

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه شاهرود

دانشکده مکانیک

گروه تبدیل انرژی

پایان نامه کارشناسی ارشد

طراحی دبی سنج جرمی حرارتی از نوع لوله موئین برای اندازه گیری دبی پامین گاز طبیعی و تحلیل آن بانرم افزار فلوئنت

سلمان پرویزی

استاد راهنما:

دکتر محمود فرزانه کرد

دکتر علی جباری مقدم

بسم ۹۳



مدیریت تحصیلات تکمیلی
فرم شماره (۶)

باسمه تعالی

شماره:
تاریخ:
ویرایش:

فرم صورت جلسه دفاع از پایان نامه تحصیلی دوره کارشناسی ارشد

با تأییدات خداوند متعال و با استعانت از حضرت ولی عصر (عج) نتیجه ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد خانم / آقای سامان پرویزی رشته مکانیک گرایش تبدیل انرژی تحت عنوان طراحی دبی سنج جرمی حرارتی از نوع لوله موئین برای اندازه‌گیری دبی پایین گاز طبیعی و تحلیل آن با نرم افزار فلونت که در تاریخ ۹۳/۱۱/۲۷ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می گردد:

قبول (با درجه : خوب - امتیاز ۱۶) دفاع مجدد مردود

۱- عالی (۲۰-۱۹)

۲- بسیار خوب (۱۸/۹۹-۱۸)

۳- خوب (۱۶-۱۷/۹۹)

۴- قابل قبول (۱۴-۱۵/۹۹)

۵- نمره کمتر از ۱۴ غیر قابل قبول

عضو هیأت داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبه علمی	امضاء
۱- استاد راهنما	محمود خزان		
۲- استاد مکلور راهنما	علی حبیبی صفری		
۳- نماینده شورای تحصیلات تکمیلی	احمد دودی	جرمی	
۴- استاد ممتحن	محمد کبیر	استاد	
۵- استاد ممتحن	علیرضا خاتری	استاد	

رئیس دانشکده : امضاء



تقدیم به پدر و مادرم

خدای را بستی شاگردم که از روی کرم، پرومادی فداکار نسیم ساخته تا در سایه درخت پر بار وجودشان بیسایم و از ریشه آنها شاخ و برگ کیرم و از سایه وجودشان در راه کسب علم و دانش تلاش نمایم. والدینی که بودنشان تاج افتخاری است بر سرم و نشان دلیلی است بر بودنم، چرا که این دو وجود، پس از پروردگار، مایه هستی ام بوده اند دستم را گرفتند و راه رفتن را در این وادی زندگی پر از فراز و نشیب آموختند. آموزگاری که برایم زندگی و انسان بودن را معنا کردند...

سپاس بیکران بر وجود استاد فاضل و اندیشمندم جناب آقای دکتر فرزانه‌گرد
به عنوان استاد راهنما که در تمام مراحل پایان‌نامه پیوسته راهنمای من بودند و
همواره نگارنده را مانند پدری مهربان و دلسوز مورد لطف و محبت خود قرار داده-
اند.

با تشکر و سپاس‌گذاری از زحمات بی‌دریغ استاد عالی‌قدر جناب آقای دکتر
جباری‌مقدم که در سایه لطف و مساعدت ایشان این پایان‌نامه به سرانجام رسید.

تعهد نامه

اینجانب سامان پرویزی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی مکانیک- گرایش تبدیل انرژی دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه با عنوان " طراحی دبی سنج جرمی حرارتی از نوع لوله موین برای اندازه گیری دبی پایین گاز طبیعی و تحلیل آن با نرم افزار فلوئنت "

تحت راهنمایی متعهد می شوم:

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

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

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

چکیده

اندازه‌گیری دقیق گاز طبیعی همواره مساله مهمی به ویژه در سطح مصارف خانگی بوده است. از سوی دیگر جریان‌سنج‌های جرمی حرارتی به طور گسترده در صنایعی همانند صنایع نیمه‌هادی‌ها و فرایندهای شیمیایی مورد استفاده قرار می‌گیرد. یکی از انواع جریان‌سنج‌های جرمی حرارتی، جریان‌سنج جرمی حرارتی لوله مویین می‌باشد که برای اندازه‌گیری جریان‌های پایین استفاده می‌شود. در این مطالعه ابتدا شناخت پارامترهای مهم و تاثیر هر یک از این پارامترها در طراحی جریان‌سنج حرارتی لوله مویین و سپس استفاده این نوع جریان‌سنج‌ها برای اندازه‌گیری گاز طبیعی برای مصارف خانگی که جریان پایینی دارند بررسی شده است. برای این کار مدل‌های دو بعدی و سه‌بعدی یک جریان‌سنج جرمی حرارتی لوله مویین شبیه‌سازی و انتقال حرارت در لوله حسگر آن به صورت عددی ابتدا برای گاز متان به عنوان گاز طبیعی و سپس برای ترکیبات مختلف گاز طبیعی تحلیل شده است. با در نظر گرفتن پارامترهای تاثیرگذار عدم قطعیت جریان‌سنج محاسبه شده است. برای اعتبارسنجی روش حل عددی به دلیل عدم وجود داده‌های آزمایشگاهی برای متان از نیتروژن استفاده شده که تطابق قابل قبولی در نتایج شبیه‌سازی داده‌های آزمایشگاهی برداشت شده از مراجع وجود داشته است.

کلمات کلیدی: اندازه‌گیری جریان، گاز طبیعی، جریان‌سنج جرمی حرارتی، لوله مویین

فهرست مقاله‌های مستخرج از پایان‌نامه

- ❖ M. Farzaneh-Gord, S. Parvizi, A. Arabkoohsar, L. Machado, and R. N. N. Koury, "Potential use of capillary tube thermal mass flow meters to measure residential natural gas consumption," *J. Nat. Gas Sci. Eng.*, vol. 22, pp. 540–550, Jan. 2015.

❖ پرویزی س، فرزانه‌گرد م، (۱۳۹۴)، "تاثیر توان گرمکن و قطر لوله حسگر بر عملکرد دبی‌سنج حرارتی در دبی‌های پایین" بیست و سومین همایش بین‌المللی مهندسان مکانیک، تهران

❖ پرویزی س، فرزانه‌گرد م، (۱۳۹۳)، "بررسی اثر فشار و مکان حسگر بر عملکرد دبی‌سنج‌های جرمی حرارتی لوله موئین" کنفرانس سراسری توسعه محوری مهندسی عمران، معماری، برق و مکانیک ایران، گرگان

فهرست مطالب

۱.....	۱ فصل اول : مقدمه
۲.....	۱-۱ مروری بر مطالب گذشته
۳.....	۲-۱ اهداف پایان نامه
۴.....	۲ فصل دوم: معرفی انواع جریان سنج
۵.....	۱-۲ مقدمه
۶.....	۲-۲ انواع جریان سنج
۶.....	۱-۲-۲ جریان سنج های حجمی
۶.....	۱-۱-۲-۲ جریان سنج های اختلاف فشاری
۷.....	۱-۱-۱-۲-۲ جریان سنج روزنه ای
۸.....	۲-۱-۱-۲-۲ جریان سنج لوله ونتوری
۸.....	۳-۱-۱-۲-۲ جریان سنج نازل جریان
۹.....	۴-۱-۱-۲-۲ جریان سنج سطح متغیر
۱۰.....	۲-۱-۲-۲ جریان سنج های سرعتی
۱۰.....	۱-۲-۱-۲-۲ لوله پیتوت
۱۱.....	۲-۲-۱-۲-۲ جریان سنج توربینی
۱۲.....	۳-۲-۱-۲-۲ جریان سنج گردابه ای

- ۱۲..... جریانسنج الکترومغناطیس ۴-۲-۱-۲-۲
- ۱۳..... جریان سنجهای جابه جایی مثبت ۳-۱-۲-۲
- ۱۴..... جریان سنجهای جرمی ۲-۲-۲
- ۱۴..... جریان سنج کوریولیس ۱-۲-۲-۲
- ۱۵..... جریان سنج حرارتی ۲-۲-۲-۲
- ۱۵..... انواع جریان سنج جرمی حرارتی از نظر نحوه انتقال حرارت ۳-۲
- ۱۵..... جریان سنج حرارتی لوله مویین ۱-۳-۲
- ۱۵..... جریان سنج حرارتی شناور ۲-۳-۲
- ۱۵..... انواع جریان سنج جرمی حرارتی از نظر نحوه محاسبه جریان ۴-۲
- ۱۶..... اختلاف دما ثابت ۱-۴-۲
- ۱۶..... جریان ثابت ۲-۴-۲
- ۱۶..... مزیت جریان سنج جرمی حرارتی ۵-۲
- ۳ فصل سوم : اصول کارکرد و معادلات حاکم بر جریان سنج های حرارتی لوله مویین..... ۱۷**
- ۱۸..... مقدمه ۱-۳
- ۱۸..... اجزای اصلی جریان سنج لوله مویین ۲-۳
- ۱۸..... بدنه اصلی ۱-۲-۳
- ۱۸..... گذرگاه فرعی ۲-۲-۳
- ۱۹..... لوله حسگر ۳-۲-۳

۲۰	.....	۳-۳	مشخصات عملکرد
۲۰	.....	۱-۳-۳	بازه جریان
۲۰	.....	۲-۳-۳	دقت
۲۱	.....	۳-۳-۳	بازه پذیری
۲۲	.....	۴-۳-۳	عدم قطعیت اندازه گیری در تجهیزات
۲۲	.....	۴-۳	اصول عملکرد
۲۴	.....	۱-۴-۳	مشخصات جریان در لوله حسگر
۲۵	.....	۲-۴-۳	نرخ ظرفیت گرمایی
۲۶	.....	۵-۳	محاسبه جریان عبوری از لوله حسگر
۲۸	.....	۶-۳	حساسیت
۲۹	.....	۷-۳	معادلات حاکم
۲۹	.....	۱-۷-۳	معادلات دوبعدی
۳۰	.....	۲-۷-۳	معادلات سه بعدی
۳۱	.....	۴	فصل چهارم: مدلسازی دوبعدی و سه بعدی جریان سنج حرارتی لوله موئین
۳۲	.....	۱-۴	مدل دوبعدی
۳۲	.....	۲-۴	مدل سه بعدی
۳۳	.....	۳-۴	تولید شبکه محاسباتی
۳۴	.....	۴-۴	بررسی استقلال از شبکه

- ۳۶ ۵-۴ مدل پیشنهادی برای حل مساله
- ۳۷ ۱-۵-۴ انتخاب حلگر و مدل فیزیکی
- ۳۷ ۲-۵-۴ مواد
- ۳۸ ۳-۵-۴ شرایط عملیاتی
- ۳۸ ۴-۵-۴ شرایط مرزی
- ۴۱ ۵ فصل پنجم: اعتبارسنجی حل عددی
- ۴۲ ۱-۵ مقدمه
- ۴۲ ۲-۵ اعتبارسنجی شبیه سازی با داده های آزمایشگاهی
- ۴۴ ۳-۵ اعتبارسنجی شبیه سازی عددی با حل تحلیلی یک بعدی
- ۴۷ ۶ فصل ششم: نتایج مدلسازی دوبعدی
- ۴۸ ۱-۶ مقدمه
- ۴۸ ۲-۶ بررسی شرایط جریان
- ۴۹ ۳-۶ تاثیر قطر لوله حسگر
- ۵۱ ۴-۶ تاثیر طول لوله حسگر
- ۵۱ ۵-۶ تاثیر مکان حسگر
- ۵۲ ۶-۶ انتخاب هندسه مناسب
- ۵۲ ۱-۶-۶ به دست آوردن رابطه خطی جریان جرمی
- ۵۳ ۲-۶-۶ محاسبه خطای معادله برازش شده با مقدار شبیه سازی

۳-۶-۶ محاسبه عدم قطعیت در اندازه گیری ۵۴

۷ فصل هفتم : نتایج مدل سازی سه بعدی ۵۷

۱-۷ مقدمه ۵۸

۲-۷ بررسی شرایط جریان ۵۸

۳-۷ بررسی تاثیر قطر لوله حسگر ۵۹

۴-۷ تاثیر طول لوله حسگر ۶۱

۵-۷ انتخاب هندسه مناسب ۶۱

۱-۵-۷ به دست آوردن معادله خطی جریان جرمی ۶۲

۲-۵-۷ محاسبه خطای معادله خطی برازش شده با مقدار شبیه سازی ۶۳

۳-۵-۷ محاسبه عدم قطعیت در اندازه گیری ۶۴

۸ فصل هشتم: بررسی تاثیر ترکیب گازهای متفاوت و فشار کاری در اندازه گیری جریان جرمی ۶۵

۱-۸ مقدمه ۶۶

۲-۸ مقایسه اندازه گیری جریان برای گازهای نیتروژن، متان و آرگون ۶۶

۳-۸ استفاده از جریان سنج جرمی برای گازهای طبیعی با ترکیبات متفاوت ۶۸

۴-۸ تاثیر فشار کاری ۷۱

۹ فصل نهم : نتیجه گیری و پیشنهادات ۷۳

۱-۹ نتیجه گیری ۷۴

۲-۹ پیشنهادات ۷۵

فهرست اشکال

- شکل ۱-۲: شماتیک جریان سنج روزنه ای ۷
- شکل ۲-۲: شماتیک جریان سنج لوله ونتوری ۸
- شکل ۳-۲: شماتیک جریان سنج نازل جریان ۹
- شکل ۴-۲: شماتیک جریان سنج سطح متغیر ۱۰
- شکل ۵-۲: شماتیک جریان سنج لوله پیتوت ۱۱
- شکل ۶-۲: شماتیک جریان سنج توربینی ۱۱
- شکل ۷-۲: شماتیک جریان سنج گردابه ای ۱۲
- شکل ۸-۲: شماتیک جریانسنج الکترومغناطیس ۱۳
- شکل ۹-۲: شماتیک جریان سنج جابه جایی مثبت ۱۳
- شکل ۱۰-۲: شماتیک جریان سنج کوریولیس ۱۴
- شکل ۱-۳: شماتیک جریان سنج حرارتی لوله مویین ۱۸
- شکل ۲-۳: حجم کنترل دیفرانسیلی جریان گاز در لوله حسگر ۲۵
- شکل ۳-۳: شماتیک لوله حسگر و تعریف اختلاف دمای بین دو حسگر ۲۷
- شکل ۴-۳: تعریف بازه کاری جریان سنج حرارتی لوله مویین ۲۸
- شکل ۵-۳: تعریف حساسیت جریان سنج ۲۹
- شکل ۱-۴: مدل دوبعدی هندسه جریان سنج حرارتی لوله مویین ۳۲
- شکل ۲-۴: مدل سه بعدی جریان سنج حرارتی لوله مویین ۳۳
- شکل ۳-۴: نمونه مش بندی دو بعدی لوله حسگر ۳۴
- شکل ۴-۴: نمونه مش بندی سه بعدی لوله حسگر ۳۴
- شکل ۵-۴: نمودار استقلال از شبکه برای نمونه دوبعدی جریان سنج ۳۵
- شکل ۶-۴: نمودار استقلال از شبکه برای مدل سه بعدی جریان سنج ۳۶
- شکل ۱-۵: مدل آزمایشگاهی انجام شده توسط کیم و همکاران ۴۲

- شکل ۲-۵: مقایسه توزیع دما در طول لوله حسگر برای داده های آزمایشگاهی و حل عددی..... ۴۴
- شکل ۳-۵: مقایسه شبیه سازی عددی و حل تحلیلی برای نیتروژن ۴۵
- شکل ۱-۶: سرعت سیال در مقطع های مختلف لوله حسگر در طول لوله ۴۸
- شکل ۲-۶: مشخصات لوله حسگر $D_{in} = 1mm, D_{out} = 1.2mm, L = 37.5mm, L_s = 20mm$ (الف) توزیع دما در طول لوله حسگر (ب) نمودار اختلاف دمای دو حسگر بر حسب جریان ورودی به جریان سنج..... ۴۹
- شکل ۳-۶: مشخصات لوله حسگر $D_{in} = 1.4mm, D_{out} = 1.6mm, L = 37.5mm, L_s = 20mm$ (الف) توزیع دما در طول لوله حسگر (ب) نمودار اختلاف دمای دو حسگر بر حسب جریان ورودی به جریان سنج ۵۰
- شکل ۴-۶: مشخصات لوله حسگر $D_{in} = 1.8mm, D_{out} = 2mm, L = 37.5mm, L_s = 20mm$ (الف) توزیع دما در طول لوله حسگر (ب) نمودار اختلاف دمای دو حسگر بر حسب جریان ورودی به جریان سنج..... ۵۰
- شکل ۵-۶: مقایسه بازه خطی و حساسیت جریان سنج برای قطرهای متفاوت لوله حسگر $L = 37.5mm, L_s = 20mm$ ۵۰
- شکل ۶-۶: مقایسه نمودار اختلاف دمای دو حسگر بر حسب جریان برای طول های مختلف لوله حسگر..... ۵۱
- شکل ۷-۶: بررسی اثر مکان حسگر در لوله حسگر با $L = 37.5mm$ ۵۲
- شکل ۸-۶: بازه خطی برای طول و قطر انتخاب شده برای لوله حسگر ۵۳
- شکل ۹-۶: درصد خطای ایجاد شده به دلیل تخمین نمودار با معادله خط ۵۴
- شکل ۱-۷: سرعت سیال در دو مقطع مختلف لوله حسگر بر حسب طول لوله ۵۸
- شکل ۲-۷: مشخصات لوله حسگر $D_{in} = 1mm, D_{out} = 1.2mm, L = 37.5mm, L_s = 20mm$ (الف) توزیع دما در طول لوله حسگر (ب) نمودار اختلاف دمای دو حسگر بر حسب جریان ورودی به جریان سنج..... ۵۹
- شکل ۳-۷: مشخصات لوله حسگر $D_{in} = 1.4mm, D_{out} = 1.6mm, L = 37.5mm, L_s = 20mm$ (الف) توزیع دما در طول لوله حسگر (ب) نمودار اختلاف دمای دو حسگر بر حسب جریان ورودی به جریان سنج ۵۹
- شکل ۴-۷: مشخصات لوله حسگر $D_{in} = 1.8mm, D_{out} = 2mm, L = 37.5mm, L_s = 20mm$ (الف) توزیع دما در طول لوله حسگر (ب) نمودار اختلاف دمای دو حسگر بر حسب جریان ورودی به جریان سنج..... ۶۰
- شکل ۵-۷: مقایسه بازه خطی و حساسیت جریان سنج برای قطرهای متفاوت لوله حسگر $L = 37.5mm, L_s = 20mm$ ۶۰

- شکل ۶-۷ : مقایسه نمودار اختلاف دمای دو حسگر بر حسب جریان برای طول های مختلف لوله حسگر..... ۶۱
- شکل ۷-۷ : بازه خطی برای هندسه انتخاب شده ۶۲
- شکل ۸-۷ : درصد خطای ایجاد شده به دلیل تخمین نمودار با معادله خط ۶۳
- شکل ۱-۸ : نمودار اختلاف دمای دو حسگر بر حسب جریان برای گازهای متان، نیتروژن و آرگون ۶۶
- شکل ۲-۸ : نمودار اختلاف دمای دو حسگر بر حسب نرخ ظرفیت گرمایی ۶۷
- شکل ۳-۸ : نمودار اختلاف دمای دو حسگر بر حسب نرخ ظرفیت گرمایی برای سه ترکیب گاز طبیعی متفاوت ... ۷۰
- شکل ۴-۸ : درصد خطای ناشی از استفاده از ظرفیت گرمایی ویژه میانگین برای گازهای طبیعی مختلف ۷۱
- شکل ۵-۸ : نمودار اختلاف دمای دو حسگر بر حسب نرخ ظرفیت گرمایی برای فشارهای کاری مختلف ۷۲

فهرست جداول

- جدول ۱-۳ : بازه جریان سنجهای حرارتی لوله موین ۲۰
- جدول ۱-۴ : حلگر و مدل فیزیکی انتخاب شده ۳۷
- جدول ۲-۴: مشخصات مواد استفاده شده در هندسه مدل شده ۳۸
- جدول ۳-۴: شرایط مرزی اعمال شده بر مساله ۳۹
- جدول ۱-۵: مشخصات هندسی مدل آزمایشگاهی ۴۳
- جدول ۱-۸ : مشخصات فیزیکی گازهای متان، نیتروژن و آرگون در $P = 1atm, T = 25^{\circ}C$ ۶۷
- جدول ۲-۸ : درصد مولی ترکیبات سه نمونه از گاز طبیعی ۶۹
- جدول ۳-۸ : ظرفیت گرمایی ویژه گازهای طبیعی مختلف در $P = 1atm, T = 25^{\circ}C$ ۷۰

فهرست علائم

(m^2)	مساحت سطح مقطع لوله حسگر	A
	ضریب ثابت	C
$(kJ/kg-K)$	ظرفیت گرمایی ویژه در فشار ثابت	Cp
(m)	قطر داخلی لوله حسگر	D_{in}
(m)	قطر خارجی لوله حسگر	D_{out}
	ضریب عدم قطعیت	F
(m/s^2)	شتاب جاذبه	G
$(kJ/m-K)$	ضریب هدایت حرارتی	K
(m)	نصف طول لوله حسگر	L
(m)	مکان حسگر بر روی لوله حسگر	Ls
(kg/h)	جریان جرمی	\dot{m}
(m^3/s)	جریان حجمی	Q
	تعداد لوله‌های آرام‌ساز جریان	N
(kPa)	فشار	P
(kPa)	افت فشار	ΔP
(w/m^2)	شار حرارتی	Q
$(K.h/kg)$	حساسیت جریان سنج	S
(K)	اختلاف دمای بین دو حسگر	ΔT
(K)	دما	T
(K)	دمای محیط	T_{amb}
علائم یونانی		
$(Pa.s)$	لزجت	μ
(kg/m^3)	چگالی	ρ
(m^2/s)	لزجت سینماتیکی	ν

فصل اول

مقدمه

۱-۱ مروری بر مطالب گذشته

در مبحث اندازه‌گیری جریان دستگاه‌ها و روش‌های متعدد و بسیاری وجود دارد که بسته به فرایند خصوصیات سیال مورد استفاده، فشار و به خصوص دقت مورد نیاز یکی از آن‌ها را می‌توان جهت اندازه‌گیری استفاده نمود. رایج‌ترین جریان‌سنج مورد استفاده در سطح مصارف خانگی جریان‌سنج‌های دیافراگمی است. فیکو [۱] با استفاده از مطالعات آزمایشگاهی وسیعی نشان می‌دهد که به دلیل مدت زمان استفاده، شرایط نصب و تکنولوژی ساخت این نوع جریان‌سنج‌ها در گذر زمان خطای زیادی ایجاد می‌کند. به همین دلیل تمایل به استفاده از سیستم‌های اندازه‌گیری با کارایی بهتر می‌باشد. در سال‌های اخیر بسیاری از وسایل اندازه‌گیری مانند جریان‌های فراصوت، صفحه روزنه‌ای و توربینی برای اندازه‌گیری جریان گاز طبیعی استفاده شده است [۲].

یکی دیگر از وسایل اندازه‌گیری که به صورت وسیعی در اندازه‌گیری جریان استفاده می‌شود جریان‌سنج جرمی حرارتی است. کومیا و همکاران [۳] حل یک بعدی برای انتقال حرارت لوله حسگر جریان‌سنج جرمی حرارتی لوله موپین ارائه کردند. در این مطالعه آن‌ها از تغییرات دما در جهت شعاعی صرف‌نظر کرده و شرایط حرارتی سیال را ثابت فرض کردند. هینکل و مارینو [۴] از یک مدل دو بعدی برای شبیه‌سازی پدیده انتقال حرارت در لوله حسگر استفاده کردند. آن‌ها فرض کردند که جریان در لوله حسگر از نظر حرارتی و هیدرودینامیکی کاملاً توسعه یافته است. کیم و همکاران [۵] برهم‌کنش انتقال حرارت بین دیواره و سیال در لوله حسگر را از نظر عددی و آزمایشگاهی مطالعه کردند. آن‌ها همچنین انتقال حرارت پایا و گذرا را در لوله حسگر و همچنین حساسیت جریان‌سنج را بررسی کردند [۶-۸].

ویزواتان و همکاران [۹] مدلی از جریان‌سنج‌های جرمی حرارتی را برای فشارهای بالا (۱۸bar و ۱۹.۵bar) برای اندازه‌گیری جریان هوا طراحی کردند. الگ ساژین برای اندازه‌گیری جریان هوا در خودرو جریان‌سنج جرمی حرارتی را طراحی و حل تحلیلی حسگرها را به دست آورد [۱۰-۱۱]. بیکر و گیمسون [۱۲] تاثیرات

روش ساخت بر دقت جریان‌سنج‌های جرمی حرارتی شناور را بررسی کردند. بارتوس [۱۳] گزارش کرد که اندازه‌گیری دقیق جریان بستگی به غیر مغشوش بودن جریان دارد.

۲-۱ اهداف پایان‌نامه

در این مطالعه پارامترهای مهم جریان‌سنج‌های حرارتی لوله موین شناسایی و تاثیر این پارامترها بر اندازه‌گیری جریان جرمی در حالت دوبعدی و سه‌بعدی بررسی شده است. همچنین امکان‌سنجی استفاده از این نوع جریان‌سنج‌ها در صنعت گاز مورد مطالعه قرار گرفته است.

در فصل اول به تاریخچه کارهای انجام‌شده و اهداف پایان‌نامه پرداخته شده است. در فصل دوم انواع جریان‌سنج‌ها و مزایای جریان‌سنج‌های جرمی مورد بررسی قرار گرفته است. فصل سوم اصول کارکرد جریان‌سنج‌های جرمی حرارتی و معادلات حاکم بر این نوع جریان‌سنج‌ها و فصل چهارم مدل‌سازی و نوع شبکه‌بندی مساله را بیان می‌کند. در فصل پنجم و ششم با حل دوبعدی و سه‌بعدی اثر پارامترهای مهم در طراحی جریان‌سنج‌های جرمی حرارتی بررسی شده و در فصل هفتم امکان استفاده از جریان‌سنج طراحی شده برای گازهای دیگر مورد مطالعه قرار گرفته است. فصل هشتم نیز به نتیجه‌گیری و ارائه پیشنهادات می‌پردازد.

فصل دوم

معرفی انواع جریان سنج

در بسیاری از صنایع جریان گرمی پارامتر مطلوب به جای جریان حجمی می‌باشد. دو شیوه برای اندازه‌گیری جریان گرمی وجود دارد. در روش اول جریان حجمی اندازه‌گیری و نتیجه در چکالی ضرب می‌شود. جریان‌سنج‌هایی که با این روش کار می‌کنند ابزار اضافی مانند حسگر فشار و دما لازم دارند تا جریان گرمی را نتیجه دهند. برخلاف این مدل جریان‌سنج‌ها، جریان‌سنج‌های نوع دوم جریان گرمی را مستقیم اندازه‌گیری می‌کنند که نسبت به تغییرات ورودی فشار و دما بهتر عمل می‌کنند. جریان‌سنج‌های گرمی حرارتی به این دسته تعلق دارند.

اندازه‌گیری دقیق گاز کار دشواری است دلیل اصلی آن تراکم‌پذیر بودن سیال است. یعنی حجم جرم ثابتی از سیال به دما و فشار آن بستگی دارد. روش‌های مختلفی برای اندازه‌گیری جریان حجمی واقعی وجود دارد اما جریان اندازه‌گیری شده با تغییرات دما و فشار تغییر می‌کند. به همین دلیل در تمام فرایندهای صنعتی تمایل به اندازه‌گیری جریان گرمی به جای جریان حجمی است. تکنولوژی جریان‌سنج گرمی حرارتی روشی برای اندازه‌گیری گاز است که برای تغییرات دما و فشار نیاز به تصحیح ندارد.

در سالهای اخیر از جریان‌سنج‌های مختلفی مانند فراصوت^۱، روزه‌ای و توربینی برای اندازه‌گیری گاز طبیعی مورد استفاده قرار گرفته است [۱۴]. این نوع جریان‌سنج‌ها همگی جریان حجمی گاز طبیعی را اندازه‌گیری می‌گیرند. جریان گرمی می‌تواند مستقل از تاثیرات فشار و دما اندازه‌گیری شود. یکی از وسایل اندازه‌گیری مستقیم جریان گرمی جریان‌سنج‌های گرمی حرارتی می‌باشد [۲]. جریان‌سنج‌های دیافراگمی که یکی از انواع جریان‌سنج‌های جابه‌جایی مثبت می‌باشد رایج‌ترین نوع وسایل اندازه‌گیری در صنعت گاز به‌ویژه مصارف خانگی است. جریان‌سنج‌های دیافراگمی جریان حجمی گاز طبیعی را با شمارش تعداد دفعات پر و خالی شدن حجم ثابتی اندازه‌گیری می‌کند [۱]. بر خلاف مزیت‌های این جریان‌سنج‌ها همچون

¹ UltraSonic

قیمت پایین محدودیت‌های نظیر قطعات متحرک این نوع جریان‌سنج‌ها را نیازمند تعمیرات دوره‌ای می‌کند. اما عیب اصلی جریان‌سنج‌های دیافراگمی این است که در جریان‌های پایین که در مصارف خانگی بسیار رایج می‌باشد خطا بسیار زیاد می‌باشد به علاوه اینکه این نوع جریان‌سنج‌ها جریان حجمی را اندازه می‌گیرند. این معایب باعث می‌شود سالانه مقدار زیادی گاز طبیعی در شبکه توزیع هدر رود [۱۵]، [۱۶]. به عنوان مثال این مقدار در ایران در سال ۲۰۱۳، ده میلیارد متر مکعب بوده است [۱۷].

۲-۲ انواع جریان‌سنج

جریان‌سنج‌ها بر اساس نوع جریان اندازه‌گیری شده به دو دسته کلی جریان‌سنج‌های حجمی و جریان‌سنج‌های جرمی تقسیم‌بندی می‌شوند. همان‌گونه که از نام آن‌ها مشخص است جریان‌سنج‌های حجمی جریان حجمی سیال و جریان‌سنج‌های جرمی جریان جرمی سیال را اندازه‌گیری می‌کنند [۱۸].

۱-۲-۲ جریان‌سنج‌های حجمی

حجم سیال گذرنده از یک مقطع در واحد زمان را جریان حجمی گویند و با Q نمایش می‌دهند. جریان حجمی کمیتی اسکالر است و از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$Q = \int v dA \quad (1-2)$$

که در آن A سطح مقطع جریان و V سرعت جریان در این مقطع می‌باشد. در جریان‌سنج‌های حجمی سرعت سیال به صورت مستقیم یا غیرمستقیم اندازه‌گیری و جریان حجمی محاسبه می‌شود. در زیر نمونه‌هایی از جریان‌سنج‌های حجمی آورده شده است.

۱-۱-۲-۲ جریان‌سنج‌های اختلاف فشاری^۱

جریان‌سنج‌های اختلاف فشاری رایج‌ترین نوع وسایل اندازه‌گیری جریان در صنعت می‌باشند و به

¹ Differential pressure flowmeter

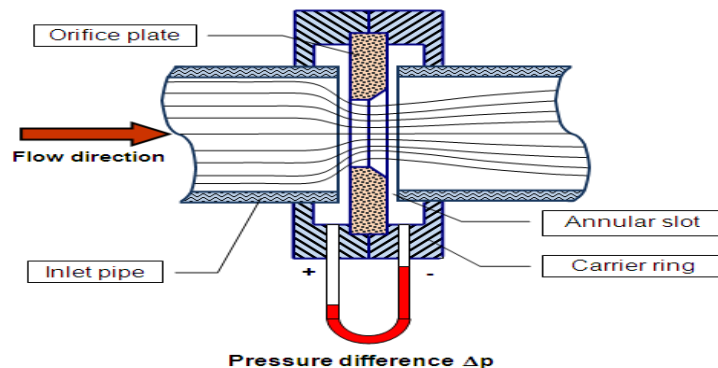
طور غیرمستقیم جریان سیال را به کمک افت فشار ایجادشده در سیال توسط یک مانع اندازه‌گیری می‌کنند. جریان‌سنج‌های اختلاف فشاری بر اساس معادله برنولی^۱ عمل می‌کنند به طوری که افت فشار تابعی از مربع سرعت سیال می‌باشد بنابراین با به‌دست آوردن سرعت سیال می‌توان جریان حجمی را به‌دست آورد. در زیر نمونه‌هایی از جریان‌سنج‌های اختلاف فشاری آورده شده است [۱۹].

$$\frac{p}{\rho} + \frac{V^2}{2} + gz = Constant \quad (2-2)$$

$$Q = c \left(\frac{\Delta p}{\rho} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3-2)$$

۱-۱-۱-۲-۲ جریان‌سنج روزنه‌ای^۲

محبوب‌ترین و متداول‌ترین جریان‌سنج اختلاف فشاری می‌باشد. اساس کار آن بدین گونه است که اختلاف فشاری که در طول این وسیله توسط یک صفحه واقع در خط فرایند ایجاد شده است اندازه‌گیری می‌شود تا جریان تعیین شود [۲۰].



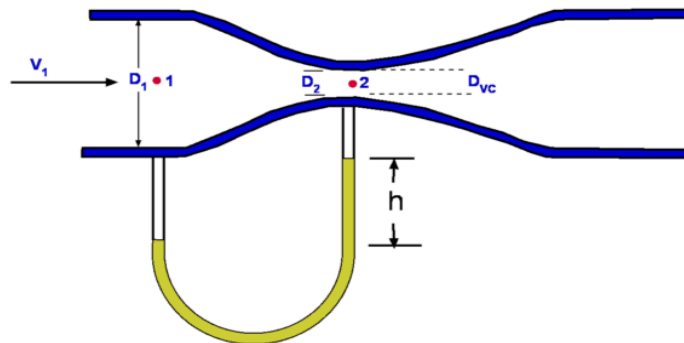
شکل ۱-۲: شماتیک جریان‌سنج روزنه‌ای

¹Bernoulli's Equation

² Orifice flowmeter

۲-۱-۱-۲-۲ جریان سنج لوله ونتوری^۱

از جریان سنج‌های لوله ونتوری در کاربردهایی که افت فشار کمتری لازم است استفاده می‌شود. در این نوع جریان سنج‌ها با کاهش سطح مقطع مسیر جریان اختلاف فشار ایجاد می‌شود. سیال پس از عبور از ناحیه باریک از مسیری برای بازیافت افت فشار ایجاد شده عبور می‌کند که تا ۸۰٪ افت فشار جبران می‌شود [۲۱].



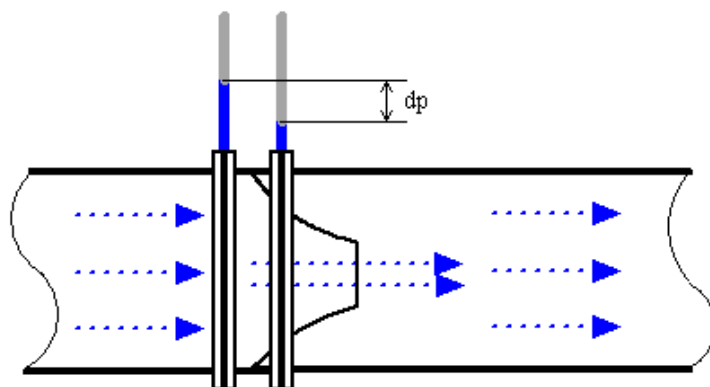
شکل ۲-۲: شماتیک جریان سنج لوله ونتوری

۳-۱-۱-۲-۲ جریان سنج نازل جریان^۲

نازل‌های جریان ممکن است به عنوان لوله ونتوری تغییر یافته تلقی شوند. دهنه نازل یک مانع بیضوی شکل در برابر جریان است و خروجی آن هیچ سطحی برای بازیافت فشار ندارد. نازل جریان برای سنجش جریان جریان‌های سرعت بالا به کار می‌رود [۲۲].

¹ Venturi tube flowmeter

² Flow nozzle flowmeter

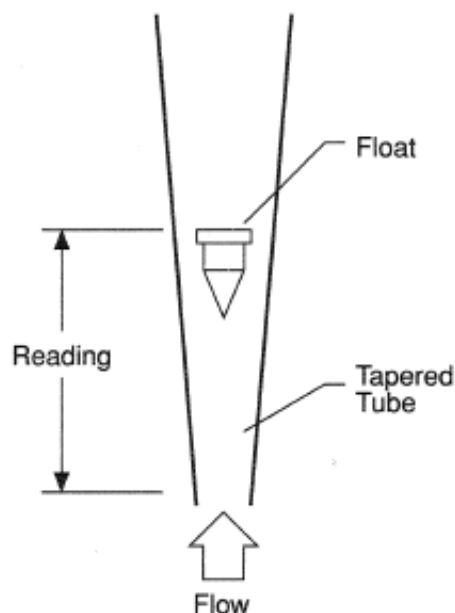


شکل ۳-۲: شماتیک جریان سنج نازل جریان

۴-۱-۱-۲-۲ جریان سنج سطح متغیر^۱

روتامترها یا جریان سنج‌های سطح متغیر عمدتاً از یک لوله شیشه‌ای که قطر آن با شیب ملایم کم می‌شود ساخته شده‌اند و به طور عمودی نصب و جریان به آن وارد می‌شود. جسم شناوری که به اندازه پایه لوله شیشه‌ای است درون آن قرار گرفته و متناسب با مقدار جریان به سمت بالا حرکت می‌کند. به دلیل آنکه قطر لوله در بالا نسبت به پایین آن بزرگتر است جسم شناور در نقطه‌ای از لوله شیشه‌ای نسبت به کف آن قرار می‌گیرد که اختلاف فشار بین سطوح بالایی و پایینی با وزن جسم شناور به تعادل برسد. در اکثر کارکردهای روتامتری مستقیماً از درجه‌بندی‌هایی که روی لوله شیشه‌ای نوشته شده‌است خوانده می‌شود.

¹ Variable area flowmeter-Rotameter



شکل ۴-۲: شماتیک جریان سنج سطح متغیر

۲-۱-۲-۲ جریان سنج‌های سرعتی^۱

در جریان سنج‌های سرعتی جریان حجمی با اندازه‌گیری سرعت در یک یا چند نقطه جریان و محاسبه سرعت بر روی سطح جریان به دست می‌آید.

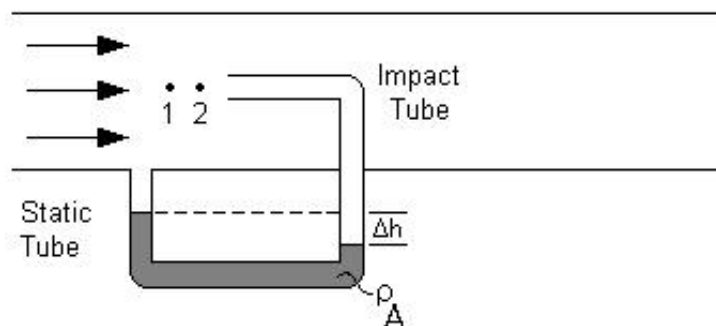
۱-۲-۱-۲-۲ لوله پیتوت^۲

لوله پیتوت سرعت سیال را با تبدیل انرژی جنبشی به انرژی پتانسیل اندازه‌گیری می‌کند. لوله پیتوت‌ها کاربرد محوری در صنایع دارند زیرا به راحتی توسط یک ماده خاصی مسدود می‌شوند و دقت آن‌ها به پروفیل سرعت که اندازه‌گیری آن مشکل است بستگی دارد. کاربرد عمده آن‌ها اندازه‌گیری سرعت جریان هوای کم‌سرعت در سیستم تهویه است و بیشتر برای

¹ Velocity flowmeter

² Pitot tube

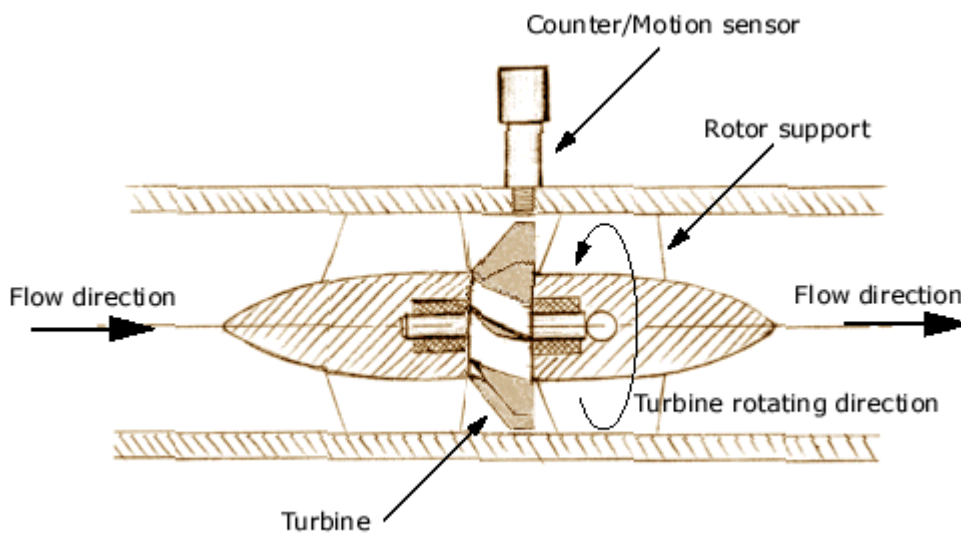
اندازه‌گیری جریان گازها به کار می‌رود [۲۳].



شکل ۲-۵: شماتیک جریان سنج لوله پیتوت

۲-۲-۱-۲-۲ جریان سنج توربینی

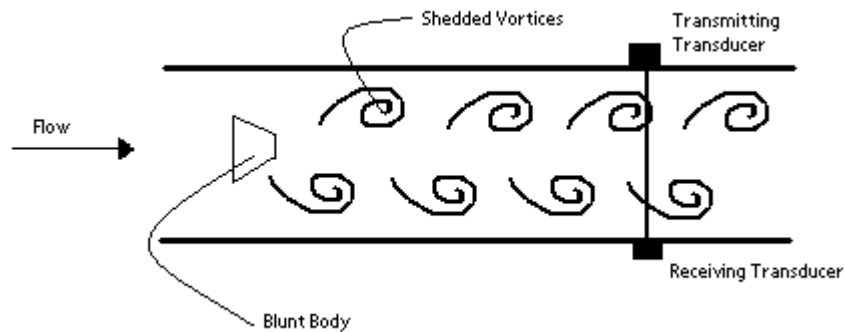
طراحی‌های مختلفی از جریان سنج توربینی وجود دارد اما همه آن‌ها بر اساس این اصل کار می‌کنند که اگر سیال از درون لوله عبور و به پره‌های توربین برخورد کند توربین شروع به چرخش می‌کند که با استفاده از میزان چرخش توربین جریان را اندازه‌گیری می‌کنند [۱۸].



شکل ۲-۶: شماتیک جریان سنج توربینی

۳-۲-۱-۲-۲ جریان سنج گردابه‌ای^۱

اساس کار جریان‌سنج‌های گردابه‌ای مبتنی بر پدیده جدایش گردابه^۲ می‌باشد. جدایش گردابه موردی است که نواحی کم‌فشار متغیر در پایین‌دست جریان ایجاد می‌شود. در این نوع جریان‌سنج‌ها به هنگام عبور سیال از یک مانع سیال شکافته می‌شود و گردابه‌های کوچکی تولید می‌شود. این گردابه‌ها باعث نوسان فشار می‌شوند و سپس توسط حسگر فشار اندازه‌گیری می‌شود. فرکانس تولید گردابه به طور مستقیم با سرعت سیال متناسب است [۱۸].



شکل ۲-۷: شماتیک جریان‌سنج گردابه‌ای

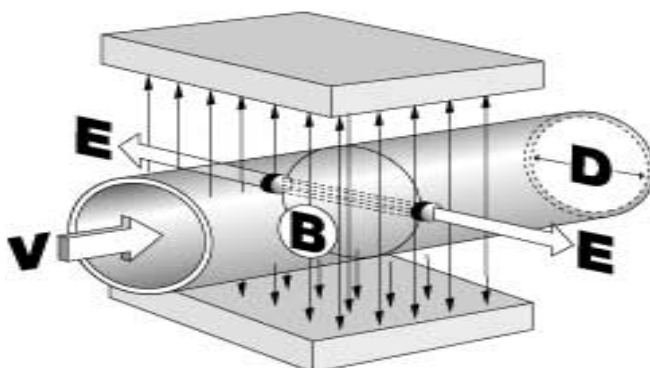
۴-۲-۱-۲-۲ جریان‌سنج الکترومغناطیس

جریان‌سنج‌های الکترومغناطیس بر اساس قانون الکترومغناطیس فارادی که بیان می‌کند با حرکت رسانا در میدان مغناطیسی ولتاژ القا می‌شود کار می‌کند. سیال به عنوان رسانا عمل می‌کند و میدان مغناطیسی بیرون از لوله جریان اعمال می‌شود. ولتاژ تولیدشده نسبت مستقیمی با جریان سیال دارد. جریان‌سنج الکترومغناطیس مصرف انرژی بالایی دارد و فقط برای سیالات رسانای الکتریکی مانند آب

^۱ Vortex flowmeter

^۲ Vortex shading

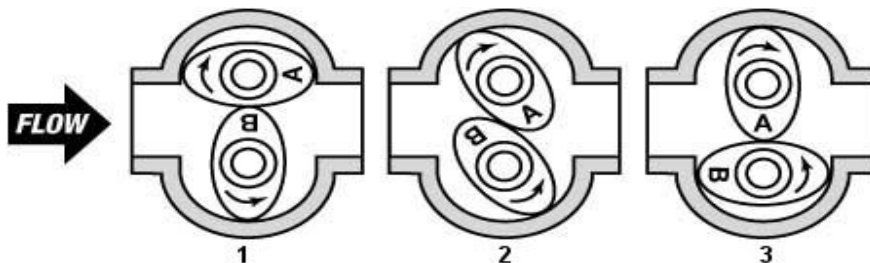
قابل استفاده می‌باشد.



شکل ۲-۸: شماتیک جریان‌سنج الکترومغناطیس

۳-۱-۲-۲ جریان‌سنج‌های جابه‌جایی مثبت^۱

اساس کار این جریان‌سنج‌ها محاسبه جریان حجمی جریان بوسیله محصور کردن مقداری از سیال در یک مخزن و سپس تخلیه آن به خروجی می‌باشد. حجم کل سیال عبوری از این وسیله در یک بازه زمانی از حجم سیال نمونه‌گیری شده و تعداد نمونه‌گیری‌ها به دست می‌آید. جریان سیال مستقیماً توسط یک ماشین محاسبه‌گر گزارش داده می‌شود. هر مخزن متحرک با سیال توسط آب‌بندهایی از مخزن بعدی جدا شده است. نیروی مورد نیاز جریان‌سنج‌های جابه‌جایی مثبت از انرژی جریان به دست می‌آید [۲۴].



شکل ۲-۹: شماتیک جریان‌سنج جابه‌جایی مثبت

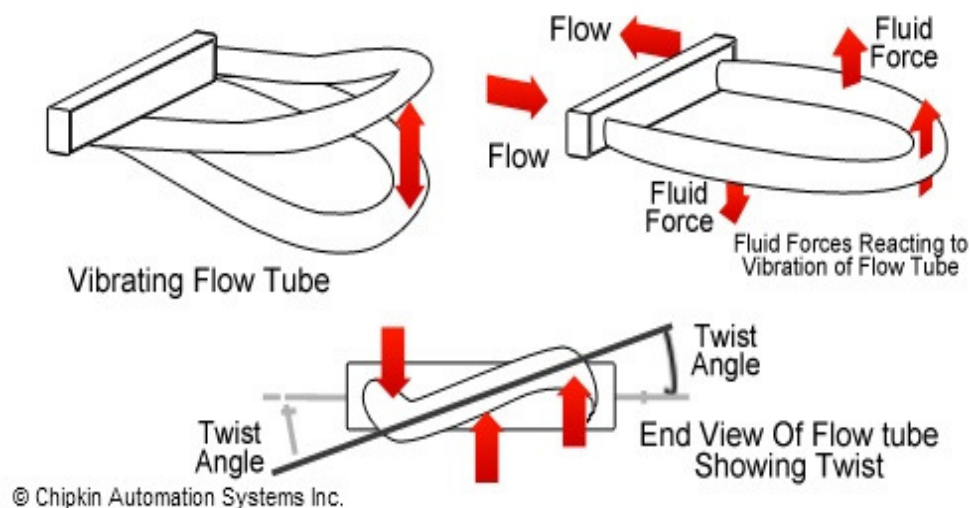
¹ Positive displacement flowmeter

۲-۲-۲ جریان سنج‌های جرمی

این نوع جریان‌سنج‌ها جریان جرمی را برخلاف جریان‌سنج‌های حجمی مستقیماً و بدون واسطه اندازه می‌گیرند.

۱-۲-۲-۲ جریان‌سنج کوریولیس^۱

این نوع جریان‌سنج‌ها از اثر کوریولیس برای اندازه‌گیری جریان جرمی استفاده می‌کنند. سیال وارد لوله U شکل شده که باعث می‌شود نوسان هماهنگ زاویه‌داری ایجاد شود. به دلیل نیروی کوریولیس مولفه ارتعاشی اضافی به لوله وارد می‌شود این مولفه اضافی می‌تواند باعث اختلاف فاز زاویه‌ای در برخی نواحی لوله شود که می‌توان با حسگرهایی آن را اندازه گرفت [۲۵].



شکل ۱۰-۲ : شماتیک جریان‌سنج کوریولیس

¹ Coriolis flowmeter

۲-۲-۲-۲ جریان سنج حرارتی

جریان سنج‌های جرمی حرارتی مستقل از چگالی، فشار و ازجت کار می‌کنند. جریان سنج‌های حرارتی بوسیله گرم‌کن و حسگرهای خود حرارت منتقل شده به سیال را اندازه‌گیری می‌کنند. این حرارت رابطه مستقیمی با جریان جرمی عبوری دارد.

۳-۲ انواع جریان سنج جرمی حرارتی از نظر نحوه انتقال حرارت

در همه جریان سنج‌های حرارتی اصول کارکرد بر اساس انتقال حرارت می‌باشد اما بر اساس نحوه این انتقال حرارت به دو دسته جریان سنج حرارتی لوله موئین و شناور تقسیم می‌شوند [۲۶].

۱-۳-۲ جریان سنج حرارتی لوله موئین

در این نوع جریان سنج حرارتی سطح گرم‌شده لوله موئینی است که انرژی را به حجم سیال منتقل می‌کند. این نوع جریان سنج‌ها برای جریان‌های پایین طراحی شده و تا جریان ۱۰۰ متر مکعب بر ساعت اندازه می‌گیرند.

۲-۳-۲ جریان سنج حرارتی شناور^۱

در این نوع جریان سنج بر خلاف مدل لوله موئین سطح گرم‌شده سطح خارجی لوله استوانه‌ای است که در لوله اصلی شناور می‌باشد و انرژی حرارتی را به لایه مرزی لزج پیرامون استوانه منتقل می‌کند. این نوع جریان سنج‌ها برای اندازه‌گیری جریان‌های بالاتر از ۱۰۰ متر مکعب بر ساعت طراحی شده است [۲۷].

۴-۲ انواع جریان سنج جرمی حرارتی از نظر نحوه محاسبه جریان

جریان سنج‌های حرارتی بر اساس روش محاسبه جریان جرمی به دو نوع جریان ثابت و اختلاف دما ثابت تقسیم می‌شوند.

^۱ Immiscible thermal mass flowmeter

۲-۴-۱ اختلاف دما ثابت^۱

در مدل اختلاف دما ثابت جریان گرمی بر اساس مقدار جریان لازم برای ثابت نگه‌داشتن یک اختلاف دمای ثابت محاسبه می‌شود. مقدار انرژی لازم برای ثابت نگه‌داشتن دما با جریان عبوری رابطه مستقیم دارد [۲۸].

۲-۴-۲ جریان ثابت^۲

در این نوع جریان سنج جریان گرمی تابعی از اختلاف دمای ایجادشده بین دو حسگر موجود در جریان سنج حرارتی در جریان ثابت می‌باشد و در بازه خاصی اختلاف دما با جریان عبوری رابطه مستقیمی دارد [۲۹].

۲-۵ مزیت جریان سنج گرمی حرارتی

در بسیاری از فرایندهای صنعتی متغیر مهم جرم است. اندازه‌گیری جریان حجمی به دلیل تغییرات دما و فشار باعث تغییر در چگالی گاز می‌شود و کمتر از اندازه‌گیری جریان گرمی قابل اعتماد است. جریان سنج‌های گرمی حرارتی قابل اعتمادترین، تکرارپذیرترین و دقیق‌ترین روش برای تحویل گاز در یک جریان خاص در یک فرایند را فراهم می‌کنند. ویژگی‌هایی شامل شامل پاسخ سریع، حساسیت استثنایی در جریان‌های پایین، افت فشار ناچیز، عدم وجود قطعات متحرک، نصب آسان، عدم نیاز به تصحیح فشار و دما و حفظ دقت در بازه وسیعی از جریان، جریان سنج گرمی حرارتی را به یک گزینه برتر نسبت به جریان سنج‌های مرسوم در بسیاری از موارد تبدیل کرده است. در سال‌های اخیر این نوع جریان سنج به مهمترین وسیله برای اندازه‌گیری گاز در فرایندهای صنعتی و به گزینه کم‌هزینه‌تری نسبت به مدل کوریولیس تبدیل شده است [۳۰].

¹ Constant temperature

² Constant current

فصل سوم

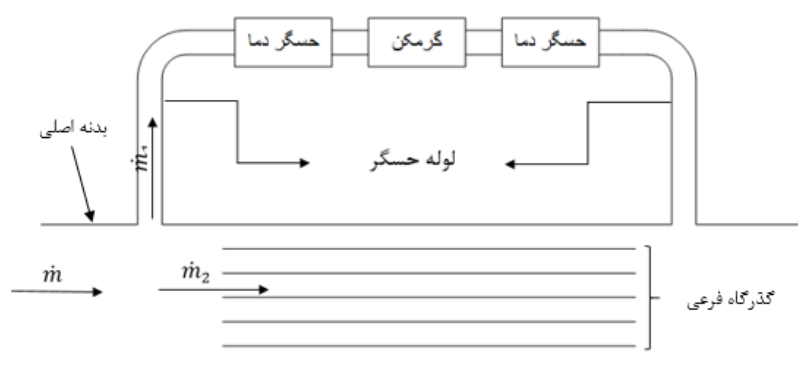
اصول کارکرد و معادلات حاکم بر جریان سنج‌های جرمی حرارتی لوله موئین

۱-۳ مقدمه

در این فصل اجزای اصلی جریان‌سنج حرارتی لوله مویین نام برده شده و اصول کار هر جز و در کل اصول کار جریان‌سنج حرارتی لوله مویین توضیح داده شده و معادله حاکم بر این نوع جریان‌سنج‌ها آورده شده است.

۲-۳ اجزای اصلی جریان‌سنج لوله مویین

همان‌طور که در شکل (۱-۳) نشان داده شده است این نوع جریان‌سنج از سه جز اصلی بدنه اصلی، لوله حسگر و گذرگاه فرعی تشکیل شده است.



شکل ۱-۳ : شماتیک جریان‌سنج حرارتی لوله مویین

۱-۲-۳ بدنه اصلی

بدنه اصلی جریان‌سنج حرارتی لوله مویین از اتصالات ورودی و خروجی، لوله حسگر و گذرگاه فرعی تشکیل شده است. تجهیزات الکترونیکی جریان‌سنج بر روی بدنه اصلی متصل می‌شود. قسمت‌های تر بدنه اصلی و تجهیزات داخلی آن از مواد ضد خوردگی ساخته می‌شوند.

۲-۲-۳ گذرگاه فرعی

در بعضی از جریان‌سنج‌های حرارتی که در جریان زیر ۵ سانتی‌متر مکعب بر دقیقه کار می‌کنند کل

جریان جرمی از لوله حسگر عبور می‌کند و نیازی به جدا کردن جریان و عبور قسمتی از آن از گذرگاه فرعی وجود ندارد. اما در بازه گسترده‌ای از وسایلی که در جریان بالا کار می‌کنند نیاز به وجود گذرگاه فرعی و عبور قسمتی از جریان از آن می‌باشد. همان‌طور که در قسمت اصول کارکرد جریان‌سنج لوله موپین توضیح داده خواهد شد جریانی که از لوله حسگر عبور می‌کند جریان آرام کاملاً توسعه‌یافته است بنابراین جدایش جریان و عبور از گذرگاه فرعی نیز باید به گونه‌ای باشد که جریان در آن کاملاً توسعه‌یافته باشد به دلیل آنکه اصولاً گذرگاه فرعی وظیفه آرام کردن جریان را دارد.

طراحی آرام‌ساز جریان برای هر سازنده مختص خود شرکت می‌باشد که باعث طراحی‌های متنوعی مانند تک‌لوله موپین، دسته لوله، شیار محوری^۱، شکاف^۲، گذرگاه زاویه‌دار و شکاف شعاعی می‌شود. بعضی از طراحان نیز از گذرگاه‌های لانه زنبوری برای طراحی آرام‌ساز برای جریان‌های بالا استفاده می‌کنند.

در بسیاری از جریان‌سنج‌های حرارتی قطر بدنه اصلی برای جریان‌های پایین، متوسط و بالا برابر است و طراحان برای هر جریان اندازه مناسب آرام‌ساز را طراحی می‌کنند و در داخل بدنه اصلی قرار می‌دهند.

۳-۲-۳ لوله حسگر

لوله حسگر موپین جریان‌سنج‌های حرارتی مقدار جریان عبوری از خود را اندازه می‌گیرد. لوله موپین به لوله بلند با قطر بسیار کم اطلاق می‌شود.

لوله حسگر جز کلیدی جریان‌سنج‌های حرارتی است. به همین دلیل جزییات طراحی لوله حسگر مختص هر طراح است. لوله حسگر به وسیله عایق گرمایی احاطه شده است.

¹ Axial groove

² Slot

۳-۳ مشخصات عملکرد

این قسمت مشخصات عملکرد یک نمونه جریان سنج حرارتی لوله موین را بیان می‌کند. مقادیر این مشخصات در میان بازه مقادیری است که سازندگان پیشنهاد می‌کنند. مشخصات هر سازنده با سازنده دیگر تفاوت دارد و بعضی از سازندگان تجهیزات مخصوصی را پیشنهاد می‌دهند که مشخصات عملکردشان را بهبود می‌بخشد.

۱-۳-۳ بازه جریان

جدول ۱-۳ بازه جریان جرمی سه اندازه بدنه اصلی جریان سنج جرمی حرارتی را نشان می‌دهد که بیشتر کاربردها را پوشش می‌دهد. بازه نشان داده شده برای هوا در دمای صفر درجه سانتی‌گراد و فشار یک اتمسفر می‌باشد. برای جریان‌های بالاتر از 1500 slpm بسیار به صرفه‌تر است که از جریان‌سنج‌های دیگر مورد استفاده قرار گیرد [۳۱].

جدول ۱-۳ : بازه جریان‌سنج‌های حرارتی لوله موین

اندازه بدنه اصلی	حداکثر بازه جریان جرم ($slpm$)
جریان پایین	۰ تا ۵۰
جریان متوسط	۰ تا ۳۰۰
جریان بالا	۰ تا ۱۵۰۰

۲-۳-۳ دقت^۲

انجمن مهندسان مکانیک آمریکا^۳ دقت جریان‌سنج را درجه آزادی از خطا یا درجه تطابق مقدار

¹ Standard liter per minute

² Accuracy

³ American Society of Mechanical Engineering (ASME)

نشان داده شده توسط دستگاه با مقدار واقعی تعریف می‌کند.

تعریف انجمن مهندسان مکانیک آمریکا از عدم قطعیت در اندازه‌گیری بازه‌ای است که انتظار می‌رود مقدار دقیق کمیت اندازه‌گیری شده با یک احتمال مشخص در آن باشد. عدم قطعیت در اندازه‌گیری شکلی است که در مورد نتایج یک اندازه‌گیری وجود دارد. خطا تفاوت بین مقدار اندازه‌گیری شده و مقدار واقعی یک کمیت است در صورتی که عدم قطعیت تعریف شک در مورد نتایج اندازه‌گیری است.

مشخصات دقت شامل خطا به دلایل زیر می‌باشد:

- عدم قطعیت در تجهیزات
 - عدم تکرارپذیری جریان‌سنج
 - عدم تطابق تابع برازش شده با پاسخ واقعی جریان
- سازندگان دقت وسایل اندازه‌گیری خود را به سه روش بیان می‌کنند:

- درصد مقیاس کامل
- ترکیبی: درصد خوانده شده + درصد مقیاس کامل
- بازه جداگانه :
- ۱- درصد خوانده شده
- ۲- درصد مقیاس کامل

۳-۳-۳ بازه‌پذیری^۱

تعریف انجمن مهندسان مکانیک آمریکا از بازه‌پذیری یک جریان‌سنج نسبت حداکثر به حداقل جریان در بازه‌ای که در یک دقت مشخص کار می‌کند می‌باشد.

¹ Rangeability

۴-۳-۳ عدم قطعیت اندازه‌گیری^۱ در تجهیزات

همواره تصور بر این است که تجهیزات اندازه‌گیری با ریزنگری بالا قابل اعتماد می‌باشند و با استفاده از آنها می‌توان به جواب صحیح رسید ولی باید توجه داشت که در هر سیستم اندازه‌گیری حتی دقیق‌ترین آنها همواره خطا و همچنین شک و تردید در نتایج اندازه‌گیری وجود دارد و رسیدن به عدد واقعی میسر نیست، این شک و تردید را عدم قطعیت می‌نامند که در خصوص کیفیت اندازه‌گیری اطلاعاتی به دست می‌دهد.

هدف از محاسبه عدم قطعیت تعیین محدوده‌ای از سطح اطمینان است که به احتمال خیلی قوی مقدار واقعی در آن قرار می‌گیرد. بعضی افراد تصور می‌کنند عدم قطعیت اندازه‌گیری همان خطا است در صورتی که تفاوت زیادی بین این دو وجود دارد، در گذشته از عبارات خطا، خطای تصادفی و خطای سیستماتیک برای توصیف عدم قطعیت استفاده می‌شد که سردرگمی زیادی ایجاد می‌نمود، خطا برابر است با مقدار اندازه‌گیری شده منهای اندازه واقعی در صورتی که عدم قطعیت در گسترده‌ترین معنایش بر این ایده که نتیجه اندازه‌گیری دقیق نیست دلالت دارد و در واقع بیانگر پراکندگی نتایج اندازه‌گیری با توجه به عوامل و پارامترهایی است که به صورت مستقیم یا غیر مستقیم روی نتایج اثر می‌گذارند. این پراکندگی حول مقدار اندازه‌گیرنده شده از اندازه ده توسط وسایل مرجع بررسی می‌گردد.

۴-۳ اصول عملکرد

با توجه به شکل ۳-۱ کل جریان جرمی در خط فرایند وارد بدنه اصلی جریان‌سنج شده و سپس به دو مسیر جدا تقسیم می‌شود. قسمتی از جریان وارد لوله حسگر شده (q_m) و قسمتی از گذرگاه‌های

¹ Uncertainty in Measurement

فرعی عبور می‌کند ($q_{m,bypass}$). گذرگاه فرعی آرام‌ساز جریان می‌باشد که علاوه بر این کار افت فشاری ایجاد می‌کند که باعث می‌شود مقداری از جریان از لوله حسگر عبور کند. معمولاً q_m خیلی کوچکتر از $q_{m,bypass}$ است. کل جریان جرمی برابر جمع جریان‌های دو مسیر می‌باشد.

$$q_{total} = q_m + q_{m,bypass} = q_m \left(1 + \frac{q_{m,bypass}}{q_m}\right) \quad (1-3)$$

عبارت $\left(1 + \frac{q_{m,bypass}}{q_m}\right)$ را نسبت گذرگاه فرعی می‌نامند. در اینجا نشان داده می‌شود اگر جریان در گذرگاه فرعی کاملاً آرام باشد نسبت گذرگاه فرعی مقداری ثابت است. به همین دلیل گذرگاه فرعی باید آرام‌ساز باشد و نمی‌تواند روزه‌ای یا اختلاف فشاری باشد.

افت فشار در طول لوله حسگر موئین از رابطه (۲-۳) برای لوله استوانه‌ای با جریان آرام کاملاً توسعه یافته بدست می‌آید [۳۲].

$$\Delta P_{sensor} = C_{tube} \left(\frac{\mu}{\rho}\right) q_m \quad (2-3)$$

اگر گذرگاه فرعی از N لوله موئین با قطر داخلی و طول شبیه لوله حسگر تشکیل شده باشد و شبیه لوله حسگر جریان در آن آرام کاملاً توسعه یافته باشد افت فشار در طول این آرام‌ساز برابر است با

$$\Delta P_{bypass} = \left(\frac{C_{tube}}{N}\right) \left(\frac{\mu}{\rho}\right) q_{(m,bypass)} \quad (3-3)$$

واضح است افت فشار در لوله حسگر و گذرگاه فرعی با هم برابر است بنابراین با توجه به روابط افت فشار داریم:

$$\Delta P_{sensor} = \Delta P_{bypass} \rightarrow C_{tube} \left(\frac{\mu}{\rho}\right) q_m = \left(\frac{C_{tube}}{N}\right) \left(\frac{\mu}{\rho}\right) q_{m,bypass} \rightarrow \frac{q_{m,bypass}}{q_m} = N$$

$$\rightarrow bypass\ ratio = N + 1$$

$$q_{total} = q_m (1 + N) = Constant \cdot q_m \quad (4-3)$$

این رابطه برای انواع گذرگاه فرعی صرفنظر از هندسه آن در صورت آرام و کاملاً توسعه یافته بودن توزیع سرعت در آن صدق می‌کند. رابطه (۳-۴) اصل اساسی در جریان‌سنج‌های جرمی حرارتی را بیان می‌کند زیرا نشان می‌دهد که نسبت گذرگاه فرعی مستقل از تمام خواص گاز مقداری ثابت است و اندازه‌گیری مستقیم جریان عبوری از لوله حسگر جریان کل عبوری در خط فرایند را صرفنظر از تغییرات در جریان، دما و فشار گاز نتیجه می‌دهد.

اگر برای گذرگاه فرعی از یک عنصر اختلاف فشاری مانند روزنه، شیپوره یا ونتوری استفاده کنیم در این مورد نسبت گذرگاه ثابت نیست و به لزجت گاز و جریان عبوری لوله حسگر وابسته می‌باشد. هر دوی این وابستگی‌ها منجر به خطای اندازه‌گیری می‌شود.

سازندگان جریان‌سنج‌های حرارتی لوله موئین با دقت بالا گذرگاه فرعی خود را طراحی می‌کنند و حداکثر جریان را برای اطمینان از آرام بودن جریان محدود می‌کنند. وسایلی که از عناصر اختلاف فشاری برای کاهش هزینه یا افزایش حداکثر جریان استفاده می‌کنند شامل خطاهایی که بحث شد می‌شوند و هدف اول جریان‌سنج‌های حرارتی که اندازه‌گیری مستقیم جریان جرمی است را از دست می‌دهند.

۳-۴-۱ مشخصات جریان در لوله حسگر

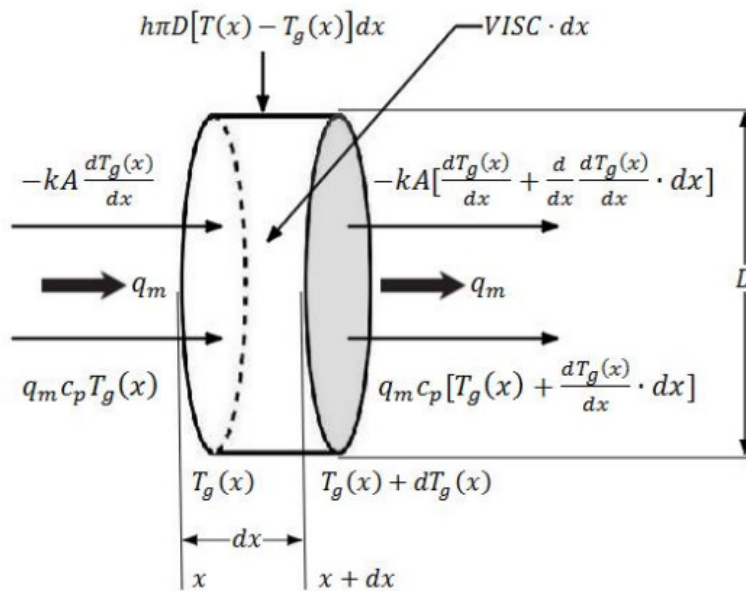
- جریان باید کاملاً آرام و توزیع سرعت کاملاً توسعه یافته داشته باشد

- جریان تراکم‌ناپذیر باشد

همچنین فرض می‌شود جریان در حالت پایا و خواص گاز و مواد لوله حسگر ثابت هستند. دمای لوله حسگر در عرض ضخامت لوله ثابت و دمای گاز میانگین در سطح مقطع لوله می‌باشد. این فرضیات برای لوله طویل با ضخامت کسم لوله موئین با جریان آرام کاملاً توسعه یافته درست می‌باشد [۳۱].

۲-۴-۳ نرخ ظرفیت گرمایی ($q_m C_p$)

شکل ۲-۳ حجم کنترل دیفرانسیلی جریان گاز در لوله حسگر را نشان می‌دهد. این شکل جریان انتقال انرژی ورودی و خروجی حجم کنترل را نشان می‌دهد. در جریان پایا قانون اول ترمودینامیک بیان می‌کند که جمع انرژی ورودی حجم کنترل با خروجی آن برابر است. با به کارگیری این اصل برای حجم کنترل نشان داده شده به معادله دیفرانسیلی انرژی برای توزیع دمای محوری گاز می‌رسیم [۳۱].



شکل ۲-۳: حجم کنترل دیفرانسیلی جریان گاز در لوله حسگر

$$-k_g A_g \frac{d^2 T_g(x)}{dx^2} + q_m C_p \frac{dT_g(x)}{dx} - h\pi D (T(x) - T_g(x)) = visc \quad (5-3)$$

(۱)
(۲)
(۳)
(۴)

در رابطه (۵-۳) x بعد طول لوله حسگر و متغیر مستقل است. عبارتهای ۱ تا ۴ رابطه (۵-۳) در زیر توضیح داده شده است:

عبارت (۱) هدایت محوری در حجم کنترل می‌باشد. k_g هدایت حرارتی گاز، D قطر داخلی لوله حسگر بر حسب متر و $A_g = \frac{\pi D^2}{4}$ سطح مقطع داخلی لوله حسگر می‌باشد. برای بیشتر جریان‌ها در بازه خطی عبارت (۱) در مقایسه با عبارات (۲) و (۳) قابل صرف‌نظر می‌باشد زیرا هدایت حرارتی گازها بسیار ناچیز است.

عبارت (۲) انرژی منتقل شده به دلیل ظرفیت گرمایی گاز است. ظرفیت گرمایی خاصیت ترمودینامیکی گاز است که توانایی ذخیره انرژی حرارتی را اندازه می‌گیرد. q_m جریان جرمی عبوری از لوله حسگر و C_p ضریب گرمای ویژه گاز در فشار ثابت است. $q_m C_p$ در عبارت (۲) نرخ ظرفیت حرارتی نامیده می‌شود و پارامتری ضروری برای فهم نحوه اندازه‌گیری جریان در لوله حسگر می‌باشد.

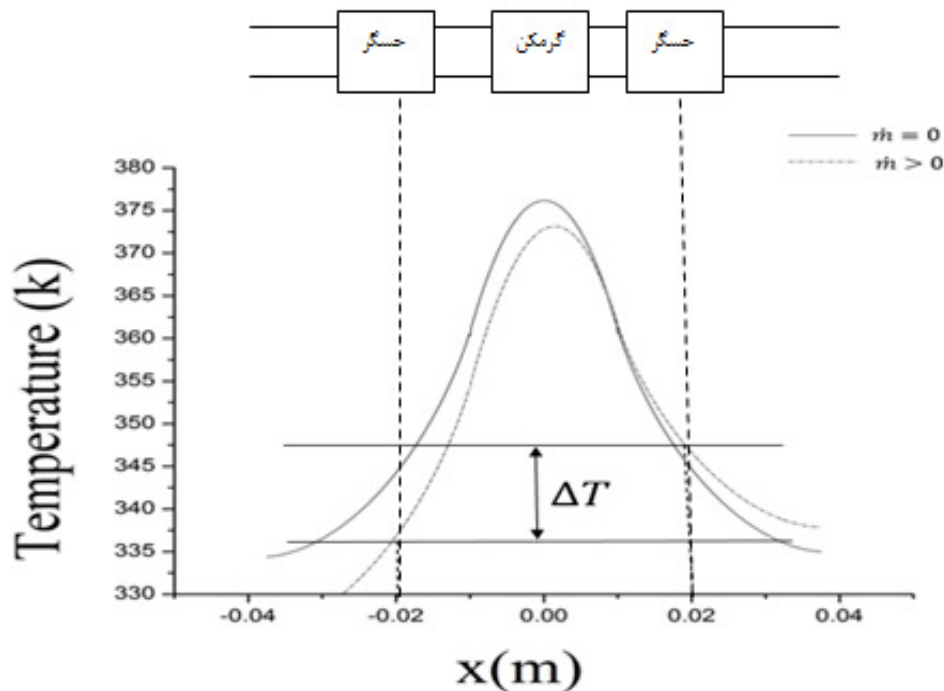
عبارت (۳) گرمایی است که به صورت شعاعی از طریق جابه‌جایی اجباری از لوله حسگر به گاز منتقل می‌شود. h ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی می‌باشد.

عبارت (۴) اتلاف انرژی ویسکوز در گاز به دلیل اثرات اصطکاکی است. این عبارت به ویسکوزیته دینامیکی گاز بستگی دارد و با افزایش نرخ جریان افزایش می‌یابد. مقدار این عبارت در مقابل عبارت (۲) و (۳) قابل صرف‌نظر می‌باشد زیرا ویسکوزیته گازها ناچیز و نرخ جریان نیز پایین می‌باشد.

۵-۳ محاسبه جریان عبوری از لوله حسگر

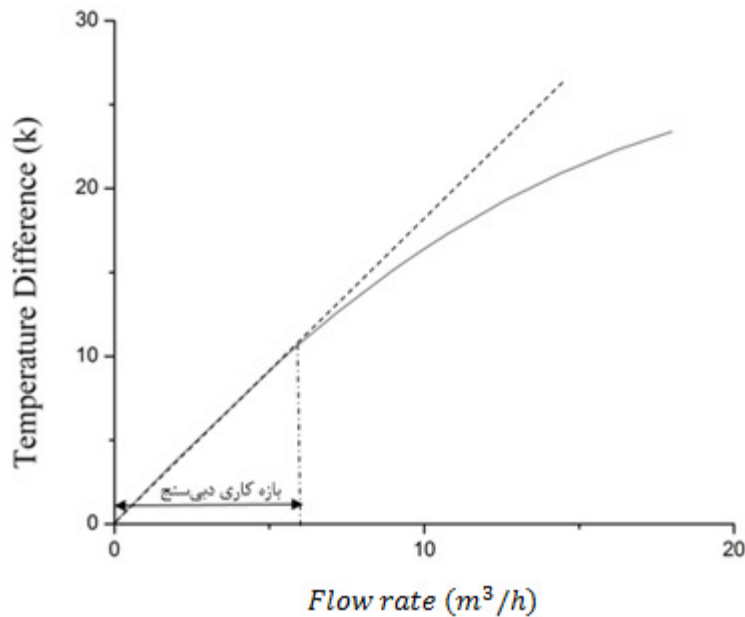
اصول کار جریان‌سنج حرارتی لوله موپین بر اساس قوانین اول ترمودینامیک و انتقال حرارت می‌باشد. جریان عبوری از لوله حسگر به وسیله سه سیم‌پیچ، دو حسگر دما که به طور متقارن نسبت به مرکز قرار گرفته و یک گرم‌کن که در مرکز قرار می‌گیرد اندازه‌گیری می‌شود. گرما به وسیله گرم‌کن به لوله حسگر داده می‌شود در بالادست جریان گرما از لوله حسگر به گاز منتقل می‌شود و گاز گرم می‌شود. گاز این گرما را از بالادست به پایین‌دست جریان منتقل می‌کند. یعنی بر خلاف بالادست که گرما از لوله

حسگر به گاز منتقل می‌شود در پایین دست جریان از گاز به لوله حسگر انتقال می‌یابد. بنابراین در حسگرها اختلاف دما ایجاد می‌شود. در صورت عدم وجود جریان این اختلاف دما صفر و توزیع دما در طول لوله حسگر به صورت متقارن می‌باشد [۷].



شکل ۳-۳: شماتیک لوله حسگر و تعریف اختلاف دمای بین دو حسگر

این اختلاف دما در بازه خاصی با افزایش جریان به صورت خطی افزایش می‌یابد بنابراین در این بازه جریان عبوری از لوله حسگر رابطه مستقیمی با اختلاف دمای دو حسگر دارد که این نسبت برای هر گاز باید کالیبره شود.



شکل ۳-۴: تعریف بازه کاری جریان‌سنج حرارتی لوله مویین

بنابراین این بازه خطی یکی از پارامترهای مهم در طراحی جریان‌سنج‌های جرمی حرارتی لوله مویین می‌باشد زیرا افزایش بازه خطی باعث امکان اندازه‌گیری جریان بیشتر می‌شود.

۶-۳ حساسیت^۱

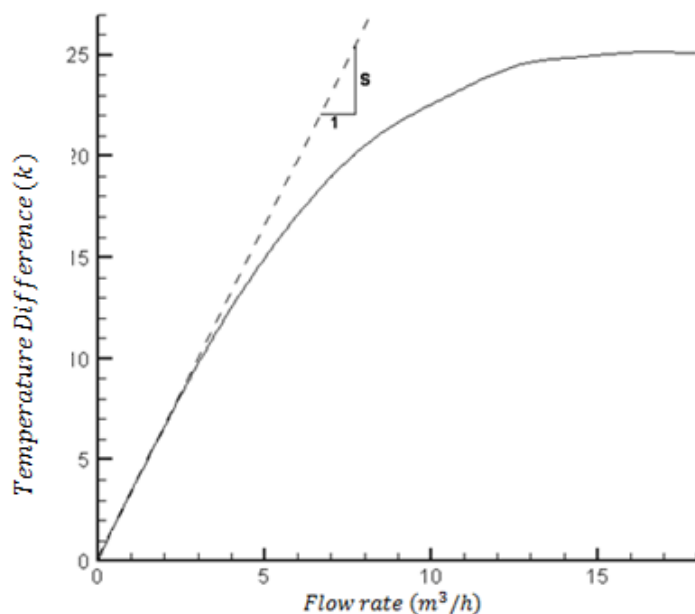
یکی دیگر از پارامترهای مهم در طراحی جریان‌سنج‌های حرارتی لوله مویین حساسیت جریان‌سنج می‌باشد. حساسیت به صورت مشتق اختلاف دما نسبت به جریان در جریان صفر تعریف می‌شود. به عبارت دیگر حساسیت به صورت رابطه زیر بیان می‌شود [۸]:

$$S = \frac{\partial(T_{sensor\ tube}(x = L_s) - T_{sensor\ tube}(x = -L_s))}{\partial \dot{m}} \quad (۶-۳)$$

با کاهش حساسیت نسبت اختلاف دما به جریان جرمی کاهش می‌یابد. اگر اختلاف دما از دقت اندازه‌گیری سنسور کوچکتر شود جریان‌سنج حرارتی نمی‌تواند جریان عبوری را اندازه‌گیری کند. بنابراین

^۱ Sensitivity

هرچه حساسیت بالاتر باشد دقت اندازه‌گیری بهتر است.



شکل ۳-۵: تعریف حساسیت جریان سنج

۷-۳ معادلات حاکم

معادلات حاکم بر جریان سنج حرارتی نیز مانند هر پدیده دیگری معادلات پیوستگی، ممنتوم و انرژی می‌باشد که در زیر آورده شده است.

۱-۷-۳ معادلات دوبعدی

رابطه (۷-۳) معادله دوبعدی پیوستگی را برای سیال عبوری از لوله حسگر بیان می‌کند که در آن u و v سرعت سیال به ترتیب در جهت‌های x و y را نشان می‌دهد [۳۲].

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (7-3)$$

معادله های زیر شکل دو بعدی معادله تکانه را برای حالت پایا در جهت‌های x و y نشان می‌دهد.

به طوریکه p ، v ، ρ و g به ترتیب فشار، لزجت سینماتیکی، چگالی و شتاب جاذبه می باشد.

$$u \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right) + v \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \quad (۸-۳)$$

$$u \left(\frac{\partial v}{\partial x} \right) + v \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} + \nu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + g \quad (۹-۳)$$

رابطه (۱۰-۳) شکل دو بعدی معادله انرژی را نشان می دهد.

$$u \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right) + v \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right) = \frac{k}{\rho C_p} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) + \frac{q}{\rho \cdot C_p} \quad (۱۰-۳)$$

در این معادله k و C_p هدایت حرارتی و ظرفیت گرمایی در فشار ثابت سیال، T دمای سیال و q

مقدار حرارت منتقل شده به سیال است [۳۲].

۳-۷-۲ معادلات سه بعدی

روابط پیوستگی، ممنتوم و انرژی در مختصات سه بعدی به صورت زیر می باشد که در آن w سرعت

سیال در جهت z را بیان می کند [۳۲].

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (۱۱-۳)$$

$$u \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right) + v \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right) + w \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad (۱۲-۳)$$

$$u \left(\frac{\partial v}{\partial x} \right) + v \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right) + w \left(\frac{\partial v}{\partial z} \right) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} + \nu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) + g \quad (۱۳-۳)$$

$$u \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right) + v \left(\frac{\partial w}{\partial y} \right) + w \left(\frac{\partial w}{\partial z} \right) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} + \nu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \quad (۱۴-۳)$$

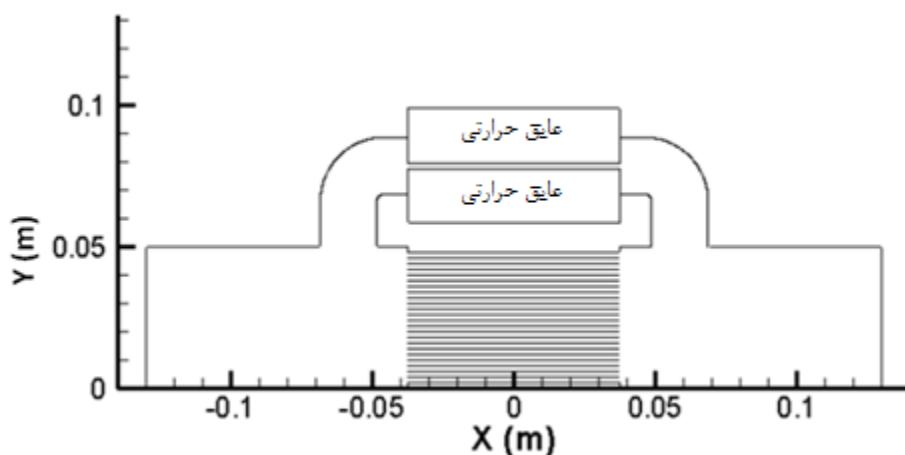
$$u \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right) + v \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right) + w \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right) = \frac{k}{\rho C_p} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \frac{q}{\rho \cdot C_p} \quad (۱۵-۳)$$

فصل چهارم

مدلسازی دوبعدی و سه بعدی جریان سنج حرارتی لوله موئین

۱-۴ مدل دوبعدی

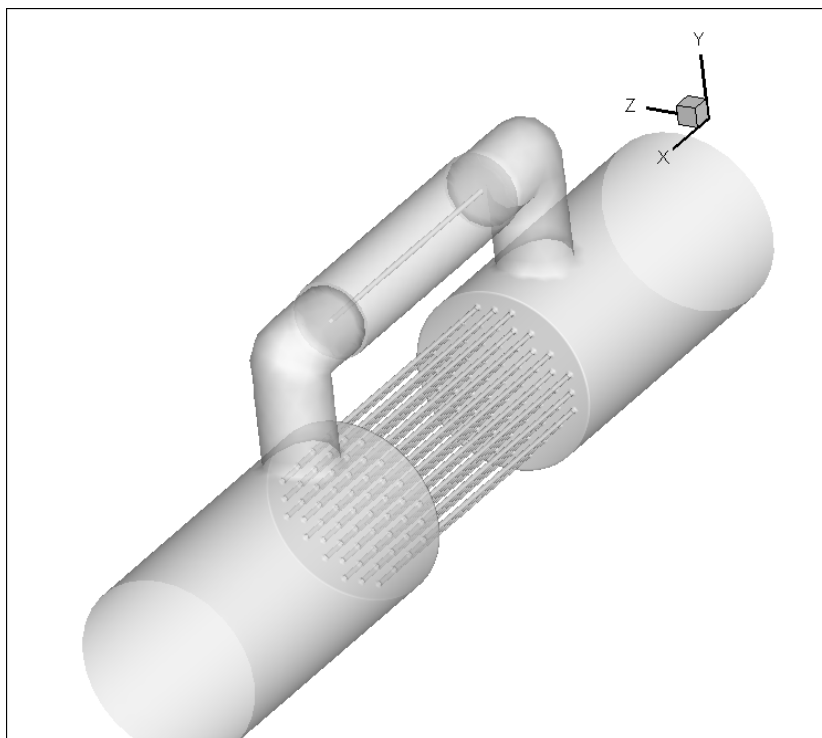
با توجه به اینکه هدف از طراحی این جریان سنج استفاده در صنعت گاز به عنوان کنتورهای گاز خانگی می باشد قطر ورودی جریان سنج برابر قطر لوله ورودی کنتورهای شرکت گاز و برابر با ۲ اینچ (۵۰/۸ میلی متر) در نظر گرفته شده است. قطر لوله های موین استفاده شده در این مدلسازی بر اساس لوله های موجود طراحی شده است. در شکل ۱-۴ مشخصات کلی مساله نشان داده شده است.



شکل ۱-۴ : مدل دوبعدی هندسه جریان سنج حرارتی لوله موین

۲-۴ مدل سه بعدی

برای بررسی و تحلیل دقیق تر مساله مدل سه بعدی جریان سنج با همان ابعاد مدل دوبعدی نیز در نرم افزار گمبیت طراحی و در نرم افزار فلونت شبیه سازی شده است. شکل ۲-۴ هندسه سه بعدی مساله را نشان می دهد.



شکل ۲-۴: مدل سه بعدی جریان سنج حرارتی لوله مویین

در این مدل به دلیل کاهش هزینه محاسباتی در قسمت آرام ساز کل سطح مقطع با لوله مویین پر نشده و فقط نسبتی از کل تعداد لوله های مویین مدل شده است.

۳-۴ تولید شبکه محاسباتی

نرم افزار گمبیت یک نرم افزار مدل ساز ساده است که سازگاری قابل ملاحظه ای با نرم افزار فلونتت دارد. از جمله خروجی های این نرم افزار تولید یک شبکه محاسباتی است که به صورت فایل با پسوند msh. بوده و توسط نرم افزار فلونتت قابل دریافت و تحلیل می باشد.

گام اول در مدل سازی CFD ایجاد یک هندسه منظم و مش بندی شده می باشد. به این منظور هندسه مورد نظر در نرم افزار گمبیت مدل می شود.

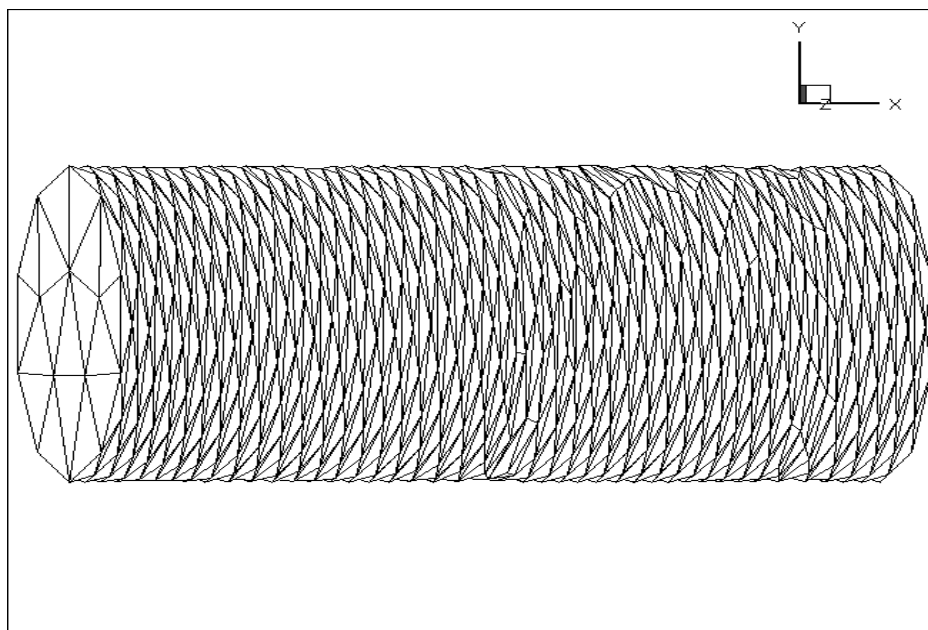
شکل ۱-۴ و شکل ۲-۴ هندسه کامل مدل شده در نرم افزار گمبیت را نشان می دهد. به دلیل حجم

بالای مش‌بندی در زیر فقط نمونه از مش‌بندی لوله حسگر آورده شده است. همان‌گونه که شکل ۳-۴ نشان می‌دهد در مدل دو بعدی از مش مربعی استفاده شده است.



شکل ۳-۴: نمونه مش‌بندی دو بعدی لوله حسگر

شکل ۴-۴ نمونه مش‌بندی سه‌بعدی را نشان می‌دهد که همانطور که مشخص است در مدل سه‌بعدی از مش Tet/Hybrid استفاده شده است.

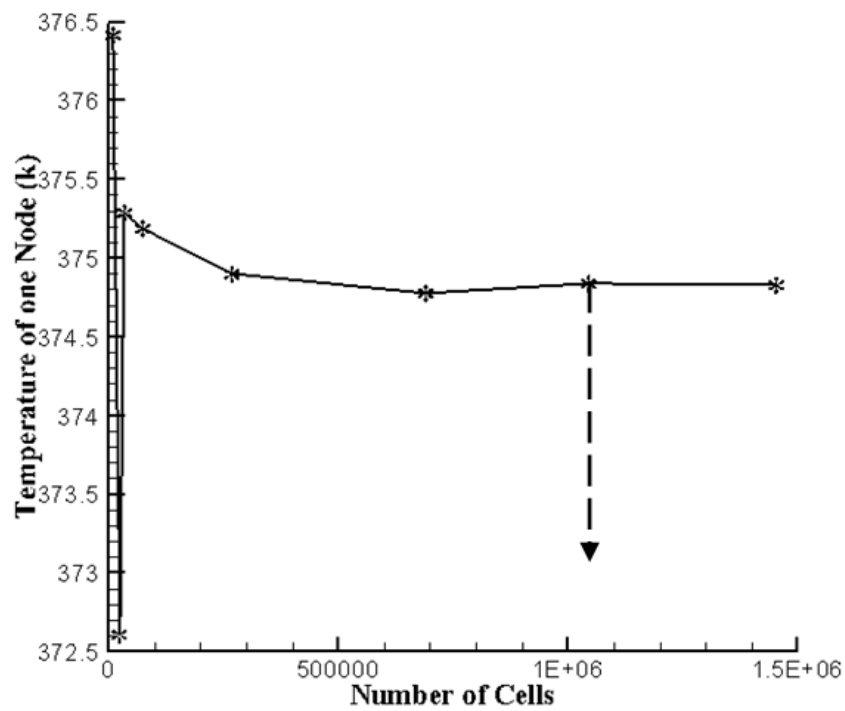


شکل ۴-۴: نمونه مش‌بندی سه‌بعدی لوله حسگر

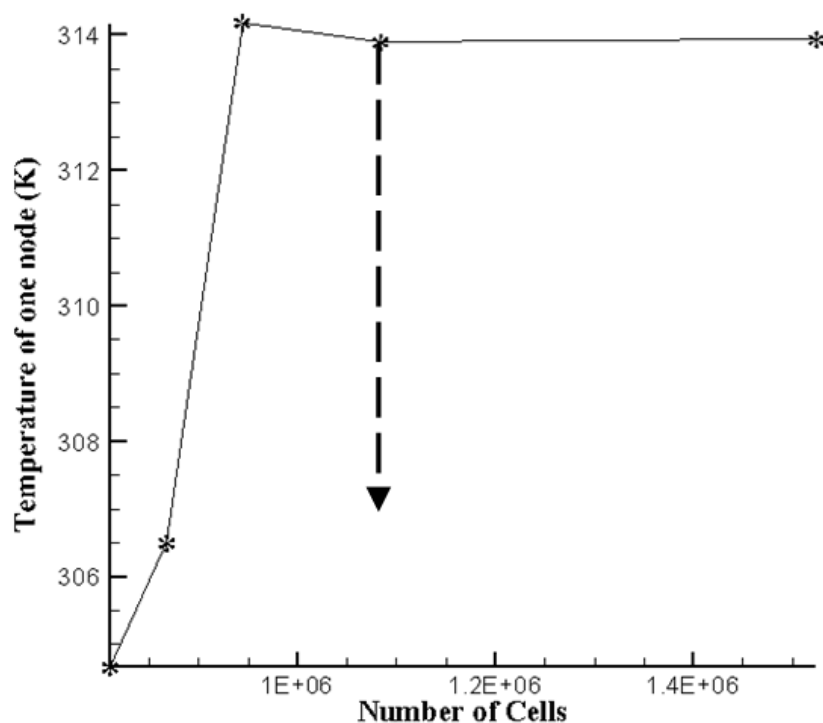
۴-۴ بررسی استقلال از شبکه

از آنجا که در تحلیل میدان جریان وابستگی حل به شبکه محاسباتی باید مورد ارزیابی قرار گیرد شبکه‌های ریز و درشت مورد بررسی قرار گرفت و در شبیه‌سازی دو بعدی برای نمونه هندسه جریان‌سنج

با قطر لوله حسگر ۱.۴۵ از ۱۰۴۴۸۰۸ سلول تشکیل شده که در ادامه نمودار استقلال از شبکه آورده شده است.



شکل ۴-۵: نمودار استقلال از شبکه برای نمونه دوبعدی جریان سنج



شکل ۴-۶: نمودار استقلال از شبکه برای مدل سه بعدی جریان سنج

۵-۴ مدل پیشنهادی برای حل مساله

روش‌های تئوری و تحلیلی بر اساس حل معادلات حاکم در مکانیک سیالات و انتقال حرارت بنا شده‌اند. اما در اغلب موارد فرمول‌بندی قوانین پایه مکانیک سیالات و انتقال حرارت به صورت معادلات دیفرانسیل پاره‌ای^۱ مرتبه دومی در می‌آیند که فقط در بعضی از حالت‌های خاص دارای حل تحلیلی و دقیق هستند. چون معادلات حاکم در مکانیک سیالات یک مجموعه معادلات دیفرانسیل پاره‌ای غیر خطی و وابسته را ایجاد می‌کنند که باید در یک قلمرو ناهموار و با شرایط اولیه و مرزی مختلف حل شوند. بنابراین در بیشتر موارد حل تحلیلی معادلات مکانیک سیالات بسیار محدود است و با اعمال شرایط مرزی این محدودیت‌ها تنگ‌تر می‌شود. روشی که برای حل این معادلات استفاده می‌شود دینامیک سیالات محاسباتی است که بر پایه محاسبات عددی بنا شده است.

¹ Partial Differential Equation

یکی از روش‌های حل دینامیک سیالات محاسباتی که نرم‌افزار فلوئنت بر پایه آن برنامه‌ریزی شده روش حجم محدود است. در این روش معادلات دیفرانسیل پاره‌ای در مکانیک سیالات و انتقال حرارت به صورت انتگرالی نوشته می‌شوند.

۴-۵-۱ انتخاب حل گر و مدل فیزیکی

بعد از اینکه شبکه و هندسه مساله وارد نرم‌افزار فلوئنت شد باید شبکه از نظر ابعاد و مقیاس مناسب بررسی و حل کننده و مدل فیزیکی مناسب انتخاب شود.

جدول ۴-۱: حل گر و مدل فیزیکی انتخاب شده

panel	Subtitle	Selected
Solver	Solver	Pressure based
	Formulation	Implicit
	Space	2D & 3D
	Time	Steady
Energy	Energy Equation	Active
Viscous	Model	Laminar

۴-۵-۲ مواد

در بیشتر موارد بیش از ۹۰٪ کسر حجمی گاز طبیعی را متان تشکیل می‌دهد [۳۳] و نزدیکترین رفتار را به گاز طبیعی دارد به همین دلیل ابتدا گاز متان به عنوان سیال مورد بررسی قرار گرفت و پس از آن با استفاده از درصدهای مولی برخی ترکیبات گاز طبیعی رفتار این ترکیبات مورد مطالعه قرار گرفت. همچنین جنس بدنه اصلی جریان سنج از فولاد و جنس عایق از پشم سنگ در نظر گرفته شده است.

جدول ۲-۴: مشخصات مواد استفاده شده در هندسه مدل شده

ماده	مشخصات			
	چگالی (kg/m^3)	ظرفیت گرمای ویژه در فشار ثابت ($j/kg.k$)	ضریب هدایت حرارتی ($w/m.k$)	ویسکوزیته $\times 10^{-5}$ ($kg/m.s$)
متان	۰.۶۵۳۶	۲۲۲۲	۰.۰۳۳۲	۱.۰۸۷
فولاد	۸۰۳۰	۵۰۲.۴۸	۱۶.۲۷	-----
پشم سنگ	۵۰	۸۴۰	۰.۰۹۲۷	-----

۳-۵-۴ شرایط عملیاتی

ابتدا تمامی خروجی‌ها در فشار کاری ۱ اتمسفر گرفته شده و سپس برای بررسی اثر فشار، فشارهای مختلف اعمال شده است.

۴-۵-۴ شرایط مرزی

جدول ۳-۴ شرایط مرزی مساله را نشان می‌دهد. شار حرارتی مدل دوبعدی (w/m^2) 500 و شار حرارتی مدل سه‌بعدی برابر (w/m^2) 1500 در نظر گرفته شده است.

جدول ۳-۴: شرایط مرزی اعمال شده بر مساله

شرایط مرزی	مرز
سرعت ثابت	ورودی
فشار خروجی	خروجی
شار حرارتی ثابت انتقال حرارت جابه‌جایی عایق حرارتی	لوله حسگر

فصل پنجم

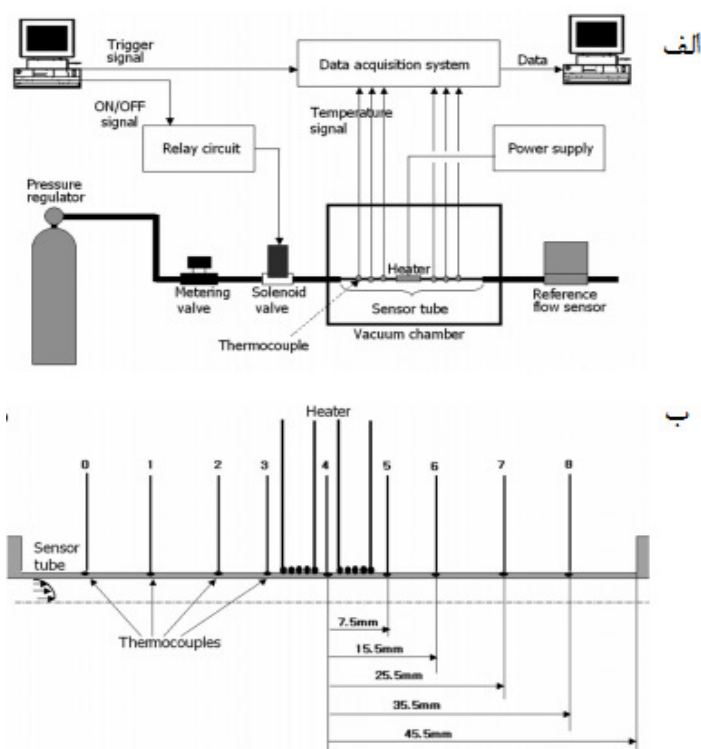
اعتبار سنجی حل عددی

۱-۵ مقدمه

به دلیل عدم وجود داده‌های آزمایشگاهی برای متان از داده‌های آزمایشگاهی نیتروژن که بوسیله کیم و همکاران گزارش شده است برای اعتبارسنجی روش حل عددی استفاده شده است. با توجه به اینکه رفتار هر دو گاز متان و نیتروژن در فشارهای پایین شبیه رفتار گاز ایده‌آل می‌باشد این مقایسه می‌تواند قابل قبول باشد.

۲-۵ اعتبارسنجی شبیه‌سازی با داده‌های آزمایشگاهی

شکل ۱-۵ الف مدل آزمایشگاهی ساخته شده توسط کیم و همکاران [۷] را نشان می‌دهد. در این مدل از لوله موپینی از جنس فولاد ضدزنگ به طول ۹۱ میلی‌متر استفاده شده است. شکل ۱-۵ ب جای قرارگیری گرمکن و حسگرها را نشان می‌دهد.



شکل ۱-۵ : مدل آزمایشگاهی انجام شده توسط کیم و همکاران

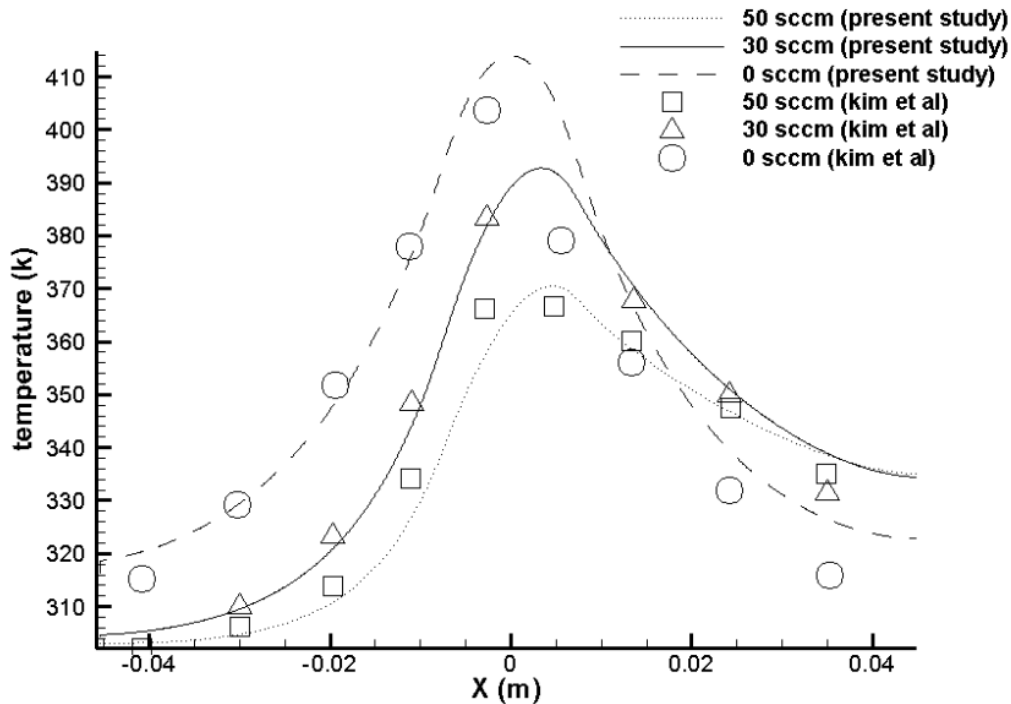
در مدل ارائه شده توسط کیم تمام جریان از لوله مویین عبور می کند. در جدول ۱-۵ مشخصات هندسی لوله حسگر ساخته شده توسط کیم و همکاران آورده شده است.

جدول ۱-۵: مشخصات هندسی مدل آزمایشگاهی [۷]

طول لوله حسگر	91mm
قطر داخلی لوله حسگر	0.977mm
قطر خارجی لوله حسگر	1.257mm
طول گرمکن	14.8mm

شکل ۲-۵ نتایج شبیه سازی عددی را در مقابل داده های آزمایشگاهی گزارش شده توسط کیم و همکاران نشان می دهد. داده های آزمایشگاهی توزیع دما برای سه جریان مختلف ۰، ۳۰ و ۵۰ سانتی متر مکعب بر دقیقه^۱ را گزارش می کنند. بر اساس شکل ۲-۵ نتایج شبیه سازی به دمای اندازه گیری شده بسیار نزدیک می باشد اگرچه در ابتدا و انتهای لوله حسگر تفاوت هایی دیده می شود. این تفاوت ها ناشی از تاثیر شرایط مرزی می باشد. در شبیه سازی جریان ورودی به صورت یکنواخت و کاملاً توسعه یافته بررسی شده است در صورتی که در عمل در ابتدا و انتهای لوله حسگر چنین شرایطی برقرار نیست. البته این انحراف از مقدار واقعی نمی تواند بر دقت جریان سنج تاثیر بگذارد زیرا آنچه در اندازه گیری جریان توسط جریان سنج حرارتی لوله مویین اهمیت دارد اختلاف دمای اندازه گیری شده بوسیله دو حسگر می باشد که در مکان $L_s = \pm 7.5mm$ قرار دارد و همانگونه که در نمودار مشخص است اختلاف بین مقدار شبیه سازی و آزمایشگاهی در این نقطه ناچیز است.

¹ Standard Cubic Centimeter per Minute (SCCM)



شکل ۲-۵: مقایسه توزیع دما در طول لوله حسگر برای داده‌های آزمایشگاهی و حل عددی

۳-۵ اعتبارسنجی شبیه‌سازی عددی با حل تحلیلی یک‌بعدی

کومیا و همکاران [۳] برای حالتی که شار به صورت یکنواخت بر روی تمام طول لوله حسگر می‌باشد

حل یک‌بعدی برای توزیع دما به صورت زیر ارائه کردند:

$$KA \frac{d^2T}{dx^2} + Q \frac{dT}{dx} - UT + q = 0 \quad (1-5)$$

که در آن q, U, A, K ضریب هدایت حرارتی لوله، سطح مقطع لوله، ضریب افت گرمای کلی و شار

حرارتی بر واحد طول لوله می‌باشد. همچنین Q برابر با حاصلضرب جریان جرمی در ظرفیت گرمایی ویژه

می‌باشد.

شبیه‌سازی عددی لوله حسگر با مطالعه کومیا و همکاران دو تفاوت دارد اول اینکه همان‌گونه که

گفته شد در مطالعه کومیا و همکاران شار در تمام طول لوله حسگر اعمال شده در صورتی که در شبیه-

سازی عددی و در عمل شار فقط در مرکز لوله حسگر و در بازه طول گرمکن اعمال می‌شود و تفاوت دوم اینکه در مطالعه کومیا و همکاران دمای محیط صفر در نظر گرفته شده بنابراین حل یک‌بعدی برای مدل ارائه شده در مطالعه کیم و همکاران به صورت زیر تغییر می‌کند:

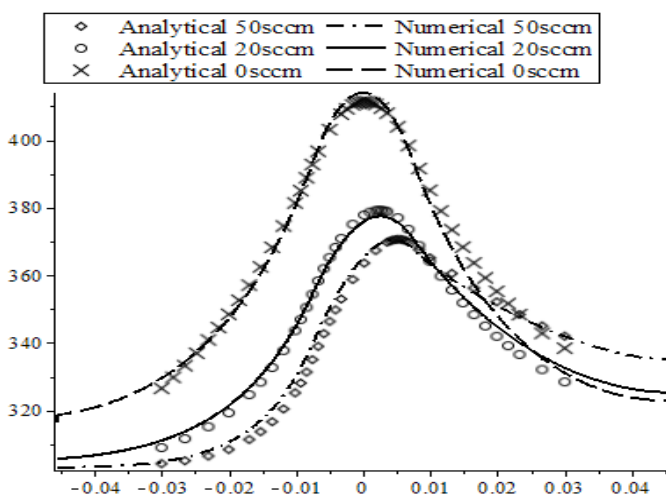
$$KA \frac{d^2T}{dx^2} + Q \frac{dT}{dx} - U(T - T_{amb}) = \begin{cases} 0 & \text{if } x < -L_h \\ -q & \text{if } -L_h < x < L_h \\ 0 & \text{if } x > L_h \end{cases} \quad (2-5)$$

که در آن L_h طول گرمکن می‌باشد.

رابطه (۳-۵) شرایط مرزی اعمال شده در حل معادلات تحلیلی را نشان می‌دهد.

$$T(-L) = T_{amb}, T'(L) = 0 \quad (3-5)$$

شکل ۳-۵ مقایسه توزیع دمای بدست آمده در طول لوله حسگر از حل تحلیلی و شبیه‌سازی عددی را نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود تطابق خوبی بین حل تحلیلی و عددی برای جریان‌های مختلف برقرار است.



شکل ۳-۵: مقایسه شبیه‌سازی عددی و حل تحلیلی برای نیتروژن

فصل ششم

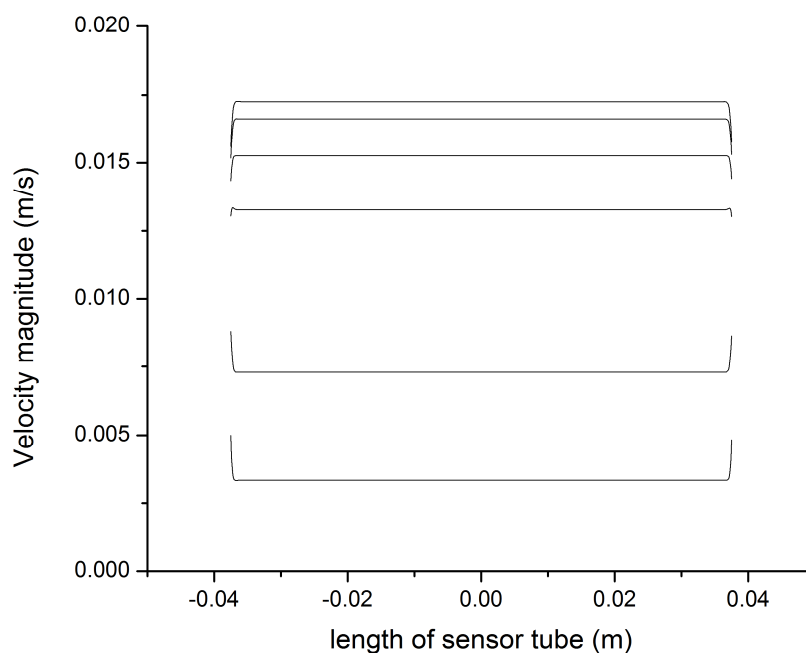
نتایج شبیه‌سازی دوبعدی

۱-۶ مقدمه

در این قسمت نتایج شبیه‌سازی دوبعدی جریان سنج جرمی حرارتی برای گاز متان آورده شده است و اثر پارامترهای مختلف بررسی شده است.

۲-۶ بررسی شرایط جریان

همان‌طور که گفته شد جریان در لوله حسگر باید آرام و کاملاً توسعه یافته هیدرودینامیکی باشد. شکل ۱-۶ سرعت سیال عبوری در مقطع‌های مختلف لوله حسگر را نشان می‌دهد. واضح است که سرعت هر مقطع در طول لوله تغییری نمی‌کند بنابراین می‌توان گفت که شرط توسعه‌یافتگی برقرار است. همچنین با بررسی عدد رینولدز مقدار این عدد در کل جریان سنج حداکثر ۲.۵۵ بوده که نشان می‌دهد شرط آرام بودن جریان نیز برقرار است.

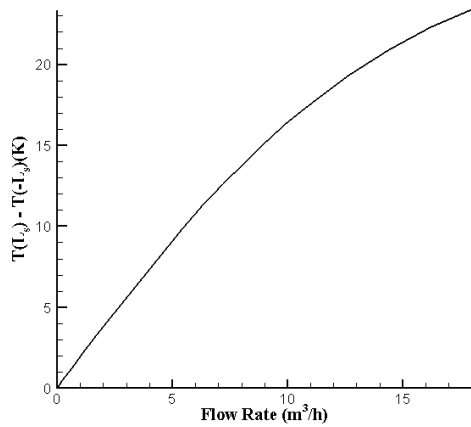


شکل ۱-۶: سرعت سیال در مقطع‌های مختلف لوله حسگر در طول لوله

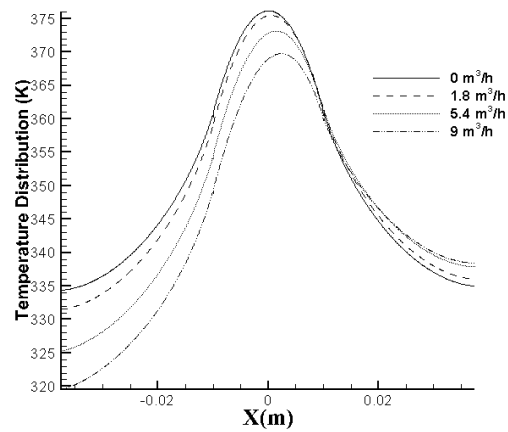
۳-۶ تاثیر قطر لوله حسگر

در این قسمت توزیع دما در طول لوله حسگر و اختلاف دمای دو حسگر بر حسب جریان ورودی به جریان سنج نشان داده شده و در نهایت بازه کاری و حساسیت جریان سنج با قطر لوله حسگر متفاوت مقایسه شده است.

(ب)

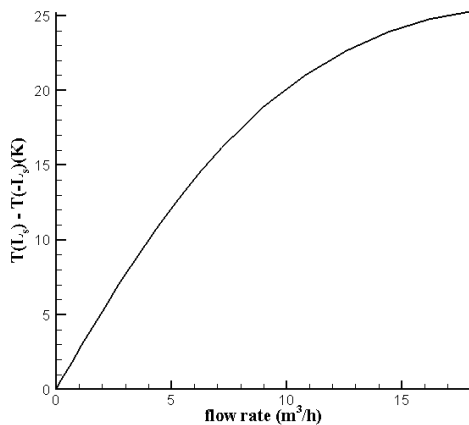


(الف)

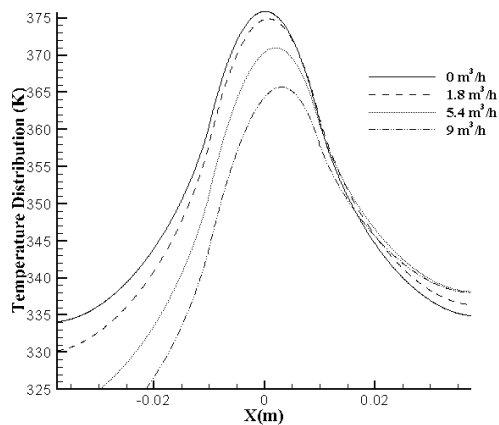


شکل ۲-۶: مشخصات لوله حسگر $D_{in} = 1mm, D_{out} = 1.2mm, L = 37.5mm, L_s = 20mm$ (الف) توزیع دما در طول لوله حسگر (ب) نمودار اختلاف دمای دو حسگر بر حسب جریان ورودی به جریان سنج

(ب)



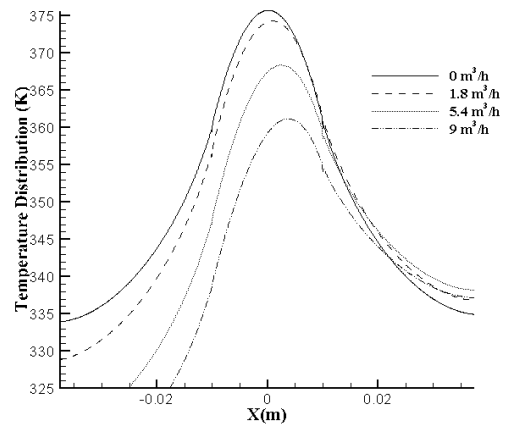
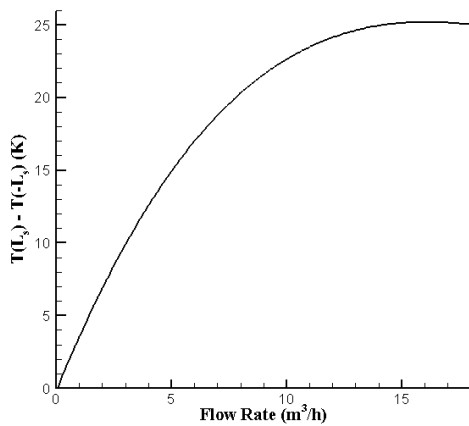
(الف)



شکل ۳-۶: مشخصات لوله حسگر $D_{in} = 1.4mm, D_{out} = 1.6mm, L = 37.5mm, L_s = 20mm$ (الف) توزیع دما در طول لوله حسگر (ب) نمودار اختلاف دمای دو حسگر بر حسب جریان ورودی به جریان سنج

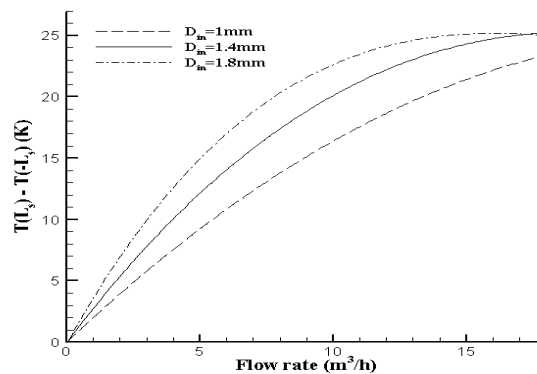
(ب)

(الف)



شکل ۴-۶: مشخصات لوله حسگر $D_{in} = 1.8mm, D_{out} = 2mm, L = 37.5mm, L_s = 20mm$ (الف) توزیع دما در طول لوله حسگر (ب) نمودار اختلاف دمای دو حسگر بر حسب جریان ورودی به جریان سنج

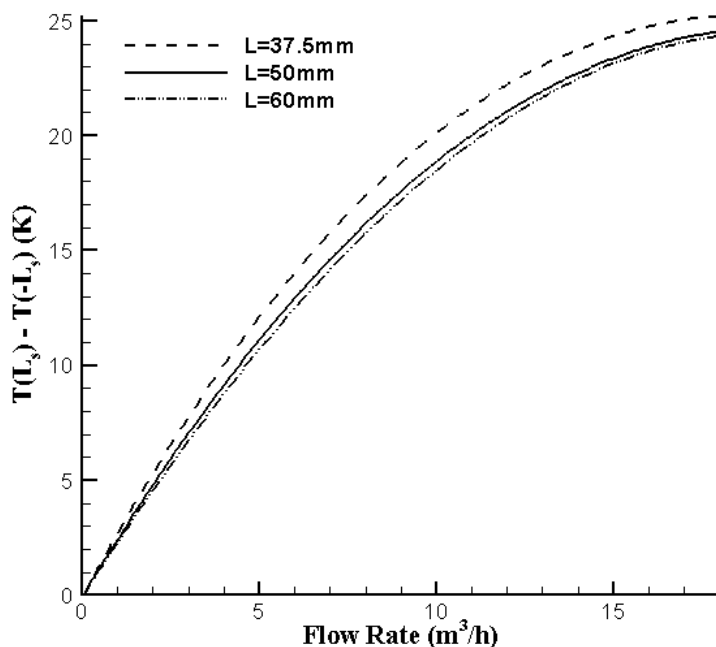
همان طور که در شکل ۵-۶ مشاهده می شود با افزایش قطر لوله حسگر بازه کاری جریان سنج کاهش می یابد اما این افزایش باعث افزایش حساسیت و در نتیجه افزایش دقت جریان سنج حرارتی می شود.



شکل ۵-۶: مقایسه بازه خطی و حساسیت جریان سنج برای قطرهای متفاوت لوله حسگر $L = 37.5mm, L_s = 20mm$

۴-۶ تاثیر طول لوله حسگر

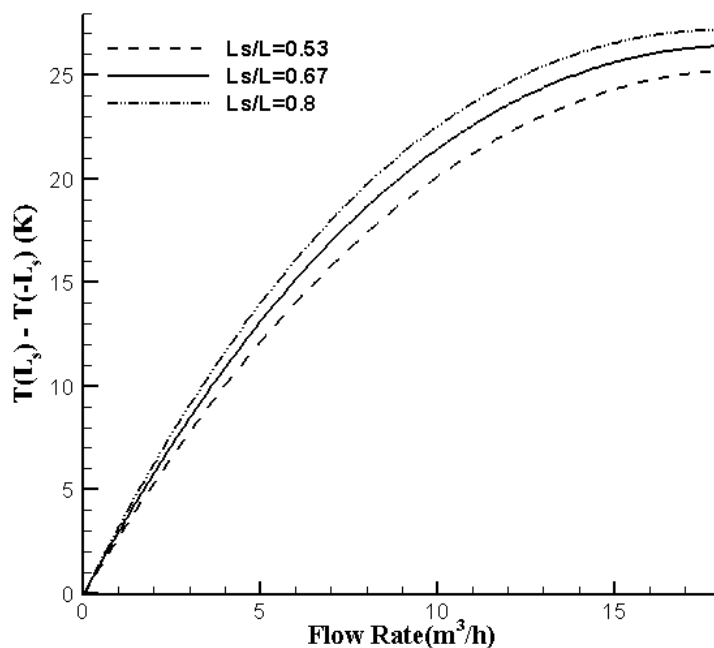
با توجه به شکل ۶-۶ تغییرات طول لوله حسگر تاثیر چندانی بر بازه کاری جریان سنج ندارد اما افزایش طول لوله باعث کاهش حساسیت جریان سنج می شود.



شکل ۶-۶: مقایسه نمودار اختلاف دمای دو حسگر بر حسب جریان برای طول‌های مختلف لوله حسگر

۵-۶ تاثیر مکان حسگر

همان گونه که در شکل ۶-۷ نشان داده شده است تغییرات مکان حسگر تاثیر ناچیزی بر بازه کاری جریان سنج دارد و در این بازه کاری تاثیر چندانی هم بر حساسیت جریان سنج ندارد.



شکل ۶-۷: بررسی اثر مکان حسگر در لوله حسگر با $L = 37.5\text{mm}$

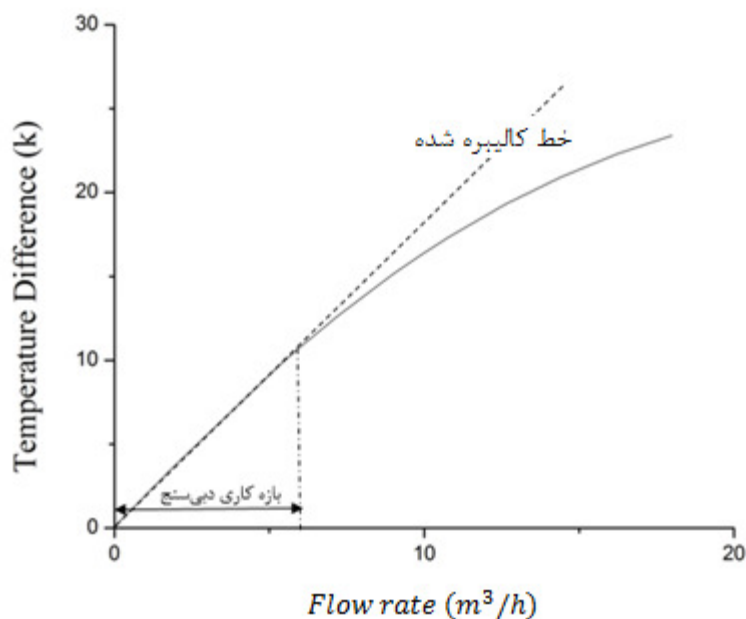
۶-۶ انتخاب هندسه مناسب

با توجه به شکل ۶-۵ تنها جریان سنج با قطر داخلی لوله حسگر ۱ میلی‌متر می‌تواند جایگزین کنتورهای خانگی G4 که در بازه کاری ۰.۱ تا ۶ متر مکعب بر ساعت کار می‌کند گردد و بازه خطی با قطرهای بیشتر بازه کاری این نوع کنتورها را پوشش نمی‌دهد. همچنین با توجه به کاهش حساسیت با افزایش طول لوله حسگر طول ۳۷.۵ میلی‌متر را به عنوان انتخاب نهایی برمی‌گزینیم.

۶-۶-۱ به دست آوردن رابطه خطی جریان جرمی

شکل ۶-۸ اختلاف دمای دو حسگر بر حسب جریان ورودی به جریان سنج را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل مشخص است در بازه ۰ تا ۶ متر مکعب بر ساعت رفتار نمودار را می‌توان با یک نمودار

خطی تخمین زد. بنابراین در این بازه می توان از تابع خط کالیبره شده برای محاسبه جریان بر حسب اختلاف دما استفاده کرد.



شکل ۸-۶: بازه خطی برای طول و قطر انتخاب شده برای لوله حسگر

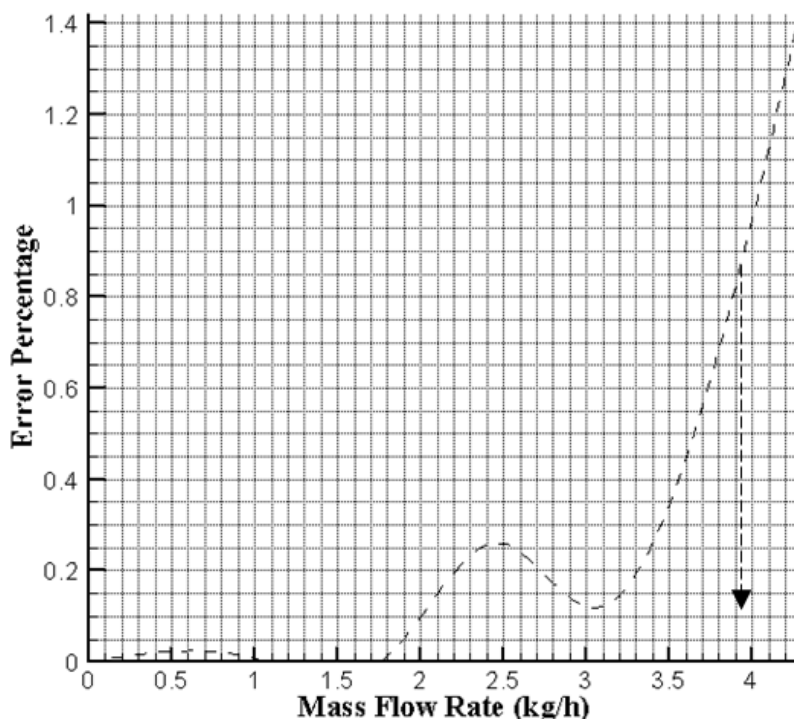
بر اساس داده‌های گرفته شده از این نمودار عکس شیب خط کالیبره برابر با ۰.۵۷۱ به دست آمده است. برای بدست آوردن رابطه جریان جرمی کافیسست ضریب بدست آمده را در چگالی گاز در شرایط $P = 1atm, T = 298k$ که شرایط ورودی گاز به جریان سنج در نظر گرفته شده است ضرب کنیم تا رابطه جریان جرمی بر حسب دما به دست آید.

$$\dot{m} = 0.571 \times 0.6536 \times \Delta T = 0.3732 \times \Delta T \quad (1-6)$$

۲-۶-۶ محاسبه خطای معادله برازش شده با مقدار شبیه‌سازی

با بررسی شکل ۸-۶ واضح است که خطایی به دلیل تخمین مقدار جریان جرمی با معادله خط به وجود می‌آید. شکل ۹-۶ درصد این خطا بر حسب جریان جرمی نشان می‌دهد. واضح است که مقدار این

خطا تا جریان ۳.۹۲ کیلوگرم بر ساعت (۶ متر مکعب بر ساعت) ناچیز و حداکثر حدود ۰.۸۳٪ در صورتی که خطای میانگین در این بازه ۰.۲۱٪ می‌باشد.



شکل ۶-۹: درصد خطای ایجادشده به دلیل تخمین نمودار با معادله خط

۳-۶-۶ محاسبه عدم قطعیت در اندازه‌گیری

عدم قطعیت در اندازه‌گیری جریان در جریان‌سنج‌های جرمی حرارتی به دلیل دقت حسگرهای استفاده شده و اختلاف توان اسمی و واقعی گرمکن می‌باشد. در این مطالعه دقت اندازه‌گیری حسگرها برابر 0.1°C و اختلاف توان اسمی و واقعی گرمکن برابر 0.1 W فرض شده است. در این مطالعه از روش کلاین-مک کلینتوک^۱ [۳۴] برای محاسبه عدم قطعیت استفاده شده است. بر اساس این روش مقدار عدم قطعیت به صورت زیر محاسبه می‌شود:

¹ Kline-McClintock

$$\pm F = \left(\left(\frac{dF}{dx_1} \varepsilon_1 \right)^2 + \left(\frac{dF}{dx_2} \varepsilon_2 \right)^2 + \dots \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2-6)$$

که در این رابطه F کمیتی است که اندازه‌گیری می‌شود، x کمیت‌های تاثیرگذار در کمیت اندازه‌گیری شده و ε دامنه تغییرات مربوط به هر کمیت تاثیرگذار می‌باشد.

$$\begin{cases} F = \dot{m} \\ x_1 = \Delta T \end{cases} \rightarrow \frac{d\dot{m}}{d(\Delta T)} = 0.3732 \quad \varepsilon_1 = 0.1^\circ\text{C} \quad (3-6)$$

$$\begin{cases} F = \dot{m} \\ x_2 = p_h \end{cases} \rightarrow \frac{d\dot{m}}{dp_h} = 0.19 \quad \varepsilon_2 = 0.1\text{w}$$

$$\begin{cases} F = \dot{m} \\ x_2 = c \end{cases} \rightarrow \frac{d\dot{m}}{dc} = 10.5 \quad \varepsilon_2 = 0.0021$$

در رابطه (۳-۶) p_h توان گرمکن می‌باشد. برای محاسبه $\frac{d\dot{m}}{dp_h}$ مساله برای ۰.۱ وات بالاتر و پایین‌تر از

توان اسمی گرمکن حل شده و سپس در یک دمای ثابت مقدار $\frac{d\dot{m}}{dp_h}$ محاسبه شده است. همچنین مقدار

از معادله خطی رابطه (۱-۶) به دست آمده است.

$$\begin{aligned} \pm \dot{m} &= (2 \times (0.3732 \times 0.1)^2 + (0.19 \times 0.1)^2 + (10.5 \times 0.0021)^2)^{\frac{1}{2}} \\ &= \pm 0.0603 \text{ kg/h} \end{aligned} \quad (4-6)$$

همان‌گونه که گفته شد حداکثر جریان جرمی برابر با ۳.۹۲ کیلوگرم بر ساعت می‌باشد بنابراین

درصد عدم قطعیت به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\frac{0.0603}{3.92} \times 100 = 1.54\% \quad (5-6)$$

فصل هفتم

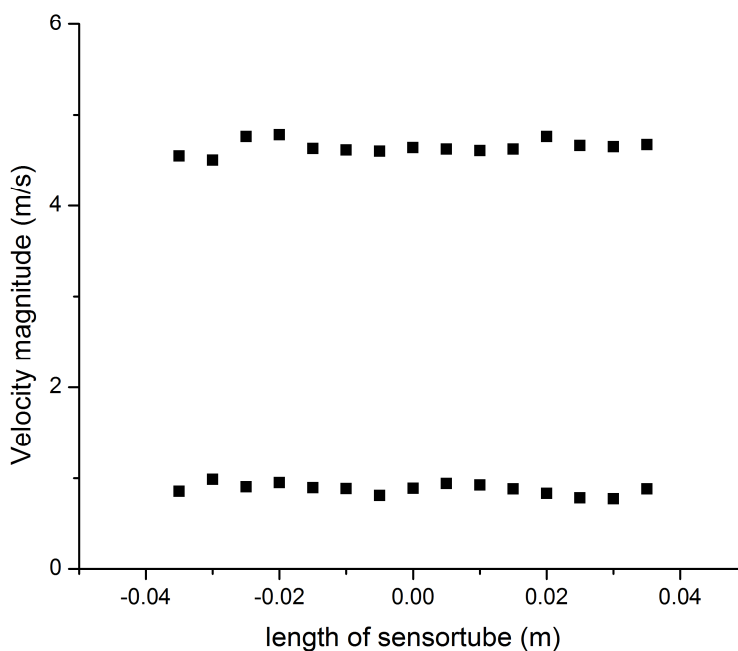
نتایج شبیه سازی سه بعدی

۱-۷ مقدمه

در این قسمت نتایج شبیه‌سازی سه‌بعدی جریان سنج جرمی حرارتی برای گاز متان آورده شده است و اثر پارامترهای مختلف بررسی شده است.

۲-۷ بررسی شرایط جریان

همان‌طور که گفته شد جریان در لوله حسگر باید آرام و کاملاً توسعه یافته هیدرودینامیکی باشد. شکل ۱-۷ سرعت سیال عبوری در مقطع‌های مختلف لوله حسگر را نشان می‌دهد. واضح است که سرعت هر مقطع در طول لوله تقریباً تغییری نمی‌کند بنابراین می‌توان گفت که شرط توسعه‌یافتگی برقرار است. همچنین با بررسی عدد رینولدز مقدار این عدد در کل جریان سنج حداکثر ۸۵.۷۴ بوده که نشان می‌دهد شرط آرام بودن جریان نیز برقرار است.

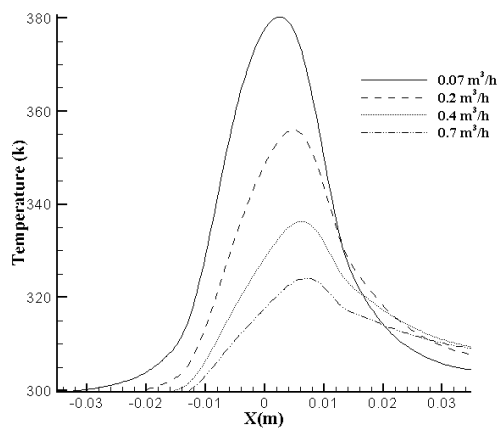
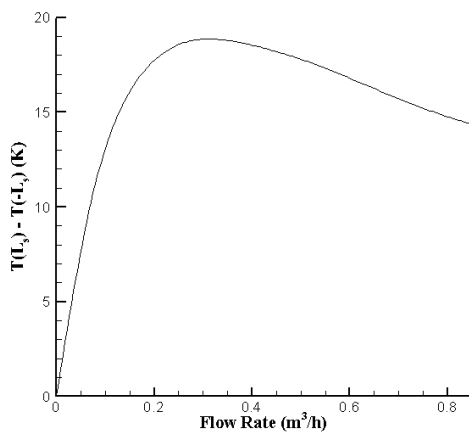


شکل ۱-۷: سرعت سیال در دو مقطع مختلف لوله حسگر بر حسب طول لوله

۳-۷ بررسی تاثیر قطر لوله حسگر

(ب)

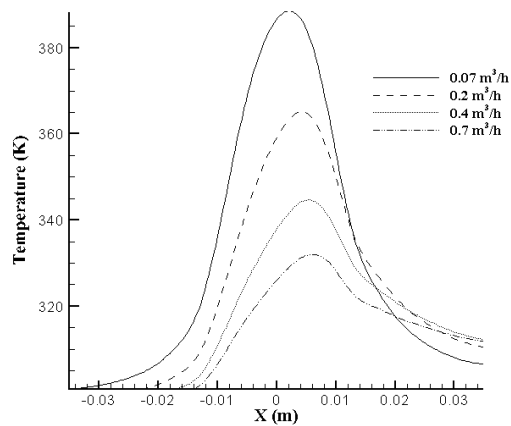
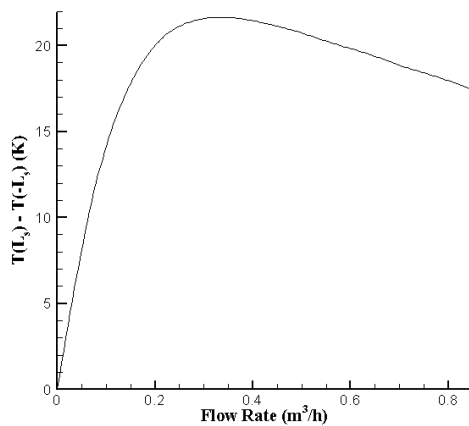
(الف)



شکل ۳-۷: مشخصات لوله حسگر $D_{in} = 1mm, D_{out} = 1.2mm, L = 37.5mm, L_s = 20mm$ (الف) توزیع دما در طول لوله حسگر (ب) نمودار اختلاف دمای دو حسگر بر حسب جریان ورودی به جریان سنج

(ب)

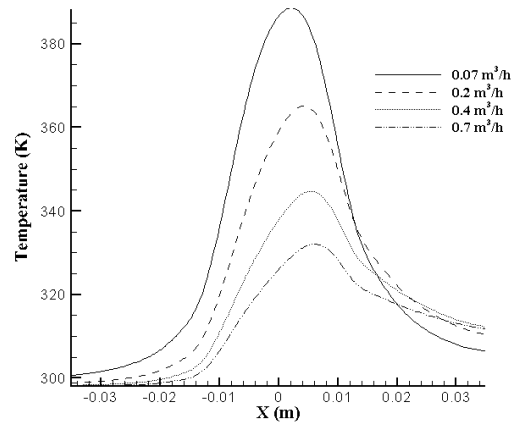
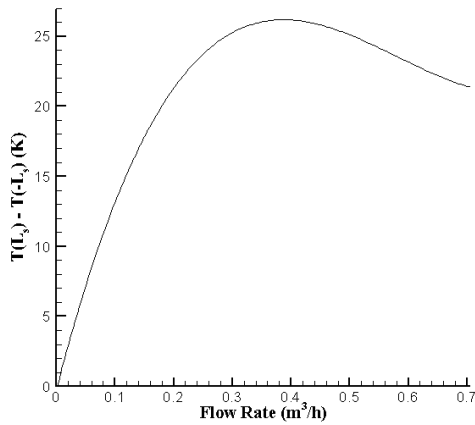
(الف)



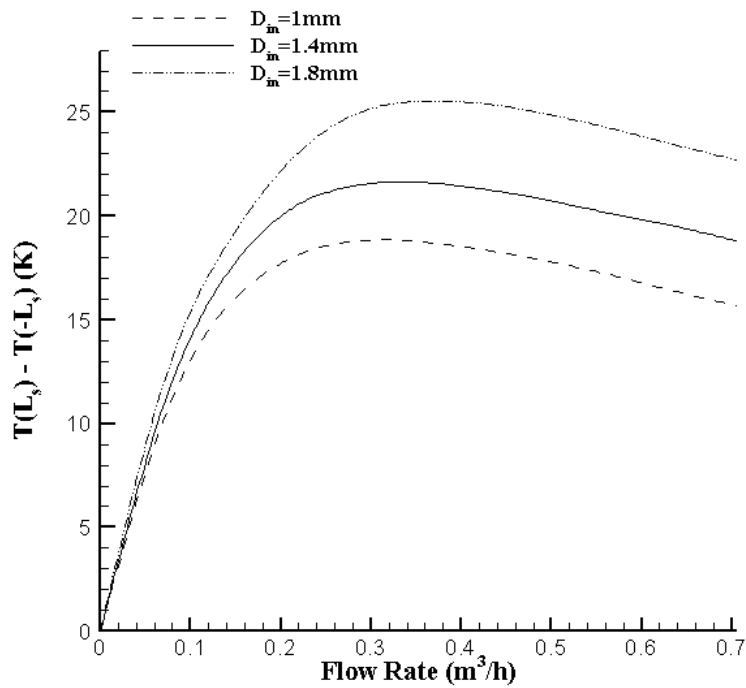
شکل ۳-۷: مشخصات لوله حسگر $D_{in} = 1.4mm, D_{out} = 1.6mm, L = 37.5mm, L_s = 20mm$ (الف) توزیع دما در طول لوله حسگر (ب) نمودار اختلاف دمای دو حسگر بر حسب جریان ورودی به جریان سنج

(ب)

(الف)



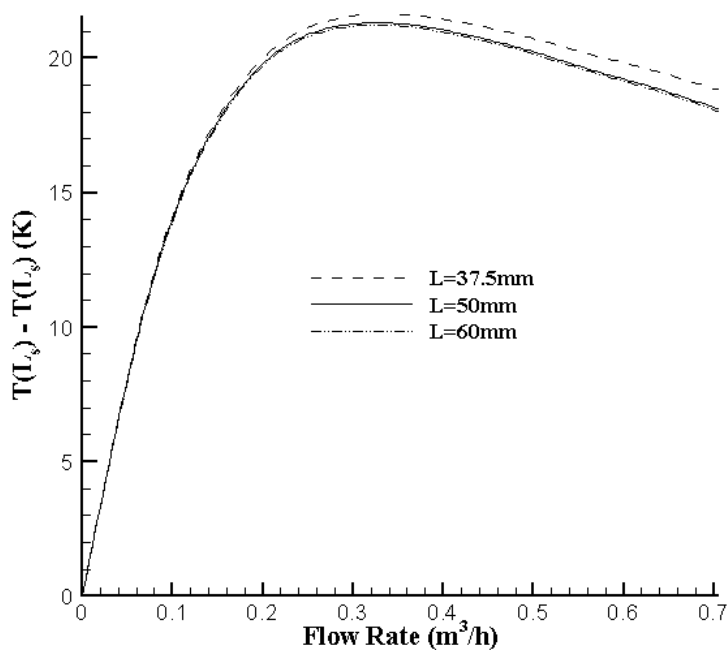
شکل ۴-۷: مشخصات لوله حسگر $D_{in} = 1.8\text{mm}$, $D_{out} = 2\text{mm}$, $L = 37.5\text{mm}$, $L_s = 20\text{mm}$ (الف) توزیع دما در طول لوله حسگر ب) نمودار اختلاف دمای دو حسگر بر حسب جریان ورودی به جریان سنج در شکل ۵-۷ واضح است که با افزایش قطر لوله حسگر بازه کاری کاهش اما حساسیت جریان سنج افزایش می یابد.



شکل ۵-۷: مقایسه بازه خطی و حساسیت جریان سنج برای قطرهای متفاوت لوله حسگر $L = 37.5\text{mm}$, $L_s = 20\text{mm}$

۴-۷ تاثیر طول لوله حسگر

با توجه به شکل ۶-۷ تغییرات طول لوله حسگر تاثیر چندانی بر بازه کاری جریان سنج ندارد اما افزایش طول لوله اندکی باعث کاهش حساسیت جریان سنج می شود.



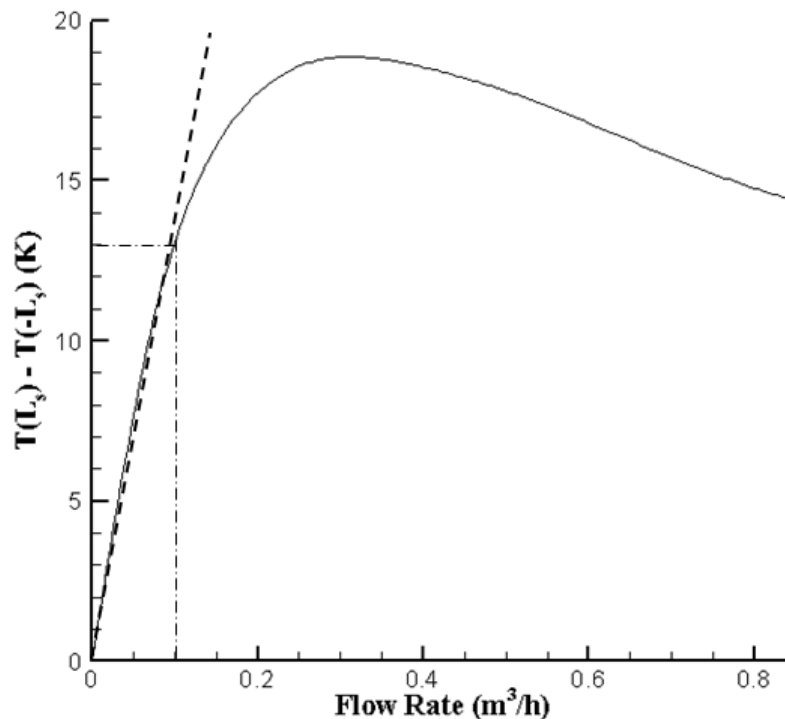
شکل ۶-۷: مقایسه نمودار اختلاف دمای دو حسگر بر حسب جریان برای طول‌های مختلف لوله حسگر

۵-۷ انتخاب هندسه مناسب

همانند قسمت حل دوبعدی بازهم بیشترین جریان قابل اندازه‌گیری با جریان سنج با قطر لوله حسگر ۱ میلی‌متر صورت می‌گیرد اما با توجه به اینکه برای جلوگیری از هزینه محاسباتی بسیار بالا تعداد لوله‌های قسمت آرام‌ساز با نسبت $\frac{1}{30}$ قرار داده شده جریان قابل اندازه‌گیری ۳۰ برابر مقدار نشان‌داده شده در شکل ۷-۷ می‌باشد.

۷-۵-۱ به دست آوردن معادله خطی جریان گرمی

شکل ۷-۷ اختلاف دمای دو حسگر بر حسب جریان ورودی به جریان سنج را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل مشخص است در بازه ۰ تا ۰.۱ متر مکعب بر ساعت رفتار نمودار را می‌توان با یک نمودار خطی تخمین زد. بنابراین در این بازه می‌توان از تابع خطی کالیبره شده برای محاسبه جریان بر حسب اختلاف دما استفاده کرد.



شکل ۷-۷: بازه خطی برای هندسه انتخاب شده

با توجه به نمودار حداکثر اختلاف دما در جریان ۰.۱ متر مکعب بر ساعت برابر ۱۳ کلوین می‌باشد. بنابراین ضریب معادله خطی جریان حجمی بر حسب اختلاف دما برابر ۰.۰۰۸ به دست می‌آید. برای به دست آوردن رابطه جریان گرمی کفایت ضریب به دست آمده در چگالی متان در شرایط ورودی یعنی

$P = 1atm, T = 298k$ ضرب شود.

$$\dot{m} = 0.008 \times 0.6536 \times \Delta T = 0.005 \times \Delta T \quad (1-7)$$

همانطور که گفته شد جریان واقعی قابل اندازه گیری ۳۰ برابر این مقدار می باشد بنابراین رابطه

خطی جریان جرمی بر حسب اختلاف دما برای هندسه انتخاب شده به صورت زیر می باشد:

$$\dot{m} = 0.005 \times 30 \times \Delta T = 0.15 \times \Delta T \quad (2-7)$$

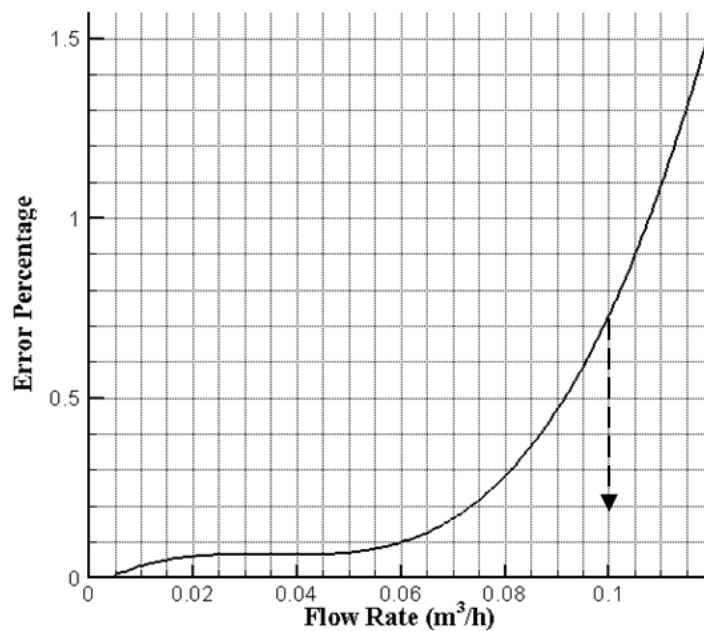
۲-۵-۷ محاسبه خطای معادله خطی برازش شده با مقدار شبیه سازی

با بررسی واضح است که خطایی به دلیل تخمین مقدار جریان جرمی با معادله خط به وجود می-

آید. شکل ۸-۷ درصد این خطا بر حسب جریان جرمی نشان می دهد. واضح است که مقدار این خطا تا

جریان حجمی ۰.۱ متر مکعب بر ساعت ناچیز و حداکثر حدود ۰.۷٪ و خطای میانگین حدود ۰.۳٪ می-

باشد.



شکل ۸-۷ : درصد خطای ایجاد شده به دلیل تخمین نمودار با معادله خط

۳-۵-۷ محاسبه عدم قطعیت در اندازه‌گیری

همانند قسمت دویعدی از رابطه کلاین - مک کلینتوک عدم قطعیت به صورت زیر محاسبه می‌شود

$$\begin{cases} F = \dot{m} \\ x_1 = \Delta T \end{cases} \rightarrow \frac{d\dot{m}}{d(\Delta T)} = 0.15 \quad \varepsilon_1 = 0.1^\circ\text{C}$$

$$\begin{cases} F = \dot{m} \\ x_2 = p_h \end{cases} \rightarrow \frac{d\dot{m}}{dp_h} = 0.01 \quad \varepsilon_2 = 0.1w \quad (۳-۷)$$

$$\begin{cases} F = \dot{m} \\ x_2 = c \end{cases} \rightarrow \frac{d\dot{m}}{dc} = 13 \quad \varepsilon_2 = 0.003$$

بنابراین عدم قطعیت جریان جرمی و درصد آن برابر است با:

$$\begin{aligned} \pm \dot{m} &= (2 \times (0.15 \times 0.1)^2 + (0.01 \times 0.1)^2 + (13 \times 0.003)^2)^{\frac{1}{2}} & (۴-۷) \\ &= 0.0444 \text{ kg/h} \end{aligned}$$

$$\frac{0.044}{1.97} \times 100 = 2.2\% \quad (۵-۷)$$

فصل هشتم

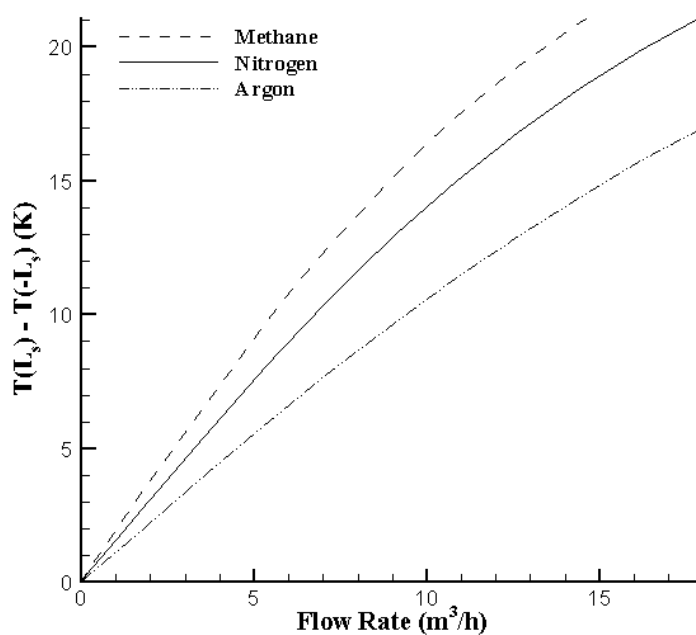
بررسی تاثیر ترکیب گازهای متفاوت و فشار کاری در اندازه گیری جریان

۱-۸ مقدمه

در این فصل ابتدا اندازه‌گیری جریان برای گازهای نیتروژن، متان و آرگون و سپس برای ترکیب-های مختلف گاز طبیعی مانند گازهای طبیعی ترکمن، پارس جنوبی، خانگیران و پالایشگاه بیدبلند مورد بررسی قرار گرفته است.

۲-۸ مقایسه اندازه‌گیری جریان برای گازهای نیتروژن، متان و آرگون

شکل ۱-۸ نمودار اختلاف دما بر حسب جریان ورودی به جریان‌سنج را برای سه گاز متفاوت متان، نیتروژن و آرگون نشان می‌دهد. مشخصات فیزیکی گازهای نیتروژن، متان و آرگون در جدول ۱-۸ آمده است.

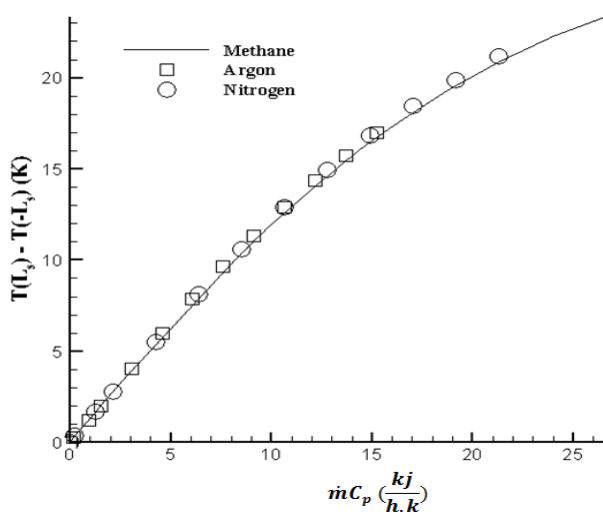


شکل ۱-۸ : نمودار اختلاف دمای دو حسگر بر حسب جریان برای گازهای متان، نیتروژن و آرگون

جدول ۱-۸: مشخصات فیزیکی گازهای متان، نیتروژن و آرگون در $P = 1\text{atm}, T = 25^\circ\text{C}$

گاز	مشخصات فیزیکی	چگالی kg/m^3	ظرفیت گرمایی ویژه $\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$
متان		۰.۶۵۳۶	۲.۲۲۲
نیتروژن		۱.۱۳۸	۱.۰۴
آرگون		۱.۶۲۲	۰.۵۲

با توجه به شکل ۲-۸ که اختلاف دمای دو حسگر بر حسب نرخ ظرفیت گرمایی را نشان می‌دهد واضح است که اگر معادله خطی را به صورت رابطه (۱-۸) بنویسیم ضریب ثابت C برای همه گازها در بازه خطی ثابت است. بنابراین با داشتن ظرفیت گرمایی ویژه هر گاز می‌توان جریان سنج جرمی را برای آن گاز مورد استفاده قرار داد. بنابراین بازه خطی بر اساس نرخ ظرفیت گرمایی برای همه گازها ثابت و فقط به هندسه دبی سنج بستگی دارد.



شکل ۲-۸: نمودار اختلاف دمای دو حسگر بر حسب نرخ ظرفیت گرمایی

$$mC_p = c \times \Delta T$$

(۱-۸)

۳-۸ استفاده از جریان سنج جرمی برای گازهای طبیعی با ترکیبات متفاوت

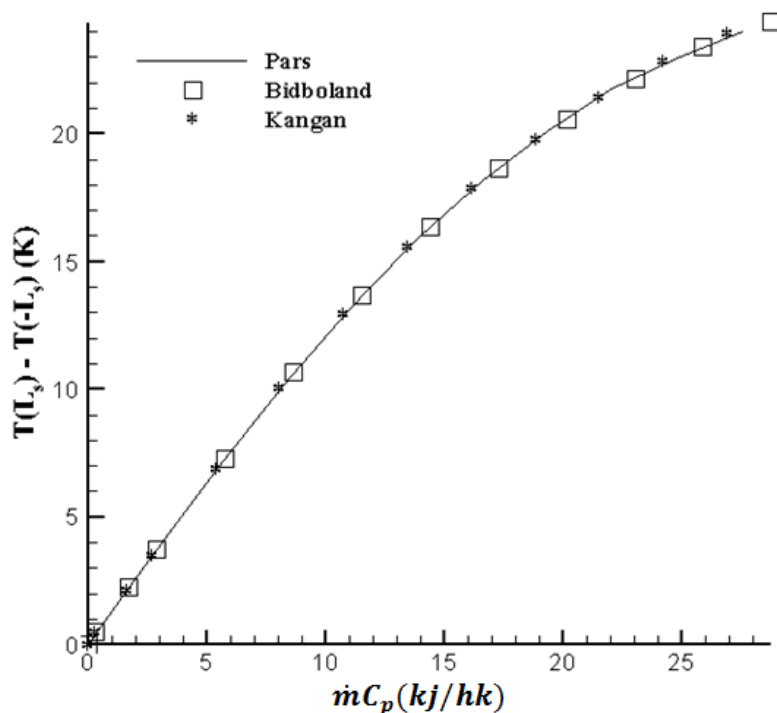
گاز طبیعی عمدتاً از متان (CH_4) یعنی ساده‌ترین نوع هیدروکربن و هیدروکربن‌های پیچیده‌تر و سنگین‌تری چون اتان (C_2H_6)، پروپان (C_3H_8) و بوتان (C_4H_{10}) تشکیل شده‌است. حال آنکه گازهای سنگین‌تر اجزای بسیار کوچکی را در ترکیب گاز طبیعی شامل می‌شوند همچنین ترکیباتی از قبیل H_2S, N_2, CO_2 نیز همراه گاز طبیعی یافت می‌شوند که درصد آنها در مخازن مختلف و حتی در قسمت‌های مختلف از یک مخزن، با یکدیگر متفاوت است. در جدول ۲-۸ ترکیبات سه نمونه از رایج‌ترین گازهای طبیعی ایران آورده شده است. لازم به ذکر است اطلاعات مربوط به ترکیبات میادین گازی از طریق سایت شرکت ملی گاز ایران استخراج شده است [۳۵].

جدول ۸-۲: درصد مولی ترکیبات سه نمونه از گاز طبیعی

ترکیبات	پارس جنوبی	بیدیلند	کنگان
CH_4	۸۷	۸۵.۰۱	۹۰.۰۴
C_2H_6	۵.۴	۹.۳۸	۳.۶۹
C_3H_8	۱.۷	۳.۴۹	۰.۹۳
$I - C_4H_{10}$	۰.۳	۰.۳۴	۰.۲۰
$N - C_4H_{10}$	۰.۴۵	۰.۶۵	۰.۲۹
$I - C_5H_{12}$	۰.۱۳	۰.۱	۰.۱۴
$N - C_5H_{12}$	۰.۱۱	۰.۰۹	۰.۰۸
$N - C_6H_{14}$	۰.۰۷	۰.۰۹	۰.۱۴
C_7H_{16}	۰.۰۳	۰.۰	۰.۰۱
N_2	۳.۱	۰.۴۴	۴.۴۸
CO_2	۱.۸۵	۰.۴۱	۰.۰
H_2S	۰.۰	۰.۰	۰.۰
H_2O	۰.۰	۰.۰	۰.۰

همان‌طور که شکل ۸-۳ نشان می‌دهد ثابت معادله خطی رابطه (۸-۱) برای هر سه ترکیب گاز

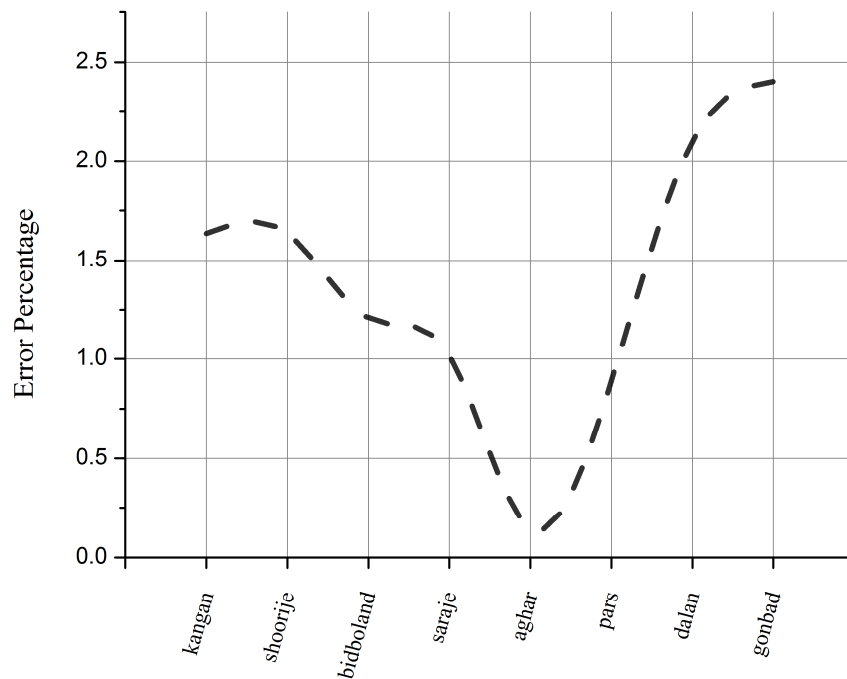
طبیعی نیز در بازه کاری برابر است.



شکل ۸-۳: نمودار اختلاف دمای دو حسگر بر حسب نرخ ظرفیت گرمایی برای سه ترکیب گاز طبیعی متفاوت با توجه به ثابت بودن شیب نمودار اختلاف دما بر حسب نرخ ظرفیت گرمایی و از آن جا که در مصارف گاز خانگی در بازه‌های زمانی مختلف از ترکیبات مختلف استفاده می‌شود می‌توان با استفاده از تعریف ظرفیت گرمایی ویژه میانگین برای جریان سنج از آن برای ترکیبات گاز طبیعی مختلف استفاده کرد. شکل ۸-۴ درصد خطای جریان سنج برای استفاده از ترکیبات مختلف گاز طبیعی ایران با استفاده از ظرفیت گرمایی ویژه میانگین را نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشخص است حداکثر خطا حدود ۲.۵ درصد می‌باشد.

جدول ۸-۳: ظرفیت گرمایی ویژه گازهای طبیعی مختلف در $P = 1atm, T = 25^{\circ}C$

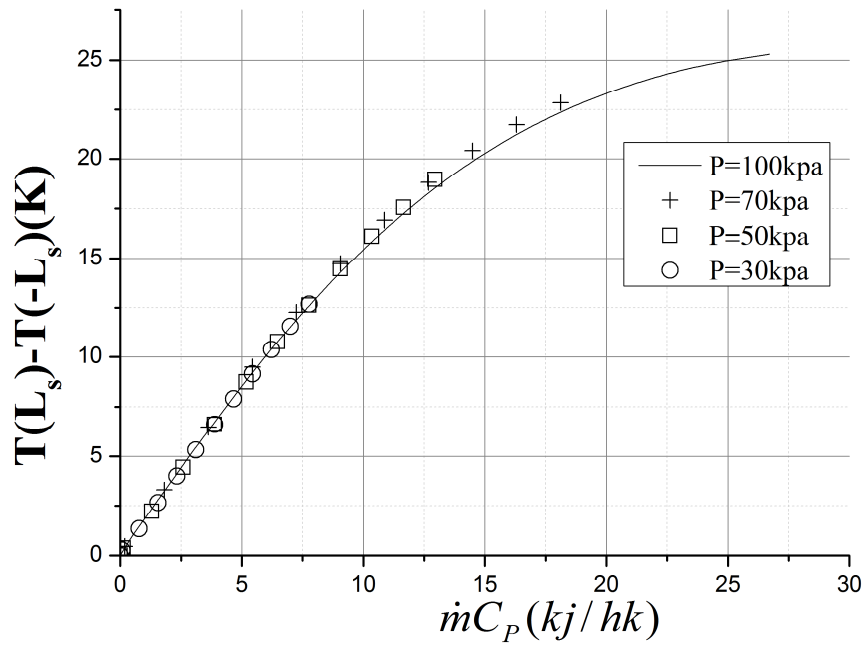
دالان	آغار	سراجه	گنبد	کنگان	بیدبلند	شوریجه	پارس	گاز طبیعی
۲.۰۰۴	۲.۰۴۳	۲.۰۶۷	۱.۹۹۸	۲.۰۸	۲.۰۷۱	۲.۰۸	۲.۰۲۸	$C_p \left(\frac{kJ}{kg \cdot K} \right)$



شکل ۴-۸ : درصد خطای ناشی از استفاده از ظرفیت گرمایی ویژه میانگین برای گازهای طبیعی مختلف

۴-۸ تاثیر فشار کاری

یکی از پارامترهای مهم در اندازه‌گیری جریان گاز طبیعی فشار کاری فرایند است و از آنجا که تغییرات فشار باعث ایجاد خطا در اندازه‌گیری جریان جرمی می‌شود اما همان‌طور که در شکل ۵-۸ نیز مشخص است تغییرات فشار تاثیری در اندازه‌گیری جریان بوسیله جریان‌سنج‌های حرارتی ندارد.



شکل ۵-۸: نمودار اختلاف دمای دو حسگر بر حسب نرخ ظرفیت گرمایی برای فشارهای کاری مختلف

فصل نهم

نتیجہ گیری و پیشہدات

با شبیه سازی و حل عددی جریان سنج حرارتی لوله موین نتایج زیر حاصل شد:

- با افزایش قطر لوله حسگر بازه خطی جریان سنج کاهش و حساسیت آن افزایش می یابد.
- کاهش طول لوله حسگر در بازه خطی تاثیر ناچیزی دارد اما اندکی حساسیت جریان سنج را بهبود می بخشد.
- مکان حسگر در بازه خطی و حساسیت جریان سنج تاثیر ناچیزی دارد.
- تغییرات فشار تاثیر در اندازه گیری جریان بوسیله جریان سنج حرارتی ندارد.
- بازه کاری جریان سنج جرمی حرارتی به پارامترهای هندسه آن وابسته می باشد و به گاز مورد استفاده بستگی ندارد.
- با داشتن ظرفیت گرمایی ویژه یک گاز می توان از جریان سنج جرمی حرارتی برای هر گازی استفاده کرد.
- با استفاده از ظرفیت گرمایی ویژه میانگین ترکیبات مختلف گاز طبیعی می توان برای همه ترکیبات بدون نیاز به کالیبره کردن برای هر ترکیب استفاده کرد.

جریان سنج های حرارتی لوله موین برای اندازه گیری جریان های پایین استفاده می شود. این نوع جریان سنج ها به دلیل اندازه گیری جریان جرمی بسیار دقیق تر از جریان سنج های حجمی می باشد بنابراین به طور کلی می توان نتیجه گرفت که از این جریان سنج ها در شبکه توزیع خانگی گاز طبیعی که در جریان های پایین کار می کنند با دقت خیلی خوبی می توان استفاده کرد.

۲-۹ پیشنهادات

- مدل آزمایشگاهی ساخته شود.
- از مدل‌های دیگر آرامساز برای افزایش بازه خطی استفاده شود.
- حالت گذرا بررسی شود.

- [1] G. Ficco, "Metrological performance of diaphragm gas meters in distribution networks," *Flow Meas. Instrum.*, vol. 37, pp. 65–72, Jun. 2014.
- [2] P. Hiismaeki, "Method and device for monitoring of a gas flow, in particular of a natural-gas flow." 08-Jul-1993.
- [3] K. Komiya, F. Higuchi, and K. Ohtani, "Characteristics of a thermal gas flowmeter," *Rev. Sci. Instrum.*, vol. 59, no. 3, p. 477, 1988.
- [4] L. D. Hinkle, "Toward understanding the fundamental mechanisms and properties of the thermal mass flow controller," *J. Vac. Sci. Technol. A Vacuum, Surfaces, Film.*, vol. 9, no. 3, p. 2043, May 1991.
- [5] S. J. Kim and S. P. Jang, "Experimental and numerical analysis of heat transfer phenomena in a sensor tube of a mass flow controller," vol. 44, pp. 1711–1724, 2001.
- [6] I. Y. Han, D.-K. Kim, and S. J. Kim, "Study on the transient characteristics of the sensor tube of a thermal mass flow meter," *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 48, no. 13, pp. 2583–2592, Jun. 2005.
- [7] D.-K. Kim, I. Y. Han, and S. J. Kim, "Study on the steady-state characteristics of the sensor tube of a thermal mass flow meter," *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 50, no. 5–6, pp. 1206–1211, Mar. 2007.
- [8] T. H. Kim, D.-K. Kim, and S. J. Kim, "Study of the sensitivity of a thermal flow sensor," *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 52, no. 7–8, pp. 2140–2144, Mar. 2009.
- [9] M. Viswanathan, R. Rajesh, and a Kandaswamy, "Design and development of thermal mass flowmeters for high pressure applications," *Flow Meas. Instrum.*, vol. 13, no. 3, pp. 95–102, Jun. 2002.
- [10] O. Sazhin, "Novel mass air flow meter for automobile industry based on thermal flow microsensor. I. Analytical model and microsensor," *Flow Meas. Instrum.*, vol. 30, pp. 60–65, Apr. 2013.
- [11] O. Sazhin, "Novel mass air flow meter for automobile industry based on thermal flow microsensor. II. Flow meter, test procedures and results," *Flow Meas. Instrum.*, vol. 35, pp. 48–54, Mar. 2014.

- [12] R. C. Baker and C. Gimson, "The effects of manufacturing methods on the precision of insertion and in-line thermal mass flowmeters," *Flow Meas. Instrum.*, vol. 12, no. 2, pp. 113–121, Apr. 2001.
- [13] F.J. Bartos, "Tame flow disturbances with the thermal massflow mete," *Control Eng. Int.*, pp. 54–55, 1995.
- [14] P. L. K E Froya, "Density and Calorific Value Measurement in Natural Gas Using Ultrasonic Flow Meters," in *23rd International North Sea Flow Measurement Workshop*, 2005.
- [15] N. R. Chapman and D. W. Etheridge, "A step change in domestic metering technology from leather diaphragms to ultrasonics," *Flow Meas. Instrum.*, vol. 5, no. 2, pp. 141–142, Apr. 1994.
- [16] C. D. Vasconcelos, S. R. Lourenço, A. C. Gracias, and D. A. Cassiano, "Network flows modeling applied to the natural gas pipeline in Brazil," *J. Nat. Gas Sci. Eng.*, vol. 14, pp. 211–224, Sep. 2013.
- [17] "<http://www.iraniangas.ir>."
- [18] گزارش سالیانه فعالیت های انجام شده در سال ۱۳۸۶ توسط دفتر پژوهش شرکت گاز استان خوزستان در دانشگاه شهید چمران اهواز .
- [19] "ISO 5167-1:2003 - Measurement of fluid flow by means of pressure differential devices inserted in circular cross-section conduits running full -- Part 1: General principles and requirements," *International Organization for Standardization*, 2003.
- [20] "ISO 5167-2:2003 - Measurement of fluid flow by means of pressure differential devices inserted in circular cross-section conduits running full -- Part 2: Orifice plates," *International Organization for Standardization*, 2003.
- [21] "ISO 5167-4:2003 - Measurement of fluid flow by means of pressure differential devices inserted in circular cross-section conduits running full -- Part 4: Venturi tubes," *International Organization for Standardization*, 2003.
- [22] "ISO 5167-3:2003 - Measurement of fluid flow by means of pressure differential devices inserted in circular cross-section conduits running full -- Part 3: Nozzles and Venturi nozzles," *International Organization for Standardization*, 2003.
- [23] I. Ftm, "1 . Introduction to Pitot Tube Flow Measurement," *paab tekno trading company* .
- [24] D. W.spitzer, *Industrial Flow Measurement*, 3rd ed. 2005.

- [25] T. Wang and R. Baker, "Coriolis flowmeters: a review of developments over the past 20 years, and an assessment of the state of the art and likely future directions," *Flow Meas. Instrum.*, vol. 40, pp. 99–123, Dec. 2014.
- [26] M. McMahon, "Thermal Core Technology White Paper Series A Tale of Two Thermals : Capillary & Immersible Introduction," 2008.
- [27] J. G. Olin, "INDUSTRIAL THERMAL MASS Parti : Principles of Operation," *Meas. Control*, no. 193, pp. 83–90, 1999.
- [28] R. P. Viswanath, B. Viswanathan, and M. V. C. Sastri, "Kinetics of reduction of Fe₂O₃ to Fe₃O₄ by the constant temperature differential thermal analysis method," *Thermochim. Acta*, vol. 16, no. 2, pp. 240–244, Aug. 1976.
- [29] P. Cappa, Z. Del Prete, and F. Marinozzi, "Experimental analysis of a new strain-gage signal conditioner based on a constant-current method," *Sensors Actuators A Phys.*, vol. 55, no. 2–3, pp. 173–178, Jul. 1996.
- [30] S. Agrawal, "CALIBRATION OF CAPILLARY TYPE THERMAL MASS FLOWMETER A PROJECT REPORT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT Bachelor of Technology," 2009.
- [31] John.G.Olin, "Capillary Tube Thermal Mass Flow Meters & Controllers A User ' s Guide," 2013.
- [32] William Graebel, *Advanced Fluid Mechanics | 978-0-12-370885-4 | Elsevier*. 2007.
- [33] E. L. Beronich, M. A. Abdi, and K. A. Hawboldt, "Prediction of natural gas behaviour in loading and unloading operations of marine CNG transportation systems," *J. Nat. Gas Sci. Eng.*, vol. 1, no. 1–2, pp. 31–38, Jul. 2009.
- [34] S.J.Kline;F.A.McClintock, "Describing Uncertainties in Single-Sample Experiments," *Mech. Eng.*, vol. 75, pp. 3–8, 1953.
- [35] "<http://www.NIGC.ir>."

Abstract

Accurate natural gas measurement is an important issue especially in domestic usage level in which the lack of accurate measurement is well sensed. On the other hand, thermal mass flow meters are widely used in industries such as semiconductor manufacturing and chemical processes. Capillary tube thermal mass flow meter is one of the most common types of thermal mass flow meters which are mostly used for low mass flow rates. In this work, the use of capillary tube mass flow meters for measuring residential natural gas consumption, where the flow rate is extremely low, was proposed. A capillary tube flow meter was simulated, two-dimensional steady state heat transfer in its sensor tube was numerically analyzed and the sensitivity of this type of flow meter to Methane, as natural gas is mainly constituted by Methane, was investigated. In order to validate the simulation approach and conditions taken in this study, the simulation was also accomplished for Nitrogen, for which experimental data was available in the literature, leading to satisfactory results. Considering all the possible effective parameters, the uncertainty of the flow meter was also calculated.

Keywords: Flow Metering, Natural Gas, Thermal Mass Flow meter, Capillary Tube



Shahrood University

Faculty Of Mechanical Engineering

**Designing capillary tube thermal Mass flowmeter for measuring low
flow rate natural gas and modelling in fluent**

Saman Parvizi

Supervisors:

Dr.Mahmood Farzaneh-Gord

Dr.Ali Jabbari Moghadam

February 2015