quad (۱۴۹-۴)$$

$$\left\{ \text{For } u_R < u < u_L \right\}$$

مهم‌تر اینکه برای کاربردهای عملی در هر مسئله مقدار اولیه، حل کلی منحصر به فردی داشته و این حل، شرط انتروپی را برآورده می‌کند.

از طرفی برای ایجاد محدودیت در معادلات هذلولوی و به شرط اینکه u سرعت سیال باشد، سمت راست رابطه $u_t + f_x = \nu u_{xx}$ بیانگر نوعی جمله ویسکوزیته در معادله نویر- استوکس یک-بعدی است. این نتیجه مهم، دلایل به‌کارگیری شرط انتروپی را در محاسبه عددی معادلات جریان غیر لزج ارائه می‌دهد و بیان می‌کند که اگر جمله ویسکوزیته مناسب برای معادلات گسسته‌سازی شده انتخاب شود، ناپیوستگی‌های فیزیکی هرگز ظاهر نمی‌شوند.

شرط یکنوایی^۱

هنگامی یک الگوریتم عددی یکنوا فرض می‌شود که منجر به رفتار نوسانی در حل عددی نشود. یک رفتار نرم و هموار^۲ در حل عددی ناشی از عوامل مختلفی است که قوی‌ترین و ضعیف‌ترین آن‌ها بترتیب شرط یکنوایی و کاهش تغییرات کلی هستند. برای بیان صریح‌تر این شرط بیایید یک الگوریتم عددی مانند

$$u_i^{n+1} = H(u_{i-k}^n, u_{i-k+1}^n, \dots, u_{i+k}^n) \quad (۱۵۰-۴)$$

در نظر گرفته شود که این روش عددی به معادله $u_t + f_x = 0$ اعمال شده است؛ الگوریتم ذکر شده به این شرط یکنواست که H به ازای کلیه آرگمان‌هایش افزایش صرف داشته و نوسانی نداشته باشد. به دیگر سخن:

$$\frac{\partial H}{\partial u_j}(u_{i-k}, u_{i-k+1}, \dots, u_{i+k}) \geq 0 \quad \text{for all } i-k \leq j \leq i+k \quad (۱۵۱-۴)$$

^۱ Monotonicity Condition

^۲ Smooth

یا جهت ارضای شرط یکنوایی حالت خاص تابع H (بیان خطی آن) به صورت

$$w_i^{n+1} = \sum_k b_k u_{i+k}^n \quad (۱۵۲-۴)$$

باید تمام b_k ها غیر منفی (مثبت یا صفر) باشند که در آن ضرایب حقیقی هستند.

جهت ارائه خاصیتی از روش‌های یکنوا، هارتن (۱۹۷۶) به همراه گروهی نشان داد که یک الگوریتم یکنوا، همواره متناظر با حالت‌های فیزیکی قابل پذیرش بوده و به بیان دیگر ناقص تولید پدیده‌هایی غیر فیزیکی مثل شوک‌های انبساطی می‌باشند و از این رو شرط انتروپی را هم ارضا می‌کنند. به خاطر داشته باشید که اگر در روش حل عددی خاصی به صورت تابعی از زمان (t) :

افزایش جدیدی طی متغیر x نتواند رخ دهد؛ و

مقدار یک مینیمم محلی افزایشی نبوده و مقدار یک ماکزیمم محلی خاصیت کاهشی نداشته باشد، آنگاه، روش را "حفظ کننده یکنوایی" می‌نامند؛ این حالت بیان می‌کند که یک روش، دارای خواص گفته شده است، اگر در هنگامی که u_i^n یکنواست، u_i^{n+1} هم یکنوا باقی بماند. به عبارت دیگر در این حالت، پروفیل‌های یکنوا طی گسسته‌سازی و تحلیل، حفظ شده و نوسانات^۱ ظاهر نخواهند شد.

شرط کاهش تغییرات کلی (TVD)

مفهوم تغییرات کلی (TV) برای هر قانون بقای اسکالری $u_t + f_x = 0$ مثل معادله برگر به صورت زیر بیان می‌شود:

$$TV = \int \left| \frac{\partial u}{\partial x} \right| dx \quad (۱۵۳-۴)$$

اما شرط کاهش تغییرات کلی به این شکل بیان می‌شود که تغییرات کلی برای هر حل از لحاظ فیزیکی قابل قبول، با زمان افزایش پیدا نکند (لکس-۱۹۷۳). از طرفی برای یک حل گسسته سازی روی قانون بقا، می‌توان گفت:

^۱ Over- and Under-shoots

$$TV(u) = \sum_i |u_{i+1} - u_i| \quad (154-ع)$$

که شرط اینکه روش، TVD خوانده شود اینست که

$$TV(u^{n+1}) \leq TV(u^n) \quad (155-ع)$$

اگر به مفهوم خاصیت یکنوایی برگشته و روش حفظ کننده یکنوایی مروری مجدد گردند، براحتی می‌توان به سلسله ارتباطات زیر بین ویژگی‌های یکنوایی و کاهش تغییرات کلی رسید:

تمامی روش‌های یکنوا، TVD هستند؛

تمامی روش‌های TVD، حفظ کننده یکنوایی هستند.

برای روش‌های با فرم خطی، که در آن‌ها تابع H به صورت رابطه (۱۵۲-ع) می‌باشد، حفظ یکنوایی دقیقاً منجر به همان شرط یکنوایی می‌شود.

در ادامه، به منظور استخراج روابط و شرایط TVD نیاز به بازنویسی روش، تحت یک فرم اختلافی و نموی می‌باشد؛ یعنی با استفاده از اختلاف نقاط شبکه. لذا معادله گسسته‌سازی شده‌ی:

$$\left(\frac{du}{dt}\right)_i = \frac{-1}{\Delta x} (f_{i+1/2} - f_{i-1/2}), \quad f_{i+1/2} = f(u_i, u_{i+1}) \quad (156-ع)$$

به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\left(\frac{du}{dt}\right)_i = \frac{-1}{\Delta x} (C_{i+1/2}^- \delta u_{i+1/2} + C_{i-1/2}^+ \delta u_{i-1/2}) \quad (157-ع)$$

که در آن:

$$\begin{cases} C_{i+1/2}^- \delta u_{i+1/2} = f_{i+1/2} - f_i \equiv a_{i+1/2}^- (u_{i+1} - u_i) \\ C_{i-1/2}^+ \delta u_{i-1/2} = f_i - f_{i-1/2} \equiv a_{i-1/2}^+ (u_i - u_{i-1}) \end{cases} \quad (158-ع)$$

و نیز C^- و C^+ ، به ترتیب قسمت‌هایی از امواج دارای سرعت‌های مثبت و منفی را شامل شده

که سازگار با تعاریف a^- و a^+ می‌باشند؛ یا

$$C_{i+1/2}^+ + C_{i+1/2}^- = \frac{\delta f_{i+1/2}}{\delta u_{i+1/2}} = \frac{f_{i+1} - f_i}{u_{i+1} - u_i} = a_{i+1/2} \quad (۱۵۹-۴)$$

همچنین می‌توان شار عددی روش‌های در نظر گرفته شده را به فرم اختلاف‌های مرکزی بعلاوه یک جمله اتلافی منظور کرد؛ یعنی

$$f_{i+1/2} = \frac{f_i + f_{i+1}}{2} - \frac{\bar{D}_{i+1/2} \delta u_{i+1/2}}{2} \quad (۱۶۰-۴)$$

که \bar{D} به صورت ضریب لزجت (ویسکوزیته) مصنوعی^۱ روش در نظر گرفته می‌شود؛ تابع \bar{D} به صورت منحصر به فرد، روش سه نقطه‌ای را تعریف کرده و با عبارات مربوط به C^\pm ارتباط پیدا می‌کند. به عبارت دیگر:

$$C_{i+1/2}^- = \frac{a_{i+1/2} - \bar{D}_{i+1/2}}{2}, \quad C_{i+1/2}^+ = \frac{a_{i+1/2} + \bar{D}_{i+1/2}}{2} \quad (۱۶۱-۴)$$

در عبارت فوق، $a_{i+1/2}$ با معادله (۱۵۹-۴) تعریف گشته و ضریب ویسکوزیته عددی \bar{D} به شکل زیر بیان می‌گردد:

$$\bar{D}_{i+1/2} = C_{i+1/2}^+ - C_{i+1/2}^- \quad (۱۶۲-۴)$$

می‌توان جهت راحتی هر چه بیشتر، خانواده‌ای از روش‌ها را به فرم زیر در نظر گرفت:

$$\begin{aligned} u_i^{n+1} + \frac{\Delta t}{\Delta x} \theta (f_{i+1/2}^{n+1} - f_{i-1/2}^{n+1}) &= \\ &= u_i^n - \frac{\Delta t}{\Delta x} (1 - \theta) (f_{i+1/2}^n - f_{i-1/2}^n) \end{aligned} \quad (۱۶۳-۴)$$

که با مقدار دادن به θ دسته روش‌های مختلفی حاصل خواهند شد؛ بدین ترتیب که رابطه بالا اگر $\theta = 0$ باشد، به روش‌های صریح و اگر $\theta \neq 0$ باشد به روش‌های ضمنی تبدیل خواهد شد. اما اگر $\theta = 1/2$ در نظر گرفته شود، حاصل یک عبارت و اختلاف دیفرانسیلی دوزنقه‌ای است که در

^۱ Artificial Viscosity

آن فرم مرتبه دوم زمانی ایجاد شده است. این خانواده تک‌پارامتری از روش‌های حل عددی باز قابل ساده کردن بیشتر است؛ این امر با تعریف

$$\bar{f}_{i+1/2} = (1 - \theta) f_{i+1/2}^n + \theta f_{i+1/2}^{n+1} \quad (164-ع)$$

صورت می‌گیرد و معادله (۱۶۳-ع) به صورت زیر ساده می‌شود:

$$u_i^{n+1} = u_i^n - \frac{\Delta t}{\Delta x} (\bar{f}_{i+1/2} - \bar{f}_{i-1/2}) \quad (165-ع)$$

از سویی در معادله نوشته شده دو بخش اساسی چپ و راست یا بخش‌های ضمنی و صریح وجود دارد:

$$L(u^{n+1}) = R(u^n) \quad (166-ع)$$

که در آن:

$$L(u_i) = u_i + \frac{\Delta t}{\Delta x} \theta (f_{i+1/2} - f_{i-1/2}) \quad (167-ع)$$

$$R(u_i) = u_i - \frac{\Delta t}{\Delta x} (1 - \theta) (f_{i+1/2} - f_{i-1/2}) \quad (168-ع)$$

هارتن (۱۹۸۴) نشان داد که به منظور اطمینان خاطر از TVD بودن روش گفته شده بایستی داشت:

$$TV[R(u^n)] \leq TV(u^n), \quad TV[L(u^{n+1})] \geq TV(u^{n+1}) \quad (169-ع)$$

وی با بازنویسی معادله (۱۶۳-ع) به فرم

$$\begin{aligned} u_i^{n+1} - \theta \frac{\Delta t}{\Delta x} [C_{i+1/2}^- \delta u_{i+1/2} - C_{i-1/2}^+ \delta u_{i-1/2}]^{n+1} &= \\ &= u_i^n + \frac{\Delta t}{\Delta x} (1 - \theta) [C_{i+1/2}^- \delta u_{i+1/2} + C_{i-1/2}^+ \delta u_{i-1/2}]^n \end{aligned} \quad (170-ع)$$

نشان داد که شرایط گفته شده، با محدوده $-\infty < C \leq -\theta C_{i+1/2}^{\pm} \Delta t / \Delta x \leq 0$ ، به شکل زیر هستند:

$$\frac{\Delta t}{\Delta x} (1 - \theta) C_{i+1/2}^{\pm} \geq 0, \quad \frac{\Delta t}{\Delta x} (1 - \theta) \{C_{i+1/2}^{+} + C_{i+1/2}^{-}\} \leq 1 \quad (171-ع)$$

در حالت‌های $\theta = 0$ و $\theta = 1$ شرط کاهش تغییرات کلی ارضا شده و این عمل برای حالتی که $\theta = 0.5$ است صورت نمی‌پذیرد؛ اینجاست که نیاز به اعمال محدودکننده‌ها جهت جلوگیری از نوسانات احساس می‌شود.

شرایط برای TVD های سه نقطه‌ای

شرایط لازم جهت TVD بودن برای روش‌های سه نقطه‌ای صریح و ضمنی، توسط هارتین و برای روش‌های چندنقطه‌ای کلی، به وسیله لکس و جیمسون^۱ بدست آمده است؛ اگر و فقط اگر دو شرط $C_{i+1/2}^{-} \leq 0$ و $C_{i+1/2}^{+} \geq 0$ همزمان برقرار باشند، روش نیمه-گسسته‌سازی شده (ع-۱۵۷)، TVD است. برای اثبات این قضیه، فرض کنید s تابع علامت اختلاف مرکزی به شکل زیر باشد:

$$s_{i+1/2} = \text{sgn}(\delta u_{i+1/2}) \quad (172-ع)$$

جهت ارضای شرط TVD بایستی:

$$\frac{dTV(u)}{dt} \leq 0 \quad (173-ع)$$

از این رو طبق تعریف:

$$\frac{dTV(u)}{dt} = \sum_i s_{i+1/2} \frac{d(u_{i+1} - u_i)}{dt} \quad (174-ع)$$

حضور $s_{i+1/2}$ به معنی ضرب علامت جمله دوم داخل \sum در علامت خودش بوده و عامل مثبت شدن عبارت (همان قدر مطلق گیری) می‌شود؛ اما برای دو جمله du_i/dt و du_{i+1}/dt می‌توان از رابطه (ع-۱۵۷) کمک گرفت؛ لذا

¹ Lax and Jameson

$$\begin{aligned} \frac{dTV(u)}{dt} &= \frac{-1}{\Delta x} \sum_i s_{i+1/2} \times \\ &\times \left[\left(C_{i+3/2}^- \delta u_{i+3/2} + C_{i+1/2}^+ \delta u_{i+1/2} \right) - \right. \\ &\left. - \left(C_{i+1/2}^- \delta u_{i+1/2} + C_{i-1/2}^+ \delta u_{i-1/2} \right) \right] \end{aligned} \quad (175-ع)$$

با ساده‌سازی عبارت و به خصوص برای $\delta u_{i+1/2} = 1$ و $\delta u_{i+3/2} = \delta u_{i-1/2} = 0$ و طبق شرط TVD می‌توان داشت:

$$\frac{-1}{\Delta x} \sum_i \left\{ (+1) \left[C_{i+1/2}^+ - C_{i+1/2}^- \right] \delta u_{i+1/2} \right\} \leq 0 \quad (176-ع)$$

یعنی:

$$C_{i+1/2}^+ \geq 0 \quad , \quad C_{i+1/2}^- \leq 0 \quad (177-ع)$$

که همان قضیه گفته شده است. حال بیایید شرط TVD بودن برای یک روش صریح مثل

$$u_i^{n+1} = u_i^n - \frac{\Delta t}{\Delta x} \left[C_{i+1/2}^- \delta u_{i+1/2} + C_{i-1/2}^+ \delta u_{i-1/2} \right] \quad (178-ع)$$

بررسی شود؛ این شرط عبارتست از:

$$\frac{\Delta t}{\Delta x} \left[C_{i+1/2}^+ - C_{i+1/2}^- \right] \leq 1 \quad (179-ع)$$

که این شرط بسیار شبیه شرط CFL است؛ به بیان دیگر این شرط عبارتست از:

$$\frac{\Delta t}{\Delta x} |a_{i+1/2}| \leq \frac{\Delta t}{\Delta x} \bar{D}_{i+1/2} \leq 1 \quad (180-ع)$$

روش‌های مرتبه دوم TVD با محدودکننده‌ها

این روش‌ها با دستورالعمل زیر تولید می‌گردند:

یک شار عددی مرتبه اول یکنوا انتخاب می‌گردد؛

این شار عددی به دقت مرتبه دوم برده می‌شود (مباحث بخش‌های قبلی)؛

دامنه تغییرات ظاهر شده، با جملاتی اضافه بر روابط بالا و در قالب یک سری محدودکننده غیر خطی، محدود می‌گردد؛

انتگرال زمانی این روش (که با دستورالعمل بخش‌های بعد گفته خواهد شد) انجام شده و نهایتاً و در صورت امکان،

برای روش حاصل، شرط انتروپی هم چک می‌شود.

اما، بیایید برای تعریف محدودکننده‌ها برای معادله جابه‌جایی $u_i + f_x = 0$ ، روشی پادبادسو را از نوع مرتبه دوم و نیمه-گسسته‌سازی شده، در نظر گرفته شود:

$$\left. \frac{du}{dt} \right|_i = -a^+ \left[\frac{3u_i - 4u_{i-1} + u_{i-2}}{2\Delta x} \right] - a^- \left[\frac{-3u_i + 4u_{i+1} - u_{i+2}}{2\Delta x} \right] \quad (181-ع)$$

که می‌توان این رابطه را به صورت زیر بازنویسی کرد:

$$\begin{aligned} \left. \frac{du}{dt} \right|_i = & -\frac{a^+}{\Delta x} \left[(u_i - u_{i-1}) + \frac{1}{2}(u_i - u_{i-1}) - \frac{1}{2}(u_{i-1} - u_{i-2}) \right] + \\ & + \frac{a^-}{\Delta x} \left[(u_{i+1} - u_i) + \frac{1}{2}(u_{i+1} - u_i) - \frac{1}{2}(u_{i+2} - u_{i+1}) \right] \end{aligned} \quad (182-ع)$$

در عبارت فوق، پارامترهای a^+ و a^- با عبارات زیر بیان می‌گردند:

$$a^+ = (a + |a|) / 2, \quad a^- = (a - |a|) / 2 \quad (183-ع)$$

بالاخره در این مرحله نوبت به محدودکردن می‌رسد که برای آن، جملات دوم و سوم در هر

برانکت به صورت زیر محدود می‌شوند:

$$\begin{aligned} \left. \frac{du}{dt} \right|_i = & -\frac{a^+}{\Delta x} \left[(u_i - u_{i-1}) + \frac{1}{2} \Psi_{i-1/2}^+ (u_i - u_{i-1}) - \frac{1}{2} \Psi_{i-3/2}^+ (u_{i-1} - u_{i-2}) \right] + \\ & -\frac{a^-}{\Delta x} \left[(u_{i+1} - u_i) + \frac{1}{2} \Psi_{i+1/2}^- (u_{i+1} - u_i) - \frac{1}{2} \Psi_{i+3/2}^- (u_{i+2} - u_{i+1}) \right] \end{aligned} \quad (184-ع)$$

توجه داشته باشید که زیرنویس مربوط به Ψ توسط بازه اعمال محدودیت، تعیین شده و از سوی دیگر روابط نوشته شده، به ازای $\Psi = 1$ منجر به روابط بدون محدودیت قبل خواهند شد. حال پارامتر جدیدی را به فرم زیر تعریف می‌کنیم:

$$r_{i+1/2}^+ = \frac{u_{i+2} - u_{i+1}}{u_{i+1} - u_i}, \quad r_{i+1/2}^- = \frac{u_i - u_{i-1}}{u_{i+1} - u_i} \quad (185-ع)$$

که مخرج کسر، معادل با زیرنویس r بوده و از جمع مخرج و اثر بالانویس r ، می‌توان صورت کسر متناظر را تعیین کرد. طبق جهت پادبادسوی مرتبط (+ یا -)، محدودکننده (Ψ) می‌تواند به صورت تابعی از r ‌های بالا تعریف و بیان گردد. به عبارت دیگر و برای امواج با سرعت انتشار مثبت ($a \geq 0$),

$$\Psi_{i-1/2}^+ = \Psi\left(r_{i-1/2}^+, r_{i+1/2}^+\right) \quad (186-ع)$$

و برای امواج با سرعت منفی ($a \leq 0$),

$$\Psi_{i+1/2}^- = \Psi\left(r_{i+1/2}^-, r_{i+3/2}^-\right) \quad (187-ع)$$

خواهد بود. برای بدست آوردن شرایط TVD، بایستی فرم معادله محدود شده (ع-۱۸۴) را به قالب معادله (ع-۱۵۷) برد. بدین منظور می‌توان نوشت:

$$\begin{aligned} \left. \frac{du}{dt} \right|_i &= -\frac{a^+}{\Delta x} \left[1 + \frac{1}{2} \Psi_{i-1/2}^+ - \frac{1}{2} \frac{\Psi_{i-3/2}^+}{r_{i-3/2}^+} \right] (u_i - u_{i-1}) + \\ &\quad -\frac{a^-}{\Delta x} \left[1 + \frac{1}{2} \Psi_{i+1/2}^- - \frac{1}{2} \frac{\Psi_{i+3/2}^-}{r_{i+3/2}^-} \right] (u_{i+1} - u_i) \end{aligned} \quad (188-ع)$$

لذا شرط TVD بودن روش (کاهش تغییرات کلی با زمان)، این است که روابط زیر برقرار باشند:

$$1 + \frac{1}{2} \Psi_{i-1/2}^+ - \frac{1}{2} \frac{\Psi_{i-3/2}^+}{r_{i-3/2}^+} \geq 0, \quad 1 + \frac{1}{2} \Psi_{i+1/2}^- - \frac{1}{2} \frac{\Psi_{i+3/2}^-}{r_{i+3/2}^-} \geq 0 \quad (189-ع)$$

اما اگر حالت‌های پادبادسوی تکی در نظر گرفته شده و وابستگی تابع محدودیت کمتر فرض شود، با کاهش پشتیبانی این روش از حالت کلی مواجه شده ولی وابستگی‌ها ساده و نزدیک‌تر خواهند شد؛ به دیگر سخن برای امواج با سرعت انتشار مثبت و منفی،

$$\begin{cases} \Psi_{i-1/2}^+ = \Psi(r_{i-1/2}^+) & , & \Psi_{i-3/2}^+ = \Psi(r_{i-3/2}^+) \\ \Psi_{i+1/2}^- = \Psi(r_{i+1/2}^-) & , & \Psi_{i+3/2}^- = \Psi(r_{i+3/2}^-) \end{cases} \quad (190-ع)$$

به ترتیب برقرار خواهند بود. از این رو شرایط

$$\frac{\Psi(r_{i-3/2}^+)}{r_{i-3/2}^+} - \Psi(r_{i-1/2}^+) \leq 2, \quad \frac{\Psi(r_{i+3/2}^-)}{r_{i+3/2}^-} - \Psi(r_{i+1/2}^-) \leq 2 \quad (191-ع)$$

بعنوان شرایط کاهش تغییرات کلی برای حالت‌های موج مثبت و منفی، در نظر گرفته می‌شوند که هر دوی این شرطها معادل با

$$\frac{\Psi(r)}{r} - \Psi(s) \leq 2 \quad (192-ع)$$

نیز هستند. توجه داشته باشید که به جز مواقع صفر شدن شیب نمودار $u-x$ ، در باقی حالت‌ها مقدار r مثبت می‌باشد (شکل ۴-۲۵)؛ از این رو برای حالت محدودیت می‌توان به طریق زیر عمل کرد تا روش کاملاً یکنوا و با کاهش تغییرات کلی درآید:

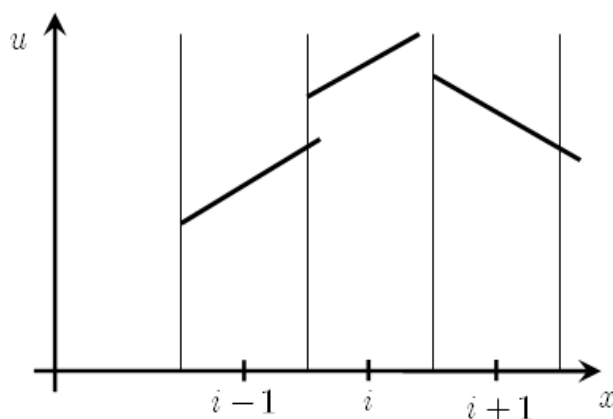
$$\Psi \geq 0 \text{ for } r \geq 0, \quad \Psi = 0 \text{ for } r \leq 0 \quad (193-ع)$$

لذا می‌توان رابطه (۴-۱۹۲) را به فرم $0 \leq \Psi \leq 2r$ اصلاح کرد. جهت ارائه مثال دیگری در این زمینه، محدود کننده به روش بیم - وارمینگ اعمال می‌گردد:

$$u_i^{n+1} = u_i^n - \nu(u_i^n - u_{i-1}^n) - \frac{\nu}{2}(1 - \nu) \nabla \left\{ \Psi(r_{i-1/2}^+) (u_i^n - u_{i-1}^n) \right\} \quad (194-ع)$$

برای شرط شبه CFL و با محدودکننده می‌توان داشت:

$$\begin{cases} 0 \leq \tau C_{i-1/2}^+ = \nu \left\{ 1 + \frac{1}{2}(1-\nu) \left[\Psi(r_{i-1/2}^+) - \frac{\Psi(r_{i-3/2}^+)}{r_{i-3/2}^+} \right] \right\} \leq 1, \\ C_{i+1/2}^- = 0 \end{cases} \quad (195-4)$$



شکل ۴-۲۵: بررسی عددی حالت خاصی از نمودار $u-x$ و شامل تغییر علامت r

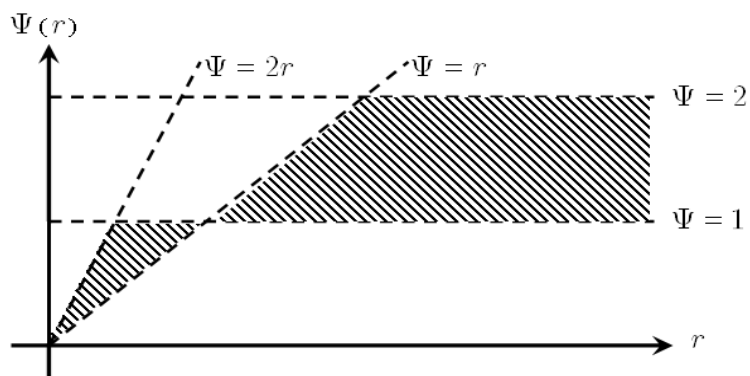
که این شرایط، منجر به محدوده‌های:

$$\frac{\Psi(r)}{r} - \Psi(s) \leq \frac{2}{1-\nu}, \quad \Psi(s) - \frac{\Psi(r)}{r} \leq \frac{2}{\nu} \quad (196-4)$$

شده که این معادلات در محدوده $0 \leq \nu \leq 1$ ارضا می‌شوند. از این رو شرط کلی محدودیت TVD برای روش بیم-وارمینگ به شکل زیر است:

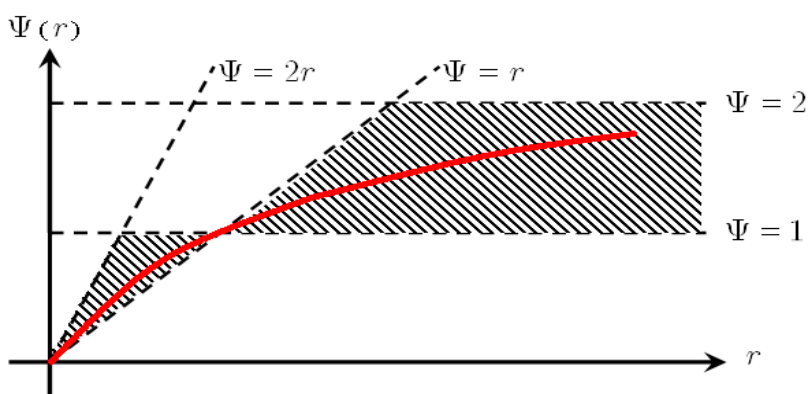
$$0 \leq \Psi(r) \leq \min(2r, 2) \quad (197-4)$$

اما با تست الگوریتم‌های موجود دیگر، می‌توان خانواده‌ای از محدودکننده‌های Ψ را بدست آورد که در آن برای رعایت شرط TVD بودن الگوریتم، بایستی قسمت هاشور خورده شکل ۴-۲۶ بعنوان محدوده اعمال محدودکننده در نظر گرفته شود.

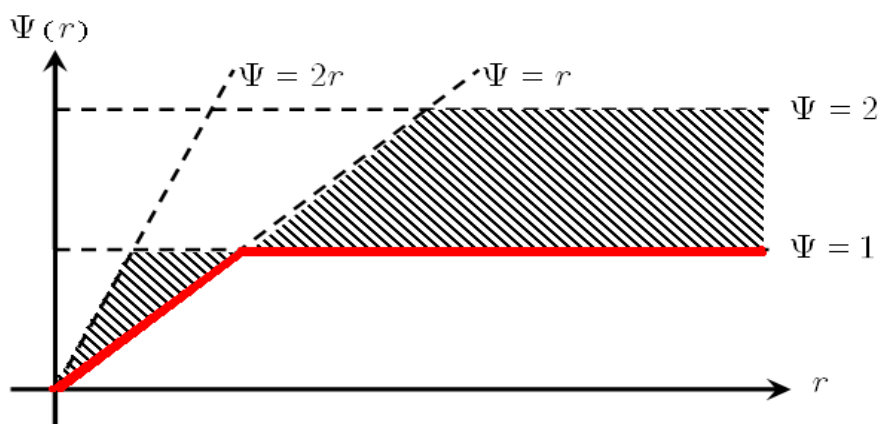


شکل ۴-۲۶: قلمرو محدودکننده برای الگوریتم‌های مختلف

به‌طور کلی، توابع محدودکننده مختلفی برای روش‌های مرتبه دوم پادبادسو، در کتب و مقالات استناد و تعریف شده‌اند که آنها در شکل ۴-۲۷ تا شکل ۴-۳۱ ارائه خواهند شد.



شکل ۴-۲۷: محدودکننده ونلیر



شکل ۴-۲۸: محدودکننده minmod

برای شروع، به روشی که توسط ونلیر^۱ (۱۹۷۴)، بعنوان نخستین آنها و به شکل

$$\Psi(r) = \frac{r + |r|}{1 + r} \quad (۱۹۸-۴)$$

ارائه شد اشاره می‌گردد؛ این روش در شکل ۴-۲۷ نشان داده شده است. محدودکننده مشابه دیگری که در حل عددی، رفتاری نرم‌تر از خود بروز می‌دهد، توسط ون آلبادا^۲ (۱۹۸۲) به فرم زیر ارائه گشت:

$$\Psi(r) = \frac{r^2 + r}{1 + r^2} \quad (۱۹۹-۴)$$

که برای مقادیر بزرگ r این مقدار به عدد یک میل می‌کند. حسن این تغییر، در عدم صفر شدن مخرج و از این رو جلوگیری از بی نتیجه ماندن اجرای برنامه است. از طرفی محدوده پایینی در شرایط TVD در نظر گرفته شده برای ناپیوستگی‌ها، دارای دقت خوبی نبوده و به تابع minmod معروف می‌باشد؛ این تابع در شکل ۴-۲۸ رسم شده و به یکی از دو بیان زیر ارائه می‌شود:

$$\Psi(r) = \min \text{mod}(1, r) \quad \text{or:} \quad (۲۰۰-۴)$$

$$\Psi(r) = \begin{cases} \min(r, 1) & \text{if } r > 0 \\ 0 & \text{if } r < 0 \end{cases}$$

البته جهت یادآوری لازم است تا تعریف minmod را برای دو متغیر دلخواه به صورت زیر بیان کرد:

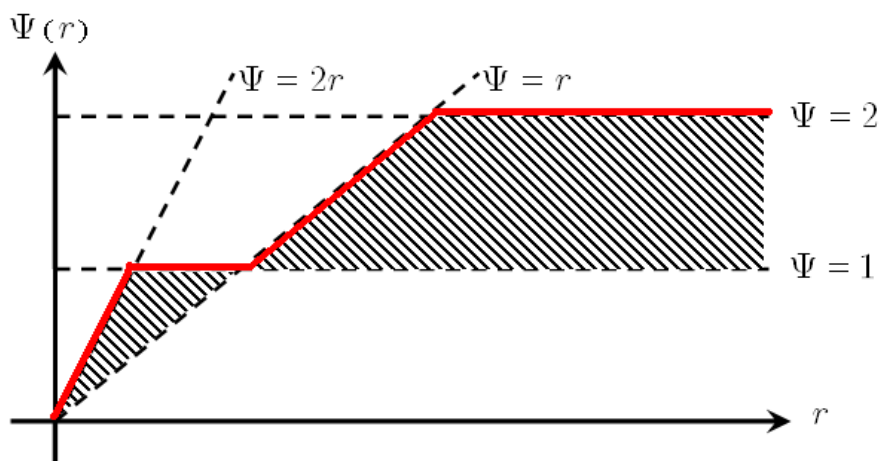
$$\min \text{mod}(x, y) = \text{sgn}(x) \cdot \max[0, \min(|x|, y \cdot \text{sgn}(x))] \quad (۲۰۱-۴)$$

یا بر اساس هم‌علامت و غیر هم‌علامت بودن x و y (علامت xy):

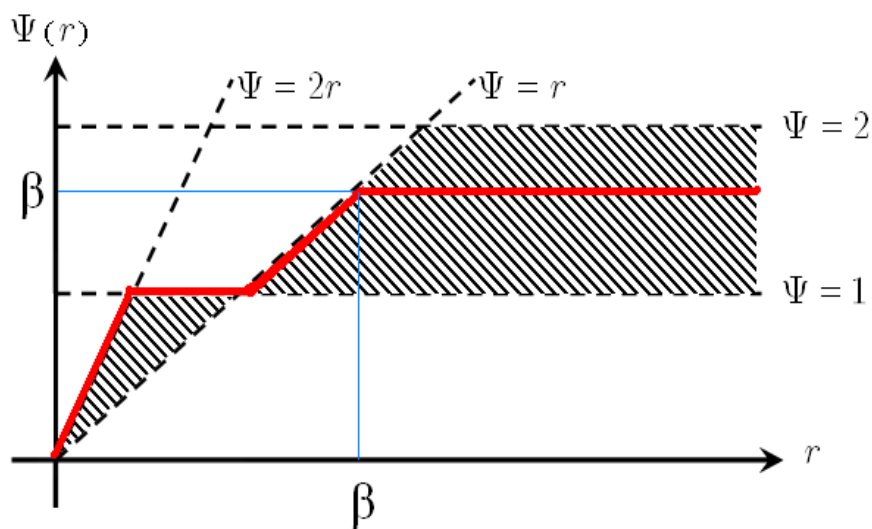
¹ Van Leer

² Van Albada

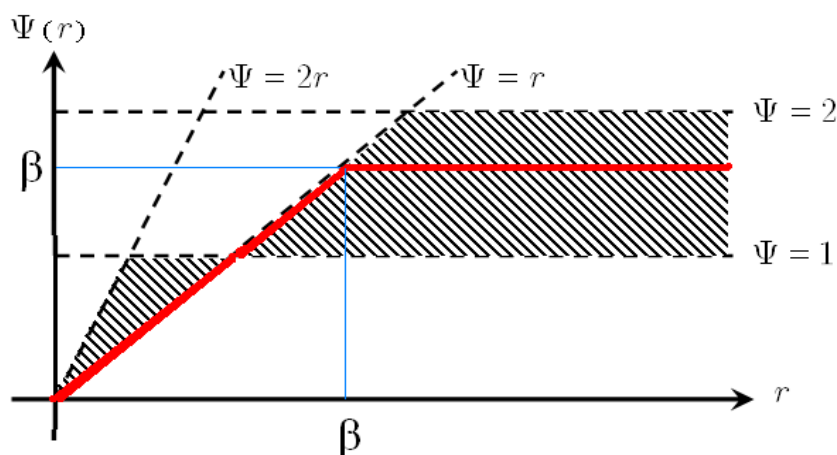
$$\min \text{mod}(x, y) = \begin{cases} x & \text{if } xy > 0 \text{ and } |x| < |y| \\ y & \text{if } xy > 0 \text{ and } |x| > |y| \\ 0 & \text{if } xy < 0 \end{cases} \quad (۲۰۲-۴)$$



شکل ۴-۲۹: محدودکننده سوپربی (رو)



شکل ۴-۳۰: محدودکننده‌های کلی نوع β



شکل ۴-۳۱: محدودکننده چاکراواریتی و اوشر

که برای راحتی کار استفاده از محدودکننده Ψ می‌توان از فرم دوم نوشته شده در روابط (۴-۲۰۰) استفاده کرد. اما از سوی دیگر، محدودیت بالایی روش‌های با شرط TVD مرتبه دوم، توسط رو^۱ (۱۹۸۵) تحت عنوان محدودساز سوپربی^۲ در نظر گرفته شده و به برخی خواص جالب آن اشاره شد. شکل ۴-۲۹ به این محدودیت می‌پردازد. در کل، طبق شکل رسم شده و به بیان ریاضی، محدودکننده سوپربی با رابطه

$$\Psi(r) = \max[0, \min(2r, 1), \min(r, 2)] \quad (۴-۲۰۳)$$

ارائه می‌گردد. همانگونه که قبلاً هم اشاره شد، می‌توان خانواده‌ای از چند محدودکننده را در اختیار داشت. کافی است پارامتری مثل β را به صورت $1 < \beta < 2$ تعریف کرده و محدود کننده کلی زیر را با آن بیان کنیم:

$$\Psi(r) = \max[0, \min(\beta r, 1), \min(r, \beta)] \quad (۴-۲۰۴)$$

حال با مقدار دهی به β ، می‌توان محدودکننده‌های مختلفی را (حتی غیر از آنچه گفته شد) ارائه کرد. این محدودکننده‌ها به سوپربی^۳ (۱۹۸۴) نسبت داده شده و در شکل ۴-۳۰ نشان داده شده‌اند.

¹ Roe
² superbee
³ Sweby

نهایتاً، بیابید محدودکننده‌های چاکراواریتی و اوشر^۱ که در شکل ۴-۳۱ نشان داده شده‌اند، در نظر شوند. توجه کنید که تمام روش‌های فوق بجز روش آخر، دارای تقارن زیر هستند:

$$\frac{\Psi(r)}{r} = \Psi\left(\frac{1}{r}\right) \quad (۲۰۵-۴)$$

که از آن می‌توان نتیجه گرفت که گرادیان‌های رو به عقب و رو به جلو با رفتاری یکسان ظاهر می‌شوند.

همیشه توجه داشته باشید که محدودکننده‌های مختلف، بخاطر وجود نسبت‌های δu غیر خطی هستند (حتی اگر به روش‌های خطی حل عددی اعمال گردند). در اینجا، دیگر به مرحله کاربرد این محدودکننده‌ها رسیده و می‌توان حل نقطه i ام را در گام زمانی $n+1$ ام داشت؛ بدین صورت که به جای جمله $u_i - u_{i-1}$ ، تصحیح غیرخطی $\Psi(u_i - u_{i-1})$ را قرار می‌دهند. بعنوان نمونه، محدودکننده minmod را در نظر بگیرید. با اعمال این محدودکننده عملاً مراحل زیر انجام می‌گیرند:

اگر داشته باشیم:

$$\frac{(u_i - u_{i-1})}{\Delta x} > \frac{(u_{i+1} - u_i)}{\Delta x} \equiv r < 1 \quad (۲۰۶-۴)$$

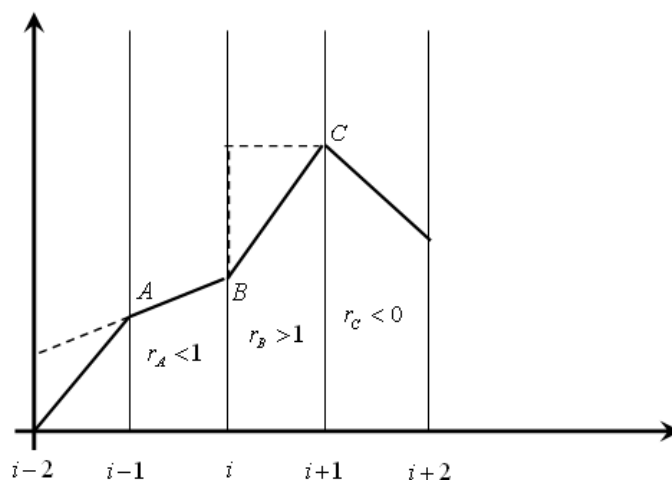
آنگاه $\Psi(r) = r$ در نظر گرفته و سهم $u_i^n - u_{i-1}^n$ در تولید u_i^{n+1} ، با مقدار کوچکتر (یعنی $u_{i+1}^n - u_i^n$) جایگزین می‌شود.

اگر $r > 1$ ، نقش و سهم $u_i^n - u_{i-1}^n$ در ایجاد u_i^{n+1} بدون تغییر مانده و بالاخره، اگر شیب دو بازه متوالی، تغییر علامت دهند ($r < 0$)، نقطه i جدید هیچ سهمی از بالادست دریافت نمی‌کند.

مثلاً در شکل ۴-۳۲ نقطه A متناظر با نسبت $r < 1$ می‌باشد. لذا سهم شرکت $u(A)$ در محاسبه گام زمانی بعدی، به مقدار تغییرات پایین دست (یعنی $[u(B) - u(A)]$) محدود می‌شود (خطوط خط-چین). از سوی دیگر در نقطه B چون $r > 1$ می‌باشد، سهم آن در گام زمانی جدید صفر بوده و لذا این المان، بدون تغییر می‌باشد. نهایتاً برای C ، چون $r < 0$ می‌باشد، لذا سهم این نقطه از بالادست صفر شده و طبق شکل تنظیم می‌گردد. بعنوان مثالی دیگر، محدودکننده سوپربی را می‌توان مد نظر

¹ Chakravarthy and Osher

قرار داد. مطابق با محدودیتی که این روش اعمال می‌کند و طبق روابط نوشته شده، اگر $r < 1/2$ باشد، $\Psi(r) = 2r$ شده و لذا سهم $(u_i^n - u_{i-1}^n)$ برای تشکیل u_i^{n+1} با مقدار کوچکتر، یعنی $2(u_{i+1}^n - u_i^n)$ جایگزین خواهد شد. از طرفی برای حالتی که $r < 0$ باشد، $\Psi(r) = 0$ شده و این در حالی است که اگر نسبت اختلاف‌ها در محدوده $0.5 < r < 1$ واقع شود، $\Psi(r) = 2r$ خواهد شد و از این رو مقدار بزرگتر حفظ گردیده و چیزی جایگزین نخواهد گردید (به دلیل وضعیت $\Psi(r) = 1$). حال برای این محدودکننده، حالتی را در نظر بگیرید که $1 < r < 2$ باشد؛ چون با استفاده از تعریف $\Psi(r) = r$ خواهد شد، لذا باز مقدار بزرگتر بعنوان یک بخش به حل جدید اضافه و منتقل خواهد شد. نهایتاً اگر حالتی را برای این محدودکننده در نظر گرفته شوند که $r > 2$ است. بدلیل اینکه برای این وضعیت $\Psi(r) = 2$ می‌شود، می‌توان گفت که مقدار کوچکتر، یعنی $2(u_i - u_{i-1})$ منتقل خواهد شد. تمام این وضعیت‌ها را برای محدودکننده سوپربی، می‌توان در شکل ۴-۳۳ دید. مجدداً در این شکل خط‌چین‌ها نماینده حالت جدید و تصحیح شده می‌باشند.

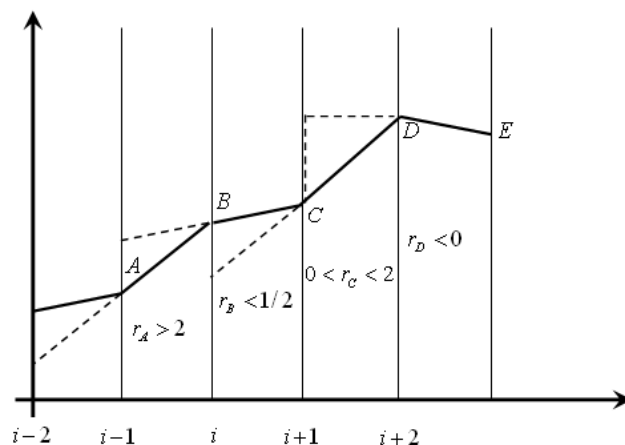


شکل ۴-۳۲: نحوه عملکرد محدود کننده مینم

اما می‌توان بعنوان نمونه و فیدبکی از حل جریان با محدودکننده‌ها، شکل ۴-۳۴ را در نظر گرفت. این شکل، نمایش‌دهنده نتایج حل عددی جابه‌جایی یک موج سینوسی با فرکانس کم، با استفاده از ۱۲۰ گام زمانی، ۱۰۱ نقطه و $CFL=0.5$ است. معادله جابه‌جایی خطی^۱ با روش

¹ Linear Convection Equation

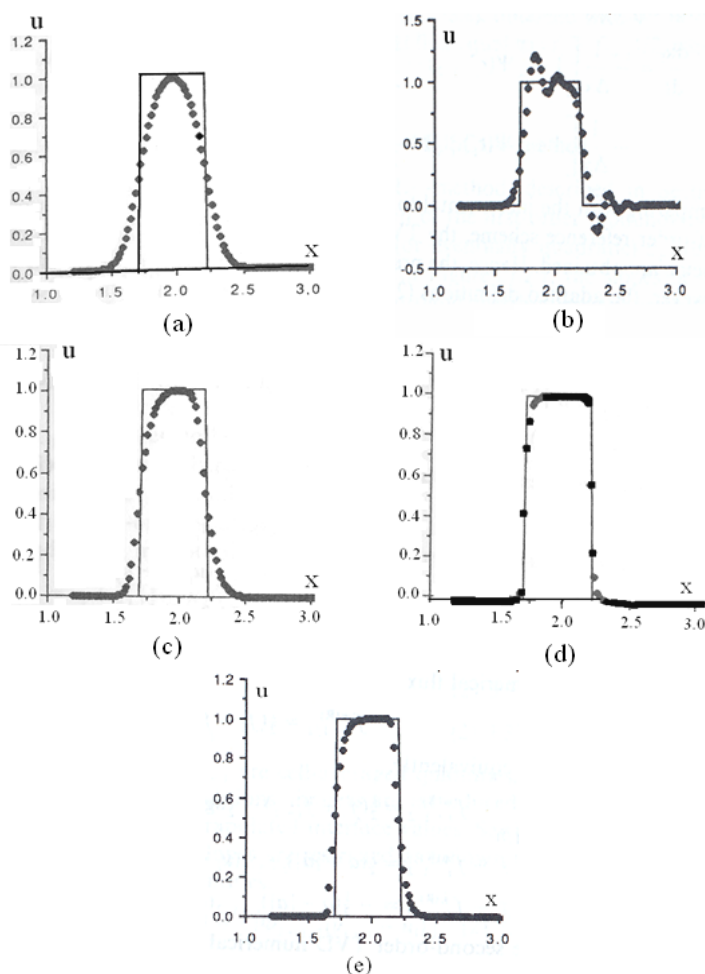
پادبادسوی مراتب اول و دوم حل گردیده و سرآخر روی روش مرتبه دوم، محدودکننده‌های مینم و سوپربی اعمال گردیده است.



شکل ۴-۳۳: نحوه عملکرد محدود کننده سوپربی

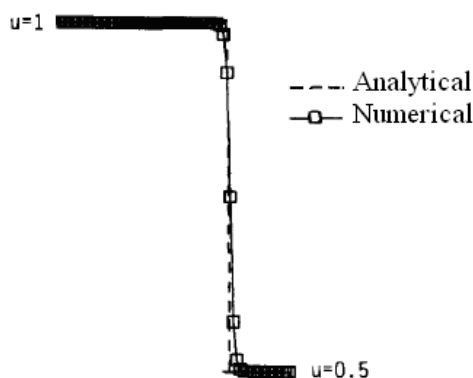
در قسمت *a* این شکل براحتی می‌توان اثرات جملات اتلافی^۱ را در قبال حل دقیق دید که این اتلافات جزء ذات روش‌های مرتبه اول می‌باشد. اما در قسمت *b*، می‌توان به نقش روش‌های پادبادسوی مرتبه دوم در بهبود حل، دست یافت؛ لیکن حضور و پیدایش نوسانات در ناپیوستگی شیب‌ها، نتیجه و نشان استفاده از روش مرتبه دوم است. البته بکارگیری محدودکننده‌ها روی الگوریتم‌های پادبادسوی مرتبه دوم، نوسانات را بطور کامل برداشته و حل یکنوایی را ایجاد خواهد کرد. به‌هرحال، دقت تحلیل عددی حول نقاط ماکزیمم و مینیمم و توسط محدودکننده مینم، کاهش یافته است (قسمت *c*).

¹ Dissipation Terms



شکل ۴-۳۴: بررسی اثرات استفاده از محدودکننده‌ها در حل عددی با ۱۲۰ گام زمانی
 (a) روش پادبادسوی مرتبه اول- (b) روش پادبادسوی مرتبه دوم-
 (c)، (d) و (e) بترتیب روش پادبادسوی مرتبه دوم با محدودکننده مینم، ونلیر و سوپربی

از طرفی در بخش d به آسانی می‌توان نقش استفاده از محدودکننده ونلیر، در کاهش نوسانات حل عددی مرتبه دوم را دیده و بالاخره در قسمت e از این شکل، می‌توان رفتار حل عددی با اعمال محدودکننده سوپربی را دید. در این حالت و همانگونه که از شکل پیداست، اکسترمم‌ها مسطح شده و گرادیان‌های با شیب تند ایجاد شده‌اند. از این رو این تحلیل برای ناپیوستگی‌های تند به خوبی جواب داده ولی برای مباحث حل نرم و هموار، نتیجه درخور توجه و مناسبی نمی‌دهد. بعنوان مثال دیگری در این زمینه می‌توان به شکل ۴-۳۵ اشاره کرد که در آن مقایسه حل دقیق و حل عددی رو مرتبه دوم اعمالی به معادله برگر با محدودکننده مینم مشاهده می‌شود که با نگاهی مجدد به شکل ۴-۲۰ متوجه بهبود نوسانات عددی می‌توان شد.



شکل ۴-۳۵: مقایسه حل دقیق و حل عددی رو مرتبه دوم اعمال شده به معادله برگر و با محدود کننده مینمد

۱۶.۱.۴ روش کاملاً ضمنی فرمولاسیون دلتا در تحلیل رفتار غیردائم

از دیگر روش‌های مرسوم در تحلیل جریان غیردائم گاز طبیعی می‌توان به نوعی روش ضمنی اشاره کرد که در آن از تحلیل موسوم به فرمولاسیون Δ استفاده می‌شود. در این روش اختلاف دیفرانسیل پارامترهای مرتبط با فشار و دبی بین گام‌های زمانی n و $n+1$ در ماتریسی آورده شده و پس از محاسبه، درایه‌های این ماتریس با مقادیر مرتبط از گام زمانی قبل (n ام) جمع بسته می‌شوند. با مرور مجدد معادلات حاکم بر جریان گذرای گاز به صورت:

معادله پیوستگی (بقای جرم):

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} = -\rho u \beta \quad (207-4)$$

معادله بقای مومنتوم:

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u^2 + P)}{\partial x} = -\frac{\rho u |u|}{2D} f - \rho g \sin \alpha - \rho u^2 \beta \quad (208-4)$$

معادله بقای انرژی:

$$\frac{\partial(\rho e_0)}{\partial t} + \frac{\partial[(\rho e_0 + P)u]}{\partial x} = \frac{\rho u^2 |u|}{2D} f + \rho q - (\rho e_0 + P)u \beta \quad (209-4)$$

می‌توان معادلات ساده شده (۲۰۷-۴) تا (۲۰۹-۴) را به فرم ماتریسی زیر نیز بازنویسی کرد:

$$\frac{\partial [U]}{\partial t} + \frac{\partial [F]}{\partial x} = [R] \quad (210-4)$$

که در آن:

$$[U] = \begin{bmatrix} \rho \\ \rho u \\ \rho e_0 \end{bmatrix} \quad (211-4)$$

$$[F] = \begin{bmatrix} \rho u \\ \rho u^2 + P \\ (\rho e_0 + P)u \end{bmatrix} \quad (212-4)$$

$$[R] = \begin{bmatrix} -\rho u \beta \\ -\frac{\rho u |u|}{2D} f - \rho g \sin \alpha - \rho u^2 \beta \\ \frac{\rho u^2 |u|}{2D} f + \rho q - (\rho e_0 + P)u \beta \end{bmatrix} \quad (213-4)$$

از این رو با گسسته‌سازی می‌توان عبارت زیر را استخراج کرد:

$$\frac{U^{n+1} - U^n}{\Delta t} + \frac{\partial}{\partial x} [F]^{n+1} = [R]^{n+1} \quad (214-4)$$

و در آن:

$$\begin{cases} [F]^{n+1} = [F]^n + \frac{\partial [F]}{\partial x} \Delta t, \\ [R]^{n+1} = [R]^n + \frac{\partial [R]}{\partial x} \Delta t \end{cases} \quad (215-4)$$

از طرفی مطابق قاعده‌ی زنجیره‌ای:

$$\begin{cases} [F]^{n+1} = [F]^n + \frac{\partial [F]}{\partial [U]} \frac{\partial [U]}{\partial t} \Delta t, \\ [R]^{n+1} = [R]^n + \frac{\partial [R]}{\partial [U]} \frac{\partial [U]}{\partial t} \Delta t \end{cases} \quad (216-4)$$

بخش اول از جمله دوم سمت راست تساوی اول، همان ژاکوبین ماتریس شار است که شامل جملاتی بر حسب سرعت سیال و سرعت صوت در آن می‌شود. این ماتریس به صورت زیر بیان می‌گردد:

$$A(u) = J(F, U) = \frac{\partial [F]}{\partial [U]} \quad (217-4)$$

به همین ترتیب برای ژاکوبین ماتریس $[R]$:

$$B(u) = J(R, U) = \frac{\partial [R]}{\partial [U]} \quad (218-4)$$

با نام‌گذاری $[\Delta U] = [U]^{n+1} - [U]^n$ ، گسسته‌سازی برای $\partial [U] / \partial t$ به شکل $[\Delta U] / \Delta t$ درمی‌آید که با قراردادن عبارات استخراج شده در سیستم معادلات حاکم به رابطه زیر دست می‌یابیم:

$$\frac{[\Delta U]}{\Delta t} + \frac{\partial}{\partial x} [F]^n + \frac{\partial}{\partial x} A(u) \frac{[\Delta U]}{\Delta t} \Delta t = [R]^n + B(u) \frac{[\Delta U]}{\Delta t} \Delta t \quad (219-4)$$

اما در این کار، فرض بر جریان هم‌دمای غیردائم گاز طبیعی بوده و از این رو حالت ماتریس‌های مسأله به فرم دوبعدی خواهند شد. با این فرض و با فرض عدم شیب لوله و نیز عدم تغییر سطح مقطع در مسیر آن، ماتریس‌های $A(u)$ و $B(u)$ به شکل زیر قابل استخراج هستند:

$$A(u) = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -u^2 + c^2 & 2u \end{bmatrix}, \quad B(u) = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ f \frac{u|u|}{2D} & -f \frac{u}{D} \end{bmatrix} \quad (220-4)$$

اما ماتریس $A(u)$ دارای بردارهای ویژه‌ی کاملی است که از این رو می‌توان آنرا به صورت

$$A(u) = XDX^{-1} \quad (221-4)$$

نوشت. ماتریس X در واقع از ترکیب بردارهای ویژه ماتریس $A(u)$ به صورت ستونی و در کنار هم بدست آمده و ماتریس D نیز دارای این ویژگی است که اعضای روی قطر اصلی اش مقادیر ویژه ماتریس ژاکوبین و دیگر درایه‌های آن صفر می‌باشند. حال اگر دو ماتریس D^+ و D^- را به این صورت تعریف کنیم که بترتیب دارای مؤلفه مثبت و منفی از ماتریس D بوده و از جمع آنها D بدست آید، آنگاه می‌توان ماتریس‌های زیر را تعریف کرد:

$$A^+(u) = XD^+X^{-1}, \quad A^-(u) = XD^-X^{-1} \quad (222-4)$$

$$[F]^+(u) = A^+(u)[U], \quad [F]^-(u) = A^-(u)[U] \quad (223-4)$$

این جداسازی‌ها برای آن انجام می‌گیرند که بتوان برای مشتقات مکانی مطابق اصول پادباسو، اطلاعات را از بالادست برای امواج چپ‌رو گرفته و از پایین دست برای امواج راست‌رو. با این تعاریف می‌توان دستگاه گسسته‌سازی شده معادلات حاکم (رابطه ۴-۲۱۹)) را با فاکتورگیری و ضرب طرفین آن در Δt به شکل زیر بازنویسی نمود:

$$\begin{aligned} [\Delta U] \left\{ I + \frac{\Delta t}{\Delta x} [(A_i^+ - A_{i-1}^+) + (A_{i+1}^- - A_i^-)] - \Delta t B_i \right\} = \\ - \frac{\Delta t}{\Delta x} \{ (F_i^+ - F_{i-1}^+) + (F_{i+1}^- - F_i^-) \} + \Delta t R_i \end{aligned} \quad (224-4)$$

و با مرتب‌سازی بیشتر می‌توان رابطه زیر را استخراج کرد:

$$\begin{aligned} - \frac{\Delta t}{\Delta x} A_{i-1}^+ [\Delta U]_{i-1} + \left\{ I + \frac{\Delta t}{\Delta x} (A_i^+ - A_i^-) - \Delta t B_i \right\} [\Delta U]_i + \\ + \frac{\Delta t}{\Delta x} A_{i+1}^- [\Delta U]_{i+1} = \\ - \frac{\Delta t}{\Delta x} \{ (F_i^+ - F_{i-1}^+) + (F_{i+1}^- - F_i^-) \} + \Delta t R_i \end{aligned} \quad (225-4)$$

این معادله را می‌توان با ارائه شرایط مرزی مناسب به صورت برون‌یابی، با الگوریتم توماس بلوکی حل کرد. نتیجه‌ای که از این حل بدست می‌آید، ماتریسی متشکل از $[\Delta U]_i$ ها در نقاط مختلف شبکه تحلیل بوده و گام بعدی زمانی، برابر با حاصل جمع این عبارت با $[U]^n$ در گام زمانی قبل می‌-

باشد. بدلیل آنکه این روش، تغییرات متغیرهای مسأله را در هر مرحله از محاسبات بدست می‌آورد به آن روش دلتا^۱ اطلاق می‌شود.

۱۷.۱.۴ ارائه خلاصه نتایجی از روش‌های بحث شده

در این بخش به مقایسه دقت روش‌های مختلف عددی بحث شده در بخش قبلی پرداخته می‌شود. این نتایج شامل موارد ذیل می‌گردد:

- نتایج روش‌های عددی مختلف در تحلیل یک تابع پله‌ای سرعت در حال گذر درون لوله گاز
- نتایج روش فرمولاسیون دلتا

۱۸.۱.۴ مقایسه نتایج روش‌های عددی با حل دقیق (دسته اول)

برای این دسته از نتایج، حالتی از جریان را در نظر می‌گیریم که در آن شبیه‌سازی حرکتی بر اساس فرضیات معادله برگر (رابطه ۴-۱۵) امکان‌پذیر باشد. از طرفی این حالت از جریان دارای شرط اولیه

$$u = \begin{cases} 0.0 & \text{for } t \leq 0.0 \\ 1.0 - x & \text{for } 0.0 \leq t \leq 1.0 \\ 1.0 & \text{for } t \geq 1.0 \end{cases} \quad (۲۲۶-۴)$$

در نظر گرفته شده و در نهایت، یافته‌های تحلیل عددی این نمونه با نتایج بدست آمده از حل دقیق برای این مسأله خاص، مقایسه خواهند گردید.

مطابق حل دقیق (بخش ۱.۴)، برای زمان‌های تحلیل کمتر از یک ثانیه کاهش نزولی مقادیر u از یک به صفر بین مکان‌های $x = 0$ تا $x = 1$ اتفاق افتاده و پس از آن این مقادیر در مقدار صفر باقی می‌مانند. اما برای بعد از یک ثانیه پروفیل مقادیر u به حالت یک پله کاهشی ثابت از یک به صفر درآمده و با افزایش زمان، این موج پله‌ای با حفظ شکل به سمت راست محور مکان ($x \geq 1.0$) حرکت می‌کند. جهت مقایسه نتایج روش‌های مختلف عددی با حل دقیق این مسأله، زمان $t = ۳.۴$ ثانیه مورد تحلیل قرار داده شد. اما برای گام زمانی و مکانی روش‌های عددی بترتیب مقادیر

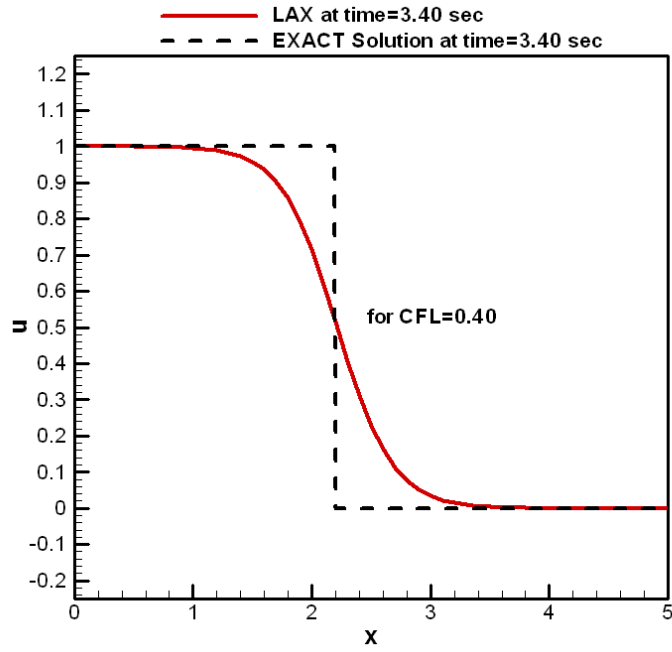
^۱ Delta (Δ)

با $\Delta t = 0.04$ و $\Delta x = 0.1$ در نظر گرفته شده است. با این فرض، عدد کورانت ماکزیمم مسأله با توجه به $a_{\max} = u_{\max} = 1$ برابر با $v = 0.04$ خواهد شد.

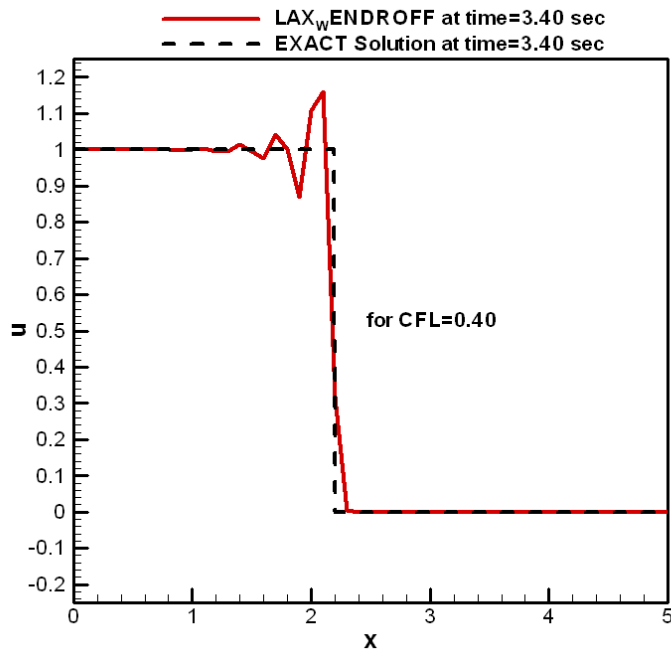
شکل ۴-۳۶ تا شکل ۴-۵۶ به نتایج ذکر شده می‌پردازند. همانطور که مشاهده می‌شود برخی از روش‌های عددی مانند لکس‌وندروف، مک‌کورمک، رازانوف، ذوزنقه‌ای، فروم مرتبه دوم و WKL دارای نوساناتی نزدیک به نقطه ناپیوستگی بوده و در این میان روش لکس-وندروف و فروم مرتبه دوم دارای بیشترین و روش‌های WKL تنظیمی، مک‌کورمک و رازانوف با ω بزرگ دارای کمترین این نوسانات می‌باشند. لازم به یادآوری است که این نوسانات تماماً به خاطر ضعف آن روش عددی در تحلیل می‌باشد که با افزودن جملات با ویسکوزیته مصنوعی (عددی) می‌توان این مشکل را تا حدی بهبود بخشید.

دیگر روش‌های عددی با مقداری اختلاف با حل دقیق و بدون نوسان در همسایگی ناپیوستگی، رفتار جریان را شبیه‌سازی می‌کنند. در این میان شکل ۴-۳۷ را با شکل ۴-۴۷ مقایسه کنید. این دو شکل روش لکس-وندروف را در دو حالت مرتبه اول و دوم نشان می‌دهند. به خوبی یکنوا شدن روش را با افزایش مرتبه می‌توان مشاهده نمود.

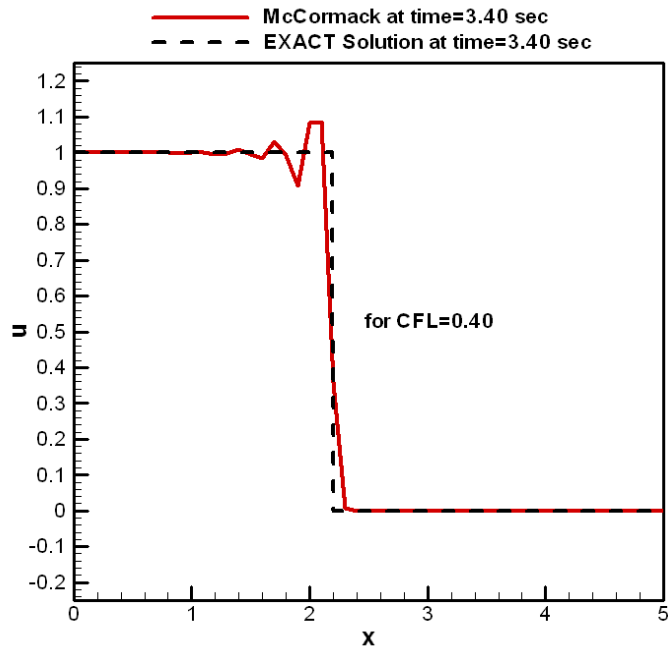
شکل ۴-۴۱ نتیجه تحلیل عددی روش انتقال تصحیحی شار با تقریب رو می‌باشد؛ همانطور که مشاهده می‌شود با افزایش پارامتر $C_{i+1/2}$ نتایج بهبود می‌یابند.



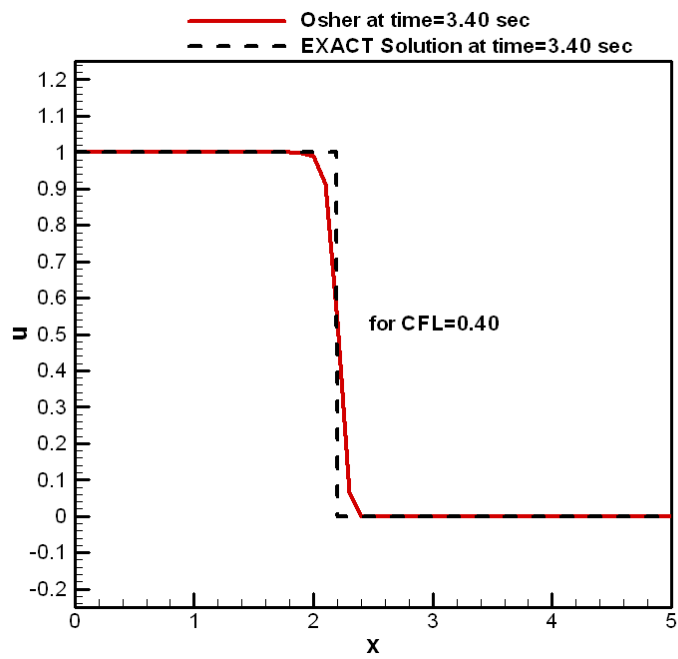
شکل ۴-۳۶: مقایسه نتایج روش لکس با حل دقیق



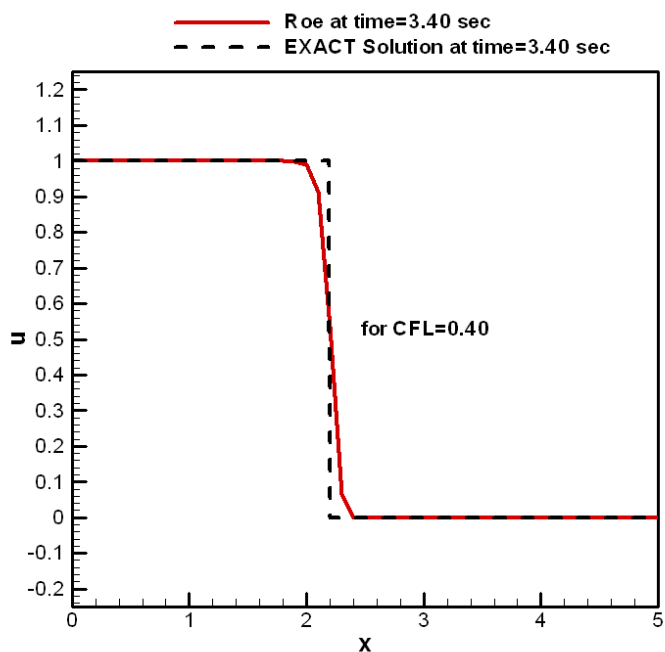
شکل ۴-۳۷: مقایسه نتایج روش لکس-وندروف با حل دقیق



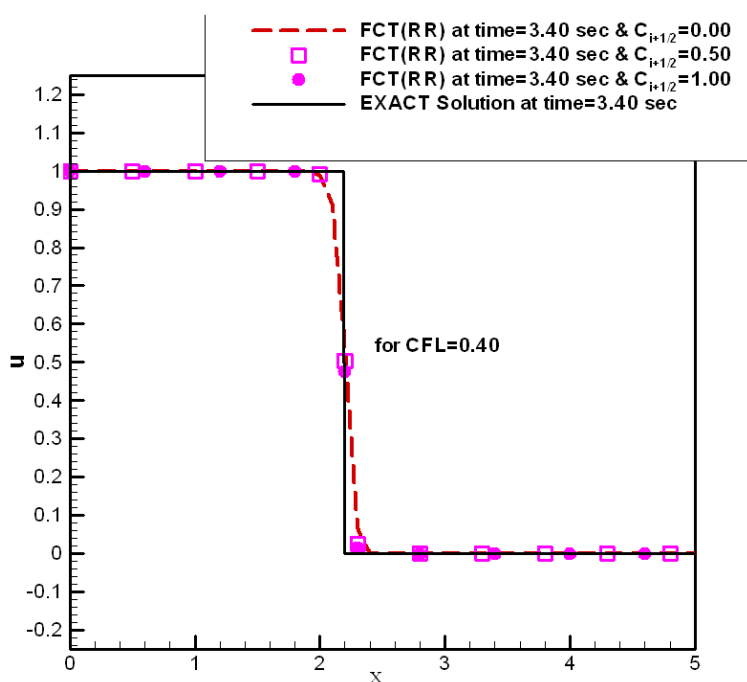
شکل ۴-۳۸: مقایسه نتایج روش مک کورمک با حل دقیق



شکل ۴-۳۹: مقایسه نتایج روش اوشر با حل دقیق



شکل ۴-۴: مقایسه نتایج روش رو با حل دقیق



شکل ۴-۵: مقایسه نتایج روش انتقال تصحیحی شار بر حسب تقریب رو با حل دقیق

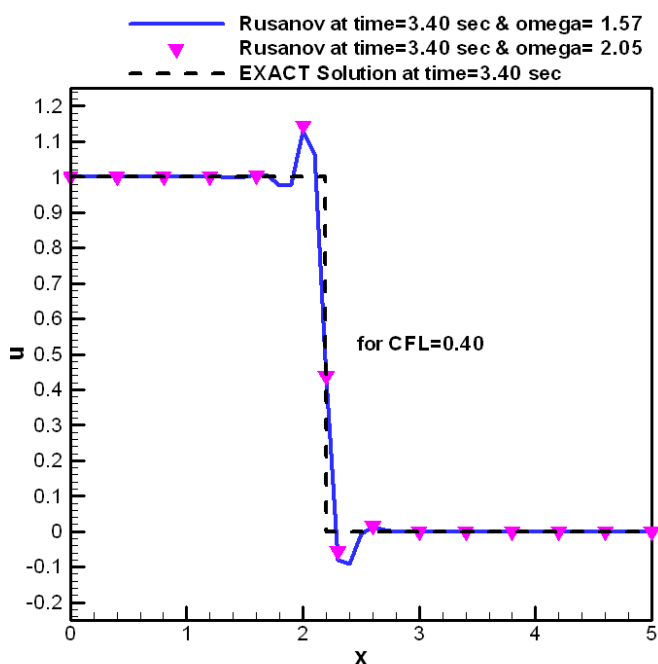
با توجه به نتایج روش رازانوف که در شکل ۴-۲ ارائه گردیده‌اند متوجه این نکته خواهیم شد که در مقادیر کمتر و نزدیکتر به یک برای پارامتر ω نتایج بهتری از لحاظ مدلسازی گرفته می‌شود اما با این حال برای مقادیر بزرگتر این متغیر روش یکنوایی بیشتری می‌یابد.

حال اگر شکل ۴-۴۳ را بررسی شود، مشاهده می‌شود که در روش ضمنی ذوزنقه‌ای اصلاح شده با افزایش پارامتر ω میزان نوسانات کمتر و در عوض همپوشانی روش نیز کمتر می‌گردد. از طرفی با مقایسه شکل ۴-۴۸ با شکل ۴-۴۰ می‌توان به افزایش دقت روش رو با بالاروی مرتبه آن پی برد.

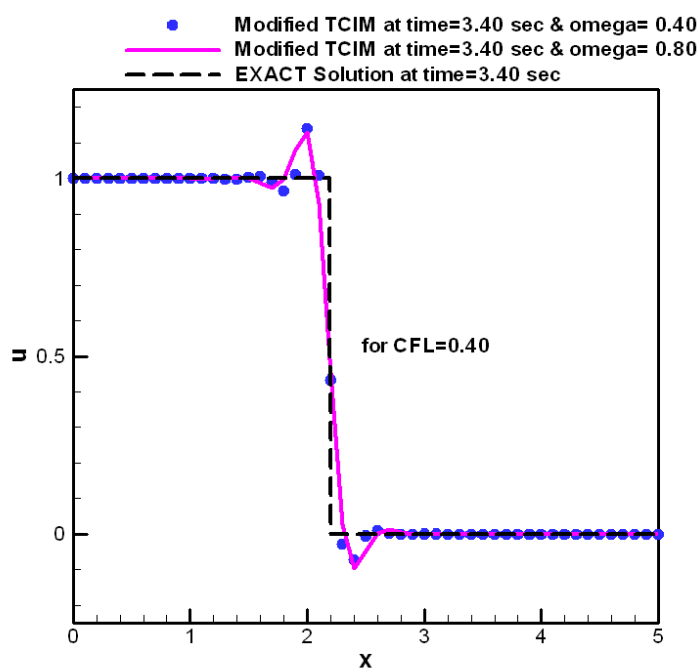
جهت بررسی دقت محدودکننده‌ها در شبیه‌سازی این مسأله، شکل ۴-۵۰ را در نظر بگیرید. این شکل محدودکننده چاکراواری را نشان می‌دهد و با دقت در آن دیده می‌شود که با افزایش مقدار پارامتر (بخش ۴.۱۵) می‌توان به نتایج نزدیکتری به حل دقیق دست یافت.

در میان محدودکننده‌های مختلف می‌توان به دقت بهتر نوع سوپربی پی برد. این امر با مقایسه نتایج شکل ۴-۵۲ با باقی محدودکننده‌ها قابل مشاهده می‌باشد. این محدودکننده حالت تقارن را در ناپوستگی‌ها حفظ کرده و در کل نتایج را در مقایسه با سایر محدودکننده‌ها بهتر و نزدیکتر به حل دقیق ارائه می‌دهد.

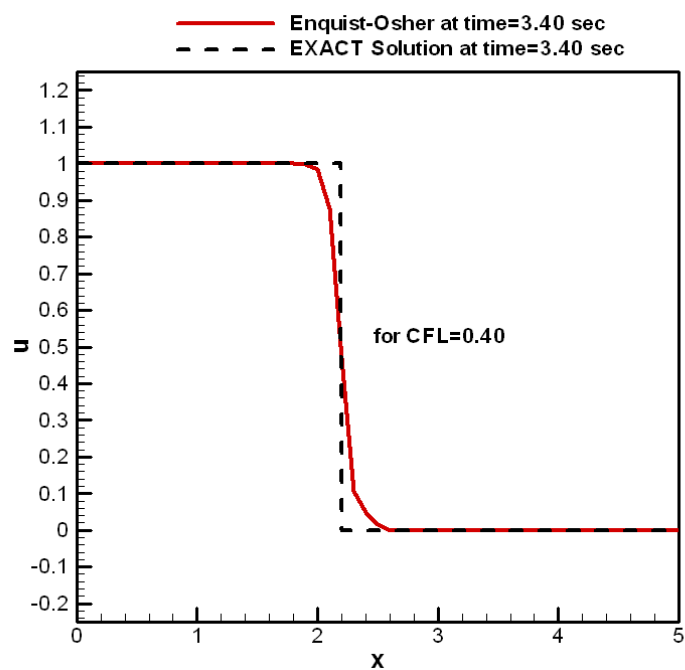
نتایج روش WKL بدون اصلاح و نوع تنظیم شده را می‌توان به ترتیب در شکل ۴-۵۵ و شکل ۴-۵۶ مشاهده کرد. باز می‌توان اینگونه نتیجه گرفت که با افزایش مقدار پارامتر ω از شدت نوسانات کمتر و از دقت همپوشانی روش تا حدودی کاسته می‌شود.



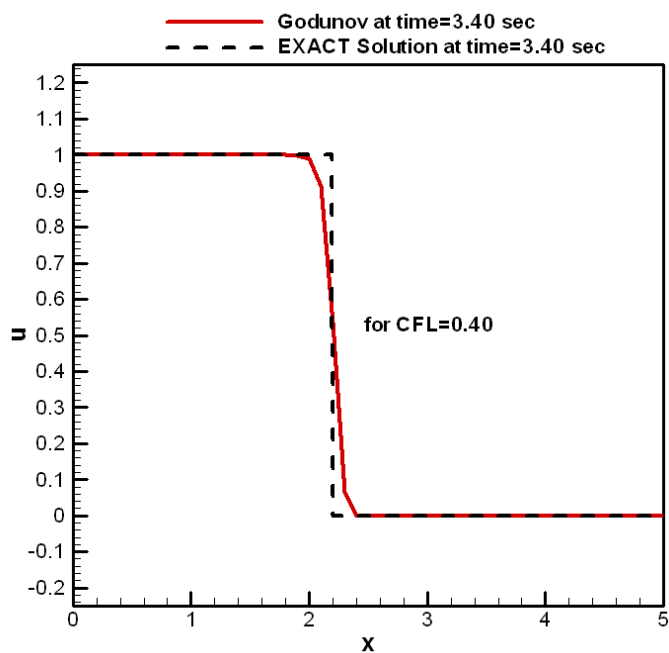
شکل ۴-۵۲: مقایسه نتایج روش رازانوف با حل دقیق



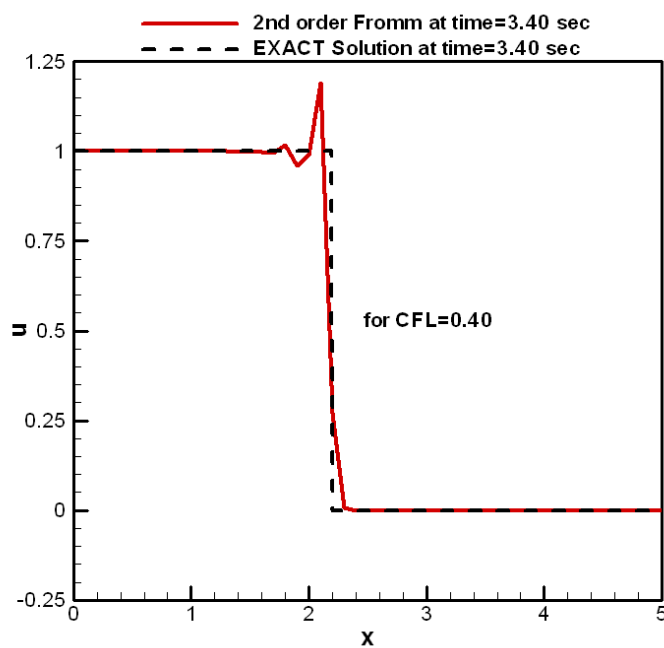
شکل ۴-۳: مقایسه نتایج روش دوزنقه‌ای اصلاح شده با حل دقیق



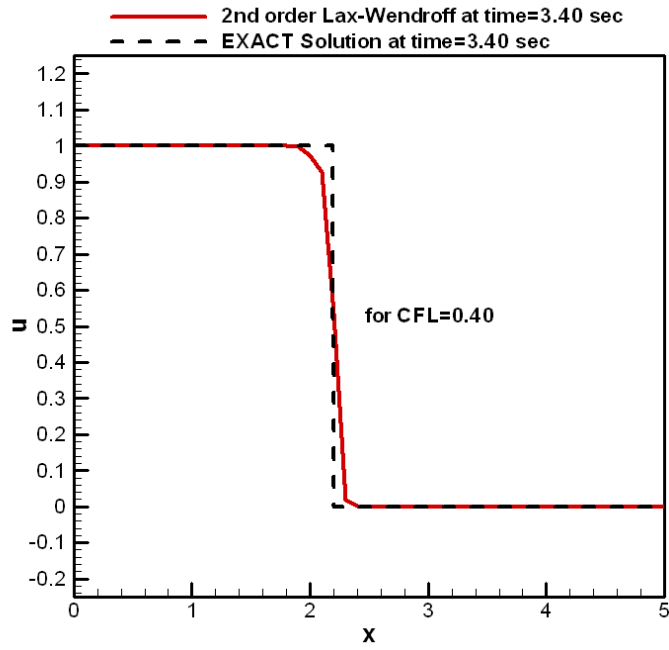
شکل ۴-۴: مقایسه نتایج روش انکوئیسٹ-اوشر با حل دقیق



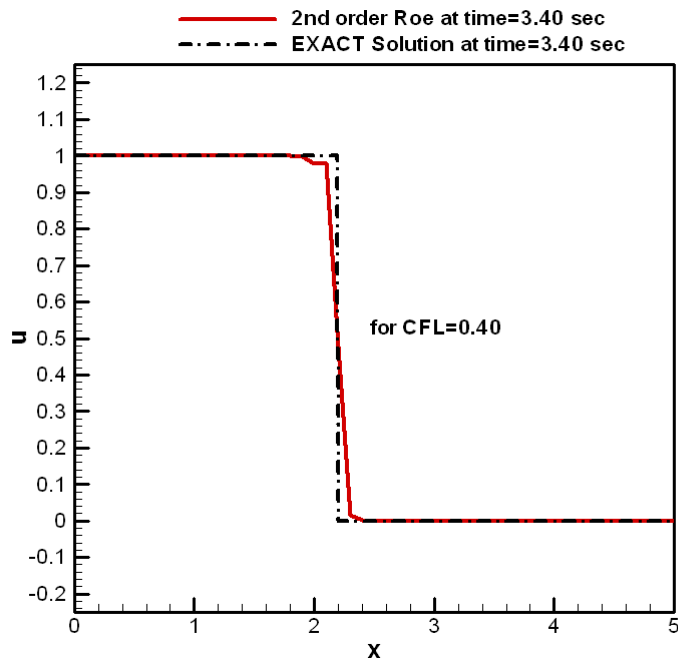
شکل ۴-۵: مقایسه نتایج روش گادانوف با حل دقیق



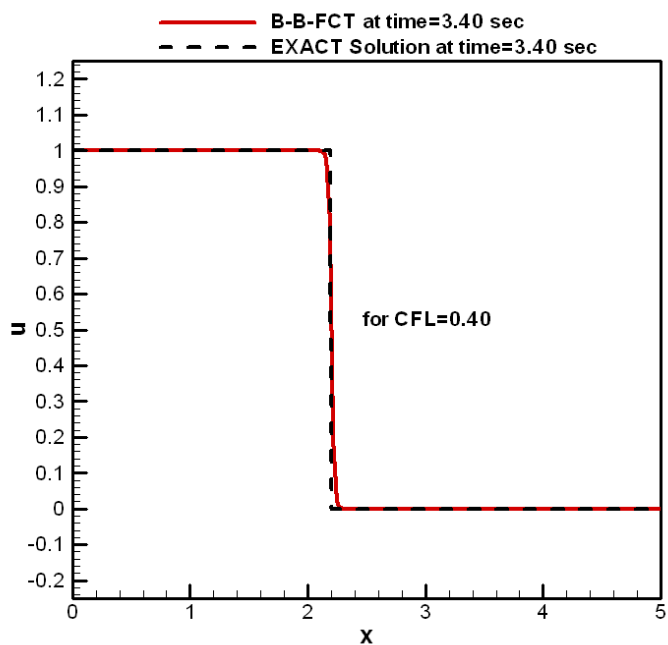
شکل ۴-۶: مقایسه نتایج روش فروم مرتبه دوم با حل دقیق



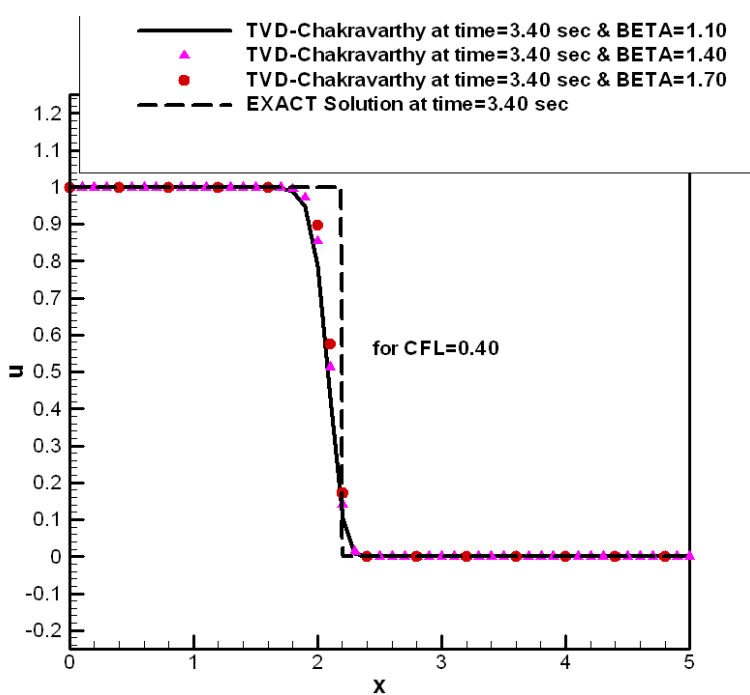
شکل ۴-۷: مقایسه نتایج روش لکس وندروف مرتبه دوم با حل دقیق



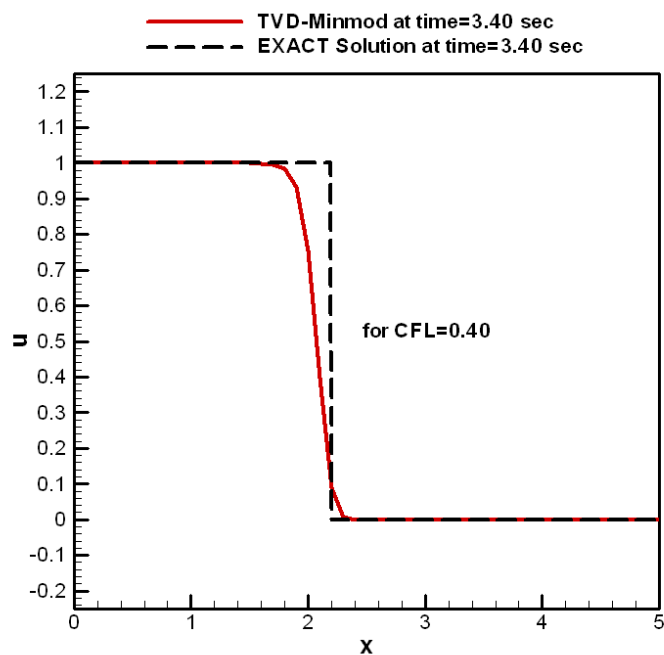
شکل ۴-۸: مقایسه نتایج روش رو مرتبه دوم با حل دقیق



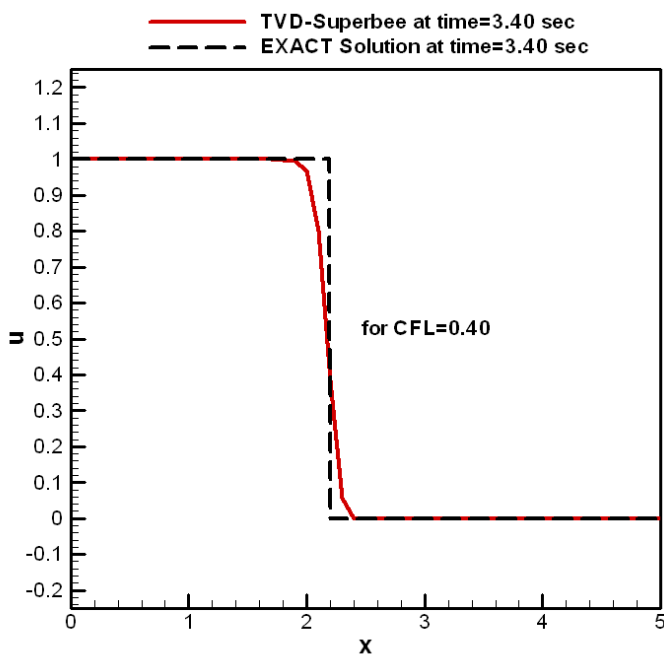
شکل ۴-۴: مقایسه نتایج روش انتقال تصحیحی شار با تقریب بوریس-بوک با حل دقیق



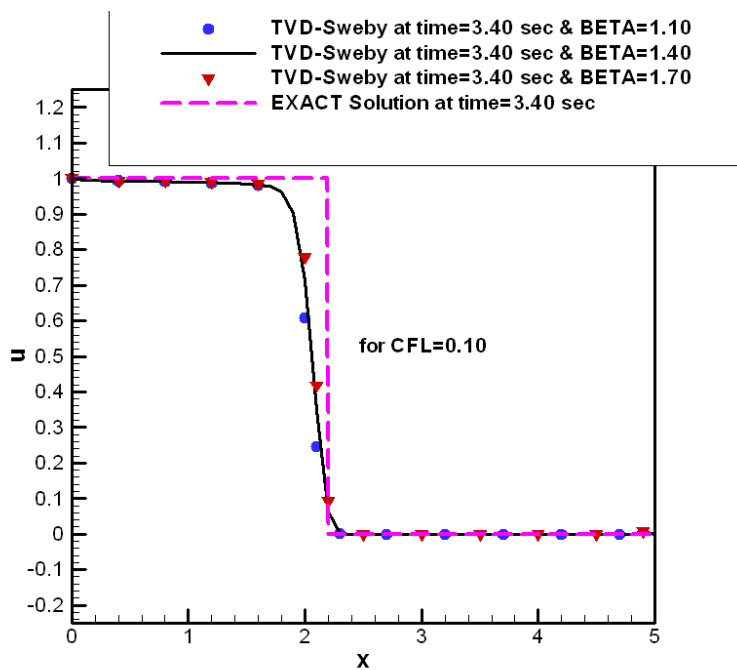
شکل ۴-۵: مقایسه نتایج روش‌های TVD با محدودکننده چاکراوارتی و حل دقیق



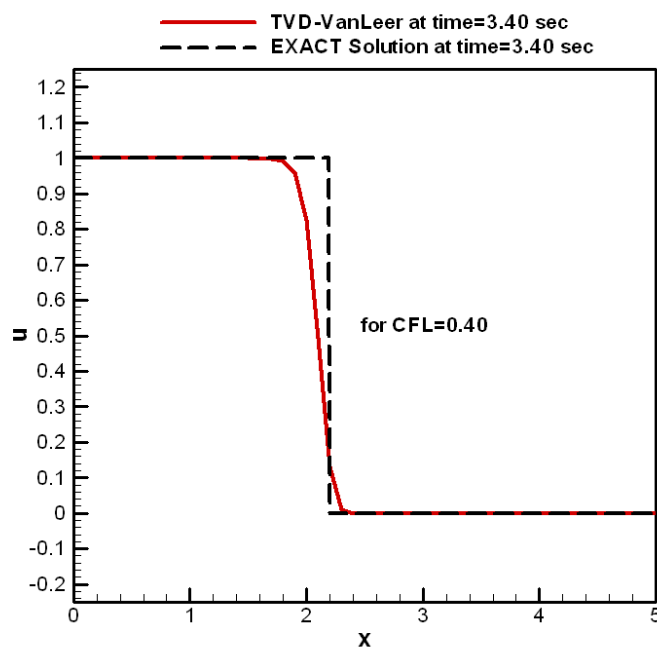
شکل ۴-۵۱: مقایسه نتایج روش‌های TVD با محدودکننده مینمد و حل دقیق



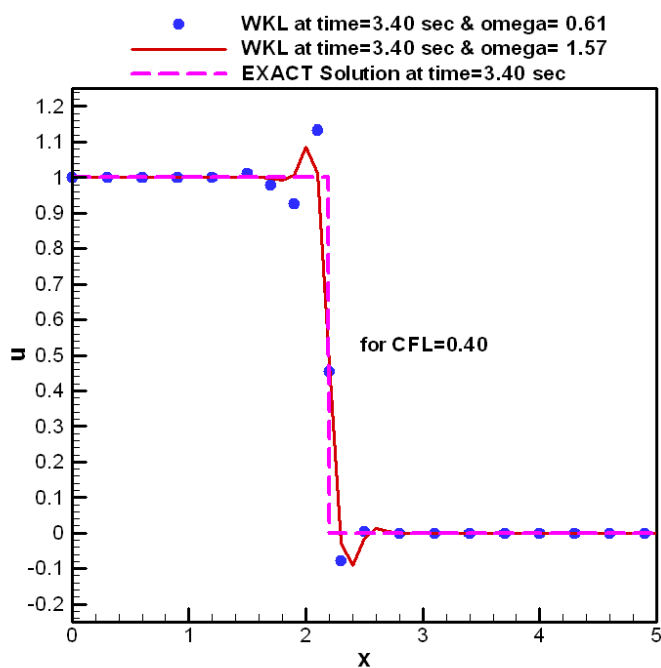
شکل ۴-۵۲: مقایسه نتایج روش‌های TVD با محدودکننده سوپربی و حل دقیق



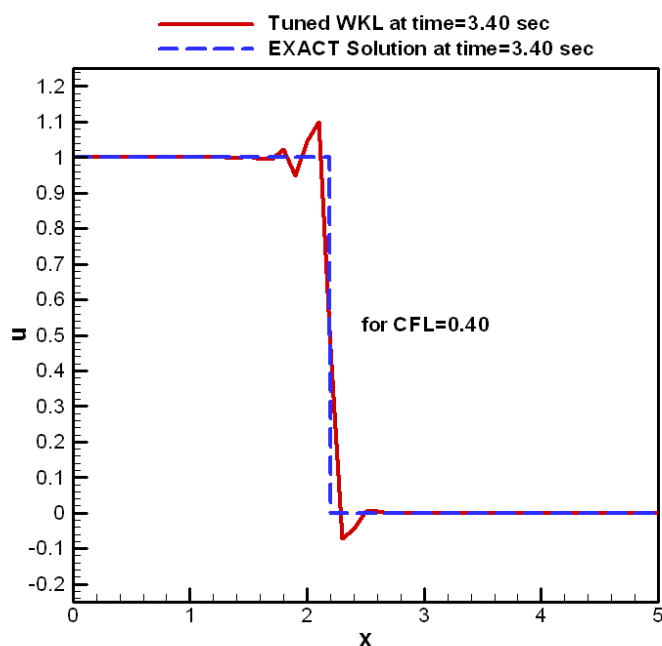
شکل ۴-۵۳: مقایسه نتایج روش‌های TVD با محدودکننده سوئی بی و حل دقیق



شکل ۴-۵۴: مقایسه نتایج روش‌های TVD با محدودکننده ونلیر و حل دقیق



شکل ۴-۵۵: مقایسه نتایج روش WKL با حل دقیق



شکل ۴-۵۶: مقایسه نتایج روش WKL تنظیم شده با حل دقیق

اما با نگاهی اجمالی به نتایج روش‌های عددی ارائه شده متوجه خواهیم شد که در میان این روش‌ها، الگوریتم رو در دقت ریز، روش انتقال تصحیحی شار با تقریب بوریس- بوک و روش

گادانوف در دقت درشت برای مدلسازی تغییر ناگهانی مطرح شده از سایر روش‌ها بهتر نتیجه داده‌اند که در بین آنها روش FCT دارای بهترین دقت مشاهده می‌گردد. این امر به خاطر آن است که این روش در واقع از ترکیب دو روش با مرتبه خطای قطع مختلف بدست آمده است.

علاوه بر همپوشانی بسیار عالی با حل دقیق، مشکل نوسانات عددی حول ناپیوستگی نیز در روش انتقال تصحیحی شار از نوع بوریس بوک وجود ندارد. از طرفی این روش دارای خاصیت توافق با هر اندازه ریزی شبکه گسسته‌سازی بوده و بعلاوه برخلاف برخی از روش‌ها برای داشتن پاسخی مناسب و یکنوا محدود به طیف خاصی از عدد کورانت نمی‌باشد. از سویی، این روش مشکل نیاز به بررسی المان به المان شبکه مکانی را که برخی الگوریتم‌ها مثل گادانوف با آن مواجه هستند، ندارد.

در جدول ۴-۴-۱ به مقایسه متوسط^۱ RMS درصد خطای روش‌های مختلف عددی (که در این بخش بحث شده‌اند) نسبت به حل دقیق و برای دو حالت شبکه گسسته‌سازی ریز (گام زمانی و مکانی به ترتیب $\Delta t = 0.04$ و $\Delta x = 0.1$) و درشت ($\Delta t = 0.4$ و $\Delta x = 0.1$) پرداخته شده است. توجه داشته باشید که عدد کورانت در دو حالت یکسان بوده و ملاک قیاس دو ستون این جدول صرفاً دقت گسسته‌سازی است. از نتایج این جدول نیز می‌توان روش FCT با تقریب بوریس-بوک را از میان تمامی روش‌ها، جهت شبیه‌سازی تغییرات ناگهانی انتخاب کرد. اما این روش درعین داشتن دقت به دلیل ماهیت صریح خود، حین اجرا مشکل صرف زمان نسبتاً زیاد را در قیاس با روش‌های ضمنی مثل روش دلتا دارد. از این رو برای حالت‌هایی از جریان که در آنها تغییرات ناگهانی برای متغیر وابسته‌ی مسأله وجود ندارد، می‌توان از روش‌های ضمنی که هم دارای سرعت بالا و هم دارای دقت نسبتاً خوبی هستند استفاده نمود.

^۱ Root Mean Square = $\sqrt{x_1^2 + x_2^2 + \dots + x_N^2} / N$

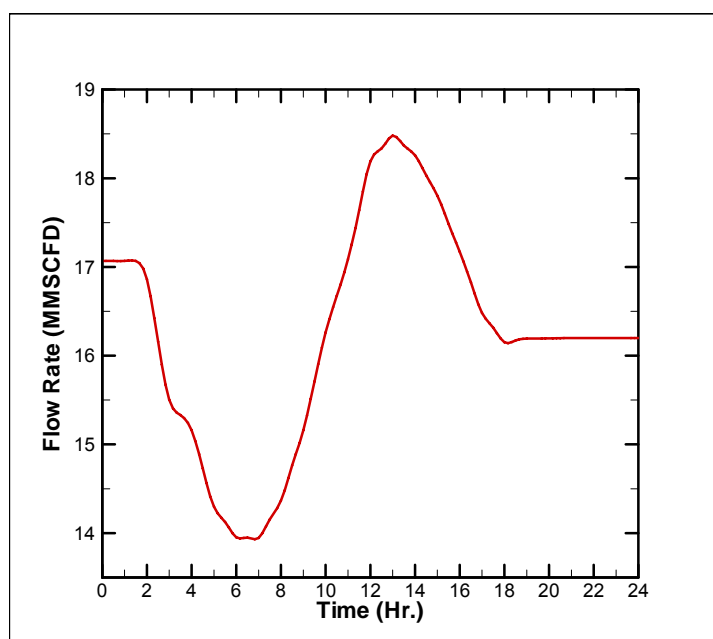
جدول ۴-۴-۱: بررسی ماکزیمم خطای روش‌های عددی

نام روش عددی	متوسط RMS درصد خطا در دقت زمانی ۰.۰۰۴ و مکانی ۰.۰۱	متوسط RMS درصد خطا در دقت زمانی ۰.۰۴ و مکانی ۰.۱
لکس	۸/۸	۱۶/۰۰
لکس و ندروف	۲/۱۹	۶/۶۴
مک کورمک	۲/۱۸	۶/۶۰
رازانوف	۲/۲۰	۶/۶۶
WKL	۲/۱۸	۶/۶۳
WKL تنظیمی	۲/۱۶	۶/۶۳
دوزنقه‌ای	۲/۱۷	۶/۶۴
گادانوف	۳/۲۴	۶/۲۸
رو	۲/۱۰	۶/۵۳
اوشر	۲/۱۶	۶/۵۳
انکوئیست - اوشر	۲/۱۶	۶/۴۹
رو مرتبه دوم	۲/۱۴	۶/۵۵
لکس و ندروف مرتبه دوم	۲/۱۸	۶/۵۳
فروم مرتبه دوم	واگرا	۶/۶۳
FCT با تقریب رو	واگرا	۶/۵۵
FCT با تقریب بوریس - بوک	۰/۵۵	۱/۵
TVD-chakravarthy	واگرا	۶/۲۷
TVD-vanleer	واگرا	۶/۱۵
TVD-minmod	واگرا	۶/۰۶
TVD-superbee	۲/۲	۶/۴۲
TVD-sweby	واگرا	۶/۹۸

۱۹.۱.۴ مقایسه نتایج روش ضمنی دلتا با الگوریتم TVD (دسته دوم)

در این قسمت به مقایسه نتایج بدست آمده از روش کاملاً ضمنی بحث شده در بخش ۱۶.۱.۴ و نتایج الگوریتم TVD روی هشت حالت خاص جریان، پرداخته خواهد شد. این هشت حالت که مربوط به جریان گذرا می‌باشند قبلاً با استفاده از روش TVD و توسط ژو و آدومی [۷] مورد تحلیل واقع شده-اند که در این کار نتایج آنها مورد استفاده قرار خواهد گرفت. هشت حالت مطرح شده به طور خلاصه به شرح ذیل می‌باشند حالت دوم یک حالت تقریباً واقعی از جریان درون یک لوله برای مدت

۲۴ ساعت می‌باشد. در این حالت لوله‌ای با قطر داخلی ۸/۵ اینچ، طول ۴۴/۹ مایل و زبری ۰/۰۲۴۳ اینچ در حالت اولیه دارای جریان یکنواخت ۱۷/۰۷ MMSCFD و توزیع فشار، متناسب با این توزیع دبی می‌باشد. طی ۲۴ ساعت مدل‌سازی دبی خروجی مطابق شکل ۴-۵۷ تغییر کرده و در این مدت زمان، فشار ورودی ۶۱۰ psi ثابت نگه داشته می‌شود. سرعت صوت درون گاز برای این حالت ۱۲۰۷/۳ ft/sec بوده و چگالی نسبی گاز طبیعی در دمای ثابت شبیه‌سازی (۵۰°F) برابر ۰/۶۷۵ می‌باشد. برای محاسبه ضریب اصطکاک این حالت از پارامترهای مسأله در جریان حالت دائم می‌توان کمک گرفته و مقدار آن را ثابت فرض نمود.



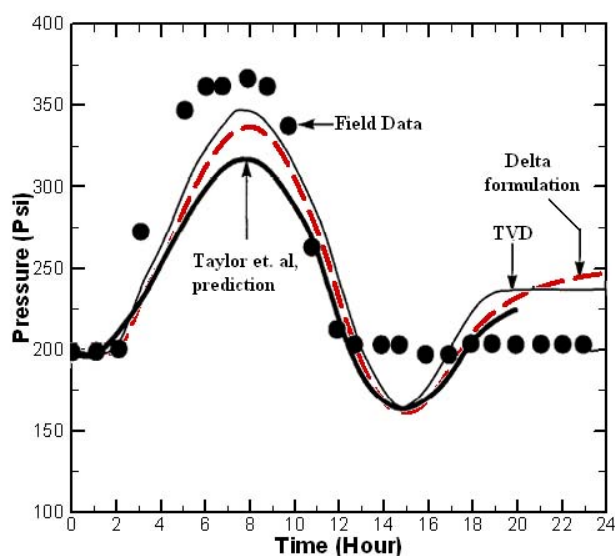
شکل ۴-۵۷: تغییرات دبی خروجی بر حسب زمان اعمال شده به حالت دوم

در شکل ۴-۵۸ به مقایسه نتایج روش ضمنی با مقادیر بدست آمده از روش‌های TVD و آزمایشگاهی برای توزیع فشار در خروجی لوله پرداخته شده است. همچنین در این شکل نتایجی که از کار تیلور و همکارانش [۸] به دست آمده، آورده شده است. آنها در کار مشابهی با صرف‌نظر کردن از جمله اینرسی در معادله مومنتوم و ایجاد دستگاه معادلات حاکم با مشتقات جزئی خطی به حل آن با روش خطوط مشخصه^۱ پرداختند. همانطور که مشاهده می‌شود توافق خوبی در بین این روش‌ها برای نتایج روش ضمنی با نتایج حاصل از آزمایش وجود دارد. این یافته‌ها نشان می‌دهند که با وجود ماهیت سیکلی دبی اعمال شده در خروجی، فشار در حدود دو ساعت اول مدل‌سازی ثابت می‌ماند. دلیل

^۱ MOC (Method of Characteristics)

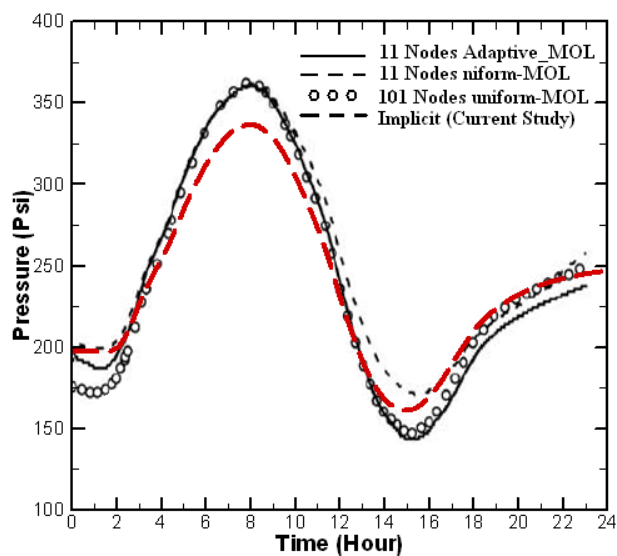
منطقی این پدیده را می‌توان با توجه به اینرسی و میرایی توجیه نمود. با توجه به ماهیت غیرخطی مدل و روش حاضر که در آن از هیچ جمله یا پارامتر معادلات حاکم صرفنظر نشده است مشاهده می‌شود که به خصوص در ۶ ساعت اول شبیه‌سازی و ساعات ۱۰ تا ۱۷ آن تطابق بسیار خوبی بین روش TVD و روش ضمنی حاضر وجود دارد.

از طرفی در شکل ۴-۵۹ به مقایسه نتایج بدست آمده از روش ضمنی با یافته‌های حاصل از روش خطوط^۱ که در کار تنتیس و مارگاریس [۱۰] آورده شده است، پرداخته می‌شود. با ملاحظه این شکل به راحتی می‌توان متوجه نزدیکی بیشتر مقادیر بین روش ضمنی با روش خطوط نسبت به روش TVD شد.

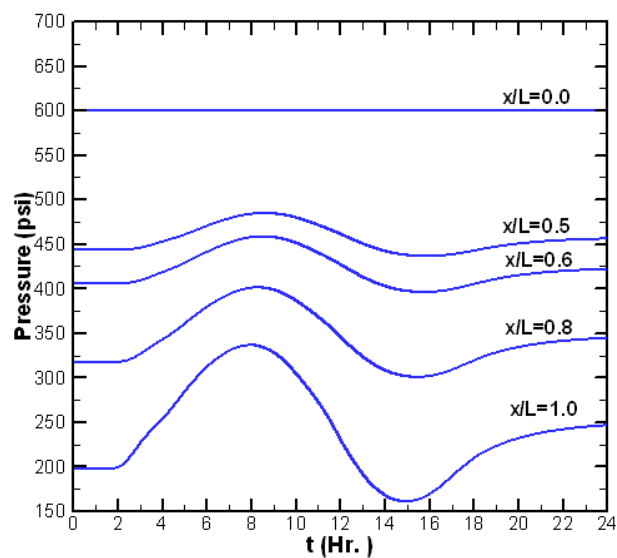


شکل ۴-۵۸: مقایسه نتایج محاسبه شده و تجربی برای فشار خروجی لوله در حالت دوم

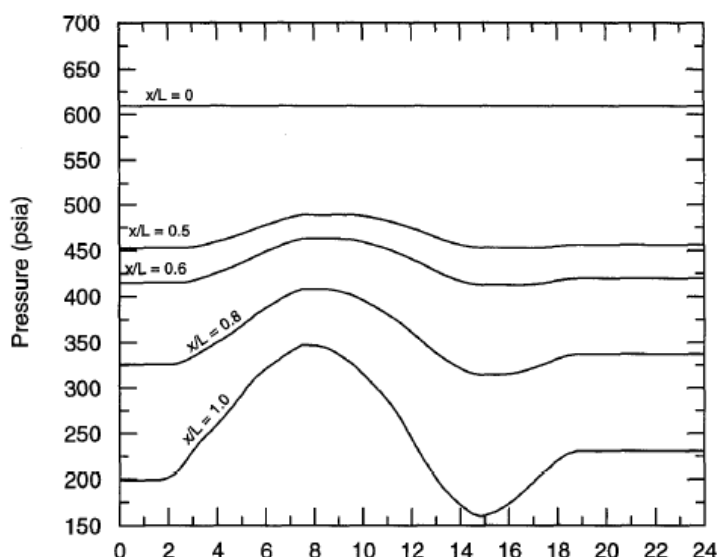
¹ Method of Lines (MOL)



شکل ۴-۵۹: مقایسه نتایج محاسبه شده با نتایج روش خطوط برای فشار خروجی لوله در حالت دوم



شکل ۴-۶۰: نتایج روش ضمنی برای فشار در چند نقطه از لوله (حالت دوم)

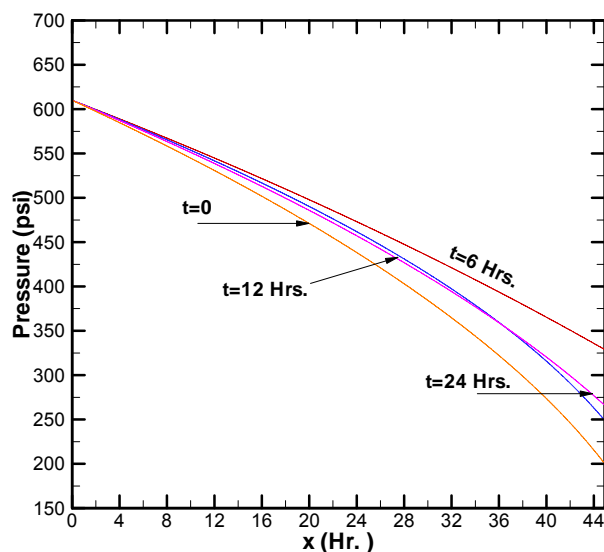


شکل ۴-۶۱: نتایج الگوریتم TVD برای فشار در چند نقطه از لوله (حالت دوم)

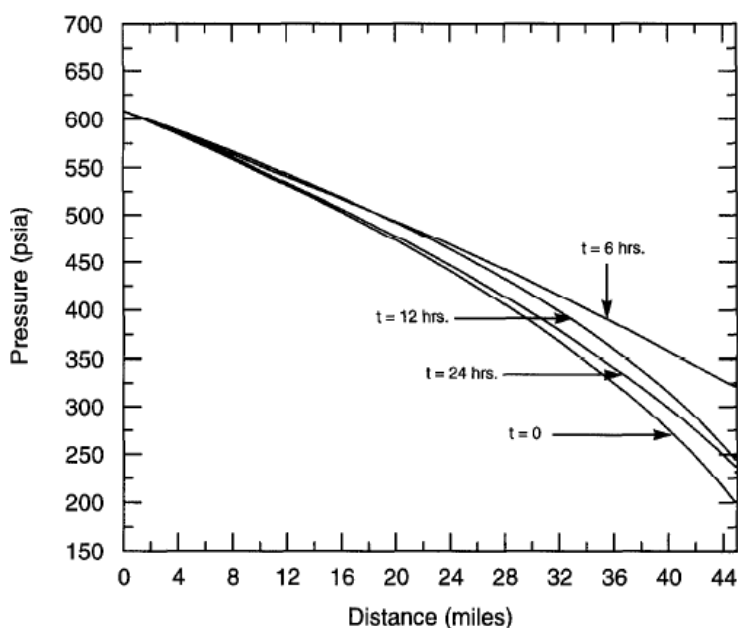
همچنین نتایج تغییرات فشار نقاط مختلف لوله بر حسب زمان برای دو حالت روش ضمنی دلتا (کار حاضر) و روش TVD (مرجع [۷]) به ترتیب در شکل ۴-۶۰ و شکل ۴-۶۱ آورده شده است که مجدداً متوجه توافق مناسب بین آنها خواهیم شد (x/L نسبت موقعیت مورد نظر به کل طول لوله است، به عنوان نمونه $x/L=0/5$ بیانگر وسط لوله و $x/L=0$ بیانگر ابتدای آن می‌باشد). همچنین مشاهده می‌شود که روند تغییرات مقادیر فشار از ورودی به خروجی دارای سیری نزولی است که علت آن افت فشار ناشی از عبور جریان و دبی حاصل از آن می‌باشد.

در شکل ۴-۶۲ توزیع فشار درون لوله برای چهار لحظه ابتدا، ششمین، دوازدهمین و بیست و چهارمین ساعت شبیه‌سازی به نمایش گذاشته شده است. این نتایج از روش ضمنی بدست آمده‌اند و نتایج مشابه آنها و حاصل از روش TVD در شکل ۴-۶۳ نشان داده شده است. می‌توان ملاحظه کرد که نتایج برای زمان‌های مختلف در دو روش بسیار نزدیک به هم بوده و افت فشار به دست آمده از دو روش در ساعات مختلف و برای نقاط مختلف لوله تقریباً یکسان می‌باشد. از طرفی منحنی مربوط به لحظه صفر همان نموداری است که برای توزیع فشار حالت دائم (شرط اولیه) استفاده شده است. با توجه به این شکل‌ها به راحتی می‌توان افت فشار یکنواخت را درون لوله از ورودی به خروجی برای هر چهار زمان مشاهده کرد. همچنین در این شکل‌ها می‌توان دید که افت فشار بر حسب زمان در ۱۰ مایل ابتدای لوله خیلی زیاد نیست که علت این امر در تغییر سیکلی دبی در خروجی و اثر کم

آن در ورودی که مرزی با فشار ثابت است می‌باشد. این مسأله را به طور واضح‌تر در شکل ۴-۶۰ یا شکل ۴-۶۱ می‌توان دید. همانطور که در این دو شکل می‌بینیم برای هر زمان اثرات تغییر فشار از خروجی (منحنی زیرین) به ورودی (بالا ترین منحنی) کمتر و کمتر می‌گردد و یا به عبارتی دامنه تغییرات در آنها رو به کاهش می‌گذارد.



شکل ۴-۶۲: نتایج الگوریتم ضمنی برای توزیع فشار در کل لوله برای چند زمان خاص (حالت دوم)



شکل ۴-۶۳: نتایج الگوریتم TVD برای توزیع فشار در کل لوله برای چند زمان خاص (حالت دوم)

۲.۴ روش توابع تبدیل در حل جریان غیردائم گاز

در این جا قصد بر این است که به بیان توصیف فرکانسی جریان غیردائم گاز در حالت کلی و بدون صرف نظر از هیچ جمله از معادله مومنتوم پرداخته شود. معادلات بقای حاکم بر جریان گذرای گاز و برای حالت کلی لوله به صورت نشان داده شده در معادلات (۲۲۷-۴) تا (۲۲۹-۴) هستند.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} = -\rho u \beta \quad (227-4)$$

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u^2 + P)}{\partial x} = -\frac{\rho u |u|}{2D} f - \rho g \sin \alpha - \rho u^2 \beta \quad (228-4)$$

$$\frac{\partial(\rho e_0)}{\partial t} + \frac{\partial[(\rho e_0 + P)u]}{\partial x} = \frac{\rho u^2 |u|}{2D} f + \rho q - (\rho e_0 + P)u \beta \quad (229-4)$$

که در آن β ، f و دیگر پارامترها در جدول الف-۱ (پیوست) بیان می‌گردند. با تقریب خوبی، می‌توان از رابطه $\sin(\alpha) \approx \Delta h / L$ استفاده کرد. از طرفی ضریب تراکم‌پذیری، به شکل $Z = 1 + \hat{k}P$ قابل تعریف است که \hat{k} با فرض جریان هم‌دم جدول‌بندی می‌گردد. حال با استفاده از ساده‌سازی گفته شده، با معادله حالت و با بیان دبی جرمی، می‌توان تا حد امکان معادله‌های پیوستگی و بقای مومنتوم را برحسب جملاتی از دبی و فشار مرتب کرد.

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{P}{(1 + \hat{k}P)RT} \right) + \frac{1}{A} \frac{\partial \dot{m}}{\partial x} = -\frac{\dot{m}}{A} \beta \quad (230-4)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial P}{\partial x} = & -\frac{1}{A} \frac{\partial \dot{m}}{\partial t} - RT \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1 + \hat{k}P}{A^2 P} \dot{m}^2 \right) - \\ & - \frac{f}{2DA^2} \frac{\dot{m} |\dot{m}|}{P} (1 + \hat{k}P) RT - \\ & - g \frac{\Delta h}{L} \frac{P}{(1 + \hat{k}P)RT} - \frac{(1 + \hat{k}P)RT}{A^2 P} \dot{m}^2 \beta \end{aligned} \quad (231-4)$$

می‌توان جملات دوم و آخر سمت راست تساوی معادله مومنتوم را به ترتیب با استفاده از تعاریف گفته شده و با استفاده از معادله پیوستگی، باز ساده‌تر کرد.

$$-RT \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1 + \hat{k}P}{A^2 P} \dot{m}^2 \right) = 2 \frac{RT}{PA^3} \dot{m}^2 (1 + \hat{k}P) \frac{dA}{dx} + \quad (232-4)$$

$$-2\dot{m} \frac{RT}{A^2 P} (1 + \hat{k}P) \frac{\partial \dot{m}}{\partial x} - \frac{RT}{A^2} \dot{m}^2 \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1 + \hat{k}P}{P} \right)$$

$$- \frac{(1 + \hat{k}P) RT}{A^2 P} \dot{m}^2 \beta = \quad (233-4)$$

$$= \frac{(1 + \hat{k}P) RT}{AP} \dot{m} \left\{ \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{P}{(1 + \hat{k}P) RT} \right) + \frac{1}{A} \frac{\partial \dot{m}}{\partial x} \right\}$$

لذا معادله بقای مومنتوم به صورت زیر بازنویسی خواهد شد.

$$\begin{aligned} \frac{\partial P}{\partial x} = & -\frac{1}{A} \frac{\partial \dot{m}}{\partial t} + 2 \frac{RT}{PA^2} \dot{m}^2 (1 + \hat{k}P) \beta - \\ & - \frac{\dot{m} RT}{A^2} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\dot{m} (1 + \hat{k}P)}{P} \right) + \quad (234-4) \\ & - \frac{f}{2DA^2} \frac{\dot{m} |\dot{m}|}{P} (1 + \hat{k}P) RT - g \frac{\Delta h}{L} \frac{P}{(1 + \hat{k}P) RT} + \end{aligned}$$

$$+ \frac{(1 + \hat{k}P) RT}{AP} \dot{m} \left\{ \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{P}{(1 + \hat{k}P) RT} \right) \right\}$$

همانطور که مشاهده می‌شود، کلیه جملات بر حسب فشار و دبی مرتب شده‌اند که این امر تحلیل مسأله را با استفاده از ورودی و خروجی‌هایی که بر اساس همین دو پارامتر هستند، بسیار راحت‌تر خواهد نمود. جهت تحلیل مسأله در فضای لاپلاس و بررسی فرکانسی پاسخ‌ها، نیاز به خطی‌سازی معادلات بالا می‌باشد؛ برای این، می‌توان از بسط تیلور تک‌تک جملات استفاده کرده و جملات با

مرتبه دوم به بالا را در آن حذف کرد؛ برای نمونه، خطی‌سازی جمله‌ای در معادلات نوشته شده که به شکل تابع $F(u_1, u_2, u_3, u_4, \dots)$ است، به فرم زیر خواهد شد.

$$\begin{aligned}
 F(u_1, u_2, u_3, u_4, \dots) &\approx F(u_{1,0}, u_{2,0}, u_{3,0}, u_{4,0}, \dots) + \\
 &+ \left. \frac{\partial F}{\partial u_1} \right|_{\substack{u_1=u_{1,0} \\ u_2=u_{2,0} \\ u_3=u_{3,0} \\ \dots}} (u_1 - u_{1,0}) + \left. \frac{\partial F}{\partial u_2} \right|_{\substack{u_1=u_{1,0} \\ u_2=u_{2,0} \\ u_3=u_{3,0} \\ \dots}} (u_2 - u_{2,0}) + \\
 &+ \left. \frac{\partial F}{\partial u_3} \right|_{\substack{u_1=u_{1,0} \\ u_2=u_{2,0} \\ u_3=u_{3,0} \\ \dots}} (u_3 - u_{3,0}) + \dots
 \end{aligned} \tag{۲۳۵-۴}$$

البته می‌توان جهت راحتی گرفتن لاپلاس، هر کدام از اختلاف‌های متغیر از مقدار ثابتش را با اوپراتور Δ نشان داد. برای وضوح بیشتر، با فرض جملات زیر،

$$F(P, \dot{m}) = RT \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1 + \hat{k}P}{A^2 P} \dot{m}^2 \right) \tag{۲۳۶-۴}$$

خطی‌سازی این جمله به شکل:

$$\begin{aligned}
 \Delta F &= \frac{2\dot{m}_0 RT_0}{A_0^2} \frac{(1 + \hat{k}P_0)}{P_0} \frac{\partial \Delta \dot{m}}{\partial x} + \\
 &+ \frac{\dot{m}_0^2 RT_0}{A_0^2} \frac{[\hat{k}P_0 - (1 + \hat{k}P_0)]}{P_0^2} \frac{\partial \Delta P}{\partial x}
 \end{aligned} \tag{۲۳۷-۴}$$

خواهد شد. با توجه به این نکته، پس از خطی‌سازی همه‌ی جملات معادلات پیوستگی و بقای مومنتوم حول نقاط $P_0, T_0, Z_0, A_0, \dot{m}_0$... می‌توان نوشت:

$$\frac{1}{R_0 T_0} \frac{[(1 + \hat{k}P_0) - \hat{k}P_0]}{(1 + \hat{k}P_0)^2} \frac{\partial \Delta P}{\partial t} + \frac{1}{A_0} \frac{\partial \Delta \dot{m}}{\partial x} = - \frac{\dot{m}_0}{A_0^2} \frac{d\Delta A}{dx} \tag{۲۳۸-۴}$$

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial \Delta P}{\partial x} = & -\frac{1}{A_0} \frac{\partial \Delta \dot{m}}{\partial t} + 2 \frac{RT_0}{P_0 A_0^2} \dot{m}_0^2 (1 + \hat{k}P_0) \frac{1}{A_0} \frac{d\Delta A}{dx} + \\
 & -\frac{\dot{m}_0 RT_0 (1 + \hat{k}P_0)}{A_0^2 P_0} \frac{\partial \Delta \dot{m}}{\partial x} - \\
 & -\frac{\dot{m}_0^2 RT_0 [\hat{k}P_0 - (1 + \hat{k}P_0)]}{A_0^2 P_0^2} \frac{\partial \Delta P}{\partial x} + \\
 & -2 \frac{f}{2DA_0^2} \frac{|\dot{m}_0| \Delta \dot{m}}{P_0} (1 + \hat{k}P_0) RT_0 + \quad (239-ع) \\
 & -\frac{f}{2DA_0^2} \dot{m}_0 |\dot{m}_0| RT_0 \frac{[\hat{k}P_0 - (1 + \hat{k}P_0)]}{P_0^2} \Delta P + \\
 & -g \frac{\Delta h}{L} \frac{[(1 + \hat{k}P_0) - \hat{k}P_0] \Delta P}{(1 + \hat{k}P_0)^2 RT_0} + \\
 & + \frac{\dot{m}_0 (1 + \hat{k}P_0) [(1 + \hat{k}P_0) - \hat{k}P_0]}{A_0 P_0 (1 + \hat{k}P_0)^2} \frac{\partial \Delta P}{\partial t}
 \end{aligned}$$

با مرتب کردن و ساده‌سازی جملات نوشته شده و جایگزینی $Z_0 = (1 + \hat{k}P_0)$ و بعد از آن جایگزینی با سرعت صوت به صورت $c = Z_0 \sqrt{RT_0}$ ، می‌توان از روابط بالا به عبارات زیر دست یافت:

$$\frac{1}{c^2} \frac{\partial \Delta P}{\partial t} + \frac{1}{A_0} \frac{\partial \Delta \dot{m}}{\partial x} = -\frac{\dot{m}_0}{A_0^2} \frac{d\Delta A}{dx} \quad (240-ع)$$

$$\begin{aligned}
 \left\{ 1 - \frac{\dot{m}_0^2 RT_0}{P_0^2 A_0^2} \right\} \frac{\partial \Delta P}{\partial x} = & -\frac{1}{A_0} \frac{\partial \Delta \dot{m}}{\partial t} - \frac{\dot{m}_0 c^2}{Z_0 A_0^2 P_0} \frac{\partial \Delta \dot{m}}{\partial x} - \\
 & -\frac{|\dot{m}_0| f c^2}{D Z_0 A_0^2 P_0} \Delta \dot{m} + \frac{f RT_0}{2DA_0^2} \frac{\dot{m}_0 |\dot{m}_0|}{P_0^2} \Delta P - g \frac{\Delta h}{L} \frac{\Delta P}{c^2} + \quad (241-ع) \\
 & + \frac{\dot{m}_0}{A_0 Z_0 P_0} \frac{\partial \Delta P}{\partial t} + \frac{2c^2 \dot{m}_0^2}{Z_0 P_0 A_0^3} \frac{d\Delta A}{dx}
 \end{aligned}$$

همچنین با استفاده از معادله (۲۴۰-ع) (پیوستگی) می‌توان رابطه زیر را استخراج کرد:

$$\frac{\partial \Delta \dot{m}}{\partial x} = -\frac{\dot{m}_0}{A_0} \frac{d\Delta A}{dx} - \frac{A_0}{c^2} \frac{\partial \Delta P}{\partial t} \quad (242-4)$$

و از این رابطه، برای مرتب کردن جملات رابطه مومنتوم استفاده کرد:

$$\begin{aligned} & \left[1 - \frac{\dot{m}_0^2 R T_0}{P_0^2 A_0^2} \right] \frac{\partial \Delta P}{\partial x} = \\ & -\frac{1}{A_0} \frac{\partial \Delta \dot{m}}{\partial t} + \frac{2\dot{m}_0}{Z_0 A_0 P_0} \frac{\partial \Delta P}{\partial t} - \frac{|\dot{m}_0| f c^2}{D Z_0 A_0^2 P_0} \Delta \dot{m} + \\ & + \left[\frac{f R T_0}{2 D A^2} \frac{\dot{m}_0 |\dot{m}_0|}{P_0^2} - \frac{g \Delta h}{L c^2} \right] \Delta P + \frac{3 c^2 \dot{m}_0^2}{Z_0 P_0 A_0^3} \frac{d\Delta A}{dx} \end{aligned} \quad (243-4)$$

از طرفی می‌توان پارامتر بدون بعد $\xi = x/L$ را برای هر موقعیت از لوله تعریف کرده و در همان موقعیت (ξ) ، سرعت متوسط گاز را به شکل $u_0(\xi) = \dot{m}_0 Z_0 R T_0 / P_0 A_0$ بیان کرد؛ پارامترهای بی‌بعد دیگری که مناسب این رابطه هستند عبارتند از:

$$\begin{aligned} t^* &= t / (L/c), & P^* &= P / P_s \\ \rho^* &= \rho / \rho_s = (P / c^2) / (P_s / c^2) = P^* \\ \dot{m}^* &= \dot{m} c / P_s A_0 \end{aligned} \quad (244-4)$$

از این رو با استفاده از رابطه (۲۴۴-۴) معادلات پیوستگی و مومنتوم بحث شده در بالا (روابط (۲۴۲-۴) و (۲۴۳-۴)) به شکل زیر درخواهند آمد:

$$\frac{\partial \Delta \dot{m}^*}{\partial \xi} = -\frac{\partial \Delta P^*}{\partial t^*} - \frac{\dot{m}_0^*}{A_0} \frac{d\Delta A}{d\xi} \quad (245-4)$$

$$\begin{aligned} & \left[1 - \frac{u_0^2(\xi)}{c^2} \right] \frac{\partial \Delta P^*}{\partial \xi} = -\frac{\partial \Delta \dot{m}^*}{\partial t^*} + \frac{2u_0(\xi)}{c} \frac{\partial \Delta P^*}{\partial t^*} - \\ & - \frac{|u_0(\xi)| f L}{D c} \Delta \dot{m}^* + \left[\frac{f L}{2 D} \frac{u_0(\xi) |u_0(\xi)|}{c^2} - \frac{g \Delta h}{c^2} \right] \Delta P^* + \\ & + \frac{3 P_0^* Z_0}{A_0} \frac{u_0^2(\xi)}{c^2} \frac{d\Delta A}{d\xi} \end{aligned} \quad (246-4)$$

حتی با تعیین روابط زیر نیز کار را می‌توان راحت‌تر کرد:

$$L^* = L/D, \quad u^* = u_0(\xi)/c \quad (247-4)$$

و برای راحتی محاسبات برای کل لوله، می‌توان مقدار متوسطی را برای u_0 به صورت زیر در نظر گرفت:

$$u_0 = \frac{(\dot{m}_{in} + \dot{m}_{out}) Z_0 R T_0}{(P_{in} + P_{out}) A_0} \quad (248-4)$$

که با این تفسیر، روابط بی‌بعد بقای مومنتوم و پیوستگی به فرم زیر در خواهند آمد:

$$\frac{\partial \Delta \dot{m}^*}{\partial \xi} = -\frac{\partial \Delta P^*}{\partial t^*} - \dot{m}_0^* \frac{d\Delta A}{A_0 d\xi} \quad (249-4)$$

$$\begin{aligned} [1 - u^{*2}] \frac{\partial \Delta P^*}{\partial \xi} = & -\frac{\partial \Delta \dot{m}^*}{\partial t^*} + 2u^* \frac{\partial \Delta P^*}{\partial t^*} - |u^*| fL^* \Delta \dot{m}^* + \\ & + \left\{ \frac{fL^*}{2} u^* |u^*| - \frac{g\Delta h}{c^2} \right\} \Delta P^* + 3P_0^* Z_0 u^{*2} \frac{d\Delta A}{A_0 d\xi} \end{aligned} \quad (250-4)$$

در این مرحله می‌توان به سادگی تمام جملات را به حوزه‌ی لاپلاس برد:

$$\frac{\partial \Delta \dot{m}^*(s)}{\partial \xi} = -s\Delta P^*(s) - \dot{m}_0^* \frac{d\Delta A(s)}{A_0 d\xi} \quad (251-4)$$

$$\begin{aligned} [1 - u^{*2}] \frac{\partial \Delta P^*(s)}{\partial \xi} = & -s\Delta \dot{m}^*(s) + 2u^* s\Delta P^*(s) + \\ & -|u^*| fL^* \Delta \dot{m}^*(s) + \left\{ \frac{fL^*}{2} u^* |u^*| - \frac{g\Delta h}{c^2} \right\} \Delta P^*(s) + \\ & + 3P_0^* Z_0 u^{*2} \frac{d\Delta A(s)}{A_0 d\xi} \end{aligned} \quad (252-4)$$

به دلیل آنکه در جریان گاز و در اغلب اوقات $c \gg u_0$ می‌باشد (مثلاً سرعت گاز در حدود

۲۰m/s و سرعت صوت در آن حدوداً ۳۰۰-۴۰۰m/s)، لذا می‌توان از جمله‌ی $u^{*2} = u_0^2/c^2$ نسبت

به عدد یک صرفنظر کرد. از طرفی معمولاً تغییر مداوم سطح مقطع با مکان بسیار نادر بوده و از این رو $A = A_0$ و $\beta = d[\Delta A(s)]/d\xi \approx 0$ و روابط بالا به صورت زیر خواهند شد:

$$\frac{\partial \Delta \dot{m}^*(s)}{\partial \xi} = -s \Delta P^*(s) \quad (253-4)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Delta P^*(s)}{\partial \xi} = & -\left[|u^*| fL^* + s\right] \Delta \dot{m}^*(s) + \\ & + \left\{ \frac{fL^*}{2} u^* |u^*| - \frac{g\Delta h}{c^2} + 2u^* s \right\} \Delta P^*(s) \end{aligned} \quad (254-4)$$

حال اگر پارامترهای زیر تعریف شوند:

$$\alpha(s) = \alpha_1 + \alpha_2 s, \quad \beta(s) = \beta_1 s, \quad \gamma(s) = \gamma_1 + \gamma_2 s \quad (255-4)$$

که در آن:

$$\begin{cases} \alpha_1 = |u^*| fL^* & \gamma_1 = \frac{fL^*}{2} u^* |u^*| - \frac{g\Delta h}{c^2} \\ \alpha_2 = L/c & \gamma_2 = 2u^* L/c \\ \beta_1 = L/c & \end{cases} \quad (256-4)$$

آنگاه سیستم معادلات به دست آمده به شکل زیر خواهد شد:

$$\begin{cases} \frac{\partial \Delta \dot{m}^*(s)}{\partial \xi} = -\beta(s) \Delta P^*(s) \\ \frac{\partial \Delta P^*(s)}{\partial \xi} = \gamma(s) \Delta P^*(s) - \alpha(s) \Delta \dot{m}^*(s) \end{cases} \quad (257-4)$$

اگر $Y(\xi) = \begin{bmatrix} \Delta P^*(s) \\ \Delta \dot{m}^*(s) \end{bmatrix}$ باشد، آنگاه:

$$\frac{dY(\xi)}{d\xi} = \begin{bmatrix} \gamma(s) & -\alpha(s) \\ -\beta(s) & 0 \end{bmatrix} Y(\xi) = M_s Y(\xi) \quad (258-4)$$

از آنجایی که کلیه عناصر ماتریس M_s نسبت به ξ مستقل هستند، لذا می‌توان مطابق رابطه‌ی بیکر^۱، حل زیر را برای دستگاه نوشته شده در نظر گرفت:

$$Y(\xi) = e^{M_s(\xi - \xi_0)} Y(\xi_0) \quad (259-4)$$

با مقداری عملیات ریاضی می‌توان به عبارت زیر دست یافت:

$$\begin{cases} \xi_{in} = \xi_0 = 0, & \xi_{out} = 1 \\ Y(\xi_{in}) = \begin{bmatrix} \Delta P_{in}^*(s) \\ \Delta M_{in}^*(s) \end{bmatrix}, & Y(\xi_{out}) = \begin{bmatrix} \Delta P_{out}^*(s) \\ \Delta M_{out}^*(s) \end{bmatrix} \end{cases} \quad (260)$$

می‌توان با محاسبه برای نقطه خروجی لوله ($x = L$)، به دستگاه زیر دست یافت:

$$\begin{cases} \Delta P_{out}^* = e^{\gamma/2} \left(\frac{a}{b} \sinh(b) + \cosh(b) \right) \Delta P_{in}^* - \\ \quad - e^{\gamma/2} \left(\frac{\alpha}{b} \sinh(b) \right) \Delta M_{in}^* \\ \Delta M_{out}^* = e^{\gamma/2} \left(\frac{-\beta}{b} \sinh(b) \right) \Delta P_{in}^* - \\ \quad - e^{\gamma/2} \left(\frac{a}{b} \sinh(b) - \cosh(b) \right) \Delta M_{in}^* \end{cases} \quad (261-4)$$

مطابق بحث انجام شده روی متغیرهای ورودی-خروجی، برای المان‌هایی از شبکه که دارای

مدل از نوع فشار-دبی هستند، بهتر است توابع تبدیل نیز بر همین اساس مرتب شوند:

¹ Baker Equation

$$\left\{ \begin{aligned} \Delta P_{out}^*(s) &= e^{\gamma/2} \frac{2b}{2b \cosh(b) - \gamma \sinh(b)} \Delta P_{in}^*(s) + \\ &\quad - \frac{2\alpha \sinh(b)}{2b \cosh(b) - \gamma \sinh(b)} \Delta M_{out}^*(s) \\ \Delta M_{in}^*(s) &= \frac{2\beta \sinh(b)}{2b \cosh(b) - \gamma \sinh(b)} \Delta P_{in}^*(s) + \\ &\quad + e^{-\gamma/2} \frac{2b}{2b \cosh(b) - \gamma \sinh(b)} \Delta M_{out}^*(s) \end{aligned} \right. \quad (262-4)$$

اکنون توابع تبدیل به شکل زیر نام‌گذاری می‌شوند:

$$\left\{ \begin{aligned} F_{P_{out}, P_{in}}(s) &= \frac{2be^{\gamma(s)/2}}{H(s)} \\ F_{P_{out}, M_{out}}(s) &= \frac{-2\alpha(s) \sinh(b)}{H(s)} \\ F_{M_{in}, P_{in}}(s) &= \frac{2\beta(s) \sinh(b)}{H(s)} \\ F_{M_{in}, M_{out}}(s) &= \frac{2be^{-\gamma(s)/2}}{H(s)} \end{aligned} \right. \quad (263-4)$$

که

$$H(s) = 2b \cosh(b) - \gamma(s) \sinh(b) \quad (264-4)$$

بوده و چون این شکل از توابع تبدیل، گویای مرتبه آن نخواهند بود، لذا باید به بسط

توابع $\sinh(b)$ و $\cosh(b)$ پرداخت:

$$\begin{aligned} H(s) &= 2b \left(1 + \frac{1}{2!} b^2 + \frac{1}{4!} b^4 + \dots \right) + \\ &\quad - b\gamma(s) \left(1 + \frac{1}{3!} b^2 + \frac{1}{5!} b^4 + \dots \right) \end{aligned} \quad (265-4)$$

با توجه به تعریف $b = \sqrt{\gamma^2 + 4\alpha\beta} / 2$

$Deno. =$

$$= 2b \left\{ \left[1 + \frac{1}{8}(\gamma^2 + 4\alpha\beta) + \frac{1}{384}(\gamma^2 + 4\alpha\beta)^2 + \dots \right] + \right. \quad (266-4)$$

$$\left. - \frac{\gamma(s)}{2} \left[1 + \frac{1}{24}(\gamma^2 + 4\alpha\beta) + \frac{1}{1920}(\gamma^2 + 4\alpha\beta)^2 + \dots \right] \right\}$$

در این مرحله می‌توان با استفاده از روابط (۴-۲۵۵) به جایگزینی و مرتب کردن عبارات مربوط به مخرج توابع تبدیل بر حسب ضرایبی از اوبراتور لاپلاس (s) پرداخت:

$$Deno. = 2b \left\{ \left[-\frac{1}{2}\gamma_1 + \frac{1}{8}\gamma_1^2 - \frac{1}{48}\gamma_1^3 + \frac{1}{384}\gamma_1^4 - \dots + \dots \right] + \right. \quad (267-4)$$

$$+ \left[\frac{1}{2}\alpha_1\beta_1 \left(1 - \frac{1}{6}\gamma_1 + \frac{1}{24}\gamma_1^2 - \frac{1}{240}\gamma_1^3 + \dots \right) + \right.$$

$$\left. - \frac{\gamma_2}{2} \left(1 - \frac{1}{2}\gamma_1 + \frac{1}{8}\gamma_1^2 - \frac{1}{48}\gamma_1^3 + \frac{1}{384}\gamma_1^4 - \dots \right) \right] s +$$

$$+ \left[\frac{1}{24}\alpha_1^2\beta_1^2 \left(1 - \frac{1}{10}\gamma_1 \right) + \frac{1}{2}\alpha_2\beta_1 \left(1 - \frac{1}{6}\gamma_1 + \frac{1}{24}\gamma_1^2 - \frac{1}{240}\gamma_1^3 + \dots \right) + \right.$$

$$\left. - \frac{1}{12}\alpha_1\beta_1\gamma_2 \left(1 - \frac{1}{2}\gamma_1 - \frac{1}{16}\gamma_1^2 - \dots \right) + \frac{1}{8}\gamma_2^2 \left(1 - \frac{1}{2}\gamma_1 + \right. \right.$$

$$\left. \left. + \frac{1}{8}\gamma_1^2 - \dots + \dots \right) \right] s^2 + \dots \left. \right\}$$

از طرفی با جایگزینی صورت کسرهای توابع تبدیل بر حسب سری تیلور، می‌توان تک تک آن‌ها را ساده‌سازی کرد؛ برای نمونه:

$$F_{P_{out}, P_{in}}(s) = \frac{2be^{\gamma_1} \left(1 + \frac{1}{2}\gamma_2 s + \frac{1}{8}\gamma_2^2 s^2 + \dots \right)}{2b(1 + \hat{a}_1 s + \hat{a}_2 s^2 + \dots)} \quad (268-4)$$

که در آن:

$$\hat{a}_1 = e^{\frac{\gamma_1}{2}} \left[\frac{1}{2}\alpha_1\beta_1 \left(1 - \frac{1}{6}\gamma_1 + \frac{1}{24}\gamma_1^2 - \frac{1}{240}\gamma_1^3 + \dots \right) \right] - \frac{\gamma_2}{2} \quad (269-4)$$

$$\hat{a}_2 = e^{\frac{\gamma_1}{2}} \left[\frac{1}{24} \alpha_1^2 \beta_1^2 \left(1 - \frac{1}{10} \gamma_1 \right) + \frac{1}{2} \alpha_2 \beta_1 \left(1 - \frac{1}{6} \gamma_1 + \frac{1}{24} \gamma_1^2 + \right. \right. \\ \left. \left. - \frac{1}{240} \gamma_1^3 + \dots \right) - \frac{1}{12} \alpha_1 \beta_1 \gamma_2 \left(1 - \frac{1}{2} \gamma_1 - \frac{1}{16} \gamma_1^2 - \dots \right) \right] + \frac{1}{8} \gamma_2^2 \quad (270-ع)$$

با تقسیم تقریبی صورت و منخرج، عبارت زیر بدست خواهد آمد:

$$F_{P_{out}, P_{in}}(s) = k_1 \frac{1}{1 + a_1 s + a_2 s^2} \quad (271-ع)$$

که در آن:

$$k_1 = e^{\gamma_1}, \quad a_1 = \hat{a}_1 - \frac{1}{2} \gamma_2, \quad a_2 = \hat{a}_2 + \frac{1}{8} \gamma_2^2 - \frac{1}{2} \gamma_2 \hat{a}_1 \quad (272-ع)$$

به همین ترتیب برای دیگر توابع تبدیل، عبارات زیر استخراج می‌شود:

$$\left\{ \begin{array}{l} F_{P_{out}, M_{out}}(s) = k_2 \frac{1 + b_1 s + b_2 s^2}{1 + \hat{a}_1 s + \hat{a}_2 s^2} \\ F_{M_{in}, P_{in}}(s) = \frac{c_1 s + c_2 s^2}{1 + \hat{a}_1 s + \hat{a}_2 s^2} \\ F_{M_{in}, M_{out}}(s) = \frac{1}{1 + d_1 s + d_2 s^2} \end{array} \right. \quad (273-ع)$$

که در عبارات نوشته شده،

$$k_2 = e^{\frac{\gamma_1}{2}} \alpha_1 \left(1 + \frac{1}{24} \gamma_1^2 + \frac{1}{1920} \gamma_1^4 \right) \quad (274-ع)$$

$$b_1 = \frac{\alpha_2}{\alpha_1} + \frac{\left(\alpha_1 \beta_1 + \frac{1}{12} \gamma_1 \gamma_2 \right) \left(1 + \frac{1}{40} \gamma_1^2 \right)}{1 + \frac{1}{4} \gamma_1^2 + \frac{1}{320} \gamma_1^4} \quad (275-ع)$$

$$b_2 = \frac{1}{1 + \frac{1}{24} \gamma_1^2 + \frac{1}{1920} \gamma_1^4} \times \left\{ \frac{\alpha_2}{\alpha_1} \left(\frac{1}{6} \alpha_1 \beta_1 + \frac{1}{12} \gamma_1 \gamma_2 \right) \left(1 + \frac{1}{40} \gamma_1^2 \right) + \frac{1}{120} \alpha_1^2 \beta_1^2 + \frac{1}{6} \alpha_2 \beta_1 \left(1 + \frac{1}{40} \gamma_1^2 \right) + \frac{1}{120} \alpha_1 \beta_1 \gamma_1 \gamma_2 + \frac{1}{4} \gamma_2^2 \left(\frac{1}{6} + \frac{1}{80} \gamma_1^2 \right) \right\} \quad (276-ع)$$

بوده و روابط مربوط به ضرایب c_1, c_2, d_1, d_2 به شکل زیر می‌باشند:

$$c_1 = e^{\frac{\gamma_1}{2}} \beta_1 \left(1 + \frac{1}{24} \gamma_1^2 + \frac{1}{1920} \gamma_1^4 \right) \quad (277-ع)$$

$$c_2 = e^{\frac{\gamma_1}{2}} \beta_1 \left(\frac{1}{6} \alpha_1 \beta_1 + \frac{1}{12} \gamma_1 \gamma_2 \right) \left(1 + \frac{1}{40} \gamma_1^2 \right) \quad (278-ع)$$

$$d_1 = \hat{a}_1 + \frac{1}{2} \gamma_2 \quad (279-ع)$$

$$d_2 = \hat{a}_2 + \frac{1}{8} \gamma_2^2 + \frac{1}{2} \gamma_2 \hat{a}_1 \quad (280-ع)$$

و \hat{a}_1 و \hat{a}_2 از روابط (269-ع) و (270-ع) بدست می‌آیند. همچنین با تقریب بیشتر، می‌توان فرم مرتبه‌ی اول توابع تبدیل فوق را نیز به‌دست آورد. بدین ترتیب که در استخراج بسط تیلور توابع تبدیل، جملات با مرتبه کمتری از اوپراتور s در نظر گرفته شوند:

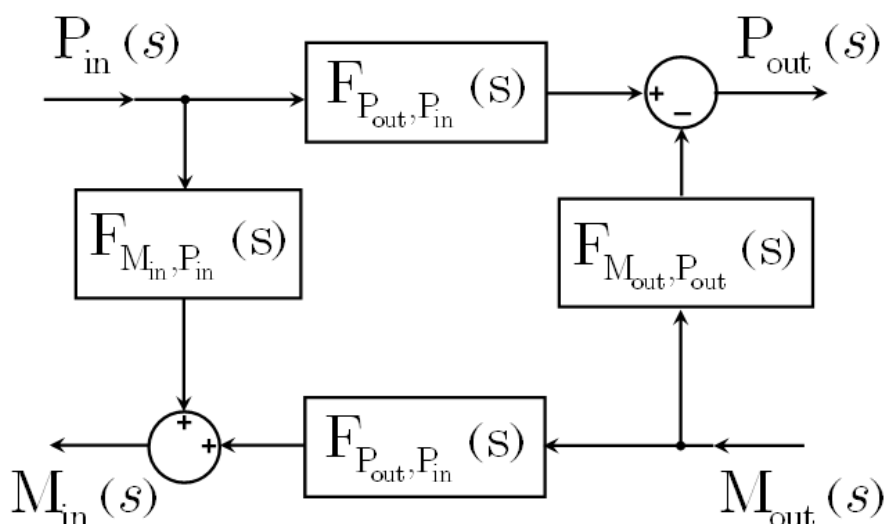
$$F_{P_{out}, P_{in}}(s) = k_1 \frac{1}{1 + a_1 s} \quad (281-ع)$$

$$F_{P_{out}, M_{out}}(s) = k_2 \frac{1 + b_1 s}{1 + \hat{a}_1 s} \quad (282-ع)$$

$$F_{M_{in}, P_{in}}(s) = \frac{c_1 s}{1 + \hat{a}_1 s} \quad (283-ع)$$

$$F_{M_{in}, M_{out}}(s) = \frac{1}{1 + d_1 s} \quad (284-4)$$

حال می‌توان فرم شماتیک زیر را برای هر المان شبکه‌ای که در آن تغییرات فشار ورودی و دبی خروجی معلوم است، طراحی و تحلیل کرد:



شکل ۴-۶۴: شماتیک توابع تبدیل فشار-دبی درون شبکه

به دلیل آنکه در یک شبکه همواره المان‌های مناسب برای مدل دبی-دبی نیز وجود دارند، توابع تبدیل از این نوع را نیز بایست در اختیار داشت. برای این منظور می‌توان با استفاده از روابط (۴-۲۸۱) تا (۴-۲۸۴) نوشت:

$$\Delta P_{out}^*(s) = k_1 \frac{1}{1 + a_1 s} \Delta P_{in}^*(s) - k_2 \frac{1 + b_1 s}{1 + \hat{a}_1 s} \Delta M_{out}^* \quad (285-4)$$

$$\Delta M_{in}^*(s) = \frac{c_1 s}{1 + \hat{a}_1 s} \Delta P_{in}^*(s) + \frac{1}{1 + d_1 s} \Delta M_{out}^*(s) \quad (286-4)$$

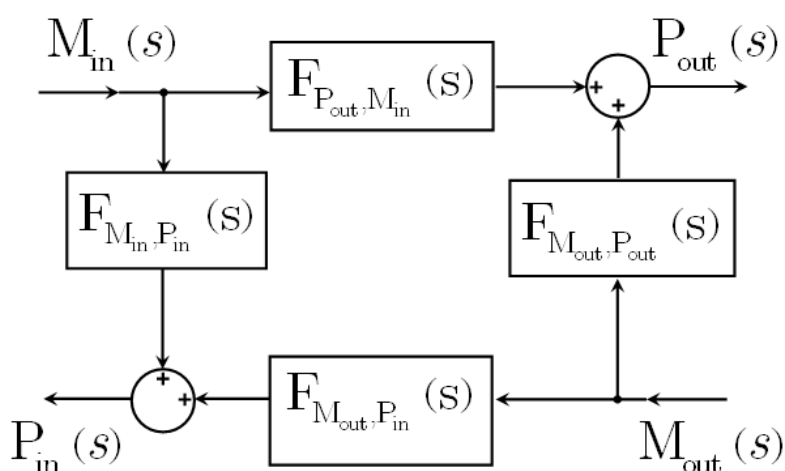
حال بایستی متغیرهای خروجی را برحسب ورودی‌ها نوشت:

$$\Delta P_{in}^*(s) = \frac{1 + \hat{a}_1 s}{c_1 s} \Delta M_{in}^*(s) - \frac{1 + \hat{a}_1 s}{(1 + d_1 s)(c_1 s)} \Delta M_{out}^* \quad (287-4)$$

$$\Delta P_{out}^*(s) = \frac{k_1}{c_1 s} \Delta M_{in}^*(s) - \quad (288-4)$$

$$-k_1 \frac{1 + \hat{a}_1 s}{c_1 s} \left(\frac{1}{(1 + a_1 s)(1 + d_1 s)} + k_2 \frac{1 + b_1 s}{1 + \hat{a}_1 s} \right) \Delta M_{out}^*(s)$$

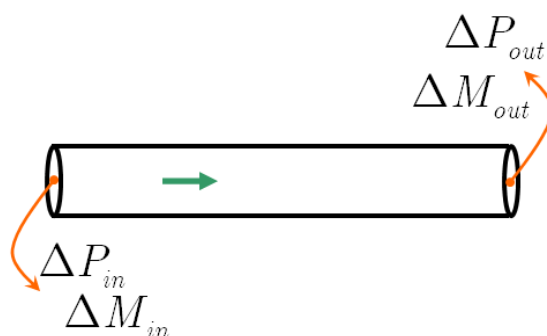
که برای این حالت شماتیک توابع تبدیل به صورت شکل ۶۵-۴ در خواهد آمد.



شکل ۶۵-۴: شماتیک توابع تبدیل دبی-دبی درون شبکه

به طور کلی برای هر نوع چینش شبکه و برای هر نوع اطلاعات ورودی معلوم برای المان‌ها می‌توان توابع تبدیل مربوطه را استخراج کرد. بدین منظور المان نشان داده شده در شکل ۶۶-۴ را در نظر بگیرید. برای این المان چهار متغیر M_{in} ، M_{out} ، P_{in} ، P_{out} قابل بررسی است. از طرفی مطابق روابط (۲۸۱-۴) تا (۲۸۴-۴)، توابع تبدیل برای حالتی از المان که در آن M_{out} و P_{in} معلوم‌اند استخراج گردید. اگر با استفاده از روابط (۲۸۵-۴) و (۲۸۶-۴)، دستگاه معادلات این روابط را به شکل زیر تشکیل دهیم:

$$\begin{cases} \Delta P_{out}^*(s) = TF_1 \Delta P_{in}^*(s) + TF_3 \Delta M_{out}^*(s) \\ \Delta M_{in}^*(s) = TF_2 \Delta P_{in}^*(s) + TF_4 \Delta M_{out}^*(s) \end{cases} \quad (289-4)$$



شکل ۴-۶۶: شماتیک یک المان کلی درون شبکه

که در آن:

$$\begin{cases} \text{TF}_1 = F_{P_{out}, P_{in}} \\ \text{TF}_2 = F_{M_{in}, P_{in}} \\ \text{TF}_3 = F_{M_{out}, P_{out}} \\ \text{TF}_4 = F_{M_{in}, M_{out}} \end{cases} \quad (۲۹۰-۴)$$

متغیرهای مورد نظر برای هر نوع چینش المان را می‌توان به راحتی با حل دستگاه (۴-۲۸۹) و بر اساس همان متغیرها به عنوان مجهول، استخراج نمود. به بیان دیگر برای المانی که در آن دبی ورودی و دبی خروجی به عنوان تابعی از زمان معلوم هستند این معادلات به شکل زیر استخراج خواهند شد:

$$\begin{cases} \Delta P_{in}^*(s) = \frac{1}{\text{TF}_2} \Delta M_{in}^*(s) - \frac{\text{TF}_4}{\text{TF}_2} \Delta M_{out}^*(s) \\ \Delta P_{out}^*(s) = \frac{\text{TF}_1}{\text{TF}_2} \Delta M_{in}^*(s) - \left(\frac{\text{TF}_1 \text{TF}_4}{\text{TF}_2} - \text{TF}_3 \right) \Delta M_{out}^*(s) \end{cases} \quad (۲۹۱-۴)$$

از طرفی برای آرایش المانی که در آن تغییرات زمانی فشار ورودی و فشار خروجی معلوم است، این روابط به صورت زیر در خواهند آمد:

$$\begin{cases} \Delta M_{in}^*(s) = -\frac{\text{TF}_1}{\text{TF}_3} \Delta P_{in}^*(s) + \frac{1}{\text{TF}_3} \Delta P_{out}^*(s) \\ \Delta M_{out}^*(s) = \left(\text{TF}_2 - \frac{\text{TF}_1 \text{TF}_4}{\text{TF}_3} \right) \Delta P_{in}^*(s) - \frac{\text{TF}_4}{\text{TF}_3} \Delta P_{out}^*(s) \end{cases} \quad (۲۹۲-۴)$$

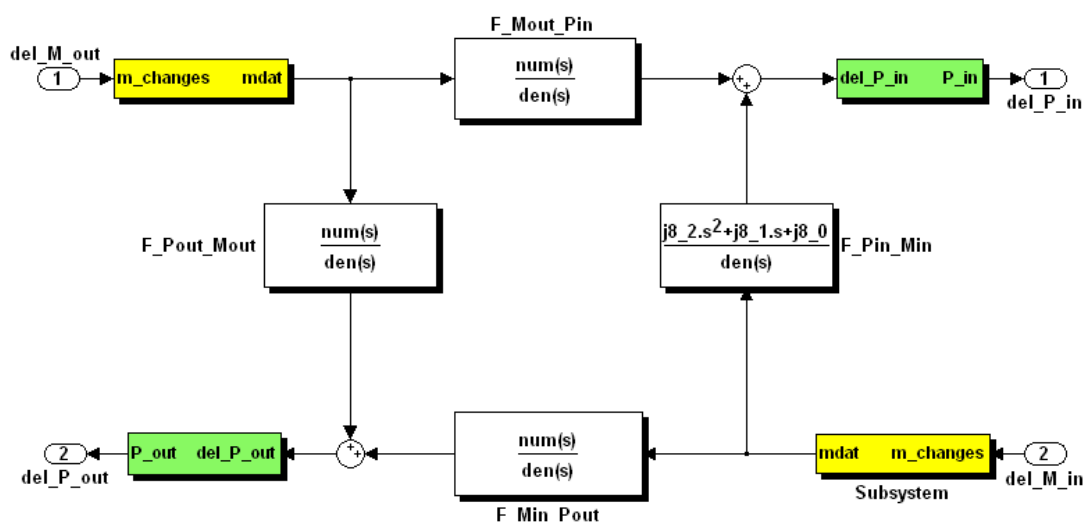
و نهایتاً برای سیستمی که در آن تغییرات فشار خروجی و دبی ورودی بر حسب زمان معلوم می‌باشد، این معادلات به شکل زیر استخراج شده و مرتب می‌شوند:

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta P_{in}^*(s) = \frac{TF_4}{TF_4 TF_1 - TF_3 TF_2} \Delta P_{out}^*(s) - \\ \quad - \frac{TF_3}{TF_4 TF_1 - TF_3 TF_2} \Delta M_{in}^*(s) \\ \Delta M_{out}^*(s) = - \frac{TF_2}{TF_4 TF_1 - TF_3 TF_2} \Delta P_{out}^*(s) + \\ \quad + \frac{TF_1}{TF_4 TF_1 - TF_3 TF_2} \Delta M_{in}^*(s) \end{array} \right. \quad (293-4)$$

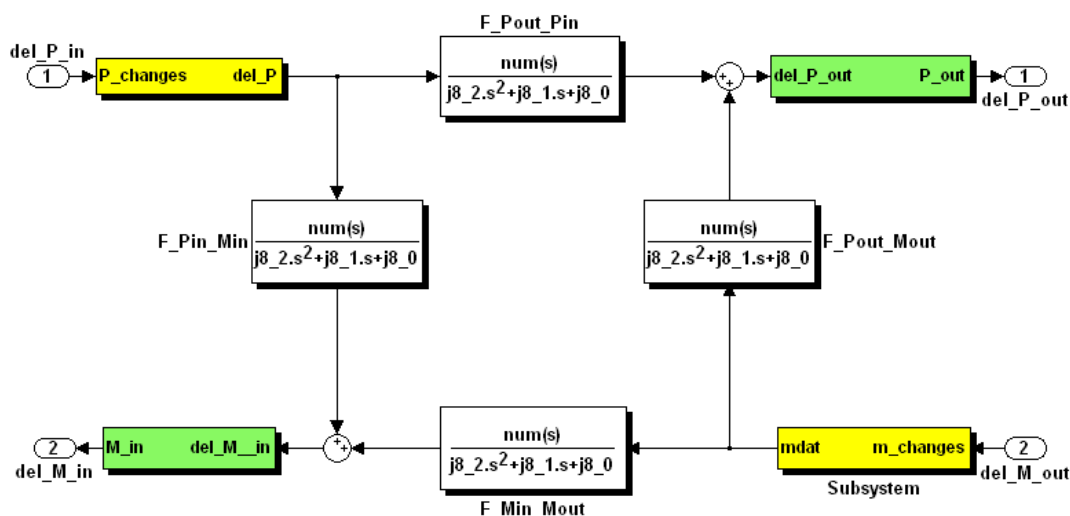
۳.۴ ارائه نتایج و بحث روی آنها

در این بخش به ارائه نتایج بدست آمده از روش توابع تبدیل و حوزه فرکانسی که به چند حالت گذرای مطرح شده در بخش‌های قبل اعمال گردیده است، پرداخته خواهد شد. به طور کلی این روش را به دلیل اینکه به خطی‌سازی معادلات حاکم می‌پردازد، می‌توان به محدوده تغییرات نرمال و نه خیلی زیاد حول وضعیت دائم اعمال نمود. اما با این وجود مزیت اصلی استفاده از این روش در اینست که زمان کمتری را برای انجام محاسبات نسبت به سایر روش‌ها لازم دارد. همچنین با دقت در معادلات استخراج شده برای این روش، می‌توان متوجه حضور پارامتر طول لوله به خصوص موقع محاسبه پارامترهای t^* و L^* در روابط (۲۴۴-۴) و (۲۴۷-۴) شد. علاوه بر این مقادیر، مطابق رابطه (۲۴۸-۴) مقدار پارامتر u_0 که خطی‌سازی حول آن انجام می‌گیرد نیز به نوعی درگیر با اندازه طول لوله می‌شود. این امر به خاطر حضور فشارها و دبی‌های ورودی و خروجی لوله (اول و آخر آن) در رابطه ذکر شده می‌باشد. لذا با افزایش طول در نظر گرفته شده برای خطی‌سازی معادلات، دقت محاسبه تا حدودی کم خواهد شد. از این رو بهتر است که برای محاسبات روی لوله‌های بلند یا توابع تبدیل به صورت چندگانه روی بخش‌های لوله‌ای که به چند المان تقسیم گشته است اعمال گردد یا اینکه به صورت حدس و خطایی بهترین مقدار را برای u_0 در خطی‌سازی پیدا کنیم.

توابع تبدیلی را که در بخش قبل برای حالت‌های مختلف آرایش المان‌ها و لوله‌ها از حیث دبی یا فشار معلوم در ورودی و خروجی آنها بدست آمده‌اند، می‌توان با نرم‌افزاری مثل MATLAB شبیه‌سازی کرد. این توابع در بخش سیمولینک این نرم‌افزار قابل مدل کردن می‌باشند. شکل ۴-۶۷ نشان‌دهنده توابع تبدیل برای حالتی است که در آن دبی ورودی و خروجی معلوم بوده و فشار در این دو قسمت از لوله مجهول می‌باشند. شکل ۴-۶۸ هم مدلی برای حالتی از توابع تبدیل که در آنها فشار ورودی و دبی خروجی معلوم است، می‌باشد. از طرف دیگر شکل ۴-۶۹ نشان‌دهنده مدل توابع تبدیل برای حالتی از المان یا لوله است که در آن دبی ورودی و فشار خروجی معلوم باشد.

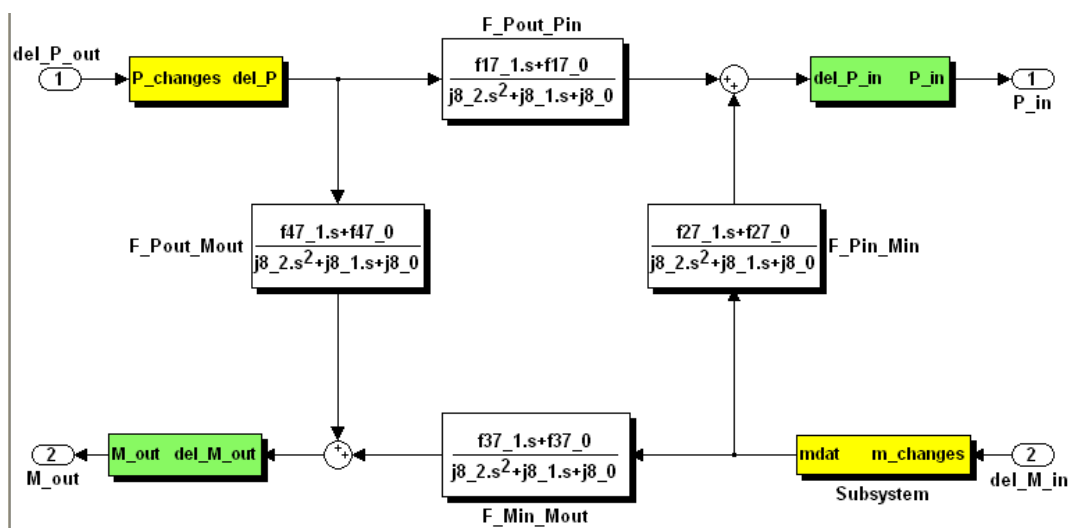


شکل ۴-۶۷: توابع تبدیل از نوع دبی ورودی و خروجی معلوم



شکل ۴-۶۸: توابع تبدیل از نوع دبی خروجی و فشار ورودی معلوم

برای بررسی دقت کار این توابع تبدیل و قبل از اینکه حالت‌های مختلف تحقیق ژو و آدومی [۱] با حوزه فرکانسی مورد تحلیل قرار گیرند، می‌توان به بررسی یک حالت با تغییرات منظم و پریودیک (دوره‌ای و متناوب) برای متغیرهای جریان با استفاده از توابع تبدیل پرداخت.

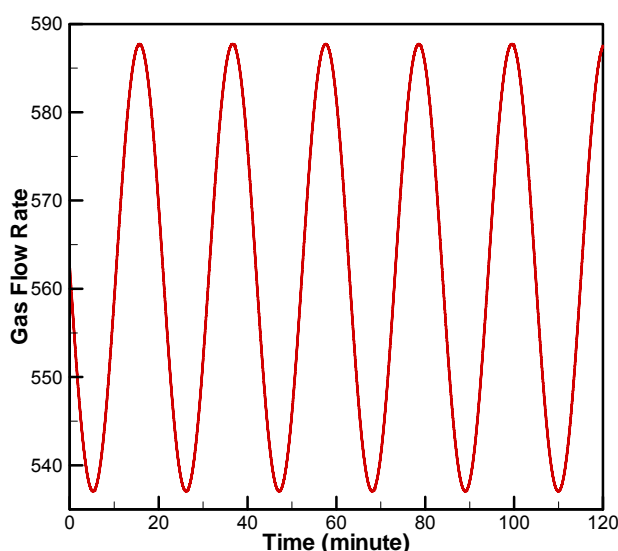


شکل ۴-۶۹: توابع تبدیل از نوع دبی ورودی و فشار خروجی معلوم

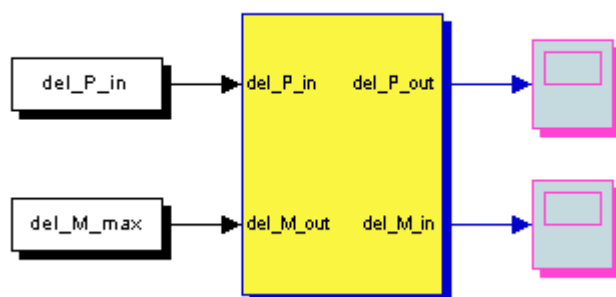
۱.۳.۴ تغییرات متناوب دبی خروجی (نمونه اول)

بیاید توابع از نوع تغییرات دبی خروجی و فشار ورودی معلوم را در نظر بگیریم. لوله مورد مطالعه دارای طول ۲۰۰.۰۰۰ فوت (۳۷/۸۸ مایل) و قطر ۸/۱۵ اینچ می‌باشد. ضریب اصطکاک را ثابت و برابر ۰/۰۲۵۶ در نظر گرفته و فشار را در ورودی برابر ۶۰۰ پوند بر اینچ مربع می‌گیریم. زمان کل شبیه‌سازی ۱۲۰ دقیقه می‌باشد. در این مدل که در شکل ۴-۷۱ آورده شده است ورودی تغییرات دبی خروجی و فشار ورودی به صورت درصدی از حالت پایدار قابل تعریف می‌باشند. لذا مدل را برای دو مقدار ۵ و ۳۰ درصد دامنه تغییرات نوسانی حول وضعیت پایدار دبی در خروجی لوله (شکل ۴-۷۰ برای حالت ۳۰٪ تغییرات) و عدم تغییر برای فشار ورودی اجرا کرده و نتایج را با مقادیری که از روش ضمنی به دست آمده است مقایسه می‌کنیم. این مقایسه به ترتیب در شکل ۴-۷۲ و شکل ۴-۷۳ آورده شده است.

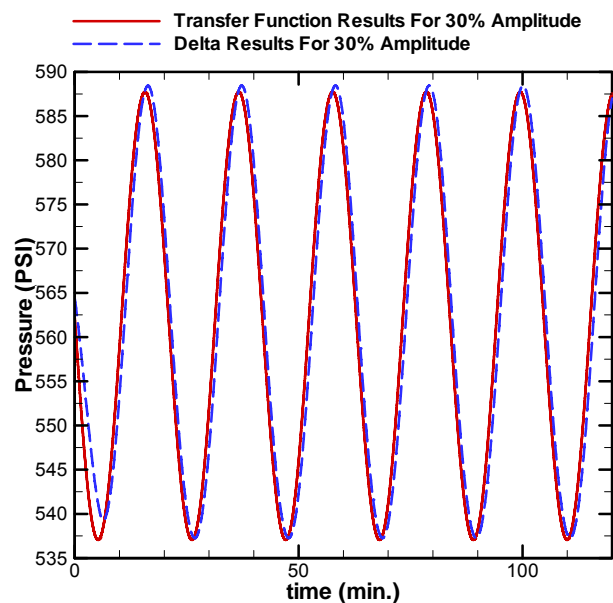
اما برای دانستن اینکه قابلیت مدل‌سازی این مدل چه میزان و تا چه درصدی از تغییرات نسبت به حالت دائم می‌باشد می‌توان به افزایش این درصد تا مقداری که نتایج با روش عددی فاصله می‌گیرند و یا به عبارتی درصد خطا از حد معقولی فراتر می‌رود ادامه داد. پس از طی این مرحله می‌توان دید که این مقدار برای مدل حاضر و در مسأله‌ی مطرح شده حدود ۷۰ درصد وضعیت دائم می‌باشد. یعنی اگر دامنه تغییرات نوسانی دبی گاز در خروجی لوله تا حدود ۷۰ درصد حالت دائم مسأله هم افزایش بیابد، باز با این مدل می‌توان شبیه‌سازی لوله را با دقت بالایی و صرف زمان بسیار کمی انجام داد.



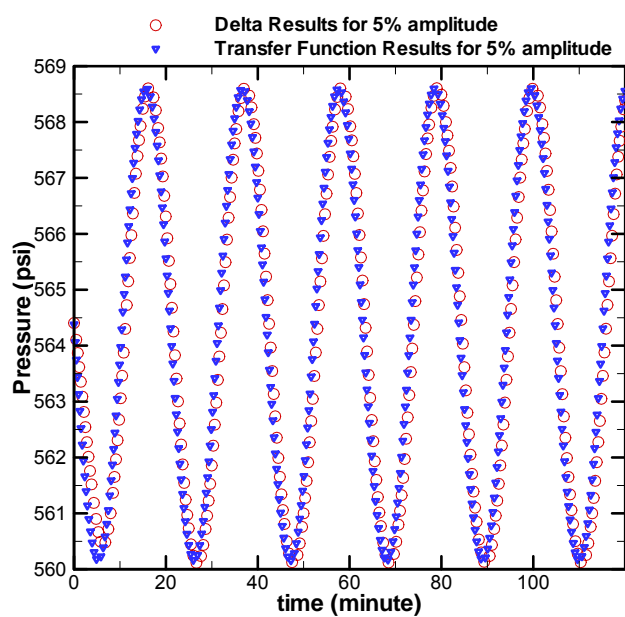
شکل ۴-۷۰: دبی متناوب اعمال شده به خروجی لوله برای مسأله جریان حالت متناوب



شکل ۴-۷۱: مدل توابع تبدیل به کار گرفته شده برای مسأله جریان حالت متناوب (نرم‌افزار MATLAB)



شکل ۴-۷۲: مقایسه نتایج روش دلتا با روش توابع تبدیل (مسأله جریان حالت متناوب ۳۰٪ تغییرات)



شکل ۴-۷۳: مقایسه نتایج روش دلتا با روش توابع تبدیل (مسأله جریان حالت متناوب ۵٪ تغییرات)

استفاده از مدل توابع تبدیل در کنار محدودیت اعمال تغییرات در شرایط مرزی و ایجاد حالت

غیردائم دارای مزایای زیر نیز می‌باشد:

- زمان انجام محاسبات در این روش نسبت به سایر روش‌های عددی بسیار پایین است. این امر هم به خاطر استفاده از حوزه لاپلاس بوده و هم به دلیل عدم محدودیت در استفاده از گام

زمانی دلخواه می‌باشد. البته برای داشتن دقت و وضوح نمایش بالا بهتر است گام زمانی خیلی زیاد هم نباشد. برای مقایسه بهتر مدت زمان انجام محاسبات در روش‌های مختلف می‌توان برای این مسأله‌ی خاص، زمانی را که هر یک از روش‌ها در محاسبات خود با یک CPU یکسان لازم دارند به صورت جدولی مرتب کرد. این مقایسه در جدول ۴-۴-۲ ارائه گردیده است.

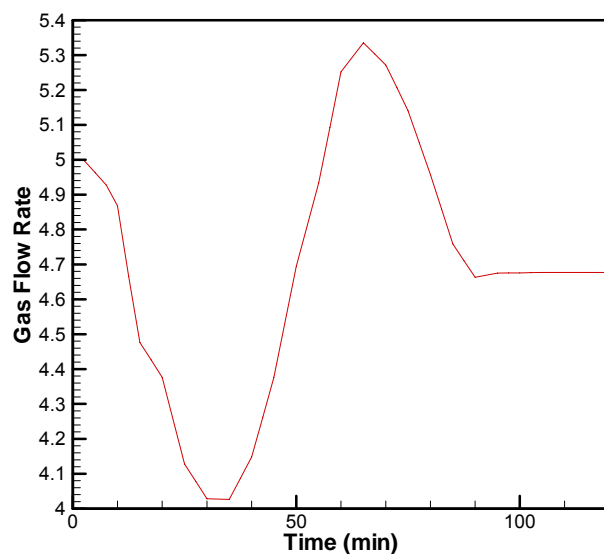
جدول ۴-۴-۲: بررسی زمان مورد نیاز روش‌های عددی برای محاسبه فشار خروجی در لوله

نام روش عددی	زمان مورد نیاز (بر حسب ثانیه) برای اجرای ۱۲۰ دقیقه شبیه‌سازی جریان گذرای نوسانی با ۳۰٪ دامنه تغییرات دبی خروجی حول وضعیت دائم
FCT	۱۱۲۰/۲۰
ضمنی	۳۴/۵۲
توابع تبدیل	۱/۱۸

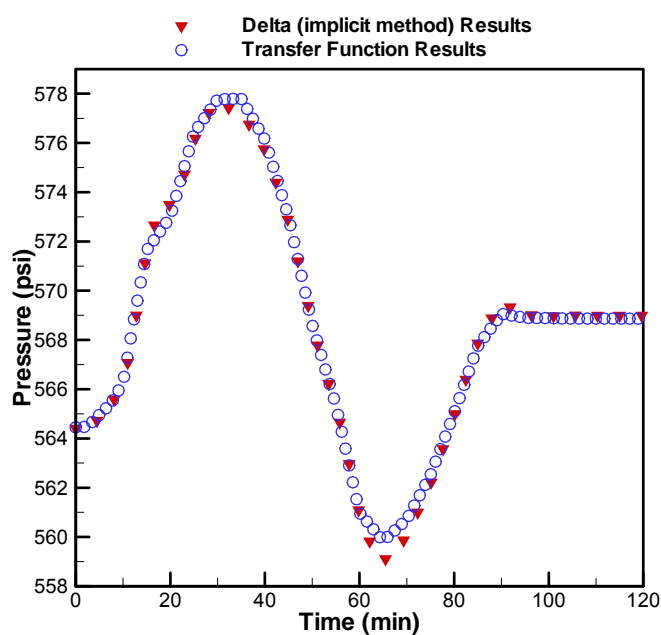
- به دلیل اینکه روابط استخراج شده برای توابع تبدیل کاملاً بی‌بعد هستند، در مسائل مشابه از لحاظ معلومات و مجهولات، می‌توان به راحتی و بدون احتیاج به بررسی هندسه لوله یا المان نتایج مشابهی را در نظر گرفت.

۲.۳.۴ تغییرات غیر متناوب در دبی خروجی (نمونه دوم)

در ادامه می‌توان به بررسی همان هندسه لوله نمونه اول با تغییرات غیر متناوب دبی در خروجی برای ۱۲۰ دقیقه (مطابق شکل ۴-۷۴) پرداخت. نتایجی که از این حالت گرفته شده در شکل ۴-۷۵ با نتایج بدست آمده از روش ضمنی دلتا مقایسه شده است. همانطور که مشاهده می‌شود دقت این الگوریتم برای تغییرات غیر منظم در حدود ۱۰ درصد دبی حالت پایدار، در مقایسه با روش‌های عددی رضایت بخش می‌باشد.



شکل ۴-۷: دبی خروجی غیر منظم اعمال شده به مدل توابع تبدیل

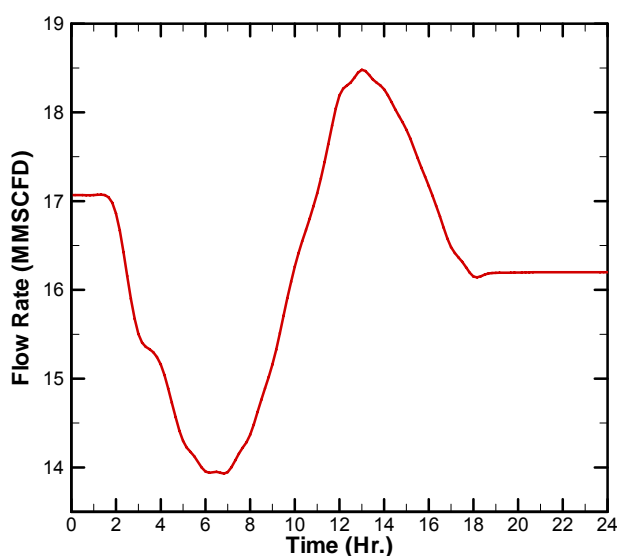


شکل ۴-۷۵: مقایسه نتایج روش توابع تبدیل با الگوریتم ضمنی دلتا برای حالت دبی خروجی غیر منظم

۳.۳.۴ گذر آهسته جریان گاز با دبی خروجی متغیر (نمونه سوم)

این نمونه مسأله در واقع همان حالت دوم کار ژو و آدومی [۱] می‌باشد. در این حالت لوله‌ای با قطر داخلی ۸/۵ اینچ، طول ۴۴/۹ مایل و زبری ۰/۰۲۴۳ اینچ در حالت اولیه (حالت دائم) دارای جریان یکنواخت ۱۷/۰۷ MMSCFD و توزیع فشار، متناسب با این توزیع دبی می‌باشد. از طرفی دبی

خروجی اعمال شده به مدل به صورت شکل ۴-۵۷ بوده و کل زمان شبیه‌سازی ۲۴ ساعت می‌باشد. در این مدت زمان، فشار ورودی ۶۱۰ psi ثابت نگه داشته می‌شود. سرعت صوت درون گاز برای این حالت ۱۲۰۷/۳ ft/sec بوده و چگالی نسبی گاز طبیعی در دمای ثابت شبیه‌سازی (۵۰^۰F) برابر ۰/۶۷۵ می‌باشد. برای محاسبه ضریب اصطکاک این حالت از پارامترهای مسأله در جریان حالت دائم می‌توان کمک گرفته و مقدار آن را ثابت فرض نمود.



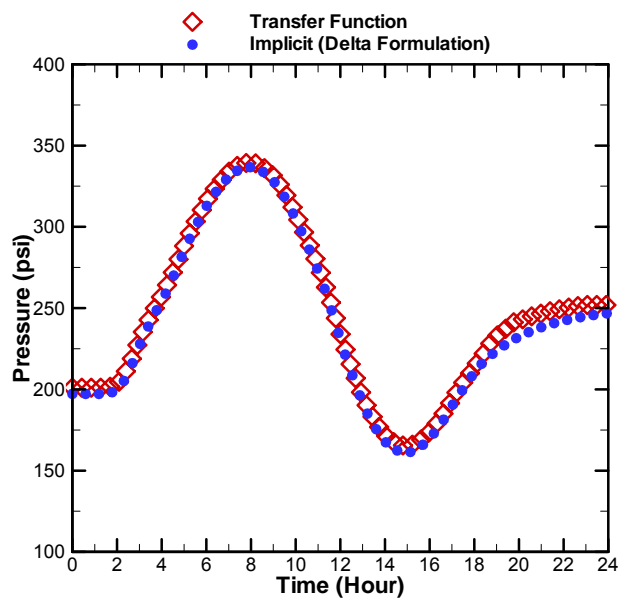
شکل ۴-۷۶: تغییرات دبی خروجی بر حسب زمان اعمال شده به حالت دوم

نتایج بدست آمده از روش توابع تبدیل برای فشار خروجی در شکل ۴-۷۷ با روش ضمنی فرمولاسیون دلتا و در شکل ۴-۷۸ با سایر روش‌های عددی و آزمایشگاهی مقایسه گردیده است. می‌توان دید که دقت بالای این روش در کنار زمان کم ارائه نتایج، آن را از دیگر روش‌ها متمایز می‌کند. لازم به ذکر است که برای داشتن جواب‌های پایدار، بایستی خطی‌سازی را حول مقدار متوسط u_0 بر حسب کل دامنه تغییرات دبی در خروجی انجام داد.

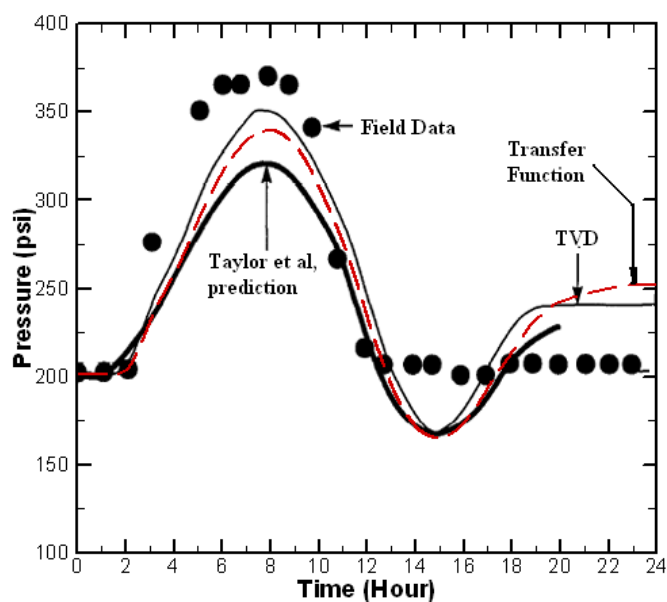
همچنین در شکل ۴-۷۹ به مقایسه نتایج بدست آمده از روش توابع تبدیل با یافته‌های حاصل از روش خطوط^۱ که در کار تتیس و مارگاریس [۲] آورده شده است، پرداخته می‌شود. با ملاحظه این شکل به راحتی می‌توان متوجه نزدیکی بین مقادیر روش توابع تبدیل با روش خطوط نیز شد.

¹ Method of Lines (MOL)

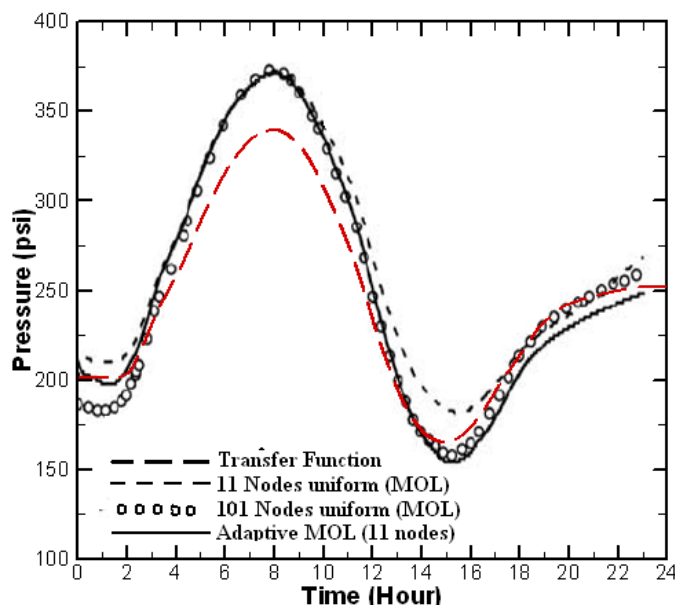
بررسی این نتایج و نتایجی که از روش ضمنی به دست آمده است، دقت مناسب روش توابع تبدیل ضمن سرعت محاسباتی بسیار برای آن مورد تأیید قرار می‌گیرد.



شکل ۴-۷۷: مقایسه نتایج روش توابع تبدیل با الگوریتم ضمنی دلتا برای نمونه سوم

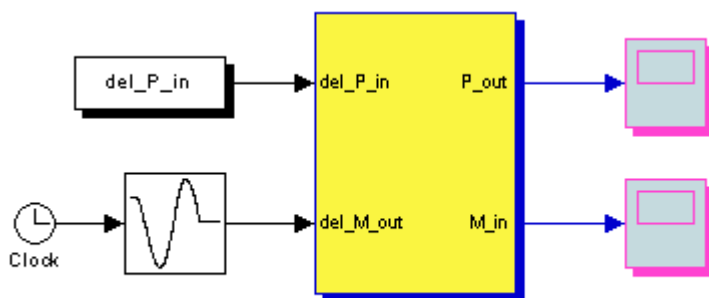


شکل ۴-۷۸: مقایسه نتایج روش توابع تبدیل با روش‌های TVD و آزمایشگاهی برای نمونه سوم



شکل ۴-۷۹: مقایسه نتایج روش توابع تبدیل با روش خطوط برای نمونه سوم

در شکل ۴-۸۰ مدل سیمپولینکی این نمونه ارائه گردیده است. همانطور که مشاهده می‌گردد از قابلیت میانبایی و برونمایی نرم‌افزار MATLAB (بلوک Look-up Table) نیز استفاده شده است که علت آن داشتن دقت بالاتر ورودی مدل (برای تغییرات دبی در خروجی لوله) بر حسب زمان است.



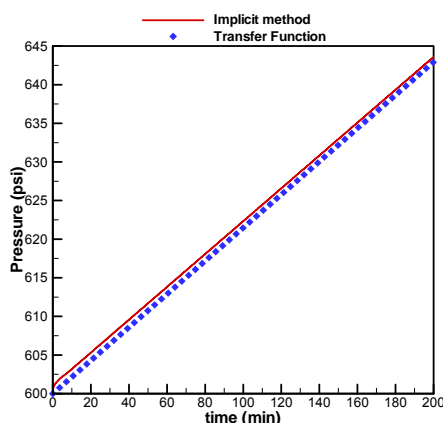
شکل ۴-۸۰: مدل سیمپولینکی روش توابع تبدیل برای نمونه سوم

۴.۳.۴ شرایط غیردائم با تغییر ناگهانی دبی ورودی (نمونه چهارم)

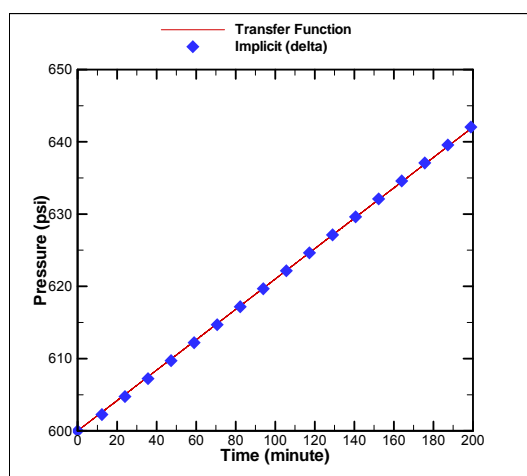
در این نمونه، دبی در ورودی به طور ناگهانی از صفر (شرایط اولیه) به مقدار ۱۸/۰ MMSCFD افزایش یافته و دبی خروجی در آن تغییری نمی‌یابد (خروجی لوله برای تمام لحظات بسته است). همانطور که قبلاً هم اشاره شد، در این مسأله شرایط اولیه به صورت بدون جریان و فشار یکنواخت ۶۰۰ پوند بر اینچ مربع می‌باشد. لذا می‌توان این شرط اولیه را به عنوان نوعی حالت پایدار برای

مدلسازی با روش توابع تبدیل در نظر گرفت اما مشکل از جایی شروع می‌گردد که در منحنی رابطه (۲۴۸-۴) برای تعریف u_0 مقادیر دبی حالت پایدار قرار می‌گیرند که با این اوصاف این پارامتر به سمت بی‌نهایت میل کرده و شبیه‌سازی با روش توابع تبدیل را دچار ناپایداری خواهد کرد. برای حل این مشکل می‌توان خطی‌سازی را حول نقاط دیگری انجام داد. این فرض به اصل نتایج هیچ لطمه‌ای وارد نمی‌کند چرا که نهایتاً این تغییرات فشارها و دبی‌ها هستند که در مدل مبادله می‌گردند.

برای زمان مدل‌سازی حدوداً ۲۰۰ دقیقه، نتایج بدست آمده از روش توابع تبدیل برای فشارهای ورودی در شکل ۴-۸۱ و برای فشار خروجی در شکل ۴-۸۲ با نتایج روش ضمنی مقایسه گردیده است. همانطور که می‌بینیم با گذشت زمان، فاصله بین نمودارهای حاصل از دو روش برای فشار ورودی کمتر و کمتر می‌گردد.



شکل ۴-۸۱: مقایسه نتایج بدست آمده از روش توابع تبدیل و روش دلتا برای فشار ورودی نمونه چهارم

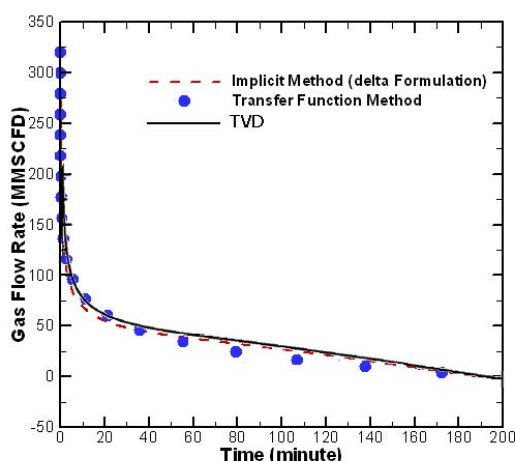


شکل ۴-۸۲: مقایسه نتایج بدست آمده از روش توابع تبدیل و روش دلتا برای فشار خروجی نمونه چهارم

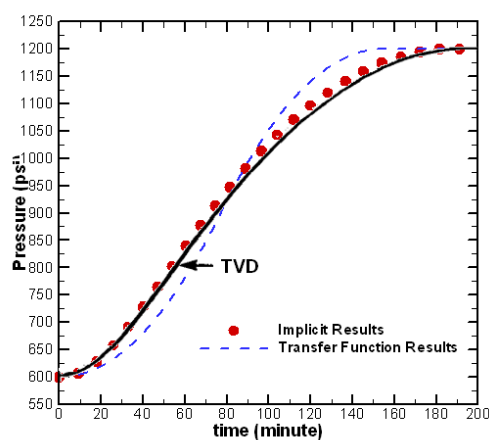
۵.۳.۴ شرایط غیردائم با تغییر ناگهانی فشار ورودی (نمونه پنجم)

در این نمونه، هندسه مسأله و پارامترها به حالتی است که در آن فشار در ورودی به طور ناگهانی از ۶۰۰/۰ psi (شرایط اولیه) به مقدار ۱۲۰۰/۰ psi افزایش یافته و دبی خروجی در آن تغییری نمی‌یابد (شیر خروجی لوله برای تمام لحظات بسته است). همانطور که قبلاً هم اشاره شد، در این مسأله شرایط اولیه به صورت بدون جریان و فشار یکنواخت ۶۰۰ پوند بر اینچ مربع می‌باشد. همانند نمونه قبل می‌توان خطی‌سازی را حول نقاط دیگری غیر از متوسط وضعیت پایدار لوله انجام داد.

برای زمان مدل‌سازی حدوداً ۲۰۰ دقیقه، نتایج بدست آمده از روش توابع تبدیل برای دبی ورودی در شکل ۴-۸۳ و برای فشار خروجی در شکل ۴-۸۴ با نتایج روش ضمنی و الگوریتم TVD (تحقیق ژو و آدومی) مقایسه گردیده است.



شکل ۴-۸۳: مقایسه نتایج بدست آمده از روش توابع تبدیل و روش دلتا برای دبی ورودی نمونه پنجم



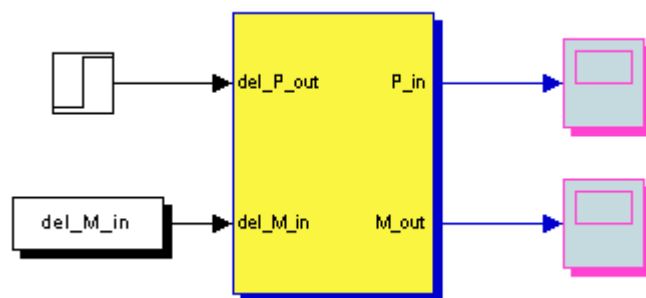
شکل ۴-۸۴: مقایسه نتایج بدست آمده از روش توابع تبدیل و روش دلتا برای فشار خروجی نمونه پنجم

همانطور که در این دو شکل می‌بینیم نتایجی که از روش توابع تبدیل به دست آمده‌اند به خصوص برای دبی ورودی با نتایج تحلیل عددی بسیار نزدیک بوده و این نتایج برای فشار خروجی با متوسط خطای $4/5$ درصد مطابقت زیادی با یافته‌های عددی دارد. علت ایجاد عقب و جلوشدگی دو قوس برای نمودار فشار روش توابع تبدیل، تغییر ناگهانی بسیار زیاد فشار در ورودی است که با تقریب بالاتر از تقریب خطی در توابع تبدیل می‌توان آن را بهبود داد.

۶.۳.۴ شرایط غیردائم با تغییر ناگهانی فشار خروجی (نمونه ششم)

در این دسته از شرایط به چهار حالت آخر تحقیق ژو و آدومی (تغییر فشار خروجی و ثابت ماندن دبی ورودی) می‌پردازیم. در دو حالت آخر که شکافی در وسط لوله اتفاق افتاده و دو سر آن تا پایان شبیه‌سازی بسته می‌ماند، می‌توان با توجه به وجود تقارن در شرایط مسأله نصف طول را مورد بررسی قرار داده و در نهایت با استفاده از قرینه‌سازی، نتایج را به کل لوله تعمیم داد. در این چهار حالت شرایط اولیه یکسان و به صورت بدون جریان و فشار یکنواخت $1200/0$ psi می‌باشد. در حالت پنجم و ششم آن تحقیق، فشار در خروجی به طور ناگهانی به ترتیب به 600 و $14/7$ کاهش ناگهانی پیدا کرده و در آن مقدار باقی می‌ماند. اما در دو حالت آخر یعنی حالت‌های هفتم و هشتم فشار در وسط لوله به ترتیب به مقادیر 600 و $14/7$ کاهش ناگهانی پیدا می‌کند.

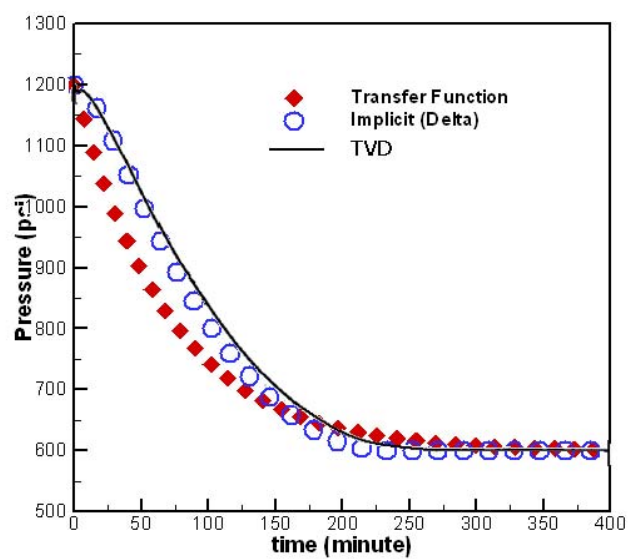
با این توصیف می‌توان مدل مشترکی برای چهار حالت گفته شده با استفاده از توابع تبدیل ترتیب داده و در آن فقط مقادیر هندسی و شرایطی جریان را تغییر داد. این مدل از دسته مدل‌های با دبی ورودی و فشار خروجی معلوم می‌باشد. شماتیک این نوع مدل در محیط نرم‌افزار MATLAB در شکل ۴-۸۵ نشان داده شده است. با دادن ورودی‌های با تغییرات ناگهانی کم به این مدل می‌توان نتایج بسیار خوبی گرفت؛ اما به هر حال برای اینکه بتوان نتایج را با یافته‌های عددی و با کار ژو و آدومی مقایسه کرد، چهار حالت گفته شده را که دارای تغییرات بسیار زیاد حول حالت پایدار می‌باشند با این مدل بررسی می‌کنیم.



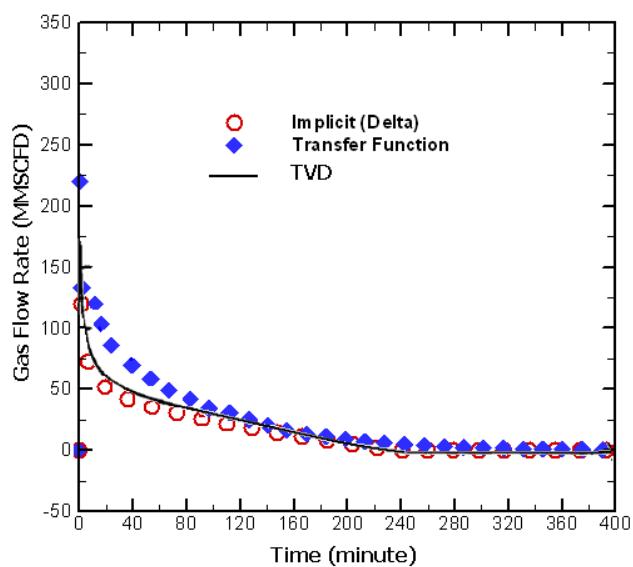
شکل ۴-۸۵: شماتیک مدل نوع دبی- فشار برای چهار حالت جریان غیردائم (نمونه ششم)

نتایج به دست آمده برای فشار ورودی حالت پنجم کار ژو و آدومی در شکل ۴-۸۶ و برای دبی خروجی آن حالت در شکل ۴-۸۷ با یافته‌های عددی مقایسه گردیده است. مشاهده می‌شود که در نمودار مربوط به مقایسه فشار ورودی برای زمان‌های بعد از ۱۵۰ دقیقه و در نمودار دبی خروجی برای زمان پس از ۸۰ دقیقه نزدیکی بسیار بالایی بین نتایج عددی با روش توابع تبدیل ایجاد می‌گردد. در زمان‌های قبل از این دو زمان نیز، همانطور که در دو نمودار می‌توان دید، نتایج روش توابع تبدیل بیشتر نزدیک به نتایج روش ضمنی برای فشار و نزدیک به نتایج روش TVD برای دبی می‌باشد.

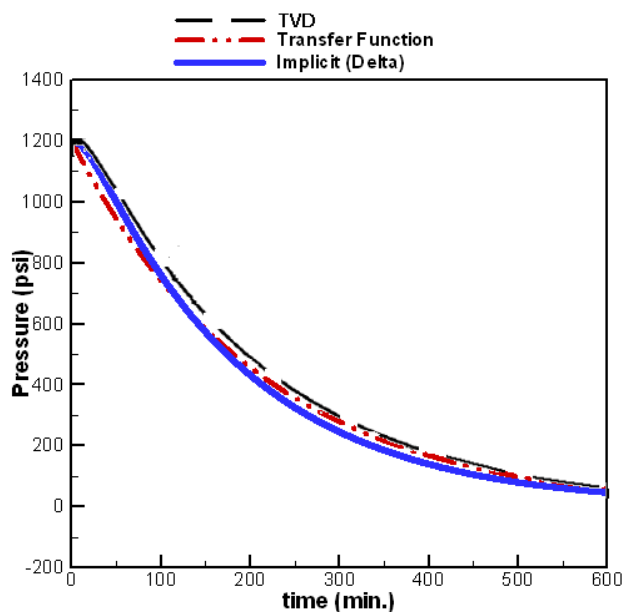
همچنین نتایج به دست آمده برای فشار ورودی حالت ششم تحقیق ژو در شکل ۴-۸۸ و برای دبی خروجی آن حالت در شکل ۴-۸۹ با یافته‌های عددی مورد مقایسه واقع شده است. مجدداً می‌توان متوجه نزدیکی بیشتر یافته‌های توابع تبدیل به نتایج فرمولاسیون دلتا (روش ضمنی) در نمودار فشار ورودی و به نتایج TVD در نمودار دبی خروجی شد. این به علت ماهیت فیزیکی و هندسی یکسان در تعریف این دو حالت به هنگام شبیه‌سازی عددی می‌باشد.



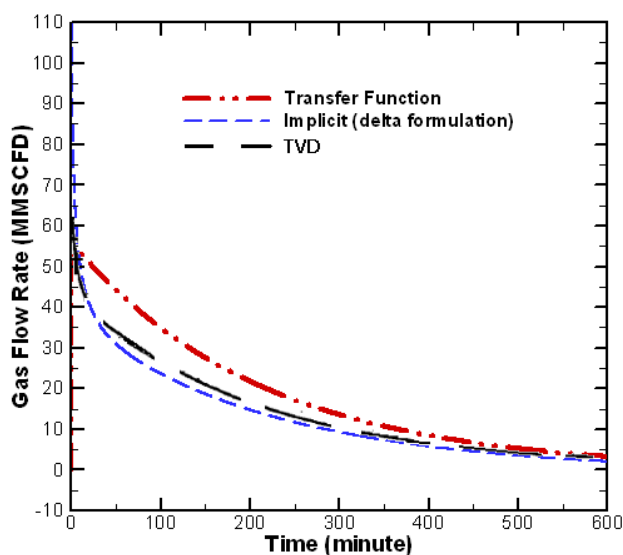
شکل ۴-۸۶: مقایسه نتایج روش توابع تبدیل و روش عددی برای فشار ورودی (حالت پنجم کار ژو-آدومی)



شکل ۴-۸۷: مقایسه نتایج روش توابع تبدیل و روش عددی برای دبی خروجی (حالت پنجم کار ژو-آدومی)



شکل ۴-۸۸: مقایسه نتایج روش توابع تبدیل و روش عددی برای فشار ورودی (حالت ششم کار ژو-آدومی)

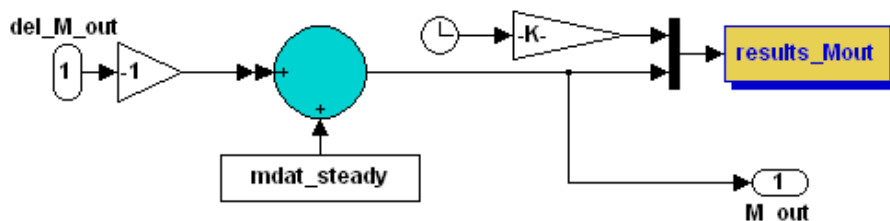


شکل ۴-۸۹: مقایسه نتایج روش توابع تبدیل و روش عددی برای دبی خروجی (حالت ششم کار ژو-آدومی)

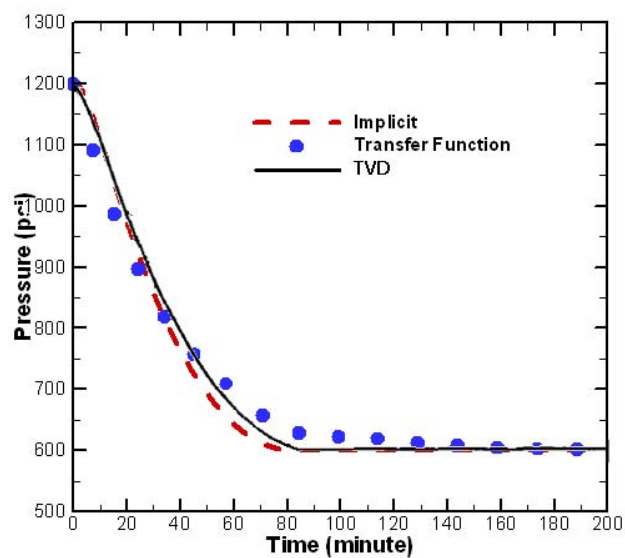
از طرف دیگر مقایسه نتایج عددی دبی خروجی و فشار ورودی برای حالت‌های هفتم و هشتم از تحقیق یاد شده با یافته‌های به دست آمده از روش توابع تبدیل و حوزه فرکانسی را می‌توان از شکل ۴-۹۱ تا شکل ۴-۹۴ مشاهده نمود. همانطور که دیده می‌شود، در نمودارهای این دو حالت نیز نتایج توابع تبدیل، همپوشانی بسیار خوبی با یافته‌های عددی TVD دارند.

با مشاهده این نتایج می‌توان گفت که با استفاده از روش توابع تبدیل و با انتخاب مقادیر مناسب جهت خطی‌سازی در حوزه فرکانس در موارد مختلف بدون نیاز به صرف وقت زیاد می‌توان به شبیه‌سازی لوله یا شبکه پرداخت. دقت نتایج به دست آمده در این موارد مرتبط با حالت فیزیکی و هندسی مدل است؛ به عبارت دیگر این روش در مواردی می‌تواند بسیار خوب نتیجه دهد که در آن تغییرات ناگهانی زیاد از حد حول وضعیت تعادل و حالت پایدار با زمان وجود نداشته باشد.

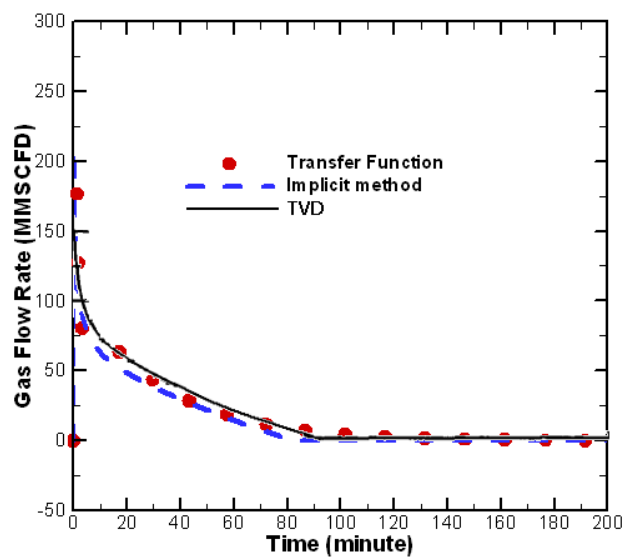
به علاوه در حالت‌هایی که نمی‌توان از نوع متوسط حالت دائم المان یا لوله برای یافتن مقدار پارامترهای خطی‌سازی استفاده کرد (همانند نمونه‌های تغییر ناگهانی از حالت بدون جریان در لوله)، می‌توان به صورت حدس و خطایی و یا به شکل تجربی این مقادیر را عوض کرده تا از بروز تقسیم بر صفر و ایجاد ناپایداری در مدل توابع تبدیل جلوگیری نمود. تغییر این مقادیر هیچ گونه لطمه یا تغییری در جواب‌های نهایی ایجاد نخواهد کرد چرا که در مدل توابع تبدیل مقادیر اختلاف پارامترهای جریان (مثل دبی یا فشار) وارد می‌شوند که در نهایت، مقادیر جدید با جمع بستن آنها با مقادیر حالت پایدار بدست خواهند آمد (شکل ۴-۹۰).



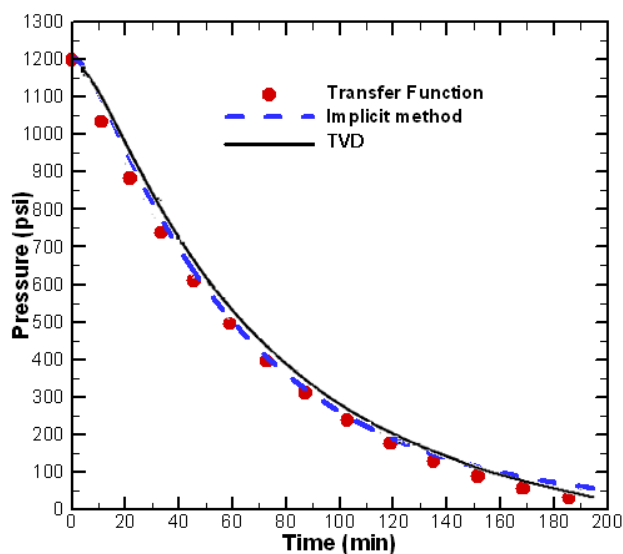
شکل ۴-۹۰: نحوه محاسبه مقادیر نهایی حالت غیردائم از مقادیر اختلافی محاسبه شده در مدل



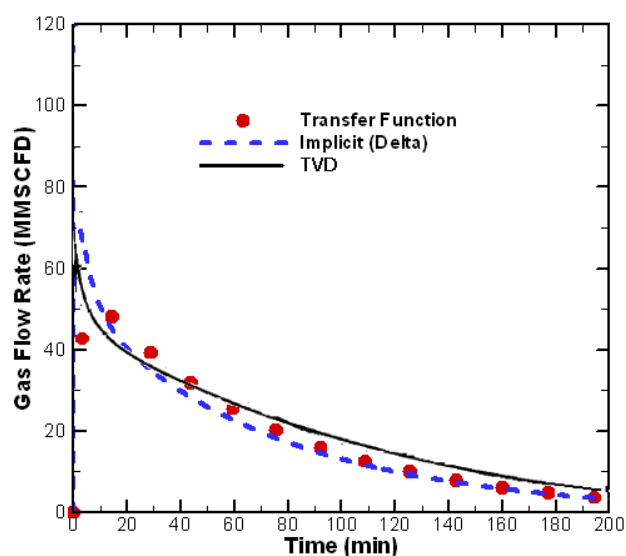
شکل ۴-۹۱: مقایسه نتایج روش توابع تبدیل و روش عددی برای فشار ورودی (حالت هفتم کار ژو-آدومی)



شکل ۴-۹۲: مقایسه نتایج روش توابع تبدیل و روش عددی برای دبی خروجی (حالت هفتم کار ژو-آدومی)



شکل ۴-۹۳: مقایسه نتایج روش توابع تبدیل و روش عددی برای فشار ورودی (حالت هشتم کار ژو-آدومی)



شکل ۴-۹۴: مقایسه نتایج روش توابع تبدیل و روش عددی برای دبی خروجی (حالت هشتم کار ژو-آدومی)

۴.۴ مراجع

- [1] 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.
- [2] Tentis E., Margaris D., Papanikas D., (2003), "Transient gas flow simulation using an Adaptive Method of Lines", Fluid Mechanics Laboratory, University of Patras, 26500 Patras, Greece, pp 481-487.

-
- [3] 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.

۵ شرکت در سمینارها و کنفرانس‌های داخلی و خارجی و مقالات ارائه شده

یکی از مسئولیت‌های دفتر پژوهش شرکت گاز استان خوزستان تعامل و ارتباط با محافل علمی و صنعتی ملی و بین‌المللی می‌باشد. در این راستا از آنجا که کنفرانس‌ها و همایش‌های داخلی و خارجی محل مناسبی جهت تبادل اطلاعات و آگاهی از پیشرفت‌ها و نوآوری‌های انجام گرفته در زمینه صنایع مرتبط با تولید، فرآوری، انتقال و توزیع گاز می‌باشند، شرکت در این کنفرانس‌ها جزء برنامه‌های سالانه‌ی دفتر می‌باشد. شایان ذکر است که شرکت پرسنل دفتر پژوهش در کنفرانس‌های علمی همراه با ارائه‌ی مقاله از طرف دفتر پژوهش در این کنفرانس‌ها بوده‌است. در ادامه مختصراً این کنفرانس‌ها و مقالات ارائه شده در آنها شرح داده شده‌اند.

۱.۵ نمایشگاه نفت و گاز

پیرامون تشکیل نمایشگاه نفت و گاز (فروردین ۸۷) در تهران، از طرف دفتر پژوهش شرکت گاز استان خوزستان برنامه‌ای برای بازدید از این نمایشگاه تدارک دیده شد. هدف از این بازدید آشنایی با شرکت‌های مختلف داخلی و خارجی مرتبط با صنعت گاز و آشنایی با آخرین تکنولوژی روز دنیا بوده است. با توجه به برنامه‌ی یک ساله‌ی دفتر پژوهش، یکی از اهداف مد نظر، آشنایی با شرکت‌هایی بوده که در زمینه ساخت سیستم‌های اندازه‌گیری دبی جریان گاز (دبی‌سنج) فعالیت داشتند. با آشنایی شرکت‌های مختلف داخلی و خارجی و تهیه کاتالوگ انواع دبی‌سنج‌های ساخته شده توسط این شرکتها، بانک اطلاعاتی در زمینه تهیه نرم‌افزار انتخاب دبی‌سنج‌های مختلف گازی کاملتر می‌شود.

از جمله شاخص‌ترین شرکت‌هایی که مورد بازدید قرار گرفتند عبارت بودند از:

۱.۱.۵ توس متک

عمده فعالیت‌های این شرکت به صورت خلاصه در شکل ۱-۵ آورده شده است.

(سهامی خاص) **توس و متک**

تجهیزات کالیبراسیون فلومترهای گاز تا ظرفیت $Q_{max} = 1000$ SCMH (با گواهینامه PTB)

Calibration Facility for Gas Meters up to $Q_{max} = 1000$ SCMH (PTB Approval)

فلومترهای توربینی گاز IGTM
IGTM Gas Turbine Meter

دستگاه تصحیح کننده مقادیر حجم/ جریان گاز PTZ-BOX V2
PTZ-BOX V2 Electronic Volume/Flow Rate Converter

فلومترهای روتاری گاز OMEGA V
OMEGA V Rotary Gas Meter

دستگاه تصحیح کننده سطح بالای مقادیر حجم/ جریان گاز GAS-CADA
GAS-CADA High Level Electronic Volume/Flow Rate Converter

فلومترهای توربینی مایعات
Liquid Turbine Meter

فلومترهای دنده تخم مرغی مایعات
Liquid Oval Gear Meter

فلترهای مایعات با صافی سبکی
Liquid Filter with Basket Type Strainers

دستگاه سیار کروماتوگرافی گاز
Mobile Process Gas Chromatograph

vemmtec
Flow Meter

شکل ۱-۵: کاتالوگ شرکت توس و متک

۲.۱.۵ شرکت شاتل پارس

این شرکت به عنوان مشاور فنی و خدمات بعد از فروش تعدادی از معتبرترین کمپانی‌های سازنده سیستم‌های اندازه‌گیری، ابزار دقیق و کنترل، فعالیت خود را به صورت اختصاصی بر روی تجهیزات فرآیندی متمرکز نموده است. در شکل ۲-۵ و شکل ۳-۵ شرکت‌هایی که شاتل پارس نماینده انحصاری آنها می‌باشد به همراه زمینه فعالیت هر کدام آورده شده است.

1. KROHNE

- 1.1. Flow meters
 - 1.1.1. Glass / Metal type Variable Area Flow meters
 - 1.1.2. Electromagnetic Flow meters
 - 1.1.3. Ultrasonic Flow meters
 - 1.1.4. Mass Flow meters
 - 1.1.5. Flow Controllers
- 1.2. Level Measuring Instruments
 - 1.2.1. Radar Level Gauge
 - 1.2.2. Ultrasonic
 - 1.2.3. Float Type
 - 1.2.4. Displacer & Level Switches
- 1.3. Metering Systems
- 1.4. Communication Engineering
- 1.5. Tank Management Systems
- 1.6. Leak Detection Systems



2. HACH ULTRA (Polymetron)

- 2.1. Liquid Analyzers
 - 2.1.1. pH, Redox, Conductivity
 - 2.1.2. Turbidity, Dissolved Gases
 - 2.1.3. Concentration, Total Hardness, Sodium
 - 2.1.4. Silica phosphate, Hydrazine, Chlorine
 - 2.1.5. Suspended Solid, T.O.C. (Total Organic Carbon)
 - 2.1.6. T.C. (Total Carbon)



3. Honeywell Analytics (Sieger)

- 3.1. Fire & Gas Detection
 - 3.1.1. Flame, Smoke, Heat Detectors
 - 3.1.2. Combustible & Toxic Gas Detectors
 - 3.1.3. Control Systems...



تهران - خیابان شهید دکتر قندی، پلاک ۱۰۹، کدپستی: ۱۵۵۴۹، تلفن: ۸۸۷۵۱۷۷۱، فکس: ۸۸۷۵۱۷۷۳

No. 109, Dr.Ghandi Ave., Tehran 15549 - IRAN Tel: +98 21 8875 1771 - Fax: +98 21 8875 1773 e-mail: shuttlepars@shuttlepars.com

شکل ۲-۵: زمینه فعالیت‌های شرکت‌هایی که شاتل پارس نماینده انحصاری آنها می‌باشد.

3.1.4. Portable Gas Detectors

4. ARCA

- 4.1. Control Valve (globe style) (signal/double seated)
- 4.2. Three way control valve
- 4.3. Steam conditioning and pressure reducing control valves
- 4.4. Butterfly Valves
- 4.5. Valve accessories such as intelligent positioner,...

**5. GEORGIN**

- 5.1. Pressure and Temperature Transmitters
- 5.2. Switches for Ex and None Ex Areas
- 5.3. Remote I/O
- 5.4. Relays
- 5.5. Barriers

**6. FISCHER**

- 6.1. Pressure Instruments
- 6.2. Temperature Instruments
- 6.3. PID Controllers
- 6.4. Differential Pressure Instruments
- 6.5. Different Electronics: Buffer Amplifier & Signal Converter
- 6.6. Mini -PLC (FICON-M)

**7. NET SAFETY**

- 7.1. F&G Control Systems
- 7.2. Flame Detectors
- 7.3. Gas Detectors
- 7.4. Smoke Detectors
- 7.5. F&G Calibration Accessories

**8. IFTG (Indutrade Flow Technology Group)**

Package supplier of Valves, Pumps and Field Instruments

شکل ۳-۵: زمینه فعالیت‌های شرکت‌هایی که شاتل پارس نماینده انحصاری آنها می‌باشد

۳.۱.۵ شرکت KOBOLD

این شرکت آلمانی، سازنده انواع سیستم‌های اندازه‌گیری و کنترل می‌باشد. سیستم‌های اندازه‌گیری و کنترل شامل:

- Flow
- Pressure
- Level
- Temperature
- Humidity
- Rotation
- Conductivity
- pH – Value/Redox
- Turbidity
- Time

این شرکت سرتاسر دنیا دارای کارخانه و نمایندگی می باشد. در شکل ۵-۴ نمائی از این پراکندگی شعبات در سرتاسر دنیا آورده شده است.



شکل ۵-۴: پراکندگی شعبات و نمایندگی‌های شرکت KOBOLD در سرتاسر دنیا
مشخصات این شرکت در ذیل آورده شده است.

Tel: +49 (0) 6192-299-0

Fax: +49 (0) 6192-23398

Email address: Info.de@Kobold.com

۴.۱.۵ گروه مهرکاناز

این گروه در زمینه مشاوره و و تامین تجهیزات ابزار دقیق به عنوان نماینده رسمی چند شرکت معتبر خارجی می باشد. این شرکت در زمینه تامین دبی سنج‌های مورد نیاز صنایع مختلف از جمله، نیروگاه، پتروشیمی، فولاد، سیمان، آب و فاضلاب فعالیت دارد. شرکت‌های خارجی که گروه مهرکاناز به عنوان نماینده رسمی آنها در داخل کشور فعالیت دارند، عبارتند از:

- شرکت Heinrichs، که یک شرکت آلمانی با سابقه 100 سال در زمینه تولید دبی سنج‌های جرمی (Coriolis) فعالیت دارد.
- شرکت Sick Mailhak آلمان
- شرکت KEM آلمان، سازنده دبی سنج‌های دقیق توربینی

• شرکت Badger ، سازنده رنج وسیعی از دبی‌سنج‌های الکترومغناطیسی بوده و محصولات این شرکت در آمریکا و اروپای غربی ساخته می‌شود.

• شرکت Bronkhorst.

۵.۱.۵ شرکت Endress+Hauser

این شرکت آلمانی در سال ۱۹۵۳ توسط دکتر Georg Endress و شریکش Ludwig Hauser افتتاح شد. فعالیت این شرکت در زمینه ساخت سیستم‌های اندازه‌گیری، سطح (Level)، فشار، دبی، دما، آنالیز مایع و ... می‌باشد.

این شرکت سازنده دبی‌سنج برای سیالات مختلف مانند، مایع، گاز و بخار می‌باشد. مدل‌های مختلف دبی‌سنج که توسط این شرکت ساخته می‌شوند، عبارتند از:

• Electromagnetic

• Coriolis

• Ultrasonic

• Vortex

• Thermal

• Differential pressure

۶.۱.۵ شرکت آزمون متمم

این شرکت در زمینه ابزار دقیق، اتوماسیون، کالیبراسیون فعالیت داشته و نماینده انحصاری شرکت‌های خارجی Heinrichs, Forbes Marshall, Phonix, Sima, VSE در داخل کشور می‌باشد. این شرکت در سال ۱۳۷۰ به منظور طراحی و ساخت دستگاه‌های اندازه‌گیری دبی تاسیس گردید. تجهیزات و خدمات قابل ارائه توسط شرکت آزمون متمم عبارتند از:

• تولید و تامین تجهیزات اندازه‌گیری

• دبی‌سنج‌های صنعتی و آزمایشگاهی

• تجهیزات اندازه‌گیری سطح مایعات

• تجهیزات اندازه‌گیری فشار، اختلاف فشار و بارومتر

• تجهیزات کنترلی

• کنترل فرآیند و اتوماسیون صنعتی

- نیاز سنجی و مشاوره، طراحی و مهندسی و اجرای سیستم‌های اتوماسیون صنعتی
- تهیه و تامین تجهیزات
- کالیبراسیون دبی سنج‌ها
- کالیبراسیون دبی سنج‌های مایع
- کالیبراسیون دبی سنج‌های گاز

مشخصات این شرکت در ذیل آورده شده است.

Email: info@azmoon-flow.com

www.azmoon-flow.com

tel.: 021 44227378, 44238427

Fax: 021 44221969

۲.۵ دومین همایش گاز ایران

در اواخر خردادماه و در روزهای ۲۵ و ۲۶ از این ماه، دومین همایش گاز ایران در محل همایش‌های سازمان صدا و سیما برگزار گردید که سه نفر از دفتر پژوهش شرکت گاز استان خوزستان نیز در این همایش به عنوان نویسندگان اول یا دوم مقالات حضور یافتند؛ اسامی این نفرات عبارتند از:

- دکتر مرتضی بهبهانی‌نژاد و مهندس مازیار چنگیزیان: نویسندگان اول و دوم مقاله‌ای تحت عنوان “ شبیه‌سازی سه‌بعدی سیستم حفاظت کاتدیک لوله‌های گاز مدفون در خاک به روش المان مرزی ” (متن کامل مقاله در پیوست ب ارائه شده است).
- مهندس علی باقری: نویسنده مقاله پوستری تحت عنوان “ تحلیل جریان گذرای گاز طبیعی با استفاده از توابع تبدیل و مقایسه نتایج آن با روشهای عددی غیردائم ” (متن کامل مقاله در پیوست ب ارائه شده است).

در این همایش که با حضور پژوهشگران و محققین بسیاری از داخل و خارج کشور در تهران برگزار گردید، محورهای کلی ارائه مقالات و پوسترها در این همایش در قالب موارد ذیل بود.

- فرآیند و تبدیلات گازی
- بهینه‌سازی و مصرف انرژی

- روش‌های تأمین گاز در اوج مصرف
- حفاظت صنعتی و خوردگی
- انتقال و توزیع
- HSE
- منابع انسانی و مدیریت
- برنامه‌ریزی استراتژیک

در افتتاحیه این همایش، مهندس سیدرضا کسایی‌زاده در سمت مدیرعامل شرکت ملی گاز ایران، مهندس غلامحسین نوذری در سمت وزیرنفت و دکتر پرویز داودی با سمت معاون اولی ریاست جمهوری، به ایراد سخنانی در ارتباط با اهمیت انرژی‌های فسیلی، صرفه‌جویی، راهکارهای بهینه-سازی آن و اهمیت برگزاری چنین همایش‌هایی پرداختند.

۱.۲.۵ شبیه‌سازی سه‌بعدی سیستم حفاظت کاتدیک لوله‌های گاز مدفون در خاک به

روش المان مرزی (چکیده)

در مقاله‌ی حاضر سیستم حفاظت کاتدیک با جریان اعمالی و نیز آندفداشونده لوله‌های مدفون به صورت عددی شبیه‌سازی شده است. برای حل عددی از روش المان مرزی استفاده شده و شرایط مرزی مسئله به صورت غیرخطی تعریف شده‌اند. لوله به صورت سه‌بعدی مدل شده و به کمک نتایج مدل‌سازی توزیع پتانسیل و جریان روی تمامی نقاط لوله تعیین می‌شود. در نهایت بمنظور طراحی بهینه سیستم جریان مناسب برای حفاظت لوله (با فرض ثابت بودن تعداد و محل آندها در روش جریان اعمالی) و تعداد و چیدمان مناسب آندها (در روش آند فداشونده) تعیین می‌شوند.

۲.۲.۵ تحلیل جریان گذرای گاز طبیعی با استفاده از توابع تبدیل و مقایسه نتایج آن با

روشهای عددی غیردائم (چکیده)

جریان درون لوله‌های گاز به دلیل حضور تغییرات زمانی، ماهیتی غیردائم داشته و در بسیاری از موارد، فرض جریان دائم خطای بالایی دارد. با تحلیل جریان غیردائم گاز می‌توان به بررسی لحظه‌ای رفتار آن درون شبکه پرداخت. در این مقاله با استفاده از حوزه فرکانس، توابع تبدیل جریان غیردائم

درون لوله‌های گاز طبیعی استخراج شده و به بررسی قابلیت آن در مدلسازی جریان پرداخته می‌شود. جهت این بررسی یافته‌های روش توابع تبدیل با نتایج بدست آمده از روش‌های عددی مستقیم (نظیر الگوریتم‌های صریح و ضمنی اختلاف محدود، روش FCT، روش‌های TVD با محدودکننده) مقایسه می‌گردد. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که می‌توان از روش توابع تبدیل در حالت‌هایی که میزان تغییرات زمانی خواص جریان در آنها نسبت به حالت دائم از ۷۰ درصد تجاوز نمی‌کند، به عنوان روشی که دارای دقت مناسب و سرعت محاسباتی بسیار بیشتری نسبت به سایر روش‌های عددی تحلیل مستقیم جریان غیردائم می‌باشد استفاده کرد. البته برای حالت‌های دارای تغییرات زمانی بیش از این نیز می‌توان تا درصدهایی با در نظر گرفتن نقاط دیگری برای خطی‌سازی حول آن به نتایج دقیق و رضایت‌بخشی دست یافت.

۳.۵ کنگره‌ی جهانی علوم، مهندسی و تکنولوژی آلمان^۱

در اواخر تیرماه سال جاری از طرف دفتر پژوهش شرکت گاز استان خوزستان دو مقاله به کنگره‌ی جهانی علوم، مهندسی و تکنولوژی که در ۲۴-۲۶ سپتامبر ۲۰۰۸ در شهر هیدلبرگ آلمان برگزار شد فرستاده و مورد پذیرش واقع گردید. این دو مقاله با عناوین و نویسندگان ذیل می‌باشند.

- بهبهانی‌نژاد، م.، و باقری، ع.، "کتابخانه سیمولینکی برای شبیه‌سازی جریان غیردائم گاز درون شبکه"، تیرماه ۱۳۸۷.

این مقاله یکی از دستاوردهای حاصل از پایان‌نامه مهندس علی باقری با همکاری شرکت گاز استان خوزستان و در زمینه مدلسازی جریان غیردائم با استفاده از توابع تبدیل و تحت عنوان کامل "بررسی الگوریتم‌های مختلف حل عددی جریان غیردائم درون شبکه‌های گاز شهری و تحلیل دینامیکی یک شبکه نمونه" می‌باشد. متن لاتین مقاله ارسال به دبیرخانه کنگره، در پیوست ارائه گردیده‌است.

- بهبهانی‌نژاد، م. و شکاری، ی.، "مدلسازی رتبه کاسته جریان غیردائم گاز درون لوله‌ها"، تیرماه ۱۳۸۷.

¹ World Congress on Science, Engineering and Technology, Heidelberg, Germany

این مقاله یکی از دستاوردهای حاصل از پایان‌نامه مهندس یونس شکاری با همکاری شرکت گاز استان خوزستان و در زمینه مدل‌سازی رتبه کاسته جریان غیردائم می‌باشد. متن لاتین مقاله ارسالی به دبیرخانه کنگره، در پیوست ت ارائه گردیده‌است.

۱.۳.۵ کتابخانه سیمولینکی برای شبیه‌سازی جریان غیردائم گاز درون شبکه (چکیده)

در این مقاله شبیه‌سازی جریان غیردائم گاز برای لوله‌ها و شبکه‌ها ارائه می‌گردد. این شبیه‌سازی بر پایه مدل‌های توابع تبدیل و سیمولینک MATLAB می‌باشد. توابع تبدیل هم‌ارز معادلات حاکم و غیرخطی جریان برای انواع مختلف شرط مرزی استخراج شده و سپس یک کتابخانه سیمولینکی با در نظرگیری آن شرایط مرزی ارائه می‌شود. برای اصلاح دقت و بررسی بازدهی محاسباتی در شبیه‌سازی انجام گرفته، نتایج با یافته‌های مشابه و هم‌ارز روش‌های عددی اختلاف محدود (مانند TVD، روش خطوط و دیگر روش‌های ضمنی یا صریح اختلاف محدود) مقایسه می‌شوند. اثرات اینرسی جریان و تغییر ارتفاع لوله از سطح زمین نیز در این مدل‌سازی در نظر گرفته می‌شوند. نشان داده خواهد شد که این شبیه‌سازی دقتی مناسب داشته و از حیث محاسباتی بازدهی بیشتری نسبت به دیگر روش‌ها دارد.

۲.۳.۵ مدل‌سازی رتبه کاسته جریان غیردائم گاز درون لوله‌ها (چکیده)

در این مقاله مدل‌سازی رتبه کاسته برای جریان گذرای گاز طبیعی در لوله‌ها ارائه می‌گردد. معادلات اوایلر بعنوان معادلات حاکم در نظر گرفته شده و با استفاده از روش تجزیه شار استگر-وارمینگ حل می‌شوند. بعد، فرم خطی شده معادلات استخراج گردیده و دستگاه مقادیر ویژه متناظر بدست می‌آید. سپس تعداد کمی از مودهای ویژه برای ایجاد یک مدل رتبه کاسته مطلوب مورد استفاده واقع می‌شوند. یک حالت نمونه شناخته شده برای توضیح دقت و بازدهی محاسباتی روش ارائه شده ارائه و تحلیل می‌گردد. نتایج بدست آمده در توافقی خوب با یافته‌های روش عددی مستقیم و نتایج تجربی هستند. بعلاوه نشان داده خواهد شد که مدل رتبه کاسته حاضر نسبت به سایر تکنیک‌های عددی مرسوم بازدهی بیشتری در تحلیل جریان غیردائم گاز دارد.

۴.۵ دوازدهمین کنفرانس دینامیک شاره‌ها

هدف این کنفرانس ارائه جدیدترین دستاوردها و تحقیقات انجام گرفته در حوزه علم مکانیک سیالات است. مقالات این کنفرانس عمدتاً حاصل پایان‌نامه‌های ارشد، رساله‌های دکترا و پژوهش‌های محققان می‌باشد. با توجه به گستردگی کاربرد موضوع دینامیک شاره‌ها در علوم و فنون مختلف، شرکت‌کنندگان این کنفرانس شامل اساتید، محققان و دانشجویان رشته‌های مهندسی مکانیک، مهندسی هوا-فضا، مهندسی شیمی، مهندسی عمران، فیزیک و هواشناسی می‌باشد. دی‌ماه سال ۱۳۸۷ مقاله‌ای با عنوان، نقش تصحیح استاتیکی در مدل‌سازی رتبه‌کاسته جریان گذرا درون خطوط لوله گاز طبیعی^۱، برای ارائه بدین کنفرانس ارسال گردید که مورد پذیرش واقع شد. متن کامل این مقاله در پیوست ج ارائه شده است. این کنفرانس، اردیبهشت‌ماه سال ۱۳۸۸ در دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل برگزار می‌شود.

۱.۴.۵ نقش تصحیح استاتیکی در مدل‌سازی رتبه‌کاسته جریان گذرا درون خطوط لوله گاز طبیعی (چکیده)

در این مقاله تاثیر تصحیح استاتیکی بر مدل‌سازی رتبه‌کاسته جریان گذرا درون خطوط لوله گاز طبیعی بررسی می‌شود. پس از گسسته‌سازی معادلات حاکم و خطی‌سازی آنها حول حالت دائم، مسئله مقدار ویژه جریان تشکیل و مقادیر ویژه این مسئله محاسبه می‌شوند. با انتخاب تعداد اندکی از مودهای غالب سیستم به عنوان پایه‌های فضای رتبه‌کاسته، و بسط معادلات حاکم در این فضای جدید مدل‌سازی رتبه‌کاسته جریان صورت می‌پذیرد. سپس به منظور بهبود نتایج، اثر تصحیح استاتیکی بر مدل‌سازی رتبه‌کاسته جریان بررسی می‌شود. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که با در نظر گرفتن اثر تصحیح استاتیکی می‌توان با تعداد مودهای بسیار کمی دقت نتایج به دست آمده از مدل رتبه‌کاسته را به مقدار قابل توجهی افزایش داد.

^۱ مرتضی بهبهانی نژاد، یونس شکاری

۵.۵ کنفرانس بین‌المللی مهندسی مکانیک

این کنفرانس شامل چهار بخش ارائه مقالات علمی و صنعتی، عرضه پوستر طرح‌های برگزیده صنعتی، نمایشگاهی از جدیدترین تولیدات و دستاوردهای صنعتی و کارگاه‌های آموزشی است که با هدف گسترش مرزهای دانش و فناوری و به وجود آوردن فرصتی برای تبادل اطلاعات بین محققان و متخصصان صنعت و دانشگاه و با امید به برداشتن قدمی در حل مشکلات کشور و همچنین بررسی سیر توسعه و تحول مهندسی مکانیک در ایران برگزار می‌گردد. دی‌ماه سال ۱۳۸۷ مقاله‌ای با عنوان، تحلیل ویژه جریان گذرای گاز طبیعی درون خطوط لوله^۱، برای ارائه بدین کنفرانس ارسال گردید که مورد پذیرش واقع شد. متن کامل این مقاله در پیوست (چ) ارائه شده‌است. این کنفرانس، اردیبهشت‌ماه سال ۱۳۸۸ در دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل برگزار می‌شود.

۱.۵.۵ تحلیل ویژه جریان گذرای گاز طبیعی درون خطوط لوله (چکیده)

در این مقاله تحلیل ویژه جریان گذرای گاز طبیعی درون خطوط لوله صورت پذیرفته است. روش ضمنی تجزیه بردار شار استیگر- وارمینگ به عنوان روش حل عددی مسئله انتخاب شده‌است. به‌منظور تحلیل ویژه جریان ابتدا مدل خطی شده این روش استخراج شده و سپس بر اساس این مدل، مسئله مقدار ویژه جریان تشکیل شده‌است و مودهای ویژه جریان محاسبه شده‌اند. در نهایت مدل‌سازی رتبه‌کاسته جریان بر اساس این مودها صورت پذیرفته و در ادامه کار تاثیر ضریب اصطکاک لوله بر رفتار مقادیر ویژه جریان بررسی شده‌است. نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهند که سیستم معادلات عددی حاکم پایدار می‌باشند و با افزایش ضریب اصطکاک لوله، اندازه مودهای غالب در صفحه ۸ کوچکتر می‌شوند.

۶.۵ دومین کنفرانس لوله و خطوط انتقال نفت و گاز

جمهوری اسلامی ایران با برخورداری از ۱۴ هزار کیلومتر خطوط لوله انتقال نفت و بیش از ۲۲ هزار کیلومتر خطوط لوله انتقال گاز دارای طولانی‌ترین شبکه خطوط لوله نفت و گاز در منطقه خاورمیانه

^۱ مرتضی بهبهانی نژاد، یونس شکاری

می‌باشد. همچنین طرح‌های در دست طراحی و اجرای خط لوله در ایران (خطوط اصلی انتقال گاز شامل خطوط ۵۶ اینچ ایگات ۴، ۵، ۶، ۷، ۸ و ۹ و خطوط متعدد انتقال نفت خام و فرآورده‌های نفتی) جمهوری اسلامی ایران را به مهد صنعت لوله‌سازی و اجرای طرح‌های خط لوله در منطقه خاورمیانه و یکی از مهم‌ترین کشورهای دنیا از این نظر تبدیل کرده‌است.

از سوی دیگر شرایط منحصر به فرد ایران از نظر حجم منابع هیدروکربوری و همچنین جایگاه کشور در میان کشورهای همسایه و منطقه خاورمیانه، ایران را به شاهراه انتقال انرژی و نقطه اتصال منابع انرژی خاورمیانه و کشورهای منطقه به بازارهای اروپا و آسیای جنوب شرقی مبدل نموده است. اولین کنفرانس لوله و صنایع وابسته در تاریخ ۲۷-۲۶ تیر ماه ۱۳۸۶ باهدف آشنایی با کلیه دستاوردها، تکنولوژی‌ها، توانمندی‌ها و نیز چالش‌های موجود در صنعت لوله و خطوط انتقال نفت و گاز با حضور بیش از ۱۵۰۰ نفر از مدیران و کارشناسان برگزار گردید. با توجه به پتانسیل‌های موجود در کشور، دومین کنفرانس لوله در خردادماه سال ۱۳۸۸ در تهران برگزار می‌شود. برای شرکت در این کنفرانس در اسفندماه سال ۱۳۸۷ دو مقاله‌ی ذیل آماده و برای این کنفرانس ارسال گردید.

- مقایسه روش المان‌مرزی و روش مدار معادل در مدل‌سازی عددی سیستم‌های حفاظت کاتدیک خطوط لوله^۱ (متن کامل در پیوست ح)
- دقت و سرعت محاسباتی روش‌های عددی مختلف برای تحلیل جریان گذرای گاز طبیعی^۲ (متن کامل در پیوست خ)

۱.۶.۵ مقایسه روش المان‌مرزی و روش مدار معادل در مدل‌سازی عددی سیستم‌های

حفاظت کاتدیک خطوط لوله (چکیده)

در این مقاله دو روش مختلف برای مدل‌سازی عددی سیستم‌های حفاظت کاتدیک خطوط لوله ارائه شده‌است. روش اول، روش المان‌مرزی (BEM) و دیگری روشی ساده‌تر است که در اینجا از آن به عنوان روش مدار معادل (ECM) یاد شده‌است. جریان اعمالی لازم به منظور حفاظت خط لوله مربوطه با استفاده از هر دو روش محاسبه شده‌است. در روش المان‌مرزی از منحنی غیرخطی

^۱ مرتضی بهبهانی‌نژاد، مازیار چنگیزیان

^۲ مرتضی بهبهانی‌نژاد، یونس شکاری

پلاریزاسیون و در روش مدار معادل منحنی پلاریزاسیون خطی شده مورد استفاده قرار گرفته‌است. نتایج بدست آمده از هر دو روش با یکدیگر مقایسه شده و مزایا و معایب هر کدام از روش‌ها مورد بحث قرار گرفته‌است. این نتیجه‌گیری بدست آمده‌است که نتایج روش مدار معادل شدیداً به نحوه خطی‌سازی وابسته است. از طرف دیگر، این روش تنها با فرض فاصله‌ی بسیار زیاد لوله و آند قابل استفاده می‌باشد.

۲.۶.۵ دقت و سرعت محاسباتی روش‌های عددی مختلف برای تحلیل جریان گذرای گاز طبیعی (چکیده)

در این تحقیق دو روش برای تحلیل عددی جریان گذرای گاز طبیعی درون خطوط لوله مورد بررسی قرار گرفته‌است. روش اختلاف محدود ضمنی تجزیه بردار شار استیگر-وارمینگ و روش اختلاف محدود صریح انتقال تصحیحی شار به معادلات حاکم بر این جریان اعمال شده‌است. دو نمونه از جریان‌هایی که در عمل رخ می‌دهند، با استفاده از این دو روش تحلیل و سرعت محاسباتی روش‌های به‌کار رفته با هم مقایسه شده‌اند. نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهد که روش ضمنی تجزیه بردار شار زمان محاسباتی بسیار کمتری نسبت به روش انتقال تصحیحی شار دارد.

۶ فعالیت‌های انجام شده در هفته پژوهش

بدون شک تحولات سریع و شگفت جهانی در دهه‌های اخیر مرهون پژوهش، ژرف‌نگری، هم‌اندیشی، درون و برون‌کاوی و نوآوری صاحبان اندیشه و تخصص و آینده‌نگری و جامع‌اندیشی مدیران در زمینه‌های گوناگون می‌باشد. از اینرو به جرأت می‌توان گفت که در این عصر توسعه‌ی پایدار جز از طریق ایجاد زیرساخت‌های لازم برای تعامل بین دانشمندان و پژوهشگران از یک سو و بدنه‌ی اصلی جامعه از سوی دیگر دست یافتنی نیست. ضمن اینکه اهمیت پژوهش با توجه به نقشی که در تولید علم و فناوری و در نتیجه توسعه کشور دارد بر هیچکس پوشیده نیست ولی آنچه از اهمیت بیشتری برخوردار است هدفمندکردن پژوهش‌ها در راستای رفع نیازهای کشور، پرکردن شکاف میان تحقیق و تولید و تلاش برای برقراری ارتباط هرچه نزدیکتر بین آنها و کاربردی کردن تحقیقات است. چنان که در بیانات سال‌های اخیر مقام معظم رهبری نیز، به کرات به این موارد اشاره شده است. هفته پژوهش که از سال ۷۹ تاکنون همه ساله در کشور برگزار شده است یکی از موقعیت‌هایی است که در صورت بهره‌گیری مناسب در زمینه آسیب‌شناسی، آگاهی‌بخشی و همچنین ارائه برنامه‌های کوتاه‌مدت و بلندمدت در این زمینه‌ها مؤثر خواهد بود. همچنین هفته‌ی پژوهش و جشنواره‌های گوناگون فرصتی است تا ضمن تقدیر از پژوهشگران برجسته و فرهیخته، کلیه‌ی دستاوردهای پژوهشی و علمی این عزیزان را، چراغ راه توسعه‌ی اقتصادی و فرهنگی و اجتماعی کشور نموده و آینده‌ای روشن برای محققین جوان و سخت‌کوش ترسیم نماییم.

۱.۶ غرفه هفته پژوهش

در سالی که از سوی مقام معظم رهبری به نام سال نوآوری و شکوفایی نامگذاری شده و در آستانه سی‌امین سالگرد پیروزی شکوهمند انقلاب اسلامی، نمایشگاه دستاوردهای پژوهش و فناوری بطور همزمان با مراسم بزرگداشت هفته پژوهش از تاریخ ۱۶ لغایت ۲۰ آذرماه در استان خوزستان و در دانشگاه شهید چمران اهواز برگزار گردید. بدین ترتیب از عموم دستگاه‌های اجرایی، دانشگاه‌ها و

پژوهشگاه‌های تحقیقاتی علاقمند استان دعوت شد به احداث غرفه اقدام نمایند. 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.

اگر چه دفتر پژوهش برای برنامه‌ریزی به منظور برگزاری غرفه در تنگنای زمانی قرار گرفته بود اما با تلاش مستمر و در فرصت زمانی محدود همه فعالیت‌ها به خوبی انجام شد. بطوریکه به منظور ارائه هر چه بهتر غرفه در هفته پژوهش چندین مورد در نظر گرفته شد که در ذیل به آنها اشاره می‌شود.

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.

همچنین اکنون که زمانی نزدیک به ۲.۵ سال از تاسیس دفتر پژوهش می‌گذرد، به منظور 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 گردید که در شکل ۱-۶ و شکل ۲-۶ دیده می‌شود.



دفتر پژوهش شرکت گاز استان خوزستان



به مناسبت هفته پژوهش
۱۶ الی ۲۰ آذرماه ۸۷

تلفن داخلی دانشگاه ۵۷۴۷ و ۵۷۴۸
تلفن: ۰۶۱۱-۳۳۶۶۹۸
Email: khgcro@cu.ac.ir

نشانی صفحه لیندای این سایت به صورت ذیل می‌باشد:
www.khgcro.cu.ac.ir

همچنین این نشانی یواحسی و از طریق صفحه اصلی وبسایت دانشگاه شهید چمران (www.cu.ac.ir) و از راهگیری لینک موجود در این صفحه امکانپذیر است.

نشانی‌ها و چشم‌اندازها

با حمایت پژوهش این مرکز و شرکت گاز استان خوزستان، لاکتورن طرح‌های تطبیقاتی و پایان‌نامه‌های بسیاری در زمینه گاز طبیعی و در سطح کارشناسی و کارشناسی ارشد به مرحله انجام رسیده‌اند که در این میان چندین پایان‌نامه کارشناسی ارشد از حمایت مالی شرکت نیز برخوردار بوده‌اند.

این مرکز پیشگام خرید می‌باشد که در راستای هدف چشم‌انداز بیست ساله کشور و داشتن ایرانی سبزند در رده صنعت گاز طبیعی به فعالیت‌هایی که مایه‌اند در زمینه نوآوری‌های تکنالوژیک و مصرف گاز طبیعی فعالیت پژوهش داشته باشند همکاری نماید.

مکان

این دفتر در حال حاضر در مرحله پای 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.

رسمیات و فعالیت آنلاین

طی پژوهش شرکت گاز خوزستان در راستای صورت‌گستری دانشجویان، اساتید و محققین محتوم به فعالیت‌های جاری و پیشین این مرکز اقدام به طراحی وبسایتی پژوهشی با آرگه لینک‌های قدرتمند گزارشات ماهیانه، لیست گنجم موجود در این دفتر، طرح‌های تطبیقاتی و معرفی پرسنل و برخی خبرهای مرتبط با صنعت گاز نموده است.



شکل ۱-۶: بروشور معرفی دفتر پژوهش شرکت گاز-۱

✓ برگزاری سیمینارهای علمی جهت آشنایی اساتید و دانشجویان با مسائل و مشکلات و اولویت‌های پژوهش شرکت گاز خوزستان

✓ هدایت دانشجویان در جهت صرف‌به‌صرفه پژوهش کارشناسی، کارشناسی ارشد و دکتری



آرشیو تخصصی

در آرشیو تخصصی این مرکز گنجم تصدیفی در ارتباط با صنایع و فرآیندهای گاز طبیعی مرتبط با گاز طبیعی و جریان‌ها، پایان‌نامه‌های انجام‌شده و نیز CDهای نرم‌افزاری مرتبط با فعالیت‌های شرکت گاز در دسترس می‌باشد که می‌تواند در ارتباط با فعالیت‌های پژوهشی مرتبط مورد استفاده قرار گیرد.

اهداف

دفتر پژوهش شرکت گاز استان خوزستان با انگیزه شناسایی آخرین ترنوی‌ها و تکنولوژی‌های جدید در صنایع گاز و مرتبط با فعالیت‌های شرکت گاز استان خوزستان و نیز ایجاد یک بستر پژوهشی جهت سوق دادن فعالیت‌های تطبیقاتی احفباء هیئت علمی و دانشجویان به سمت نوآوری‌های تطبیقاتی آن شرکت تأسیس گردید. اهم اهداف فوآسری این دفتر به شرح ذیل می‌باشد:

- ✓ پیگیری و یافتن آخرین ترنوی‌ها 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 مرسات تطبیقاتی گاز در داخل و خارج کشور.
- ✓ ارائه گزارش‌های ماهیانه، سالیانه و فنی در ارتباط با فرآیندها و فعالیت‌های شرکت گاز استان خوزستان

تاریخچه

دفتر پژوهش شرکت گاز استان خوزستان به‌طور رسمی از تیرماه ۱۳۸۵ فعالیت خود را در دانشگاه مهندسی دانشگاه شهید چمران آغاز نمود. این دفتر در ابتدا با یک هدفی هیئت علمی، یک نفر دانشجوی کارشناسی ارشد و یک کارشناس کار خود را شروع کرده و در حال حاضر با کمی مشکل از یک دکتری و مهندسی مکانیک، یک کارشناس ارشد مهندسی مکانیک، یک نفر کارشناس ارشد مهندسی ترنوی و انتقال گاز و یک نفر کارشناسی شیمی به فعالیت خود ادامه می‌دهد. این مرکز با انگیزه ارتباط دوچایانه و هورچه بیشتر دانشگاه با صنعت در خصوص تطبیقات پایه و کاربردی صنعت ترنوی و مصرف گاز طبیعی تأسیس شده‌است.



شکل ۲-۶: بروشور معرفی دفتر پژوهش شرکت گاز-۲

در برگه معرفی دفتر، موارد مختلفی از جمله تاریخچه، اهداف و شرح خدمات و سایر مطالب مربوط دفتر پژوهش شرکت گاز استان خوزستان به چشم می‌خورد. ضمناً سعی بر آن شد فعالیت‌های

انجام شده توسط دفتر به شکل بروشورهای دیگری در اختیار بازدید کنندگان قرار گیرد. از طرف دیگر کلیه طرح‌های تحقیقاتی، پایان نامه‌های دانشجویی و گزارشات ماهانه مرتبط با دفتر برای مشاهده علاقمندان در غرفه قرار داده شده‌بود.

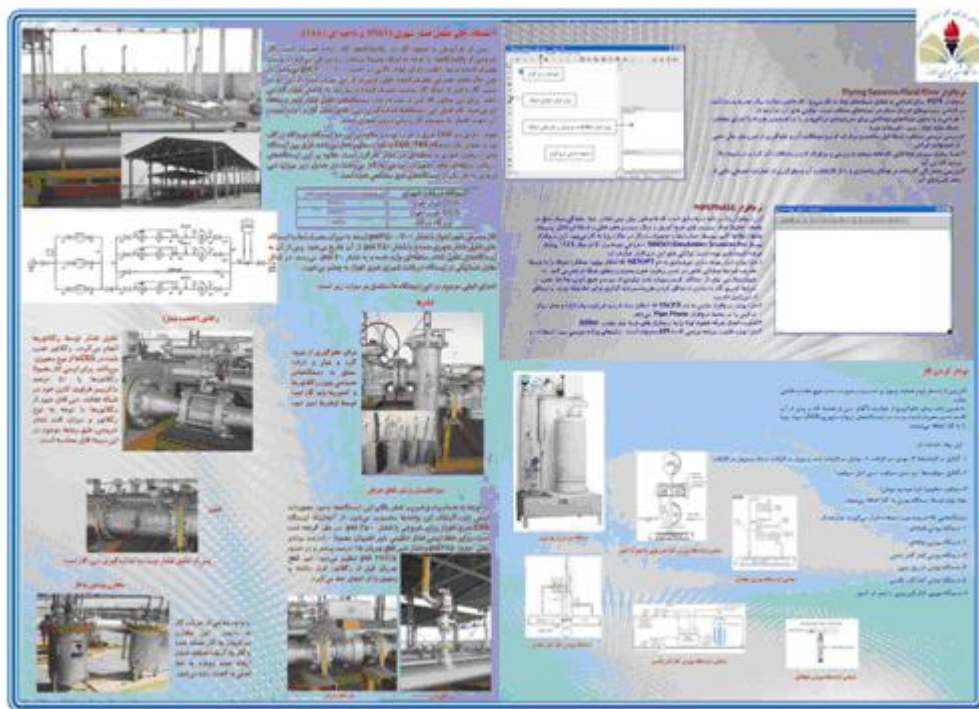
از دیگر کارهای انجام‌شده، پخش فیلم معرفی دفتر و فیلم‌های در ارتباط با صنایع گاز کشور بود، که پس از راه اندازی غرفه و مراجعه علاقه‌مندان و ابراز علاقه برای همراه داشتن اطلاعاتی در مورد فعالیت‌ها و زمینه‌های کاری دفتر، تصمیم بر آن شد که CD معرفی دفتر و فعالیت‌های آن در اختیار علاقه‌مندان قرار گیرد.

در ادامه معرفی زمینه فعالیت‌های انجام شده توسط دفتر، چندین پوستر در غرفه استفاده شد. در این پوسترها زمینه‌هایی که مورد مطالعه دفتر پژوهش قرار گرفته‌اند به طور مختصر معرفی شده‌اند. که پوستر شماره ۱ مشتمل بر موارد زیر بود.

- ایستگاه‌های تقلیل فشار شهری (CGS) و ناحیه‌ای (TBS) و اجزای اصلی موجود در این ایستگاه‌ها (فیلترها، رگولاتور(کاهنده فشار)، شیر اطمینان و شیر قطع جریان، کنتور، مخازن بودهی به گاز)

- نرم‌افزارهای مدل‌سازی جریان همچون نرم‌افزار Piping Systems Fluid Flow و نرم‌افزار PIPEPHASE

- بودارکردن گاز و دستگاه‌های بوزنی مختلف (دستگاه بوزنی فتیله‌ای، دستگاه بوزنی چکه‌ای، دستگاه بوزنی کنارگذر جذبی، دستگاه بوزنی تزریق پمپی، دستگاه بوزنی کنارگذر پالسی، دستگاه بوزنی کنارگذر پمپی با محرک کنتور)



شکل ۶-۳: پوستر شماره ۱ معرفی زمینه‌های تحقیقاتی دفتر پژوهش

در ادامه معرفی زمینه فعالیت‌های انجام شده توسط دفتر، پوستر شماره ۲ نیز مشتمل بر موارد زیر بود.

- روش‌های جلوگیری از خوردگی مثل حفاظت گالوانیکی و جریان اعمالی
- توپک، دلایل مختلف و روش‌های متعدد عملیات توپک رانی در خطوط لوله همچون توپک رانی حین عملیات و توپک رانی با توقف عملیات
- معرفی چند نمونه از پرکاربردترین کنتورهای متداول در صنایع گاز مثل کنتورهای دیافراگمی، کنتورهای توریبنی، کنتورهای آلتراسونیک، کنتورهای روزنه‌ای، کنتورهای ورتکس شدینگ



شکل ۶-۴: پوستر شماره ۲ معرفی زمینه‌های تحقیقاتی دفتر پژوهش

همچنین پوستری دیگری درباره پروژه سیستم جامع اندازه گیری شرکت گاز استان توسط نرم افزار GIS در معرض عموم قرار گرفت.

از طرف دیگر در راستای آشنایی علاقه‌مندان با توزیع شبکه انتقال گاز، نصب چهار نقشه از توزیع خطوط انتقال گاز در غرفه ممکن شد. این نقشه‌ها مشتمل بر موارد زیر بود.

۴. نقشه خطوط انتقال گاز اروپا و خاورمیانه



شکل ۶-۵: نقشه خطوط گاز اروپا و بخشی از خاورمیانه

۵. نقشه خطوط انتقال گاز و نفت ایران

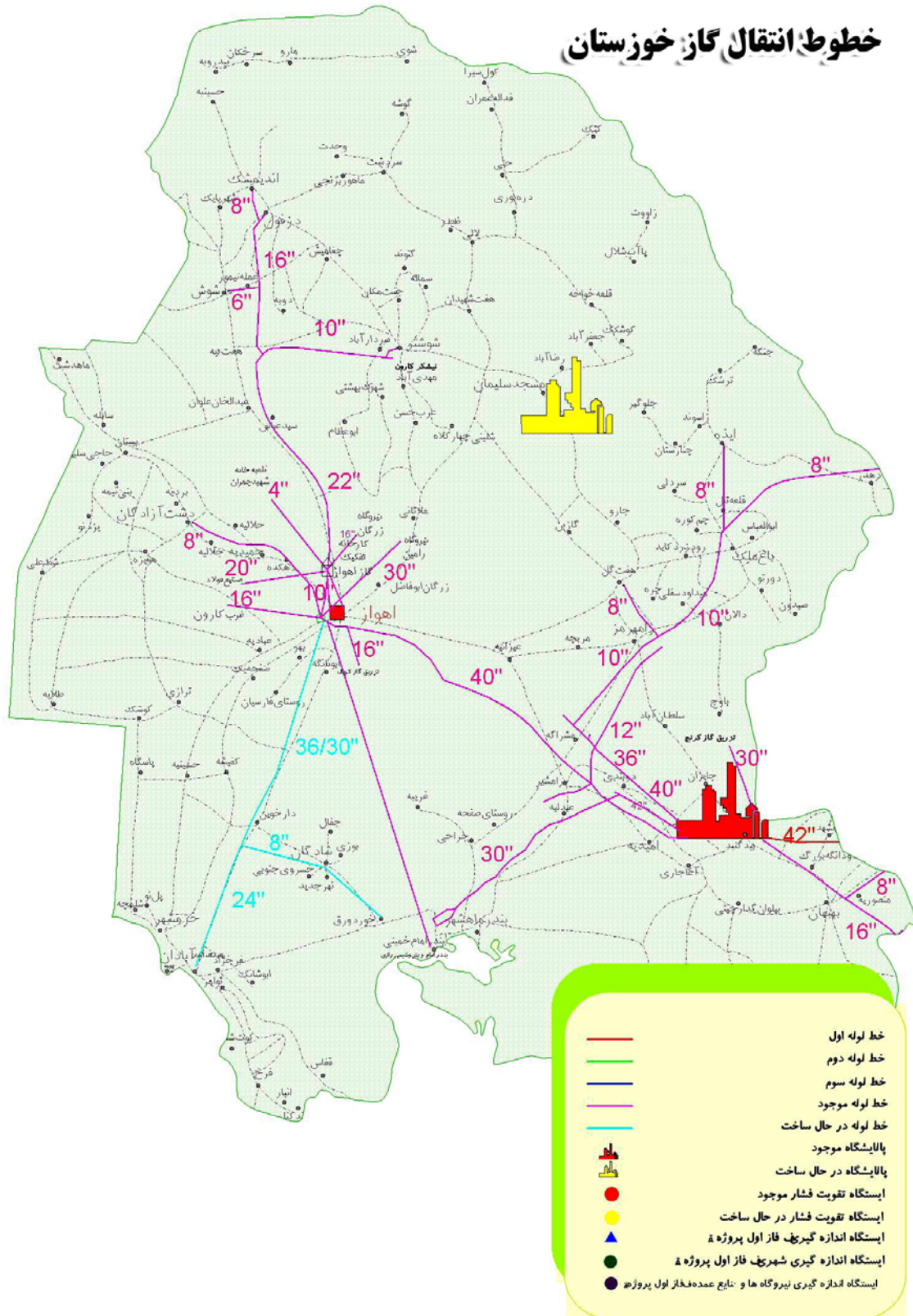


نقشه فوق توسط شرکت منطقه ۱ عملیات انتقال گاز تهیه شده است

شکل ۶-۶: نقشه خطوط انتقال گاز و نفت ایران

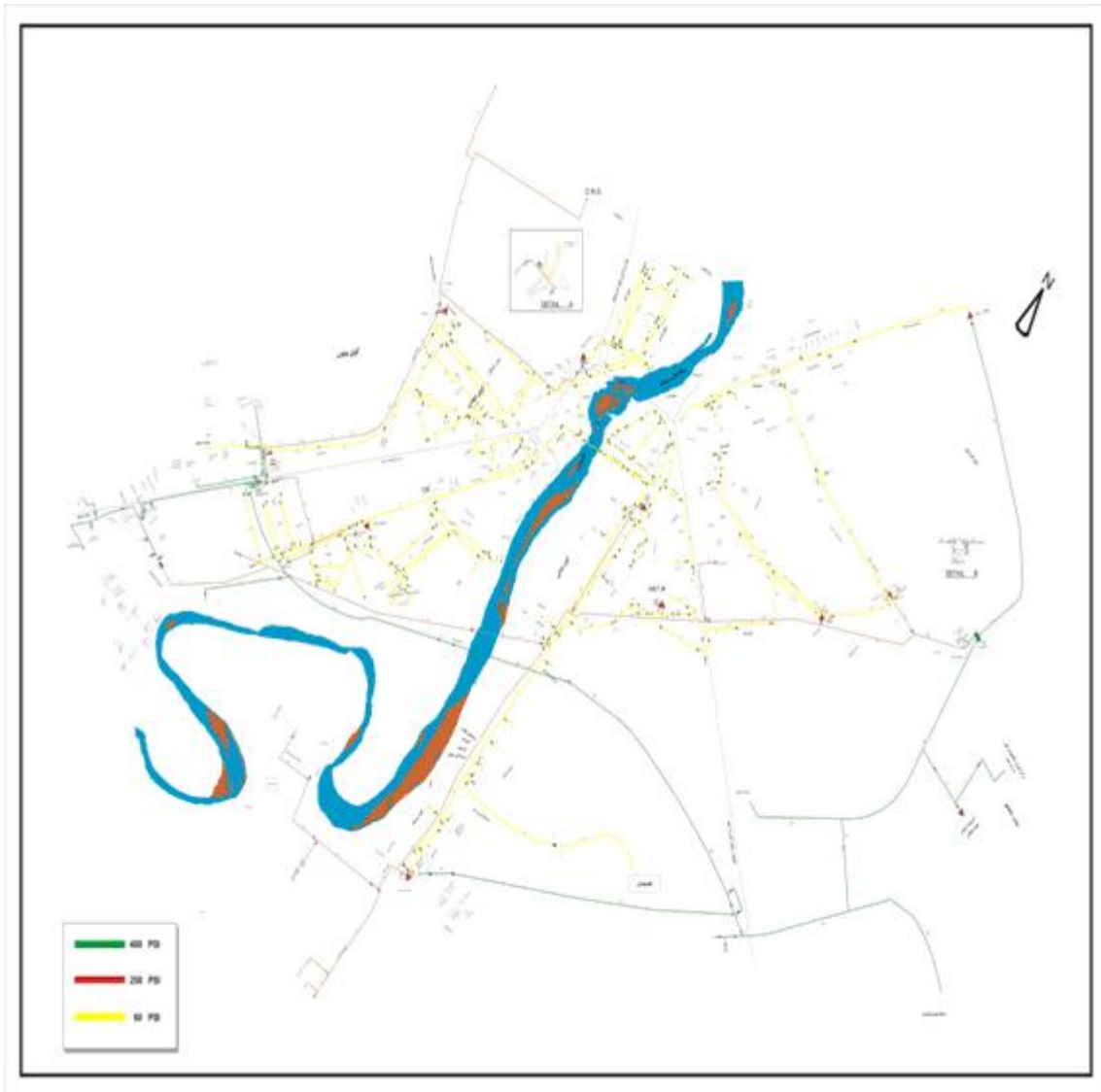
۶. نقشه خطوط انتقال گاز استان خوزستان

خطوط انتقال گاز خوزستان



شکل ۶-۷: نقشه خطوط انتقال گاز استان خوزستان

۷. نقشه شبکه توزیع گاز اهواز



شکل ۶-۸: نقشه شبکه توزیع گاز شهرستان اهواز

نکته دیگر همکاری شرکت پالایش گاز بیدبلند در برگزاری غرفه امسال بود. این شرکت به منظور آشنایی بازدیدکنندگان با در اختیار گرفتن بخشی از غرفه با امکانات مناسبی همچون تهیه بروشور، استند، برگه های معرفی پروژه های دانشجویی و فیلمی از قطعات مختلف صنایع پالایش گاز به معرفی هر چه بیشتر فعالیت های شرکت پالایش گاز بیدبلند پرداخت. نمونه ای از عکس های گرفته شده از غرفه گاز در پیوسته گردآوری شده است.

۲.۶ سمینارهای هفته پژوهش

در این قسمت سمینارهای ارائه شده در هفته پژوهش، ارائه شده است.

به منظور آشنایی هر چه بیشتر علاقه‌مندان با فعالیت‌های دفتر پژوهش، یک سمینار مرتبط با فعالیت‌های پژوهشی دفتر در هفته پژوهش تحت عنوان وضعیت حال و آینده ایستگاه‌های گاز شهری تهیه و ارائه گردید. اعم مباحث این سمینار شامل معرفی ایستگاه‌های مختلف در امر گازرسانی، وضعیت حال ایستگاه‌ها، وضعیت آتی مورد انتظار ایستگاه‌ها و ارائه راهکارهای سازنده جهت ادامه تدوین استانداردها و طراحی ایستگاه‌ها می‌باشد. اسلایدهای ارائه شده در این سمینار در پیوست ر آورده شده است.

۳.۶ منابع

[۱] گزارش ماهیانه فعالیت‌های انجام شده در آذرماه ۱۳۸۷، KHGCRO MR 1387-08، دفتر پژوهش شرکت گاز استان خوزستان، دی‌ماه ۱۳۸۷

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.

- مصارف نوین گاز طبیعی
- تکمیل بانک اطلاعاتی پژوهشگران داخلی
- بررسی روش‌های مدل‌سازی عددی سیستم‌های حفاظت کاتدیک (روش مدار معادل)
- بررسی روش‌های عددی جهت اندازه‌گیری دبی جریان در دبی‌سنج‌ها
- پوشش‌های مقاوم جهت استفاده در محیط‌های آلوده به مشتقات نفتی

۱.۷ مصارف نوین گاز طبیعی

در جهت آشنایی با تکنولوژی‌های روز دنیا در ارتباط با صنعت گاز، از طرف دفتر پژوهش شرکت گاز جستجوهای در اینترنت انجام گرفته و موضوعاتی انتخاب شده که در ذیل به آن اشاره می‌شود.

۱.۱.۷ بمباران الکترونیکی لوله‌های پلی‌اتیلن ضخیم با قطر (PE-Xe)

فرآیند زنجیره‌سازی پلی‌اتیلن به وسیله تشعشع، یک تکنولوژی کاملاً شناخته شده است. برای بیشتر از ۲۰ سال لوله‌های PE-Xc در اقطار تا ۴۰ میلیمتر و ضخامت جداره تا ۴ میلیمتر به صورت موفقیت آمیزی در بازار لوله‌های بهداشتی و گرمایشی مورد استفاده قرار گرفته است.

به کمک توسعه یک تکنولوژی جدید زنجیره سازی و به مدد تشعشع در پیوند که به وسیله تابش جمعی از الکترون‌های پر انرژی (10Mev) حاصل می‌شود، زنجیره‌های لوله پلی‌اتیلن تا قطر ۴۵۰ میلیمتر و ضخامت جداره ۴۰ میلیمتر و طول ۱۲ متر پدید می‌آید. فرآیند زنجیره‌سازی لوله‌های پلی‌اتیلن ضخیم و با قطر بزرگ به کمک توسعه یک تکنولوژی جدید ممکن شده‌است. این تکنولوژی با به‌کارگیری یک لوله انتقال جدید تشعشع در کارخانه مربوط به ساخت این لوله واقع در شهر رادبرگ آلمان، توانست لوله‌های به طول ۱۲ متر را ایجاد کند. تحقیقات انجام شده بر روی این نوع لوله‌ها که با تکنولوژی جدید و این شیوه ساخته شده‌اند، نشان داد که این لوله‌ها با وجود قطر بزرگشان دارای مقاومت بسیار خوبی در برابر رشد ترک هستند.

- لوله‌های PE-Xc یک شبکه مطمئن و ایمن

لوله‌های PE-Xc به وجود آورنده یک شبکه مطمئن هستند. این ادعا به وسیله نتایج حاصل از چند تست کنترل کیفیت، توجیه پذیر است. ایجاد شیار و ترک و رشد آنها، در مرحله نصب لوله در زمین‌هایی که خاک برگشتی آنها حاوی سنگ است و زمین دفن لوله صخره‌ای است، به‌عنوان یک رویداد اجتناب‌ناپذیر است. استفاده از لوله‌های PE-Xc جهت شبکه‌گذاری در این منطقه‌ها، توصیه می‌شود. بسیاری از مراکز شناخته شده تست، برنامه‌های تست مناسبی برای لوله‌های PE-Xc تنظیم نموده‌اند.

- Notch-Test (ISO ۱۳۴۷۹)

در این تست بر روی جداره بیرونی یک لوله به وسیله یک دستگاه مناسب شیار زنی، چهار شیار به فاصله 90° و عمق ۲۰٪ ضخامت لوله، ایجاد می‌کنند. سپس لوله تحت فشار تست و تنش معین قرار می‌گیرد تا زمانیکه لوله بترکد. زمان شکست اندازه‌گیری می‌شود که بیانگر زمان مقاومت رشد ترک لوله است.

- Test Full Notch Creep (FNCT, DIN ۵۳۴۴۴)

تست FNC در واقع یک تست کششی است که نمونه‌های Notch-Test را بکار می‌گیرد. بر روی نمونه‌های (۱۰×۱۰×۱۰mm)، شیارهای محیطی به عمق ۱/۶ میلیمتر ایجاد می‌کنند، سپس قطعه در دمای 80°C تحت تنش کششی ۴ نیوتن بر میلیمتر مربع قرار می‌گیرد.

- Test Propagation-S Rapid Crack (ISO DIS ۱۳۴۷۷)

فشار داخلی ثابتی به جداره درونی یک لوله به طول معین، وارد می‌شود. سپس به‌وسیله یک پرتابه لب تیز به یک انتهای آن ضربه وارد می‌شود. مقاومت در برابر انتشار سریع ترک به‌وسیله یک فشار بحرانی که زیر این فشار ترک ایجاد شده، انتشار سریع نیابد، مشخص می‌شود. با توسعه یک تکنولوژی زنجیره سازی بوسیله تابش در اتصالات بکمک شتاب دهنده های پر انرژی تر الکترون (10Mev)، زنجیره سازی لوله‌های پلی اتیلن تا قطر ۴۵۰ میلیمتر و ضخامت ۴۰ میلیمتر و طول ۱۲ متر ممکن می‌شود. در این روش جدید تمام اطراف لوله تحت تابش پیوسته بمباران الکترونی قرار می‌گیرد، که هم‌زمان با جابه‌جائی لوله و چرخش آن هنگام عبور از میدان تابش، خواص زنجیره سازی را تحت‌الشعاع قرار می‌دهند. لوله‌های PE-Xc در طول فرآیند نصب و در طول بهره برداری، در نتیجه خواصی چون تمایل پائین خزش، مقاومت بالا در برابر فشارهای خارجی، مقاومت بالا در برابر عوامل ایجاد و گسترش شیار و نیز افزایش مقاومت شیمیایی و دمایی، شبکه تضمین شده‌ای را فراهم می‌کنند. قابلیت زنجیره سازی لوله‌های PE تا قطر ۴۵۰ میلیمتر، کاربردهای صنعتی لوله PE-X در ایجاد شبکه های آب رسانی و گازرسانی را به نحو چشمگیری افزایش خواهد داد.

۲.۱.۷ اتصال به اینترنت از طریق گاز

محققان می‌گویند: می‌توان از شبکه‌های گاز خانگی برای ارسال سیگنال‌های فرابهن باند استفاده کرد. به گزارش ایلنا، تصور این که کاربران اینترنت برای اتصال به شبکه از لوله‌های گاز منزل خود استفاده کنند تا حد زیادی عجیب و شاید خنده‌دار به نظر می‌رسد.

اما محققان یک شرکت در سانتیاگوی آمریکا به اسم نترکام سرگرم طراحی روشی برای استفاده از سیگنال‌های بی‌سیم فرابهن باند جهت انتقال داده‌ها از طریق لوله‌های گاز طبیعی با سرعت پهن باند هستند.

محققان شرکت نترکام ادعا می‌کنند: فناوری جدید این شرکت امکان دسترسی به اینترنت با سرعت ۱۰۰ مگابیت بر ثانیه در خانه‌های کاربران را فراهم می‌کند، چنین سرعتی امکان دریافت فایل‌های صوتی و ویدیویی در زمان خیلی کوتاه را فراهم می‌کند.

البته کارشناسان می‌گویند: هنوز چنین فناوری صرفاً یک ادعا بوده و عملاً به کار گرفته نشده‌است. اما نحوه عمل فناوری پهن باند از طریق لوله‌های گاز چگونه است؟ شرکت نترکام از

انتقال دهنده‌ها و گیرنده‌های رادیویی فرابهن باند برای ارسال سیگنال‌های بی‌سیم از طریق لوله‌ها در هنگام جریان گاز استفاده می‌کند.

فرابهن باند یا UWB یک فناوری ارتباطی در حال توسعه است که داده‌های شبکه‌ای را با سرعت خیلی بالایی ارسال می‌کند، اما در سطوح توان بالاتر ممکن است با سیگنال‌های بی‌سیم تداخل کند. اما این مشکل هنگامی که سیگنال‌های فرابهن باند از طریق لوله‌های گاز دفن شده ارسال می‌شود پیش نمی‌آید، در نتیجه می‌توان بدون آن که تداخلی ایجاد شود حجم بالایی از داده را از طریق لوله‌های گاز منتقل کرد. در حالی که بسیاری ایده محققان شرکت نترکام را خنده‌دار می‌دانند این محققان همچنان مصمم هستند که در آینده نه چندان دور طرح خود را عملی کنند. در صورتی که این فناوری عملی شود و اینترنت پرسرعت از طریق لوله‌های گاز به خانه‌های کاربران بیاید، می‌توان منتظر تحولات اساسی در بازار دسترسی به پهن باند بود.

۲.۷ تکمیل بانک اطلاعاتی پژوهشگران داخلی

بانک اطلاعاتی تهیه شده شامل اطلاعاتی از قبیل نام، نام‌خانوادگی، رتبه‌ی علمی، رشته‌ی تحصیلی، دانشگاه محل تدریس، ایمیل، شماره تلفن، فاکس، زمینه‌های تحقیقاتی و پروژه‌های تحقیقاتی است. تاکنون اطلاعات ۲۰۰۶ تن از این پژوهشگران در این بانک موجود می‌باشد، تمامی این اطلاعات با مراجعه به سایت‌های دانشگاه‌های مختلف جمع‌آوری گردیده‌است و به علت به روز نبودن برخی از این سایت‌ها دستیابی به برخی از این اطلاعات مقدور نبوده‌است. به همین علت برای دستیابی به اطلاعات مذکور در ابتدا مجدداً به سایت مربوطه مراجعه شد و در صورت به روز نبودن سایت، طی ارسال ایمیلی به اساتید مربوطه از آنها درخواست شد که رزومه‌ای از فعالیت‌های پژوهشی خود را در صورت تمایل به ایمیل دفتر پژوهش شرکت گاز ارسال نمایند. تاکنون به ۸۸ نفر از این پژوهشگران که رزومه‌ی آنها در سایت موجود نبوده‌است ایمیل ارسال شده‌است که از میان آنها فقط سه نفر به این ایمیل پاسخ داده‌اند. پیگیری جهت دریافت رزومه همچنان ادامه خواهد یافت. در ادامه اطلاعات موجود در این بانک به‌طور خلاصه و به تفکیک دانشگاه‌ها و دستگاه‌های اجرایی ارائه شده‌است. نسخه‌ی کامل این بانک همراه با یک لوح فشرده به‌این گذارش ضمیمه شده‌است.

۱.۲.۷ دانشگاه تهران

اطلاعات مربوط به ۲۲۲ نفر از اعضای هیئت‌علمی دانشگاه تهران در زمینه‌های تخصصی مختلف تاکنون وارد بانک اطلاعاتی شده‌است. تعداد اعضای هیئت‌علمی رشته‌های مختلف در ذیل آورده شده‌است:

- ۳۰ نفر مربوط به دانشکده مکانیک
- ۳۸ نفر مربوط به دانشکده عمران
- ۱۴ نفر مربوط به دانشکده صنایع
- ۵۹ نفر مربوط به دانشکده برق و کامپیوتر
- ۱۱ نفر مربوط به دانشکده نقشه برداری
- ۲۲ نفر مربوط به دانشکده متالورژی و مواد
- ۱۵ نفر مربوط به دانشکده معدن
- ۳۳ نفر مربوط به دانشکده مهندسی شیمی

۲.۲.۷ دانشگاه صنعتی شریف

اطلاعات مربوط به ۲۰۶ نفر از اعضای هیئت علمی دانشگاه شریف در زمینه‌های تخصصی مختلف تا کنون وارد بانک اطلاعاتی شده است. تعداد اعضای هیئت علمی رشته‌های مختلف مطابق زیر می‌باشد:

- ۳۲ نفر مربوط به دانشکده مکانیک
- ۳۶ نفر مربوط به دانشکده عمران
- ۱۶ نفر مربوط به دانشکده هوا فضا
- ۳۱ نفر مربوط به دانشکده مهندسی شیمی
- ۵۴ نفر مربوط به دانشکده برق
- ۲۱ نفر مربوط به دانشکده کامپیوتر
- ۱۶ نفر مربوط به دانشکده صنایع

۳.۲.۷ دانشگاه تربیت مدرس

اطلاعات مربوط به ۹۹ نفر از اعضای هیئت علمی دانشگاه تربیت مدرس در زمینه‌های تخصصی مختلف تاکنون وارد بانک اطلاعاتی شده است. تعداد اعضای هیئت علمی رشته‌های مختلف مطابق زیر می‌باشد:

- ۱۷ نفر مربوط به دانشکده مکانیک
- ۱۷ نفر مربوط به دانشکده مهندسی شیمی
- ۲۱ نفر مربوط به دانشکده عمران
- ۲۳ نفر مربوط به دانشکده برق و کامپیوتر
- ۱۱ نفر مربوط به دانشکده مواد
- ۶ نفر مربوط به دانشکده معدن

- ۴ نفر نفر مربوط به دانشکده صنایع

۴.۲.۷ دانشگاه اراک

اطلاعات مربوط به ۲۲ نفر از اعضای هیئت علمی دانشگاه اراک در زمینه‌های تخصصی مختلف تاکنون وارد بانک اطلاعاتی شده است. تعداد اعضای هیئت علمی رشته‌های مختلف مطابق زیر می‌باشد:

- ۵ نفر مربوط به گروه مهندسی شیمی
- ۴ نفر مربوط به گروه مهندسی عمران
- ۷ نفر مربوط به گروه مهندسی مکانیک
- ۲ نفر مربوط به گروه مهندسی برق
- ۱ نفر مربوط به گروه مهندسی صنایع
- ۲ نفر مربوط به گروه معدن و زمین‌شناسی

۵.۲.۷ دانشگاه ارومیه

اطلاعات مربوط به ۳۱ نفر از اعضای هیئت علمی دانشگاه ارومیه در زمینه‌های تخصصی مختلف تاکنون وارد بانک اطلاعاتی شده است. تعداد اعضای هیئت علمی رشته‌های مختلف مطابق زیر می‌باشد:

- ۹ نفر مربوط به گروه مهندسی برق
- ۸ نفر مربوط به گروه مهندسی عمران
- ۸ نفر مربوط به گروه مهندسی مکانیک
- ۲ نفر مربوط به گروه مهندسی کامپیوتر
- ۴ نفر مربوط به گروه مهندسی معدن

۶.۲.۷ دانشگاه اصفهان

اطلاعات مربوط به ۳۷ نفر از اعضای هیئت علمی دانشگاه اصفهان در زمینه‌های تخصصی مختلف تاکنون وارد بانک اطلاعاتی شده است. تعداد اعضای هیئت علمی رشته‌های مختلف مطابق زیر می‌باشد:

- ۵ نفر مربوط به گروه مهندسی عمران
- ۱۳ نفر مربوط به گروه مهندسی کامپیوتر
- ۸ نفر مربوط به گروه مهندسی شیمی

- ۴ نفر مربوط به گروه مهندسی پزشکی
- ۶ نفر مربوط به گروه مهندسی برق

۷.۲.۷ دانشگاه امیرکبیر

اطلاعات مربوط به ۱۷۱ نفر از اعضای هیئت علمی دانشگاه امیرکبیر در زمینه‌های تخصصی مختلف تاکنون وارد بانک اطلاعاتی شده است. تعداد اعضای هیئت علمی رشته‌های مختلف در ذیل آورده شده است:

- ۱۷ نفر مربوط به دانشکده مهندسی معدن
- ۱۱ نفر مربوط به دانشکده مهندسی متالورژی
- ۳۸ نفر مربوط به دانشکده مهندسی مکانیک
- ۲۶ نفر مربوط به دانشکده مهندسی کامپیوتر
- ۱۹ نفر مربوط به دانشکده مهندسی شیمی
- ۴۰ نفر مربوط به دانشکده مهندسی برق
- ۵ نفر مربوط به دانشکده مهندسی صنایع
- ۱۵ نفر مربوط به دانشکده مهندسی هوافضا

۸.۲.۷ دانشگاه ایلام

اطلاعات مربوط به ۴ نفر از اعضای هیئت علمی دانشگاه ایلام در زمینه‌های تخصصی مختلف تاکنون وارد بانک اطلاعاتی شده است.

۹.۲.۷ دانشگاه بابل

اطلاعات مربوط به ۲ نفر از اعضای هیئت علمی دانشگاه بابل در زمینه‌های تخصصی مختلف تاکنون وارد بانک اطلاعاتی شده است.

۱۰.۲.۷ دانشگاه بوعلی سینا

اطلاعات مربوط به ۳۱ نفر از اعضای هیئت علمی دانشگاه بوعلی سینا در زمینه‌های تخصصی مختلف تاکنون وارد بانک اطلاعاتی شده است. تعداد اعضای هیئت علمی رشته‌های مختلف در ذیل آورده شده است:

- ۱۰ نفر مربوط به گروه مهندسی مکانیک
- ۶ نفر مربوط به گروه مهندسی صنایع

- ۳ نفر مربوط به گروه مهندسی برق
- ۴ نفر مربوط به گروه مهندسی کامپیوتر
- ۸ نفر مربوط به گروه مهندسی عمران

۱۱.۲.۷ دانشگاه تبریز

اطلاعات مربوط به ۸۲ نفر از اعضای هیئت علمی دانشگاه تبریز در زمینه‌های تخصصی مختلف تاکنون وارد بانک اطلاعاتی شده است. تعداد اعضای هیئت علمی رشته‌های مختلف در ذیل آورده شده است:

- ۱۸ نفر مربوط به گروه مهندسی مکانیک
- ۲۹ نفر مربوط به گروه مهندسی عمران
- ۲۲ نفر مربوط به گروه مهندسی برق
- ۳ نفر مربوط به گروه مهندسی فناوری اطلاعات
- ۵ نفر مربوط به گروه مهندسی ساخت و تولید
- ۳ نفر مربوط به گروه مهندسی مواد
- ۲ نفر مربوط به گروه مهندسی شیمی

۱۲.۲.۷ دانشگاه تربیت معلم

اطلاعات مربوط به ۷ نفر از اعضای هیئت علمی دانشگاه تربیت معلم در زمینه‌های تخصصی مختلف تاکنون وارد بانک اطلاعاتی شده است.

۱۳.۲.۷ دانشکده نفت تهران

اطلاعات مربوط به ۷ نفر از اعضای هیئت علمی دانشکده نفت تهران در زمینه‌های تخصصی مختلف تاکنون وارد بانک اطلاعاتی شده است.

۱۴.۲.۷ دانشگاه رازی کرمانشاه

اطلاعات مربوط به ۳۹ نفر از اعضای هیئت علمی دانشگاه رازی کرمانشاه در زمینه‌های تخصصی مختلف تاکنون وارد بانک اطلاعاتی شده است. تعداد اعضای هیئت علمی رشته‌های مختلف در ذیل آورده شده است:

- ۱۰ نفر مربوط به گروه مهندسی شیمی
- ۵ نفر مربوط به گروه مهندسی برق

- ۶ نفر مربوط به گروه مهندسی کامپیوتر
- ۴ نفر مربوط به گروه مهندسی عمران
- ۱۴ نفر مربوط به گروه مهندسی مکانیک

۱۵.۲.۷ دانشگاه زنجان

اطلاعات مربوط به ۳۴ نفر از اعضای هیئت علمی دانشگاه زنجان در زمینه‌های تخصصی مختلف تاکنون وارد بانک اطلاعاتی شده است. تعداد اعضای هیئت علمی رشته‌های مختلف در ذیل آورده شده است:

- ۱۰ نفر مربوط به گروه مهندسی عمران
- ۱۰ نفر مربوط به گروه مهندسی برق
- ۶ نفر مربوط به گروه مهندسی مکانیک
- ۲ نفر مربوط به گروه مهندسی کامپیوتر
- ۲ نفر مربوط به گروه مهندسی نقشه‌برداری
- ۴ نفر مربوط به گروه مهندسی معماری

۱۶.۲.۷ دانشگاه سیستان و بلوچستان

اطلاعات مربوط به ۲۷ نفر از اعضای هیئت علمی دانشگاه سیستان و بلوچستان در زمینه‌های تخصصی مختلف تاکنون وارد بانک اطلاعاتی شده است. تعداد اعضای هیئت علمی رشته‌های مختلف در ذیل آورده شده است:

- ۵ نفر مربوط به گروه مهندسی مکانیک
- ۶ نفر مربوط به گروه مهندسی عمران
- ۹ نفر مربوط به گروه مهندسی شیمی
- ۲ نفر مربوط به گروه مهندسی مواد
- ۵ نفر مربوط به گروه مهندسی برق

۱۷.۲.۷ دانشگاه شاهد

اطلاعات مربوط به ۱۰ نفر از اعضای هیئت علمی دانشگاه شاهد در زمینه‌های تخصصی مختلف تاکنون وارد بانک اطلاعاتی شده است.

۱۸.۲.۷ دانشگاه شهرکرد

اطلاعات مربوط به ۱۵ نفر از اعضای هیئت علمی دانشگاه شهرکرد در زمینه‌های تخصصی مختلف تاکنون وارد بانک اطلاعاتی شده‌است. تعداد اعضای هیئت علمی رشته‌های مختلف در ذیل آورده شده‌است:

- ۸ نفر مربوط به گروه مهندسی مکانیک
- ۶ نفر مربوط به گروه مهندسی برق
- ۱ نفر مربوط به گروه مهندسی مواد

۱۹.۲.۷ دانشگاه شهید باهنر کرمان

اطلاعات مربوط به ۴۹ نفر از اعضای هیئت علمی دانشگاه شهید باهنر کرمان در زمینه‌های تخصصی مختلف تاکنون وارد بانک اطلاعاتی شده‌است. تعداد اعضای هیئت علمی رشته‌های مختلف در ذیل آورده شده‌است:

- ۹ نفر مربوط به گروه مهندسی مکانیک
- ۱۵ نفر مربوط به گروه مهندسی معدن
- ۱۳ نفر مربوط به گروه مهندسی عمران
- ۷ نفر مربوط به گروه مهندسی شیمی
- ۲ نفر مربوط به گروه مهندسی برق
- ۳ نفر مربوط به گروه مهندسی صنایع

۲۰.۲.۷ دانشگاه شهید بهشتی

اطلاعات مربوط به ۲۶ نفر از اعضای هیئت علمی دانشگاه شهید بهشتی در زمینه‌های تخصصی مختلف تاکنون وارد بانک اطلاعاتی شده‌است. تعداد اعضای هیئت علمی رشته‌های مختلف در ذیل آورده شده‌است:

- ۱۳ نفر مربوط به گروه مهندسی کامپیوتر
- ۱۲ نفر مربوط به گروه مهندسی برق

۲۱.۲.۷ دانشگاه شهید چمران

اطلاعات مربوط به ۲۷ نفر از اعضای هیئت علمی دانشگاه شهید چمران در زمینه‌های تخصصی مختلف تاکنون وارد بانک اطلاعاتی شده‌است. تعداد اعضای هیئت علمی رشته‌های مختلف در ذیل آورده شده‌است:

- ۸ نفر مربوط به گروه مهندسی مکانیک
- ۹ نفر مربوط به گروه مهندسی برق
- ۶ نفر مربوط به گروه مهندسی عمران
- ۲ نفر مربوط به گروه مهندسی متالورژی
- ۲ نفر مربوط به گروه مهندسی کامپیوتر

۲۲.۲.۷ دانشگاه شیراز

اطلاعات مربوط به ۹۲ نفر از اعضای هیئت علمی دانشگاه شیراز در زمینه‌های تخصصی مختلف تاکنون وارد بانک اطلاعاتی شده‌است. تعداد اعضای هیئت علمی رشته‌های مختلف در ذیل آورده شده‌است:

- ۱۷ نفر مربوط به گروه مهندسی مکانیک
- ۲۰ نفر مربوط به گروه مهندسی برق
- ۱۴ نفر مربوط به گروه مهندسی راه و ساختمان
- ۱۳ نفر مربوط به گروه مهندسی شیمی
- ۱۴ نفر مربوط به گروه مهندسی مواد
- ۱۰ نفر مربوط به گروه مهندسی کامپیوتر
- ۴ نفر مربوط به گروه مهندسی هسته‌ای

۲۳.۲.۷ دانشگاه صنعتی اصفهان

اطلاعات مربوط به ۱۲۶ نفر از اعضای هیئت علمی دانشگاه صنعتی اصفهان در زمینه‌های تخصصی مختلف تاکنون وارد بانک اطلاعاتی شده‌است. تعداد اعضای هیئت علمی رشته‌های مختلف در ذیل آورده شده‌است:

- ۳۱ نفر مربوط به گروه مهندسی برق
- ۱۰ نفر مربوط به گروه مهندسی کامپیوتر
- ۱۷ نفر مربوط به گروه مهندسی شیمی

- ۱۲ نفر مربوط به گروه مهندسی صنایع
- ۱۹ نفر مربوط به گروه مهندسی عمران
- ۲۴ نفر مربوط به گروه مهندسی مواد
- ۱۳ نفر مربوط به گروه مهندسی نساجی

۲۴.۲.۷ دانشگاه صنعتی سهند تبریز

اطلاعات مربوط به ۳۷ نفر از اعضای هیئت علمی دانشگاه صنعتی سهند تبریز در زمینه‌های تخصصی مختلف تاکنون وارد بانک اطلاعاتی شده‌است. تعداد اعضای هیئت علمی رشته‌های مختلف در ذیل آورده شده‌است:

- ۱۰ نفر مربوط به گروه مهندسی برق
- ۱ نفر مربوط به گروه مهندسی کامپیوتر
- ۴ نفر مربوط به گروه مهندسی پلیمر
- ۵ نفر مربوط به گروه مهندسی شیمی
- ۴ نفر مربوط به گروه مهندسی مواد
- ۳ نفر مربوط به گروه مهندسی معدن
- ۴ نفر مربوط به گروه مهندسی عمران
- ۵ نفر مربوط به گروه مهندسی مکانیک

۲۵.۲.۷ دانشگاه صنعتی شیراز

اطلاعات مربوط به ۲۲ نفر از اعضای هیئت علمی دانشگاه صنعتی شیراز در زمینه‌های تخصصی مختلف تاکنون وارد بانک اطلاعاتی شده‌است. تعداد اعضای هیئت علمی رشته‌های مختلف در ذیل آورده شده‌است:

- ۱۲ نفر مربوط به گروه مهندسی برق
- ۳ نفر مربوط به گروه مهندسی شیمی
- ۳ نفر مربوط به گروه مهندسی کامپیوتر
- ۳ نفر مربوط به گروه مهندسی مکانیک
- ۱ نفر مربوط به گروه مهندسی عمران

۲۶.۲.۷ دانشگاه علم و صنعت

اطلاعات مربوط به ۲۳۰ نفر از اعضای هیئت علمی دانشگاه علم و صنعت در زمینه‌های تخصصی مختلف تاکنون وارد بانک اطلاعاتی شده‌است. تعداد اعضای هیئت علمی رشته‌های مختلف در ذیل آورده شده‌است:

- ۴۶ نفر مربوط به گروه مهندسی برق
- ۳۳ نفر مربوط به گروه مهندسی مکانیک
- ۲۱ نفر مربوط به گروه مهندسی صنایع
- ۱۲ نفر مربوط به گروه مهندسی شیمی
- ۳۴ نفر مربوط به گروه مهندسی مواد
- ۱۳ نفر مربوط به گروه مهندسی کامپیوتر
- ۱۹ نفر مربوط به گروه مهندسی راه آهن
- ۳۳ نفر مربوط به گروه مهندسی عمران

۲۷.۲.۷ دانشگاه فردوسی مشهد

اطلاعات مربوط به ۱۳۵ نفر از اعضای هیئت علمی دانشگاه فردوسی مشهد در زمینه‌های تخصصی مختلف تاکنون وارد بانک اطلاعاتی شده‌است. تعداد اعضای هیئت علمی رشته‌های مختلف در ذیل آورده شده‌است:

- ۱۴ نفر مربوط به گروه مهندسی مواد
- ۳۱ نفر مربوط به گروه مهندسی مکانیک
- ۳۵ نفر مربوط به گروه مهندسی برق
- ۱۴ نفر مربوط به گروه مهندسی شیمی
- ۲۶ نفر مربوط به گروه مهندسی عمران
- ۱۴ نفر مربوط به گروه مهندسی کامپیوتر
- ۱ نفر مربوط به گروه مهندسی صنایع

۲۸.۲.۷ دانشگاه کاشان

اطلاعات مربوط به ۲۲ نفر از اعضای هیئت علمی دانشگاه کاشان در زمینه‌های تخصصی مختلف تاکنون وارد بانک اطلاعاتی شده‌است. تعداد اعضای هیئت علمی رشته‌های مختلف در ذیل آورده شده‌است:

- ۸ نفر مربوط به گروه مهندسی مکانیک
- ۳ نفر مربوط به گروه مهندسی برق
- ۴ نفر مربوط به گروه مهندسی شیمی
- ۲ نفر مربوط به گروه مهندسی معدن
- ۵ نفر مربوط به گروه مهندسی کامپیوتر

۲۹.۲.۷ دانشگاه کردستان

اطلاعات مربوط به ۱۰ نفر از اعضای هیئت علمی دانشگاه کردستان در زمینه‌های تخصصی مختلف تاکنون وارد بانک اطلاعاتی شده است.

۳۰.۲.۷ دانشگاه گیلان

اطلاعات مربوط به ۴۱ نفر از اعضای هیئت علمی دانشگاه گیلان در زمینه‌های تخصصی مختلف تاکنون وارد بانک اطلاعاتی شده است. تعداد اعضای هیئت علمی رشته‌های مختلف در ذیل آورده شده است:

- ۸ نفر مربوط به گروه مهندسی برق
- ۲ نفر مربوط به گروه مهندسی کامپیوتر
- ۱۶ نفر مربوط به گروه مهندسی عمران
- ۲ نفر مربوط به گروه مهندسی شیمی
- ۶ نفر مربوط به گروه مهندسی مکانیک
- ۶ نفر مربوط به گروه مهندسی نساجی

۳۱.۲.۷ دانشگاه لرستان

اطلاعات مربوط به ۴ نفر از اعضای هیئت علمی دانشگاه کردستان در زمینه‌های تخصصی مختلف تاکنون وارد بانک اطلاعاتی شده است. تعداد اعضای هیئت علمی رشته‌های مختلف در ذیل آورده شده است:

- ۲ نفر مربوط به گروه مهندسی الکترونیک
- ۱ نفر مربوط به گروه مهندسی معدن
- ۱ نفر مربوط به گروه مهندسی عمران

۳۲.۲.۷ دانشگاه خواجه نصیر طوسی

اطلاعات مربوط به ۱۴۹ نفر از اعضای هیئت علمی دانشگاه خواجه نصیر طوسی در زمینه‌های تخصصی مختلف تاکنون وارد بانک اطلاعاتی شده‌است. تعداد اعضای هیئت علمی رشته‌های مختلف در ذیل آورده شده‌است:

- ۴۱ نفر مربوط به گروه مهندسی مکانیک
- ۲۵ نفر مربوط به گروه مهندسی عمران
- ۱۰ نفر مربوط به دانشکده هوا فضا
- ۱۱ نفر مربوط به گروه مهندسی صنایع
- ۲۱ نفر مربوط به گروه مهندسی نقشه‌برداری
- ۴۱ نفر مربوط به گروه مهندسی برق

۳۳.۲.۷ دانشکده نفت اهواز

اطلاعات مربوط به ۱۳ نفر از اعضای هیئت علمی دانشکده نفت اهواز در زمینه‌های تخصصی مختلف تاکنون وارد بانک اطلاعاتی شده‌است. تعداد اعضای هیئت علمی رشته‌های مختلف در ذیل آورده شده‌است:

- ۸ نفر مربوط به گروه مهندسی شیمی
- ۱ نفر مربوط به گروه مهندسی برق
- ۴ نفر مربوط به گروه مهندسی نفت

۳۴.۲.۷ دانشکده نفت آبادان

اطلاعات مربوط به ۷ نفر از اعضای هیئت علمی دانشکده نفت آبادان در زمینه‌های تخصصی مختلف تاکنون وارد بانک اطلاعاتی شده‌است. تعداد اعضای هیئت علمی رشته‌های مختلف در ذیل آورده شده‌است:

- ۲ نفر مربوط به گروه مهندسی شیمی
- ۴ نفر مربوط به گروه مهندسی مکانیک

۳۵.۲.۷ دانشگاه یزد

اطلاعات مربوط به ۴۴ نفر از اعضای هیئت علمی دانشگاه یزد در زمینه‌های تخصصی مختلف تاکنون وارد بانک اطلاعاتی شده‌است. تعداد اعضای هیئت علمی رشته‌های مختلف در ذیل آورده شده‌است:

- ۷ نفر مربوط به گروه مهندسی عمران
- ۵ نفر مربوط به گروه مهندسی کامپیوتر
- ۶ نفر مربوط به گروه مهندسی برق
- ۳ نفر مربوط به گروه مهندسی مواد
- ۱۱ نفر مربوط به گروه مهندسی مکانیک
- ۵ نفر مربوط به گروه مهندسی معدن
- ۶ نفر مربوط به گروه مهندسی نساجی
- ۱ نفر مربوط به گروه مهندسی صنایع

۳.۷ بررسی روش‌های مدل‌سازی عددی سیستم‌های حفاظت کاتدیک (روش

مدار معادل)

بررسی روش‌های مدل‌سازی و طراحی سیستم‌های حفاظت کاتدیک یکی از سرفصل‌های اصلی دفتر پژوهش شرکت گاز می‌باشد. در این راستا نیز تاکنون اقدامات گسترده‌ای انجام گرفته که ماحصل آن چندین مقاله علمی ارائه شده در کنفرانس‌های بین‌المللی داخلی می‌باشد. یکی از مطرح‌ترین روش‌ها در مدل‌سازی عددی سیستم‌های حفاظت کاتدیک روش المان‌مرزی می‌باشد. عمده‌ی فعالیت‌های انجام شده در دفتر نیز با تکیه بر این روش به تحلیل و بررسی سیستم‌های حفاظت کاتدیک پرداخته‌است. نحوه‌ی مدل‌سازی، فرضیات و پارامترهای مهم در مدل‌سازی به تفصیل در گزارش‌های سال ۱۳۸۶ ارائه شده‌است. در این بخش هدف بررسی روشی دیگر در مدل‌سازی سیستم‌های حفاظت کاتدیک بوده که مبتنی بر استفاده از مدارهای معادل می‌باشد. بدین منظور برای درک بهتر تفاوت دو روش مذکور ابتدا روش المان‌مرزی مختصر معرفی شده و در نهایت روش مدارهای معادل تشریح خواهد شد.

۱.۳.۷ مروری بر روش المان‌مرزی در مدل‌سازی CP

با توجه به مطالعات انجام گرفته در باب ماهیت الکتروشیمی پدیده‌ی خوردگی الکتروشیمیایی، معادله‌ی حاکم بر این پدیده همان معادله‌ی لاپلاس مطابق با رابطه‌ی زیر می‌باشد.

$$\nabla^2 \phi = 0 \quad (1-7)$$

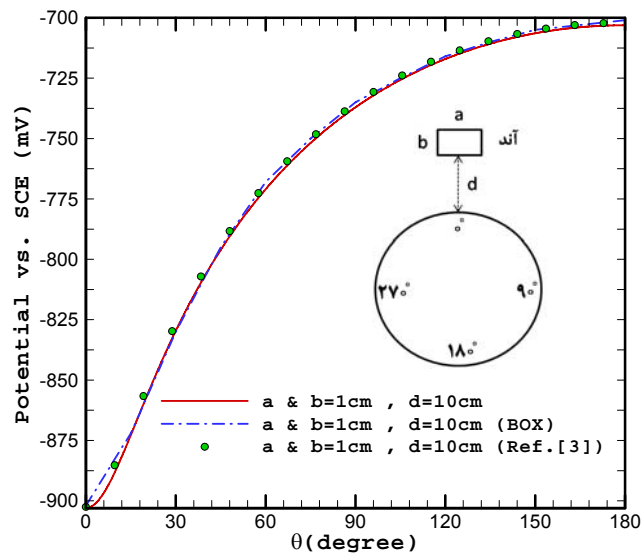
معادله فوق معادله حاکم بر میدان محاسباتی است که شامل محیط الکتrolیتی است که آند و کاتد در آن غوطه‌ورند. ϕ نیز برابر با پتانسیل درون این ناحیه است. مرزهای این محیط همان سطح

آند و کاتد است. هر معادله‌ی دیفرانسیل به‌منظور داشتن جواب‌های یکتا نیازمند تعریف شرایط مرزی مناسب می‌باشد. از این‌رو همانگونه که اشاره شد مرزهای ناحیه محاسباتی سطح آند و کاتد می‌باشد که می‌بایست مقادیر جریان، پتانسیل و یا رابطه‌ی بین این دو در این مرزها مشخص باشد. با مشخص شدن شرایط مرزی مسئله قابل حل بوده و می‌توان پتانسیل و جریان را در هر نقطه از ناحیه محاسباتی تعیین نمود. از آنجا که در سیستم‌های حفاظت کاتدیک مقدار پتانسیل در خاک چندان اهمیتی نداشته و دانستن پتانسیل و جریان روی مرزها (آند و کاتد) برای تجزیه و تحلیل کفایت می‌کند، از این‌رو یافتن روشی که بدون نیاز به حل کامل مسئله بتواند مقادیر مرزی را مشخص نماید بیش از پیش احساس می‌گردد. در این مرحله با توجه به توانایی روش المان مرزی در حل مسائل بدون نیاز به تولید شبکه در کل میدان و تنها با استفاده از نقاط مرزی، این روش به عنوان کاندید اصلی در مدل‌سازی عددی سیستم‌های حفاظت کاتدیک مطرح می‌شود.

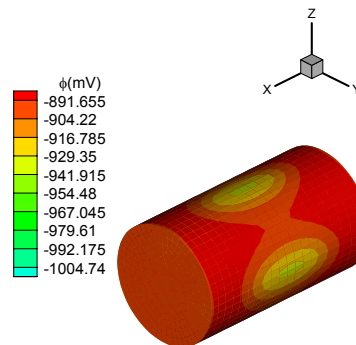
با انتخاب روش المان مرزی و با تعریف شرایط مرزی مسئله قابل حل می‌باشد. پیچیده‌ترین حالت در تعریف شرایط مرزی استفاده از رابطه‌ی غیر خطی بین جریان و پتانسیل روی مرزهاست که از روی منحنی پلاریزاسیون خوردگی فلز آند و کاتد بدست می‌آید. نمونه‌ای از این شرط مرزی برای فولاد کم‌کربن (کاتد) در الکترولیت خاک به شکل زیر بوده که در آن i بر حسب $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ و ϕ بر حسب mV تعریف می‌شود.

$$i = e^{(\phi+522)/25/623} - \left(1 + e^{(\phi+172)/26/492}\right)^{-1} - e^{-(\phi+942)/57/328} \quad (2-7)$$

روی آند نیز می‌توان از رابطه‌ی غیرخطی منحنی پلاریزاسیون استفاده نمود و یا از شرط پتانسیل ثابت (در روش آند فداشونده) یا شرط جریان ثابت (در روش جریان اعمالی) استفاده نمود. دو نمونه از تحلیل‌های انجام گرفته به کمک روش المان مرزی در حالات دوبعدی و سه‌بعدی در شکل ۷-۱ و شکل ۷-۲ ارائه شده‌است.



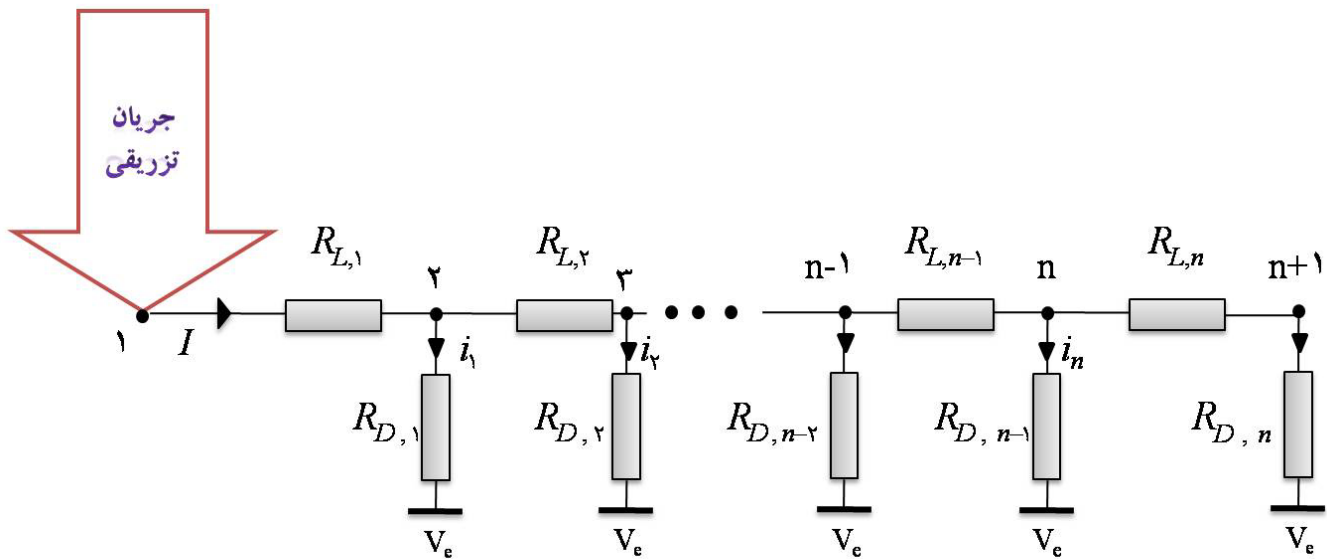
شکل ۷-۱: نمونه مدل‌سازی عددی حفاظت کاتدیک به صورت دوبعدی



شکل ۷-۲: نمونه مدل‌سازی عددی حفاظت کاتدیک به صورت سه‌بعدی

۲.۳.۷ روش مدار معادل در مدل‌سازی CP

یکی دیگر از روش‌های مدل‌سازی سیستم‌های حفاظت کاتدیک استفاده از روش مدار معادل می‌باشد. در این روش لوله به عنوان یک هادی جریان می‌باشد که در مقاطع مختلف جریان از آن خارج می‌شود. طول لوله به چندین قسمت دلخواه (L_i) تقسیم می‌شود. این قسمت‌ها به صورت مقاومت‌های سری در طول لوله کنار یکدیگر قرار می‌گیرند. بین هر قسمت از لوله شارژ خروجی جریان وجود دارد که ناشی از عدم وجود روکش، خرابی آن و یا عدم مقاومت کافی آن در خروج جریان می‌باشد. مقاومت‌های موجود بر سر این جریان مشتمل بر مقاومت روکش، مقاومت پلاریزاسیون و مقاومت خاک می‌باشد. شماتیک نحوه‌ی پیاده‌سازی مقاومت‌ها در شکل ۷-۳ ارائه شده است.



الکترولیت

شکل ۷-۳: نحوه‌ی پیاده‌سازی مقاومت‌ها در طول لوله و در اتصال آن به الکترولیت

در شکل فوق $R_{L,i}$ برابر با مقاومت طولی در هر بخش و $R_{D,i}$ برابر با مقاومت در برابر خروج جریان از لوله می‌باشد. طبق قانون اهم، رابطه‌ی افت ولتاژ بین نقطه‌ی ۱ و الکترولیت را به شکل زیر می‌توان نوشت.

$$V_1 - IR_{L,1} - i_1 R_{D,1} = V_e \quad (۳-۷)$$

این رابطه را به شکل دیگری چون رابطه‌ی زیر نیز می‌توان بدست آورد.

$$V_1 - IR_{L,1} - (I - i_1) R_{L,2} - i_2 R_{D,2} = V_e \quad (۴-۷)$$

شکل کلی رابطه فوق به شکل زیر حاصل می‌گردد.

$$V_1 - V_e = I \sum_{j=1}^m R_{L,j} - \sum_{j=1}^{m-1} i_j \sum_{k=j+1}^m R_{L,k} + i_m R_{D,m} \quad (۵-۷)$$

با توجه به روابط فوق می‌توان معادله زیر را نتیجه گرفت.

$$IR_{L,1} + i_1 R_{D,1} = IR_{L,1} + (I - i_1) R_{L,2} + i_2 R_{D,2} = I \sum_{j=1}^m R_{L,j} - \sum_{j=1}^{m-1} i_j \sum_{k=j+1}^m R_{L,k} + i_m R_{D,m} = V_1 - V_e \quad (۶-۷)$$

با فرض اطلاع از میزان جریان تزریق شده به خط (I معلوم) و اطلاع از میزان مقاومت‌ها، مجهولات مسئله برابر با n مجهول i و مقدار مجهول $V_1 - V_e$ می‌باشد. در کل $n+1$ مجهول

می‌باشد. رابطه (۶-۷) n معادله برای n گره نتیجه می‌دهد. معادله $n+1$ نیز به کمک قانون بقای جریان (۷-۷) بدست می‌آید.

$$I = \sum_{j=1}^n i_j \quad (۷-۷)$$

با معلوم بودن جریان ورودی و مقدار مقاومت‌ها معادلات فوق حل شده و مقدار جریان خروجی در هر مسیر مشخص می‌شود. همانگونه که اشاره شد مقاومت‌های مدار معادل را می‌توان به دو دسته تقسیم نمود [۱].

۱. مقاومت در برابر عبور جریان در راستای طول لوله ($R_{L,i}$)

۲. مقاومت در برابر خروج جریان از محیط لوله $R_{D,i}$

مقاومت‌های طولی را به کمک رابطه‌ی زیر می‌توان محاسبه نمود.

$$R_{L,i} = \frac{\rho_i L_i}{S_i} \quad (۸-۷)$$

در رابطه فوق L_i برابر با طول هر بخش از لوله (در اختیار کاربر)، ρ_i برابر با مقاومت ویژه لوله و S_i برابر با سطح مقطع عرضی ضخامت لوله می‌باشد. مقاومت نوع دیگر (مقاومت خروج جریان) خود از ترکیب سه مقاومت خاک همراه با مقاومت پوشش و مقاومت پلاریزاسیون ناشی می‌شود. مقاومت خاک طبق رابطه‌ی زیر تعیین می‌شود [۱].

$$R_{soil,i} = \frac{\rho_{soil}}{2\pi L_i} \ln \frac{L_i^2}{hd} \quad (۹-۷)$$

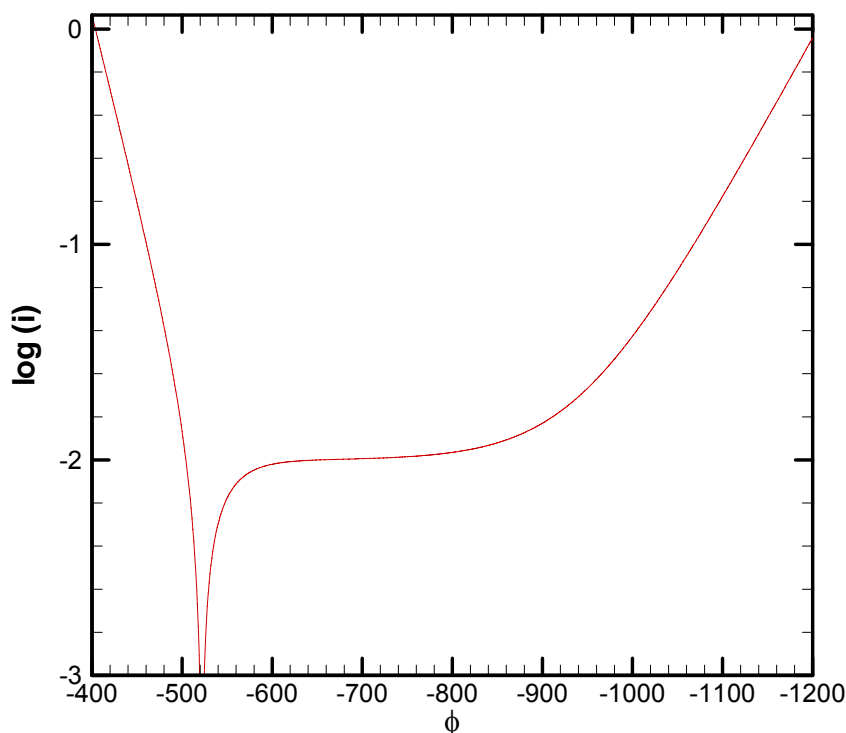
در رابطه فوق L_i برابر با طول هر بخش از لوله (در اختیار کاربر)، ρ_{soil} برابر با مقاومت ویژه خاک، d قطر لوله و h عمق قرارگیری لوله می‌باشد. مقاومت پوشش نیز به کمک رابطه‌ی (۷-۱۰) تعیین می‌شود [۱].

$$R_{por,i} = \frac{R_{ins,i}}{S_{out,i}} \quad (۱۰-۷)$$

$R_{ins,i}$ برابر با مقاومت پوشش بوده و $S_{out,i}$ برابر با سطح خارجی لوله می‌باشد. مقاومت پلاریزاسیون نیز به شکل زیر بدست می‌آید [۱].

$$R_{\text{pol},i} = \left(\frac{\partial E}{\partial i} \right)_i / S_{\text{ins},i} \quad (11-7)$$

برای محاسبه‌ی $\left(\frac{\partial E}{\partial i} \right)_i$ می‌بایست از رابطه‌ی (۷-۷) استفاده نمود. با توجه به رابطه‌ی مذکور مشاهده می‌شود که رابطه‌ی غیر خطی بین جریان و پتانسیل وجود دارد از اینرو نمی‌توان مقاومت پلاریزاسیون را به طور مستقل بدست آورد. برای رفع این مشکل و ایجاد سهولت در حل می‌توان تنها شیب بخشی از نمودار شکل ۷-۴ را در محاسبات لحاظ نمود که در محدوده‌ی پتانسیل مورد نظر می‌باشد. بدین وسیله $\left(\frac{\partial E}{\partial i} \right)_i$ تعیین شده و مراحل حل تکمیل می‌گردد.



شکل ۷-۴: منحنی پلاریزاسیون

در رابطه (۱۱-۷) مقدار $S_{\text{ins},i}$ برابر با بخشی از سطح خارجی لوله می‌باشد که بدون روکش مانده و یا روکش آن معیوب می‌باشد.

مطالب ارائه شده در بخش‌های پیش جهت معرفی روش مدارهای معادل بوده و توانایی و صحت فرضیات این روش در حال بررسی می‌باشد. شایان ذکر است که برنامه‌ای نیز مبتنی بر این روش در حال تدوین است و نتایج بررسی این روش در ماه آتی ارائه خواهد شد. در ادامه با توجه به موارد مذکور مزایا و معایب این روش در مقایسه با روش المان مرزی ارائه می‌شود. موارد ذیل صرفاً ناشی از دیدگاه دو روش برای حل بوده و دقت و کارایی روش مدار معادل همچنان در حال بررسی می‌باشد.

- مزایای روش مدار معادل نسبت به روش المان مرزی
 ۱. سادگی روش و سهولت کاربرد
 ۲. عدم نیاز به تولید شبکه روی مرزها
 ۳. تبدیل مسئله سه‌بعدی به یک بعدی
 ۴. عدم نیاز به روند تکرار (با فرض منحنی پلاریزاسیون خطی شده) و سرعت بالای حل که ناشی از حل یک سری معادلات خطی می‌باشد.
 ۵. سهولت بیشتر در مدل‌سازی شبکه‌ها
- معایب روش مدار معادل نسبت به روش المان مرزی
 ۱. نیاز به فرض اساسی دوری بسیار زیاد آندها از کاتد (وجود پتانسیل یکنواخت در الکترولیت)
 ۲. عدم توانایی پیش‌بینی تغییرات پتانسیل در جهت محیطی لوله (ناشی از فرض دوری آندها)
 ۳. عدم تطابق خطی‌سازی منحنی پلاریزاسیون با شرایط واقعی
 ۴. عدم کارایی در مدل‌سازی مسائل حفاظت کاتدیک از نوع آند فداشونده
 ۵. عدم کارایی در مدل‌سازی مسائل با شرایط آند و کاتد نزدیک به هم

۳.۳.۷ منابع

- [۱] V. E. Kasatkin, A. V. Gelman, A. I. Zarepov, I. V. Kasatkina and V. N. Dorofeeva, 'Computer Simulation of Cathodic Protection Systems for Branched Pipelines', Protection of materials, Vol. 39, No. 3, 2003, pp 268-273.

۴.۷ بررسی روش‌های عددی جهت اندازه‌گیری دبی جریان در دبی سنج‌ها

در ارتباط با فعالیت‌های در نظر گرفته شده برای اسفندماه ۸۷ فعالیت جدیدی تحت عنوان شبیه‌سازی جریان درون کنتورهای گاز و تخمین دقت اندازه‌گیری آنها در نظر گرفته شد. هدف از این مطالعات این است که مشخص شود در ارتباط با این فعالیت چه کارهایی در سطح کشور و یا دنیا انجام شده‌است. بدین ترتیب در ارتباط با نحوه صحیح بکارگیری کنتورها زوایای بیشتری روشن خواهد شد.

در این راستا بررسی روش‌های عددی یکی از سرفصل‌های اصلی شبیه‌سازی جریان درون کنتورهای گاز و تخمین دقت اندازه‌گیری آنها می‌باشد. لذا عمده‌ی فعالیت‌های انجام شده در دفتر نیز با تکیه بر این روش به تحلیل و بررسی اندازه‌گیری جریان توسط دبی‌سنج‌های مختلف می‌باشد. بدین منظور با جستجوهای اینترنتی انجام شده در این زمینه یکی از منابعی که بطور نسبتاً جامع به این موضوع پرداخته است مرجع [۱] بوده که بر اساس آن نحوه‌ی مدل‌سازی، فرضیات و پارامترهای مهم در مدل‌سازی استخراج شده و در گزارش حاضر به تفصیل ارائه شده است.

۱.۴.۷ اندازه‌گیری علمی جریان

برای اندازه‌گیری دقیق جریان جرمی سیال، دبی‌سنج جرمی مناسبی لازم است بگونه‌ای که قبلاً مطابق با استانداردهای ملی کالیبره باشد. بدین ترتیب کالیبراسیون دبی‌سنج می‌بایست توسط موسسه استاندارد ملی و یا یک آزمایشگاه معتبر انجام شود. گذشته از دبی‌سنج کالیبره شده، فرآیند اندازه‌گیری به جهت تعیین کردن خطای تخمینی اندازه‌گیری جریان بایستی معلوم باشد. بر این اساس دبی جرمی \dot{m} می‌تواند اینچنین بیان شود:

$$\dot{m} = (I + C_{cr}) \pm U_c \quad (۱۲-۷)$$

که I نشانه دبی‌سنج، C_{cr} مطابق با تصحیح کالیبراسیون دبی‌سنج و U_c خطای تخمینی استاندارد بسط‌یافته اندازه‌گیری می‌باشد. بدین ترتیب از معادله (۱۲-۷) سه وظیفه اصلی اندازه‌گیری علمی جریان دیده می‌شود:

- تحقیق و توسعه جهت ارتباط دادن استانداردهای ملی جرم و زمان و درجه‌بندی دبی‌سنج (تعیین نشانه دبی‌سنج، I)
- شناسایی فرآیند اندازه‌گیری جهت تعیین ضریب تصحیح، C_{cr}
- مطالعه عدم قطعیت‌ها در فرآیند اندازه‌گیری جهت خطای اندازه‌گیری، U_c

در علم اندازه‌گیری جریان، شبیه‌سازی‌های دینامیک سیالات محاسباتی، CFD ^{۹۸} برای مطالعه میدان‌های جریان قبل از دبی‌سنج بکار می‌رود تا اینکه اثرات تاسیسات مختلف در نشانه دبی‌سنج مشخص شود. ضمناً پروفایل جریان‌های ورودی مختلف یا ساختمان‌های گوناگون دبی‌سنج و فرآیند اندازه‌گیری دبی‌سنج و ارزیابی خطای تخمینی اندازه‌گیری مورد مطالعه قرار می‌گیرد.

⁹⁸ Computational fluid dynamics

در این گزارش، مطالعه مختصری در میان مجموعه مقالات مرتبط با روشهای عددی در علم اندازه‌گیری جریان انجام شده است. در ارزیابی خطای تخمینی اندازه‌گیری، مخصوصاً برای مدل‌های اندازه‌گیری غیرخطی روشهای عددی Monte Carlo قابل استفاده می‌باشند. با توجه به محدودیت‌های زمانی تنها مرور کوتاهی بر مقالات نوشته شده و روشهای استفاده شده در اندازه‌گیری جریان ارائه شده است و مطالعه عمیق‌تر تعدادی مثال شبیه‌سازی، و آینده علم اندازه‌گیری عددی به گزارشات بعدی موکول شده است.

۲.۴.۷ روش‌های عددی در علم اندازه‌گیری جریان

در این بخش کاربردهای روش‌های عددی در زمینه اندازه‌گیری دبی حجمی و جرمی انواع گازها و سیالات دیگر مورد بحث قرار گرفته است. برخی از این کاربردها در ارتباط با میدان جریان قبل از ورود به دبی‌سنج می‌باشند که می‌توانند در دقت اندازه‌گیری آن تاثیرگذار باشند. برخی دیگر از کاربردها در ارتباط با شبیه‌سازی میدان جریان درون خود دبی‌سنج می‌باشند و در نهایت نیز بطور مختصر کاربرد روش مونت کارلو در ارتباط با تخمین خطای اندازه‌گیری دبی‌سنج‌ها ارائه شده است.

۳.۴.۷ تحلیل محاسباتی میدان جریان قبل از دبی‌سنج

این مسئله یکی از علایق اصلی برای سازنده‌ها و همچنین برای خریدارهای انواع دبی‌سنج‌ها می‌باشد تا بدین ترتیب به نحوی از عکس‌العمل دبی‌سنج‌ها به آشفتگی جریان معین قبل از نصب واقعی آگاهی پیدا کنند. چنانکه هر کسی بخوبی می‌داند، برای مثال، زانویی‌های ساده در لوله‌کشی‌ها، آشفتگی‌های جریانی همچون حرکت چرخشی و تغییر شکل پروفایل جریان را ایجاد می‌کنند. این اختلالات می‌توانند با استفاده از لوله‌کشی‌های مسقیم بلند یا تصحیح‌کننده‌های جریان در بالادست دبی‌سنج کاهش داده شوند. اما نکته قابل توجه این می‌باشد که این لوله‌کشی و تاسیسات هزینه نصب را افزایش خواهند داد و باعث ایجاد افت فشار اضافی می‌گردند.

هیلی گنستاک و ارنست [۲]، دو نمونه از موارد رایج که ممکن است باعث اغتشاشات به اندازه‌گیری جریان سیال شود را محاسبه کرده‌اند. این دو نمونه شامل یک زانویی 90° و جریان متلاطم از میان یک زانویی مضاعف (out of-plane) قبل از دبی‌سنج می‌باشند. از دیدگاه تجربی اثرات هر دو نمونه کاملاً شناخته شده هستند و این دو با استفاده از این نتایج جواب‌های دو روش عددی مختلف بدست آمده را اعتبارسنجی نموده‌اند. بر اساس تجربیات آنها، شبیه‌سازی‌های CFD برای جریان‌های لوله در مقایسه با اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی خیلی ارزاتر می‌باشند و همچنین تحلیل اطلاعات این شبیه‌سازی‌ها آسانتر است.

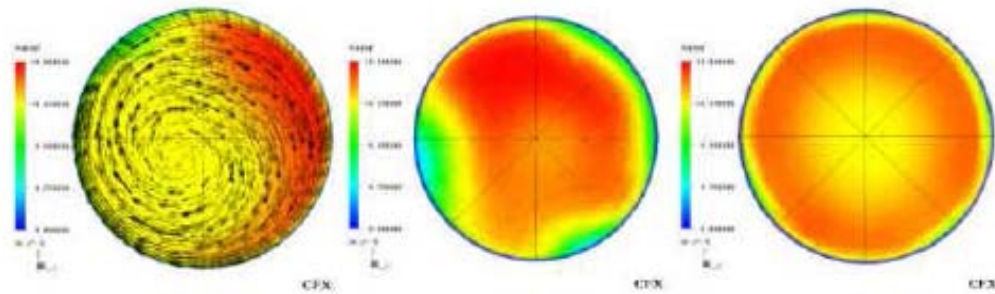
در مقاله‌ای از یه و متینگلی [۳]، شبیه‌سازی عددی دبی‌سنج آلتراسونیک برای میدان‌های جریان لوله کاملاً ۳ بعدی و افت‌های (گرادیان‌های) آن انجام شده‌است. ضمناً دورنماهای سطح کارایی تکنیک‌های آلتراسونیک travel-time و دو سنسوره برای جریان‌های غیرقابل تراکم درون لوله با عدد رینولدز بالا مورد بحث قرار گرفته‌است. شایان ذکر است که در این مطالعات هر دو پروفایل تحلیلی سرعت (آرام و متلاطم) و یک جریان لوله صنعتی استفاده شده‌است. بدین ترتیب آنها در این بررسی‌ها متوجه شده‌اند که در یک دبی‌سنج آلتراسونیک دو سنسوره، پروفایل جریان حساسیت بالایی دارد.

هولم و همکارانش [۴]، با استفاده از پروفایل سرعت بدست آمده از روش‌های تجربی و همچنین با استفاده از یک کد CFD تجاری و یک مدل اندازه‌گیری تئوریک برای دبی‌سنج‌های آلتراسونیک، ضریب کالیبراسیون برای این نوع دبی‌سنج را در شرایط نصب مختلف پیش‌بینی نموده‌اند. آنچه که در این مطالعات بدست آمده‌است نشانگر این می‌باشد که اختلاف بین ضرایب k شبیه‌سازی و تجربی از ۱٪ تا ۳٪ می‌باشند. ضمناً آنها منبع اصلی خطا را چگونگی مدل‌کردن لایه مرزی و مدل توربولنسی $k - \epsilon$ استفاده‌شده تصور می‌کنند.

در مقاله‌ای از کن‌کد و رب [۵]، کارایی یک تصحیح‌کننده جریان قبل از یک دبی‌سنج توربینی به کمک شبیه‌سازی CFD انجام شده‌است. بطورکلی دبی‌سنج‌های توربینی و اریفیس‌دار برای عملیات در شرایط ایده‌آل پایین دست لوله‌های مستقیم طراحی شده‌اند. بنابراین این کتورها در این شرایط کالیبره شده‌اند و صحت اندازه‌گیری آنها شدیداً به شرایط جریانی برخوردشده در ورودی دبی‌سنج بستگی دارد. پس بدین ترتیب دبی‌سنج‌های توربینی به اثرات لوله‌کشی از جمله اختلالات جریان مثل اثرات جریان جت^{۹۹} و حرکات چرخشی جریان، که بوسیله رگولاتورهای فشاری یا آرایش بندی لوله‌کشی در ایستگاه‌های گاز شهری ایجاد می‌شوند خیلی حساس می‌باشند. این خطاها که به دلیل اثرات لوله‌کشی ناصحیح ایجاد می‌گردند به بیش از ۳٪ می‌توانند برسند. نمونه‌ای از حوزه مورد مطالعه جریان قبل از دبی‌سنج‌ها در شکل ۵-۷ نشان داده شده‌است. ضمناً نمونه‌ای از تحلیل‌های عددی سرعت در مکان‌های مختلف لوله در شکل ۶-۷ آورده شده‌است.



شکل ۵-۷: نمونه‌ای از حوزه مورد مطالعه جریان قبل از دبی‌سنج‌ها



شکل ۶-۷: نمونه از تحلیل‌های عددی سرعت در مکان‌های مختلف لوله

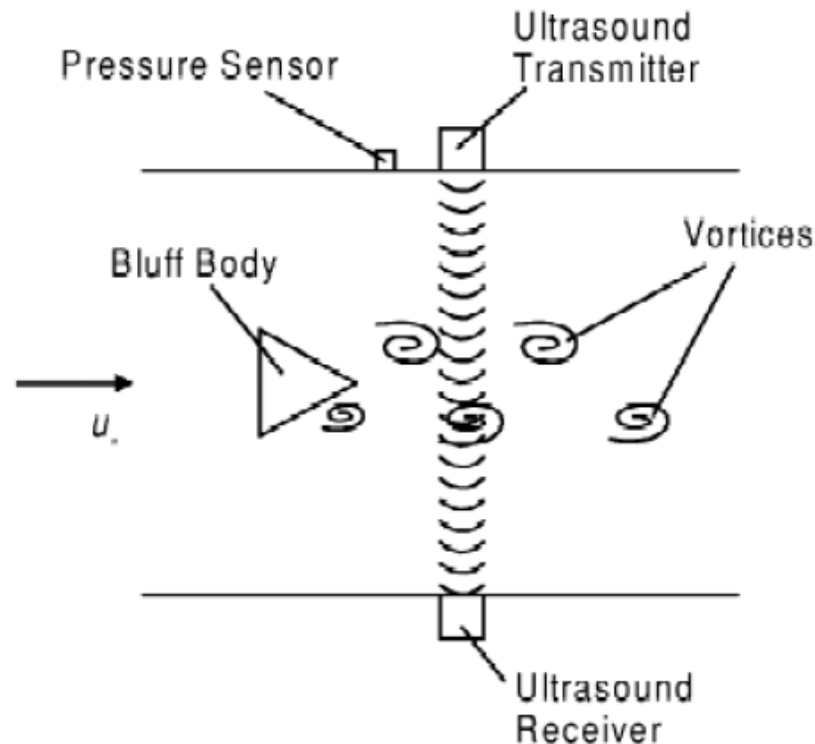
۴.۴.۷ تحلیل محاسباتی دبی‌سنج‌ها

یکی از زمینه‌های مهم برای اندازه‌گیری میزان دبی جرمی سیالات، بهبود و توسعه دبی‌سنج‌های حجمی متداول می‌باشد. در میان این دبی‌سنج‌های حجمی، دبی‌سنج گردابه‌ای^{۱۰۰} یک نوع بارز و ممتاز است. اصول اندازه‌گیری این دبی‌سنج بر اساس فرکانس ریزش گردابه وون کارمن^{۱۰۱} پشت یک جسم ضخیم^{۱۰۲} می‌باشد و نوسانات فشاری تولید شده توسط جسم ضخیم نیز معمولاً با سنسورهای فشاری نمایان می‌شود. اصول عملکردی یک دبی‌سنج ریزش گردابه به همراه یک مرز فراصوت پشت جسم ضخیم در شکل ۷-۷ نشان داده شده است.

¹⁰⁰ Vortex flowmeter

¹⁰¹ Von Karman

¹⁰² bluff body

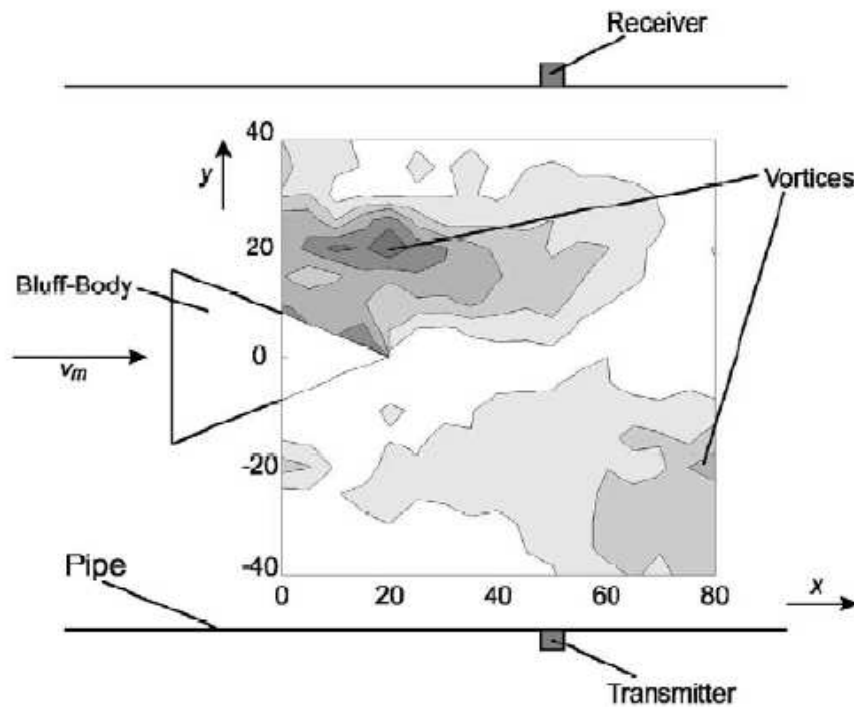


شکل ۷-۷: اصول عملکردی یک دبی‌سنج ریزش گردابه با یک مرز فراصوت پشت جسم ضخیم

نکته قابل توجه این است که در حال حاضر، کتورهای گردابه‌ای بطور گسترده در اندازه‌گیری جریان مایعات، گازها و بخارات صنعتی استفاده می‌شوند. این مسئله به خاطر قیمت پایین، نصب آسان، قابلیت اطمینان بالا، نداشتن بخش‌های متحرک و دقت اندازه‌گیری بالای آنها می‌باشد. این نوع دبی‌سنج‌ها معمولاً برای اندازه‌گیری میزان جریان حجمی در جریان درون لوله بکار گرفته می‌شوند. در مقاله‌ای از پانکانین [۶]، جنبه‌های مختلف مشکلات درباره کتورهای گردابه‌ای بررسی شده‌است. ضمناً در این مطالعه مشکلات بنیادی و راه‌حل‌های آنها بر اساس توضیحی از اصول عملکردی این دبی‌سنج‌ها ارائه شده‌است. بدین ترتیب مهمترین روش‌های بررسی پدیده‌هایی که در دبی‌سنج‌های گردابه‌ای ظاهر می‌گردد شامل موارد زیر می‌باشند:

- تحلیل سیگنال اندازه‌گیری شده
- بررسی میدان جریان با استفاده از یک سرعت‌سنج سیم‌داغ^{۱۰۳}
- تجسم جریان به همراه پردازش تصویر
- مدل‌سازی عددی جریان

همچنین در مطالعه‌ای از سوی ژنگ و همکارانش [۷]، یک شبیه‌سازی CFD به منظور پیدا کردن بهترین موقعیت نصب پورت فشارسنج در این دبی‌سنج‌ها انجام شده‌است. این مسئله به بهترین دقت در اندازه‌گیری فشار منجر می‌شود. منحنی فشار اندازه‌گیری شده یک مسیر گردابه وون کامن پشت یک جسم ضخیم در یک دبی‌سنج گردابه‌ای در شکل ۷-۸ ارائه شده‌است.



شکل ۷-۸: منحنی فشار اندازه‌گیری شده در یک دبی‌سنج گردابه‌ای

از سوی دیگر جستجو برای مطلوب‌ترین هندسه برای این کتورها کار ابتدایی طراحی‌گران دبی‌سنج‌های گردابه‌ای شده‌است. این در حالی است که سال‌ها توجه آنها اساساً بر روی جسم ضخیم و همچنین روی طراحی سنسور متمرکز شده‌بود. پس بنابراین نه تنها شکل جسم ضخیم بلکه همچنین هندسه کانال در پیشرفت گردابه اثر می‌گذارد و آزمایشات گوناگون انجام شده توسط محققان گوناگون این مسئله را تایید می‌کنند. ضمناً دیواره‌های کانال ریزش گردابه و فرآیند توسعه آن را پایدار می‌سازد. بنابراین مفهوم مخروطی شدن کانال جریان در منطقه توسعه گردابه‌ها مطرح شده‌است.

در کار دیگری توسط هنس و ویندورفر [۸]، یک روش اندازه‌گیری که سیگنال فراصوت را با کتورهای گردابه‌ای مرسوم ترکیب می‌کند توضیح داده شده‌است. آنها در مطالعات خود دو نوع متفاوت جسم ضخیم مثالی و T شکل را شبیه‌سازی کرده‌اند.

براساس یک شبیه‌سازی عددی که در مرجع [۹] انجام شده است می‌توان نتیجه گرفت که بخاطر انقباض مقطع عرضی (که باعث افزایش سرعت جریان می‌شود) انرژی چرخش گردابه افزایش می‌یابد و همچنین طول عمر گردابه زیاد می‌شود. ضمناً در مرجع [۱۰]، اصول فیزیکی دبی‌سنج تصحیح-عرضی فراصوت^{۱۰۴} بطور کمی توسط روش‌های مبتنی بر تحلیل سیستمی توضیح داده شده است.

دستگاه‌های میکرومکانیکی از جمله تکنولوژی‌های جدیدی هستند که به سرعت در حال پدیدار شدن می‌باشند، که قابلیت‌های جدید کاربردی آنها بطور پیوسته در حال توسعه می‌باشد. متراکم‌بودن و نسبت‌های سطح به حجم بالای دستگاه‌های سیالاتی با مقیاس میکرو آنها را جایگزین سیستم‌های جریان مرسوم کرده است. با پیشرفت‌های تکنولوژیکی حال حاضر، دستگاه‌های میکرو جریان (micro-flow)، میکروپمپها، میکروشیرها، میکرومبدلها، سنسورهای استفاده‌شده در اندازه‌گیری‌های جریان، خنک‌کننده‌های الکترونیکی، سیستم‌های میکروالکترومکانیکی و دیگر اجزاء در حد میکرو به واقعیت پیوسته است. این پدیده‌های جریانی همچنین در دبی‌سنج‌هایی که هم‌اکنون بطور وسیع استفاده می‌شوند و بر پایه جریان آرام در کانال‌های با مقیاس میکرومتر هستند، اتفاق می‌افتد. در مطالعه‌ای از جن و لین [۱۱]، شبیه‌سازی جریان سه‌بعدی برای کانال‌های جریان با مقیاس میکرومتر با استفاده از نیتروژن به عنوان گاز آزمایشی انجام شده است. آنها در این زمینه شبیه‌سازی دوبعدی و سه‌بعدی را انجام داده‌اند و متوجه شده‌اند که فرض دوبعدی برای مطالعه جریان قابل‌تراکم در میکروکانال‌های سه‌بعدی درست نمی‌باشد. در چنین حالتی در مقایسه با محاسبات سه‌بعدی ۱۵٪ تا ۴۵٪ سرعت‌های بالاتر و ۷٪ تا ۱۲٪ ضریب اصطکاک نرمالایز شده پایین‌تری نتیجه می‌شود.

در دبی‌سنج کوریولیسی^{۱۰۵} یک لوله اندازه‌گیری انتقال‌دهنده سیال که در حال نوسان در فرکانس طبیعی‌اش می‌باشد، به عنوان یک عنصر حس‌کننده اولیه استفاده شده است. بدین ترتیب تغییرات فرکانس طبیعی لوله اندازه‌گیری و طریقه تغییر شکل آن، برای اندازه‌گیری‌های دانسیته یک سیال یا میزان جریان جرمی استفاده می‌شوند. بابوینک در مقاله‌ای [۱۲]، جریان یک سیال ویسکوز از میان یک لوله اندازه‌گیری مستقیم یک دبی‌سنج کوریولیسی را با استفاده از شبیه‌سازی عددی مطالعه کرده است.

همچنین در مقاله‌ای از لاونته و همکارانش [۱۳]، میدان جریان ناپایدار سه‌بعدی پیچیده یک دبی‌سنج توربینی یک مرحله‌ای مطالعه شده است.

در خیلی از کاربردهای مهندسی از جمله فرآیندهای ساخت نیمه‌رساناها و فرآیندهای شیمیایی نه تنها حجم گاز مصرفی بلکه اندازه‌گیری و کنترل نرخ مصرف آن (دبی حجمی یا جرمی) بسیار مهم

¹⁰⁴ Ultrasound cross-correlation flowmeter

¹⁰⁵ Coriolis flowmeter

و حساس می‌باشد. روش‌های آشکارسازی کل جریان شامل انواع سنسورهای اریفیزی، توربینی، آلتراسونیک و کوریولیزی هستند. بویژه، در صنایع نیمه‌رساناها و شیمیایی، کنتورهای جرمی حرارتی^{۱۰۶} به شکل گسترده‌ای برای اندازه‌گیری نرخ‌های جریان جرمی استفاده می‌شوند. در کاری از هن و همکارانش [۱۴]، یک روش عددی ساده برای پدیده‌های انتقال حرارت گذرا در لوله حسگر یک دبی‌سنج جرمی حرارتی ارائه شده‌است. بدین ترتیب فرآیند اندازه‌گیری و دقت دبی‌سنج جرمی حرارتی بدرستی درک شده و بهبود داده می‌شود.

۵.۴.۷ شبیه‌سازی Monte Carlo در ارزیابی خطای تخمینی اندازه‌گیری

برای مدل‌های اندازه‌گیری غیرخطی، روش عددی Monte Carlo ابزار موثری برای محاسبه‌کردن خطای تخمینی اندازه‌گیری می‌باشد. فرآیند محاسبه با تعریف توزیع احتمال‌های متغیرهای مربوط به مدل اندازه‌گیری شروع می‌شود. بعد از آن، توزیع احتمال کمیت تحت اندازه‌گیری توسط اضافه‌کردن احتمال‌های ناشی از توزیع احتمال متغیرها به مدل اندازه‌گیری محاسبه می‌گردد. مقدار متوسط توزیع احتمال کمیت تحت اندازه‌گیری، بیانگر مقدار پیش‌بینی شده آن کمیت است و انحراف‌معیار مربوطه بیانگر خطای تخمینی استاندارد کمیت تحت اندازه‌گیری می‌باشد. فرآیند محاسبه به همراه جزئیات در مرجع [۱۵] توضیح داده شده‌است. از طرف دیگر، سیلانپا در مقاله‌ای [۱۶]، با موفقیت از این روش در ارزیابی خطای تخمینی دستگاه جدید MIKES برای اندازه‌گیری دانسیته مایعات در سطح خطای تخمینی پایین تر از ۱۵ ppm استفاده کرده‌است. این روش با خطای تخمینی محاسبه‌شده از مدل اندازه‌گیری تحلیلی قابل مقایسه می‌باشد.

۶.۴.۷ منابع

- [1] S. Sillanpaa. Numerical methods in flow metrology, 47244M, March 13, 2002.
- [2] A. Hilgenstock and R. Ernst. Analysis of installation effects by means of computational fluid dynamics-cfd vs experiments? Flow measurement and instrumentation, 7:161–171, 1996.
- [3] T. T. Yeh and G. E. Mattingly. Computer simulations of ultrasonic flow meter performance in ideal and non-ideal pipeflows. In Proceedings of the 11th FLOMEKO-conference (CD-ROM), Groningen, The Netherlands, May 12-14. Gasunie research, 2003.
- [4] M. Holm, J. Stang, and J. Delsing. Simulation of flow meter calibration factors for various installation effects. Measurement, 15:235–244, 1995.

¹⁰⁶ Thermal mass flow meters

- [5] J. Cancade. Numerical simulation of the smmi flow conditioner. In Proceedings of the 11th FLOMEKO-conference (CD-ROM), Groningen, The Netherlands, May 12-14. Gasunie research, 2003.
- [6] G. L. Pankanin. The vortex flowmeter: various methods of investigating phenomena. *Measurement science and technology*, 16:R1–R16, 2005.
- [7] Z. Hongjian, H. Yongmei, and S. Zhiqiang. A study of mass flow rate measurement based on the vortex shedding principle. *Flow Measurement and Instrumentation*, 17:29–38, 2006.
- [8] V. Hansa and H. Windorferb. Comparison of pressure and ultrasound measurements in vortex flow meters. *Measurement*, 33:121–133, 2003.
- [9] G. L. Pankanin, J. Berlinski, and R. Chmielewski. Numerical modeling of vortices development in tapered duct. In Proceedings of the 11th FLOMEKO-conference (CD-ROM), Groningen, The Netherlands, May 12-14. Gasunie research, 2003.
- [10] F. Schneider, F. Peters, and W. Merzkirch. Quantitative analysis of the cross-correlation ultrasonic flow meter by means of system theory. *Measurement science and technology*, 14:573–582, 2003.
- [11] V. Jain and C. X. Lin. Numerical modeling of three-dimensional compressible gas flow in microchannels. *Journal of micromechanics and microengineering*, 16:292–302, 2006.
- [12] G. Bobovnik, J. Kutin, and I. Bajsic. Numerical simulations of the fluid flow in the measuring tube of the coriolis flow meter. In Proceedings of the 11th FLOMEKO-conference (CD-ROM), Groningen, The Netherlands, May 12-14. Gasunie research, 2003.
- [13] E. von Lavante, N. Lazaroski, U. Maatje, T. Kettner, and V. Lötzt-Dauer. Numerical simulation of unsteady three-dimensional flow fields in a turbine flow meter. In Proceedings of the 11th FLOMEKO-conference (CD-ROM), Groningen, The Netherlands, May 12-14. Gasunie research, 2003.
- [14] I. Han, D.-K. Kim, and Kim S. J. Study on the transient characteristics of the sensor tube of a thermal mass flow meter. *International journal of heat and mass transfer*, 48:2583–2592, 2005.
- [15] International Organization for Standardization (ISO). Guide to the expression of uncertainty in measurement GUM - supplement 1: Numerical methods for the propagation of distributions, 2004.

[16] S. Sillanpää. LDOS-laitteiston numeerinen epävarmuuslaskenta. MIKES flow laboratory report nr. 13, 2005.

۵.۷ پوشش‌های مقاوم جهت استفاده در محیط‌های آلوده به مشتقات نفتی

توسعه‌ی گازرسانی به مناطق مختلف استان خوزستان از جمله شهرستان آبادان و مسجدسلیمان وجود شرایط اقلیمی خاص در این مناطق، استفاده از خطوط لوله، تجهیزات مرتبط، روکش‌ها و سایر موارد را تحت‌الشعاع قرار داده و می‌بایست قبل از پیاده‌سازی شبکه‌ها از توانایی و کارایی موارد مذکور در این شرایط اقلیمی متفاوت اطمینان حاصل نمود. یکی از تفاوت‌های اساسی خاک این شهرستان‌ها با دیگر نقاط در میزان آلودگی خاک این ناحیه به مواد نفتی می‌باشد. این آلودگی‌های نفتی از پیامدهای جنگ تحمیلی بوده و ناشی از نشت نفت از لوله‌های ترکیده یا از پالایشگاه می‌باشند که در خاک منطقه نفوذ کرده‌اند. بدین منظور جهت تامین گاز این شهرستان‌ها و موارد مشابه می‌بایست تمهیدات لازم اتخاذ شود. در این زمینه نیز از طرف مسئولین محترم بخش توزیع شرکت گاز استان خوزستان درخواستی جهت معرفی روکش مناسب برای نواحی با آلودگی نفتی به دفتر پژوهش گاز استان خوزستان ارسال گردید که نتایج بررسی اولیه این موضوع در ادامه ارائه خواهد شد.

۱.۵.۷ انتخاب روکش مناسب

به‌منظور تعیین روکش مناسب، منابع متعددی مطالعه شد و در نهایت استانداردهای مربوطه در این زمینه ملاک تصمیم‌گیری قرار گرفت. در ابتدا از آنجاکه بسیاری از اصطلاحات و عبارات‌ها در استانداردهای مورد بررسی به‌صورت مخفف ارائه شده‌اند، جهت رفع ابهام در مطالعه گزارش حاضر، مخفف‌های مورد استفاده در جدول ۷-۱ معرفی می‌شوند.

جدول ۷-۱: معرفی علائم اختصاری استفاده شده در متن

ACS	Approved Coating System
3LPE	Three Layer Polyethylene
FPE	Fusion Bounded Epoxy
CP	Cathodic Protection
SCC	Stress Corrosion Cracking

در منابع مختلف انواع پوشش‌ها جهت استفاده بر روی لوله‌های مدفون معرفی شده‌اند [۱-۵]. در این بین جدیدترین استاندارد گردآوری شده، استاندارد مربوط به شرکت گاز ایران بوده که با عنوان راهنمای انتخاب پوشش و با کد IGS-R-TP-024(0) (پیوست ی) ارائه شده‌است. این کد انواع روکش‌های مورد تایید را طبق جدول ۲-۷ معرفی می‌نماید.

جدول ۲-۷: مشخصات روکش‌های تایید شده

شماره	عنوان	کد استاندارد
ACS-1	Three layer polyethylene coating for line pipe	IGS-M-TP-010 (Parts 1&2)
ACS-2	Fusion Bonded Epoxy for line pipe	ISO 21809-2
ACS-3	Modified bitumen enamel coating for line pipe	IGS-M-TP-016
ACS-4A	Coal tar enamel coating for line pipe	BS 4164 & BS 7873
ACS-4B	Bitumen enamel coating for line pipe	BS EN 10300
ACS-5	Hand applied 3PLY tape	IGS-M-TP-014-2-C
ACS-6	Hand applied laminated bituminous tape	IGS-M-TP-014-5
ACS-7	Hand applied laminated tape	IGS-M-TP-014-4
ACS-8	Shop or field applied two-component EP	NACE RP 01 05
ACS-9	Shop or field applied two-component PUR	IGS-M-TP-020
ASC-10	High temperature 3-Layer heat shrinkable sleeve system for service temperature up to 80 C.	IGS-M-TP-014-3(1)
ASC-11	3-Layer heat shrinkable sleeve system (hot melt adhesive) for service temperature up to 60 C.	IGS-M-TP-014-6
ASC-12	2-Layer heat shrinkable sleeve (mastic adhesive) for service temperature up to 50°C.	IGS-M-TP-014-7
ACS-13	Polymer modified bitumen membrane	IGS-M-TP-014-2-A
ACS-14	Hand applied petrolatum tape	IPS-M-TP-317
ACS-15	Pressure sensitive, hand applied laminated tape for elevated temperature	IGS-R-TP-024(0) Annex A
ACS-16	Field Applied FBE for field girth welds	NACE RP 04 02

در جدول ۲ و جدول ۳ کد IGS-R-TP-024(0) روکش‌های فوق با توجه به محل و شرایط استفاده نیز دسته‌بندی شده‌اند. این گروه‌بندی به طور خلاصه در جدول ۳-۷ ارائه شده‌است.

جدول ۳-۷: پوشش‌های خارجی مورد استفاده خطوط لوله، اتصالات و خطوط سرویس ($OD < 24$)

گروه کاری	پوشش‌های قابل استفاده
بدنه لوله	ACS-1/ACS-2/ACS-3/ASC-4A/ACS-4B
لوله‌های مدفون و اتصالات مرتبط	ACS-5/ACS-6/ACS-8/ASC-9/ACS-13/ACS-16

با مطالعه‌ی خصوصیات پوشش‌های ارائه شده در جدول ۳-۷، مطابق با جدول ۶ کد IGS-R-TP-024(0)، تنها دو نوع روکش ACS-1 و ACS-2 دارای مقاومت عالی نسبت به هیدروکربن‌ها می‌باشند. همچنین دو نوع روکش مذکور دارای مقاومت بالایی در محیط‌های شیمیایی و نیز در برابر اثرات باکتری‌های مختلف، می‌باشند. البته با توجه به اینکه روکش ACS-2 جاذب قوی رطوبت می‌باشد برای استفاده در محیط‌های مرطوب پیشنهاد نمی‌شود [۱-۵]. از اینرو تنها گزینه‌ی مطلوب روکش ACS-1 می‌باشد. شایان ذکر است با مطالعه انجام شده در منابع مختلف [۱-۵] به میزان مقاومت دیگر روکش‌ها نسبت به هیدروکربن‌ها صراحتاً اشاره‌ای نشده‌است.

با توجه به جدول ۲-۷، مشاهده می‌گردد که روکش ACS-1 که از نوع پلی‌اتیلنی سه لایه می‌باشد، برای لوله‌های مدفون پیشنهاد نشده‌است. در این زمینه نیز با بررسی انجام شده، استاندارد این نوع روکش با کد IGS-M-TP-010-2 تهیه و مورد مطالعه قرار گرفت. شرح کار این روکش مطابق با کد مذکور به شرح ذیل می‌باشد.

"THIS PART 2 OF NIGC ENGINEERING STANDARD IGS-ES-TP-010 SPECIFIES THE OPERATIONS AND REQUIREMENTS FOR THE FACTORY APPLICATION OF MATERIALS IDENTIFIED IN NIGC ENGINEERING CONSTRUCTION STANDARD IGS-ES-TP-010 PART 1 , TO BURIED STEEL PIPES PROVIDING A FINISHED PRODUCT CAPABLE OF PIPE LAYING AND OPERATING AT UP TO 80°C ."

از اینرو با توجه به مطلب فوق می‌توان نتیجه گرفت، روکش ASC-1 برای لوله‌های مدفون نیز قابل استفاده می‌باشد. در جدول ۶ کد IGS-R-TP-024(0) مزایا و معایب این روکش به قرار ذیل ذکر شده‌است.

- مزایا

۱. نیاز به جریان کمتر جهت حفاظت

۲. مقاومت عالی نسبت به هیدروکربن‌ها
۳. مقاومت عالی نسبت به جدایش ناشی از حفاظت کاتدی
۴. مقاومت بالا نسبت به سایش
۵. چسبندگی عالی به سطح لوله
۶. مقاومت الکتریکی بسیار زیاد
۷. مقاوم در برابر فشار خاک
۸. مقاوم در برابر بسیاری از محیط‌های شیمیایی و باکتریایی
۹. مقاوم در برابر نفوذ آب
۱۰. قابل استفاده در محدوده‌ی دمایی ۲۰- تا ۸۰ درجه سانتیگراد

• معایب

۱. نیاز به کنترل دقیق در حین اجرا
۲. هزینه‌ی اجرای بالا
۳. در صورت خرابی لایه FBE تمامی پوشش تحت تاثیر قرار خواهد گرفت.
۴. تعمیرات روکش مشکل است.
۵. با توجه به اینکه لایه‌ی اصلی محافظت از خوردگی از دیده پنهان می‌باشد، صحت یا خرابی روکش زیرین را نمی‌توان با چشم بررسی نمود.

۲.۵.۷ جمع‌بندی

با توجه به مواردی که در بخش قبل بدان‌ها اشاره گردید، موارد ذیل جهت پوشش قابل استفاده در خاک آلوده به مواد نفتی پیشنهاد می‌شود.

۱. استفاده از روکش‌های پلی‌اتیلنی سه‌لایه با کد ACS-1
۲. با توجه به هزینه‌ی بالای اجرایی این نوع پوشش راه‌کار دیگری که می‌توان اشاره نمود استفاده از لوله‌های پلی‌اتیلنی می‌باشد. تنها محدودیتی که در استفاده از این نوع لوله‌ها به چشم می‌خورد با توجه به استاندارد IGS-PL-14-01(1) محدودیت فشار درون این لوله‌هاست.

مطابق با کد مذکور حداکثر فشار کاری این لوله‌ها برابر با ۴ بار برابر با ۶۰ Psi می‌باشد. از اینرو با توجه به فشار کاری شبکه توزیع می‌توان از این لوله‌ها استفاده نمود. در بقیه موارد نیز می‌توان از لوله‌های فولادی با روکش ACS-1 استفاده نمود.

شایان ذکر است که مطالعات فوق در بازه‌ی زمانی بسیار محدودی انجام شده‌است و لذا پیشنهاد می‌شود به منظور دستیابی به نتایج دقیق‌تر و مطمئن‌تر، این مطالعات در قالب یک طرح تحقیقاتی مورد بررسی قرار گیرد.

۳.۵.۷ منابع

- [1] M. E. Parker, "Pipe Line Corrosion & Cathodic Protection", 3rd edition, Gulf Publishing Company, Houston, TX, 1999.
- [2] W. von Baekmann, W. Schwenk, W. Prinze, "Handbook of Cathodic Protection", Gulf Publishing Company, Houston, TX, 1997.
- [3] B. Guo and A. Ghalambor, "Natural Gas Engineering Handbook", Gulf Publishing Company, Houston, TX, 2005.
- [4] A. W. Peabody, "Control of Pipe line Corrosion", NACE, 2001.
- [5] D. A. Bayliss and D. H. Deacon, "Steelwork Corrosion Control", 2nd Edition, Taylor & Francis e-Library, 2004.

الف جداول استانداردسازی گرمکن

در این پیوست، به ارائه استاندارد پارامترها، جداول و صفحه مشخصاتی که در حین بسته‌بندی، تولید و مونتاژ گرمکن‌ها باید رعایت گردند پرداخته می‌شود.

جدول ۱: ظرفیت نامی گرمکن

GAS FLOW RATE SCM/H	MIN, REQUIRED NET ABSORBED HEAT DUTY (1000 Kcal/h)
1,200	20.3
2,000	34
3,000	51
5,000	84
7,500	127
10,000	169
15,000	253
20,000	337
25,000	422
30,000	507
40,000	675
50,000	844
60,000	1010

جدول ۲: مشخصات گاز

COMPONENT	PROCESS GAS MOL%	FUEL GAS MOL%
Methane	84.98	97.534
Ethane	8.96	0.801
Propane	3.26	0.149
Iso butane	0.32	0.039
Normal butane	0.59	0.074
Iso pentane	0.10	0.043
Normal pentane	0.09	0.053
Hexane plus	0.04	0.355
Nitrogen	1.33	0.792
Carbon dioxide	0.33	0.161
Hydrogen sulphide (max.)	5 ppm	5 ppm
H2O	7 1b/mmft ³	7 1b/mmft ³
TOTAL	100	100

جدول ۳: صفحه دیتا و اطلاعات گرمکن

DATA SHEET

NIGC

Inquiry No:

Item No:

No of units required:

Date:

SUPPLIER

Name :

Quotation No:

No of units offered :

Date:

جدول ۴: صفحه دیتای N.I.G.C

Gas flow rate	SCM/H	
Inlet press.	Bar	min. ()max. (70)
Min . inlet temp.	° C	10
Outlet temp.	° C	38
Net absorbed heat duty Kcal/h		Ref. To app. "A"
Max. bath temp.	° C	88
Max. gas velocity in coil M/sec		20
Max. press. Drop in coil	bar	1.75
Design press	bar	72

Design temp.	° C	100
End connection size	inch	
Fuel gas supply pres.	Bar	4-17
Ambient temp	° C	Min.()max. ()
Max. wind velocity Km/h		
Max . rain fall mm/year		
Relative humidity	%	
Max. snow loading	mm	
Earth quake zone OBCIV		
Elevation above sea level	M	

جدول ۵: دیتای فرآیندی

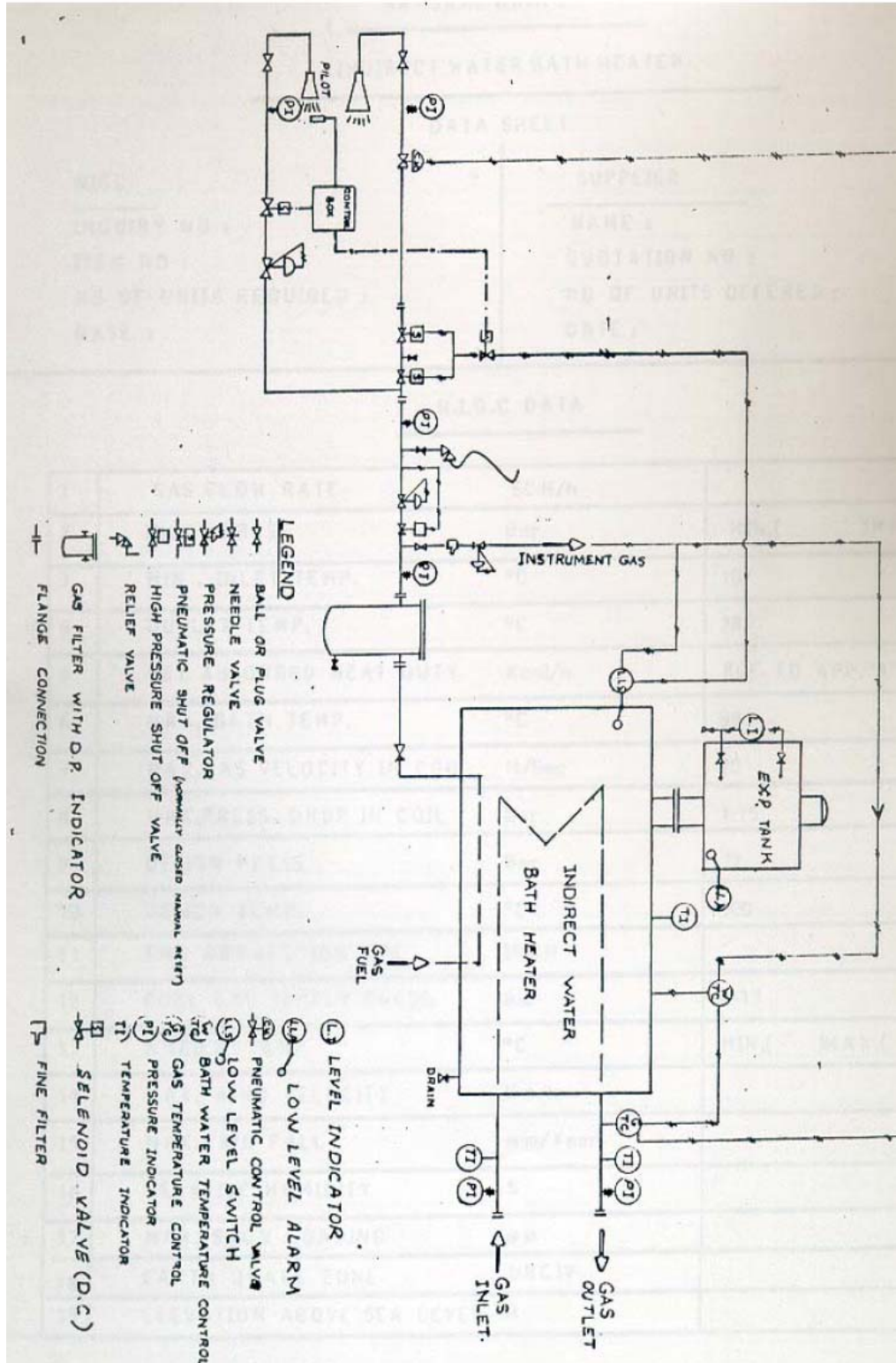
SERVICE CONDITION	Gas flow rate	Scm/h
	Inlet press.	Bar
	Min. inlet temp.	° C
	Outlet temp.	° C
	Net absorbed heat duty	Kcal/h
	Gross heat duty	Kcal/h
	Overall thermal efficiency	%
	Max. bath temp.	° C
	Max. gas velocity in coil	M/Sec
	Max. press. Drop in coil	Bar
	Fuel gas consumption	scm/h

جدول ۶: دیتای مکانیکی

End connection	Type	
	Class	
	Inlet and outlet size	Inch
Coil	Material	
	Outside and inside diameter	mm
	No. of flow paths	
	No. of passes per flow path	
	Total coil outside surface area	
	Design press.	Bar
	Design temp.	° C
Shell	Material	
	Diameter	Mm
	Length	Mm
	Insulation material and thickness	Mm

جدول ۷: دیتای ابزاردقیقی

Gas temperature controller	Temp. range	°C
	Type	
	Manufacturer	
Water bath temperature controller	Temp . range	
	Type	
	Manufacturer	
Water level controller	Type	
	Manufacturer	
Gas high pressure shut off valve	Type	
	Size	Inch
	Manufacturer	
	Set pressure	Bar
M a i n	Type	



شکل ۱: یک نقشه تیپ گرمکن

ب شبیه‌سازی سه‌بعدی سیستم حفاظت کاتدیک لوله -

های گاز مدفون در خاک به روش المان مرزی

چکیده

در مقاله‌ی حاضر سیستم حفاظت کاتدیک با جریان اعمالی و نیز آندفداشونده لوله‌های مدفون به صورت عددی شبیه‌سازی شده‌است. برای حل عددی از روش المان مرزی استفاده شده و شرایط مرزی مسئله به صورت غیرخطی تعریف شده‌اند. لوله به صورت سه‌بعدی مدل شده و به کمک نتایج مدل‌سازی توزیع پتانسیل و جریان روی تمامی نقاط لوله تعیین می‌شود. در نهایت بمنظور طراحی بهینه سیستم جریان مناسب برای حفاظت لوله (با فرض ثابت بودن تعداد و محل آن‌ها در روش جریان اعمالی) و تعداد و چیدمان مناسب آن‌ها (در روش آند فداشونده) تعیین می‌شوند.

واژه های کلیدی: حفاظت کاتدیک، المان مرزی، مدل سه‌بعدی، لوله‌های مدفون، آندفداشونده، جریان اعمالی

مقدمه

خوردگی گالوانیکی از مرسوم‌ترین انواع خوردگی سازه‌های فلزی می‌باشد. جهت حفاظت سازه از خوردگی گالوانیکی روش‌های متفاوتی مورد استفاده قرار می‌گیرند که از کاراترین آنها می‌توان به روش حفاظت کاتدیک اشاره نمود. روش‌های متداول در طراحی سیستم حفاظت کاتدیک بر پایه‌ی یک سری روابط و فرمول‌های تجربی بنا شده‌اند. به هر میزان که شرایط سازه و محیط پیچیده‌تر باشد، از کارایی این روش‌ها کاسته شده و نمی‌توان سیستم حفاظت کاتدیک مناسبی برای محافظت سازه طراحی نمود.

روش‌های عددی در دو دهی اخیر به عنوان ابزاری توانمند در تحلیل خوردگی و روش‌های حفاظت از آن معرفی شده‌اند. به کمک این روش‌ها توزیع جریان و پتانسیل روی تمامی سطح سازه قابل تعیین می‌باشد. از این

رو علاوه بر تعیین پتانسیل لازم برای حفاظت سازه در مورد وجود پدیده‌ی پتانسیل اضافی روی سطح سازه نیز می‌توان نظر داد. از جمله این روش‌ها به روش اختلاف محدود، المان محدود و روش المان‌های مرزی می‌توان اشاره نمود. در این بین، روش المان‌مرزی بدلیل عدم نیاز به تولید شبکه درون کل ناحیه، به عبارتی انجام گسسته‌سازی تنها روی سطوح سازه، از ارجحیت بالاتری نسبت به دو روش دیگر برخوردار است. علاوه بر این در مقایسه با سایر روش‌ها تعداد معادلات کمتر، ماتریس‌های کوچکتر و نیز توانایی حل مسائل با ناحیه‌ی محدود و نامحدود از دیگر قابلیت‌ها و مزایای روش المان مرزی می‌باشد.

مدل‌سازی دوبعدی سیستم حفاظت کاتدیک لوله‌های درون دریا به کمک آند فداشونده با روش المان‌مرزی توسط گریفن، وایت و پاکالایاتی [۱] انجام شده است. در این مدل با فرض پتانسیل ثابت روی آند و در نظر گرفتن منحنی پلاریزاسیون کاتد (لوله) به صورت یک رابطه‌ی غیرخطی، به تحلیل و بررسی چگونگی توزیع پتانسیل روی لوله پرداخته شده است. کنلی، بون و اورازم نیز به مدل‌سازی دوبعدی سیستم حفاظت کاتدیک لوله‌هایی با پوشش معیوب پرداخته‌اند [۲]. ایشان با در نظر گرفتن سیستم حفاظت کاتدیک به روش جریان اعمالی، توزیع جریان و پتانسیل روی لوله در خاک با مقاومت بالا را با استفاده از شرط مرزی خطی روی لوله محاسبه نموده‌اند. اورازم و بون در ادامه‌ی فعالیت‌های خود به بررسی و مقایسه در نظر گرفتن خرابی پوشش به صورت متمرکز و یا خرابی یکنواخت در کل پوشش که منجر به کاهش بازده پوشش می‌شود می‌پردازند [۳]. بریچا و دکونیک به مدل‌سازی سه‌بعدی سیستم حفاظت کاتدیک به روش جریان اعمالی، لوله‌های مدفون پرداخته‌اند [۴]. مدل آنها با در نظر گرفتن افت پتانسیل در طول لوله بررسی شده و به منظور بررسی افت پتانسیل در گوشت لوله از روش المان محدود استفاده شده است. امایا و آوکی به شرح قابلیت‌های روش المان‌مرزی در تحلیل مسائل خوردگی با هندسه‌های پیچیده پرداخته و برای نمونه سیستم حفاظت کاتدیک لوله‌های درون مبدل حرارتی و سازه‌های دریایی نامتقارن را تحلیل کرده‌اند [۵]. بهبهانی نژاد و همکاران نیز سیستم حفاظت کاتدیک یک لوله‌ی مدفون را در حالت دو بعدی مدل نموده و تاثیر پارامترهای مختلف چون اندازه و تعداد آندها، فاصله‌ی آند تا کاتد و نیز اثرات وجود یا عدم وجود پوشش و یا قرارگیری آن در جهات مختلف بر توزیع پتانسیل روی سطح کاتد را بررسی نمودند [۶ و ۷].

در مقاله‌ی حاضر ابتدا با توجه به منابع موجود صحت حل سه‌بعدی با شبیه‌سازی نمونه‌ی دوبعدی موجود و اعمال آن برای حالت سه‌بعدی مورد بررسی قرار می‌گیرد. پس از اطمینان از صحت نتایج، مدل سه‌بعدی سیستم حفاظت کاتدیک برای لوله‌ای با طول دلخواه که مدفون شده و به طریق آندفداشونده حفاظت می‌شود، شبیه‌سازی شده و جریان و پتانسیل در کل لوله تعیین می‌گردد. به کمک نتایج حل چیدمان صحیح آندها تعیین خواهد شد. سیستم فوق برای حالت جریان اعمالی نیز مدل شده و جریان لازم برای حفاظت تعیین شده است.

معادلات حاکم بر خوردگی گالوانیکی

عامل محرک در تولید جریان، اختلاف پتانسیل و به عبارتی تمایل فلزات برای آزاد نمودن الکترون می‌باشد. با استفاده از مفاهیم الکتروشیمیایی، معادله‌ی حاکم بر توزیع جریان و پتانسیل بدست می‌آید [۸]. طبق رابطه‌ی پیوستگی (بقای شار) تغییرات جریان در واحد حجم متناسب با شار جریان می‌باشد [۸،۹].

$$-\nabla I = \frac{\partial q}{\partial t} \quad (1)$$

در حالت دائم، $\frac{\partial q}{\partial t}$ برابر با صفر می‌شود. از طرفی باتوجه به رابطه‌ی پتانسیل با میدان الکتریکی در الکترولیت، $E = -\nabla\phi$ و نیز قانون اهم، $I = KE$ ، معادله حاکم در الکترولیت در حالت دائم به صورت ذیل حاصل می‌شود.

$$\nabla(K\nabla\phi) = 0 \quad (2)$$

در رابطه فوق پارامتر K بیانگر هدایت الکتریکی الکترولیت است. حال چنانچه الکترولیت همگن فرض شود، معادله حاکم به شکل نهائی زیر حاصل می‌گردد.

$$\nabla^2\phi = 0 \quad (3)$$

از این رو پتانسیل الکتریکی هر نقطه در الکترولیت، معادله لاپلاس را ارضا می‌کند. مقدار جریان در هر نقطه از الکترولیت به کمک رابطه‌ی ذیل تعیین می‌شود.

$$I_{xi} = -K \frac{\partial\phi}{\partial xi} \quad (4)$$

در این رابطه I_{xi} دانسیته‌ی جریان در راستای x_i بوده و ϕ تابع پتانسیل می‌باشد.

روش المان مرزی

فرمول‌بندی این روش به طور مبسوط توسط منابع مختلف برای یک الکترولیت همگن ذکر شده‌است [۹،۱۰]. برای حل معادله لاپلاس همانگونه که در معادلات زیر نشان داده شده شرایط مرزی مختلفی وجود دارد که شامل موارد ذیل می‌باشد.

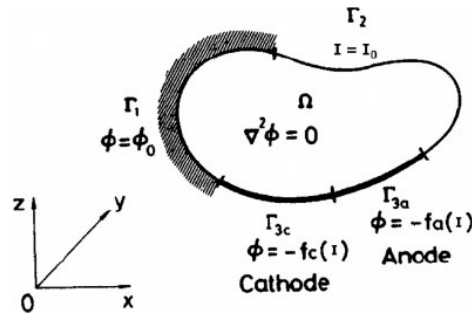
$$\phi = \phi_0 \quad \text{on} \quad \Gamma_1 \quad (5)$$

$$I = I_0 \quad \text{on} \quad \Gamma_2 \quad (6)$$

$$I_a = f(\phi) \quad \text{on} \quad \Gamma_{3a} \quad (7)$$

$$I_c = f(\phi) \quad \text{on} \quad \Gamma_{3c} \quad (8)$$

در شکل زیر $\Gamma (\Gamma_1 + \Gamma_2 + \Gamma_3 + \Gamma_4 \equiv)$ کل مرز ناحیه بسته Ω را تشکیل می‌دهد. شرط مرزی (۵) از نوع شرط مرزی دریچله بوده و یک پتانسیل ثابت روی مرز Γ_1 در نظر می‌گیرد. شرط مرزی (۶) (شرط نیومن) جریانی ثابت روی مرز Γ_2 اعمال کرده و شروط (۷) و (۸) یک رابطه‌ی خطی یا غیر خطی بین جریان و پتانسیل روی آند و کاتد در نظر می‌گیرند.



شکل ۱: شرائط مرزی مختلف برای حل معادله لاپلاس

فرم انتگرال مرزی معادله‌ی لاپلاس به صورت زیر بدست می‌آید [۱۰، ۱۱].

$$c(y)\phi(y) + \int_{\Gamma} \phi(x) I^*(y, x) d\Gamma(x) = \int_{\Gamma} I(x) \phi^*(y, x) d\Gamma(x) \quad (9)$$

ϕ^* جواب اساسی اپراتور لاپلاس می‌باشد و I^* برابر با گرادیان ϕ^* در راستای عمود بر سطح است [۱۱]. با تقسیم مرز مسئله به N المان رابطه‌ی فوق را به صورت زیر می‌توان بازنویسی نمود.

$$c_i \phi_i + \sum_{j=1}^N \int_{\Gamma_j} \phi I^* d\Gamma = \sum_{j=1}^N \int_{\Gamma_j} I \phi^* d\Gamma \quad (10)$$

با اعمال معادله‌ی فوق برای تمام المان‌ها می‌توان در نهایت به فرم ماتریسی زیر رسید.

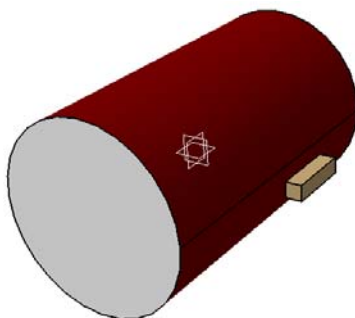
$$H\phi = GI \quad (11)$$

در این رابطه G و H ماتریس‌های تاثیر^۱ و I و ϕ نیز بردار مقادیر جریان و پتانسیل روی گره‌های مرز می‌باشند. [۱۰] با توجه به شرایط مرزی مختلف، روش‌های متفاوتی برای حل دستگاه معادلات رابطه‌ی (۱۱) وجود دارد. چنانچه شرائط مرزی از نوع دریچله یا نیومن باشند، دستگاه معادلات فوق به روش حذفی گوس قابل حل می‌باشند. چنانچه از رابطه‌ی خطی یا غیرخطی منحنی پلاریزاسیون روی آند و کاتد استفاده شود، نیاز به استفاده از روش‌های تکرار چون روش نیوتن رافسون می‌باشد. [۱۲، ۷، ۱]

¹ Influence matrix

مورد مطالعاتی

برای تحلیل سیستم حفاظت کاتدیک یک لوله در محیط مدفون، مدلی مانند شکل ۲ در نظر گرفته شده است.



شکل ۲: سیستم حفاظت کاتدیک برای یک لوله مدفون با یک آند

معادله‌ی حاکم بر مسئله طبق رابطه‌ی (۳) تعریف شده و شرایط مرزی برای حل روی آند و کاتد با توجه به جنس آنها و الکترولیت تعیین می‌شوند. با در نظر گرفتن آند از جنس آلیاژ آلومینیوم و استفاده از روش آند فداشونده، پتانسیل روی آن برابر با مقدار ثابت -1055 mV در نظر گرفته شده ([۱،۱۱]) و با توجه به اینکه جنس لوله‌های انتقال گاز عمدتاً از فولاد بدون درز بوده، برای منحنی پلاریزاسیون روی سطح لوله (کاتد) از رابطه‌ی زیر استفاده می‌شود [۱،۱۱]. رابطه‌ی ذیل به کمک یک سری آزمایشات تجربی بدست آمده و در آن مقادیر مربوط به اکسایش آهن، کاهش اکسیژن و تشکیل هیدروژن لحاظ شده است.

$$i = e^{(\phi+693.91)/24} - \left(\frac{1}{86.06} + e^{(\phi+521.6)/23.47} \right)^{-1} - e^{-(\phi+707.57)/55} \quad (12)$$

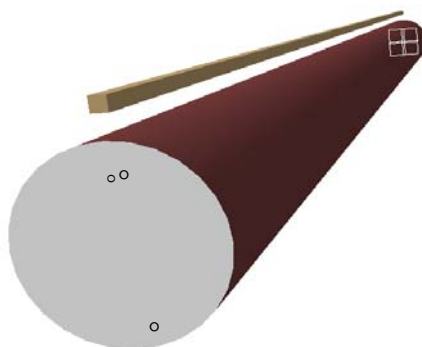
مسئله لوله در محیط مدفون یک مسئله با مرز در بی‌نهایت است. در این حالت یک مجهول به معادلات اضافه شده که برابر با مقدار پتانسیل در بی‌نهایت می‌باشد. برای تعیین این مجهول می‌بایست از معادله‌ی کمکی ذیل کمک گرفت.

$$\int_{\tau} i d\tau = 0 \quad (13)$$

طبق رابطه‌ی فوق مجموع جریان‌های خروجی از آند و ورودی به کاتد باید صفر شود

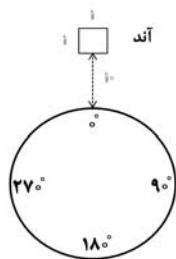
بحث و ارائه نتایج

به منظور اطمینان از صحت کد نگارش شده، ابتدا مسئله‌ی سه‌بعدی برای لوله با مقطع دایروی و نسبت طول به قطر ۱۰۰ و آندی با مقطع مربع و هم طول با لوله که به موازات آن قرار گرفته (شکل ۳) مدل می‌شود.



شکل ۳: کاند و آند بی‌نهایت

پس از تحلیل و تعیین توزیع پتانسیل روی لوله از آنجا که انتظار می‌رود که توزیع پتانسیل در وسط طول لوله از زاویه ۰ تا ۱۸۰ مشابه با توزیع پتانسیل مسئله‌ی دوبعدی به شماتیک ارائه شده در شکل ۴ باشد. با مقایسه نتایج می‌توان صحت محاسبات را بررسی نمود. نتایج این مقایسه برای حالت‌های مختلف المان‌بندی (جدول ۱) روی لوله در شکل ۵ ترسیم شده‌است.

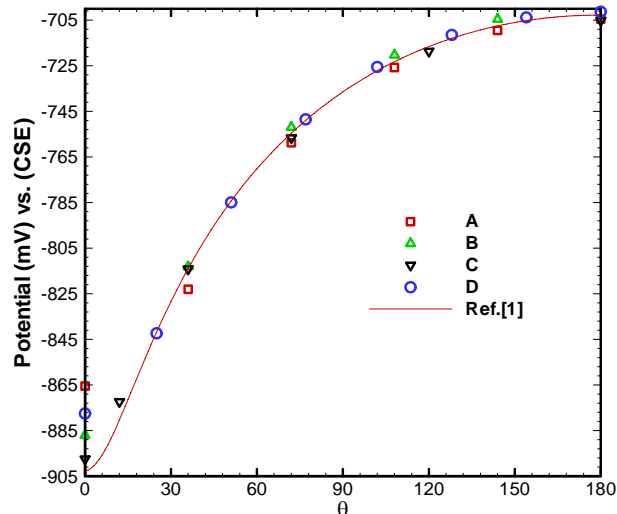


شکل ۴: شماتیک دو بعدی لوله با یک آند

جدول ۱: حالت‌های مختلف شبکه‌بندی لوله

حالت C	حالت D	حالت B	حالت A	
۱۰	۱۴	۲۰	۱۰	تعداد تقسیمات محیط لوله
۱۵۰	۷۵	۷۵	۷۵	طول المان‌ها در راستای محور
۵	-	-	-	استفاده از ضریب تراکم ^۲

^۲ Stretching factor



شکل ۵: مقایسه جواب‌های حل سه‌بعدی در وسط لوله با حل مشابه دوبعدی با شبکه‌بندی‌های مختلف با توجه به اشکال فوق و تطابق نتایج با جواب‌های حل دوبعدی از پیش گزارش شده (منبع [۱]) نتایج حاضر قابل اطمینان بوده و می‌توان از آن برای مدل‌سازی سیستم‌های حفاظت کاتدیک سه‌بعدی استفاده نمود. همانگونه که در شکل ۵ مشاهده می‌گردد تغییر طول المان‌ها در راستای محور تاثیر چندانی روی نتایج ندارد و حالت C بهینه‌تری نسبت به بقیه حالات می‌باشد.

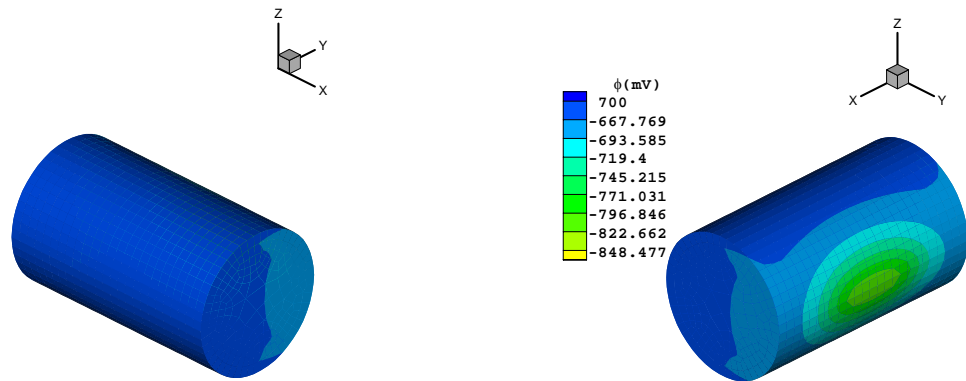
با فرض شبیه‌سازی سیستم حفاظت کاتدیک لوله‌ای مدفون در آب با مشخصات ارائه شده در جدول ۲ و استفاده از روش آند فداشونده نتایج حاصل از شبیه‌سازی در شکل ۶ (الف) ارائه شده است. فاصله‌ی بین آند و کاتد ۰/۱ متر می‌باشد.

جدول ۲: مشخصات لوله و آند

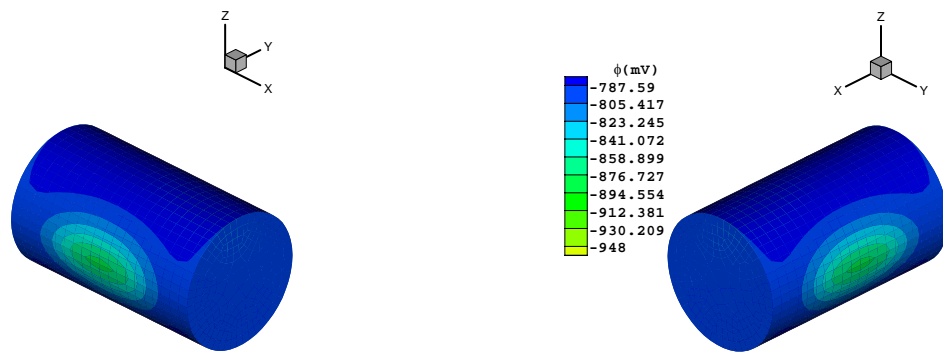
مقطع	طول (متر)	جنس	آند
مربع با ضلع ۰/۱ متر	۰/۲	آلومینیوم (در آند فداشونده)	آند
دایره با قطر ۰/۶	۱	فولاد کم کربن	کاتد (لوله)

مطابق با نتایج این شکل، مشاهده می‌گردد که یک آند به تنهایی قادر به حفاظت از لوله نبوده و همچنان بخش‌هایی از لوله دچار خوردگی خواهند شد. برای رفع این مشکل روش‌های متعددی موجود است که از آن

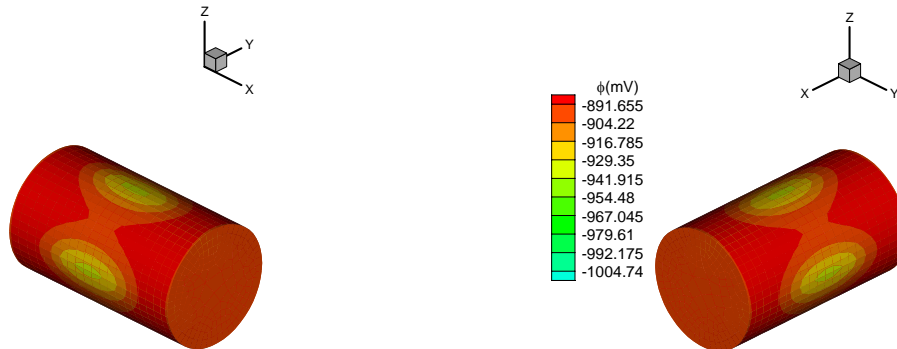
جمله می‌توان به تغییر اندازه آند، تغییر فاصله آند یا تغییر تعداد آندها اشاره نمود. در این بین تغییر تعداد آندها بیشترین تاثیر را در توزیع پتانسیل روی کاتد (لوله) خواهد داشت [۶-۷]. از اینرو تاثیر افزایش تعداد آندها بر توزیع پتانسیل کاتد مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج حاصل از این مدل‌سازی برای دو و چهار آند در شکل ۶ (بخش‌های ب و ج) نشان داده شده است.



الف



ب

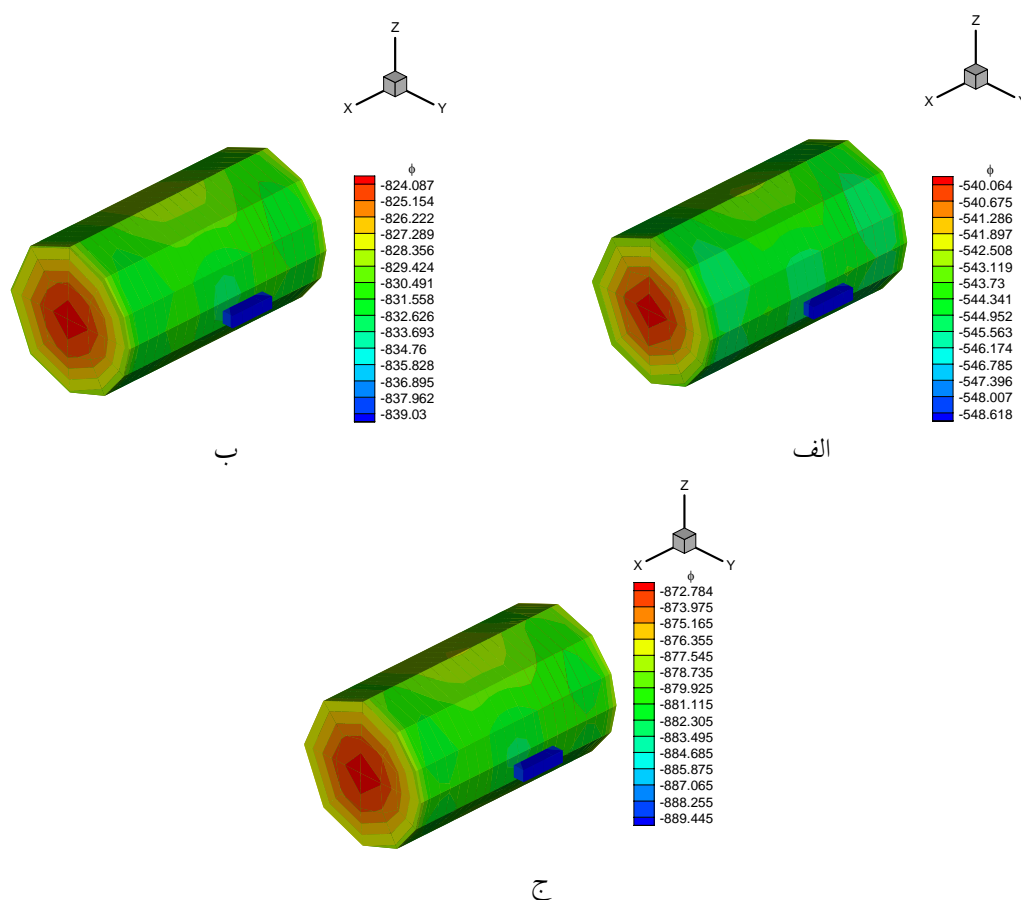


ج

شکل ۶: توزیع پتانسیل در روش آند فداشونده، (الف: با یک آند) - (ب: با دو آند در طرفین) - (ج: با چهار آند در چهار طرف)

مطابق با شکل‌های فوق، همانگونه که انتظار می‌رفت، انتخاب چهار آند در اطراف لوله مناسبترین حالت برای محافظت لوله می‌باشد.

برای مدل‌سازی سیستم جریان اعمالی از چیدمان ارائه شده در شکل ۲ با یک آند و مشخصات جدول ۲ استفاده می‌شود. با در نظر گرفتن جریان اعمال شده به آند برابر با $13/5$ میلی‌آمپر توزیع پتانسیل در شکل ۷ (الف) ارائه شده است. برای مشاهده اثر افزایش جریان اعمالی به آند، جریان را در حالت ثانویه به دو برابر مقدار حالت قبل رسانده و توزیع پتانسیل روی لوله ناشی از این جریان در شکل ۷ (ب) ارائه شده است.



شکل ۷: توزیع پتانسیل در روش جریان اعمالی، الف: جریان برابر با $13/5$ میلی‌آمپر، ب: جریان برابر با 27 میلی‌آمپر، ج: جریان برابر با $31/5$ میلی‌آمپر

همانگونه که انتظار می‌رفت با افزایش جریان قدر مطلق پتانسیل روی لوله نیز افزایش می‌یابد. جریان نهایی برای محافظت کل لوله از خوردگی برابر با $31/5$ میلی‌آمپر می‌باشد. پتانسیل لوله ناشی از این جریان در شکل ۷ (ج) ارائه شده است.

نتیجه گیری

با توجه به نتایج بدست آمده و مقایسه آنها با سایر منابع، می توان نتیجه گرفت که روش حاضر قابلیت بسیار بالایی در تحلیل و مدل سازی دو بعدی و سه بعدی سیستم حفاظت کاتدیک لوله ها با شرایط مرزی غیرخطی دارد. با استفاده از این برنامه می توان نسبت به چیدمان صحیح آندها، تعداد آنها، محل قرارگیری و ابعاد آنها نیز میزان جریان لازم برای حفاظت لوله و یا هر سازه ی دیگر، اقدام نمود. از مزایای دیگر این روش می توان به بررسی کمی و کیفی تاثیر تغییر هر یک از عوامل فوق بر توزیع پتانسیل و جریان روی سازه اشاره نمود. با توجه به اینکه روش حاضر قادر به تعیین پتانسیل روی تمامی نقاط می باشد می توان به راحتی در مورد ایجاد یا عدم ایجاد پتانسیل اضافی روی سازه اظهار نظر نمود.

منابع

- [1] J. F. Yan, S. N. R. Pakalapati, T. V. Nguyen, R. E. White and R. B. Griffin, "Mathematical Modeling of Cathodic Protection using the Boundary Element Method with a Nonlinear Polarization Curve," J. Electrochem. Soc., Vol. 139, No. 7, July 1992
- [2] K. J. Kennelley, L. Bone and M. E. Orazem, "Current and Potential Distribution on a Coated Pipeline with Holidays Part I – Model and Experimental Verification," Corrosion Journal, Vol. 49, N0.3, March 1993.
- [3] K. J. Kennelley, L. Bone and M. E. Orazem, "Current and Potential Distribution on a Coated Pipeline with Holidays Part II– Comparison of the effects of Discrete and Distributed Holidays," Corrosion Journal, Vol. 49, N0.3, March 1993.
- [4] F. Brichau and J. Deconinck, "A Numerical Model for Cathodic Protection of Buried Pipes," Corrosion Journal, Vol. 50, No. 1, January 1994.
- [5] K. Amaya, S. Aoki, "Effective Boundary element methods in corrosion analysis," Journal of Engineering Analysis with Boundary Elements, Vol. 27, pp. 507- 519, 2003.
- [۶] بهبهانی نژاد، م.، چنگیزیان، م. و سببی، م.، "شبیه سازی عددی سیستم حفاظت کاتدیک و بررسی پارامترهای موثر در توزیع پتانسیل روی کاتد به روش المان مرزی"، مجموعه مقالات هفتمین همایش مهندسی مواد و متالورژی ایران، نجف آباد: دانشگاه آزاد اسلامی، آذرماه ۱۳۸۶.
- [۷] چنگیزیان، م.، "تحلیل عددی حفاظت کاتدیک خطوط لوله گاز طبیعی به روش المان مرزی"، رساله جهت اخذ مدرک کارشناسی ارشد، دانشگاه شهید چمران، شهریور ۱۳۸۶.
- [8] N. Perez, "Electrochemistry and Corrosion Science," Kluwer Academic Publishers, New York, 2004
- [9] A. Adey, "Modeling of Cathodic Protection System," WIT Press, 2006.

- [10] R. A. Adey, C. A. Brebbia, S. M. Niku, "Application of boundary element in Corrosion Engineering ,". 22 Nov. 2002 (access).
- [11] L. C. Wrobel, " The Boundary Element Method, Vol I: Application in Thermo-Fluids and Acoustics ,", John Willy & Sons, LTD, 2001.
- [12] J. X. Jia, G. Song, A. Atrens, D. St John, J. Baynham and G. Chandler, "Evaluation of the BEASY Program using linear and Piecewise Linear Approaches for the Boundary Condition ,", Journal of Matherial & Corrosion, Vol. 55. No. 11, 2004.

پ. تحلیل جریان گذرای گاز طبیعی با استفاده از توابع تبدیل و مقایسه نتایج آن با روشهای عددی غیردائم

چکیده

جریان درون لوله‌های گاز به دلیل حضور تغییرات زمانی، ماهیتی غیردائم داشته و در بسیاری از موارد، فرض جریان دائم خطای بالایی دارد. با تحلیل جریان غیردائم گاز می‌توان به بررسی لحظه‌ای رفتار آن درون شبکه پرداخت. در این مقاله با استفاده از حوزه فرکانس، توابع تبدیل جریان غیردائم درون لوله‌های گاز طبیعی استخراج شده و به بررسی قابلیت آن در مدلسازی جریان پرداخته می‌شود. جهت این بررسی یافته‌های روش توابع تبدیل با نتایج بدست آمده از روش‌های عددی مستقیم (نظیر الگوریتم‌های صریح و ضمنی اختلاف محدود، روش FCT، روش‌های TVD با محدودکننده) مقایسه می‌گردد. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که می‌توان از روش توابع تبدیل در حالت‌هایی که میزان تغییرات زمانی خواص جریان در آنها نسبت به حالت دائم از ۷۰ درصد تجاوز نمی‌کند، به عنوان روشی که دارای دقت مناسب و سرعت محاسباتی بسیار بیشتری نسبت به سایر روش‌های عددی تحلیل مستقیم جریان غیردائم می‌باشد استفاده کرد. البته برای حالت‌های دارای تغییرات زمانی بیش از این نیز می‌توان تا درصدهایی با در نظر گرفتن نقاط دیگری برای خطی‌سازی حول آن به نتایج دقیق و رضایت‌بخشی دست یافت.

واژه‌های کلیدی: روش توابع تبدیل، جریان گذرای گاز طبیعی، حل عددی جریان گاز

مقدمه

امروزه استفاده از سیستم‌های کنترلی اتوماتیک برای تنظیم خودکار شبکه‌های گازرسانی و نگهداری شبکه شهری در حداقل فشار ممکن مد نظر می‌باشد. از طرفی به دلیل وجود یک‌سری تغییرات زمانی در عملیات گازرسانی، مثل راه‌اندازی یا از کار افتادن ایستگاه‌های تقلیل فشار و نشستی خط لوله، جریانی کاملاً غیردائم درون لوله‌ها ایجاد می‌شود. از سوی دیگر سیستم‌های انتقال گاز طبیعی و گسترش استفاده از این منبع انرژی، روز به روز پیچیده‌تر می‌گردند. لذا مدلسازی ریاضی و حل عددی جریان، یکی از ابزارهای مهم برای کمک به طراحی و مطالعات ساختاری این زمینه است.

بحث حل عددی جریان غیردائم گاز، دارای پیشینه‌ای نسبتاً طولانی بوده و محققین مختلفی در این زمینه فعال بوده‌اند. روش‌های مختلفی هم به شکلی پراکنده در این میان بررسی و یا حتی ابداع شده است که از آن جمله می‌توان به روش خطوط مشخصه [۱]، تعداد زیادی روش اختلاف محدود از قبیل روش‌های صریح لکس-وندروف، لپ-فراگ و پادباسو [۲]، و روش‌های ضمنی با اختلاف مرکزی زمان، کرنک‌نیکلسون و ذوزنقه‌ای [۳]، اشاره کرد. در دسامبر ۱۹۷۱، گروهی به سرپرستی دکتر وایلی، از این روش‌های اختلاف محدود مرکزی ضمنی برای حل شبکه توزیع گاز طبیعی، استفاده کرده و نتایج روش خود را با روش مشخصه‌ها مقایسه کردند [۴]. تحقیقات جدیدی هم در این زمینه روی الگوریتم‌های عددی نوینی مثل روش کاهش تغییرات کلی [۵] یا روش خطوط [۶] انجام شده است؛ این روش‌ها به فرم شماتیک چندگانه با دقت بالا و با قابلیت دستکاری در شرایط مرزی می‌باشند که توسط ابراهیم و آدوومی در سال ۱۹۹۶ انجام گرفته‌اند؛ آنها با بهره‌گیری از روش رانج-کوتای بهبودیافته، حل جریان غیردائم دوبعدی را برای حل مناطقی از شبکه انتقال گاز طبیعی که دارای ناپیوستگی‌های تندی هستند، ترتیب دادند [۷]. در سال ۲۰۰۳ نیز تنتیس و مارگاریس به حل عددی و شبیه‌سازی جریان گذرای گاز و بررسی عددی معادلات حاکم با استفاده از روش خطوط (MOL) پرداختند [۸].

در این مقاله با خطی‌سازی معادلات حاکم بر جریان غیردائم و بردن آنها به فضای لاپلاس، توابع تبدیل جریان استخراج شده و نتایج به دست آمده از آن با نتایج روش‌های متداول حل عددی مقایسه می‌گردد.

معادلات حاکم و تعیین توابع تبدیل

درحالت کلی معادلات حاکم بر جریان غیردائم گاز با فرض جریان همدمما شامل معادله بقای جرم و مومنتوم به ترتیب به شکل روابط (۱) و (۲) هستند که در آن β به شکل $1/A(dA/dx)$ تعریف می‌شود.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} = -\rho u \beta \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u^2 + P)}{\partial x} = -\frac{\rho u |u|}{2D} f - \rho g \sin \alpha - \rho u^2 \beta \quad (2)$$

با خطی سازی حول نقاط مشخص بر اساس دبی، فشار، دما و ... می‌توان به روابط زیر بر اساس دبی و فشار در ورودی و خروجی و به شکل بی‌بعد در محیط لاپلاس دست یافت:

$$\begin{aligned} \Delta P_{out}^*(s) = & e^{\gamma/2} \frac{2b}{2b \cosh(b) - \gamma \sinh(b)} \Delta P_{in}^*(s) + \\ & - \frac{2\alpha \sinh(b)}{2b \cosh(b) - \gamma \sinh(b)} \Delta M_{out}^*(s) \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \Delta M_{in}^*(s) = & \frac{2\beta \sinh(b)}{2b \cosh(b) - \gamma \sinh(b)} \Delta P_{in}^*(s) + \\ & + e^{-\gamma/2} \frac{2b}{2b \cosh(b) - \gamma \sinh(b)} \Delta M_{out}^*(s) \end{aligned} \quad (4)$$

حال با استفاده از بسط تیلور می‌توان دستگاه به دست آمده را ساده‌تر کرد:

$$F_{P_{out}, P_{in}}(s) = k_1 \frac{1}{1 + a_1 s + a_2 s^2} \quad (5)$$

$$F_{P_{out}, M_{out}}(s) = k_2 \frac{1 + b_1 s + b_2 s^2}{1 + \hat{a}_1 s + \hat{a}_2 s^2} \quad (6)$$

$$F_{M_{in}, P_{in}}(s) = \frac{c_1 s + c_2 s^2}{1 + \hat{a}_1 s + \hat{a}_2 s^2} \quad (7)$$

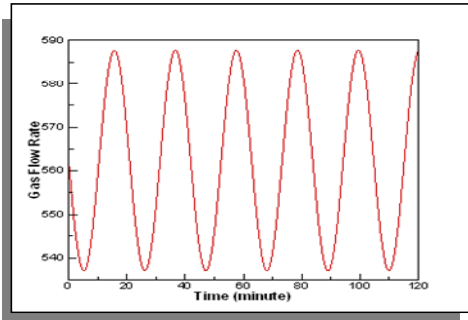
$$F_{M_{in}, P_{in}}(s) = \frac{c_1 s + c_2 s^2}{1 + \hat{a}_1 s + \hat{a}_2 s^2} \quad (8)$$

که هر کدام از پارامترهای این روابط بر اساس هندسه لوله و فیزیک مسأله بیان می‌شوند. نهایتاً با جایگزینی توابعی که در روابط (5) تا (8) به دست آمده‌اند می‌توان به محیط سیمولینکی شکل ۱ دست یافت. این حالت برای لوله‌ای است که در آن مقدار تغییرات زمانی دبی خروجی و فشار ورودی معلوم است. اما برای حالت‌های دیگر با مقادیر معلوم غیر از این می‌توان دستگاه معادله (3)–(4) را بر حسب آنها نوشت و مدل مشابهی را استخراج نمود.

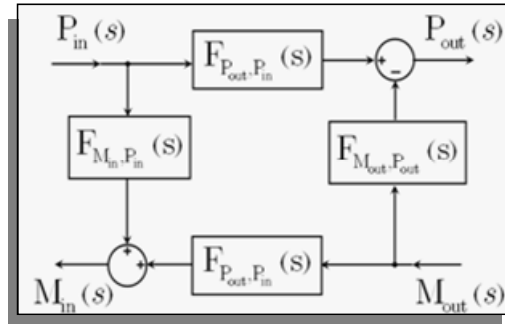
نتایج بدست آمده

جهت بررسی قابلیت این مدل در تحلیل جریان غیر دائم، لوله‌ای با طول ۴۴.۹ مایل و قطر ۸.۵ اینچ که در آن ضریب اصطکاک ۰.۰۳ ثابت فرض می‌گردد، در نظر گرفته شده است. این مسئله یک بار برای زمان ۱۲۰ دقیقه، بدون تغییرات فشار ورودی و با تغییرات دبی خروجی نشان داده شده در شکل ۲ و یکبار هم با دبی خروجی مطابق شکل ۳ مورد مطالعه قرار گرفت. نتایجی که از این مدلها بدست آمده‌اند به ترتیب در شکل ۴ با روش ضمنی و در شکل ۵ با روش TVD و نتایج تجربی مقایسه شده‌اند.

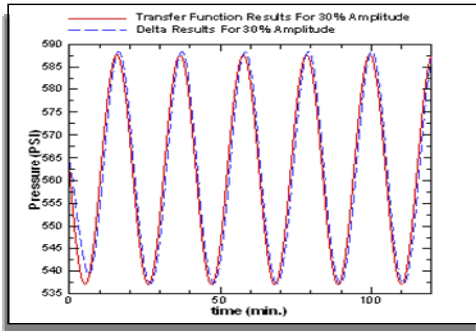
ملاحظه می‌شود که دقت توابع تبدیل در مقایسه با روشهای عددی بسیار مناسب است. از طرفی با توجه به مقادیر جدول ۱ سرعت بالای انجام محاسبات در این روش نتیجه می‌شود.



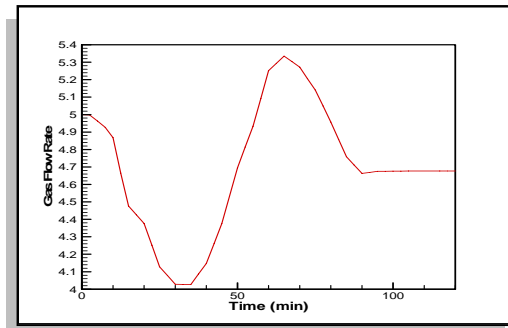
شکل ۲: تغییرات هارمونیک دبی خروجی



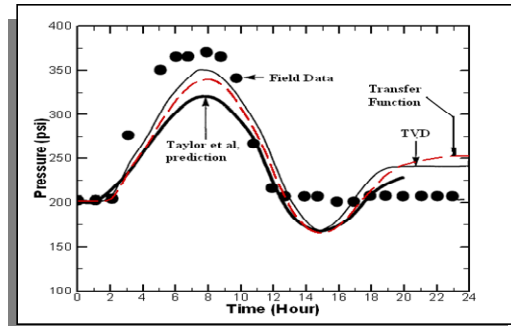
شکل ۱: نمونه‌ای از فرم توابع تبدیل مسئله



شکل ۴: مقایسه نتایج با روش ضمنی



شکل ۳: تغییرات دلخواه دبی خروجی



شکل ۵: مقایسه نتایج با روش‌های عددی و تجربی

جدول ۱: مقایسه زمان CPU لازم برای تحلیل با روش‌های عددی مختلف

نام روش عددی	زمان مورد نیاز (بر حسب ثانیه)
FCT	۱۱۲۰.۲۰
ضمنی	۳۴.۵۲
توابع تبدیل	۱.۱۸

مراجع

- [1] M.J. Zucrow, J.D. Hofmann, "Gas Dynamics", Vols. I & II, Willey Press, 1976.
- [2] H.H. Rachford, T. Dupont, "A fast highly accurate means of modeling transient flow in gas pipelines by variational methods", Soc. Pet. Eng. J. 14, 1974, 165–178.
- [3] S. Abarbanel, D. Gottlieb, E. Turkel, "Difference schemes with four order accuracy for hyperbolic", SIAM J. Appl. Math. 29, 1975, 329–351.
- [4] E.B. Wylie, M.A. Stoner and V.L. Streeter, "Network System Transient Calculation by Implicit Methods", Soc. Eng. J., 1971, 356-362.
- [5] J. Zhou, M.A. Adewumi, "Simulation of transients in natural gas pipelines using hybrid TVD schemes", Int. J. Numer. Methods Fluids 32, 2000, 407–437.
- [6] W.E. Schiesser, "The Numerical Method of Lines", Academic Press, 1991.
- [7] Ibraheem, S.O. and Adewumi, M.A, "Higher-Resolution Numerical Solution for Two-Dimensional Transient Natural Gas Pipeline Flows", Society of Petroleum Engineers, SPE 35626, 1996, 473-482.
- [8] Tentis E., Margaris D., Papanikas D., (2003), "Transient gas flow simulation using an Adaptive Method of Lines", Fluid Mechanics Laboratory, University of Patras, 26500 Patras, Greece, pp 481-487

ت. کتابخانه سیمولینکی برای شبیه‌سازی جریان غیردائم گاز درون شبکه (مقاله)

در این پیوست به ارائه اولین مقاله پذیرفته شده در همایش مکانیک سیالات آلمان (ICFM 2008) تحت عنوان "کتابخانه سیمولینکی برای شبیه‌سازی جریان غیردائم گاز درون شبکه" پرداخته می‌شود.

A MATLAB Simulink Library for Transient Flow Simulation of Gas Networks

M. Behbahani-Nejad and A. Bagheri

Abstract— An efficient transient flow simulation for gas pipelines and networks is presented. The proposed transient flow simulation is based on the transfer function models and MATLAB-Simulink. The equivalent transfer functions of the nonlinear governing equations are derived for different types of the boundary conditions. Next, a MATLAB-Simulink library is developed and proposed considering any boundary condition type. To verify the accuracy and the computational efficiency of the proposed simulation, the results obtained are compared with those of the conventional finite difference schemes (such as TVD, method of lines, and other finite difference implicit and explicit schemes). The effects of the flow inertia and the pipeline inclination are incorporated in this simulation. It is shown that the proposed simulation has a sufficient accuracy and it is computationally more efficient than the other methods.

Keywords— gas network, MATLAB-Simulink, transfer functions, transient flow.

I. INTRODUCTION

NATURAL gas transportation and distribution are commonly accomplished in many countries through the gas pipelines and networks. Due to the on-line networks 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 **Error! Reference source not found.**–**Error! Reference source not found.**, but unfortunately, almost all of these conventional schemes are time consuming especially for gas network analysis.

Some of investigators **Error! Reference source not found.**, **Error! Reference source not found.** have neglected inertia term in momentum equation to linearize partial differential set of equations. However, it will result in loss of accuracy. Yow introduced the concept of inertia multiplier to partially account the effect of the inertia term **Error! Reference source not found.**. Osadacz et al. simulated transient gas flow with isothermal assumption without neglecting any terms in momentum equation for gas networks **Error! Reference source not found.**. Kiuchi used an implicit method to analyze unsteady gas networks at isothermal

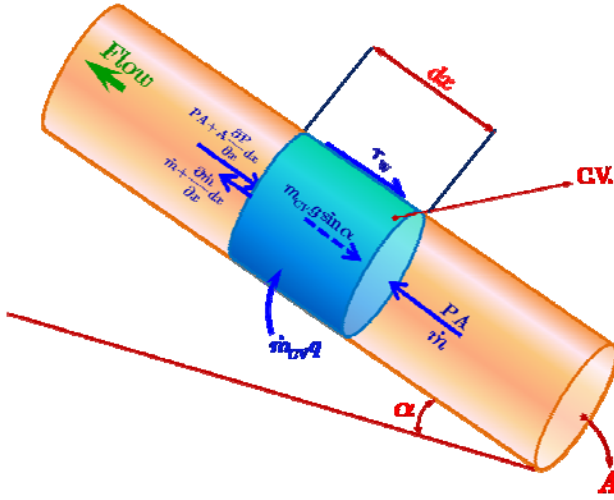


Fig. 1: A control volume in a general gas pipeline

conditions **Error! Reference source not found.**. Also, Dukhovnaya and A. Michael **Error! Reference source not found.**, and Zhou and Adewumi **Error! Reference source not found.** 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 **Error! Reference source not found.**. Ke and Ti analyzed isothermal transient gas flow in the pipeline networks using

the electrical models for the loops and nodes **Error! Reference source not found.**. Recently and in a new work, Gonzales et al. **Error! Reference source not found.** 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. **Error! Reference source not found.** 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. In the present study the transient flow transfer functions are employed with another efficient approach. The object of this paper is to prepare a MATLAB-Simulink library in order to simulate the transient flow in gas pipelines and networks. For this purpose, the transfer functions of a single pipeline are derived and applied to develop a MATLAB-Simulink library. Next, this library is used for a gas pipeline transient flow simulation and its accuracy and efficiency is compared with those results obtained by an accurate implicit nonlinear finite difference scheme. The idea is then extended for a typical network simulation. The results obtained show that proposed simulation has a sufficient accuracy and is more efficient than the other methods.

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 **Error! Reference source not found.**

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u^2 + P)}{\partial x} = -\frac{\rho u |u|}{2D} f - \rho g \sin \alpha \quad (2)$$

$$P = \rho Z R_g T \quad (3)$$

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.

The governing equations in matrix form are

$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{F}}{\partial x} = \mathbf{R} \quad (4)$$

where

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} \rho u \\ \rho u^2 + P \end{bmatrix}, \quad \mathbf{R} = \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{\rho u |u|}{2D} f - \rho g \sin \alpha \end{bmatrix} \quad (5)$$

Another form of the relations (1) and (2) versus the gas pressure and the mass flow rate can be written as **Error! Reference source not found.**

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{P}{(1 + \hat{k}P)RT} \right) + \frac{1}{A} \frac{\partial \dot{m}}{\partial x} = 0 \quad (6)$$

$$\frac{\partial P}{\partial x} = -\frac{1}{A} \frac{\partial \dot{m}}{\partial t} - RT \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1 + \hat{k}P}{A^2 P} \dot{m}^2 \right) - \frac{f}{2DA^2} \frac{\dot{m} |\dot{m}|}{P} (1 + \hat{k}P) RT - g \frac{\Delta h}{L} \frac{P}{(1 + \hat{k}P)RT} \quad (7)$$

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. FINITE DIFFERENCE SCHEME

The implicit Steger-Warming flux vector splitting method (FSM) in delta formulation has been used as the numerical scheme. This method is chosen, because it doesn't have the problem of numerical instability **Error! Reference source not found.** The finite difference form of the governing equations is

$$\begin{aligned} & -\frac{\Delta t}{\Delta x} \mathbf{A}_{i-1}^+ \Delta \mathbf{U}_{i-1} + \left\{ \mathbf{I} + \frac{\Delta t}{\Delta x} (\mathbf{A}_i^+ - \mathbf{A}_i^-) - \Delta t \mathbf{B}_i \right\} \Delta \mathbf{U}_i \\ & + \frac{\Delta t}{\Delta x} \mathbf{A}_{i+1}^- \Delta \mathbf{U}_{i+1} = \\ & -\frac{\Delta t}{\Delta x} \left\{ (\mathbf{F}_i^+ - \mathbf{F}_{i-1}^+) + (\mathbf{F}_{i+1}^- - \mathbf{F}_i^-) \right\} + \Delta t \mathbf{R}_i \end{aligned} \quad (9)$$

where

$$\Delta \mathbf{U} = \mathbf{U}^{n+1} - \mathbf{U}^n \quad (10)$$

and subscript i indicates the spatial grid point, superscript n indicates the time level, and moreover

$$\mathbf{A}^+ = \begin{bmatrix} \frac{c^2 - u^2}{2c} & \frac{u+c}{2c} \\ \frac{(u+c)^2(c-u)}{2c} & \frac{(u+c)^2}{2c} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{A}^- = \begin{bmatrix} \frac{u^2 - c^2}{2c} & \frac{c-u}{2c} \\ \frac{(u+c)(c-u)^2}{2c} & -\frac{(c-u)^2}{2c} \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$\mathbf{F}^+ = \begin{bmatrix} \frac{\rho(u+c)}{2} \\ \frac{\rho(u+c)^2}{2} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{F}^- = \begin{bmatrix} \frac{\rho(u-c)}{2} \\ \frac{\rho(u-c)^2}{2} \end{bmatrix}$$

where c is the speed of acoustic wave in the gas flow. When (9) is applied to each grid point, a block tridiagonal system of algebraic equations will be obtained. This equations system can be solved at each time step using Thomas algorithm,

which results in $\Delta \mathbf{U}$. Next, \mathbf{U} at the advanced time level can be calculated using (10).

IV. 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

$$\begin{aligned} \xi &= \frac{x}{L} \\ t^* &= \frac{tc}{L} \\ P^* &= \rho^* = \frac{P}{P_0} \end{aligned} \quad (12)$$

$$\dot{m}^* = \dot{m}c / P_0 A_0$$

$$u^* = \frac{u_0}{c}$$

where u_0 is the average gas velocity in the pipe and is calculated as **Error! Reference source not found.**

$$u_0 = \frac{(\dot{m}_m + \dot{m}_{out}) Z_0 R T_0}{(P_m + P_{out}) A_0} \quad (13)$$

When the governing equations (6) and (7) are linearized and the nondimensional variables are used, with some mathematical manipulations one obtains **Error! Reference source not found.**

$$\frac{\partial \Delta \dot{m}^*}{\partial \xi} = -\frac{\partial \Delta P^*}{\partial t^*} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} \left[1 - u^{*2} \right] \frac{\partial \Delta P^*}{\partial \xi} &= -\frac{\partial \Delta \dot{m}^*}{\partial t^*} + 2u^* \frac{\partial \Delta P^*}{\partial t^*} - \\ & \left[u^* fL^* \Delta \dot{m}^* + \left\{ \frac{fL^*}{2} u^* |u^*| - \frac{g\Delta h}{c^2} \right\} \Delta P^* \right] \end{aligned} \quad (15)$$

where

$$\Delta P^* = P^* - P_0^* \quad (16)$$

$$\Delta \dot{m}^* = \dot{m}^* - \dot{m}_0^*$$

Since for the practical subsonic transient flows $u^* = u_0/c \ll 1$, one can omit u^{*2} at the left hand side of (15). Taking the Laplace transform of (14) and (15), yields the following two coupled linear ordinary differential equations

$$\frac{\partial \Delta \dot{m}^*(s)}{\partial \xi} = -s \Delta P^*(s) \quad (17)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Delta P^*(s)}{\partial \xi} &= -\left[u^* fL^* + s \right] \Delta \dot{m}^*(s) + \\ & \left\{ \frac{fL^*}{2} u^* |u^*| - \frac{g\Delta h}{c^2} + 2u^* s \right\} \Delta P^*(s) \end{aligned} \quad (18)$$

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

$$\begin{cases} \Delta P_{out}^*(s) = e^{\gamma/2} \frac{2b}{2b \cosh(b) - \gamma \sinh(b)} \Delta P_{in}^*(s) + \\ \quad - \frac{2\alpha \sinh(b)}{2b \cosh(b) - \gamma \sinh(b)} \Delta M_{out}^*(s) \\ \Delta M_{in}^*(s) = \frac{2\beta \sinh(b)}{2b \cosh(b) - \gamma \sinh(b)} \Delta P_{in}^*(s) + \\ \quad + e^{-\gamma/2} \frac{2b}{2b \cosh(b) - \gamma \sinh(b)} \Delta M_{out}^*(s) \end{cases} \quad (19)$$

where α , β , b and γ are defined in appendix A. After Taylor-expansion of the hyperbolic terms in (19), the simplified transfer functions are

$$\begin{cases} \Delta P_{out}^*(s) = F_{P_{out},P_{in}} \Delta P_{in}^*(s) + F_{M_{out},P_{out}} \Delta M_{out}^*(s) \\ \Delta M_{in}^*(s) = F_{M_{in},P_{in}} \Delta P_{in}^*(s) + F_{M_{in},M_{out}} \Delta M_{out}^*(s) \end{cases} \quad (20)$$

where

$$F_{P_{out},P_{in}}(s) = k_1 \frac{1}{1 + a_1 s + a_2 s^2} \quad (21)$$

$$F_{M_{in},P_{in}}(s) = \frac{c_1 s + c_2 s^2}{1 + \hat{a}_1 s + \hat{a}_2 s^2} \quad (22)$$

$$F_{P_{out},M_{out}}(s) = k_2 \frac{1 + b_1 s + b_2 s^2}{1 + \hat{a}_1 s + \hat{a}_2 s^2} \quad (23)$$

$$F_{M_{in},M_{out}}(s) = \frac{1}{1 + d_1 s + d_2 s^2} \quad (24)$$

The coefficients of the above expansions are also presented in appendix A. For other types of the boundary conditions, similar relations can be obtained.

V. MATLAB SIMULINK MODEL

When the flow transfer functions are obtained, they can be used to make a MATLAB-Simulink model for transient analysis. Fig. 2 shows a Simulink model for a single pipe when the gas pressure at the inlet and the mass flow rate at the outlet are known. For other boundary conditions, similar models can be made.

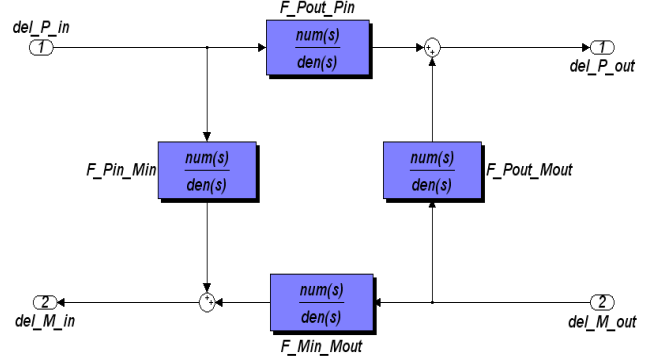


Fig. 2: A simulink model when the pipeline inlet pressure and the outlet gas flow rate are known

At the present work, a Simulink library for each type of the boundary conditions is made in the MATLAB-Simulink browser that is called as shown in Fig. 3. In this library each block has two inputs which are known from the boundary conditions, and two outputs which are the results of the transient simulation. Then, the proposed approach is extended to simulate a gas network. A typical network which has been studied by Ke and Ti **Error! Reference source not found.** is considered and simulated with the proposed approach. Fig. 4 shows a schematic of this network and its Simulink model is illustrated in Fig. 5. The accuracy of the obtained results and the computational efficiency of the proposed simulation are discussed in the next section.

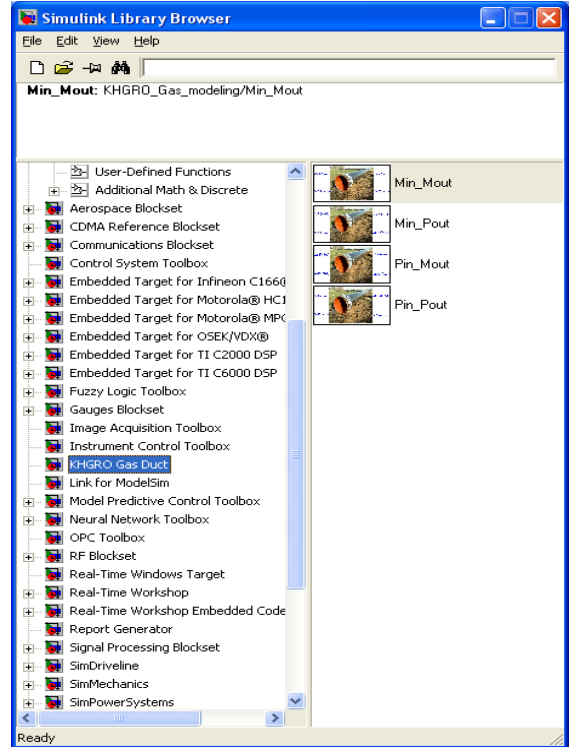


Fig. 3: The present MATLAB-Simulink

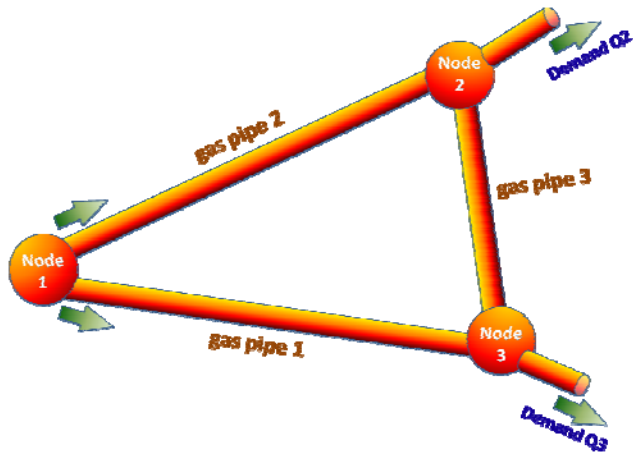


Fig. 4: The gas pipeline network

The pipeline transports natural gas of 0.675 specific gravity at 10°C . The gas viscosity is 1.1831×10^{-5} N.sec/m², 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.

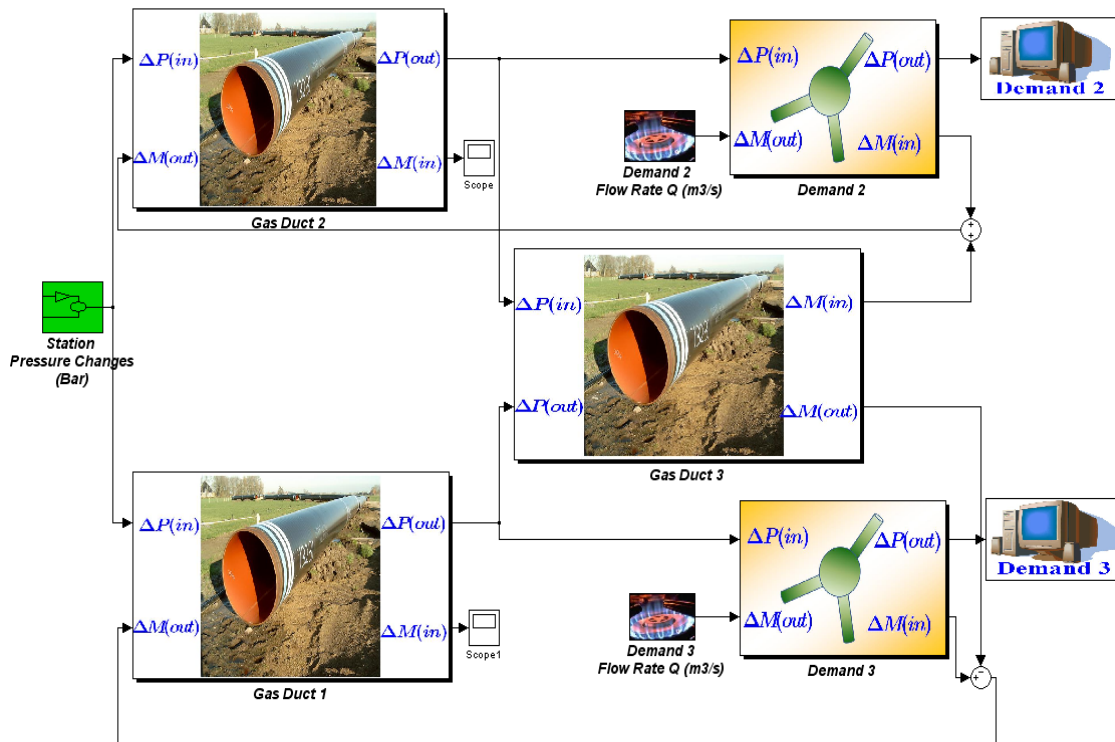


Fig. 5: Simulink model of the gas pipeline network

VI. RESULTS AND DISCUSSIONS

The results of the proposed transient simulation are compared with those of the implicit FSM as an accurate nonlinear finite difference scheme. In order to verify the accuracy of the present implicit FSM, a 72259.5 m long pipeline of 0.2 m diameter was considered as a test case. The test case which its experimental results are available, has been studied by Taylor et al. **Error! Reference source not found.**, Zhou and Adewumi **Error! Reference source not found.**, and also by Tentis et al. **Error! Reference source not found.**

Fig. 7 illustrates the present results of FSM for pressure time changes at the pipe outlet, along with those of the others **Error! Reference source not found.**, **Error! Reference source not found.**, **Error! Reference source not found.** and the experiments. There are some differences between the present nonlinear FSM results with those obtained by the others. However, when they are compared with the experiments, it seems that all of the numerical methods have the nearly similar differences with experiments. The interesting point is the accuracy of the results of the proposed transfer function model. As it is seen in Fig. 7, the present transfer function model can predict the transient behavior of the outlet pressure as nearly accurate as the nonlinear finite difference models.

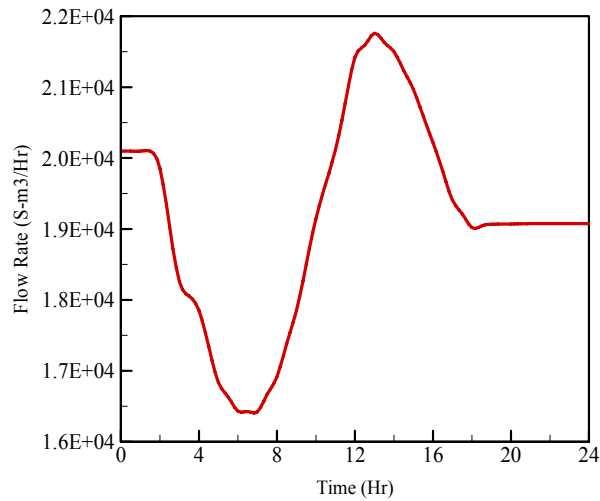


Fig. 6: A 24-hour irregular flow imposed at the pipe outlet

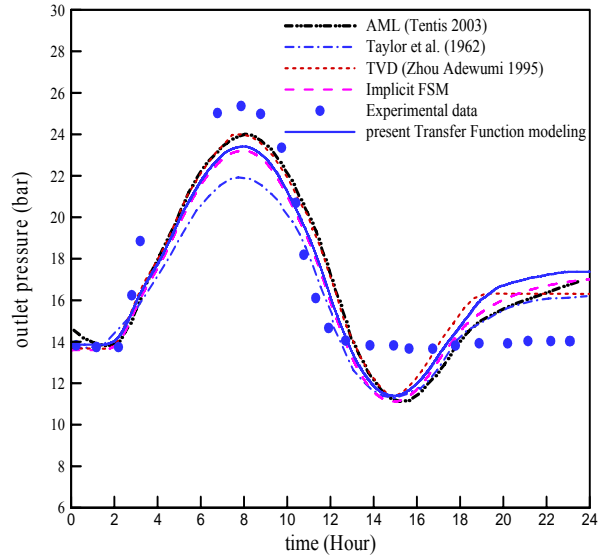


Fig. 7: Comparison of pressure time history at the outlet

A harmonic demand as shown in Fig. 8 was imposed at the pipe outlet as another test case. From Fig. 9, it is observed that the present transfer function model can well follow the results of the implicit FSM after a few minutes. The relatively large errors at the initial times are expected because at these times the outlet pressure does not achieve its purely harmonic behavior.

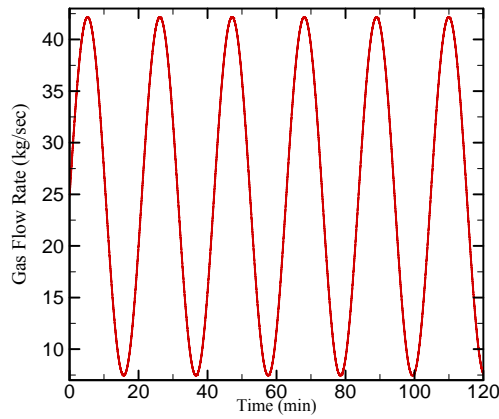


Fig. 8: A periodic demand imposed at the pipe outlet

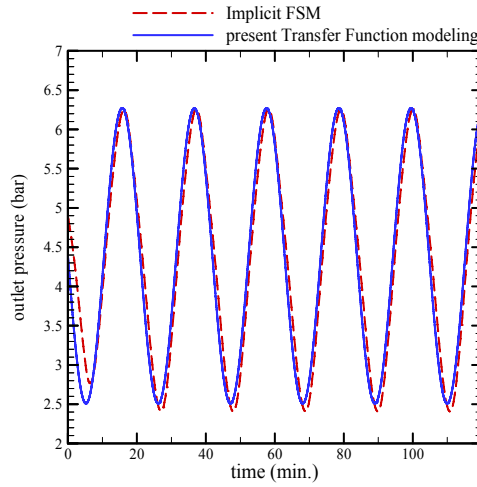


Fig. 9: The gas outlet pressure predicted by the present simulation and implicit FSM

Finally, a typical network as shown in Fig. 4 was considered to confirm 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. 10. The pressure source in the network is node 1 which is maintained at a constant pressure of 50 bar. The gas specific gravity is approximately 0.6, the operational temperature is 278 K, and the friction factor is considered to be constant and equal to 0.003. The present simulation results are compared with those obtained by Ke and Ti **Error! Reference source not found.** in Figs. 11 and 12. As is shown in the figures a good agreement is observed although some differences exist at the sharp points. This behavior implies that the transfer function model results in the sharp changes in the outlet pressure if the demand at the outlet is sharp.

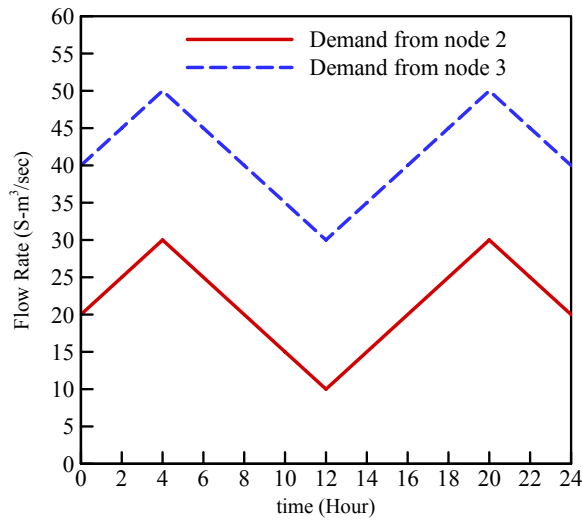


Fig. 10: demands versus time for nodes 2 and 3 of the simulated network

Table I: pipe geometrical data for the related network

Gas Duct 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

The computational efficiency of the proposed simulation is compared with the implicit FSM through the results presented in Table II. It is observed that the proposed simulation is extremely efficient than the conventional finite difference methods.

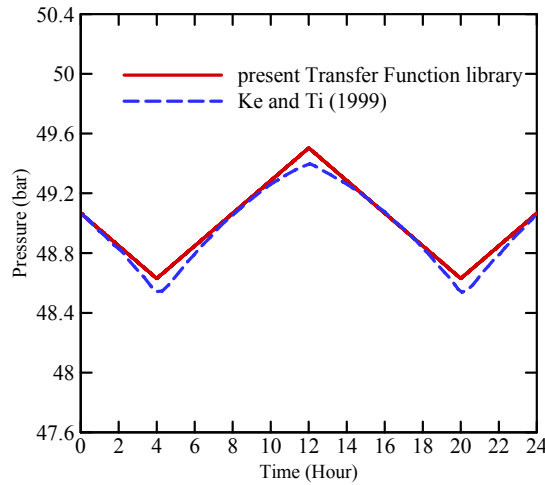


Fig. 11: Outlet pressure results for nodes 2

Table II: Speed comparison between used methods

method	CPU time (s)
transfer function (current study)	1.18
implicit method	34.52

VII. CONCLUSIONS

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 transfer functions of the transient gas flows, it is more computationally efficient than the other finite difference methods. On the other hand, it is an easy task to analyze the transient flows with any boundary condition types using the proposed MATLAB-Simulink library. Moreover, one can assemble the transfer functions of all the network pipes to simulate the dynamic behavior of a gas network. The present study is shown that the proposed simulation extremely reduces the computational time comparing the other numerical schemes. However, because the present simulation is based on the flow transfer functions it only gives the endpoints results and not those distributions along the pipelines.

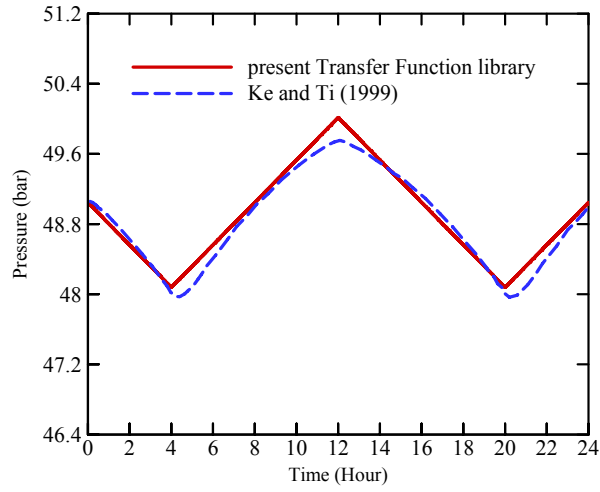


Fig. 12: Outlet pressure results for nodes 3

APPENDIX A

In this appendix, the algebraic expressions of the parameters used in (19) and (21)-(24) are presented. α , β , γ and b which are used in (19) are stated as **Error! Reference source not found.**

$$\begin{aligned}
 \alpha(s) &= \alpha_1 + \alpha_2 s \\
 \beta(s) &= \beta_1 s \\
 \gamma(s) &= \gamma_1 + \gamma_2 s \\
 b(s) &= \sqrt{\gamma^2 + 4\alpha\beta} / 2
 \end{aligned} \tag{A-1}$$

where

$$\begin{aligned}
 \alpha_1 &= |u^*| fL^*, \quad \alpha_2 = L/c, \quad \beta_1 = L/c, \\
 \gamma_1 &= \frac{fL^*}{2} u^* |u^*| - \frac{g\Delta h}{c^2}, \quad \gamma_2 = 2u^* L/c
 \end{aligned} \tag{A-2}$$

The other parameters which have been used in (21)-(24) are **Error! Reference source not found.**

$$\hat{a}_1 = e^{\frac{\gamma_1}{2}} \left[\frac{1}{2} \alpha_1 \beta_1 \left(1 - \frac{1}{6} \gamma_1 + \frac{1}{24} \gamma_1^2 - \frac{1}{240} \gamma_1^3 + \dots \right) \right] - \frac{\gamma_2}{2} \tag{A-3}$$

$$\begin{aligned}
 \hat{a}_2 &= e^{\frac{\gamma_1}{2}} \left[\frac{1}{24} \alpha_1^2 \beta_1^2 \left(1 - \frac{1}{10} \gamma_1 \right) + \right. \\
 &\quad \left. \frac{1}{2} \alpha_2 \beta_1 \left(1 - \frac{1}{6} \gamma_1 + \frac{1}{24} \gamma_1^2 + -\frac{1}{240} \gamma_1^3 + \dots \right) - \right. \\
 &\quad \left. \frac{1}{12} \alpha_1 \beta_1 \gamma_2 \left(1 - \frac{1}{2} \gamma_1 - \frac{1}{16} \gamma_1^2 - \dots \right) \right] + \frac{1}{8} \gamma_2^2
 \end{aligned} \tag{A-4}$$

$$k_1 = e^{\gamma_1} \tag{A-5}$$

$$a_1 = \hat{a}_1 - \frac{1}{2}\gamma_2 \quad (\text{A-6})$$

$$a_2 = \hat{a}_2 + \frac{1}{8}\gamma_2^2 - \frac{1}{2}\gamma_2\hat{a}_1 \quad (\text{A-7})$$

$$k_2 = e^{\frac{\gamma_1}{2}}\alpha_1\left(1 + \frac{1}{24}\gamma_1^2 + \frac{1}{1920}\gamma_1^4\right) \quad (\text{A-8})$$

$$b_1 = \frac{\alpha_2}{\alpha_1} + \frac{\left(\alpha_1\beta_1 + \frac{1}{12}\gamma_1\gamma_2\right)\left(1 + \frac{1}{40}\gamma_1^2\right)}{1 + \frac{1}{4}\gamma_1^2 + \frac{1}{320}\gamma_1^4} \quad (\text{A-9})$$

$$b_2 = \frac{1}{1 + \frac{1}{24}\gamma_1^2 + \frac{1}{1920}\gamma_1^4} \times \left\{ \frac{\alpha_2}{\alpha_1}\left(\frac{1}{6}\alpha_1\beta_1 + \frac{1}{12}\gamma_1\gamma_2\right)\left(1 + \frac{1}{40}\gamma_1^2\right) + \frac{1}{120}\alpha_1^2\beta_1^2 + \frac{1}{6}\alpha_2\beta_1\left(1 + \frac{1}{40}\gamma_1^2\right) + \frac{1}{120}\alpha_1\beta_1\gamma_1\gamma_2 + \frac{1}{4}\gamma_2^2\left(\frac{1}{6} + \frac{1}{80}\gamma_1^2\right) \right\} \quad (\text{A-10})$$

$$c_1 = e^{\frac{\gamma_1}{2}}\beta_1\left(1 + \frac{1}{24}\gamma_1^2 + \frac{1}{1920}\gamma_1^4\right) \quad (\text{A-11})$$

$$c_2 = e^{\frac{\gamma_1}{2}}\beta_1\left(\frac{1}{6}\alpha_1\beta_1 + \frac{1}{12}\gamma_1\gamma_2\right)\left(1 + \frac{1}{40}\gamma_1^2\right) \quad (\text{A-12})$$

$$d_1 = \hat{a}_1 + \frac{1}{2}\gamma_2 \quad (\text{A-13})$$

$$d_2 = \hat{a}_2 + \frac{1}{8}\gamma_2^2 + \frac{1}{2}\gamma_2\hat{a}_1 \quad (\text{A-14})$$

ACKNOWLEDGMENT

Khuzestan Gas Company and Shahid Chamran University are acknowledged for providing technical, administrative, and financial assistance.

REFERENCES

- [1] E. B. Wylie, M. A. Stoner, and V. L. Streeter, "Network Transient Calculation by Implicit methods", Soc. Pet Eng. J., 1971, 356-362.
- [2] C. A. Luongo, "An Efficient Program for Transient Flow Simulation in Natural Gas Pipelines", 15th Annual Meeting Pipeline Simulation Interest Group (PSIG), New Orleans, October 1986.
- [3] W. Yow, "Analysis and Control of Transient Flow in Natural Gas Piping System", Ph.D. dissertation, U. of Michigan, Ann Harbor, 1971.
- [4] A. J. Osiadacz, "Simulation and Analysis of Gas Networks", E. & F.N. Spon, London, 1987.
- [5] S. O. Ibraheem and M. A. Adewumi, "Higher-Resolution Numerical Solution for 2-D Transient Natural Gas Pipeline Flows", Soc. of Petroleum Eng., SPE 35626, 1996, pp. 473-482.
- [6] T. Kiuchi, "An Implicit Method for Transient Gas Flow in Pipe Networks", Int. J. Heat and Fluid Flow, Vol. 15, No. 5, 1994, pp. 378-383.
- [7] Y. Dukhovnaya and A. Michael, "Simulation of non-isothermal transient in gas/condensate pipelines using TVD schemes", Petroleum and Natural Gas Eng., The Pennsylvania State University, USA., 2000.
- [8] J. Zhou and M. A. Adewumi, "Simulation of Transient Flow in Natural Gas Pipelines", the Pennsylvania State University, Petroleum and Natural Gas Engineering, GRI-PA 16802, 1996.
- [9] E. Tentis, D. Margaris, and D. Papanikas, "Transient gas flow simulation using an Adaptive Method of Lines", U. of Patras, C. R. Mechanics J., 2003, pp. 481-487.
- [10] S. L. Ke and H. C. Ti, "Transient analysis of isothermal gas flow in pipeline network", chemical eng. J., 1999, 169-177.
- [11] A. H. Gonzales, J. M. De La Cruz, B. D. Andres-Toro, and J. L. Risco-Martin, "Modeling and simulation of a gas distribution pipeline network", Applied Mathematical Modeling J., article in press, 2008.

- [12] H. P. Reddy, S. Narasimhan, and S. M. Bhallamudi, "*Simulation and State Estimation of Transient Flow in Gas Pipeline Networks Using a Transfer Function Model*", Department of Chemical Engineering and Department of Civil Engineering, Indian Inst. of Technology, Madras, Chennai-600036, India, 2006.
- [13] J. Kralik, P. Stiegler, Z. Vostry, J. Zavorka, "*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, 1998.
- [14] A. K. Hoffman and S. T. Chiang, "*Computational Fluid Dynamics for Engineers*", Wichita, Kansas, 2000.
- [15] T. D. Taylor, N. E. Wood, and J. E. Power, "*A Computer Simulation of Gas Flow in Long Pipelines*", Soc. Pet. Eng. J., Trans. AIME, 225, 1962, 1962, pp. 297-302.
- [16] A. Bagheri, "*Evaluation of Various Numerical Algorithms for Transient Flow Computation in Natural Gas Networks and Dynamic Analysis of a Typical Case*", M. Sc. Thesis, Mech. Eng. Dept., Shahid Chamran University, Ahvaz, Iran, (in preparation)

ث. مدلسازی رتبه کاسته جریان غیردائم گاز درون لوله‌ها

در این پیوست به ارائه دیگر مقاله پذیرفته شده در همایش مکانیک سیالات آلمان (ICFM 2008) تحت عنوان ”مدلسازی رتبه کاسته جریان غیردائم گاز درون لوله‌ها“ پرداخته می‌شود.

Reduced Order Modeling of Natural Gas Transient Flow in Pipelines

M. Behbahani-Nejad and Y. Shekari

Abstract— A reduced order modeling approach for natural gas transient flow in pipelines is presented. The Euler equations are considered as the governing equations and solved numerically using the implicit Steger-Warming flux vector splitting method. 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. A well-known test case is presented to demonstrate the accuracy and the computational efficiency of the proposed method. The results obtained are in good agreement with those of the direct numerical method and field data. Moreover, it is shown that the present reduced-order model is more efficient than the conventional numerical techniques for transient flow analysis of natural gas in pipelines.

Keywords—Eigenmode, Natural Gas, Reduced Order Modeling, Transient Flow.

I. INTRODUCTION

THE dynamic behavior of long pipelines is characterized by large time constants, sometimes of as much as several hours, due to the resistance to flow in pipes and the large storage capacity of the pipelines. Transients in such complex and large scale systems can be satisfactorily described by the nonhomogeneous, nonlinear hyperbolic, inviscid Euler system of conservation laws in one dimensional form **Error! Reference source not found.** Under isothermal conditions the continuity and momentum equations together with an equation of state constitute the governing equations describing transient flow in natural gas pipelines.

Traditional methods for the numerical analysis of system of governing equations are the Method of Characteristics (MOC) **Error! Reference source not found.** and several finite difference schemes such as explicit finite differences **Error! Reference source not found.** and implicit schemes **Error! Reference source not found.** Recent relevant studies used higher resolution explicit TVD Methods for the solution of sharp discontinuities fronts **Error! Reference source not found.** More recently the Method of Lines has been used with an adaptive mesh for solution system of governing equations of transient natural gas flow **Error! Reference source not found.** 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 a computational efficient technique for analysis of unsteady flows. Eigenmodes of the flow are used to construct reduced-order models similar to the normal mode analysis 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. This method has been used for unsteady aerodynamics and aeroelastic problems by several researchers [6] – [14].

Although ROM based on the flow eigenmodes is a well-known numerical technique, it is not yet applied for transient compressible flow analysis in the pipelines. In the present work this approach is chosen to achieve an efficient computational scheme for natural gas transient pipeflows. The nonhomogeneous Euler equations under isothermal condition are numerically solved using the implicit Steger-Warming flux vector splitting method (FSM) and their results are compared with the available experimental results. 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 present eigenanalysis and ROM for natural gas transient flow in pipelines.

II. GOVERNING EQUATIONS

Under isothermal conditions the Euler equations along with a source term due to the pipe friction effect are governed the dynamics of the natural gas in a long pipeline **Error! Reference source not found.** 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

$$\mathbf{Q} = \begin{pmatrix} \rho \\ \rho u \end{pmatrix}$$

$$\mathbf{E}(\mathbf{Q}) = \begin{pmatrix} \rho u \\ \rho u^2 + c^2 \rho \end{pmatrix} \quad (2)$$

$$\mathbf{H}(\mathbf{Q}) = \begin{pmatrix} 0 \\ -\frac{\rho f_g u |u|}{2D} \end{pmatrix}$$

In the above equations c is isothermal sound speed, ρ is the gas density, u is the axial gas velocity, D is diameter of the pipe and f_g is the pipe friction factor.

III. FINITE DIFFERENCE SCHEME

The implicit Steger-Warming flux vector splitting method (FSM) has been used as the numerical scheme. This method is chosen, because it doesn't have the problem of numerical instability. In delta formulation, the finite difference form of the method is **Error! Reference source not found.**

$$\begin{aligned} & -\left(\frac{\Delta t}{\Delta x} \mathbf{A}_{j-1}^+ - 1\right) \Delta \mathbf{Q}_{j-1} \\ & + \left(\mathbf{I} + \frac{\Delta t}{\Delta x} (\mathbf{A}_j^+ - \mathbf{A}_j^-) - \Delta t \mathbf{B}_j\right) \Delta \mathbf{Q}_j \\ & + \left(\frac{\Delta t}{\Delta x} \mathbf{A}_{j+1}^- + 1\right) \Delta \mathbf{Q}_{j+1} = \\ & -\frac{\Delta t}{\Delta x} (\mathbf{E}_j^+ - \mathbf{E}_{j-1}^+ + \mathbf{E}_{j+1}^- - \mathbf{E}_j^-) + \Delta t \mathbf{H}_j \end{aligned} \quad (3)$$

where subscript j indicates the spatial grid point, superscript n indicates the time level and

$$\Delta \mathbf{Q} = \mathbf{Q}^{n+1} - \mathbf{Q}^n \quad (4)$$

In relation (3), \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

$$\mathbf{A}^+ = \begin{pmatrix} \frac{c^2 - u^2}{2c} & \frac{u + c}{2c} \\ \frac{(u + c)^2(c - u)}{2c} & \frac{(u + c)^2}{2c} \end{pmatrix} \quad (6)$$

$$\mathbf{A}^- = \begin{pmatrix} \frac{u^2 - c^2}{2c} & \frac{c - u}{2c} \\ \frac{(u + c)(c - u)^2}{2c} & -\frac{(c - u)^2}{2c} \end{pmatrix}$$

In addition, \mathbf{E}^+ and \mathbf{E}^- are the positive and negative parts of the flux vector \mathbf{E} which are represented as

$$\mathbf{E}^+ = \begin{pmatrix} \frac{\rho(u + c)}{2} \\ \frac{\rho(u + c)^2}{2} \end{pmatrix} \quad (7)$$

$$\mathbf{E}^- = \begin{pmatrix} \frac{\rho(u - c)}{2} \\ \frac{\rho(u - c)^2}{2} \end{pmatrix}$$

When equation (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, which results in $\Delta \mathbf{Q}$. Next, \mathbf{Q} at the advanced time step can be calculated using Eq. (4).

IV. LINEARIZED FINITE DIFFERENCE EQUATIONS

To do the eigenanalysis and construct an eigenmode based reduced order model, it is necessary to linearize the equations. For this purpose, the flow field variables at each time step are considered as

$$Q^{n+1} = Q^o + \hat{Q}^{n+1} \quad (8)$$

where Q^o is the corresponding steady state value and \hat{Q} is a small perturbation about it. Substituting equation (8) into (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 made by the left hand side factors of Eq. (9).

V. EIGENANALYSIS AND ROM

For zero forcing function, \mathbf{V} , one can set

$\hat{\mathbf{Q}}_i = \mathbf{x}_i \exp(\lambda_i t)$ 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 written 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 rows that are the left eigenvectors. If the eigenvectors are normalized suitable, they satisfy the following 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,

$$\hat{\mathbf{Q}} = \mathbf{X} \mathbf{c} \quad (15)$$

where \mathbf{c} is the vector of normal mode coordinates. Substitution of (15) into (10), premultiplying by \mathbf{Y}^T , and making use of the orthogonality condition gives a set of N uncoupled equations for the modal coordinates \mathbf{c} ,

$$\mathbf{c}^{n+1} = \mathbf{Z} \mathbf{c}^n + \mathbf{Y}^T \mathbf{V}^{n+1} \quad (16)$$

Now, one may construct a reduced-order model by retaining only a few of the original modes.

VI. RESULTS AND DISCUSSIONS

A 72259.5 m long pipeline of 0.2 m diameter is considered as a test case to verify the results of the present method. Figure 1 shows the test case schematically. The above test case which its experimental results are available, has been studied by Taylor et al. **Error! Reference source not found.**, Zhou and Adewumi **Error! Reference source not found.**, and also by Tentis et al. **Error! Reference source not found.** The pipeline transports natural gas of 0.675 specific gravity at 10°C. The gas viscosity is 11.84×10^{-6} kg/ms while the pipeline wall roughness is 0.617mm and isothermal sound speed equals 367.9 m/s. At the pipeline's inlet, the gas pressure is kept constant at 4.21MPa, 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 shown in Fig. 2.

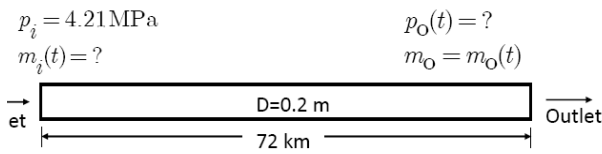


Fig.1 Schematic of the pipeline and its B.Cs.

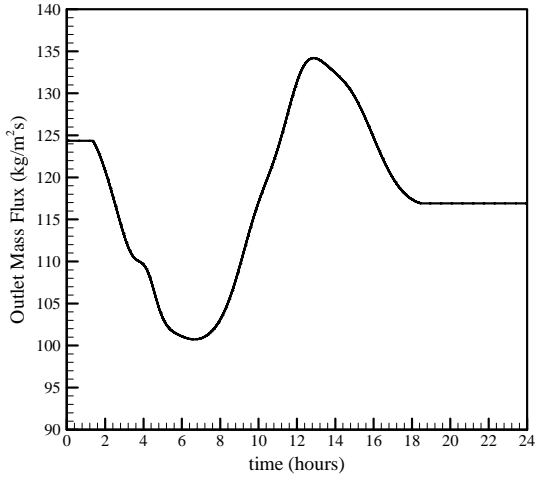


Fig.2 Imposed mass flux at the outlet

Figure 3 illustrates the present results of FSM for pressure time changes at the pipe outlet, along with those of the others [1, 5, 16] and the experiments. There are some differences between the present nonlinear FSM results with those obtained by the others. However, when they are compared with the experiments, it seems that all of the numerical methods have the nearly similar errors. The interesting point is the accuracy of the results of the present linearized FSM. As is shown in Fig. 3, the linearized FSM can predict the transient behavior of the outlet pressure as nearly accurate as the nonlinear models. Thus, one can construct a reduced order model based on the linearized equations to estimate the transient gas pipeflows more efficiently. In figure 4 the gas pressure at some different points are presented and compared with those by Zhou and Adewumi **Error! Reference source not found.** It is observed that the present results are in relatively good agreement with those obtained by the above authors. Moreover, Fig. 4 shows that the present linearized FSM results in the gas pressure as accurate as the nonlinear model.

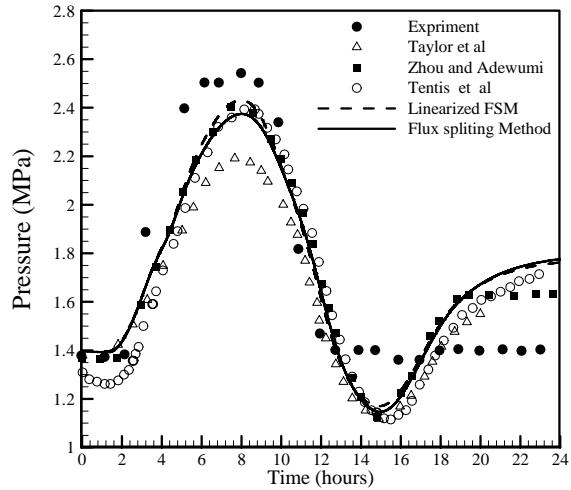


Fig.3 Comparison of pressure time history at the outlet

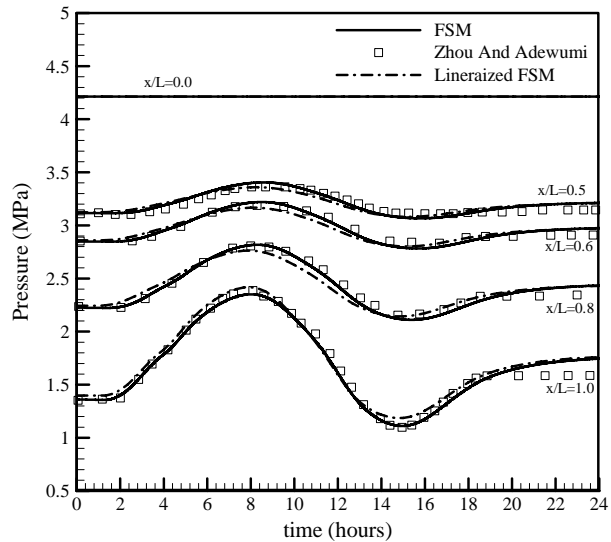


Fig.4 Pressure time history at different points of the pipe

Next, the results of the present eigenanalysis are discussed. The eigenvalues of the present method are shown in Figs. 5 and 6 in λ -plane and z -plane, respectively. In addition, the first 60 eigenvalues in λ -plane are illustrated in Fig. 7. As is shown in Fig. 5, this eigensystem has no any zero eigenvalue in the z -plane. Behbahani-Nejad et al. [17] have been shown that when there is no zero eigenvalue, there is no any quasisteady eigenmode and thus, it is likely to construct a reduced order model without the static correction requirement. On the other hand, Fig. 6 illustrates that the real part of all eigenvalues are negative. In physical point of view, it means that the present numerical technique is stable. Moreover, as is shown in Fig. 7, a few first eigenvalues corresponds the dominant eigenmodes, because their absolute real and imaginary parts are relatively small and therefore they are activated before the other eigenmodes.

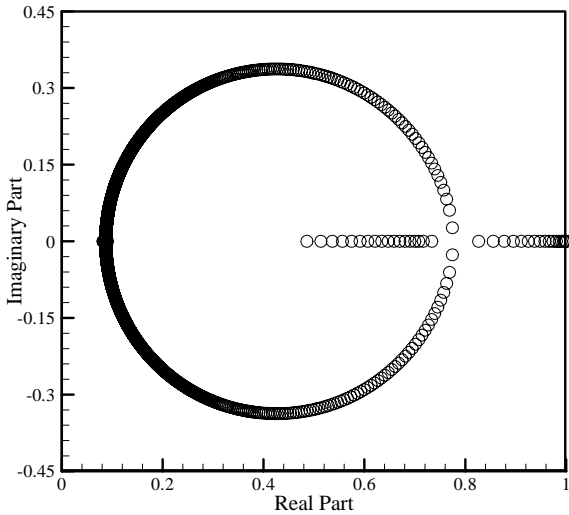


Fig.5 The eigenvalues in z -plane

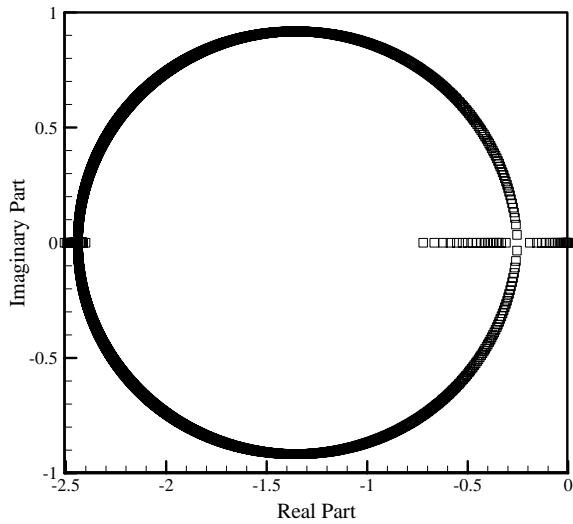


Fig.6 The Eigenvalues in λ -plane

The eigenvalues discussed in the preceding paragraph are used to construct a reduced order model. As there is no any zero eigenvalue, it is expected that the present reduced order model for natural gas transient flow gives satisfactory results without the static correction. Figure 8 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 obtained by the direct numerical method. The similar results are obtained for the pressure time changes at the other points along the pipe and are shown in Fig. 9. Finally, the efficiency of the present ROM are confirmed when its CPU times are compared with the direct numerical method. Table I indicates the computational times for the present ROM and the direct method. It is declared that there is about 70% reduction in CPU time when the present ROM is used.

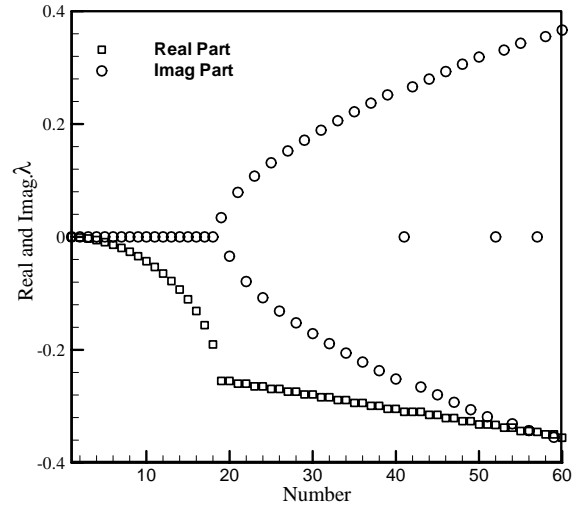


Fig.7 The first 60 eigenvalues in λ -plane

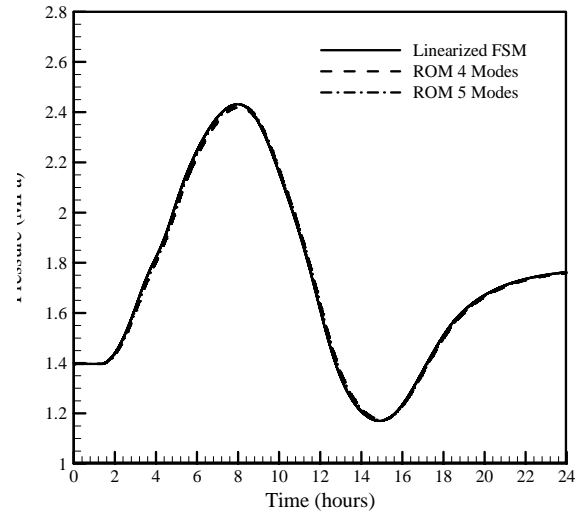


Fig.8 Results of the present ROM and the direct method for pressure history at the outlet

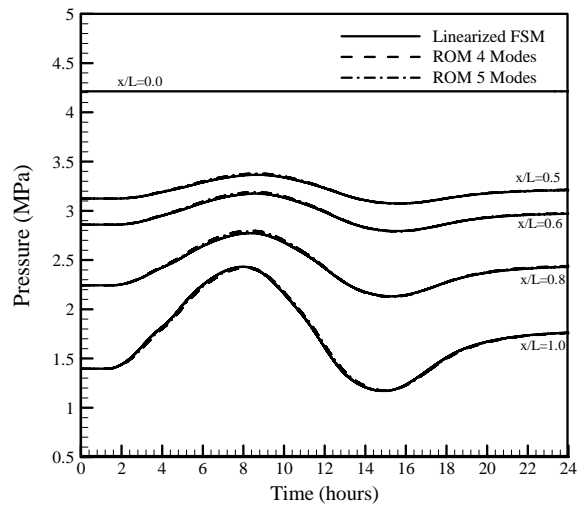


Fig.9 Results of the present ROM and the direct method for pressure history at different points of the pipe

Table I CPU times for the present ROM and the direct method

Method	Direct Simulation	ROM 4 Modes	ROM 5 Modes
CPU TIME	253 s	73 s	83 s
Time saving	-	71.14%	67.2%

VII. CONCLUSIONS

The present ROM can be used to analyze the transient flow of natural gas in pipelines, efficiently. Since the linearized forms of the governing equations can give satisfactory results with an enough degree of accuracy in many natural gas transient pipeflows, they can be used to construct proper reduced order models. The present eigenanalysis show that there is no any zero eigenvalue in the z -plane and therefore it is likely to construct reduced order models without the static correction requirement. It is indicated that the proposed reduced order model can efficiently gives satisfactory results for natural gas unsteady flow problems as accurate as the other direct numerical finite difference methods.

VIII. ACKNOWLEDGEMENTS

Khuzestan Gas Company and Shahid Chamran University are acknowledged for providing technical, administrative, and financial assistance.

REFERENCES

- [1] E. Tentsis, D. Margaris, D. Papanikas, "Transient gas flow simulation using an Adaptive Method of Lines", *C. R. Mecanique*, Vol. 331, 2003, pp. 481–487.
- [2] W. Yow, "Analysis and Control of Transient Flow in Natural Gas Piping Systems", *Ph.D. Thesis, The University of Michigan*, 1971.
- [3] H. H. Rachford and T.A. Dupont, "A Fast Highly Accurate Means of modeling Transient Flow in Gas Pipelines by Variational Methoding", *Society of Petroleum Engineers Journal*, 1974, pp. 356-362.
- [4] E. B. Wylie, M. A. Stoner and V. L. Streeter, "Network System Transient Calculations by Implicit Methods" *Society of Petroleum Engineers Journal*, Dec., 1971, pp. 356-362.
- [5] J. Zhou and M. A. Adewumi, "Simulation of Transient Flow in Natural Gas Pipelines", *27th Annual Meeting Pipeline Simulation Interest Group (PSIG)*, Albuquerque, New Mexico, Oct. 18-20, 1995.
- [6] E. H. Dowell, "Eigenmode Analysis in Unsteady Aerodynamics: Reduced-Order Models", *AIAA Journl*, Vol. 34, No. 8, August 1996, pp. 1578-1583.
- [7] M. C. Romanowski and E. H. Dowell, "Using Eigenmodes to Forms an Efficient Euler Based Unsteady Aerodynamics Analysis" *Proceeding of the Special Symposium on Aeroelasticity and Fluid/Structure Interaction Problems*, ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Chicago Illions, AD-Vol. 44, 1994, pp. 147-160.
- [8] K. C. Hall, R. Florea and P. J. Lanzkorn, "A Reduced Order Model of Unsteady Flows in Turbomachinery", *American Society of Mechanical Engineers, ASME Paper 94-GT-291*, June 1994.
- [9] K. C. Hall, "Eigenanalysis of Unsteady Flows About Airfoils, Cascade and Wings", *AIAA Journal*, Vol. 32, No. 12, 1994, pp. 2426-2432.
- [10] E. H. Dowell and M. C. Romanowski, "Eigenmode Analysis in Unsteady Aerodynamics: Reduced-Order Models", *Appl. Mech. Rev.*, Vol. 50, No. 6, 1997, pp. 371-385.
- [11] V. Esfahanian and M. Behbahani-Nejad, "Reduced Order Modeling of Unsteady flows about Complex Configurations Using the Boundary Element Method", *J. Fluid Eng-TASME*, Vol. 124, 2002, pp. 988-993.
- [12] H. Shahverdi, A. S. Nobari, M. Behbahani-Nejad, H. Haddadpour, "An efficient reduced-order modelling approach based on fluid eigenmodes and boundary element method", *Journal of Fluids and Structures*, Vol. 23, 2006, pp. 143–153.
- [13] K. C. Hall, R. Florea and P. J. Lanzkorn, "A Reduced Order Model of Unsteady Flows in Turbomachinery", *AIAA Journal* Vol. 117, No. 3, 1995, pp. 375-383.
- [14] R. Florea, K. C. Hall and G. A. Cizmas, "Reduced Order Modeling of Unsteady Viscous Flow in a Compressor Cascade", *AIAA Journal*, Vol. 36, No. 6, 1998, pp. 1039-1048.
- [15] A. K. Hoffman, S. T. Chiang, "Computational Fluid Dynamics For Engineers", Wichita, Kansas, 2000.
- [16] T. D. Taylor, N. E. Wood, J. E. Power, "A Computer Simulation of Gas Flow in Long Pipelines", *Soc. Pet. Eng. Trans, AIME*, Vol. 225, 1962, pp. 297-302.
- [17] M. Behbahani-Nejad, H. Hadadpour, V. Esfahanian, "Reduced-Order Modeling of Unsteady Flows without Static Correction Requirement", *J. of Aircraft*, Vol. 42, No. 4, 2005.

ج. روابط مربوط به پارامترهای توابع تبدیل

$$\begin{aligned}
 \alpha(s) &= \alpha_1 + \alpha_2 s \\
 \beta(s) &= \beta_1 s \\
 \gamma(s) &= \gamma_1 + \gamma_2 s \\
 b(s) &= \sqrt{\gamma^2 + 4\alpha\beta} / 2
 \end{aligned}
 \tag{۱}$$

که

$$\begin{aligned}
 \alpha_1 &= |u^*| fL^*, & \alpha_2 &= L/c, & \beta_1 &= L/c, \\
 \gamma_1 &= \frac{fL^*}{2} u^* |u^*| - \frac{g\Delta h}{c^2}, & \gamma_2 &= 2u^* L/c
 \end{aligned}
 \tag{۲}$$

$$\hat{a}_1 = e^{\frac{\gamma_1}{2}} \left[\frac{1}{2} \alpha_1 \beta_1 \left(1 - \frac{1}{6} \gamma_1 + \frac{1}{24} \gamma_1^2 - \frac{1}{240} \gamma_1^3 + \dots \right) \right] - \frac{\gamma_2}{2}
 \tag{۳}$$

$$\begin{aligned}
 \hat{a}_2 &= e^{\frac{\gamma_1}{2}} \left[\frac{1}{24} \alpha_1^2 \beta_1^2 \left(1 - \frac{1}{10} \gamma_1 \right) + \right. \\
 &\quad \left. \frac{1}{2} \alpha_2 \beta_1 \left(1 - \frac{1}{6} \gamma_1 + \frac{1}{24} \gamma_1^2 + -\frac{1}{240} \gamma_1^3 + \dots \right) - \right. \\
 &\quad \left. \frac{1}{12} \alpha_1 \beta_1 \gamma_2 \left(1 - \frac{1}{2} \gamma_1 - \frac{1}{16} \gamma_1^2 - \dots \right) \right] + \frac{1}{8} \gamma_2^2
 \end{aligned}
 \tag{۴}$$

$$k_1 = e^{\gamma_1}
 \tag{۵}$$

$$a_1 = \hat{a}_1 - \frac{1}{2}\gamma_2 \quad (6)$$

$$a_2 = \hat{a}_2 + \frac{1}{8}\gamma_2^2 - \frac{1}{2}\gamma_2\hat{a}_1 \quad (7)$$

$$k_2 = e^{\frac{\gamma_1}{2}}\alpha_1\left(1 + \frac{1}{24}\gamma_1^2 + \frac{1}{1920}\gamma_1^4\right) \quad (8)$$

$$b_1 = \frac{\alpha_2}{\alpha_1} + \frac{\left(\alpha_1\beta_1 + \frac{1}{12}\gamma_1\gamma_2\right)\left(1 + \frac{1}{40}\gamma_1^2\right)}{1 + \frac{1}{4}\gamma_1^2 + \frac{1}{320}\gamma_1^4} \quad (9)$$

$$b_2 = \frac{1}{1 + \frac{1}{24}\gamma_1^2 + \frac{1}{1920}\gamma_1^4} \times \quad (10)$$

$$\left\{ \frac{\alpha_2}{\alpha_1} \left(\frac{1}{6}\alpha_1\beta_1 + \frac{1}{12}\gamma_1\gamma_2 \right) \left(1 + \frac{1}{40}\gamma_1^2 \right) + \frac{1}{120}\alpha_1^2\beta_1^2 + \frac{1}{6}\alpha_2\beta_1 \left(1 + \frac{1}{40}\gamma_1^2 \right) + \frac{1}{120}\alpha_1\beta_1\gamma_1\gamma_2 + \frac{1}{4}\gamma_2^2 \left(\frac{1}{6} + \frac{1}{80}\gamma_1^2 \right) \right\}$$

$$c_1 = e^{\frac{\gamma_1}{2}}\beta_1\left(1 + \frac{1}{24}\gamma_1^2 + \frac{1}{1920}\gamma_1^4\right) \quad (11)$$

$$c_2 = e^{\frac{\gamma_1}{2}}\beta_1\left(\frac{1}{6}\alpha_1\beta_1 + \frac{1}{12}\gamma_1\gamma_2\right)\left(1 + \frac{1}{40}\gamma_1^2\right) \quad (12)$$

$$d_1 = \hat{a}_1 + \frac{1}{2}\gamma_2 \quad (13)$$

$$d_2 = \hat{a}_2 + \frac{1}{8}\gamma_2^2 + \frac{1}{2}\gamma_2\hat{a}_1 \quad (14)$$

چ. تحلیل ویژه جریان گذرای گاز طبیعی درون خطوط لوله (مقاله)

مرتضی بهبهانی نژاد^۱، یونس شکاری^۲

^۱ استادیار گروه مکانیک، دانشگاه شهید چمران اهواز bnmorteza@scu.ac.ir
^۲ کارشناس ارشد مکانیک، دانشگاه شهید چمران اهواز shekari124@yahoo.com

چکیده

در مقاله حاضر تحلیل ویژه جریان گذرای گاز طبیعی درون خطوط لوله صورت پذیرفته است. روش ضمنی تجزیه بردار شار استیگر-وارمینگ به عنوان روش حل عددی مسئله انتخاب شده است. به منظور تحلیل ویژه جریان ابتدا مدل خطی شده این روش استخراج شده و سپس بر اساس این مدل، مسئله مقدار ویژه جریان تشکیل شده است و مودهای ویژه جریان محاسبه شده اند. در نهایت مدل سازی رتبه کاسته جریان بر اساس این مودها صورت پذیرفته و در ادامه کار تاثیر ضریب اصطکاک لوله بر رفتار مقادیر ویژه جریان بررسی شده است. نتایج به دست آمده نشان می دهند که سیستم معادلات عددی حاکم پایدار می باشند و با افزایش ضریب اصطکاک لوله، اندازه مودهای غالب در صفحه λ کوچکتر می شوند.

کلمات کلیدی: مودهای ویژه، روش تجزیه بردار شار، جریان گذرا، خطوط لوله گاز طبیعی

مقدمه

اصولاً جریان درون خطوط لوله گاز طبیعی از نوع جریانهای گذرا می باشد. این جریان در اثر عوامل مختلفی مانند راه اندازی و یا از کار افتادن ایستگاههای تقویت فشار، تغییرات تقاضای مصرف در بین مصرف کنندگان و نشستی خطوط لوله و یا شکسته شدن آنها به وجود می آید. از مهمترین اهداف تحلیل این گونه جریانها می توان به نمایش تغییرات لحظه ای فشار گاز درون خط لوله و طراحی بهینه شبکه های انتقال و توزیع گاز طبیعی اشاره کرد.

معادلات حاکم بر این جریان شکل خاصی از معادلات اویلر بوده که اثر اصطکاک دیواره لوله به صورت یک عبارت چشمه وارد آنها شده، و باعث ناهمگن شدن این معادلات می شود. روش های متعددی به منظور تحلیل این جریان استفاده شده است. وایلی و همکاران یک روش تفاضل محدود ضمنی ارائه دادند و این روش را با روش مشخصه ها مقایسه کردند [۱]. راجفورد و داپونت^۱ از روش اجزا محدود گالرکین با در نظر گرفتن اجزا دوبعدی در زمان و مکان برای شبیه سازی جریان هم دما و گذرای گاز طبیعی استفاده کردند [۲]. کیوچی^۲ یک روش تفاضل محدود کاملاً ضمنی برای حل جریان غیردائم و تراکم پذیر دما ثابت بدون در نظر گرفتن عبارت اینرسی در معادلات حاکم ارائه داد [۳]. ایشان این روش را به یک شبکه نمونه اعمال کردند. سیستم معادلات حاکم با استفاده از یک روش تفاضل محدود صریح TVD با استفاده از یک شبکه بسیار ریز و با در نظر گرفتن عبارت اینرسی مورد تحلیل قرار گرفته است [۴]. اخیراً روش خطها^۳ (MOL) با استفاده از یک شبکه تطبیقی و با در نظر گرفتن عبارت اینرسی به معادلات حاکم اعمال شده است [۵]. در اغلب روشهایی که تا کنون مورد استفاده قرار گرفته، زمان محاسباتی تحلیل جریان بسیار زیاد می باشد. بنابراین این روشها را نمی توان در سیستم کنترلی شبکه مورد استفاده قرار داد. لذا استفاده از روشهای محاسباتی جدید که ضمن داشتن دقت مناسب، سرعت

¹ Rachford and Dupont

² Kiuchi

³ Method of Lines

محاسباتی بالایی نیز داشته باشند، ضروری به نظر می‌رسد. مدل‌سازی رتبه‌کاسته می‌تواند راهکاری مناسب برای این مقصود قلمداد شود.

مدل‌سازی رتبه‌کاسته^۴ (ROM) یک روش جدید و از نظر محاسباتی کارا در محاسبه جریان‌های غیردائم به حساب می‌آید که اخیراً برای محاسبه جریان‌های غیردائم حول ایرفویل‌ها، بال‌های تخت و ردیف پره‌های توربوماشین‌ها مورد استفاده قرار گرفته‌است. در مدل‌سازی رتبه‌کاسته هدف، کاهش تعداد درجات آزادی مسائل عددی به گونه‌ای می‌باشد که دقت نهایی را تحت تاثیر چندانی قرار ندهد. این کار معمولاً با تبدیل فضای فیزیکی به یک فضای مودال که در آن تعداد کمی از درجات آزادی برای تخمین پاسخ سیستم مورد نیاز است، انجام می‌شود. با کاهش تعداد درجات آزادی سیستم، سرعت حل عددی با صرف هزینه محاسباتی کم، بالا می‌رود.

هال^۵ جریان غیردائم و تراکم‌ناپذیر حول ایرفویل، ردیف پره و بال تخت سه‌بعدی را با استفاده از مدل‌سازی رتبه‌کاسته در حوزه زمانی تحلیل نمود [۶]. وی برای به دست آوردن مدهای ویژه جریان از شبکه گردابه غیردائم استفاده کرد و نشان داد که برای دستیابی به یک جواب دقیق نیاز به تصحیح استاتیکی^۶ است. فلوره^۷ و همکاران مدل‌سازی رتبه‌کاسته را برای حل جریان غیردائم و لزج در ردیف پره‌های کمپرسور مورد استفاده قرار داده‌اند [۷]. هدف این محققین بررسی پدیده واماندگی در پره‌های کمپرسور بوده‌است. آنها برای به دست آوردن مدهای ویژه از معادلات پتانسیل و معادلات لایه مرزی غیر دائم استفاده نمودند. همچنین در این کار اثر تعداد تصحیحات استاتیکی مورد بررسی قرار گرفته‌است. مدل‌سازی رتبه‌کاسته با استفاده از مدهای ویژه جریان در برخی از مسائل جواب‌های رضایت‌بخشی ارائه نمی‌کند. در مرجع [۸] ذکر شده که این روش وقتی که به مسائل غیردائم حول ایرفویل‌ها و بال‌ها اعمال می‌شود، هنگامی نتایج رضایت‌بخش ارائه می‌کند که تعداد بسیار زیادی از مدها در نظر گرفته شوند. بهیچانی‌نژاد نشان داد اعمال روش ذکر شده به جریان‌های غیردائم حول اجسام پیچیده، حتی با در نظر گرفتن تعداد زیادی از مدها نتایج مطلوبی به دست نمی‌دهد [۹]. وی دلیل این امر را با استفاده از تعداد مقادیر ویژه صفر، که از حل مسئله مقدار ویژه جریان به دست می‌آیند، توجیه می‌کند. در این مرجع نویسنده با بیان اینکه حداکثر مدهایی که می‌تواند در مدل‌سازی رتبه‌کاسته مورد استفاده قرار گیرد، به تعداد مقادیر ویژه غیر صفر است، از روش تصحیح استاتیکی برای رفع این مشکل استفاده کرده‌است. روش عددی مورد استفاده در تحلیل جریان گذرای گاز طبیعی بایستی ضمن برخورداری از دقت بالا دارای زمان محاسباتی قابل قبولی نیز باشد. بدین منظور مدل‌سازی رتبه‌کاسته این جریان توسط بهیچانی‌نژاد و شکاری صورت پذیرفته‌است [۱۰].

به‌منظور تحلیل عددی مسئله، ابتدا با استفاده از روش تفاضل محدود ضمنی تجزیه بردار شار استیگر-وارمینگ معادلات حاکم بر جریان گسسته‌سازی می‌شوند. به دلیل حضور عبارت غیرخطی اینرسی در معادلات حاکم و گسسته‌سازی شده، معادلات عددی به دست آمده حول حالت دائم خطی‌سازی شده و مسئله مقدار ویژه تشکیل و مقادیر ویژه جریان محاسبه و رفتار آنها بررسی می‌شوند. برای اولین بار بهیچانی‌نژاد و شکاری مقادیر ویژه جریان گذرای گاز طبیعی درون خطوط را محاسبه نمودند [۱۱]. با بررسی رفتار مقادیر ویژه جریان می‌توان برخی مفاهیم اساسی فیزیک جریان غیردائم را استخراج نمود. همچنین با محاسبه این مقادیر ویژه و استفاده از بردارهای ویژه متناظر با آنها به عنوان پایه‌های یک فضای مودال و تصویر فضای محاسباتی اصلی به این فضا، می‌توان تعداد درجات آزادی مسئله را به شدت کاهش داد. در واقع با محاسبه این مقادیر ویژه و بردارهای ویژه متناظر می‌توان مدل رتبه‌کاسته سیستم را به دست آورد. از طرفی پارامترهای هندسی و فیزیکی مسئله در شرایط دائم در چگونگی رفتار مقادیر ویژه جریان نقشی اساسی دارند.

در این مقاله ابتدا تحلیل عددی مسئله ارائه می‌شود سپس ضمن محاسبه مقادیر ویژه جریان گذرای گاز طبیعی، نتایج مدل‌سازی رتبه‌کاسته سیستم نیز به دست می‌آید و در نهایت تاثیر اصطکاک لوله بر رفتار مقادیر ویژه بررسی می‌شود.

معادلات حاکم

معادلات حاکم بر رفتار غیردائم جریان درون خطوط لوله را می‌توان با استفاده از اصول بقای جرم و انرژی و قانون دوم نیوتن و با به کارگیری یک معادله حالت مناسب به دست آورد. بسته به اینکه جریان هم‌دما باشد یا آدیاباتیک، معادلات حاکم شکل متفاوتی خواهند داشت. در حالت هم‌دما نیازی به حل معادله انرژی نیست و با حل معادلات پیوستگی و مومنتم و استفاده از یک معادله حالت مناسب می‌توان جریان را تحلیل نمود. ژو و آدومی معادلات حاکم بر جریان گذرای گاز طبیعی در حالت هم‌دما را به صورت زیر ارائه کرده‌اند [۴]:

$$\frac{\partial \mathbf{Q}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{E}(\mathbf{Q})}{\partial x} - \mathbf{H}(\mathbf{Q}) = 0 \quad (1)$$

که در رابطه بالا

$$\mathbf{Q} = \begin{pmatrix} \rho \\ \rho u \end{pmatrix} \quad \mathbf{E} = \begin{pmatrix} \rho u \\ \rho u^2 + c^2 \rho \end{pmatrix} \quad \mathbf{H}(\mathbf{Q}) = \begin{pmatrix} 0 \\ -\frac{\rho f_g u |u|}{2D} \end{pmatrix}$$

و در این رابطه ρ جرم مخصوص (دانسیته)، u متوسط سرعت جریان در هر مقطع عمود بر محور لوله، c سرعت صوت، D قطر لوله و f_g ضریب اصطکاک لوله می‌باشد.

شبیه‌سازی عددی

به منظور مدل‌سازی رتبه‌کاسته جریان، ابتدا بایستی یک روش حل عددی مناسب برای معادلات حاکم انتخاب نمود. بدین منظور در کار حاضر از روش ضمنی تجزیه بردار شار استیگر-وارمینگ استفاده

⁴ Reduced Order Modeling

⁵ Hall

⁶ Static Correction

⁷ Florea

در نظر گرفتن $\mathbf{Q}^{n+1} = \mathbf{Q}^n + \hat{\mathbf{Q}}^{n+1}$ شکل خطی شده معادلات حاکم را می توان به صورت زیر نوشت:

$$-\left(\frac{\Delta t}{\Delta x} \mathbf{A}_{j-1}^{o+}\right) \hat{\mathbf{Q}}_{j-1}^{n+1} + \left(\frac{\Delta t}{\Delta x} \mathbf{A}_{j+1}^{o-}\right) \hat{\mathbf{Q}}_{j+1}^{n+1} + \left(\mathbf{I} + \frac{\Delta t}{\Delta x} (\mathbf{A}_j^{o+} - \mathbf{A}_j^{o-}) - \Delta t \mathbf{B}_j\right) \hat{\mathbf{Q}}_j^{n+1} = \hat{\mathbf{Q}}_j^n \quad (5)$$

اگر شرایط مرزی به گونه ای اعمال شوند که اثر مرز به صورت مستقیم در ماتریس ضرایب وارد نشود، در حالت کلی می توان به رابطه زیر رسید:

$$\mathbf{W}^o \hat{\mathbf{Q}}^{n+1} = \mathbf{I} \hat{\mathbf{Q}}^n + \mathbf{V}^{n+1} \quad (6)$$

در رابطه بالا \mathbf{W}^o در حالت دائم محاسبه می شود و \mathbf{V}^{n+1} اثرات مرز سیستم را در بر دارد. همچنین \mathbf{I} ماتریس یک می باشد.

تحلیل ویژه جریان

به منظور تحلیل ویژه جریان های غیردائم بایستی مسئله مقدار ویژه جریان تشکیل شود. با در نظر گرفتن قسمت همگن معادله (۲) و با قرار دادن $\hat{\mathbf{Q}}_i = \mathbf{x}_i e^{\lambda t}$ در معادله حاصل و با فرض اینکه $z_i = e^{\lambda \Delta t}$ می توان به مسئله عمومی مقدار ویژه زیر رسید:

$$\mathbf{Z} \mathbf{W}^o \mathbf{X} = \mathbf{I} \mathbf{X} \quad (7)$$

در رابطه بالا \mathbf{Z} ماتریسی قطری است که عناصر آن مقادیر ویژه سیستم هستند. همچنین \mathbf{X} ماتریسی است که ستون های آن شامل بردارهای ویژه سمت راست مساله مقدار ویژه (۷) می باشند. همچنین بردارهای ویژه سمت راست و سمت چپ شرایط تعامد زیر را ارضا می کنند:

$$\mathbf{Y}^T \mathbf{W}^o \mathbf{X} = \mathbf{I} \quad (8)$$

$$\mathbf{Y}^T \mathbf{I} \mathbf{X} = \mathbf{Z}$$

با محاسبه مقادیر ویژه جریان از رابطه (۷) می توان به بررسی پایداری روش حل عددی پرداخت. اگر همه مقادیر ویژه در صفحه z درون دایره واحد قرار گیرند و با قسمت حقیقی همه مقادیر ویژه در صفحه λ منفی باشند آنگاه می توان نتیجه گرفت که روش حل عددی پایدار است. در غیر این صورت روش حل عددی ناپایدار خواهد بود.

مدل سازی رتبه کاسته

در بخش قبل تحلیل ویژه جریان های غیردائم تشریح گردید. در این قسمت هدف، انتخاب تعدادی از مودهای موثر جریان می باشد، به نحوی که بتوان توسط این مودها یک فضای مودال با ابعاد به مراتب کمتر از ابعاد مسئله اصلی تشکیل داد و جواب مسئله را در این فضای مودال پیدا نمود. به منظور یافتن جواب در فضای مودال ابتدا تعدادی از مودها را در نظر گرفته و جواب به شکل زیر در این فضای برداری تصویر می شود.

$$\hat{\mathbf{Q}} = \mathbf{X} \mathbf{c} \quad (9)$$

در رابطه فوق \mathbf{X} شامل M بردار ویژه سمت راست، متناظر با بزرگترین مقادیر ویژه است که این بردارها ستون های این ماتریس را تشکیل می دهند. همچنین \mathbf{c} بردار مختصات مودهای نرمال می باشد. با قرار دادن معادله (۴) در رابطه (۶) و با ضرب طرفین رابطه به دست آمده در \mathbf{Y}^T از سمت چپ و با استفاده از شرایط تعامد (۸) به رابطه زیر می توان رسید:

می شود. انتخاب این روش به دلیل پایداری آن در محدوده وسیعی از اعداد CFL می باشد. با استفاده از این ویژگی روش ذکر شده، می توان ضمن حفظ دقت مناسب، گام زمانی و فواصل مکانی را به اندازه کافی بزرگ در نظر گرفت و بنابراین زمان محاسبات را با حفظ دقت مناسب، کاهش داد. فرم دلتای معادلات گسسته سازی شده حاکم را می توان به صورت زیر نوشت.

$$-\left(\frac{\Delta t}{\Delta x} \mathbf{A}_{j-1}^+\right) \Delta \mathbf{Q}_{j-1} + \left(\frac{\Delta t}{\Delta x} \mathbf{A}_{j+1}^-\right) \Delta \mathbf{Q}_{j+1} + \left(\mathbf{I} + \frac{\Delta t}{\Delta x} (\mathbf{A}_j^+ - \mathbf{A}_j^-) - \Delta t \mathbf{B}_j\right) \Delta \mathbf{Q}_j = -\frac{\Delta t}{\Delta x} (\mathbf{E}_j^+ - \mathbf{E}_{j-1}^+ + \mathbf{E}_{j+1}^- - \mathbf{E}_j^-) + \Delta t \mathbf{H}_j \quad (2)$$

که در رابطه بالا \mathbf{A}^+ و \mathbf{A}^- ، ماتریس های ژاکوبین شار تجزیه شده بوده و عبارتند از:

$$\mathbf{A}^+ = \begin{pmatrix} \frac{c^2 - u^2}{2c} & \frac{u+c}{2c} \\ \frac{(u+c)^2(c-u)}{2c} & \frac{(u+c)^2}{2c} \end{pmatrix}$$

$$\mathbf{A}^- = \begin{pmatrix} \frac{u^2 - c^2}{2c} & \frac{c-u}{2c} \\ \frac{(u+c)(c-u)^2}{2c} & \frac{(c-u)^2}{2c} \end{pmatrix}$$

همچنین در رابطه (۲)، \mathbf{E}^+ و \mathbf{E}^- بردارهای شار تجزیه شده هستند و به صورت زیر بیان می شوند:

$$\mathbf{E}^+ = \begin{pmatrix} \frac{\rho(u+c)}{2} \\ \frac{\rho(u+c)^2}{2} \end{pmatrix} \quad \mathbf{E}^- = \begin{pmatrix} \frac{\rho(u-c)}{2} \\ \frac{\rho(u-c)^2}{2} \end{pmatrix}$$

ماتریس \mathbf{B} عبارت است از:

$$\mathbf{B} = \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial \mathbf{Q}} = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ \frac{f_g}{2D} \frac{m_1 m_1}{\rho^2} & -\frac{f_g}{D} \frac{m_1}{\rho} \end{pmatrix}$$

که در رابطه اخیر $m = \rho u$ می باشد. باید یادآور شد که $\mathbf{A} = \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial \mathbf{Q}}$ می باشد. با محاسبه $\Delta \mathbf{Q}$ در هر گام زمانی می توان متغیرهای مجهول آن گام را با استفاده از معادله زیر محاسبه کرد.

$$\mathbf{Q}^{n+1} = \mathbf{Q}^n + \Delta \mathbf{Q}^{n+1} \quad (3)$$

در حالت کلی با اعمال شرایط مرزی به گونه ای که متغیرهای مجهول در مرز به صورت مستقیم در ماتریس ضرایب وارد نشوند، می توان معادله (۲) را به صورت زیر نوشت:

$$\mathbf{W}^{n+1} \Delta \mathbf{Q} = \mathbf{RHS}^n + \mathbf{V}^{n+1} \quad (4)$$

در رابطه بالا \mathbf{V}^{n+1} عبارتی است که اثرات شرایط مرزی تابع زمان را بیان می کند. \mathbf{RHS}^n و \mathbf{W}^{n+1} هم از معادله (۲) قابل محاسبه هستند.

معادلات تفاضل محدود خطی شده

به دلیل حضور عبارت اینرسی معادلات تفاضل محدود حاکم غیر خطی هستند. بنابراین به منظور تحلیل ویژه جریان، بایستی معادلات عددی حاکم حول یک حالت پایه خطی سازی شوند. بدین منظور با

$$\mathbf{c}^{n+1} = \mathbf{Zc}^n + \mathbf{Y}^T \mathbf{V}^{n+1} \quad (10)$$

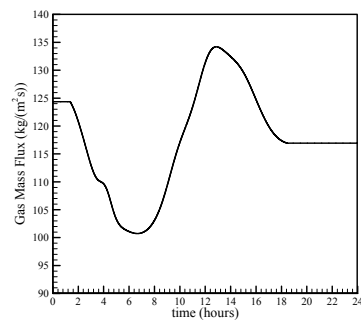
در رابطه بالا \mathbf{Y}^T ماتریسی است که ستون‌های آن شامل بردارهای ویژه سمت چپ می‌باشند و \mathbf{c} مختصات فضای رتبه‌کاسته می‌باشد. در رابطه اخیر \mathbf{Y}^T شامل M بردار ویژه سمت چپ می‌باشد که این بردارها سطرهای این ماتریس را تشکیل می‌دهند. همچنین \mathbf{c} یک بردار با بعد M ، \mathbf{Z} یک ماتریس قطری $M \times M$ ، \mathbf{Y}^T ماتریسی $M \times M$ و \mathbf{V} بردار سمت راست با بعد N می‌باشد. معادله (۱۰) به دلیل خاصیت تعامد موده‌های ویژه یک سیستم غیروابسته و با بعد M که $M \ll N$ می‌باشد. با محاسبه \mathbf{c} در هر مرحله زمانی می‌توان با استفاده از رابطه (۹)، $\hat{\mathbf{Q}}$ را براحتی محاسبه کرد. با محاسبه $\hat{\mathbf{Q}}$ می‌توان باراحتی مقدار \mathbf{Q} را در هر مرحله به‌دست آورد. بنابراین با استفاده از معادله (۱۰) و با در نظر گرفتن تعداد اندکی از موده‌های غالب سیستم، تعداد درجات آزادی سیستم به‌شدت کاهش می‌یابد.

نتایج

به منظور بررسی صحت نتایج به دست آمده ابتدا نمونه‌ای از جریان گذرای گاز طبیعی مورد تحلیل قرار می‌گیرد و نتایج حاصل از حل مستقیم (روش تجزیه بردار شار) و حل خطی شده با نتایج ارائه شده توسط سایر محققین مقایسه می‌گردد. سپس، نتایج حاصل از مدل رتبه‌کاسته با نتایج مدل خطی مقایسه می‌شود تا نتایج به‌دست آمده از مدل رتبه‌کاسته مورد تجزیه و تحلیل قرار گیرد.

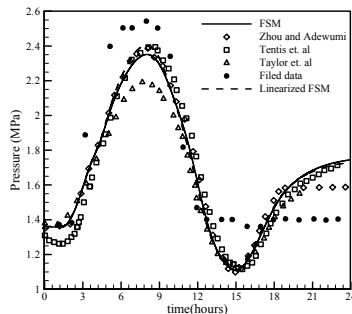
مسئله‌ای که مورد بررسی قرار گرفته‌است، لوله‌ای به‌طول $72259/5 m$ و قطر $207 m$ می‌باشد که جریان گاز طبیعی با وزن مخصوص $0/675$ و دمای $10^\circ C$ درون آن برقرار است. لزجت گاز $16 \times 10^{-6} \text{ kgm}^{-1}\text{s}^{-1}$ است و زبری لوله $0/617 mm$ می‌باشد.

در اثر عدم وجود شرایط اولیه، شرایط حالت دایم جریان به‌عنوان شرایط اولیه در نظر گرفته می‌شوند. مقدار ضریب اصطکاک در همه زمان‌ها ثابت و برابر با همان مقدار حالت دایم در نظر گرفته می‌شود. برای شرایط مرزی هم، فشار در ورودی ثابت و برابر $4/13 \text{ MPa}$ در نظر گرفته می‌شود، در حالی که لوله در خروجی خود در اثر تغییر تقاضای مصرف در طول یک شبانه‌روز، تحت اثر تغییر شار جرمی مطابق شکل (۱) قرار می‌گیرد. تحلیل عددی این مساله در مراجع [۴ و ۵ و ۱۲] مورد بررسی قرار گرفته است.

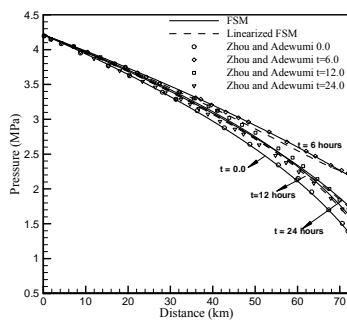


شکل ۱: شار جرمی در مقطع خروجی

در شکل (۲) تغییرات فشار در مقطع انتهایی لوله با استفاده از روش تجزیه بردار شار و مدل خطی شده این روش با نتایج ارائه شده توسط سایر محققین مقایسه شده‌است. ملاحظه می‌شود که روش تجزیه بردار شار به‌خوبی تغییرات فشار را پیش‌بینی کرده‌است. همچنین مدل خطی این روش با خطای ناچیزی و در حدود $2/2\%$ نسبت به مدل غیرخطی توانسته است تغییرات فشار با زمان را تقریب بزند. همان‌گونه که در این شکل نشان داده شده‌است، تا ساعت $1/5$ بامداد، با ثابت ماندن شار جرمی در مقطع خروجی هیچ‌گونه تغییر فشاری در این مقطع مشاهده نمی‌شود، پس از این ساعت با کاهش مصرف، فشار در مقطع خروجی شروع به افزایش می‌کند. این روند تا حدود ساعت ۸ صبح ادامه می‌یابد. پس از این ساعت با افزایش مصرف، فشار در مقطع خروجی کاهش می‌یابد. این روند تا ساعت ۱۵ ادامه می‌یابد. سپس با کاهش مصرف، روند افزایش فشار تا ساعت ۲۴ ادامه می‌یابد.



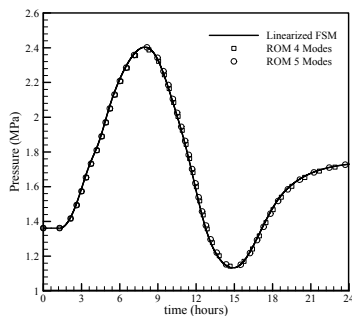
شکل ۲: مقایسه تغییرات فشار در مقطع انتهایی لوله با نتایج دیگر محققین



شکل ۳: مقایسه تغییرات فشار در امتداد لوله با نتایج ژو و آدومی [۴]

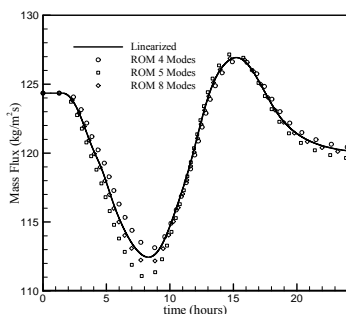
شکل (۳) نشان دهنده تغییرات فشار در امتداد لوله در ساعات مختلف شبانه‌روز می‌باشد. همان‌طور که در این شکل مشخص است، نتایج روش تجزیه بردار شار و نتایج ارائه شده توسط ژو و آدومی بسیار به هم نزدیک هستند. همچنین مدل خطی شده با خطای کمی توانسته است مدل غیرخطی را تقریب بزند.

در شکل‌های (۴ و ۵) نتایج تحلیل ویژه جریان ارائه شده‌است. شکل (۴) شکل مقادیر ویژه جریان را در صفحه z و شکل (۵) رفتار مقادیر ویژه جریان در صفحه λ را نشان می‌دهد. همان‌گونه که در



شکل ۷: توزیع فشار در مقطع انتهایی لوله با استفاده از مدل رتبه کاسته

در شکل (۸) شار جرمی در مقطع میانی لوله با استفاده از مدل رتبه کاسته و حل خطی شده با یکدیگر مقایسه شده‌اند. ملاحظه می‌شود که مدل رتبه کاسته با تعداد درجات آزادی اندکی رفتار گذرای جریان را پیش‌بینی می‌کند، ولی نسبت به توزیع فشار بایستی تعداد مودهای بیشتری در نظر گرفته شود.

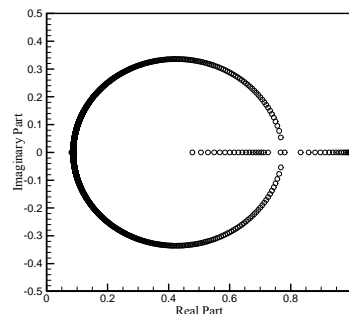


شکل ۸: تغییرات شار جرمی در مقطع میانی انتهایی لوله با استفاده از مدل رتبه کاسته

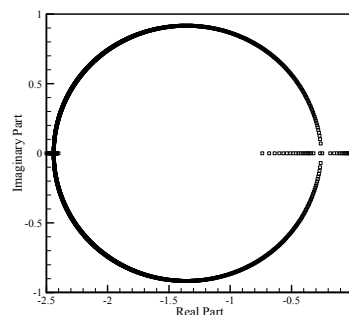
در ادامه کار به منظور بررسی نقش اصطکاک لوله بر رفتار مقادیر ویژه، سیستمی جدید با همان مشخصات هندسی و شرایط مرزی سیستم قبل ولی با ضریب اصطکاک کمی کمتر در نظر گرفته می‌شود. شرایط دائم این مسئله جدید، به‌عنوان شرط اولیه در نظر گرفته می‌شود.

در شکل (۹) قسمت موهومی ۱۰۰ مقدار ویژه اول برای جریان با دو ضریب اصطکاک متفاوت با یکدیگر مقایسه شده‌اند. ملاحظه می‌شود که هنگامی که ضریب اصطکاک افزایش می‌یابد، قسمت موهومی مودهای غالب کوچکتر می‌شود. همچنین با افزایش ضریب اصطکاک تعداد مودهایی که قسمت موهومی آنها صفر است افزایش می‌یابد. بنابراین می‌توان انتظار داشت که در این حالت مودهای غالب سریعتر تحریک شوند. و بتوان جریان را با تعداد مودهای کمتری تحلیل نمود.

شکل (۴) نشان داده شده‌است، همه مقادیر ویژه در صفحه z درون دایره واحد قرار می‌گیرند و مطابق شکل (۵) قسمت حقیقی همه مقادیر ویژه در صفحه λ منفی می‌باشد. این رفتار مقادیر ویژه در صفحه‌های z و λ نشان دهنده پایداری سیستم معادلات عددی به‌کار رفته می‌باشد.

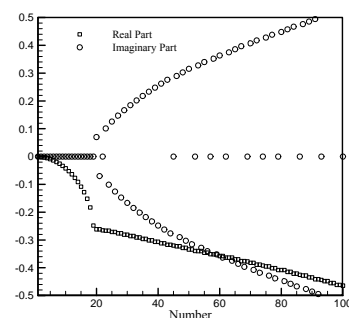


شکل ۹: مقادیر ویژه جریان در صفحه z



شکل ۱۰: مقادیر ویژه جریان در صفحه λ

شکل (۶) قسمت حقیقی و موهومی ۱۰۰ مقدار ویژه اول متناظر با مودهای ویژه غالب در صفحه λ را نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود که قدرمطلق قسمت‌های حقیقی و موهومی این مودها در مقایسه با دیگر مودها اندازه کوچکتری دارند. بنابراین این مودها قبل از بقیه مودها تحریک می‌شوند.



شکل ۱۱: قسمت‌های حقیقی و موهومی ۱۰۰ مود اول در صفحه λ

در شکل (۷) توزیع فشار در مقطع انتهایی لوله با استفاده از مدل رتبه کاسته و حل خطی شده با یکدیگر مقایسه شده‌اند. ملاحظه می‌شود که مدل رتبه کاسته با تعداد درجات آزادی اندکی رفتار جریان را پیش‌بینی می‌کند.

Meeting Pipeline Simulation Interest Group (PSIG), Albuquerque, New Mexico, Oct. 18-20, 1995.

[5] Tentis, E., Margaris, D., Papanikas, D., "Transient gas flow simulation using an Adaptive Method of Lines", *C. R. Mecanique*, Vol. 331, pp. 481-487, 2003.

[6] Hall, K.C., "Eigenanalysis of Unsteady Flows About Airfoils, Cascade and Wings", *AIAA Journal*, Vol. 32, No. 12, 1994, pp. 2426-2432.

[7] Florea, R., Hall, K.C. and Cizmas, G.A., Reduced Order Modeling of Unsteady Viscous Flow in a Compressor Cascade, *AIAA Journal*, Vol. 36, No. 6, 1998, pp. 1039-1048.

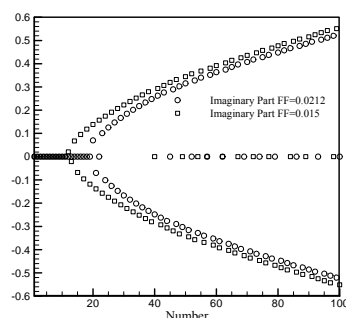
[8] Hall, K.C., Florea, R. and Lanzkorn, P.J., "A Reduced Order Model of Unsteady Flows in Turbomachinery", *American Society of Mechanical Engineers, ASME Paper 94-GT-291*, June 1994.

[9] بهبهانی نژاد، مرتضی، مدل سازی رتبه کاسته جریان های سه بعدی غیردائم با استفاده از مدهای ویژه جریان و روش المان های مرزی، رساله دکتری، دانشگاه تهران، اسفند ۱۳۸۰.

[10] M. Behbahani-Nejad, Y. Shekari, "Reduced Order Modeling of Natural Gas Transient Flow in Pipelines" 5th International Conference on Fluid Mechanics, ICFM08, Heidelberg, Germany, SEP. 2008.

[11] شکاری، یونس، مدل سازی رتبه کاسته جریان گذرا در خطوط لوله گاز طبیعی، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه شهید چمران، ۱۳۸۷.

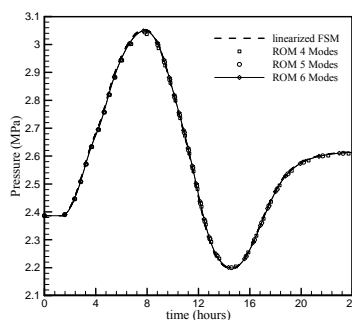
[12] Taylor, T.D., Wood, N.E., Power, J.E., "A Computer Simulation of Gas Flow in Long Pipelines", *Soc. Pet. Eng. Trans, AIME*, Vol. 225, 1962, pp. 297-302.



شکل ۴: قسمت موهومی ۱۰۰ مقدار ویژه اول در صفحه λ

با استفاده از دو ضریب اصطکاک متفاوت

در شکل (۱۰) تغییرات فشار با زمان در مقطع انتهایی لوله با استفاده از مدل رتبه کاسته با تعداد مدهای مختلف ارائه شده است. ملاحظه می شود که با کاهش ضریب اصطکاک تعداد مدهای بیشتری برای تحلیل جریان نیاز است.



شکل ۷: توزیع فشار در مقطع انتهایی لوله با استفاده از مدل رتبه کاسته با

$$f_g = 0.15 \text{ ضریب اصطکاک}$$

نتیجه گیری

با تحلیل ویژه جریان گذرای گاز طبیعی ملاحظه می شود که سیستم معادلات عددی حاکم پایدار بوده و همچنین با افزایش ضریب اصطکاک اندازه قسمت موهومی مدهای غالب سیستم کوچکتر می شود. به این ترتیب می توان با تعداد مدهای کمتری با استفاده از مدل رتبه کاسته جریان را تحلیل نمود.

مراجع

- [1] Wylie, E.B., Stoner, M.A. and Streeter, V.L., "Network System Transient Calculations by Implicit Methods" *Society of Petroleum Engineers Journal*, Dec., 1971, pp. 356-362.
- [2] Rachford, H.H., and Dupont, T.A., "A Fast Highly Accurate Means of modeling Transient Flow in Gas Pipelines by Variational Methods", *Society of Petroleum Engineers Journal*, 1974, pp. 356-362.
- [3] Kuichi, T., "An Implicit Method for Transient Gas Flow in Pipe Networks", *Int. J. Heat and Fluid Flow*, Vol. 15, No.5, 1994, pp. 378-383.
- [4] Zhou, J., Adewumi, M.A., "Simulation of Transient Flow in Natural Gas Pipelines", 27th Annual

ح. مقایسه روش المان‌مرزی و روش مدار
معادل در مدل‌سازی عددی سیستم‌های حفاظت
کاتدی خطوط لوله (مقاله)

**Comparing BEM and Equivalent Circuit Method in
Numerical Modeling of Pipelines CP Systems**

Abstract

Two different approaches for numerical modeling of pipeline's cathodic protection (CP) systems are presented. The first approach is the boundary element method (BEM) and the other is a simpler one which is named here as equivalent circuit method (ECM). Impressed current which is needed to protect the underground pipe is calculated with the both methods. The nonlinear polarization curve has been used in BEM and the linearized one in ECM. The results obtained are compared with each other and advantages and disadvantages of each approach are discussed. It is concluded that ECM results depend strongly on the linearization of polarization curve. On the other hand, ECM can be applied when the anodes are placed far from the cathode, sufficiently.

Keywords: Cathodic Protection Modeling, Pipeline, Boundary Element Method, Equivalent Circuit Method

مقایسه روش المان مرزی و روش مدار معادل در مدل سازی عددی سیستم های حفاظت کاتدیک خطوط لوله

چکیده

در این مقاله دو روش مختلف برای مدل سازی عددی سیستم های حفاظت کاتدیک خطوط لوله ارائه شده است. روش اول، روش المان مرزی (BEM) و دیگری روشی ساده تر است که در اینجا از آن به عنوان روش مدار معادل (ECM) یاد شده است. جریان اعمالی لازم به منظور حفاظت خط لوله مربوطه با استفاده از هر دو روش محاسبه شده است. در روش المان مرزی از منحنی غیرخطی پلاریزاسیون و در روش مدار معادل منحنی پلاریزاسیون خطی شده مورد استفاده قرار گرفته است. نتایج بدست آمده از هر دو روش با یکدیگر مقایسه شده و مزایا و معایب هر کدام از روش ها مورد بحث قرار گرفته است. این نتیجه گیری بدست آمده است که نتایج روش مدار معادل شدیداً به نحوه خطی سازی وابسته است. از طرف دیگر، این روش تنها با فرض فاصله ی بسیار زیاد لوله و آند قابل استفاده می باشد.

واژه های کلیدی: مدل سازی حفاظت کاتدیک، خط لوله، روش المان مرزی، روش مدار معادل

مقدمه

یکی از راه‌کارهای متداول در حفظ سازه‌های فولادی از زنگ‌زدگی و خوردگی گالوانیکی استفاده از روش حفاظت کاتدیک می‌باشد. با توجه به پیچیدگی‌های مسئله و لزوم طراحی بهینه‌ی سیستم‌های حفاظت کاتدیک استفاده از حل‌ها و مدل‌سازی‌های عددی به شدت احساس می‌شود. از اینرو در دو دهی اخیر تحقیقات گسترده‌ای در این زمینه صورت گرفته‌است [۱-۴]. در کشور نیز با توجه به اهمیت موضوع در چند سال اخیر اقداماتی در زمینه مدل‌سازی عددی سیستم‌های حفاظت کاتدیک انجام شده‌است [۵-۹]. با مروری بر فعالیت‌های انجام گرفته در این زمینه می‌توان دریافت که روش عددی المان‌مرزی^۱ (BEM) از دقت و کارایی بالایی در زمینه مدل‌سازی عددی CP برخوردار می‌باشد [۱-۹]. این امر ناشی از قابلیت انعطاف‌پذیری و سهولت تعمیم بسیار زیاد این روش برای حل انواع مسائل مربوط به مدل‌سازی CP است.

در این مقاله هدف بررسی کارایی روشی دیگر در مدل‌سازی سیستم‌های حفاظت کاتدیک در مقایسه با روش المان‌مرزی می‌باشد. این روش که در اینجا با عنوان روش مدار معادل^۲ (ECM) نام‌گذاری شده، بر پایه استفاده از قوانین اهم و به کمک ساده‌سازی مسئله و استفاده از یک سری مقاومت‌های سری و موازی به تحلیل و مدل‌سازی سیستم حفاظت کاتدیک می‌پردازد. در ادامه با مروری مختصر بر روند حل به کمک روش BEM، روش ECM نیز معرفی شده و با حل یک مسئله نمونه به کمک هر دو روش نتایج آنها مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

معادلات حاکم

معادله‌ی حاکم بر پدیده‌ی خوردگی الکتروشیمیایی همان معادله‌ی لاپلاس مطابق با رابطه‌ی زیر می‌باشد.

$$\nabla^2 \phi = 0 \quad (1)$$

معادله فوق معادله حاکم بر میدان محاسباتی است. ϕ برابر با پتانسیل درون این ناحیه بوده و میدان محاسباتی مشتمل بر محیط الکترولیتی که آند و کاتد در آن غوطه‌ورند، می‌باشد. مرزهای این میدان همان سطح آند و کاتد است. به‌منظور حل به‌کمک روش المان‌مرزی می‌بایست شرایط مرزی متناسب با مسئله تعریف شوند. این شرایط مرزی می‌تواند مقدار جریان، پتانسیل و یا رابطه‌ی بین این دو در این مرزها باشد. پیچیده‌ترین حالت در تعریف شرایط مرزی استفاده از رابطه‌ی غیرخطی بین جریان و پتانسیل روی مرزهاست که توسط منحنی پلاریزاسیون خوردگی فلز آند و کاتد بدست می‌آید. نمونه‌ای از این شرط مرزی برای فولاد کم‌کربن (کاتد) در الکترولیت خاک به شکل زیر تعریف می‌شود. در رابطه‌ی ذیل i جریان بر حسب $\mu A/cm^2$ و ϕ پتانسیل بر حسب mV می‌باشند.

$$i = e^{(\phi+522)/25623} - \left(1 + e^{(\phi+172)/26492}\right)^{-1} - e^{-(\phi+942)/57328} \quad (2)$$

برای شرط مرزی روی آند نیز می‌توان از رابطه‌ی غیرخطی منحنی پلاریزاسیون و یا از شرط پتانسیل ثابت (در روش آند فداشونده) یا شرط جریان ثابت (در روش جریان اعمالی) استفاده نمود.

عموم روش‌های عددی نیاز به تولید شبکه در ناحیه‌ی محاسباتی خواهند داشت. از طرف دیگر در سیستم‌های حفاظت کاتدیک تنها مقادیر جریان و پتانسیل روی سازه اهمیت داشته و اطلاع از پتانسیل و جریان در کل ناحیه محاسباتی ضرورت چندانی ندارد.

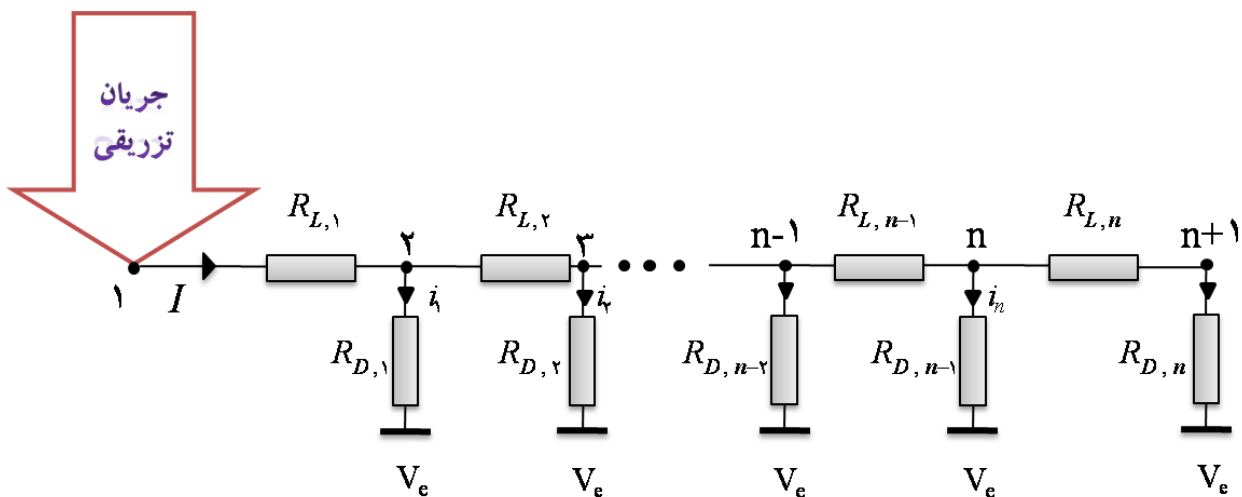
^۱ Boundary Element Method

^۲ Equivalent Circuit Method

بدین منظور به کمک روش المان مرزی و با استفاده از قابلیت این روش، تولید شبکه تنها به مرزهای ناحیه‌ی محاسباتی محدود می‌شود. در نهایت نیز پس از تولید شبکه روی مرزها (آند و کاتد) با توجه به شرط مرزی غیرخطی روی کاتد، مجهولات مسئله به کمک یک حلقه تکرار مشخص خواهند شد. روش حل مسئله به کمک روش المان مرزی و شرایط مرزی مختلف به تفصیل در منابع موجود (۸ و ۹) در دسترس می‌باشد.

روش مدار معادل (ECM)

یکی دیگر از روش‌های مدل‌سازی سیستم‌های حفاظت کاتدیک استفاده از ECM می‌باشد. در این روش لوله به عنوان یک هادی جریان بوده که در مقاطع مختلف جریان از آن خارج می‌گردد. طول لوله به چندین قسمت دلخواه (L_i) تقسیم می‌شود. این قسمت‌ها به صورت مقاومت‌های سری در طول لوله قرار می‌گیرند. در هر قسمت از لوله شارژ خروجی جریان وجود دارد که ناشی از عدم وجود روکش، خرابی آن و یا عدم مقاومت کافی روکش در برابر خروج جریان می‌باشد. مقاومت‌های موجود بر سر این جریان مشتمل بر مقاومت روکش، مقاومت پلاریزاسیون و مقاومت خاک است. شماتیک نحوه‌ی پیاده‌سازی مقاومت‌ها در شکل ۱ ارائه شده‌است.



الکترولیت

شکل ۱- نحوه‌ی پیاده‌سازی مقاومت‌ها در طول لوله و در اتصال آنها به الکترولیت

در شکل فوق $R_{L,i}$ برابر با مقاومت طولی در هر بخش و $R_{D,i}$ برابر با مقاومت در برابر خروج جریان از لوله می‌باشد. طبق قانون اهم، رابطه‌ی افت ولتاژ بین نقطه‌ی ۱ و الکترولیت عبارت است از

$$V_1 - IR_{L,1} - i_1 R_{D,1} = V_e \quad (۳)$$

این رابطه را به شکل دیگری مانند زیر نیز می‌توان نوشت

$$V_1 - IR_{L,1} - (I - i_1) R_{L,2} - i_1 R_{D,2} = V_e \quad (۴)$$

حال شکل کلی رابطه (۴) را میتوان به صورت رابطه زیر ارائه کرد

$$V_1 - V_e = I \sum_{j=1}^m R_{L,j} - \sum_{j=1}^{m-1} i_j \sum_{k=j+1}^m R_{L,k} + i_m R_{D,m} \quad (5)$$

با توجه به روابط فوق در نهایت می توان نتیجه گرفت که

$$IR_{L,1} + i_1 R_{D,1} = +IR_{L,1} + (I - i_1) R_{L,2} + i_1 R_{D,2} = I \sum_{j=1}^m R_{L,j} - \sum_{j=1}^{m-1} i_j \sum_{k=j+1}^m R_{L,k} + i_m R_{D,m} = V_1 - V_e \quad (6)$$

با فرض اطلاع از میزان جریان تزریق شده به خط (I معلوم) و اطلاع از میزان مقاومتها، مجهولات مسئله i_n و $V_1 - V_e$ می باشند که در مجموع $n+1$ مجهول می باشند. رابطه (۶)، n معادله برای n گره نتیجه می دهد. معادله $n+1$ نیز به کمک قانون بقای جریان (۷) بدست می آید.

$$I = \sum_{j=1}^n i_j \quad (7)$$

با معلوم بودن جریان ورودی و مقدار مقاومتها معادلات فوق حل شده و مقدار جریان خروجی در هر مسیر مشخص می شود. همانگونه که اشاره شد مقاومت های مدار معادل را می توان به دو دسته تقسیم نمود.

• مقاومت در برابر عبور جریان در راستای طول لوله ($R_{L,i}$)

• مقاومت در برابر خروج جریان از محیط لوله $R_{D,i}$

مقاومت های طولی را به کمک رابطه ی ذیل می توان محاسبه نمود.

$$R_{L,i} = \frac{\rho_i L_i}{S_i} \quad (8)$$

در رابطه فوق L_i برابر با طول هر بخش از لوله (در اختیار کاربر)، ρ_i برابر با مقاومت ویژه لوله و S_i برابر با سطح مقطع عرضی ضخامت لوله می باشد. مقاومت خروج جریان خود از ترکیب سه مقاومت خاک همراه با مقاومت پوشش و مقاومت پلاریزاسیون ناشی می شود. مقاوم خاک طبق رابطه ی زیر تعیین می شود [۱۰].

$$R_{soil,i} = \frac{\rho_{soil}}{2\pi L_i} \ln \frac{L_i}{hd} \quad (9)$$

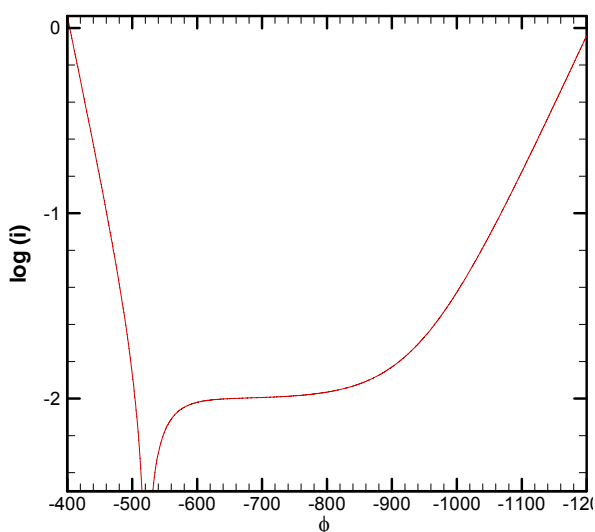
در رابطه فوق L_i برابر با طول هر بخش از لوله (در اختیار کاربر)، ρ_{soil} برابر با مقاومت ویژه خاک، d قطر لوله و h عمق قرارگیری لوله می باشد. مقاومت پوشش را نیز می توان به شکل زیر تعیین کرد [۱۰].

$$R_{por,i} = \frac{R_{ins,i}}{S_{out,i}} \quad (10)$$

$R_{ins,i}$ برابر با مقاومت پوشش بوده و $S_{out,i}$ برابر با سطح خارجی لوله می باشد. مقاومت پلاریزاسیون نیز به شکل زیر بدست می آید [۱۰].

$$R_{pol,i} = \left(\frac{\partial E}{\partial i} \right)_i / S_{ins,i} \quad (11)$$

برای محاسبه‌ی $\left(\frac{\partial E}{\partial i}\right)_i$ می‌بایست از رابطه‌ی (۲) استفاده نمود. با توجه به رابطه‌ی (۲) مشاهده می‌شود که رابطه‌ی غیرخطی بین جریان و پتانسیل امکان محاسبه‌ی مقاومت پلاریزاسیون را به طور مستقل نمی‌دهد. برای رفع این مشکل و ایجاد سهولت در حل می‌توان تنها شیب بخشی از نمودار پلاریزاسیون (شکل ۲) را لحاظ نمود و یا با استفاده از روند تکرار در هر مرحله شیب مربوط به هر بخش را محاسبه و از آن استفاده کرد.



شکل ۲- منحنی پلاریزاسیون

در رابطه (۱۱) مقدار $S_{ins,i}$ برابر با بخشی از سطح خارجی لوله می‌باشد که بدون روکش مانده و یا روکش آن معیوب می‌باشد.

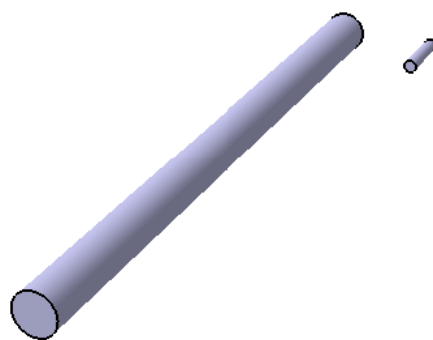
نتایج

در این قسمت سیستم حفاظت کاتدیک یک خط لوله نمونه به کمک هر دو روش مدل‌سازی شده و نتایج مورد بررسی قرار می‌گیرد. اطلاعات مربوط به این خط در جدول زیر ارائه شده‌است.

جدول ۱- اطلاعات مربوط به خط لوله مورد حفاظت

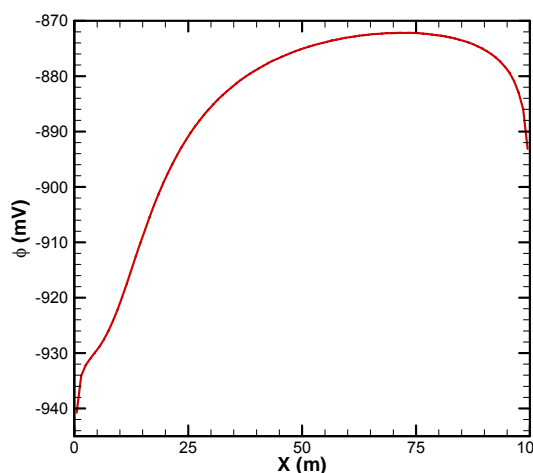
طول خط لوله	۱۰۰ متر
طول آند	۱۰ متر
فاصله‌ی ابتدای آند تا ابتدای لوله	۱۰ متر
موقعیت قرار گیری آند	موازی با لوله
قطر لوله	۳۰۰ میلی‌متر
طول هر بخش از لوله L_i	۱ متر
الکترولیت	خاک
مقاومت ویژه خاک	۱۰۰۰ اهم.سانتی‌متر
مقاومت ویژه لوله	۷۲۰ نانو اهم. متر

لوله بدون روکش بوده و ابتدا و انتهای آن عایق فرض شده است. شماتیکی از نحوه قرارگیری لوله و آند در شکل ۳ ارائه شده است.

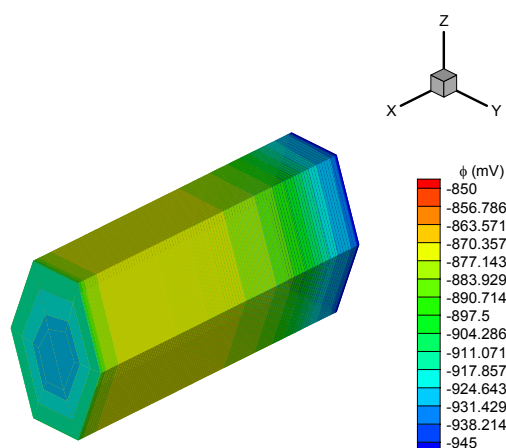


شکل ۳- شماتیکی از نحوه قرارگیری آند و خط لوله

با فرض استفاده از روش جریان اعمالی نتایج حاصل از مدل سازی خط لوله ای با مشخصات ارائه شده در جدول ۱ به کمک روش المان مرزی در شکل ۴ و شکل ۵ ارائه شده است.



شکل ۵- تغییرات پتانسیل در راستای محور لوله



شکل ۴- تغییرات پتانسیل در سطح لوله

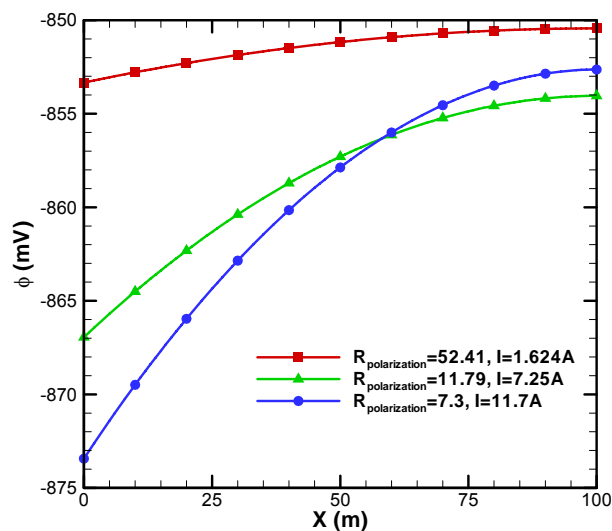
جریان لازم برای حفاظت لوله به کمک یک روند تکرار مشخص شده و این جریان در نهایت برابر با مقدار ۱/۳۶ آمپر بدست آمده است.

برای استفاده از روش ECM نیز همانگونه که در قسمت قبل تشریح شد ابتدا می بایست مقاومت ها مشخص شوند. با فرض لخت بودن لوله مقاومت طولی و مقاومت خاک به کمک اطلاعات موجود در جدول ۱ براحتی تعیین می شوند. برای تعیین مقاومت پلاریزاسیون همانگونه که در پیش اشاره شد می توان شیب تنها بخشی از نمودار پلاریزاسیون را در معادله استفاده نمود و یا از روند تکرار و تصحیح شیب بهره گرفت. با فرض استفاده از شیب تنها یک بخش از نمودار پلاریزاسیون، مقاومت های متناظر در حالات مختلف در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۲- مقاومت‌های متناظر با شیب نمودار پلاریزاسیون

مقدار مقاومت پلاریزاسیون متناظر	محاسبه‌ی شیب در بازه‌ی پتانسیل
۷/۳۰۰۴ اهم	-۵۲۰ تا -۱۰۴۰
۱۱/۷۹ اهم	-۵۲۰ تا -۱۰۰۰
۵۲/۴۱ اهم	-۵۶۰ تا -۸۸۰

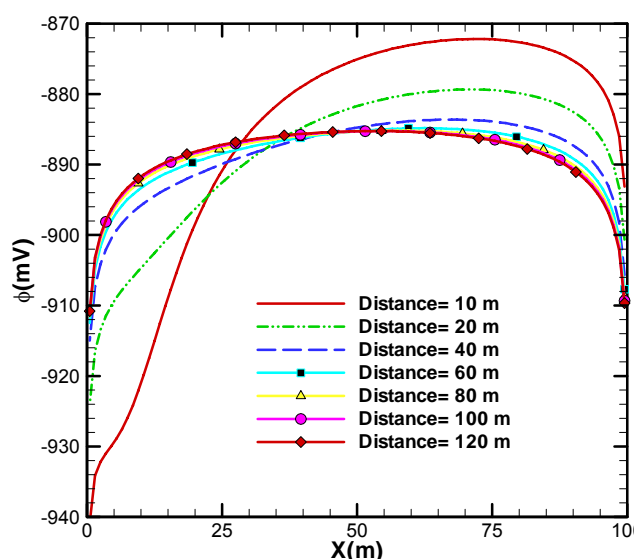
توزیع پتانسیل در طول لوله و جریان لازم برای حفاظت آن به ازای مقاومت‌های ارائه شده در جدول فوق در شکل ۶ ارائه شده‌است. جریان در ابتدای خط ($X=0$) تزریق شده‌است.



شکل ۶- توزیع پتانسیل در طول لوله به ازای مقاومت‌های مختلف پلاریزاسیون

با توجه به شکل ۶ مشاهده می‌گردد که انتخاب شیب مناسب و به عبارتی مقاومت پلاریزاسیون تاثیر چشمگیری در میزان جریان لازم جهت حفاظت خواهد داشت. به طوریکه گاه مقدار جریان لازم را تا ۱۰ برابر کاهش یا افزایش می‌دهد. از اینرو این روش شدیداً به فرآیند خطی‌سازی منحنی پلاریزاسیون وابسته می‌باشد. هر چه شیب نمودار در بازه‌ی کوتاه‌تری لحاظ شود، مقدار جریان کمتر می‌شود. نتایج شکل ۶ نشانگر اینست که جریان لازم برای حفاظت لوله مطابق با حالت سوم جدول ۲ تقریباً با جریان محاسبه شده توسط روش BEM برابر می‌باشد.

در روش المان‌مرزی اثر فاصله‌ی آند تا کاتد در توزیع پتانسیل را می‌توان بررسی نمود. با توجه به شکل ۱ در روش ECM الکترولیت اطراف لوله دارای پتانسیل یکسان در سرتاسر لوله می‌باشد. این پدیده تنها با فرض فاصله‌ی بسیار زیاد آند و کاتد ممکن است. اثر فاصله در توزیع پتانسیل روی کاتد که به کمک روش المان‌مرزی محاسبه شده در شکل ۷ نشان داده شده‌است.



شکل ۷- توزیع پتانسیل در طول لوله به ازای فواصل مختلف آند از خط لوله

مطابق با شکل فوق افزایش فاصله ی آند و خط لوله به بیش از ۸۰ متر تاثیر چندانی در توزیع پتانسیل خط ندارد. از اینرو در فواصل بیش تر از ۸۰ متر پتانسیل خاک در اطراف لوله یکسان بوده و می توان روش ECM را برای مسائلی با این شرط مورد استفاده قرار داد. با توجه به شکل ۷ و شکل ۶ می توان به این نتیجه رسید که حتی با ارضای شرط فاصله ی زیاد آندها تا کاتد هر یک از دو روش توزیع پتانسیل متفاوتی را روی کاتد نتیجه می دهند. علاوه بر موارد فوق با کمی دقت در شکل ۷ مشاهده می گردد که افزایش فاصله آند تا کاتد در این مسئله خاص باعث افزایش یکنواختی توزیع پتانسیل در خط لوله شده و حالت تقارن توزیع پتانسیل را در حالت فواصل بسیار دور ایجاد می نماید. همچنین با توجه به شکل مذکور مشاهده می گردد افزایش فاصله همانگونه که انتظار می رود باعث افزایش مقدار کمینه پتانسیل روی خط می شود. به عکس این افزایش فاصله سبب کاهش مقدار بیشینه پتانسیل شده که این حرکت در جهت مطلوب می باشد. به عنوان مثال برای فاصله ی ۱۰ متر بحرانی ترین نقطه دارای پتانسیلی در حدود -۸۷۵ میلی ولت بوده و این حد بحرانی برای فواصل بالاتر از ۶۰ متر برابر با -۸۸۵ میلی ولت می باشد. این امر بیانگر نیاز به جریان کمتر برای حفاظت خط در صورت جایگذاری آندها در فواصل دور می باشد.

نتیجه گیری

با توجه به مطالب ارائه شده در قسمت های پیش مزایا و معایب روش ECM را در مقایسه با روش المان مرزی به صورت زیر می توان برشمرد.

- مزایای روش مدار معادل نسبت به روش المان مرزی
 ۱. سادگی روش و سهولت کاربرد
 ۲. عدم نیاز به تولید شبکه روی مرزها
 ۳. تبدیل مسئله سه بعدی به یک بعدی
 ۴. عدم نیاز به روند تکرار (با فرض استفاده از یک شیب برای کل لوله) و سرعت بالای حل که ناشی از حل یک سری معادلات خطی می باشد.
 ۵. سهولت بیشتر در مدل سازی شبکه ها
- معایب روش مدار معادل نسبت به روش المان مرزی

۱. نیاز به فرض اساسی دوری بسیار زیاد آندها از کاتد (وجود پتانسیل یکنواخت در الکترولیت)
۲. عدم تطابق خطی‌سازی منحنی پلاریزاسیون با شرایط واقعی
۳. وابستگی شدید به خطی‌سازی منحنی پلاریزاسیون
۴. عدم و یا سختی بسیار برای استفاده در مدل‌سازی سیستم‌های حفاظت کاتدیک اجزای دیگر چون مخازن
۵. عدم کارایی در مدل‌سازی مسائل حفاظت کاتدیک از نوع آند فداشونده
۶. عدم کارایی در مدل‌سازی مسائل با شرایط آند و کاتد نزدیک به هم

مراجع

- [۱] R. B. Griffin, J. F. Yan, S. N. R. Pakalapati, T.V. Nguyen and R. E. White, "Mathematical Modeling of Cathodic Protection Using the Boundary Element Method with a Nonlinear Polarization Curve", *J. Electrochem. Soc.*, July 1992, Vol. 139, No. 7, pp. 1932-1936.
- [۲] K. J. Kennelley, L. Bone and M. E. Orazem, "Current and Potential Distribution on a Coated Pipeline with Holidays Part II-Comparison of the Effects of Discrete and Distributed Holidays", *Corrosion*, March 1993, Vol. 49, No. 3.
- [۳] M. E. Orazem, J. M. Esteban, K. J. Kennelley and R. M. Degerstedt, "Mathematical Models for Cathodic Protection of an Underground Pipeline with Coating Holidays: Part 1 – Theoretical Development", *Corrosion*, April 1997, Vol. 53, No. 4, pp. 264-272.
- [۴] I. A. Metwally, H. M. Al-Mandhai, A. Gastli, Z. Nadir, "Factors Affecting Cathodic-Protection Interference", *Engineering Analysis with Boundary Elements*, 2007, Vol. 31, pp. 485-493.
- [۵] بهبهانی‌نژاد، م.، چنگیزیان، م. و سببی، م. "حفاظت کاتدیک لوله‌های گاز طبیعی با استفاده از روش المان مرزی"، کنفرانس بین‌المللی لوله و صنایع وابسته، تهران، دوره یک، ۱۳۸۶.
- [۶] بهبهانی‌نژاد، م.، چنگیزیان، م. و سببی، م. "شبیه‌سازی عددی سیستم حفاظت کاتدیک و بررسی پارامترهای موثر در توزیع پتانسیل روی کاتد به روش المان مرزی"، همایش مهندسی مواد و متالورژی ایران، نجف آباد، دوره هفت، ۱۳۸۶.
- [۷] بهبهانی‌نژاد، م. و چنگیزیان، م. "شبیه‌سازی سه‌بعدی سیستم حفاظت کاتدیک لوله‌های گاز مدفون در خاک به روش المان مرزی"، همایش بین‌المللی گاز، تهران، دوره دو، ۱۳۸۷.
- [۸] چنگیزیان، م. "تحلیل عددی حفاظت کاتدیک خطوط لوله گاز طبیعی به روش المان مرزی"، رساله جهت اخذ مدرک کارشناسی ارشد، دانشگاه شهید چمران، شهریور ۱۳۸۶.
- [۹] بهبهانی‌نژاد، م. "شبیه‌سازی عددی حفاظت کاتدیک لوله‌های گاز طبیعی"، شرکت گاز استان خوزستان، دانشگاه شهید چمران اهواز، ۱۳۸۷.
- [۱۰] V. E. Kasatkin, A. V. Gelman, A. I. Zarepov, I. V. Kasatkina and V. N. Dorofeeva, "Computer Simulation of Cathodic Protection Systems for Branched Pipelines", *Protection of materials*, 2003, Vol. 39, No. 3, pp 268-273.

خ. دقت و سرعت محاسباتی روش‌های عددی مختلف برای تحلیل جریان گذرای گاز طبیعی (مقاله)

Accuracy and computational speed of various numerical methods for analysis of natural gas transient flow

Abstract

In the present research two numerical methods are assessed for analyzing the transient flow of natural gas in pipelines. Implicit Steger-Warming flux vector splitting method is applied to the governing equations as well as explicit Flux Corrected Transport (FCT) method. Two real cases are analyzed by these methods and their accuracies and computational speeds are compared. Obtained results show that Implicit Steger-Warming flux vector splitting method is more efficient than the flux corrected transport method with acceptable accuracy.

Keywords: **transient flow, natural gas pipelines, flux vector splitting method, flux corrected transport**

دقت و سرعت محاسباتی روش‌های عددی مختلف برای تحلیل جریان گذرای گاز طبیعی

چکیده

در این تحقیق دو روش برای تحلیل عددی جریان گذرای گاز طبیعی درون خطوط لوله مورد بررسی قرار گرفته‌است. روش اختلاف محدود ضمنی تجزیه بردار شار استیگر-وارمینگ و روش اختلاف محدود صریح انتقال تصحیحی شار به معادلات حاکم بر این جریان اعمال شده‌است. دو نمونه از جریان‌هایی که در عمل رخ می‌دهند، با استفاده از این دو روش تحلیل و سرعت محاسباتی روش‌های به‌کار رفته با هم مقایسه شده‌اند. نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهد که روش ضمنی تجزیه بردار شار زمان محاسباتی بسیار کمتری نسبت به روش انتقال تصحیحی شار دارد.

واژه‌های کلیدی: جریان گذرا، خطوط لوله گاز طبیعی، روش تجزیه بردار شار، روش انتقال تصحیح شار

مقدمه

طراحی بهینه خطوط لوله و صرفه‌جویی در هزینه‌های گازرسانی نیازمند داشتن اطلاعاتی دقیق در مورد افت فشار و نرخ جریان در خطوط لوله گاز می‌باشد. به دلایلی مانند تغییرات مصرف گاز در بین مصرف‌کنندگان، تغییر دمای محیط لوله، توقف و یا راه‌اندازی ایستگاه‌ها و استفاده از تجهیزات ذخیره‌سازی گاز، جریان درون خطوط لوله گاز طبیعی، جریانی گذرا می‌باشد [۱]. تحلیل این جریان گذرا به روش‌های طراحی بهینه و اقتصادی خطوط لوله منجر می‌شود. معادلات حاکم بر چنین جریان گذرای، همان معادلات اویلر هستند، که ماهیت آنها هذلولوی است. ترم اصطکاک به صورت یک عبارت جداگانه وارد سیستم معادلات شده و باعث ناهمگن شدن آنها می‌شود. این معادلات در حالت دما ثابت با استفاده معادله بقای جرم، معادله مومنتم و معادله حالت گاز به دست می‌آیند.

شیوه مناسب برای حل چنین سیستمی بایستی دقیق و تا حد امکان دارای هزینه محاسباتی کم و سرعت محاسباتی بالا باشد. شیوه‌های سنتی برای تحلیل چنین جریانی غالباً شامل روش مشخصه‌ها^۱، (MOC) و تعدادی روش اختلاف محدود صریح [۲] و روش‌های اختلاف محدود کاملاً ضمنی مانند کرانک نیکلسون می‌باشند [۳]. همچنین سیستم معادلات حاکم با استفاده از یک روش صریح TVD با استفاده از یک شبکه بسیار ریز و با در نظر گرفتن عبارت اینرسی مورد تحلیل قرار گرفته‌است [۴]. اخیراً روش خط‌ها^۲ (MOL) با استفاده از یک شبکه تطبیقی و با در نظر گرفتن عبارت اینرسی به معادلات حاکم اعمال شده‌است [۱]. در کار حاضر دو روش اختلاف محدود صریح و ضمنی بدون صرف نظر کردن از عبارت اینرسی در معادله مومنتم به معادلات حاکم بر جریان گذرای گاز طبیعی اعمال می‌شود. بدین منظور پس از معرفی معادلات حاکم، هر کدام از این روش‌ها معرفی شده و نتایج تحلیل دو نمونه جریان گذرا در حالت دما ثابت ارائه خواهد شد.

معادلات حاکم

معادلات حاکم بر جریان یک بعدی غیردائم و هم‌دما، درون یک لوله افقی، بدون صرف نظر کردن از هیچ ترمی توسط ژو و آدومی ارائه شده‌است [۴]. این معادلات را که ماهیت هذلولوی دارند می‌توان به صورت زیر بیان کرد:

$$\frac{\partial \mathbf{Q}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{E}(\mathbf{Q})}{\partial x} - \mathbf{H}(\mathbf{Q}) = 0 \quad (1)$$

که در رابطه بالا

$$\mathbf{Q} = \begin{pmatrix} \rho \\ \rho u \end{pmatrix} \quad \mathbf{E} = \begin{pmatrix} \rho u \\ \rho u^2 + c^2 \rho \end{pmatrix} \quad \mathbf{H} = \begin{pmatrix} 0 \\ -\frac{\rho f_g u |u|}{2D} \end{pmatrix} \quad (2)$$

در معادله (۲) سرعت جریان با u و چگالی با ρ نشان داده شده‌است. همچنین در این معادله c سرعت صوت، D قطر لوله و f_g ضریب اصطکاک می‌باشد.

^۱Method of Characteristic

^۲Method of Lines

روش‌های حل غیردائم جریان گاز

برای حل جریان غیردائم گاز طبیعی روش‌های مختلفی به صورت عددی، استفاده از فضای حالت و یا تحلیل مستقیم وجود دارد که در ادامه به برخی از مهم‌ترین آنها اشاره می‌گردد.

روش تجزیه بردار شار

در روش ضمنی تجزیه بردار شار استیگر - وارمینگ، مشتق نسبت به زمان با استفاده از تفاضل پس‌رو حول گام زمانی $n + 1$ بسط داده می‌شود. سپس، به دلیل حضور عبارات غیرخطی، فرآیند خطی‌سازی معادله تفاضل محدود به دست آمده حول گام زمانی n با استفاده از بسط تیلور صورت می‌پذیرد. پس از این مرحله با استفاده از قاعده مشتق زنجیره‌ای شکل خاصی از معادله تفاضل محدود حاکم به نام فرمول بندی دلتا به دست آمده و پس از آن ماتریس‌های ژاکوبین شار تشکیل می‌شوند. با تجزیه ماتریس ژاکوبین شار با استفاده از مشخصه‌های مثبت و منفی، و با استفاده از شکل‌های پس‌رو و پیش‌روی مشتقات مکانی، نوعی روش پادبادسو^۳ به دست می‌آید. این روش را روش تجزیه بردار شار گویند که توسط استیگر و وارمینگ^۴ پیشنهاد شده است [۵]. شکل تفاضل محدود نهایی این روش برای معادلات حاکم بر جریان گذرا به صورت زیر قابل بیان است:

$$-\left(\frac{\Delta t}{\Delta x} A_{j-1}^+\right) \Delta Q_{j-1} + \left(I + \frac{\Delta t}{\Delta x} (A_j^+ - A_j^-) - \Delta t B_j\right) \Delta Q_j = \quad (3)$$

$$+ \left(\frac{\Delta t}{\Delta x} A_{j+1}^-\right) \Delta Q_{j+1} = -\frac{\Delta t}{\Delta x} (E_j^+ - E_{j-1}^+ + E_{j+1}^- - E_j^-) + \Delta t H_j$$

که در رابطه بالا A^+ و A^- ، ماتریس‌های ژاکوبین شار تجزیه شده هستند. این ماتریس‌ها عبارتند از:

$$A^+ = \begin{pmatrix} \frac{c^2 - u^2}{2c} & \frac{u + c}{2c} \\ \frac{(u + c)^2 (c - u)}{2c} & \frac{(u + c)^2}{2c} \end{pmatrix} \quad A^- = \begin{pmatrix} \frac{u^2 - c^2}{2c} & \frac{c - u}{2c} \\ \frac{(u + c)(c - u)^2}{2c} & -\frac{(c - u)^2}{2c} \end{pmatrix} \quad (4)$$

همچنین E^+ و E^- بردارهای شار تجزیه شده هستند و به صورت زیر بیان می‌شوند:

$$E^+ = \begin{pmatrix} \frac{\rho(u + c)}{2} \\ \frac{\rho(u + c)^2}{2} \end{pmatrix} \quad E^- = \begin{pmatrix} \frac{\rho(u - c)}{2} \\ \frac{\rho(u - c)^2}{2} \end{pmatrix} \quad (5)$$

همچنین ماتریس B عبارت است از:

^۳ Upwind

^۴ Steger and Warming

$$\mathbf{B} = \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial \mathbf{Q}} = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ \frac{f_g}{2D} \frac{m}{\rho^2} & -\frac{f_g}{D} \frac{m}{\rho} \end{pmatrix} \quad (6)$$

در رابطه بالا $m = \rho u$ می‌باشد. باید یادآور شد که $\mathbf{A} = \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial \mathbf{Q}}$ می‌باشد. با استفاده از رابطه (۳) برای هر کدام از نقاط شبکه و

با اعمال شرایط مرزی می‌توان به یک دستگاه سه‌قطری بلوکی رسید. با حل این دستگاه برای هر گام زمانی متغیرهای جریان در آن گام محاسبه می‌شوند. برای حل معادلات فوق به چهار شرط مرزی نیاز است. بایستی دو شرط مرزی بر روی مرزها معلوم باشند. از طرفی چون مسأله مورد نظر دو مشخصه حقیقی دارد، دو شرط مرزی دیگر از طریق برون‌یابی از درون میدان جریان محاسباتی تعیین می‌شوند. در حالت کلی با اعمال شرایط مرزی به‌گونه‌ای که متغیرهای مجهول در مرز به‌صورت مستقیم در ماتریس ضرایب وارد نشوند، می‌توان معادله (۳) را به‌صورت زیر نوشت:

$$\mathbf{W}^{n+1} \Delta \mathbf{Q} = \mathbf{RHS}^n + \mathbf{V}^{n+1} \quad (7)$$

در رابطه فوق \mathbf{V}^{n+1} عبارتی است که اثرات شرایط مرزی تابع زمان را بیان می‌کند. \mathbf{W}^{n+1} و \mathbf{RHS}^n هم از معادله (۳) قابل محاسبه هستند. با محاسبه $\Delta \mathbf{Q}$ در هر گام زمانی می‌توان متغیرهای مجهول آن گام را با استفاده از معادله زیر محاسبه کرد.

$$\mathbf{Q}^{n+1} = \mathbf{Q}^n + \Delta \mathbf{Q} \quad (8)$$

روش انتقال تصحیحی شار (FCT)

روش دوم، روش صریح انتقال تصحیحی شار^۵ می‌باشد که اولین بار توسط بوک و بوریس^۶ [۶] ارائه شده و بعد از آن توسط زالساک^۷ [۷] تکمیل گردیده است. ایده اصلی، ترکیب یک روش با دقت بالا با روشی دارای دقت پایین است که در آن، روش با دقت بالا در نواحی هموار جریان اعمال می‌شود در حالی که روش با دقت پایین نزدیک ناپیوستگی‌ها (به جهت دستیابی به یک راه حل یکنوا^۸) اعمال می‌گردد. برای دستیابی به روش و استفاده از آن، فرم بقایی معادلات مورد نیاز می‌باشند. گام‌های روش تکاملی FCT (الگوریتم زالساک) به‌شرح زیر می‌باشد [۷]:

- شار انتقالی روش با دقت پایین ($f_{i+1/2}^L$) با استفاده از یک روش با دقت پایین مانند روش لکس یا لکس-وندروف مرتبه اول برای تضمین رفتار یکنوای روش محاسبه می‌گردد.

^۵ Flux Corrected Transport (FCT)

^۶ Book and Boris

^۷ Zalesak

^۸ Monotone

- شار انتقالی روش با دقت بالا ($f_{i+1/2}^H$) با استفاده از یک روش با دقت بالا همانند الگوریتم وارمینگ-کانتر-لومکس (WKL) یا روش‌های TVD به منظور تضمین انجام تحلیلی با دقت بالا، محاسبه می‌شود، اما این کار می‌تواند باعث بروز برخی رفتارهای نوسانی و دیگر رفتارهای نامناسب عددی در حل گردد که این نوسان‌ها از ویژگی‌های بسیاری از روش‌های مرتبه دوم به بالا می‌باشد.
- حل انتقالی و پخشی جدید و مرتبه پایین محاسبه می‌شود.

$$u_i^{TD} = u_i^n - \frac{\Delta t}{\Delta x_i} (f_{i+1/2}^L - f_{i-1/2}^L) \quad (9)$$

- شار ضد پخشی که معادل مقدار شار انتقالی یکنوایی تعریف می‌شود که بایستی قبل از تصحیح متغیرهای مرحله سوم محدود شود.

$$f_{i+1/2}^{AD} = f_{i+1/2}^H - f_{i+1/2}^L \quad (10)$$

- شارهای ضد پخشی به‌نحوی محدود می‌گردند که u^n محاسبه شده در مرحله چهارم عاری از بالاروی یا پایین‌روی^۹ (همانند u_i^{TD}) باشد. به عبارت روشن‌تر:

$$f_{i+1/2}^C = C_{i+1/2} f_{i+1/2}^{AD}, \quad 0 \leq C_{i+1/2} \leq 1 \quad (11)$$

- این شار ضد پخشی محدود شده برای مقدار جدید u_i^{n+1} اعمال می‌گردد. یعنی

$$u_i^{n+1} = u_i^{TD} - \frac{\Delta t}{\Delta x} (f_{i+1/2}^C - f_{i-1/2}^C) \quad (12)$$

نتایج

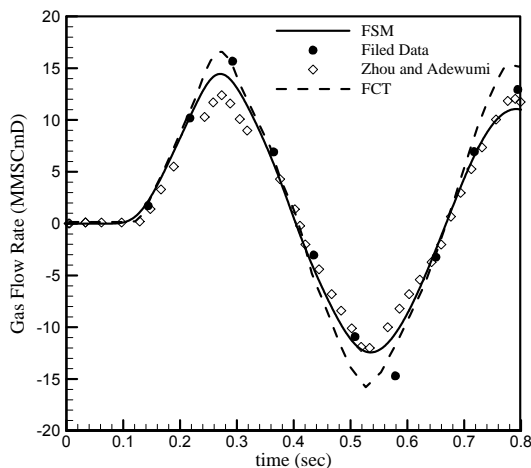
در این قسمت با استفاده از روش‌های ذکر شده، دو نمونه جریانی که در عمل رخ می‌دهند، تحلیل و نتایج به‌دست آمده با نتایج ارائه شده توسط سایر محققین مقایسه می‌شوند.

^۹ Over- and Undershoots

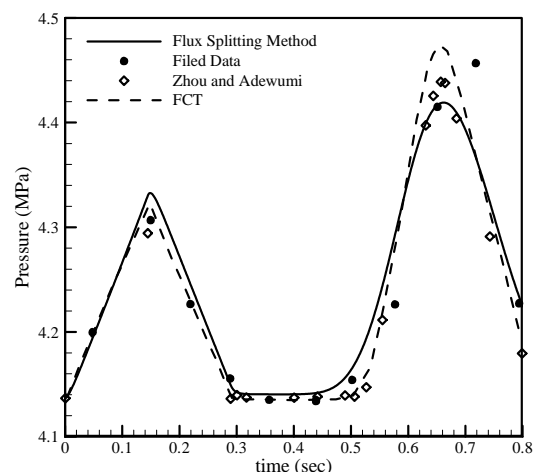
خط لوله با انتهای بسته

نمونه اولی که بررسی می‌شود، نمونه‌ای است که در [۸] نیز مورد بررسی قرار گرفته‌است. این مثال توسط ژو و آدومی [۴] هم تحلیل شده‌است. لوله‌ای به طول $91/44\text{ m}$ و به قطر 61 mm که انتهای آن بسته است و در ابتدا فشار $4/136\text{ MPa}$ درون آن برقرار است، در ورودی خود تحت اثر تغییر شار جرمی به صورت یک پالس مثلثی قرار می‌گیرد. مدت زمان کل انجام آزمایش $8/10\text{ s}$ می‌باشد. این پالس به‌گونه‌ای است که از لحظه صفر جریان ورودی به صورت خطی در مدت زمان $145/10\text{ s}$ تا مقدار $196\frac{\text{m}^3}{\text{s}}$ در شرایط استاندارد^{۱۰}، افزایش می‌یابد. سپس به صورت خطی در مدت زمان $145/10\text{ s}$ تا صفر کاهش می‌یابد. همچنین سرعت صوت دما ثابت $348/1\frac{\text{m}}{\text{s}}$ می‌باشد. همچنین مقدار ضریب اصطکاک ثابت و برابر با $3/10$ در نظر گرفته شده‌است. علاوه بر این مقادیر شار جرمی در ورودی و خروجی معلوم است بنابراین بایستی مقادیر جرم مخصوص در مرزها برون‌یابی شوند.

نتایج به‌دست آمده با استفاده از روش تجزیه بردار شار و FCT



شکل ۲- نرخ جریان گاز در مقطع میانی لوله با استفاده از روش تجزیه بردار شار و FCT و مقایسه آن با نتایج ارائه شده توسط سایر محققین



شکل ۱- تغییرات فشار در ورودی لوله با استفاده از روش تجزیه بردار شار و FCT و مقایسه آن با نتایج ارائه شده توسط سایر محققین

شکل ۱ تغییرات فشار با زمان در مقطع ورودی لوله را نشان می‌دهد. همان‌گونه که در این شکل مشخص است نتایج به‌دست آمده از روش تجزیه بردار شار به داده‌های میدانی، و نتایج به‌دست آمده توسط ژو و آدومی، بسیار نزدیک است. همچنین روش FCT نیز توانسته‌است فشار در مقطع ورودی لوله را به‌خوبی تقریب بزند. فشار در ابتدا در مدت زمان $145/10\text{ s}$ به مقدار بیشینه خود می‌رسد، سپس در زمان $29/10\text{ s}$ فشار از مقدار بیشینه خود به مقدار $4/136\text{ MPa}$ می‌رسد و تا زمان $45/10\text{ s}$ در این مقدار

^{۱۰} در شرایط استاندارد دما 25°C و فشار 100 kPa می‌باشد.

باقی می‌ماند. این افزایش و کاهش ناگهانی فشار به دلیل اعمال پالس مثلثی نرخ حجمی جریان گاز در ورودی لوله می‌باشد. پس از این زمان به دلیل برگشت جریان فشار تا حدود $4 / 41 MPa$ در زمان $7s$ / افزایش می‌یابد و پس از آن فشار دوباره کاهش می‌یابد. شکل ۲ نمایش دهنده نرخ تغییرات جریان گاز در نقطه میانی لوله با زمان می‌باشد. در اینجا نیز نتایج به‌دست آمده از روش تجزیه بردار شار و FCT به داده‌های میدانی، و نتایج به‌دست آمده توسط ژو و آدومی، بسیار نزدیک است. در ابتدا در حدود $16s$ / هیچ‌گونه تغییری در این نقطه مشاهده نمی‌شود. این بدان علت است که در این مدت زمان، این نقطه هیچ تحریکی از بالادست جریان حس نکرده است. با گذر زمان و با منتقل شدن تحریک اعمال شده به پایین دست جریان، نرخ حجمی گاز در نقطه میانی شروع به افزایش می‌کند. با عبور تحریک اعمال شده از این نقطه نرخ جریان گاز در این نقطه شروع به کاهش می‌کند. تا اینکه در زمانی حدود $4s$ / این مقدار به صفر می‌رسد. در اثر برگشت جریان از انتهای لوله به ابتدا نرخ جریان در جهت منفی افزایش می‌یابد. تا اینکه با گذر جریان برگشتی نرخ جریان گاز رو به کاهش می‌رود و در زمانی حدود $65s$ / مقدار آن به صفر می‌رسد و پس از آن دوباره نرخ جریان گاز افزایش می‌یابد.

جدول ۱- مقایسه کارایی دو روش تجزیه بردار شار و FCT

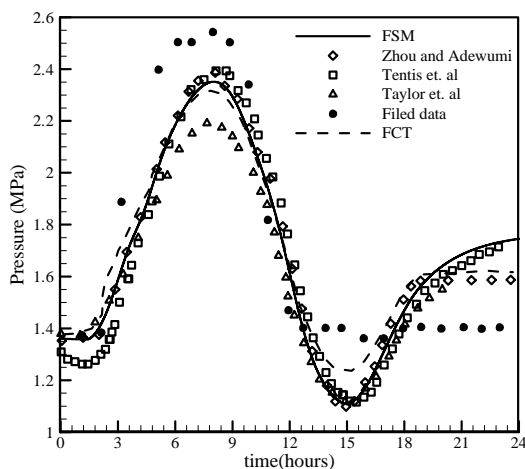
روش	تجزیه بردار شار	FCT
وضعیت پایداری	همیشه پایدار	در محدوده عدد کورانت، پایدار
CPU TIME	$25s$ /	$47s / 15$

در جدول ۱ کارایی دو روش تجزیه بردار شار و FCT در ارتباط با زمان محاسباتی برای مثال اول با یکدیگر مقایسه شده‌اند. ملاحظه می‌شود که زمان محاسباتی روش ضمنی تجزیه بردار شار در مقایسه با روش FCT بسیار کمتر است.

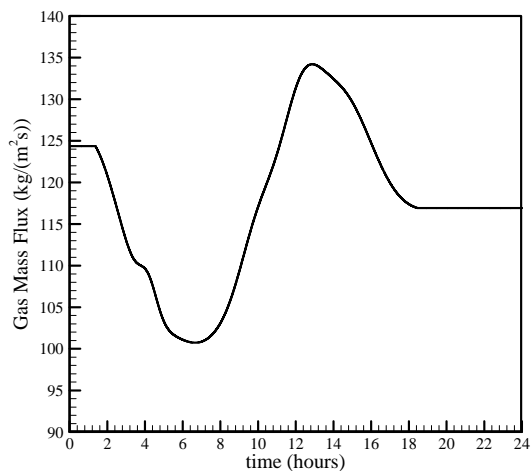
خط لوله با خروجی مشخص

دومین نمونه جریانی که بررسی می‌شود، نمونه‌ای است که در مرجع [۹] نیز مورد بررسی قرار گرفته‌است. سیستم، لوله‌ای به طول $72259 / 5 m$ و قطر $207m$ / می‌باشد که جریان گاز طبیعی با وزن مخصوص 675 / و دمای $10^{\circ}C$ درون آن برقرار است. لزجت گاز $11 / 84 \times 10^{-6} kgm^{-1}s^{-1}$ است و زبری لوله $617 mm$ / می‌باشد. در اثر عدم وجود شرایط اولیه، شرایط حالت دائم‌جریان به‌عنوان شرایط اولیه در نظر گرفته می‌شوند. مقدار ضریب اصطکاک ثابت و برابر با همان مقدار حالت دائم‌در نظر گرفته می‌شود. برای شرایط مرزی هم، فشار در ورودی ثابت در نظر گرفته می‌شود، در حالی که لوله در خروجی خود در اثر تقاضای مصرف‌کنندگان، تحت اثر تغییر شار جرمی مطابق شکل ۳ در طول یک شبانه‌روز قرار می‌گیرد. این مساله توسط ژو و آدومی هم با استفاده از یک روش TVD مورد بررسی قرار گرفته‌است [۴]. همچنین این مساله توسط تنتیس و همکاران با استفاده از روش خط‌ها^{۱۱} و یک شبکه تطبیقی تحلیل شده‌است [۱].

^{۱۱} Method of Lines



شکل ۴- تغییرات فشار در انتهای لوله با استفاده از روش تجزیه بردار شار و FCT و مقایسه آن با نتایج ارائه شده توسط سایر محققین



شکل ۳- شار جرمی در مقطع خروجی

شکل ۴ تغییرات فشار گاز با زمان در مقطع خروجی لوله در مدت یک شبانه روز را نشان می‌دهد. همان گونه که در این شکل نشان داده شده است، تا ساعت ۱/۵ بامداد، با ثابت ماندن شار جرمی در مقطع خروجی هیچ گونه تغییر فشاری در این مقطع مشاهده نمی‌شود، پس از این ساعت با کاهش مصرف، فشار در مقطع خروجی شروع به افزایش می‌کند. این روند تا حدود ساعت ۸ صبح ادامه می‌یابد. پس از این ساعت با افزایش مصرف، فشار در مقطع خروجی کاهش می‌یابد. این روند تا ساعت ۱۵ ادامه می‌یابد. سپس با کاهش مصرف، روند افزایش فشار تا ساعت ۲۴ ادامه می‌یابد.

جدول ۲- مقایسه کارایی دو روش تجزیه بردار شار و FCT

روش انتقال تصحیحی شار		روش تجزیه بردار شار	
CPU TIME	گام زمانی	CPU TIME	گام زمانی
۱۴۶۸۸۳/۲ s	۰/۰۰۰۰۱ s	۲۵۶/۵۹ s	۱ s
۷۸۴۱۲/۱ s	۰/۰۰۰۱ s	۱۲/۶۵ s	۲۰ s
۳۵۸۸۹/۸ s	۰/۰۰۱ s	۴/۰۵ s	۶۰ s
۲۷۵۴۰/۰ s	۰/۰۱ s	۰/۸۷۵ s	۳۰۰ s

در جدول ۲ کارایی دو روش تجزیه بردار شار و FCT در ارتباط با زمان محاسباتی برای مثال دوم با یکدیگر مقایسه شده‌اند. ملاحظه می‌شود که زمان محاسباتی روش ضمنی تجزیه بردار شار در مقایسه با روش FCT بسیار کمتر است. سرعت محاسباتی روش تجزیه بردار شار را می‌توان به دو عامل زیر نسبت داد.

- کم بودن حجم عملیات ریاضی و تعداد مراحل تحلیل در یک گام زمانی نسبت به FCT
- بزرگتر بودن گام زمانی در روش تجزیه بردار شار

نتیجه گیری

با بررسی جداول و شکل‌های ارائه شده ملاحظه می‌شود که روش تجزیه بردار شار ضمن برخورداری از دقت مناسب، به دلیل داشتن سرعت محاسباتی بالاتر نسبت به روش FCT برای تحلیل جریان درون خطوط انتقال و شبکه‌های توزیع گاز طبیعی مناسب‌تر است.

مراجع

- [1] Tentis, E., Margaris, D., Papanikas, D., 2003, "Transient gas flow simulation using an Adaptive Method of Lines", C. R. Mecanique, Vol. 331, pp. 481-487.
- [2] Zucrow, M.J., Hofman., J.D., 1976, "Gas Dynamics", Willey, Vol. I & II.
- [3] Rachford, H.H., Dupont, T.A., 1974, "A Fast Highly Accurate Means of modeling Transient Flow in Gas Pipelines by Variational Methods", Society of Petroleum Engineers Journal, pp. 356-362.
- [4] 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, Oct. 18-20.
- [5] Steger, J.L., Warming, R.F., 1979, "Flux Vector Splitting of the Inviscid Gasdynamic Equation with Application to Finite Difference Methods", NASA TM 78605.
- [6] Book, D.L., Boris, J.P., Hain, K., 1975, "Flux-corrected transport II: Generalizations of the method", J.Comput. Phys. 18, pp. 248-278.
- [7] Zalesak, S.T., 1979, "Fully multidimensional flux-corrected transport algorithms for fluids", J. Comput. Phys. 31, pp. 335-362.
- [8] Dempsey, R.J., Rachford, H.H., Nolen, J.S., "Gas Supply Analysis-States of the Arts", Paper Presented at AGA Conf, San Francisco, 1972
- [9] Taylor, T.D., Wood, N.E., Power, J.E., "A Computer Simulation of Gas Flow in Long Pipelines", Soc. Pet. Eng, Trans, AIME, Vol. 225.

د. غرفه دفتر پژوهش شرکت گاز استان خوزستان از نمای دوربین



شکل ۱: عکس‌هایی از غرفه دفتر پژوهش ۱



شکل ۲: عکس‌هایی از غرفه دفتر پژوهش ۲



شکل ۳: عکس‌هایی از غرفه دفتر پژوهش ۳



شکل ۴: عکس‌هایی از غرفه دفتر پژوهش ۴



شکل ۵: عکس‌هایی از غرفه دفتر پژوهش ۵



شکل ۶: عکس‌هایی از غرفه دفتر پژوهش ۶

ر. سمینارهای ارائه شده در هفته پژوهش

ر. ۱ وضعیت حال و آینده ایستگاه های گاز شهری



دفتر پژوهش شرکت گاز استان خوزستان

وضعیت حال و آینده ایستگاه های گاز شهری

مهندس علی باقری
کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک
دانشگاه شهید چمران اهواز

آذرماه ۱۳۸۷

فهرست مطالب

- معرفی ایستگاه‌های مختلف در امر گازرسانی
- وضعیت حال ایستگاه‌ها
- وضعیت آتی مورد انتظار ایستگاه‌ها
- ارائه راهکارهای سازنده جهت ادامه تدوین استانداردها و طراحی ایستگاه‌ها

معرفی ایستگاه‌های مختلف در امر گازرسانی

- انواع ایستگاه‌ها بر حسب کاربرد:
 - ایستگاه‌های تقلیل فشار شامل:
 - ایستگاه دروازه شهری بزرگ (City Gate Station- CGS) با تقلیل از ۴۰۰ به ۲۵۰ پوند بر اینچ مربع
 - ایستگاه محدوده شهری کوچک (Town Boarder Station- TBS) با تقلیل از ۲۵۰ به ۶۰ پوند بر اینچ مربع
 - ایستگاه‌های اندازه‌گیری
 - ایستگاه با تقلیل فشار خاص جهت موارد خاص صنعتی

معرفی ایستگاه‌های مختلف در امر گازرسانی



• انواع ایستگاه‌ها بر حسب نوع استقرار:

- ایستگاه‌های کابینتی
- ایستگاه‌های سطح
- ایستگاه‌های زیرزمینی

بازگشت به فرست

وضعیت حال ایستگاه‌ها

• همواره با توجه به نوع کاربرد و فشار گاز ورودی به ایستگاه، نوع ایستگاه

انتخاب می‌شود و با توجه به پارامترهای اصلی زیر طراحی ایستگاه تقلیل

فشار انجام می‌پذیرد:

- فشار و دمای عملیاتی گاز ورودی
- فشار و دمای عملیاتی گاز خروجی
- فشار طراحی و تست
- سرعت گاز داخل لوله
- مقدار جریان حجمی گاز

وضعیت حال ایستگاهها

در شکل کلی، تمامی ایستگاههای تقلیل فشار از حیث شکل ظاهری و نوع اجزا یکسان می باشند. برای نمونه:

- شیر عایقی از نوع مخروطی
- شیر عایقی از نوع توپی
- فیلتر خشک عمودی (ایستاده) گاز
- سیستم بودار کننده
- شیر کنترلی
- شیر سماوری
- رگولاتور
- شیر اطمینان قطع کننده جریان
- شیر اطمینان تخلیه گاز
- دبی سنج توربینی گاز
- شاخص اندازه گیر دما
- شاخص اندازه گیر فشار

هر کدام از اجزای فوق دارای استانداردهای مخصوص خود در شرکت ملی گاز ایران (IGS) یا در سطح بین المللی (ASME, ANSI,...) هستند

وضعیت حال ایستگاهها



وضعیت حال ایستگاهها

- نمونه‌هایی از استانداردهای حال حاضر شرکت گاز:
 - ضد زنگ و آسترکاری اجزا و در مورد فیلترها، ساچمه‌پاشی و ماسه‌زنی باید مطابق با استاندارد سوئدی S.L.S 05590-LATEST یا sts 055900 Grade SA3 بوده و دارای یک پوشش روی-کرومات با ضخامت خشک ۳ میلی‌متر به همراه پوششی میانی از اکسید آهن میکادار خاکستری با ضخامت ۲.۵ میلی‌متر باشند
 - صفحه نام و مشخصاتی روی اجزا حاوی اطلاعات ذیل باید جوش بخورد:
 - نام تولیدکننده، شماره سریال و سال تولید
 - مدل و نوع
 - اندازه
 - فشار کاری-فشار طراحی-فشار تست
 - دمای کاری
 - وزن و حجم
 - قطعات قابل انفکاک بایستی بعد از تنش‌زدایی نصب گردند



وضعیت حال ایستگاهها

- نمونه‌هایی از استانداردهای حال حاضر شرکت گاز:
 - کلیه فلنج کاری‌ها و لوله کاری‌های فولادی مطابق استاندارد ANSI-B16.5
 - جوش کاری‌ها و فیت کاری‌ها بایستی مطابق با استاندارد ANSI-B16.11
 - اتصالات چفتی و جوشی مطابق استاندارد ANSI-B16.11
 - واشرها (گسکت‌ها): ANSI-B 16.20
 - پیچ و مهره‌ها: ANSI-B 18.2 , B 2.2
 - شیرآلات: NIGC-IGS-MS-PL-010, 019
 - لوله کشی: ANSI-B31.8, B31.3
 - رنگ کاری: NIOC-IPS-E-TP-100
 - لوله فولادی بدون درز: ASTM A106
 - پوشش‌های اپوکسی: NIOC-IPS-M-TP-215, 220, 225 (1993)

بازگشت به فهرست



وضعیت آتی مورد انتظار ایستگاهها

- ایستگاه‌های مسطح در آینده به طور کامل منسوخ و به جای آنها دو ایستگاه زیر جایگزین می‌گردند:
 - ایستگاه‌های کابینتی
 - ایستگاه‌های زیر زمینی

این امر بخاطر مشکلات کمبود جا می‌باشد؛ البته ممکن است مشکلاتی بوجود آیند و از جمله آنها اینکه این ایستگاه‌ها مشکل دسترسی به یک جزء خاص برای تعویض یا نگهداری خواهند داشت.

بازگشت به فهرست

راهکارهایی جهت ادامه تدوین استانداردها و طراحی ایستگاهها

- تدوین استانداردهای جدید و مرتبط با ایستگاههای جدید
- سویچ از ایستگاههای قدیمی مسطح به انواع جدید با بررسی موانع و مشکلات احتمالی
- ایجاد یک مجموعه کامل و نرم‌افزاری از تیپ‌های ایستگاههای کابینتی و مسطح

راهکارهایی جهت ادامه تدوین استانداردها و طراحی ایستگاهها

- استانداردهاسازی باید مطابق با موارد ذیل انجام پذیرد:
 - محافظت در برابر خوردگی
 - محافظت ایستگاه و پرسنل از رعد و برق
 - ایجاد سیستم‌های قطع فعالیت اتوماتیک
 - استحکام سازه‌ها بخصوص سازه‌ها و تجهیزات زیر زمینی
 - بررسی راه‌های جمع‌آوری و کنترل آبهای سطحی و هرزآبها و مخلوط آب‌روغن‌ها
 - ارتعاشات لوله‌ای به هنگام انبساط و انقباض و فعالیت ایستگاه
 - هواکش و سیستم تهویه
 - روشنایی
 - حصارکشی
 - طرح و موقعیت‌سنجی اولیه ایستگاه قبل از پیاده‌سازی
 - ایمنی در برابر آتش‌سوزی

پایان



ز. استاندارد انتخاب روکش IGS

APPROVED



شرکت ملی گاز ایران - مدیریت پژوهش و فناوری

امور تدوین استانداردها

IGS

Iranian Gas Standards

راهنمای انتخاب پوشش

راهنمای انتخاب پوشش خارجی برای خطوط لوله گاز (مدفون)

Recommended Practice for Selection of Suitable External Coatings
for Underground (Buried) Gas Pipelines



دفتر مدیر عامل



شرکت ملی گاز ایران

تاریخ: ۱۳۸۷/۱۰/۱۶
گ.د.ب. / ۰۷۵۰ - ۱۴۹۹۶
شماره:

ابلاغ مصوبه هیأت مدیره

مدیر محترم پژوهش و فناوری

باسلام،

به استحضار می‌رساند در جلسه ۱۳۴۷ مورخ ۱۳۸۷/۱۰/۱ هیأت مدیره، نامه شماره گ.۹/۰۰۰/۰۰۰/۱۱۰۴۸۱ مورخ ۸۷/۹/۱۳ آن مدیریت در مورد دستورالعمل راهنمای انتخاب انواع پوشش‌های خطوط لوله گاز از جمله قیر اصلاح شده (با نام تجاری بیتوسیل) و پلی اتیلن سه لایه با حضور رئیس امور تدوین استانداردها و رئیس امور بازرسی فنی شرکت انتقال گاز مطرح و مورد تصویب قرار گرفت.

همچنین مقرر گردید انتخاب نهایی پوشش خطوط لوله اجرائی با رعایت استانداردهای مندرج در دستورالعمل فوق الذکر به عهده هیأت مدیره شرکت زیربط باشد و در پیمانهای اجرائی خطوط لوله نیز با پیشنهاد طراح و تأیید نهایی هیأت مدیره شرکت زیربط انجام پذیرد.

ناصر آنگون

دبیر هیأت مدیره

بازرسی / اراضی
اصل دستورالعمل + این مصوبه در سایت دونا
قرار دارد. به دلیل عدم امکان دسترسی به سایت
اطلاع رسانی نمود.
لطفاً
۸۷/۱۰/۲۹

رونوشت: مدیرعامل محترم شرکت ملی گاز ایران و قائم مقام رئیس هیأت مدیره

اعضای محترم هیأت مدیره / مدیر محترم توسعه منابع انسانی / مدیرعامل محترم

شرکت انتقال گاز ایران / رئیس محترم امور حسابرسی داخلی / رئیس محترم

امور حقوقی / رئیس محترم روابط عمومی

FOREWORD

This standard is intended to be mainly used by NIGC and contractors and has been prepared on interpretation recognized standards , technical documents , knowledge , backgrounds and experiences in gas industries at national and international levels .

Iranian gas standards (IGS) are prepared , reviewed and amended by technical standard committees within NIGC Standardization division and submitted to the NIGC's "STANDARDS COUNCIL" for approval .

IGS Standards are subject to revision , amendment or withdrawal , if required , thus the latest edition of IGS shall be checked/inquired by NIGC users .

This standard must not be modified or altered by the end users within NIGC and her contractors . Any deviation from normative references and/or well known manufacturers specifications must be reported to Standardization division .

Any comments from concerned parties on NIGC distributed IGS are welcome to technical standards committees and will receive serious attention and consideration should a revision to standards is recommended .

GENERAL DEFINITIONS :

Throughout this standard the following definitions , where applicable , should be followed :

1- "STANDARDIZATION DIV." has been organized to deal with all aspects of industrial standards in NIGC . Therefore , all queries for clarification or amendments are requested to be directed to mentioned div.

2- "COMPANY" : refers to national Iranian gas company .

3- "SUPPLIER" : refers to a firm who will supply the service , equipment or material to IGS specification whether as the prime producer or manufacturer or a trading firm .

4- "SHALL " : is used where a provision is mandatory .

5- "SHOULD" : is used where a provision is advised only .

6- "MAY" : is used where a provision is completely discretionary .

Website : <http://igs.nigc.ir>

E-mail : nigc_igs@nigc.org

CONTENT	PAGE
0. INTRODUCTION	1
1. SCOPE	3
2. REFERENCES	3
3. DEFINITIONS	5
4. GENERAL REQUIREMENTS	5
5. MANDATORY REQUIREMENTS	7
6. SELECTION REQUIREMENTS	7
Annex A – "ACS-15"	16
Annex B – "PIPELINE REHABILITATION COATING SYSTEMS"	17
Annex C – "TP 206 (ALEYSKA SHEAR STRESS TEST)"	19

0. INTRODUCTION

The majority of gas transmission and distribution pipework and associated fittings is buried and therefore needs to be protected against corrosion.

All metallic pipelines should be provided with an external coating and, for buried or submerged sections, cathodic protection.

The possibility of external corrosion occurring shall be determined on the basis of pipeline operating temperatures and the external conditions along the pipeline.

Typical environments which shall be considered when evaluating the possibility of external corrosion include:

- Atmosphere (marine/industrial/rural);
- Sea water (tidal zone/shore approach);
- Fresh or brackish water;
- Marshes and swamps;
- River crossings;
- Dry or wet soil;
- Inside tunnels, sleeves or caissons.
- Human Interference

Environmental parameters which should be considered include:

- ambient air temperatures;
- resistivity, salinity and oxygen content of the environment;
- bacterial activity;
- water current (ground water depth);
- degree of burial;
- potential in-growth of tree roots;
- potential soil pollution by hydrocarbons and other pollutants.

The evaluation of corrosion measures should take into account the probable long-term corrosiveness of the environment rather than be solely confined to the as-installed corrosiveness. For a pipeline on land, due consideration should be given to any known planned changes in the use of the land traversed by the pipeline route which may alter the environmental conditions and thus soil corrosiveness, e.g. irrigation of land previously arid or of low corrosiveness.

The possible effect of the PH of the environment and possible sources of stray and alternating currents shall be evaluated for pipelines on land.

The types of external corrosion damage to be considered shall include:

- general metal loss and degradation;
- localized corrosion, e.g. pitting under deposit or crevice attack;
- microbiologically induced corrosion;
- stress-corrosion cracking, e.g. carbonate / bicarbonate attack.

In a review of 50 years of literature on pipeline coatings, the following concepts emerged:

- Selection of a suitable coating and proper application of the coating both in the factory and in the field are very important for the pipelines intended service life.
- CP must supplement the coating in underground applications to ensure 100% protection.
- Field test results are more indicative of the long term suitability than laboratory tests.
- Results of adhesion tests do not correlate with those of cathodic disbondment tests.
- Cathodic disbondment tests are the best tests to measure coating performance.
- The current required for CP is the best measure of coatings performance when buried.
- Optimizing coating thickness is important.
- Soil stress on the coating is one of the main problems associated with buried pipelines.
- Resistance to cathodic disbondment and soil stresses are very important requirements of a pipe coating . For a pipe coating to be effective, it should meet these criteria: adhesion, adequate thickness, low moisture absorption / transfer, chemical resistance (especially alkalis from CP), and flexibility.
- The initial selection of a suitable coating system is very important, and also, perhaps the most important factor is that the coating system shall be applied as per the required specification.

1. SCOPE

This recommended practice defines the minimum requirements for selection of external coating systems for buried steel pipeline and piping (including associated fittings and appurtenances) and also gives guidance on the performance characteristics of these coatings.

NOTE:

1 - This standard will refer only to coating systems which are known to be successful when used by NIGC and major internationally well-known oil & gas companies.

2 - Additions will be made from time to time to the information available in order to cover products which are less widely used and new products which are considered to be of sufficient interest.

2. REFERENCES

Throughout this standard specification, the following standards and codes that are in effect at the time of issues of this specification (2008) shall, to the extent specified herein, form part of this specification.

The applicability of changes in standards and codes that occur after the date of standards that referred shall be mutually agreed upon by the purchaser and supplier and / or manufacturer.

ISO 21809-2	Petroleum and natural gas industries – External Coatings for buried or submerged pipelines Used in pipeline transportation systems Part 2: Fusion Bonded Epoxy Coatings
ISO 13623	Petroleum and natural gas industries – pipeline transportation systems
ASTM D 1000	Test method for pressure-sensitive adhesive-coated tapes used for electrical and electronic applications
AWWA C 203	Coal tar protective coatings and linings for steel water pipeline – Enamel and tape – Hot applied
NACE RP 01 05-2005	Liquid–epoxy coatings for external repair, Rehabilitation, and weld joints on buried steel pipelines
NACE RP 04 02-2002	Field –Applied Fusion Bonded Epoxy (FBE) pipe coating system for Girth Weld Joints: Application, Performance, and Quality Control

NACE SP 01 69-2007	Control of External corrosion on Underground or Submerged Metallic piping Systems
BS 4164	Specification for coal-tar-based hot-applied coating materials for protecting iron and steel, including a suitable primer
BS 7873	Code of Practice for application and testing of hot enamel external and/or internal coating of iron and steel pipes
BS EN 10300	Bitumen hot applied material coating for external coating
BS ISO 11359	Plastics – thermomechanical analysis (TMA)
IPS-M-TP-317	Hand applied petrolatum tape and primer
IPS-M-TP-311	Cold – applied laminated plastic tape as outer – layer tape
IGS-M-TP-010-1&2	3 layer PE coating system
IGS-M-TP-014-2-A	Polymer modified bitumen membrane
IGS-M-TP-014-2-C	3ply Cold applied plastic tape
IGS-M-TP-014-4	Hand applied laminated plastic tape
IGS-M-TP-014-5	Hand applied laminated bituminous tape
IGS-M-TP-014-3(1)	High temperature heat shrinkable sleeves
IGS-M-TP-014-6	Heat shrinkable sleeves (hot melt adhesive)
IGS-M-TP-014-7	Heat shrinkable sleeves (mastic adhesive)
IGS-M-TP-016	Modified bitumen enamel coating system
IGS-M-TP-020-1	Polyurethane coating for pipeline rehabilitation

- Control of pipeline corrosion: A.W. Peabody
- Uhlig's Corrosion Handbook
- FBE : Allen Kehr

3. DEFINITIONS

3.1 For definitions, please refer to the relevant section of the standards referred in section 2 above.

3.2 Abbreviated items:

ACS	Approved coating system
3LPE	Three Layer Polyethylene
FBE	Fusion Bonded Epoxy
CP	Cathodic Protection
SCC	Stress Corrosion Cracking

4. GENERAL REQUIREMENTS

4.1 The effectiveness in providing the required protection and the possible hazards during application and service shall be considered when selecting external coatings.

4.2 Parameters to be considered when evaluating the effectiveness of external coatings include:

- electrical resistivity of coating;
- moisture permeation and its relation to temperature;
- ability to resist development of holidays with time(gouge resistance);
- ability to maintain substantially constant electrical resistivity with time ;
- ease of repair
- non-toxic interaction with the environment :
- required adhesion between the coating and the pipeline base material;
- required resistance to shear forces between the coating and additional coating, insulation or environment;
- resistance to cathodic disbondment and soil stress ;
- resistance to ageing , brittleness and cracking ;
- possible detrimental effects on the pipe material ;
- possible thermal cycling ;
- UV resistance(for above ground pipelines or long term storage)
- low/high temperature bending
- impact resistance
- soil stress resistance
- CP shielding

4.3 In addition to the above characteristics, the following typical factors should be considered when selecting a pipe coating.

- **type of environment**
- **maximum (upset) operating temperature**
- **pipeline OD**
- **ambient temperatures during application, storage, shipping, construction, and installation**
- **geographical and physical location**
- **type of coating on existing pipeline(if any)**
- **equipment and location(i.e. shop or field) required for coating**
- **installation methods**
- **costs**
- **pipe surface preparation requirements**
- **Logistics**

4.4 The following typical factors should be considered when selecting a girth-weld coating system.

- **Application requirements:**
 - **Surface preparation**
 - **Speed of installation(application cycle time)**
 - **Applicator --skill requirements**
 - **Crew size**
 - **Equipment requirements**
- **Compatibility with main pipeline coating**
- **Pipeline construction and installation methods**
- **Material and application cost**
- **Pipeline environmental and operation conditions**
- **Required life span for the pipeline(longevity requirements)**
- **Routine maintenance budget for the pipeline**
- **Compatibility with cathodic protection requirements**
- **Local health, safety, and environmental (HSE) requirements and regulations**
- **Pipeline operating temperature/duty cycle**
- **Salinity and soil resistivity**
- **Pipeline movement and likelihood of soil stress/settlement**
- **Ground conditions/soil type**
- **Pipeline OD**

5. MANDATORY REQUIREMENTS

- 5.1 External coatings of line pipe shall be factory-applied, except for field weld joints, rehabilitation of existing pipelines and other special points which shall be coated on site.**
- 5.2 Field joints should be protected with a coating system which is compatible with the line-pipe coating. The field joint should meet or exceed the line-pipe coating specification and allow satisfactory application under the predicted field conditions.**
- 5.3 Plant piping and other above grade pipelines in industrial or marine atmospheres shall be externally coated.**
- 5.4 Paint systems shall not be used as the primary external coating on buried pipelines (including field girth welds).**
- 5.5 Hand-applied tapes of the "primer activated" type shall not be used. Hand-applied tape wraps shall be of the "pressure sensitive" type, meaning they can be applied over dry primer or no primer without adverse effect on adhesion.**

6. SELECTION REQUIREMENTS

- 6.1 The NIGC's approved pipeline / field weld joint coating systems are given in table 1.**
- 6.2 Selection of the appropriate coating system for a particular coating situation should be made by reference to tables 2 and 3.**
- 6.3 The products identified in table 4 specify the preferred field-weld joint coating considered the most compatible with the various types and combinations of factory / field applied coatings. Where site or operating conditions preclude the use of the preferred product, options are given where appropriate. In addition, the nominated contractor is permitted to submit a detailed technical proposal for alternative solution for the written approval of NIGC prior to use.**
- 6.4 The main factory coating systems identified in tables 2&3 will require repair when damaged. The preferred repair materials are given in table 5.**
- 6.5 The general characteristics of approved pipeline coatings are given in table 6.**

TABLE 1: DESCRIPTION OF APPROVED COATING SYSTEMS (ACS)

Index	Title	Reference Standard
ACS-1	Three layer polyethylene coating for line pipe	IGS-M-TP-010 (Parts1&2)
ACS-2	Fusion Bonded Epoxy for line pipe	ISO 21809-2
ACS-3	Modified bitumen enamel coating for line pipe	IGS-M-TP-016
ACS-4A	Coal tar enamel coating for line pipe	BS 4164 & BS 7873
ACS-4B	Bitumen enamel coating for line pipe	BS EN 10300
ACS-5	Hand applied 3PLY tape	IGS-M-TP-014-2-C
ACS-6	Hand applied laminated bituminous tape	IGS-M-TP-014-5
ACS-7	Hand applied laminated tape	IGS-M-TP-014-4
ACS-8	Shop or field applied two-component EP	NACE RP 01 05
ACS-9	Shop or field applied two-component PUR	IGS-M-TP-020
ACS-10	High temperature 3-Layer heat shrinkable sleeve system for service temperature up to 80° C.	IGS-M-TP-014-3(1)
ACS-11	3-Layer heat shrinkable sleeve system (hot melt adhesive) for service temperature up to 60° C.	IGS-M-TP-014-6
ACS-12	2-Layer heat shrinkable sleeve (mastic adhesive) for service temperature up to 50°C.	IGS-M-TP-014-7
ACS-13	Polymer modified bitumen membrane	IGS-M-TP-014-2-A
ACS-14	Hand applied petrolatum tape	IPS-M-TP-317
ACS-15	Pressure sensitive , hand applied laminated tape for elevated temperatures	See ANNEX A
ACS-16	Field Applied FBE for field girth welds	NACE RP 04 02

TABLE 2: EXTERNAL PIPE COATINGS, HIGH PRESSURE LARGE DIAMETER GAS TRANSMISSION PIPELINES (OD ≥ 24")

Categories	Approved coating systems	Remarks
Pipe body	ACS-1 ACS-2 ACS-3	ACS-2 is recommended to be used in the following conditions: - non-rocky terrains - Where handling of line pipes from pipe coating plant to construction site is done in controlled-manner with limited damage to pipe surface. * ACS-3 is not recommended to be used in the following conditions : - In tropical environments. - On line pipes larger than 30" OD. **
Field girth welds	ACS-8 ACS-10 ACS-13 ACS-16	ACS-13 should be used only with ACS-3 ACS-8 & ACS-16 should be used only with ACS-2.
Buried pipes , Fittings, appurtenances and spool pieces (in stations)	ACS-5 ACS-8 ACS-9 ACS-10 ACS-13 ACS-15 ACS-16	
Buried Valves	ACS-8 ACS-9 ACS-14	The valves body should preferably factory coated.

* In rocky areas the FBE coating system shall be used with rockguard materials (Rockshield) and dual layer FBE have been developed for harsher pipeline environments (procedures shall be required for the transportation, storage and construction of FBE coated line pipes).

**The ACS- 3 coating system overcoated with Polypropylene extruded sheet having 1 mm thickness(min.) have been used on some 48" projects with satisfactory results, although additional investigation is under process for final decision.

TABLE 3: EXTERNAL PIPE COATINGS, BRANCH AND SERVICE LINES (OD< 24")

Categories	Approved coating systems	Remarks
Pipe body	ACS-1 ACS-2 ACS-3 ACS-4A ** ACS-4B **	ACS-2 is recommended to be used in the following conditions: - non-rocky terrains - Where handling of line pipes from pipe coating plant to construction site is done in controlled-manner with limited damage to pipe surface. * ACS-3, ACS-4A and ACS-4B coating systems are not recommended to be used in tropical environments. ACS-4B coating systems is not recommended to be used on line pipes larger than 12"OD.
Field girth welds	ACS-5 ACS-6 ACS- 8 ACS-11 ACS-12 ACS-13 ACS-16	ACS-6 should be used only with ACS-4A & ACS-4B. ACS-13 should be used with ACS-3 & ACS- 4B. ACS-8 & ACS-16 should be used with ACS-2.
Buried pipes , Fittings, appurtenances and spool pieces (in stations)	ACS-5 ACS-6 ACS-8 ACS-9 <u>ACS-13</u> <u>ACS-16</u>	Use ACS-5 , ACS-6 & ACS-16 when these coating systems are used on the pipe body.
Buried Valves	ACS-8 ACS-9 ACS-14	The valves body should preferably factory coated.

* In rocky areas the FBE coating system shall be used with rockguard materials (Rockshield). Dual-layer FBE have been developed for harsher pipeline environments. Procedures shall be required for the transportation, storage and construction of FBE coated line pipes.

** It is recommended that the ACS- 4A and ACS-4B coating systems to be selected in conditions where the using of other coating systems is not applicable.

TABLE 4: RECOMMENDED MATERIALS FOR PROTECTION OF FIELD GIRTH WELDS

Possible components of differing types of coating on each side of a weld		Choice of field girth welds coating	
		Preferred	Option
ACS-1	ACS-1	ACS-10* ACS-11* ACS-12**	ACS-5**
ACS-1	ACS-2		
ACS-1	ACS-8		
ACS-1	ACS-9		
ACS-1	ACS-4A	ACS-6	
ACS-1	ACS-4B		
ACS-2	ACS-2	ACS-8 ACS-16 ACS-10* ACS-11*	
ACS-2	ACS-8		
ACS-2	ACS-9		
ACS-8	ACS-8	ACS-8	ACS-10 ACS-11
ACS-8	ACS-9	ACS-8 or ACS-9	
ACS-9	ACS-9	ACS-9	
ACS-4A or ACS-4B	FBE	ACS-6	ACS-8***
ACS-4A or ACS-4B	ACS-8 or ACS-9		
ACS-4A or ACS-4B	ACS-4A or ACS-4B		
ACS-3	ACS-2	ACS-13	ACS-6
ACS-3	ACS-8 or ACS-9		
ACS-3	ACS-3		
ACS-3	ACS-1		
ACS-5 or ACS-7	ACS-1	ACS-5	ACS-7
ACS-5 or ACS-7	ACS-2		
ACS-5 or ACS-7	ACS-8 or ACS-9		
ACS-5 or ACS-7	ACS-5 or ACS-7		
ACS-5 or ACS-7	ACS-4A or ACS-4B	ACS-6	

* NIGC strongly recommends use of the induction heater post-heating method for applying H.S.Sleeves on pipeline with OD greater than 24 inches.

** This option is recommended for Branch & Service lines(see table 3).

*** The junction of ACS-4A or ACS-4B and two – component liquids (ACS-8 or ACS-9) shall be over wrapped with ACS-6.

TABLE 5: RECOMMENDED REPAIR SYSTEM

Existing factory/ field applied coatings	Repair systems	
	Preferred	Option
ACS-1	Melt stick , repair patch (with filler mastic) , heat shrinkable Sleeve(see ACS-10 , ACS-11 & ACS-12)	-
ACS-2	ACS-16 ACS-8(Spray or brush/ trowel applied)	Heat shrinkable sleeve/ repair patch(see ACS-10 & ACS-11)
ACS-3	ACS-13	-
ACS-4A	ACS-6	Hot enamel dope
ACS-4B	ACS-6	Hot enamel dope
ACS-8	ACS-8 (Spray or brush/ trowel applied)	-
ACS-9	ACS-9 (Spray or brush/ trowel applied)	-
ACS-5	ACS-5	-
ACS-7	ACS-7	-
ACS-15	ACS-15	-

TABLE 6: TYPES OF APPROVED PIPELINE COATING AND THEIR CHARACTERISTICS

Coating System	Advantages	Limitations
ACS-1	<ul style="list-style-type: none"> - Lowest current requirements - Excellent resistance to cathodic disbondment - Excellent adhesion to steel - Excellent resistance to hydrocarbons - High impact and abrasion resistance - High electrical insulation resistance - High resistance to water permeation - Is not affected by soil stress - Easy handling during transportation and construction activities - Resistant to many chemicals, environmental and bacterial attack - Excellent bendability - Service temperature: -20 to +80°C 	<ul style="list-style-type: none"> - Factory coating application parameters are very critical requiring strict quality control - Higher initial cost - Shielding of CP current is possible (possibility of coating disbondment) - If the FBE layer fails the entire coating system affected. - Repairs are difficult and susceptible to soil stress - Due to the main corrosion protection layer being hidden under other layers difficult to determine if application is good(the polyethylene can hide many faults)
ACS-2	<ul style="list-style-type: none"> - Low current requirements - Excellent resistance to cathodic disbondment - Excellent adhesion to steel - Excellent resistance to hydrocarbons - Excellent soil stress resistance - No known instances of SCC - Coating is visible and easy to inspect, application issues are solved immediately - Pipeline can be coated for full length with same coating material - Non shielding of CP - Excellent chemical resistance - Excellent oxygen barrier - Service temperature: -20 to +120°C 	<ul style="list-style-type: none"> - High moisture absorption - UV rays can cause the FBE to chalk when stored in direct sunlight for long periods of time (top coatings available for UV protection) - Lower impact and abrasion resistance(compared to 3LPE) - Susceptible to damage during transportation and backfilling - Not suitable for use in rocky environments as stand-alone coating - Exacting application parameters - FBE Field joint application parameters are critical and require trained operators and QC

TABLE 6: Continued...

<p>ACS-3</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Minimum holiday susceptibility (due to self healing properties) - Low current requirement for cp - Good resistance to cathodic disbondment - The coating system with the same quality field joint coating - Good adhesion to steel - Ease of application - Non polluting - Easy repair procedure using the same coating material that is on the pipe body - Plant applied(compared to ACS-4A and ACS-4B) - Very good electrical insulating properties - No known instances of CP shielding - No known instances of cold flow - No known instances of SCC - No known instances of Soil Stress 	<ul style="list-style-type: none"> - Limited bendability at higher ambient temperatures - Low chemical resistance, - Limited manufacturers - Limited applicators - Limited ambient temperature resistance - Max. operating temp. : unknown - Limited track record of using for underground or submerged metal corrosion protection in the world - Handling and installation restrictions in tropical environments
<p>ACS-4A</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Minimum holiday susceptibility - Lower current requirements with respect to ACS-4B - Good resistance to cathodic disbondment - Good adhesion to steel - Very good electrical insulating properties - Low water permeation - Resists bacterial attack and root penetration 	<ul style="list-style-type: none"> - Limited manufacturers - Health and air quality concerns - Soil stress may cause the coating to wrinkle, crack, disbonded and expose steel surfaces - CP requirements increases as the coating ages . - Operating temperatures are normally limited to 65° c. - "Cold flow" (leaving the top of the pipe without adequate coating especially on high temperature pipelines) - Low soil stress resistance - Susceptible to SCC - Limited bendability

TABLE 6: Continued...

<p>ACS-4B</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Good adhesion to steel - Good electrical insulating properties - Non polluting environment 	<ul style="list-style-type: none"> - Soil stress may cause the coating to wrinkle, crack, disbond and expose steel surfaces - CP requirements increases as the coating ages - Operating temperatures are normally limited to 60 ° C - "cold flow" (leaving the top of the pipe without adequate coating especially on high temperature pipelines) - Low soil stress resistance - Susceptible to SCC - Root penetration - Low chemical resistance - Brittle at low ambient temperatures - Sags at high ambient temperatures - Limited bendability - Handling and installation restrictions in tropical environments
----------------------	--	--

Annex A

ACS-15

I. TYPE OF COATING

Pressure-sensitive, hand-applied tape-wrap for elevated temperature service

II. GENERAL DATA

- a) **uses:** for onshore buried services. Primarily used for in-plant piping and for pipeline coating renovation on lines operating in the temperature range 55 to 100 ° C.
- b) **coating system:** primer
inner wrap tape
outer wrap tape
- c) **Not suitable for:** continuous contact with hydrocarbons, including oil – contaminated ground water.
- d) **service limitations:**
temperature: min. -30 ° C
max. +100 ° C
- e) **Purchase specification or other product/performance requirements:**
Minimum tape thickness = 0.64 mm.
Polyethylene backing.
Butyl rubber adhesive with minimum TMA softening point equal to 100 ° C
(Test method: ISO 11359).
Minimum allowable 180 degrees peel strength per ASTM D1000 shall be 1 N/mm for tape-to-tape and 2 N/mm tape-to-steel when applied over dry primer.
Maximum allowable slippage in Alyeska tape shear test shall be 15 mm at 80 ° C (Test method: TP-206)* .

III. SURFACE PREPARATION AND COATING APPLICATION REQUIREMENTS

- a) **Commercial blast, Sa2. Double wrap required. Outer wrap required for all services.**
- b) **Compatible repair coatings : ACS-15**

* See Annex C.

Annex B (Informative)

PIPELINE REHABILITATION COATING SYSTEMS

B.1 coating materials

There are a number of coating materials available for using in pipeline rehabilitation, each with its own particular set of advantages and disadvantages. The most common materials type and characteristics are listed in table B1.

TABLE B1: TYPES OF COATING FOR USEING IN PIPELINE REHABILITATION

Type	Advantages	Limitations
ACS-5	<ul style="list-style-type: none"> - Minimum surface preparation - Backfill time - Ease of application - High electrical resistance - Minimum holiday susceptibility - Very good adhesion to steel - Low energy required for application 	<ul style="list-style-type: none"> - Tenting at weld seam is unknown - Shielding CP from soil is unknown - Soil stress resistance is unknown - Susceptibility to SCC is unknown - Susceptible to bacterial attack (due to butyl rubber adhesive) - Limited max. operating temperature (<50 °C)
ACS-9	<ul style="list-style-type: none"> - Fast curing - Low temperature cure - Good soil stress resistance - No known instances of SCC - Lower backfill time than ACS-8 	<ul style="list-style-type: none"> - Less resistant to cathodic disbondment than ACS-8 - Adversely affected by moisture or high humidity - Higher moisture absorption compared to ACS-8 - Acid / alkali attack - Limited max. operating temperature (<60 °C)
ACS-8	<ul style="list-style-type: none"> - Good adhesion - Good mechanical properties - Good soil stress resistance - Immersion resistance - Good cathodic disbondment resistance - Good performance in wet conditions - No known instances of SCC - Suitable for pipelines with operating temperature of higher than 60°C 	<ul style="list-style-type: none"> - Longer cure time compared to ACS-9 - slow cure below 5 °C

B.2 Materials selection: liquid epoxy / liquid polyurethane

With all coating systems, there are trade-offs in application and performance characteristics. Through improvements in chemistry, rehabilitation materials for pipeline – coating replacement have properties approaching that of premium-grade, plant applied FBE materials (see table B2). Selection depends on balancing factors like requirements for backfill time, material cost, and performance. Typically, epoxy is the coating of choice, unless the temperature at the time of application is too low or the time to backfill is critical.

TABLE B2: REHABILITATION COATINGS NOW HAVE PERFORMANCE PROPERTIES APPROACHING THOSE OF PREMIUM – GRADE FBE MATERIALS

Test /Property	ACS-2	ACS-8	ACS-9
Cathodic disbondment resistance – 14 days, 65° C, 1.5 V, mm radius	4.3	6.5	9
Impact – ASTM G-14, 16mm tup, 23±2° C (Jules)	2.4	2.8	3.2
Material cost per unit volume	X	3.1 X	2.6 X
Moisture vapor transmission G/ (mil) (square inches) (24 h)	1.8	1.8	4.3
Time to backfill at 23±2° C (minutes)	-	160	30

Annex C **(TP 206)**

ALEYSKA SHEAR STRESS TEST

4.1.1 The purpose of this test is to determine if the sleeve has adequate resistance to shear stresses that might result from friction between the coating and the ground during pipe movement . The normal and shear loads simulate the forces experienced actual operation due to back-fill and to pipe movement .

4.1.2 The test set-up is shown schematically in figure 1 .

4.1.3 A strip cut from a heat shrink sleeve is bonded to a degreased steel plate by applying a load of approximately 34 kPa (5 psi) and placing in an oven at the vendor-recommended application temperature (typically about 150⁰C) for a minimum of 4 hours . After removal from the oven , the joint shall remain at room temperature for one day before testing . The 34 kPa load shall remain on the test joint during cool down . The bonded strip of heat shrink sleeve shall be trimmed to a final size of 15.2 cm (6.0 inch) long by 3.1 cm (1.2 inch) wide . The test fixture , the coated plate , and the weights are then conditioned in an oven at the test temperature for 5 hours prior to testing .

4.1.4 The coating plate is fixed in place on the text fixture . The 18.6 kg normal load and the 6.8 kg shear load are applied (Note: the 18.6 kg weight has coarse sandpaper (120 grit) bonded to it , rough side exposed , so that is will not slip on the coating during the test) .

4.1.5 A dial indicator , reading to the nearest 0.025 mm (0.001 inch) is set in contact with the upper , moveable weight and zeroed . Readings are taken after 18 hours , 25 hours , and 50 hours and reported to the nearest 0.025 mm .

4.1.6 The test report shall include the dimensions of the coating strip , weights used , test temperature (including tolerance) , surface preparation of the steel panels , amount of movement after the time intervals given in paragraph 4.1.5 , and the time to complete failure (if complete failure occurs within the 50 hour test period) .

Figure 1 – Test setup for TP-206 – Alyeska Shear Stress test

