

تقدیم به:

مادر و پدر بزرگوارم: که دعای خیرشان سرمایه زندگی ام است.

همسر مهربانم: که در همه مراحل آرامش خاطر من بوده و هست.

و

خاله عزیزم: که هنوز در غم از دست دادنش اندوهگینم.

سپاسگزاری

از زحمات و راهنمایی‌های اساتید گرانقدر جناب آقای دکتر فرزانه‌گرد و جناب آقای دکتر هاشمی مرغزار و جناب آقای دکتر خوشنویس در طی سال گذشته، از اساتید داور این پروژه، جناب آقای دکتر مغربی و جناب آقای دکتر شاهمردان که زحمت مطالعه و بررسی آن را تقبل کرده‌اند. همچنین از شرکت گاز استان سمنان که حمایت مالی تحقیق حاضر را برعهده داشته و از مدیریت محترم بخش پژوهش و فناوری آن شرکت، جناب آقایان مهندس زرگر و همکار ایشان مهندس رئوف که با تحمل زحمات مجریان پروژه گامی بزرگ در انجام آن برداشته‌اند و سایر همکارانشان کمال تشکر و قدردانی به عمل می‌آید.

کمال تقدیر و تشکر را دارم

دانشجو تأیید می نماید که مطالب مندرج در این پایان نامه نتیجه تحقیقات خودش می باشد و در صورت استفاده از نتایج دیگران مرجع آن را ذکر نموده است.

کلیه حقوق مادی مترتب از نتایج مطالعات ، آزمایشات و نوآوری ناشی از تحقیق موضوع این پایان نامه متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد.

دی ماه یکهزار و سیصد و هشتاد و هفت

چکیده:

به طور کلی در بسیاری از صنایع، عمل اندازه‌گیری از اهمیت ویژه‌ای برخوردار می‌باشد و اندازه‌گیری جریان سیالات همواره یکی از رایجترین پارامترهای مورد اندازه‌گیری بوده است. در صنایع نفت و گاز و نیروگاه‌ها داشتن اطلاعات دقیق‌تر جهت تصمیم‌گیری‌های کلان، از آنجا که با فروش محصول سروکار دارند، توجه به سودآوری شرکتها باعث شده‌است که اندازه‌گیری جریان گاز از جایگاه بالایی برخوردار باشد. در این تحقیق با طراحی و ساخت یک نمونه اریفیس‌متر دقیق برای گاز طبیعی نرخ جرمی جریان اندازه‌گیری شده است. اریفیس‌متر با توجه به توصیه‌های استاندارد ISO ۵۱۶۷ ساخته شده و با گاز طبیعی شهر شاهرود و با استفاده از لوازم الکترونیکی دقیق جهت اندازه‌گیری پارامترهای دما، فشار و اختلاف فشار مورد بررسی و آزمایش قرار گرفته است. بدین منظور نرم‌افزاری جهت محاسبه قطر اریفیس، اختلاف فشار دو طرف اریفیس و نیز محاسبه نرخ جرمی جریان عبوری از اریفیس با انواع اتصالات فشاری، تدوین شده‌است. جهت محاسبات متنوع ذکر شده برای طراحی اریفیس، نیاز به یک سری خواص فیزیکی مخلوط گاز طبیعی مانند چگالی، ضریب تراکم‌پذیری ضریب ژول-تامسون، لزجت سیال و توان آیزنتروپیک بود که از معادله حالت ۸ AGA که طبق گزارش انجمن گاز آمریکا معتبرترین روش برای تعیین خواص گاز طبیعی می‌باشد، استفاده شده‌است. از آنجا که گاز طبیعی مخلوطی از عناصر هیدروکربنی و غیر آلی مختلف با کسر مولی‌های متفاوت می‌باشد، این معادله حالت تنها معادله‌ایست که اثرات نیروهای بین مولکولی عناصر مختلف را در نظر می‌گیرد. مقایسه خواص ترمودینامیکی بدست آمده از نرم‌افزار با نتایج عددی و تجربی دیگران تطابق خوبی را نشان می‌دهد. نتایج اندازه‌گیری شده برای نرخ جرمی جریان نیز خطایی در حدود ۱.۲ درصد با نتایج نرم‌افزار Meter Calc دارند.

لیست مقالات مستخرج از پایان نامه

- ۱- محمود فرزانه‌گرد، یونس بیات، شهرام هاشمی مرغزار، "محاسبه ظرفیت‌های حرارتی فشار ثابت و حجم ثابت و توان آیزنتروپیک مخلوط گاز طبیعی با استفاده از روش AGA۱ برای حوزه گازی شانول" هفدهمین کنفرانس سالانه مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران، اردیبهشت ۱۳۸۸.
- ۲- محمود فرزانه‌گرد، یونس بیات، "تعیین ضریب تراکم‌پذیری و ضریب ژول - تامسون گاز طبیعی با استفاده از روش AGA ۱"، دومین کنفرانس تخصصی ترمودینامیک ایران، دانشگاه علم و صنعت، ۲۲ اردیبهشت ۱۳۸۸.

3. M. Farzaneh Gord, M. Kargaran, Y. Bayat, S.H. Marghzar, "Investigation of Natural Gas Thermal Separation through a Vortex Tube", Journal of Cryogenics.

فهرست مطالب

فصل اول : مقدمه

- ۱-۱- اهمیت اندازه گیری ۲
- ۲-۱- برای اندازه گیری جریان گاز، کدام جریان سنج را انتخاب کنیم؟ ۴
- ۱-۲-۱- C.G.S ها ۵
- ۲-۲-۱- ایستگاه نیروگاهها ۶
- ۳-۲-۱- ایستگاههای پتروشیمی ۷
- ۳-۱- اهداف پژوهش ۸
- ۴-۱- ساختار پایان نامه ۹

فصل دوم : ابزار اندازه گیری اختلاف فشاری و مروری بر کارهای گذشته

- ۱-۲- مقدمه ۱۱
- ۱-۱-۲- فلومترهای جابجایی (Displacement Flowmeter) ۱۱
- ۲-۱-۲- فلومترهای استنتاجی (Inferential Flowmeter) ۱۲
- ۲-۲- فلومترهای اختلاف فشاری ۱۳
- ۱-۲-۲- گلوگاه دارای صفحه اریفیس دار ۱۴
- ۲-۲-۲- مشخصات اریفیس متر ۱۶

- ۱۹-۲-۳- گلوگاه نازل دار ۱۹
- ۲۲-۳- افت فشار دائمی ۲۲
- ۲۳-۴- اثرات وضعیت نصب بر عملکرد دستگاههای اندازه گیری جریان..... ۲۳
- ۲۴-۴-۱- تمهیداتی که در لوله کشی می بایست مد نظر قرار گیرد : ۲۴
- ۲۶-۴-۲- منابع اثرات نصب ۲۶
- ۳۵-۵- مروری بر کارهای گذشته ۳۵

فصل سوم : معرفی روش ۸ AGA و فرمول بندی روابط

- ۴۴-۱-۳- مقدمه ۴۴
- ۴۴-۱-۱- معادله حالت گاز ایده آل..... ۴۴
- ۴۵-۱-۲- معادله حالت Peng Robinson..... ۴۵
- ۴۶-۱-۳- معادله حالت ۸ AGA ۴۶
- ۴۶-۲-۳- روش ۸ AGA و روابط و معادلات مربوطه ۴۶
- ۴۷-۱-۲-۳- شرح و بسط روش ۸ AGA ۴۷
- ۴۹-۳-۳- عدم قطعیت ها ۴۹
- ۴۹-۱-۳-۳- عدم قطعیت روش D.C.M ۴۹
- ۴۹-۲-۳-۳- عدم قطعیت روش G.C.M ۴۹
- ۵۰-۳-۳-۳- توصیه ها ۵۰

- ۴-۳- روابط ریاضی مورد استفاده در حل مسأله..... ۵۱
- ۳-۴-۱- معادلات و روابط مربوط به روش D.C.M..... ۵۱
- ۳-۴-۲- تعیین ضریب تراکم پذیری و چگالی گاز طبیعی..... ۵۵
- ۳-۴-۳- تعیین ظرفیت های حرارتی و توان آیزنتروپیک..... ۵۶
- ۳-۴-۴- تعیین ضریب ژول- تامسون..... ۶۲
- ۳-۴-۵- تعیین ویسکوزیته..... ۶۵

فصل چهارم : معرفی استاندارد ISO ۵۱۶۷

- ۴-۱- مقدمه..... ۶۸
- ۴-۲- اصطلاحات مورد نیاز..... ۶۹
- ۴-۳- مشخصات صفحات اریفیس..... ۷۰
- ۴-۴- اتصالات فشاری]..... ۷۳
- ۴-۴-۱- اتصال فلنجی و نوع D/۲ & D..... ۷۳
- ۴-۴-۲- اتصالات گوشه ای (Corner Tapping)..... ۷۵
- ۴-۵-۱- اصول روشهای اندازه گیری..... ۷۶
- ۴-۵-۱- روش تعیین نسبت قطر β ۷۶
- ۴-۵-۲- اندازه گیری فشار استاتیک..... ۷۷
- ۴-۵-۳- اندازه گیری دما..... ۷۸
- ۴-۵-۴- نیازمندیهای عمومی برای اندازه گیری..... ۷۸

- ۶-۵-۴- نیازمندیهای نصب: ۷۹
- ۶-۴- بهبود دهنده (Flow Conditioner) و یکنواخت کننده (Straightener) ۸۱
- ۷-۴- محاسبه ضرایب و خطاهای مربوط به صفحه اریفیس ۸۳
- ۴-۷-۱- محدودیتهای استفاده از اتصالات فشاری ۸۳
- ۴-۷-۲- ضرایب ۸۴
- ۴-۷-۳- عدم قطعیت ها ۸۵
- ۴-۸- افت فشار دائمی ۸۵

فصل پنجم : توسعه نرم افزار طراحی اریفیس

- ۵-۱- مقدمه ۸۸
- ۵-۲- مراحل توسعه نرم افزار ۸۹
- ۵-۲-۱- مرحله اول : محاسبه چگالی و ضریب تراکم پذیری ۸۹
- ۵-۲-۲- مرحله دوم تعیین ظرفیت حرارتی، توان آیزنتروپیک، ویسکوزیته ، ژول تامسون ۹۱
- ۵-۲-۳- مرحله سوم : محاسبه نرخ جرمی جریان ۹۳
- ۵-۲-۴- مرحله چهارم : محاسبه قطر سوراخ اریفیس ۹۴
- ۵-۲-۵- مرحله پنجم : محاسبه اختلاف فشار ایجاد شده بین دو طرف صفحه اریفیس ۹۵

۱۲۵ ۷-۴-۲- معتمر سازی با نتایج آزمایشگاهی

۱۳۰ ۷-۵- نتایج آزمایشگاهی با گاز طبیعی شهر شاهرود

فصل هشتم : نتیجه گیری و ارائه پیشنهادات

۱۳۶ ۸-۱- جمع بندی

۱۳۹ ۸-۲- ارائه پیشنهادات

فهرست اشکال و نمودارها

فصل دوم:

- شکل ۱-۲ : یک نوع از ابزارهای اندازه گیری جابجایی..... ۱۲
- شکل ۲-۲: مکانیزم عملکرد اریفیس..... ۱۴
- شکل ۲-۳: نمودار افت فشار دائمی بعد از اریفیس..... ۱۵
- شکل ۲-۴: نمودار افت فشار دائمی بعد از گلوگاه نازل دار..... ۱۹
- شکل ۲-۵ : نمودار افت فشار دائمی بعد از لوله ونتوری..... ۲۱
- شکل ۲-۶: نحوه صحیح اتصالات دما و فشار..... ۲۵
- شکل ۲-۷ : پروفیل جریان در خروجی یک زانو..... ۲۸
- شکل ۲-۸ : پروفیل جریان خروجی از دو زانوی پشت سر هم..... ۳۱
- شکل ۲-۹ : جریان خروجی از افزایشده ها..... ۳۲

فصل سوم:

- شکل ۱-۳ : محدوده خطا برای محاسبه ضریب تراکم پذیری از روش AGA۸..... ۵۰

فصل چهارم:

- شکل ۱-۴: انواع صفحات اریفیس..... ۷۰
- شکل ۲-۴ : نمایی از مقطع جانبی صفحه اریفیس..... ۷۱

- شکل ۳-۴ : مکان نصب اتصالات فشاری برای انواع فلنجی و D/2 & D..... ۷۴
- شکل ۴-۴ : مکان نصب اتصالات فشاری برای نوع اتصالات گوشه ای..... ۷۶
- شکل ۵-۴ : نحوه چینش اتصالات فشاری برای اندازه گیری فشار استاتیک..... ۷۷
- شکل ۶-۴ : یک نمونه از اتصالات قبل و بعد از صفحه اریفیس..... ۸۰
- شکل ۷-۴ : مستقیم کننده جریان از نوع ۱۹ لوله ای..... ۸۲
- شکل ۸-۴ : مستقیم کننده جریان از نوع AMCA ۸۳
- شکل ۹-۴ : پروفیل تقریبی جریان و توزیع فشار و دما در یک سیستم اریفیس..... ۸۶

فصل پنجم:

- شکل ۱-۵ : مکانیزم ورود اطلاعات برای محاسبه خواص گاز طبیعی با روش AGA۸..... ۸۸
- شکل ۲-۵ : نمایی از صفحه ورود اطلاعات نرم افزار طراحی اریفیس..... ۸۹
- شکل ۳-۵ : صفحه ورود اطلاعات درصد مولی اجزاء برای محاسبه چگالی و ضریب تراکم پذیری..... ۹۱
- شکل ۴-۵ : محاسبه ظرفیتهای حرارتی ، توان آیزنتروپیک و ویسکوزیته..... ۹۲
- شکل ۵-۵ : محاسبه نرخ جرمی جریان..... ۹۳
- شکل ۶-۵ : محاسبه قطر سوراخ صفحه اریفیس..... ۹۴
- شکل ۷-۵ : محاسبه اختلاف فشار ایجاد شده بین دو طرف اریفیس..... ۹۵

فصل ششم:

- شکل ۱-۶ : طرحواره کلی از لوله گردبادی..... ۹۸
- شکل ۲-۶ : طرحواره کلی از دستگاه مورد آزمایش و نحوه اتصال آن به کامپیوتر..... ۹۹

- شکل ۳-۶: دستگاه مورد آزمایش در محل ایستگاه تقلیل فشار شهر شاهرود..... ۱۰۰
- شکل ۴-۶: محل قرار گرفتن سنسور های فشار و دما ۱۰۳
- شکل ۵-۶: میکرو پرسسور اختصاصی برای خواندن اطلاعات آزمایش..... ۱۰۴
- شکل ۶-۶: کامپیوتر و نرم افزار مورد استفاده در آزمایش..... ۱۰۴
- شکل ۷-۶: نحوه اتصال دستگاه به رگلاتور گاز در محوطه دانشگاه صنعتی شاهرود..... ۱۰۵

فصل هفتم:

- نمودار ۷-۱: تغییرات مقادیر چگالی گاز طبیعی پالایشگاه خانگیران برحسب دما و فشار..... ۱۱۲
- نمودار ۷-۲: تغییرات مقادیر ضریب تراکم پذیری گاز طبیعی خانگیران برحسب دما و فشار..... ۱۱۳
- نمودار ۷-۳: تغییرات مقادیر ویسکوزیته گاز طبیعی پالایشگاه خانگیران برحسب دما و فشار..... ۱۱۵
- نمودار ۷-۴: تغییرات مقادیر ظرفیت حرارتی حجم ثابت گاز طبیعی برحسب دما و فشار..... ۱۱۶
- نمودار ۷-۵: تغییرات مقادیر ظرفیت حرارتی فشار ثابت گاز طبیعی برحسب دما و فشار..... ۱۱۷
- نمودار ۷-۶: تغییرات مقادیر توان آیزنتروپیک گاز طبیعی برحسب دما و فشار..... ۱۱۹
- نمودار ۷-۷: تغییرات مقادیر ضریب ژول - تامسون گاز طبیعی برحسب دما و فشار..... ۱۲۱
- نمودار ۷-۸: مقایسه توان آیزنتروپیک بین نتایج نرم افزار طراحی و مرجع [۳۲]..... ۱۲۳
- نمودار ۷-۹: مقایسه ضریب ژول - تامسون بین نتایج نرم افزار طراحی و مرجع [۳۷]..... ۱۲۵
- نمودار ۷-۱۰: مقایسه ظرفیت حرارتی فشار ثابت بین نتایج نرم افزار طراحی و مرجع [۳۸]..... ۱۲۷
- نمودار ۷-۱۱: مقایسه ضریب ژول - تامسون بین نتایج نرم افزار طراحی و مرجع [۳۸]..... ۱۲۹

فهرست جداول

فصل دوم:

جدول ۱-۲: انواع اثرات نصب و منابع ایجاد کننده آنها..... ۲۷

فصل سوم:

جدول ۱-۳: محدوده مجاز ترکیبات گاز طبیعی برای استفاده از روش G.C.M..... ۴۸

جدول ۲-۳: ضرایب معادله ظرفیت حرارتی مولی ایده آل در فشار ثابت برای مخلوطهای گازی..... ۶۱

فصل هفتم:

جدول ۱-۷: آنالیز تجربی ترکیبات تشکیل دهنده گاز طبیعی پالایشگاه خانگیران..... ۱۱۰

جدول ۲-۷: مقادیر چگالی گاز طبیعی پالایشگاه خانگیران برای دما و فشارهای مختلف..... ۱۱۱

جدول ۳-۷: مقادیر ضریب تراکم پذیری گاز طبیعی برای دما و فشارهای مختلف..... ۱۱۲

جدول ۴-۷: مقادیر ویسکوزیته گاز طبیعی پالایشگاه خانگیران برای دما و فشارهای مختلف..... ۱۱۴

جدول ۵-۷: مقادیر ظرفیت حرارتی حجم ثابت گاز طبیعی برای دما و فشارهای مختلف..... ۱۱۶

جدول ۶-۷: مقادیر ظرفیت حرارتی فشار ثابت گاز طبیعی برای دما و فشارهای مختلف..... ۱۱۷

جدول ۷-۷: مقادیر توان آیزنتروپیک گاز طبیعی برای دما و فشارهای مختلف..... ۱۱۸

جدول ۸-۷: مقادیر ضریب ژول - تامسون گاز طبیعی برای دما و فشارهای مختلف..... ۱۲۰

- جدول ۷-۹ : نتایج توان آیزنتروپیک به دست آمده توسط مرجع [۳۲]..... ۱۲۲
- جدول ۷-۱۰ : نتایج توان آیزنتروپیک به دست آمده توسط نرم افزار طراحی اریفیس..... ۱۲۳
- جدول ۷-۱۱ : اختلاف بین نتایج نرم افزار طراحی اریفیس و نتایج مرجع [۳۲]..... ۱۲۳
- جدول ۷-۱۲ : نتایج ضریب ژول - تامسون به دست آمده توسط مرجع [۳۷]..... ۱۲۴
- جدول ۷-۱۳ : نتایج ضریب ژول - تامسون به دست آمده توسط نرم افزار طراحی اریفیس..... ۱۲۴
- جدول ۷-۱۴ : اختلاف بین نتایج نرم افزار طراحی اریفیس و نتایج مرجع [۳۷]..... ۱۲۵
- جدول ۷-۱۵ : نتایج ظرفیت حرارتی فشار ثابت به دست آمده توسط آزمایشات مرجع [۳۸]..... ۱۲۶
- جدول ۷-۱۶ : نتایج ظرفیت حرارتی فشار ثابت به دست آمده توسط نرم افزار طراحی اریفیس..... ۱۲۷
- جدول ۷-۱۷ : اختلاف بین نتایج نرم افزار طراحی اریفیس و نتایج مرجع [۳۸]..... ۱۲۸
- جدول ۷-۱۸ : نتایج ضریب ژول - تامسون به دست آمده توسط آزمایشات مرجع [۳۸]..... ۱۲۸
- جدول ۷-۱۹ : نتایج ضریب ژول - تامسون به دست آمده توسط نرم افزار طراحی اریفیس..... ۱۲۹
- جدول ۷-۲۰ : اختلاف بین نتایج نرم افزار طراحی اریفیس و نتایج مرجع [۳۸]..... ۱۳۰
- جدول ۷-۲۱ : یک نمونه ۱۰۰ تایی اندازه گیری شده در آزمایشات انجام گرفته در شاهرود..... ۱۳۱
- جدول ۷-۲۲ : نتایج متوسط گیری برای پارامترهای اندازه گیری شده..... ۱۳۵
- جدول ۷-۲۳ : مقایسه نتایج نرخ جرمی جریان توسط سه نرم افزار طراحی اریفیس، Flow Orifice و Meter calc ۱۳۵

فهرست علائم

a_n, b_n, c_n, k_n, g_n	ضرایب ثابت معادله حالت ۸ AGA
f_n, q_n, u_n	
B	ضریب دوم ویریال
B_{nij}^*	ضریب برهمکنش دو دویی مخلوطها
$C_{m,p}$	ظرفیت حرارتی مولی در فشار ثابت، $J/(mol.k)$
$C_{m,v}$	ظرفیت حرارتی مولی در حجم ثابت، $J/(mol.k)$
C_n^*	ضریب وابسته به دما و ترکیبات گاز
C_p	ظرفیت حرارتی مخصوص در فشار ثابت، $J/(gr.k)$
C_v	ظرفیت حرارتی مخصوص در حجم ثابت، $J/(gr.k)$
$C_{m,pi}$	ظرفیت حرارتی مولی ایده آل مخلوط گاز در فشار ثابت، $J/(mol.k)$
$C_{m,vi}$	ظرفیت حرارتی مولی ایده آل مخلوط گاز در حجم ثابت، $J/(mol.k)$
$C_{m,pi}^j$	ظرفیت حرارتی مولی ایده آل جزء i ام مخلوط گاز در فشار ثابت، $J/(mol.k)$
E_{ij}	پارامتر انرژی برهمکنش ضریب دوم ویریال
F	پارامتر دما بالای مخلوط
G	پارامتر موقعیت
K	پارامتر سایز مخلوط
P	فشار، Kpa
Q	پارامتر کوادراتیو
R	ثابت جهانی گازها، $8,314 \text{ kJ}/(\text{kmol.k})$
U	پارامتر انرژی
Y_i	کسر مولی جزء i ام
	علائم یونانی
ρ_m	چگالی مولی، (kmol/m^3)
ρ_{mi}	چگالی مولی گاز ایده آل، (kmol/m^3)
ρ_r	چگالی کاهیده
v_m	حجم مخصوص مولی، (m^3/kmol)
ε	ضریب انبساط
β	نسبت قطر مجرا به قطر ابزار اندازه گیری
κ	توان ایزنتروپیک

فصل اول

مقدمه

۱-۱- اهمیت اندازه‌گیری^۱

اهمیت سیستم‌های اندازه‌گیری و کنترل در صنایع مدرن امروزی تا حدی است که بدون این سیستمها، صنعت از ادامه حیات شتاب‌آلود خود باز خواهد ماند. پیچیدگی و در عین حال دقت در تکنولوژی امروزه جهان مدیون اندازه‌گیری پارامترها و عوامل مختلف و کنترل آنها می‌باشد.

هر شاخه‌ای از تکنولوژی دارای پارامترهای مختلفی است که سر و کار مستمر با آنها دارد. با توجه به اینکه موضوعات تکنولوژی بسیار متنوع می‌باشند، لذا موضوعات اندازه‌گیری هم از تنوع خاصی برخوردار خواهند بود و ضروری است که این عوامل در هر شاخه‌ای از صنعت به طور جداگانه مورد بحث قرار گیرند. جریان‌سنجها^۲ از جمله دستگاه‌هایی هستند که کاربرد فراوانی در صنایع و بخصوص صنایع فرآیندی دارند. میزان خوراک ورودی به یک برج تقطیر یا برج واکنش و یا جریان خروجی از یک پمپ و یا کمپرسور بوسیله جریان‌سنجها اندازه‌گیری می‌شود.

صنایع نفت و گاز، نیروگاه‌ها، صنایع آب و فاضلاب و که شاخه‌های مهمی از صنعت هستند شامل دستگاه‌ها و تجهیزات مختلفی می‌باشند که در آن دستگاه‌ها، فاکتورهای مهمی مثل دما، فشار و جریان سیالات باید اندازه‌گیری شوند. سنجش جریان سیالات رایجترین اندازه‌گیری در فرایندهای صنعتی می‌باشد. بسیاری از صنایع به میزان سیال عبوری از یک محل خاص در کار روزانه خود نیاز دارند. عمل ثبت مقدار ماده مصرفی یا انتقال داده شده، توسط سنجش دبی صورت می‌پذیرد و بر مبنای آن هزینه اعمال شده برای مصرف یا انتقال سیال مشخص می‌گردد [۱].

^۱ Measurement

^۲ Flow Meter

شرایط عملیاتی (دما- فشار- نوع سیال و . . .)، مسائل اقتصادی و مالی و اهمیت دقت اندازه‌گیری از جمله عواملی هستند که در انتخاب نوع جریان‌سنجها مؤثر می‌باشند. موارد ذکر شده از جمله فاکتورهای مهم در انتخاب یک جریان‌سنج می‌باشند، ولی تنها با انتخاب یک جریان‌سنج با دقت^۳ بالا، دامنه‌پذیری^۴ مناسب و نیاز نداشتن آن به تعمیرات متناوب، نمی‌توان ادعا نمود که اندازه‌گیری جریان با دقت ذکر شده در کاتالوگ سازنده انجام می‌شود. حقیقت آن است که نصب صحیح و اصولی جریان‌سنجها از چنان اهمیتی برخوردار است که در صورت رعایت نکردن پارامترهای اساسی در نصب آنها، دقت جریان‌سنج کاملاً تحت تأثیر وضعیت نصب قرار خواهد گرفت.

علاوه بر دانش و علم اندازه‌گیری پارامترهای مورد نیاز، تجربه‌هایی در زمینه ساخت، کنترل اندازه‌گیری خطا، نگهداری و تعمیر ابزار اصلی در نحوه و کیفیت اندازه‌گیری از اهمیت خاصی برخوردار می‌باشند.

همواره پیشرفت در فناوری سنسورها^۵، باعث ابداع دبی‌سنجهای جدید و همزمان استفاده از ریزپردازنده‌ها موجب افزایش کارایی انواع قدیمی دبی‌سنجها از طریق خطی‌سازی و جبران کردن اثر تغییرات دما و فشار شده است.

^۳ Accuracy

^۴ Range ability

^۵ Sensors

۱-۲- برای اندازه‌گیری جریان گاز، کدام جریان‌سنج را انتخاب کنیم؟ [۲]

در مبحث اندازه‌گیری جریان، دستگاهها و روشهای متعدد و بسیاری وجود دارند که بسته به فرآیند خصوصیات سیال مورد استفاده، فشار و بخصوص دقت مورد نیاز، یکی از آنها را می‌توان جهت اندازه‌گیری استفاده نمود. ضمن اینکه برای انتخاب دستگاه‌های اندازه‌گیری نمی‌توان نسخه‌ای از قبل پیچیده شده را برای تمامی شرایط تجویز نمود.

شرایط ویژه گاز پس از عبور از خطوط انتقال از نظر ذرات معلق موجود و آلودگی‌های احتمالی بخصوص روغنها، گریسها به همراه محصولات خوردگی، همه و همه ایجاب می‌نماید که در انتخاب سیستم اندازه‌گیری برای هر شرایط، تفاوت‌هایی را قائل شد. شاید در واحدهای عملیاتی (پالایشگاه و ...) یکی از دستگاه‌های مناسب اندازه‌گیری، اریفیس‌مترها باشد ولی استفاده از آنها را نمی‌توان بطور کلی در همه موارد تعمیم داد.

دقت اندازه‌گیری در مدیریت گازرسانی و فروش از بالاترین اهمیت برخوردار است، چراکه در جهان کنونی همه چیز و هرکارکردی بر مبنای اقتصاد و سودآوری با ریزنگری بسیار بالا مد نظر می‌باشد. طبیعی است هرچه میزان گاز عبوری از دستگاه اندازه‌گیری بیشتر گردد، دقت اندازه‌گیری نیز می‌بایست بالاتر رود. در علم اقتصاد و بحث مدیریت صنعتی می‌توان با افزایش هزینه اولیه میزان هزینه‌های جاری را کم کرد و بنابراین با خرید و سرمایه‌گذاری جهت سیستم‌های اندازه‌گیری مطمئن‌تر و با دقت بالاتر حتی با قیمت چند برابر در دراز مدت اثرات آن در سودآوری شرکتها کاملاً آشکار خواهد شد.

اصولاً برای انتخاب هر دستگاه اندازه‌گیری همانطور که قبلاً ذکر گردید شرایط و نیازمندیهای عملیاتی بسیار بااهمیت می‌باشد. جهت انتخاب جریان‌سنجها نیز شرایط فشار، دما، نوع سیال جریانی، نوسانات فشار، پروفیل جریان و بخصوص دقت (Accuracy) و صحت (Certainty) دستگاه را می‌بایست مد نظر قرارداد. پر واضح است که هر وضعیت خاصی نیازمند دقت و همچنین صحت خاص خود می‌باشد. بدین

معنی که در حجمها و دبی زیاد طبیعتاً می‌بایست از دستگاههای با دقت بالا استفاده نمود و در ایستگاه‌های با ظرفیت پائین قطعاً نیازی به سیستم اندازه‌گیری با آن دقتی که در حجمهای بالا مورد نیاز بوده نمی‌باشد.

بنابراین با توجه به نوع ایستگاه مصرف‌کننده گاز و کاربرد آن و نیز میزان ظرفیت آن می‌بایست از جریان‌سنج مناسب آن استفاده نمود، لذا خرید دستگاه‌های اندازه‌گیری جریان از یک نوع و با یک مشخصات برای تمامی شرایط انتخابی پرهزینه می‌باشد. بدین معنی که برای ایستگاههای با ظرفیت پائین‌تر افزایش خطای احتمالی، تغییرات قابل توجهی بر روی اندازه‌گیری نمی‌گذارد ولی در ایستگاه‌هایی نظیر نیروگاهها، صنایع پتروشیمی و C.G.S ها بعلت حجم زیاد گاز، بالابودن دقت از اهمیت بسیار زیادی برخوردار است.

به طور کلی ایستگاه‌های اندازه‌گیری با ظرفیت زیاد موجود در مدیریت گازرسانی و فروش را می‌توان از نظر وضعیت فشار، نوسانات احتمالی فشار و حداقل و حداکثر مصرف به موارد زیر طبقه‌بندی کرد:

- C.G.S ها
- ایستگاه نیروگاهها
- ایستگاه صنایع پتروشیمی و پالایشگاه

۱-۲-۱ C.G.S ها

دقت اندازه‌گیری در C.G.S ها نظر به شرکتی شدن مناطق گازرسانی و طرح مسئله خرید گاز از امور خطوط لوله و فروش آن به مشتری از اهمیت بسیار زیادی برای مدیریت گازرسانی و فروش برخوردار است، بدلیل اینکه در حال حاضر نقاط تعیین‌کننده گاز ورودی به شهرها و درکل به استان‌ها از طریق C.G.S ها مشخص می‌شود. حال بعنوان مثال اگر ظرفیت C.G.S کلان شهری حدود $600,000 \text{ m}^3/\text{h}$

باشد تنها خطای اندکی معادل ۰,۵٪ از بعد اندازه‌گیری اختلافی معادل $216,000 \text{ m}^3/\text{Month}$ تولید خواهد نمود که این رقم در سال معادل $2,600,000 \text{ m}^3/\text{Year}$ خواهد بود که بسیار قابل توجه می‌باشد. ممکن است یک دستگاه اندازه‌گیری از لحاظ هزینه‌های تعمیرات در طول سال بسیار مقرون بصره باشد ولی باید این هزینه‌های تعمیراتی را با هزینه‌هایی که ناشی از دقت پائین (Accuracy) و نیز صحت پائین و نیز خطاهائی احتمالی که در دستگاه بعد از اندازه‌گیری بوجود خواهد آمد، مقایسه نمود. مسئله دیگری که در بعد انتخاب دستگاه اندازه‌گیری برای C.G.S ها باید مد نظر قرارداد، میزان تغییرات مصرف با توجه به وضعیت آب و هوائی و حتی بسته به ساعات شبانه روز می‌باشد و نوسانات قابل توجهی بر روی آمارهای موجود ایستگاه‌ها قابل مشاهده می‌باشد. بنابراین توجه به قابلیت تغییرات محدوده کاری (Range ability) دستگاه که یکی از پارامترهائی است که در انتخاب جریان سنج بسیار با اهمیت می‌باشد، ضروری است.

۱-۲-۲- ایستگاه نیروگاه‌ها

درمورد نیروگاه‌ها نیز نظر به مصارف بسیار بالای آنها (بطور مثال ظرفیت ایستگاه نیروگاه‌های استان فارس بالقوه حدوداً $560,000 \text{ m}^3/\text{h}$ می‌باشد که احتمال افزایش این میزان نیز وجود دارد.) از لحاظ مقایسه‌ای و آماری می‌توان ایستگاه نیروگاه‌ها را با مثال قبل مقایسه نمود ولی در نیروگاه‌ها نیز از بعد فنی نکاتی وجود دارد که قابل تأمل می‌باشد. به عنوان مثال نیروگاه‌ها در بار ثابت کار نمی‌کنند، زمانی بالاتر از ظرفیت اسمی خود مثلاً ۱۰۵ درصد و زمانی بعلا اشکال در یک ژنراتور و یا توربین و یا هر مسئله دیگر بار مصرفی بسیار پائین خواهد آمد. بنابراین مورد ذکر شده را می‌بایست در مورد انتخاب سیستم‌های اندازه‌گیری مد نظر قرارداد.

۱-۲-۳- ایستگاه‌های پتروشیمی

ایستگاه‌های پتروشیمی نیز ظرفیت بسیار بالایی دارند. بنابراین دقت اندازه‌گیری و دستیابی به حداکثر دقت ممکنه و جلوگیری از خطاهای احتمالی بسیار با اهمیت می‌باشد. در کارخانجات پتروشیمی مصرف گاز عمدتاً جهت دو مورد ذیل می‌باشد:

- ۱ - جهت واحدهای مادر و اصلی که خوراک آنها گاز طبیعی است، نظیر واحد آمونیاک در مجتمع‌های شیمیائی و واحدهای اولفین در مجتمع‌های پتروشیمی و یا واحدهای مشابه نظیر متانول.
- ۲ - جهت توربین‌های گازی.

در حالت کلی، تغییرات بار مصرفی در ایستگاه‌های پتروشیمی زیاد نمی‌باشد ولی در شرایط خاص مثلاً خاموشی (Shut Down) اضطراری واحدهای مادر و اصلی و یا در زمان تعمیرات اساسی آنها، میزان مصرف گاز بشدت کاهش می‌یابد. که البته در این خصوص می‌بایست در مجتمع‌های پتروشیمی ایستگاه‌های مجزا تعبیه نمود و عبارتی دیگر، تغییراتی در طراحی ایجاد نمود تا بتوان از بعضی مشکلات احتمالی پیشگیری نمود.

خلاصه کلام اینکه در واحدهای پتروشیمی نیز دقت اندازه‌گیری و جلوگیری از بروز خطاهای احتمالی و نیز طراحی ایستگاه به نحوی که در صورت نیاز یک سیستم اندازه‌گیری به تعمیرات احتمالی، اندازه‌گیری در ایستگاه مختل نشود یعنی دستگاه ذخیره (Standby) وجود داشته باشد، ضروری می‌باشد.

اما در مورد ایستگاه‌های با ظرفیت پائین، حدود $5000 \text{ m}^3/\text{h}$ ، لزوم دستیابی به دقت بالا چندان اهمیتی ندارد. معمولاً اینگونه ایستگاه‌ها نوسانات بار کمی دارند و میزان مصرف آنها تقریباً قابل پیش‌بینی و ثابت می‌باشد. ضمن اینکه بعلت بالا نبودن میزان مصرف در صورت ایجاد خطاهای احتمالی، مسائل مالی قابل توجهی را بدنبال نخواهد داشت. بنابراین برای اینگونه ایستگاه‌ها میتوان طیف وسیعی از دستگاه‌های اندازه‌گیری را پیشنهاد نمود.

۳-۱- اهداف پژوهش

در این پروژه با توجه به نکاتی که راجع به اهمیت اندازه‌گیری بیان شد، سعی ما بر اندازه‌گیری دبی جریان گاز طبیعی به روش آزمایشگاهی به کمک اریفیس متر^۶ و اتصالات از نوع فلنجی^۷ می‌باشد. پارامترهای به دست آمده از آزمایش از قبیل فشار، دما و اختلاف فشار^۸ دو طرف اریفیس را به عنوان ورودی به برنامه کامپیوتری که به زبان ویژوال بیسیک^۹ و به منظور طراحی کامل اریفیس نوشته شده است، وارد کرده و خروجی نهایی را که شامل نرخ جرمی جریان^{۱۰} می‌باشد، تعیین می‌کنیم. برنامه طراحی اریفیس به یک سری خواص فیزیکی گاز طبیعی از جمله چگالی^{۱۱} ρ ، توان آیزنتروپیک^{۱۲} K ، ضریب ژول – تامسون^{۱۳} μ_{JT} و ویسکوزیته^{۱۴} ν نیاز دارد که باید به عنوان اطلاعات پایه در توابع برنامه محاسبه شوند.

در این پروژه برای تخمین چگالی و توان آیزنتروپیک و ضریب ژول – تامسون گاز طبیعی از روش AGA۸ که روشی کاملاً جدید بوده و توسط انجمن گاز آمریکا ارائه شده است، سود می‌بریم. برای محاسبه ویسکوزیته نیز سعی شده است تا بسته به ترکیبات گاز و شرایط کاری واقعی، بهترین و جامع‌ترین رابطه انتخاب شود.

^۶ Orifice Meter

^۷ Flange Tapping

^۸ Differential Pressure

^۹ Visual Basic

^{۱۰} Flow Rate

^{۱۱} Density

^{۱۲} Isentropic Exponent

^{۱۳} Joule–Thomson coefficient

^{۱۴} Viscosity

۱-۴- ساختار پایان نامه

فصل اول: مقدمه. در این فصل به ذکر اهمیت اندازه‌گیری و انتخاب جریان‌سنج مناسب و اهداف پژوهش پرداخته‌ایم.

فصل دوم: ابزار اندازه‌گیری اختلاف فشاری و مروری بر کارهای گذشته.

فصل سوم: معرفی روش ۸ AGA و فرمول‌بندی روابط. در این فصل چند معادله حالت برای گاز طبیعی بررسی شده است و در نهایت با ذکر خصوصیات روش ۸ AGA از این روش برای تخمین پارامترهای مورد نیاز استفاده کرده و در انتها روابط مورد استفاده برای تعیین خواص فیزیکی گاز طبیعی را آورده‌ایم.

فصل چهارم: معرفی استاندارد ISO ۵۱۶۷. در این فصل استاندارد ISO ۵۱۶۷ را برای طراحی، ساخت نصب و استفاده از اریفیس‌مترها را معرفی کرده‌ایم. این استاندارد شامل مجموعه اطلاعات و نیازمندیها برای ابزارهای اندازه‌گیری اختلاف فشاری است.

فصل پنجم: توسعه نرم‌افزار طراحی اریفیس. در آن به مراحل برنامه‌نویسی پرداخته‌ایم.

فصل ششم: طراحی و ساخت یک نمونه عملی اریفیس‌متر و کار آزمایشگاهی. در این فصل روش کار آزمایشگاهی و ابزارهای مورد استفاده شرح داده شده است.

فصل هفتم: نتایج آزمایشگاهی و نتایج عددی نرم‌افزار طراحی اریفیس و معتبرسازی آنها با نتایج تجربی.

فصل هشتم: نتیجه‌گیری و پیشنهادات.

فصل دوم

ابزار اندازه‌گیری اختلاف فشاری

و مروری بر کارهای گذشته

۲-۱- مقدمه

در مبحث مایعات، گازها (یا بخار) و در سیستم‌های کنترل پروسه‌های صنایع مختلف، آنچه که در میان سایر موارد بیشتر اندازه‌گیری می‌شود، میزان عبور جرم یا حجم سیال از مقطع یک لوله در زمان واحد یا در طی یک مدت معین می‌باشد.

از آنجا که در اکثر صنایع میزان جریان عبوری مهم است و مخصوصاً در صنایع نفت و گاز، فروش محصولات بر اساس حجم آنها صورت می‌گیرد، همچنین کیفیت محصولات تولید شده به درصد ترکیب مواد اولیه با هم که متأثر از نرخ جریان است بستگی دارد، بنابراین دقت اندازه‌گیری جریان دارای نقشی اساسی می‌باشد.

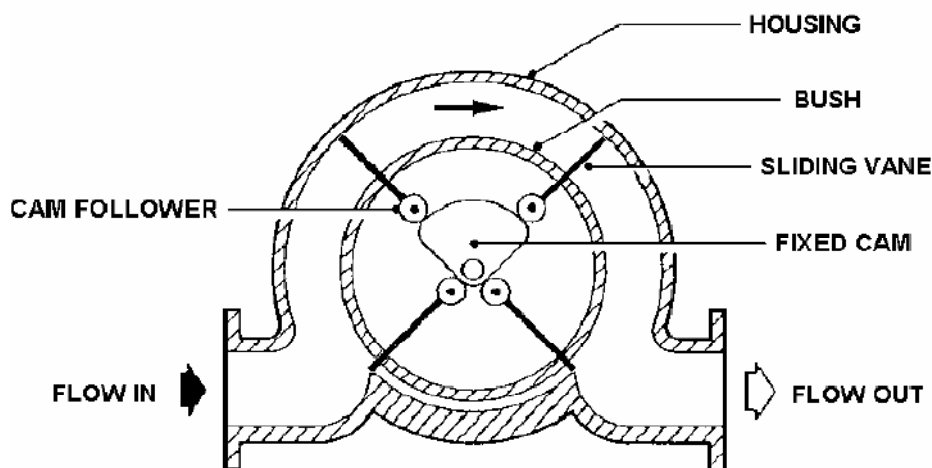
در صنعت تجهیزات مختلفی برای اندازه‌گیری فلوئی سیالات استفاده می‌شوند که همگی آنها در دو دسته اساسی زیر طبقه‌بندی می‌شوند [۳]:

- فلومترهای جابجایی
- فلومترهای استنتاجی

۲-۱-۱- فلومترهای جابجایی (Displacement Flow Meters)

دستگاه‌هایی که در طول یک روز، یک شیفت کاری و نظیر آن برای اندازه‌گیری میزان کل عبور سیال کاربرد دارند، جریان سنج کل (Total Flow Meter) یا فلومترهای جابجایی نامیده می‌شوند. در این گونه دستگاه‌ها اختلاف مقادیر نشان داده شده توسط اندیکاتور در ابتدا و انتهای مدت اندازه‌گیری نشان دهنده

مقدار کل سیالی است که در آن مدت از مقطع عبور کرده است [۱]. فلومترهای توربینی^۱ و فلومترهای جابجایی مثبت^۲ از این نوع می باشند.



شکل ۱-۲ : یک نوع از ابزارهای اندازه گیری جابجایی. مرجع [۳]

۲-۱-۲- فلومترهای استنتاجی (Inferential Flow Meters)

این فلومترها بر اساس این واقعیت عمل می کنند که نخست، تعدادی پارامتر اندازه گیری شده و در نهایت بر اساس مقدار این پارامترها، نتیجه محاسبه و استنتاج می شود. ابزارهای استنتاجی برای اندازه گیری نرخ فلوی سیالات مورد استفاده قرار می گیرند. آنها مقدار لحظه ای فلوی مورد نظر را بر واحد زمان اندازه گیری می کنند. چنانچه در نرخ فلو در یک مدت زمان تغییراتی داده شود، مقدار کل جریان نیز پس از آن مدت زمان فرق خواهد کرد [۳]. فلومترهای اختلاف فشاری^۳ و روتامتر^۴ از این قبیل می باشند.

^۱ Turbine Flow Meter

^۲ Positive Displacement Flow Meter

^۳ Differential Pressure Flow Meter

^۴ Rota Meter

جهت حصول اطمینان از نتایج اندازه گیری جریان سیالات، اندازه گیری باید در شرایط نرمال انجام شود که معمولاً دمای 20°C و فشار استاندارد 1 bar و رطوبت نسبی 0 می باشد.

۲-۲- فلومترهای اختلاف فشاری

همانطور که روش ها و ابزارآلات مختلفی وجود دارد که می توانند برای معین کردن نرخ فلو و یا مقدار کل جریان استفاده شوند، ما مطالعه خود را روی ابزاری که بیشترین کاربرد را دارند معطوف می کنیم. اندازه گیری دبی سیالات با توجه به اختلاف فشاری که در اثر عبور سیال از مقطع یک گلوگاه^۵ ایجاد می شود، از معمول ترین روش های دبی سنجی در میان سایر روش ها می باشد و بیشتر از روش های دیگر نیز مورد بررسی و تحقیق قرار گرفته است. این گلوگاه (یعنی جایی که مقطع لوله به صورتی باریک می شود) به عنوان عنصری حساس نسبت به عبور جریان تلقی می گردد. در محل گلوگاه سرعت سیال به صورت موضعی افزایش پیدا کرده و در نتیجه انرژی جنبشی سیال در این محل افزایش می یابد. از نقطه نظر تعادل انرژی، با افزایش سرعت سیال باید انرژی پتانسیل آن کم شود و در نتیجه فشار استاتیک در محل گلوگاه نسبت به فشار در محل ورود سیال به گلوگاه کاهش پیدا می کند. در نتیجه بین گلوگاه و محل پیش از آن اختلاف فشاری معادل $\Delta p = p_1 - p_2$ ایجاد می شود [۱].

از آنجایی که اختلاف فشار ایجاد شده تابعی از سرعت و در نتیجه میزان عبور سیال از گلوگاه می باشد می توان از این موضوع برای اندازه گیری دبی سیال استفاده نمود. برای تعیین مقدار عددی دبی سیال می توان با استفاده از یک مانومتر یا اختلاف فشارسنج یا سنسورهای اختلاف فشاری، اختلاف فشار را اندازه گیری کرد.

معمول ترین نوع گلوگاه های استاندارد عبارتند از:

^۵ Throat

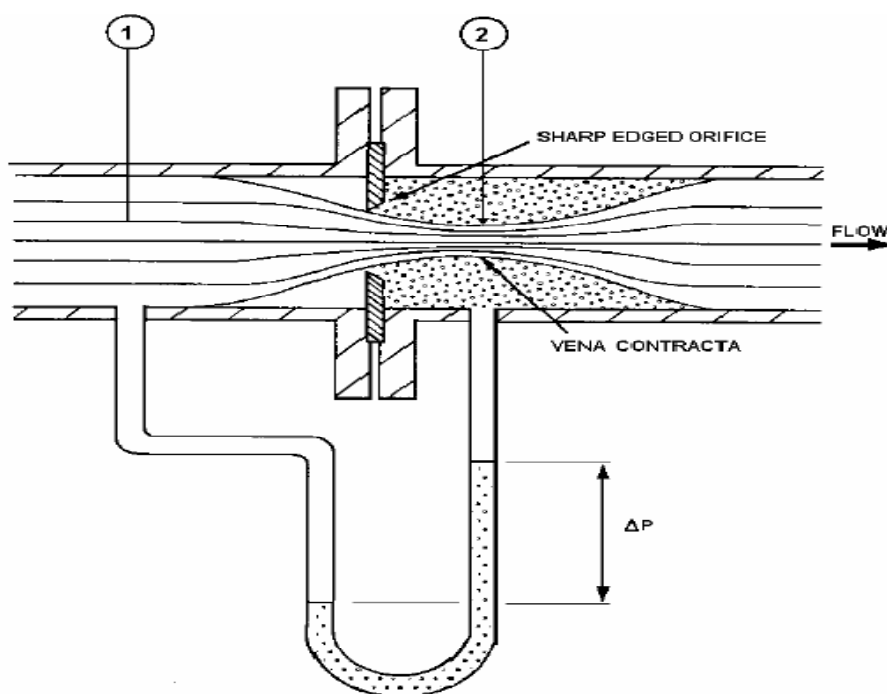
- گلوگاه دارای صفحه اریفیس دار

- گلوگاه نازل دار

- لوله ونتوری

۲-۲-۱- گلوگاه دارای صفحه اریفیس دار^۶

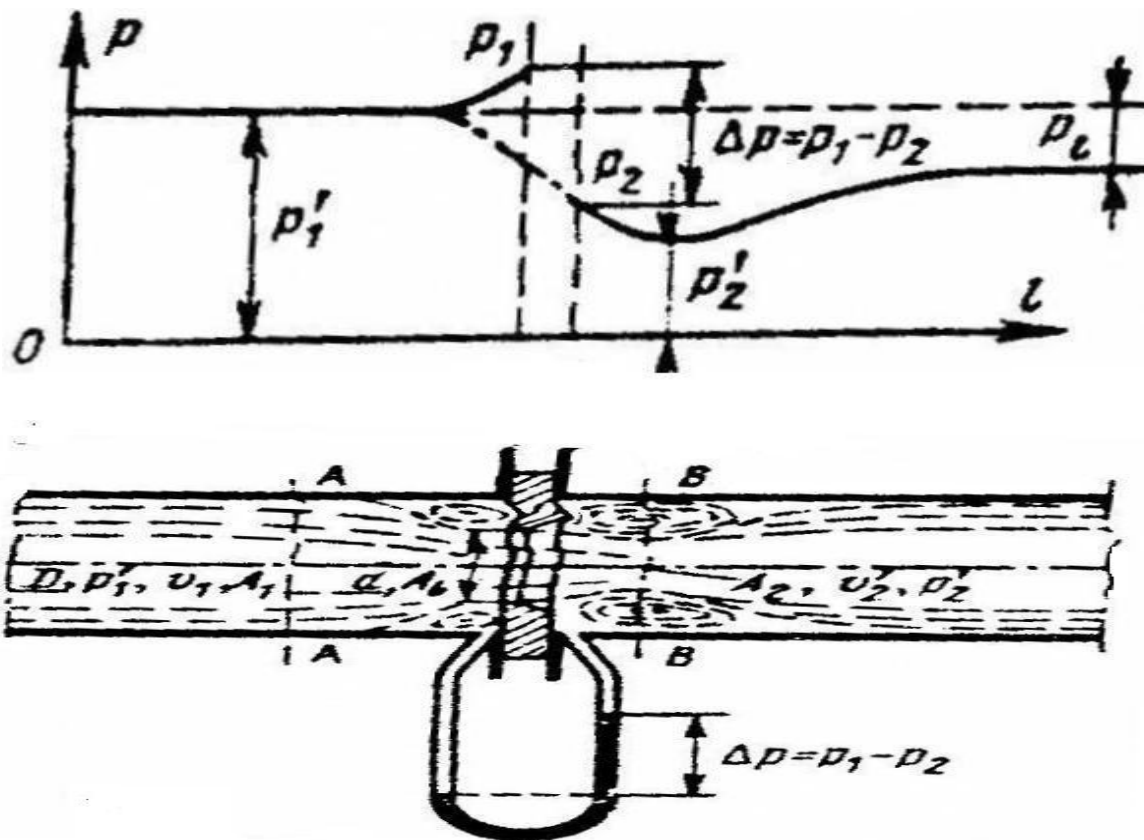
در شکل (۲-۲) مقطع خطوط جریان سیال پیش از اریفیس کم کم باریک می شود و در نقطه ۱ سیال بوسیله صفحه اریفیس آشفته می شود. این باریک شدن تا فاصله اندکی پس از اریفیس نیز ادامه دارد تا این که مقطع جریان در نقطه ۲ به حداقل و سرعت آن به حداکثر می رسد. این نقطه به نام Vena Contracta نامیده می شود. از این نقطه به بعد سطح مقطع جریان سیال به تدریج افزایش پیدا می کند تا قطر لوله کاملاً پر شود [۳].



شکل ۲-۲: مکانیزم عملکرد اریفیس. مرجع [۳]

^۶ Orifice Plate Restriction

همانطور که در شکل (۲-۳) دیده می‌شود، فشار بعد از محل صفحه اریفیس‌دار با فشار اصلی (یعنی فشار پیش از نقطه جمع شدن خطوط جریان) هرگز برابر نمی‌شود. در حین این که سیال از یک صفحه اریفیس‌دار عبور می‌کند، در اطراف لبه سوراخ صفحه، ناحیه‌ای ایجاد می‌شود که اصطلاحاً ناحیه راکد^۷ نامیده می‌شود و در این ناحیه به علت اختلاف فشارهای موجود حالتی از برگشت خطوط جریان ایجاد می‌شود که اصطلاحاً جریان ثانویه یا گردابی^۸ نامیده می‌شود. از آنجایی که سیال، لزج است و نیز حرکت جریان اولیه در خلاف جهت حرکت جریان ثانویه است، مقداری از انرژی جذب شده و در نتیجه قسمت قابل توجهی از فشار سیال افت می‌کند [۱].



شکل ۲-۳: نمودار افت فشار دائمی بعد از اریفیس. مرجع [۱]

^۷ Stagnant Zone

^۸ Vorticity

در اثر تغییر در امتداد حرکت خطوط جریان سیال نیز افت فشار ایجاد می شود اما مقدار آن نسبت به افت فشار ناشی از جریان های برگشتی قابل ملاحظه نیست.

در شکل (۲-۳) نشان داده شده است که فشارهای استاتیکی در قبل و بعد از صفحه اریفیس دار، با استفاده از مجراهایی حس می شوند که در زاویه بین صفحه اریفیس دار و سطح داخلی لوله قرار دارند. این مجراها را مجراهای حس کننده فشار یا مجراهای گوشه‌ای^۹ می نامند. ممکن است که این مجراهای حس کننده فشار در نقاط دیگری غیر از گوشه ها نیز قرار گیرند [۱].

۲-۲-۲- مشخصات اریفیس متر

دستگاه های مذکور نزدیک به یک قرن در صنایع مختلف مورد استفاده قرار گرفته اند و از جمله قدیمی ترین وسایل اندازه گیری جریان می باشند که هم جهت اندازه گیری Liquid Flow و هم جهت اندازه گیری Gas Flow و Steam مورد استفاده قرار می گیرند.

۲-۲-۲-۱- مزایا

- نداشتن قطعه متحرک:

این دستگاهها که بر مبنای اختلاف فشار ایجاد شده در دو طرف صفحه اریفیس عمل می نمایند در قسمت صفحه خود هیچ قطعه متحرکی ندارند و بنابراین صدماتی که ناشی از وجود قطعات متحرک در یک دستگاه می باشد، در این نوع جریان سنجها دیده نمی شود. البته این بدان معنا نیست که صفحه اریفیس دچار هیچ مشکل مکانیکی نخواهد شد، این موضوع در ادامه شرح داده می شود:

نظر به سابقه طولانی این دستگاهها در صنعت، مطالعات زیادی بر روی دستگاه های مذکور انجام شده و مستندات بسیار مفید و ارزشمندی نیز منتشر گردیده که قابلیتها، محدودیتها، نقاط ضعف و نیز عملکرد و

^۹ Corner Taps

مکانیزم این دستگاه‌ها را تشریح کرده‌اند که از جمله آنها می‌توان به استانداردهای API ۱۴.۳ و ISO ۵۱۶۷ و BS ۱۰۴۲ اشاره نمود که البته اگر استانداردهای مذکور به دقت مطالعه گردند، بسیاری از نکات ظریف در رابطه با این دستگاه‌ها قابل استخراج می‌باشد [۲].

- در دسترس بودن آن:

به دلیل احتیاج نداشتن به تکنولوژی خاصی برای ساخت اریفیس، تکنولوژی تولید آن آسان و در دسترس می‌باشد.

- قیمت ارزان:

قیمت تمام شده اریفیس نسبت به سایر جریان‌سنجها کمتر می‌باشد.

۲-۲-۲-۲-۲- معایب

- قابلیت پایین تغییر محدوده اندازه‌گیری (*Range Ability*):

یکی از پارامترهای مهمی که در بعد اندازه‌گیری جریان حائز اهمیت می‌باشد و به قابلیت‌های یک دستگاه می‌افزاید و باعث برتری یک دستگاه اندازه‌گیری نسبت به یک دستگاه دیگر می‌گردد، قابلیت تغییر محدوده اندازه‌گیری است. این مقدار برای اریفیس ها ۱ : ۳.۵ است که این عدد بعنوان پائین‌ترین میزان در میان جریان‌سنج‌ها می‌باشد. بنابراین پائین بودن پارامتر فوق محدودیت قابل توجهی در زمینه استفاده از دستگاه‌های مذکور ایجاد می‌نماید. چرا که در بسیاری از ایستگاه‌های اندازه‌گیری گازرسانی و فروش میزان حداقل و حداکثر جریان (Power Plant ها و) از مقدار ذکر شده فراتر می‌رود و این یعنی تولید خطا در اندازه‌گیری و نظر به حجم زیاد گاز عبوری از چنین ایستگاه‌هایی تولید خطا مسائل مالی قابل توجهی را بوجود خواهد آورد.

- طول مستقیم لوله قبل و بعد از صفحه اریفیس:

نظر به اهمیت پروفیل جریان در دستگاه‌های مذکور، طول مستقیم لوله مورد نیاز قبل و بعد از دستگاه نسبتاً زیاد می‌باشد. می‌توان گفت که در بین دستگاه‌های اندازه‌گیری این میزان بالاترین میزان می‌باشد. ضمن اینکه می‌بایست شرایط دهنده جریان (Flow Conditioner) نیز قبل از صفحه اریفیس استفاده گردد. همچنین میزان طول مستقیم لوله مورد نیاز با نسبت β تغییر می‌نماید و هرچه β افزایش یابد این مقدار نیز افزایش می‌یابد. براساس مطالب مندرج در استاندارد ISO ۵۱۶۷ در بعضی مواقع حتی در صورت استفاده از Flow Conditioner به طول مستقیمی حدود ۴۰D قبل از ابزار نیاز می‌باشد [۲]. راجع به Flow Conditioner در ادامه صحبت شده است.

- *Accuracy / Uncertainty*

Accuracy مربوط به صفحه اریفیس‌ها حدوداً ۰.۲٪ تخمین زده می‌شود و درخوش بینانه ترین حالت این میزان را برابر ۱٪ می‌توان در نظر گرفت که در مقایسه با بعضی از انواع Meter ها پائین تر می‌باشد. همچنین یکی از پارامترهای مهمی که در مبحث اندازه‌گیری می‌بایست مورد توجه قرار گیرد Uncertainty می‌باشد. در اریفیس‌ها این میزان برای β بین ۰.۱ تا ۰.۶ برابر ۵.۰٪ می‌باشد ولی از β بالاتر از ۰.۶ این میزان سرعت افزایش می‌یابد بطوریکه برای $\beta = ۰.۷۵$ میزان Uncertainty ۲٪ می‌باشد. مقادیر ذکر شده براساس استاندارد API ۱۴.۳ می‌باشد.

- حساسیت زیاد نسبت به پروفیل جریان:

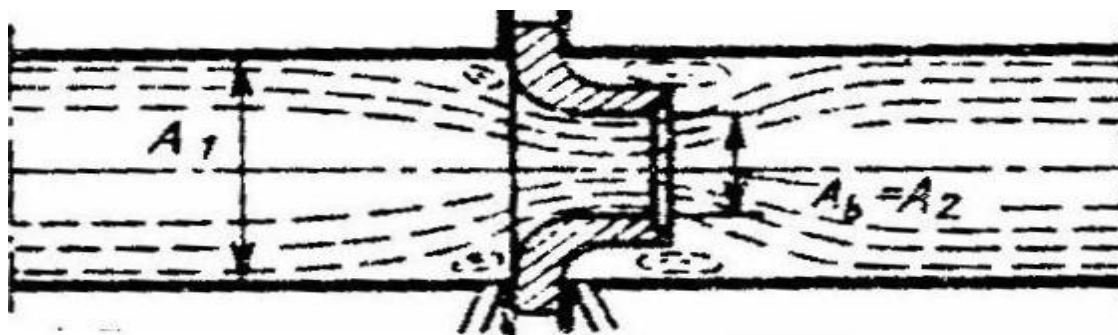
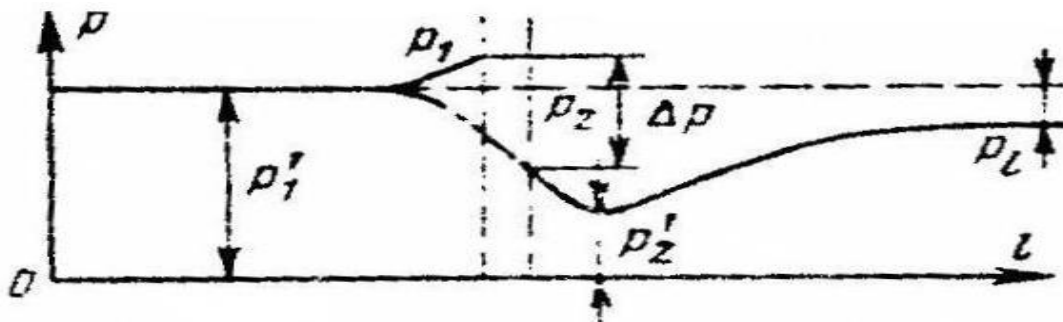
اریفیس‌ها در جریان‌هایی که حالت ضربه‌ای دارند دچار خطاهای قابل توجهی می‌گردند و این مسئله بیشتر بعلت وضعیت پروفیل جریان قبل و بعد از اریفیس می‌باشد و تغییرات در پروفیل جریان باعث خطای اندازه‌گیری خواهد شد و به همین دلیل است که طول مستقیم قبل از اریفیس را زیاد در نظر می‌گیرند تا پروفیل جریان حالت بهینه داشته باشد و همچنین استفاده از Flow Conditioner حتماً توصیه می‌شود.

براساس استاندارد BS1042 برای یک اریفیس با β معادل 0.7 بدون Flow Conditioner حتی در صورتی که طول مستقیم لوله $30D$ در نظر گرفته شود خطائی معادل 10٪ داریم.

ذکر این نکته نیز ضروری است که صفحات اریفیس نیز باید بطور مرتب از لحاظ ضخامت، مسطح بودن وضعیت لبه‌ها، کثیف بودن و یا بازرسی گردند.

۲-۲-۳- گلوگاه نازل دار^{۱۰}

گلوگاه نازل دار شکل (۲-۴) دارای مقطعی شبیه به یک زنگوله است، یعنی دیواره آن از اطراف به تدریج جمع می‌شود تا به صورت یک گلوگاه در می‌آید و انتهای آن استوانه ای شکل است.



شکل ۲-۴: نمودار افت فشار دائمی بعد از گلوگاه نازل دار. مرجع [۱]

^{۱۰} Flow Nozzle Restriction

محور نازل نیز بر محور لوله منطبق است. مقطع نازل به گونه‌ای انتخاب می‌شود که مقطع خطوط جریان سیال پس از باریک شدن تقریباً همه گلوگاه را پر کند. بنابراین سطح گلویی را می‌توان با کمترین سطح مقطع سیال عبوری برابر فرض نمود.

جریان‌های گردابی ایجاد شده در اطراف نازل نسبت به جریان‌های گردابی صفحه اریفیس‌دار انرژی کمتری جذب می‌کنند و در نتیجه افت فشار کمتری ایجاد می‌شود. البته نمودار توزیع فشار در طول دیواره و محور لوله این نوع گلوگاه، تقریباً شبیه به گلوگاه دارای صفحه اریفیس می‌باشد اما افت فشار آن کمی کمتر است. این نکته باید یادآوری شود که در صورت یکسان بودن دبی، صفحه اریفیس‌دار دارای مقطع گلویی بیشتری نسبت به مقطع گلویی لوله نازل‌دار می‌باشد و همین موضوع باعث می‌شود تا افت فشار نهایی در هر دو سیستم برابر باشد [۱].

محل قرارگرفتن مجراهای حس‌کننده فشار در گلوگاه‌های نازل‌دار شبیه به گلوگاه اریفیس‌دار می‌باشد.

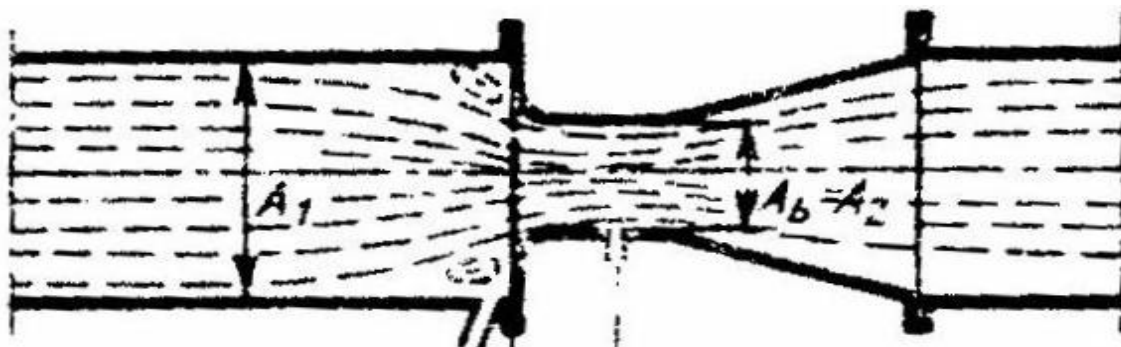
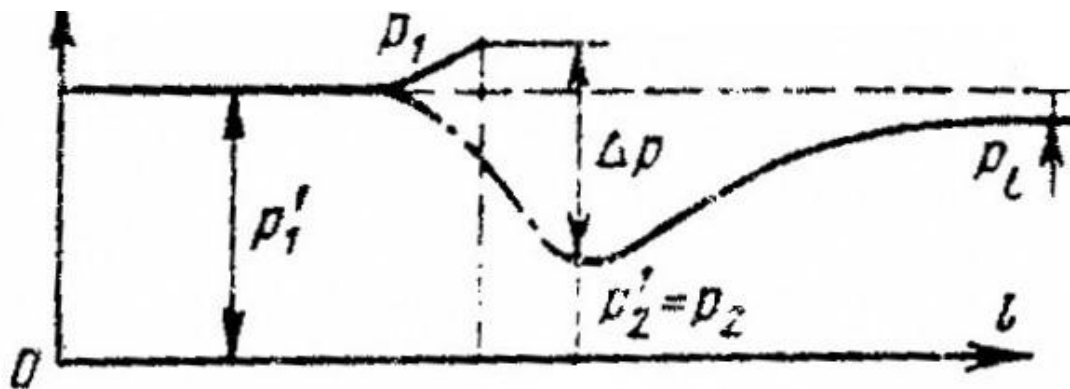
۲-۲-۴- لوله ونتوری^{۱۱}

لوله ونتوری استاندارد شامل یک لوله مستقیم و کوتاه می‌باشد که از دو طرف به وسیله دهانه‌های مخروطی در مسیر لوله اصلی نصب می‌شود و در شکل (۲-۵) نشان داده شده است. گلوگاه لوله ونتوری از یک استوانه باریک شده تشکیل شده است که گلویی نامیده می‌شود. دهانه ورودی گلوگاه به تدریج جمع یا باریک می‌شود اما دهانه خروجی آن به صورت شیپوره به تدریج باز می‌شود. لوله‌های ونتوری ممکن است کوتاه یا بلند باشند.

با استفاده از یک لوله و نتوری افت فشار به طور قابل توجهی نسبت به افت فشار گلوگاه اریفیس‌دار و یا نازل‌دار کمتر می‌شود. علت کم بودن افت فشار لوله ونتوری بیشتر به علت شکل دهانه خروجی آن

^{۱۱} Venturi Tube

است. در لوله ونتوری فشارهای استاتیک P_1 و P_2 با استفاده از دو حلقه فشارسنجی^{۱۲} حس می‌شوند. این دو حلقه هر یک دارای یک سری سوراخ هستند که به فاصله مساوی از یکدیگر قرار دارند و به داخل لوله ونتوری ارتباط دارند. مجاری حس‌کننده فشار در دو طرف صفحه اریفیس‌دار ممکن است فقط دو سوراخ استوانه‌ای بوده و یا از حلقه‌های فشارسنجی تشکیل شده باشند [۱].



شکل ۲-۵ : نمودار افت فشار دائمی بعد از لوله ونتوری. مرجع [۱]

حلقه‌های فشارسنجی در عمل بهترند، مخصوصاً در جایی که سیال تحت تأثیر توربولانسهای موضعی قرار داشته و یا توزیع یکنواخت فشار در لوله به علت خمیدگی‌ها و یا سایر موانع لوله، به صورت مطلوب انجام نمی‌شود. حلقه‌های فشارسنجی اختلاف فشار را متعادل ساخته، اندازه‌گیری دقیق‌تری را نسبت به مجراهای استوانه‌ای منفرد امکان‌پذیر می‌سازند. در یک طرح برای حلقه‌های فشارسنجی دو لوله در اطراف

^{۱۲} Piezo Meter Rings

لوله عبور سیال به شکل دایره و یا مربع خم شده است و از این لوله‌های کمربندی، لوله‌هایی دیگر به فواصل مساوی بداخل لوله عبور سیال پیش رفته‌اند تا فشار متعادل شده را به مانومتر اعمال کنند. برای اینکه توزیع فشار در یک حلقه فشارسنجی واقعاً متعادل باشد سطح مقطع هر حلقه نباید کمتر از نصف مجموع سطح مقطع سوراخ‌هایی باشد که به داخل لوله وارد می‌شوند [۱].

۲-۳- افت فشار دائمی

در انتخاب گلوگاه‌های استاندارد باید این موضوع را به یاد داشت که هر نوع از گلوگاه‌ها (صفحه اریفیس‌دار، نازل‌دار و لوله و نتوری) به اندازه‌ای افت فشار ایجاد می‌کند. این بدان معنی است که سیال پس از عبور از گلوگاه هرگز فشار قبل از وارد شدن به گلوگاه را بدست نمی‌آورد. افت فشار دائم یک گلوگاه را می‌توان از تفاضل فشارهای استاتیک در دو نقطه به خصوص بدست آورد. این دو نقطه تقاطعی هستند که خطوط جریان سیال جهت ورود به گلوگاه جمع و یا باریک می‌شوند. و سپس با عبور از گلوگاه به اندازه قطر لوله باز می‌شوند، یعنی نقاطی که گلوگاه هیچ گونه تأثیری بر خطوط جریان سیال نداشته باشد. افت فشار دائمی گلوگاهها Δw معمولاً برحسب درصدی از اختلاف فشار ΔP بیان می‌شود.

افت فشار دائم به عنوان تابعی از β (نسبت قطر اریفیس به قطر لوله) و نوع گلوگاه است. افت فشار دائم گلوگاه دارای صفحه اریفیس‌دار برای β مساوی، بیشتر از افت فشار گلوگاه نازل‌دار می‌باشد. البته باید برروی این نکته تأکید کرد که اگر اختلاف فشار و دبی جریان سیال هر دو گلوگاه مساوی باشد مقدار β در صفحات اریفیس‌دار بیشتر از نازل‌ها می‌باشد. در چنین شرایطی افت فشار دائمی در نهایت عملاً برای هر دو نوع گلوگاه برابر می‌شود.

از آنجا که لوله ونتوری دارای خروجی مخروطی شکل است سیال تقریباً تمام انرژی پتانسیل خود را بدست می‌آورد و به همین علت افت فشار دائمی لوله‌های ونتوری نسبت به گلوگاه دارای صفحه اریفیس‌دار و گلوگاه نازل‌دار به طور قابل ملاحظه‌ای کمتر است. به همین دلیل در مصارف صنعتی درجایی که به حداقل افت فشار دائم نیاز باشد بهتر است که از لوله ونتوری استفاده شود. افت فشار دائم لوله ونتوری حتی در شرایطی که دهانه خروجی لوله ونتوری قطری برابر 0.75 قطر داخل لوله عبور سیال داشته باشد باز هم نسبتاً کم خواهد بود.

۴-۲- اثرات وضعیت نصب بر عملکرد دستگاه‌های اندازه‌گیری جریان [۴]

برای دستیابی به عملکرد مناسب جریان سنج‌ها، نصب و تعمیرات این دستگاه‌ها باید با دقت و صحیح انجام شود. این موضوع آنقدر مهم است که نصب نادرست جریان‌سنجی که هنوز راه اندازی نشده است بر دقت دستگاه تأثیر قابل توجهی خواهد داشت.

به منظور دستیابی به بهترین دقت^{۱۳} و صحت^{۱۴} (پایین ترین عدم قطعیت)، جریان‌سنج‌ها باید کالیبره شوند و در آرایش مناسبی از لوله‌ها و اتصالات قرار گیرند به نحوی که آرایش خطوط لوله تأثیری در عملکرد جریان‌سنج‌ها نداشته باشد.

انحراف دستگاه از داده‌های کالیبراسیونی آن، تنها بعلاّت اثرات خط لوله نمی‌باشد بلکه بسته به نوع جریان‌سنج اثرات خارجی دیگری مانند تداخل امواج رادیویی، اثرات دمای محیط و اثرات رطوبت محیط می‌توانند روی راندمان دستگاه تأثیر بگذارند. در ادامه نکاتی که در سیستم لوله‌کشی^{۱۵} جهت نصب جریان‌سنج‌ها می‌بایست مد نظر قرار گیرد آورده شده است.

^{۱۳} Accuracy

^{۱۴} Certainty

^{۱۵} Piping

۲-۴-۱- تمهیداتی که در لوله کشی می بایست مد نظر قرار گیرد:

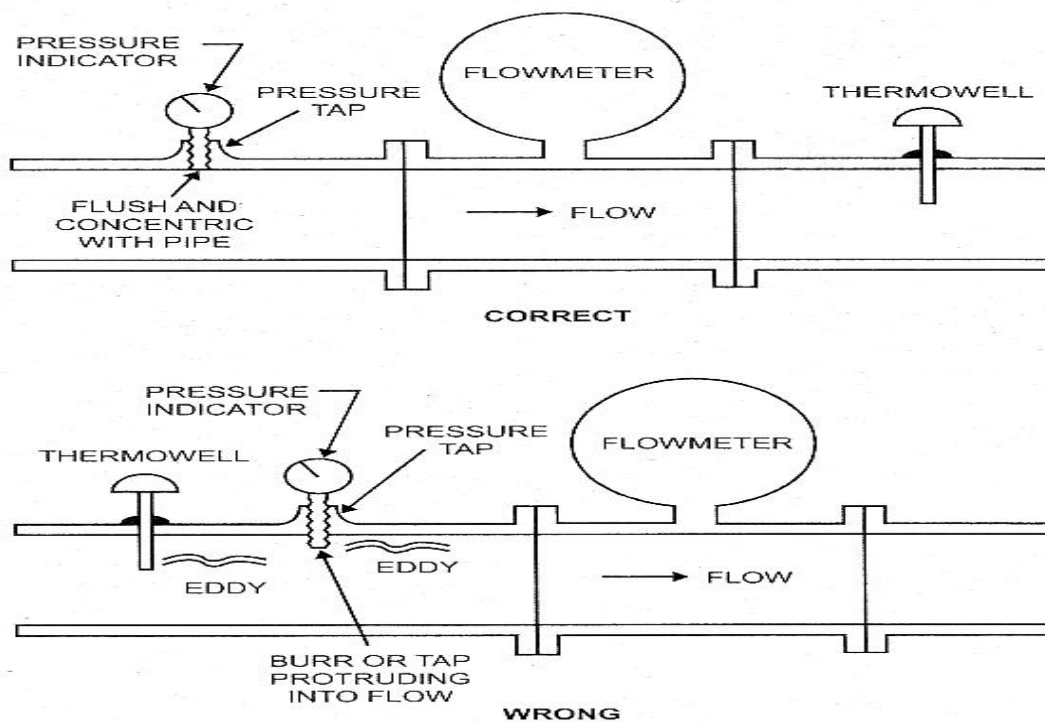
• لوله های قبل و بعد از جریان سنج :

بیشتر جریان سنج ها مقداری طول مستقیم لوله قبل و بعد از دستگاه اندازه گیری که دارای قطر مشابه با جریان سنج می باشد، نیاز دارند. این طول مستقیم لوله باید از داخل لوله کاملاً صاف باشد، در برگیرنده هیچ اتصالی (فلنج ، سه راهه و . . .) نباشد. در بسیاری موارد به منظور کاهش طول مستقیم لوله مورد نیاز قبل از جریان سنج از وسایلی بنام شرایط دهنده جریان (Flow Conditioner) استفاده می شود. میزان طول مستقیم مورد نیاز قبل و بعد از جریان سنج عموماً برحسب ضریبی از قطر داخلی لوله بیان می شود (در عمل قطر اسمی لوله بجای قطر داخلی استفاده می گردد مثلاً عنوان می شود طول مستقیم مورد نیاز قبل از لوله برابر با $20D$ می باشد).

این میزان طول مستقیم مورد نیاز بسته به نوع جریان سنج، نوع طراحی، تکنولوژی ساخت و . . . تغییر می کند. بعضی از سازندگان دستگاه های اندازه گیری جریان، لوله های قبل و بعد از جریان سنج را نیز به همراه دستگاه ارسال می نمایند. در این حالت درون لوله قبل از جریان سنج از Flow Conditioner مناسب استفاده شده است.

• انشعابات فشار (Pressure Taps):

انشعابات مورد نیاز جهت نصب وسایل اندازه گیری فشار باید روی لوله قبل و بعد از جریان سنج تعبیه شوند و می بایست به نحوی باشند که هیچگونه فرورفتگی در خط لوله ایجاد نمایند. (شکل ۲-۶)



Flowmeter Pressure and Temperature Taps

شکل ۲-۶ : نحوه صحیح اتصالات دما و فشار. مرجع [۴]

• انشعابات دما (Temperature Taps):

چاهک‌های دما جهت نصب ترموکوپل و یا هر وسیله دیگر اندازه‌گیری دما، می‌بایست روی خط بعد از جریان‌سنج نصب گردد. دلیل اینکار این است که اگر چاهک دمایی قبل از جریان‌سنج نصب گردد فرورفتگی چاهک دما در خط لوله باعث ایجاد اغتشاش در جریان و تأثیر قابل توجه بر روی دقت و صحت جریان‌سنج خواهد داشت. موارد متعددی مشاهده شده که چاهک دما قبل از جریان‌سنج نزدیک به آن نصب شده است. این عمل روی دقت اندازه‌گیری دستگاه‌هایی که به پروفیل سرعت بسیار حساس می‌باشند (مانند اریفیس) تأثیر قابل ملاحظه‌ای خواهد داشت.

• کالیبراسیون دوره ای :

جهت اطمینان از عملکرد مناسب جریان سنجها و حفظ دقت آنها، کالیبراسیون دوره ای ضروری است. دو نوع کالیبراسیون برای جریان سنجها در نظر گرفته می شود که انتخاب آنها بستگی به ساختار و طراحی و نوع جریان سنج دارد. این دو نوع کالیبراسیون عبارتند از:

- ۱- کالیبراسیون تر (Wet Calibration). در این نوع کالیبراسیون حجم معینی از سیال را از درون جریان سنج عبور می دهند و خروجی آنرا تست می کنند. در این حالت می توان جریان سنج را باز نمود و بر روی یک سیستم تست قرارداد و با یک جریان سنج مرجع که بطور سری با آن قرار دارد مقایسه نمود.
- ۲- کالیبراسیون خشک (Dry Calibration). در این نوع کالیبراسیون از سیگنالهای شبیه سازی (ولتاژ مقاومت، جریان و ...) جهت کالیبراسیون استفاده می شود.

۲-۴-۲- منابع اثرات نصب:

اثرات نصب در جریان سنجها متنوع می باشند. جدول زیر منابع عمده اثرات نصب را طبقه بندی

می نماید:

جدول ۱-۲: انواع اثرات نصب و منابع ایجادکننده آنها

<ul style="list-style-type: none"> - وجود پیچش در جریان، پروفیل سرعت بد و ضعیف - وجود جریان نبضی و پالسی - وجود سیال غیرهمگن (دوفازی) - تغییر خصوصیت سیال 	<p>اثرات دینامیک سیال</p>
<ul style="list-style-type: none"> - وجود اتصالات خیلی نزدیک به جریان سنج - وجود اتصالات خیلی نزدیک به یکدیگر و قبل از جریان سنج - نصب ناصحیح شیرها - اثرات ناشی از ناصافی لوله و یا رسوبات داخل لوله - استفاده نکردن از Conditioner یا Straightener 	<p>اثرات مکانیکی</p>
<ul style="list-style-type: none"> - وجود لرزش - وجود منابع امواج الکترومغناطیس یا فرکانس رادیویی نزدیک جریان سنج - تغییرات زیاد دمای محیط - تغییرات زیاد رطوبت 	<p>اثرات دیگر</p>

بعضی از عوامل ذکر شده در جدول با زمان تغییر می نمایند، مانند صافی داخل لوله که با گذشت زمان

دچار تغییر می گردد.

• اثرات دینامیک سیال :

دو نوع عمده اختلال و ناآرامی در جریان دینامیک سیال وجود دارد:

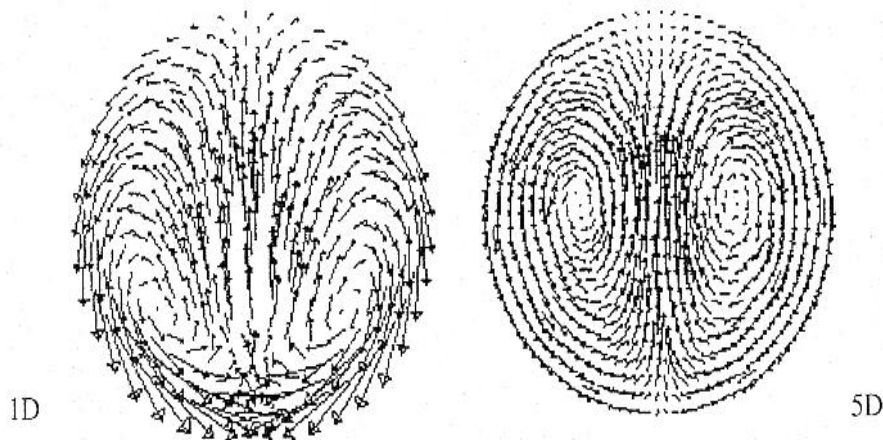
۱- تغییر پروفیل (Velocity Profile Distortion)

۲- پیچش (Swirl)

این دو پارامتر می‌توانند به تنهایی و یا با هم در سیال ایجاد شود. ولی هر دو بوسیله استفاده از یک Flow Conditioner مناسب قابل تصحیح می‌باشند.

تغییر پروفیل سرعت در واقع تغییر در توزیع محوری (Axial Velocity Distribution) می‌باشد. این حالت ممکن است در زانوها، شیرهای نیمه باز یا عدم نصب صحیح آب بندها، هم محور نبودن فلنجه‌ها برآمدگی‌های داخل لوله و یا کاهنده‌های غیر هم مرکز بوجود آید.

پیچش (Swirl)، اساساً چرخش سیال درون لوله می‌باشد و در اثر تغییر سرعت شعاعی درون سیال بوجود می‌آید. این پدیده در زانوها (خصوصاً در ترکیبی از چند زانو) در بعضی از شیرها و یا زمانی که دو یا چند اتصال مختلف نزدیک به هم نصب شده‌اند بوجود می‌آید.



شکل ۲-۷: پروفیل جریان در خروجی یک زانو. مرجع [۴]

نتایج آزمایشگاهی نشان داده است که شدیدترین پیچش هنگامی در سیال ایجاد می شود که دو زانوی غیرهم سطح با زاویه ۹۰ درجه نسبت به هم وجود دارد. پیچش می تواند بصورت چرخش سیال از سمت چپ و یا سمت راست باشد که این بستگی به جهت گیری اتصالات دارد. این پدیده بر روی جریان سنجهایی که دارای اجزا دوران کننده می باشند (مانند کنتورهای توربینی) اثر بسیار زیادی دارد. پیچش همچنین در سهراهی ها ایجاد می شود بخصوص زمانی که یک سیال با سرعت بالا با سیال اصلی مخلوط می شود.

نتایج آزمایشگاهی نشان داده است که در صورتی که دو زانوی غیرهم سطح با زاویه ۹۰ درجه نسبت به هم نصب شوند، جریان سیال در هنگام خروج از زانوی دوم دچار پیچش زیادی میگردد که حتی پس از طی ۱۵ D از زانو هنوز پیچش قابل توجه می باشد و طبق نتایج بدست آمده، ۱۰۰D فاصله نیاز است تا این پیچش از بین برود (باید توجه نمود که پیچش به سرعت بوجود می آید ولی به آهستگی از بین می رود).

پمپها و کمپرسورها می توانند باعث ایجاد جریان نبضی گردند که این عامل باعث می شود که اکثر جریان سنجها بیشتر قرائت نمایند که البته میزان خطا بستگی به بزرگی و فرکانس پالسهای ایجاد شده دارد. این قضیه در خصوص جریان سنجهایی که براساس اختلاف فشار کار می کنند (مانند جریان سنجهای اریفیس، ونتوری و نازل) اهمیت زیادی دارد. در کنتورهای توربینی جریانهای نبضی باعث تغییر سرعت روتور می گردد و مستقیماً روی دقت اندازه گیری (Accuracy) اثر می گذارد.

بعضی از جریان سنجها (مانند جریان سنجهای جابجائی مثبت) می توانند باعث ایجاد جریان نبضی گردند. بنابراین باید در خصوص نصب وسایل اندازه گیری دیگر در صورتی که جریان نبضی ایجاد می شود دقت نمود. همانگونه که انتظار می رود خصوصیات جریان نبضی با نوع سیال متفاوت می باشد. این حالت در گازها بعلاوه خاصیت تراکم پذیری کمتر از مایعات می باشد.

• اثرات مکانیکی :

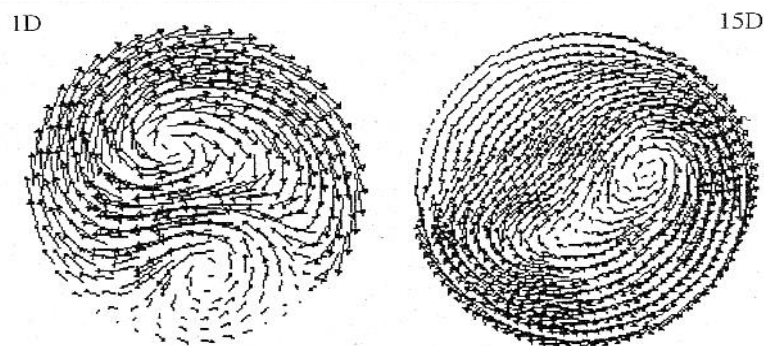
یکی از منابع مهم ایجاد مشکل در نصب جریان سنجها طراحی ضعیف سیستم لوله کشی می باشد. تقریباً همه جریان سنجها به قسمی طراحی شده اند که با یک جریان بدون پیچش و بدون تغییر در پروفیل سرعت عمل نمایند که این شرایط تنها زمانی به وقوع می پیوندد که حداقل طول مستقیم لوله قبل از جریان سنج به اندازه کافی در نظر گرفته شده باشد. ولی اغلب مجبور می شویم جریان سنجها را نزدیک اتصالاتی نظیر زانوها، کاهنده ها و شیرها نصب نمائیم. در ادامه اثرات نصب اتصالات ذکر شده روی عملکرد جریان سنجها بررسی خواهد شد.

- زانوها :

همانطور که قبلاً گفته شد زانوها یکی از عوامل ایجاد اغتشاش در جریان می باشند که میزان آن بستگی به شعاع زانو دارد. هر چقدر شعاع زانو کوچکتر باشد پیچش جریان بیشتر خواهد بود. بازیافت پروفیل سرعت بستگی به میزان جریان سیال دارد. در جریان کم، بازیافت می تواند تا حدود $10D$ باشد ولی برای جریان زیادتر این میزان به $20D$ و یا بیشتر افزایش می یابد.

- زانوهای پشت سرهم :

در بعضی از واحدهای فرایندی بعلت کمبود فضا، اجباراً از چندین زانو پشت سرهم و در کنارهم استفاده می شود. این مسئله تأثیر بسیار بدی روی صحت اندازه گیری جریان سنجها دارد و عامل بسیار مهمی در ایجاد پیچش در جریان پس از خروج سیال از زانوی دوم می باشد. این پیچش براساس نتایج آزمایشگاهی تا $100D$ بعد از زانوی دوم پایدار خواهد بود و باعث خطای قابل ملاحظه ای در اندازه گیری جریان می گردد. (بیش از ۲۰٪ خطا برای جریان سنجهایی که $2-3D$ بعد از زانوی دوم نصب شده اند گزارش شده است). فاصله دادن بین زانوها می تواند باعث کاهش این اثرات گردد.



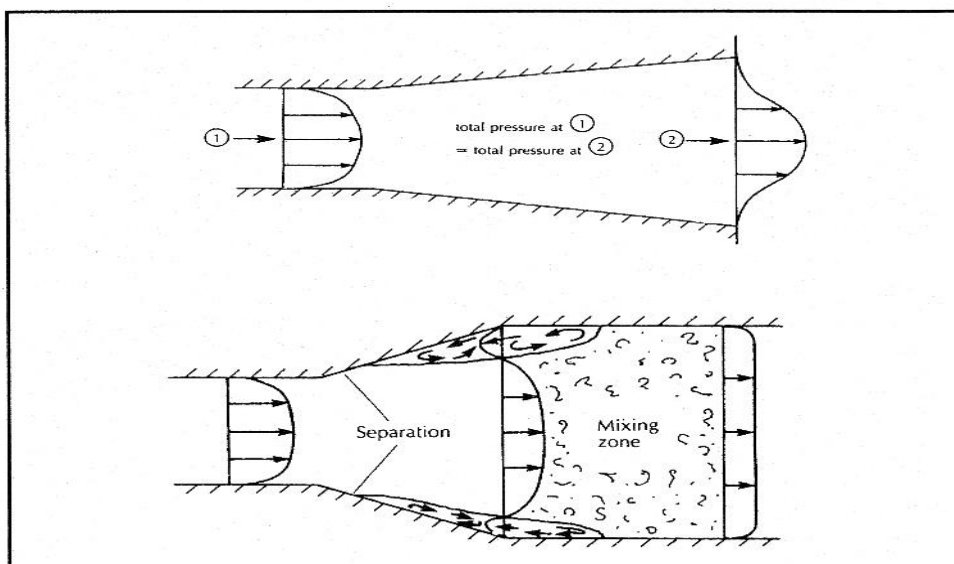
شکل ۲-۸ : پروفیل جریان خروجی از دو زانوی پشت سر هم . مرجع [۴]

- کاهنده‌ها (*Reducers*):

کاهنده‌ها نیز باعث تغییر در پروفیل سرعت می‌شوند و بر عملکرد جریان‌سنج‌ها تأثیر نامطلوبی دارند.

- افزایشنده‌ها (*Increasesers*):

این نوع اتصال نیز باعث تأثیرات متعددی بر روی اندازه‌گیری جریان می‌گردد که میزان آن بستگی به مقدار افزایش سایز دارد. شیپوره‌های بلند باعث ایجاد پروفیل قله‌دار سرعت می‌گردند (*Peaked Velocity Profile*) که این حالت باعث مقداری افزایش در قرائت جریان‌سنج می‌گردد. اگر از افزایشنده‌های هم‌مرکز رایج استفاده شود در خروجی افزایشنده یک جت از سیال و جریان مغشوش در اطراف دیواره ایجاد می‌گردد (شکل ۲-۹) که مجموعاً باعث تغییر پروفیل سرعت می‌شوند. متأسفانه در بسیاری موارد در خطوط لوله افزایشنده‌های با شیب زیاد جهت افزایش قطر استفاده می‌گردد که به ندرت به اثرات سوء استفاده از آنها در جریان‌سنج‌ها توجه می‌گردد. این موضوع در ایستگاه‌های تقلیل فشارگاز به وفور مشاهده می‌شود.



شکل ۲-۹ : جریان خروجی از افزایشدها. مرجع [۴]

- شیرها:

همه شیرها مقادیر قابل توجهی آشفتگی و تلاطم در جریان پائین دست خود ایجاد می نمایند. هرچه میزان بسته بودن شیر بیشتر می گردد، میزان آشفتگی جریان افزایش می یابد. شیرهای نیمه باز هم تولید پیچش می نمایند و هم باعث تغییر پروفیل سرعت می گردند و نهایتاً بیشترین خطای اندازه گیری را ایجاد می نمایند. وجود یک شیر نیمه باز حتی به فاصله $50D$ دربالادست و قبل از یک جریان سنج باعث تولید خطاهای غیرقابل قبول در اندازه گیری جریان می گردد.

یک شیر را می توان بعنوان یک مانع و نیز ترکیبی از زانوهای نزدیک بهم در نظر گرفت (مانند شیرهایی که برای کنترل جریان بکار می روند. رگلاتورهای دارای حرکت خطی درایستگاههای تقلیل فشار گاز نیز بدینگونه می باشند). همچنین تغییر جهت ناگهانی سیال درون شیر مجموعاً باعث یک الگوی جریانی پیچیده می گردد که باعث ایجاد خطا در همه انواع جریان سنجها می شود. شکل پروفیل جریان با بسته شدن بیشتر شیر به سمت قله دار شدن (Peaked Flow) تمایل می یابد. و مسافت زیادی لازم است تا پروفیل جریان به حالت پایدار خود برگردد و این دلیل مهمی است که بهتر است عناصر کنترل کننده

جریان قبل از جریان سنجها قرار نگیرند. یکی از دلایل خرابی جریان سنجهای توربینی در ایستگاههای تقلیل فشار گاز نیز همین موضوع می باشد. بخصوص در زمان تنظیم رگلاتورها که نوسانات فشار باعث صدمه به قطعات متحرک جریان سنج می گردد.

اگر به شیرهایی جهت قطع و وصل جریان قبل از جریان سنج نیاز می باشد، بهتر است از شیرهای ربع گرد و توپی (Ball Valve) قبل از جریان سنج استفاده نمود و این شیرها در صورتی که کاملاً باز باشند مانع قابل توجهی بر سر جریان نمی باشند و می توان آنها را با فاصله کمتر از $50D$ قبل از جریان سنج نصب نمود.

- ترکیبی از اتصالات :

اتصالات چندتایی که نزدیک به هم نصب شده اند هم باعث ایجاد پیچش و هم باعث تغییر در پروفیل سرعت می شوند. یکی از رایج ترین اتصالات ترکیبی عبارت است از یک زانو که به فاصله کمی از آن یک کاهنده نصب شده است. این نوع اتصال باعث اغتشاش بسیار شدیدی در جریان می گردد که از بین بردن آن اغتشاشات بسیار مشکل می باشد. اغتشاشات این چنینی باعث کاهش شدیدی در کارایی یکنواخت کننده ها (Straightener) و بهبود دهنده های (Flow Conditioner) جریان می گردند.

اتصالات دیگر مانند صافی ها (Strainer) و فیلترها میتوانند بعنوان اتصالات ترکیبی در نظر گرفته شوند و دلیل آن این است که در فیلترها هم تغییر جهت جریان و هم تغییر سطح جریان ایجاد می شود. متأسفانه بیشتر اوقات فاصله کافی بین فیلتر و جریان سنج در نظر گرفته نمی شود و این موضوع بخصوص در مورد کنتورهای توربینی بسیار مهم و حائز اهمیت میباشد.

- ناصافی لوله و رسوبات :

بطور کلی با افزایش عمر لوله، ناصافی داخل لوله افزایش می یابد و وجود ذرات معلق و مواد خارجی نیز به این موضوع کمک می کند. تغییر ناصافی لوله باعث تغییر در پروفیل سرعت می گردد و عموماً تولید

پروفیل سرعت قله دار می شود که این موضوع نیز باعث افزایش میزان قرائت کنتور و خطای مثبت می شود.

- بهبوددهنده ها (*Flow Conditioner*) و یکنواخت کننده ها (*Straightener*):

در نقاطی که تغییرات شدید در شکل جریان وجود دارد استفاده از بهبوددهنده ها (*Conditioner*) و یکنواخت کننده ها (*Straightener*) باعث کاهش خطای اندازه گیری می گردد. اصولاً تفاوت مشخصی بین بهبوددهنده ها و یکنواخت کننده ها وجود دارد. وسایلی که تنها پیچش جریان را کاهش می دهند بعنوان *Straightener* طبقه بندی می شوند. وسایلی که پیچش جریان را کاهش داده و پروفیل تغییر شکل داده را نیز از بین می برند بعنوان *Conditioner* طبقه بندی می گردند. بعلت اینکه خود این وسایل ایجاد تلاطماتی در جریان می نمایند نباید زیاد نزدیک به جریان سنج نصب شوند.

یکی از دلایلی که باعث می شود در نصب کنتورهای توربینی گاز بتوان طول مستقیم لوله مورد نیاز را از آنچه قبلاً ذکر شد، کاهش داد نصب یک *Straightener* در ورودی کنتور می باشد.

- اثرات عوامل خارجی :

تجربه نشان داده است که عوامل خارجی اثرات قابل توجهی بر روی خطای اندازه گیری داشته اند. این اثرات می توانند شامل لرزش خطوط لوله، قراردادن جریان سنج و کابل های سیگنال آن در کنار منابع تولید برق قوی، رطوبت زیاد و دمای بالا باشد. بعنوان مثال لرزش خط لوله باعث ایجاد مشکل در جریان سنج هایی که براساس اختلاف فشار عمل می نماید (*Venturi*, *Orifice* و . . .) می گردد. این موضوع نیز باید مد نظر قرار داده شود که راندمان و عملکرد جریان سنج ها در عمل با آنچه که در کاتالوگ شرکت سازنده آمده است و یا آنچه در آزمایشگاه های تحت کنترل بدست می آید متفاوت می باشد.

۲-۵- مروری بر کارهای گذشته

در سال ۱۷۲۴، برنولی به معادله‌ای برای اندازه‌گیری نرخ جریان‌های حاصل از اختلاف فشار که پس از عبور سیال از مقاطع کوچکتر پدید می‌آید، دست یافت. این معادله به بیان رابطه بین انرژی جنبشی و پتانسیل جریان سیال می‌پردازد:

$$P_s + \frac{\rho V^2}{2} = P_t \quad (1-2)$$

که P_s فشار استاتیکی و P_t فشار سکون جریان می‌باشد.

سپس در سال ۱۷۷۹ یک دانشمند ایتالیایی به نام جیووانی ونتوری یافته‌های خود را در جهت استفاده از اریفیس برای اندازه‌گیری جریان سیالات، به ثبت رساند و پس از آن اریفیس به طور گسترده در سطح جهان مورد استفاده قرار گرفت.

اریفیس در صنایع مختلفی برای کنترل نرخ جریان به کار می‌رود. گلوگاه کوچک اریفیس همانگونه که نرخ جریان را در لوله کنترل می‌کند، می‌تواند در برخی مواقع باعث ایجاد کاویتاسون شود. اریفیس‌های دوقلو یا اریفیس‌های با گلوگاه مخروطی برای کاهش مضرات کاویتاسیون در اختلاف فشارهای بالا استفاده می‌شوند. پدیده کاویتاسیون باعث تشکیل، رشد و فروپاشی حبابهایی در سیال شده که تولید صدا و ارتعاش می‌کنند و می‌توانند به سیستم صدمه بزنند [۵].

سیمپسون [۶] کاویتاسیون در اریفیس‌های چندگانه که در ورودی مبدل‌های حرارتی یک کشتی نصب شده بودند را مشاهده کرد. فشار بالای آب دریا برای استفاده مطمئن در مبدلهای حرارتی، باید کاهش می‌یافت. اریفیس‌های چندگانه ترکیبی از صفحات اریفیس با نسبت‌های β متفاوت می‌باشند که در یک فاصله بهینه از یکدیگر قرار می‌گیرند تا صدمات کاویتاسیون را به حداقل برسانند. سیمپسون نشان داد که اثرات کاویتاسیون به $\frac{1}{3}$ تا $\frac{1}{4}$ نسبت به استفاده از یک صفحه اریفیس کاهش پیدا می‌کند.

کامی یاما و یامازاکی [۷] بر روی اریفیس‌های با گلوگاه‌های بلند و باریک که نسبت ضخامت صفحه به قطر گلوبی اریفیس بزرگتر از $t/d > 15$ باشد، در سیالات مختلف تحقیق کردند. عدد کاویتاسیون^{۱۶} پیش بینی شده، با اعداد حاصل از کار تجربی برای شرایط سرعت بالا در گلوگاه مطابقت خوبی داشت. عدد کاویتاسیون نسبت بین اختلاف فشار مطلق و فشار بخار و انرژی جنبشی بر واحد حجم سیال بوده و پتانسیل یک جریان برای رخدادن کاویتاسیون در سیال می‌باشد:

$$Ca = \frac{P - P_v}{\frac{1}{2} \rho v^2} \quad (2-2)$$

اوبا و ایکوهاگی و کیم [۸] برای اریفیس با گلوگاه‌های ریز کوچکتر از 1 mm و $t/d > 2.5$ و $d=0.2$ و $\beta=0.33$ (آزمایشاتی را انجام و نشان داد که ضریب تخلیه C_d پیش‌بینی شده کمی از مقادیر ذکر شده در ISO ۵۱۶۷ بیشتر است.

کیم و همکاران [۵] در مقاله‌ای به بررسی تأثیر عدد کاویتاسیون و ضخامت صفحه اریفیس بر عملکرد آن پرداختند. در این کار تجربی، برای یک لوله با قطر 100 mm سه اریفیس با قطر سوراخ‌های مختلف برای سیال آب مورد آزمایش قرار گرفتند به طوری که $\beta=0.1$ و $\beta=0.15$ و $\beta=0.33$. عدد کاویتاسیون در طول آزمایش بین ۱ تا ۱.۲ تغییر می‌کند. با اینکه در تمام آزمایشات کاویتاسیون رخ می‌دهد با این وجود ضریب تخلیه اریفیس C_d فقط برای کوچکترین قطر اریفیس ($\beta=0.1$) و ضخیم‌ترین آن‌ها ($t/d=0.7$) تحت تأثیر کاویتاسیون قرار گرفت. کیم نتیجه گرفت که ضخامت نیز فقط برای حالت $\beta=0.1$ بر ضریب تخلیه اثر می‌گذارد و همان اریفیس با ضخامت های ۴ و ۵.۵ میلی‌متر تحت تأثیر قرار نمی‌گیرد.

^{۱۶} Cavitation Number

استیرن و همکاران [۹] و اسپیتزر [۱۰] در بررسی‌های خود نشان دادند که مقدار ضریب تخلیه اریفیس C_d به عدد رینولدز و β نسبت قطر لوله به قطر اریفیس بستگی دارد.

با توجه به نیاز صنایع گوناگون، انواع مختلف اریفیس متر مانند خارج از مرکز، ورودی مخروطی شکل اریفیس‌های با لبه با منحنی درجه ۲ و اخیراً نیز اریفیس‌های با سطح متغیر متداول شده‌اند. گرایش به یک نوع خاص اریفیس متر به مقدار افت فشار دائمی ایجاد شده در سیستم، مربوط می‌باشد. به طوریکه هر چه افت انرژی کمتر باشد این گرایش بیشتر خواهد بود.

یک اریفیس با سطح متغیر نرخ جریان را به صورت تابعی خطی از جابجایی جسم متقارن هم مرکز با اریفیس که بعد از آن قرار می‌گیرد، نشان می‌دهد. مزیت این نوع اریفیس اینست که افت فشار در سیستم مستقل از نرخ جریان است. جسم متقارن در هر جریانی موقعیت خود را طوری تنظیم می‌کند که افت انرژی مستقل از نرخ جریان و ثابت باشد. جابجایی این جسم دقیقاً اندازه‌گیری شده و نرخ جریان به دست می‌آید.

پوری و همکاران [۱۱] و [۱۲] بر روی مشخصه‌های اریفیس سطح متغیر کار کرده‌اند. آزمایش آنها با یک جسم مخروطی با قطر پایه ۵۵.۲ mm و زاویه یال ۵۳.۳ درجه و یک اریفیس با قطر سوراخ ۵۵.۲mm و قطر لوله ۷۸ mm انجام شده است.

سونگ و همکاران [۱۳] آزمایشاتی را بر روی موقعیت‌های مختلف جسم متقارن برای ارزیابی عملکرد اریفیس سطح متغیر انجام داده‌اند. آنها نتیجه گرفتند که برای یک اریفیس سطح متغیر مخروطی با پایه نیمکره و یال‌های پارابولیک تقریباً یک رابطه خطی بین نرخ جریان و جابجایی جسم متقارن وجود دارد. برای اندازه‌گیری اختلاف فشار حاصل از عبور جریان از ابزارهای اندازه‌گیری اختلاف فشاری مانند اریفیس و ونتوری راه‌های زیادی وجود دارد. یکی از این راه‌ها استفاده از سنسورهای فشار می‌باشد و در این زمینه در چند سال اخیر پیشرفتهای زیادی صورت گرفته است.

یکی از جذابترین پیشرفتهای، ساخت سنسورهای فشار بر پایه تکنولوژی سیلیکون است که به دلیل انتقال حرارت مناسب تر سیلیکون، قابلیت استفاده از مدارهای الکترونیکی مجتمع، قیمت پایین تر و کارایی بالاتر سنسورها فراهم شده است [۱۴].

سنسورهای سیلیکونی معمولاً شامل اجزای الکترونیکی برای تطبیق پارامترها و مدارهای الکترونیکی برای پردازش سیگنال می باشند. این سنسورها چون خیلی حساس هستند فرایند ساخت، مونتاژ و مجموعه شدن آنها باید از فارغ از هر گونه تنش انجام شود [۱۵].

دارکو بلازویچ و همکاران [۱۶] برای جلوگیری از هرگونه صدمه به سنسورها، استفاده از تکنولوژی فیلم ضخیم که پیرامون سنسور فشار کشیده شود را پیشنهاد داده اند. پس از آن استفاده از سنسورهای سیلیکونی با پوشش ضخیم در بسیاری از صنایع نظیر خودروسازی، وسایل آزمایشگاهی و پزشکی و صنایع کنترل فرایند رونق گرفت.

کراسو و همکاران [۱۷] از میکرو سنسورهای سیلیکونی فشار برای اندازه گیری فشار، بخصوص در جایی که اندازه های اقطار لوله و اریفیس کوچک، استفاده و یک وسیله آزمایشگاهی ارزان و قابل اعتماد معرفی کرده اند.

برای پیدا کردن ضریب تخلیه اریفیس، از روابط موجود در استانداردها مانند ISO ۵۱۶۷ استفاده می کنیم. این روابط وقتی معتبر هستند که جریان ورودی کاملاً توسعه یافته بوده و به حالت پایدار رسیده باشد. بنابراین معمولاً این شرایط را هم به کمک یک شرایط دهنده جریان (Flow Conditioner) و هم به کمک یک طول مستقیم لوله قبل از اریفیس متر برقرار کرده و نیازمندیهای نصب اریفیس استاندارد نیز باید رعایت شود.

میلر [۱۸] دقت اریفیس متر را در سایزهای مختلف و جریان ها و سیالات متفاوت بررسی کرده است و نشان داده است که اریفیس ها می توانند خیلی دقیق باشند.

برانچ [۱۹] به بررسی تأثیر یک زانویی ۹۰ درجه به عنوان آشفتگی بر روی اریفیس پرداخته است. زیمرمان [۲۰] تأثیر یک خم خارج از صفحه را بر روی نامتقارنی پروفیل سرعت بررسی کرده است. لاز و کازان [۲۱] بر روی شرایط دهنده‌های جریان کار کرده‌اند. بک و مازیل [۲۲] بر روی یک اریفیس متر جدید تحقیق کرده‌اند که در آن با تعریف چرخش استاندارد قبل از اریفیس متر، ضریب تخلیه اریفیس تحت تأثیر شرایط آشفته جریان ورودی به لوله قرار نمی‌گیرد. این آشفتگی می‌تواند جریان چرخشی یا مسدود شدن قسمتی از مقطع جریان باشد. از این نتیجه می‌توان برای استاندارد سازی پروفیل‌های سرعت جریان و کوتاه تر کردن طول لوله مستقیم قبل از اریفیس استفاده کرد. در این چند سال پیشرفت هایی در خصوص ابزارهای اندازه‌گیری مخصوص جریان‌های دو فازی با دقت بالا و قیمت پایین صورت گرفته است. این ابزارها در صنایع نفت و گاز و تزریق گاز ترش به چاه‌های نفت مورد استفاده هستند و دقت بالای آنها تأثیری اقتصادی در خیلی از زمینه‌ها به عنوان مثال برای تخمین بهتر طول عمر چاه‌های گاز، دارند. معمولاً در خطوط انتقال گاز، مقداری مایع بر اثر تقطیر در لوله جمع می‌شود و توانایی یک جریان سنج به پاسخ قابل پیش بینی برای مخلوط جریان گاز و مایع در صنایع گاز مهم است. رفتار اریفیس مترهای معمولی غیر قابل پیش بینی و نامناسب است و توربین مترها نیز در مواجهه با جریانهای دو فازی آسیب جدی می‌بینند. موریسون و همکاران [۲۳] اریفیس شکافدار را برای رفع این مشکل ارائه و تأثیر جریان دوفازی گاز و مایع بر روی کارایی اریفیس شکافدار با نسبت قطر معادل ۰٫۵ را بررسی کرده‌اند. این اریفیس‌ها طوری طراحی می‌شوند که به پروفیل سرعت جریان حساس نباشند.

البیورا و همکاران [۲۴] نشان داده‌اند که در جریان های دوفازی عمودی یا افقی بودن جهت جریان هیچ تأثیر قابل توجهی بر روی نتایج اندازه‌گیری نمی‌گذارد.

استیون [۲۵] برای اولین بار از ونتوری متر برای سنجش جریان دو فازی استفاده کرد و روابط مربوط به آن را استخراج نمود. تا قبل از این کار از اریفیس‌متر برای اندازه‌گیری‌های مربوط به جریان دوفازی استفاده می‌شد. لین [۲۶] روابط مربوط به محاسبات اریفیس‌متر برای جریان دوفازی را آورده است.

جنگ و دوستانش [۲۷] در مقاله‌ای به بررسی مشخصه‌های اریفیس شکافدار در جریان دوفازی پرداخته‌اند و نتیجه گرفته‌اند که این اریفیس‌ها نسبت به انواع معمولی به طول لوله کوتاهتری برای جریان فشار در ورودی لوله نیاز دارند و پروفیل سرعت یکنواخت و پایداری دارند و ذرات انباشته شده مایع در پایین دست اریفیس مشاهده نمی‌شود.

طبق رابطه (۳-۲) برای محاسبات مربوط به اندازه‌گیری نرخ جریان گاز طبیعی که در این تحقیق به آن پرداخته‌ایم، به چند پارامتر اساسی از جمله ضریب تخلیه اریفیس C_d ، چگالی، اختلاف فشار و ضریب انبساط گاز^{۱۷} نیاز داریم [۲۸]:

$$\dot{m} = c_d \varepsilon \times \pi \frac{d^2}{4} \sqrt{\frac{2 \Delta p \rho}{1 - \beta^4}} \quad (3-2)$$

برای اندازه‌گیری اختلاف فشار از سنسورهای DP و برای تخمین C_d ضریب تخلیه اریفیس، از روابط موجود در ISO ۵۱۶۷-۲ [۲۸] برای اریفیس سود می‌بریم.

وقتی یک جریان گاز از میان یک ابزار اندازه‌گیری اختلاف فشاری مانند اریفیس عبور می‌کند فشار آن کاهش یافته و در چگالی آن تغییری ایجاد می‌شود. روابط تخمین نرخ جریان برای ابزارهای اختلاف فشاری با فرض چگالی ثابت برای سیال، معتبر می‌باشند. این فرض فقط برای جریان‌های تراکم‌ناپذیر

^{۱۷} Expansibility Factor

صدق می‌کند و برای جریان‌های تراکم‌پذیر یک ضریب تصحیح باید لحاظ شود که ضریب انبساط آدیاباتیک^{۱۸} نام دارد و به پارامترهای فشار، اختلاف فشار، قطر لوله، قطر سوراخ ابزار اندازه‌گیری و توان آیزنتروپیک بستگی دارد [۲۹].

از آنجا که معادله حالت به شکل $P = \rho_m ZRT$ می‌باشد، بنابراین با معلوم بودن مقادیر دما و فشار و ضریب تراکم‌پذیری، چگالی مولی، ρ_m ، و با ضرب آن در وزن مولی، چگالی به دست می‌آید:

$$\rho = \rho_m \times M_r \quad (۴-۲)$$

بنابراین اولین قدم پس از قرائت مقادیر دما و فشار اندازه‌گیری شده با سنسور فشار و ترموکوپل دما در راه محاسبه دبی جریان، تعیین ضریب تراکم‌پذیری^{۱۹} می‌باشد. در این تحقیق از معادله حالت AGA۸ که با تحقیقات انجام شده، مناسب‌ترین روش برای تعیین ضریب تراکم‌پذیری گاز طبیعی است [۳۰] استفاده کرده و Z را تعیین می‌کنیم.

پارامتر دیگر مورد نیاز محاسبه نرخ جریان، ضریب انبساط گاز، ϵ ، است [۲۸]:

$$\epsilon = 1 - (0.351 + 0.256\beta^4 + 0.93\beta^8) \left[1 - \left(\frac{p_r}{p_1} \right)^{1/\kappa} \right] \quad (۵-۲)$$

که در آن κ توان آیزنتروپیک است که برای تعیین این پارامتر هم از روش AGA ۸ استفاده می‌کنیم. لازم به یادآوری است که در فشارهای بالا رفتار گاز طبیعی از رفتار گاز ایده آل انحراف پیدا کرده و κ دیگر از رابطه $\frac{C_p}{C_v}$ به دست نمی‌آید، بلکه C_p و C_v و κ تابعی از دما و فشار می‌باشند. هر چند κ تاثیر کمی بر روی نرخ جریان دارد ولی برای دقت بیشتر در محاسبات به مقدار دقیق آن نیازمندیم. سولیوان [۳۱] در مقاله‌ای چند مدل جریان آیزنتروپیک معرفی کرده است که از معادلات حالت مختلف برای

^{۱۸} Adiabatic Correction Factor

^{۱۹} Compression Factor

پیش‌بینی K سود می‌برد. او همچنین پیشنهاد کرد برای کاربردهایی که به محاسبات دقیق نیاز دارند مانند اندازه‌گیری نرخ جریان، تأثیر رفتار گازهای واقعی در نظر گرفته شود.

ایوان ماریک [۲۹] و [۳۲] با کمک تقریب ردلیش - وانگ و معادله حالت AGA ۸/۱۹۹۲ و نیز با یک سری عملیات ریاضی بر روی معادله حالت AGA ۸ و تعاریف ترمودینامیکی، برای گاز طبیعی K را محاسبه کرده است .

در پایان نامه پیش رو سعی شده است تا با ساخت یک نمونه اریفیس متر با اتصالات از نوع فلنجی طبق استاندارد ISO ۵۱۶۷-۲ و کار آزمایشگاهی بر روی آن و به صورت همزمان ورود پارامترهای مورد نیاز حاصل از آزمایش به یک برنامه کامپیوتری ویژوال بیسیک که به منظور طراحی اریفیس نوشته و در آن از جدیدترین روشها و مطالعات برای تخمین پارامترهای فیزیکی گاز طبیعی استفاده شده است، به اطلاعات جامعی در اندازه‌گیری نرخ جریان گاز که در خطوط انتقال گاز و ایستگاه های C.G.S به آن نیاز فراوان می‌باشد، دست یابیم .

در فصل بعد به طور کامل به معرفی روش AGA ۸ که معتبرترین روش برای محاسبه ضریب تراکم‌پذیری گاز طبیعی و چگالی می‌باشد، خواهیم پرداخت.

فصل سوم

معرفی روش ۸ AGA

و فرمول بندی روابط

۳-۱- مقدمه

تا کنون معادلات حالت مختلف و متنوعی جهت بدست آوردن خواص ترمودینامیکی گازها معرفی شده‌اند اما از آنجا که گاز طبیعی، ترکیبی از گازهای مختلف با خواص ترمودینامیکی متفاوت می‌باشد و بدلیل وابستگی شدید خواص گاز به ترکیبات تشکیل دهنده‌اش و توجه به این مسئله که گازهای طبیعی استخراج شده از مناطق مختلف دارای ترکیبات متفاوتی نیز می‌باشند، نیاز به وجود معادله حالتی که خواص گاز طبیعی را با استفاده از آنالیز دقیق اجزای تشکیل دهنده گاز بیان نماید وجود داشت. معادله حالت ۸ AGA، خواص گاز طبیعی را با استفاده از میزان درصد کسر مولی اجزای تشکیل دهنده گاز بیان می‌نماید [۳۰].

در این فصل در ابتدا به معرفی معادلات حالت مختلف و سپس به معرفی و نحوه استفاده از روش AGA۸ و استنتاج روابط مورد نیاز برای تعیین خواص فیزیکی گاز طبیعی می‌پردازیم.

۳-۱-۱- معادله حالت گاز ایده‌آل

از جمله ساده‌ترین معادلات حالتی که امروزه وجود دارند، معادله حالت گاز ایده‌آل می‌باشد. این معادله ارتباط بین پارامترهای فشار، دما و حجم گاز را برای چگالی‌های کم به صورت یک رابطه خطی بین آنها بیان می‌نماید.

در پاره‌ای کاربردها که دقت بالایی مدنظر نباشد استفاده از این معادله می‌تواند فرایند رسیدن به جواب را تسریع بخشد.

$$PV = mRT \quad (۱-۳)$$

در رابطه بالا P فشار گاز، T دمای گاز بر حسب کلوین، V حجم گاز یا حجم سیلندر یا محفظه حاوی گاز m جرم گاز و در نهایت R ثابت گاز می‌باشد.

۳-۱-۲- معادله حالت Peng Robinson [۳۳]

یکی دیگر از معادلات حالت مشهور و پرکاربرد معادله حالت Peng Robinson می‌باشد. نتایج حاصل از استفاده از این معادله برای تبیین رابطه فشار، دما و حجم در مورد گاز طبیعی بیانگر این می‌باشند که با استفاده از این معادله در مواردی که جزئیات ترکیب گازهای تشکیل‌دهنده برای کاربر ضروری نباشد می‌توان خروجیهای خوبی را از آن نتیجه گرفت.

معادله حالت Peng Robinson در زیر آورده شده‌است. در این معادله a ، b و ω به ضرایب Peng Robinson موسوم بوده مقادیر آنها از رابطه (۲-۳) بدست می‌آید.

$$P = \frac{RT}{V-b} - \frac{a\alpha}{V^2 + 2bV - b^2} \quad (۲-۳)$$

$$a = \frac{0.45724 R^2 T_C^2}{P_C}$$

$$b = \frac{0.07780 RT_C}{P_C} \quad (۳-۳)$$

$$\alpha = \left((1 + (0.37464 + 1.54226\omega - 0.26992\omega^2)(1 - T_r^{0.5})) \right)^2$$

$$T_r = \frac{T}{T_C}$$

در رابطه (۳-۳)، T_C و P_C به ترتیب دما و فشار بحرانی گاز، T_r دمای کاهشدهنده و ω ضریب خروج از مرکزیت می‌باشند که مقادیر آنها در جداول خواص گازها موجود است.

۳-۱-۳- معادله حالت ۸ AGA

جدیدترین و معتبرترین معادله حالت مورد استفاده در مورد گاز طبیعی، معادله ۸ AGA می‌باشد. این معادله تنها معادله حالتیست که با در نظر گرفتن اجزاء تشکیل‌دهنده گاز و خواص هرکدام به محاسبه ضریب تراکم‌پذیری گاز می‌پردازد. دقت نتایج بدست آمده از این روش تا آنجاست که امکان استفاده از آنرا در وسائل و لوازم اندازه‌گیری از جمله اریفیس‌ها ممکن می‌سازد [۳۰].

۳-۲- روش ۸ AGA و روابط و معادلات مربوطه

تحقیقات انجام گرفته زیر نظر آقای هاوارد در سالهای ۱۹۲۸ تا ۱۹۲۹ منجر به تدوین روشی استاندارد و قابل قبول جهت محاسبه ضریب تراکم‌پذیری گاز کامل تا فشار گاز ۴ Mpa در دایره تحقیقات استاندارد گاز طبیعی آمریکا گردید. اما تا سال ۱۹۵۴ که آقای پروفیسور ساموئل.ر. در دانشگاه اوهایو گزارشی از تحقیقات انجام گرفته‌اش بر روی ضریب تراکم‌پذیری گاز طبیعی بر مبنای مطالعات پیشین آقای هاوارد منتشر کرد، نتایج ایشان انتشار نیافته بود [۳۰].

پس از آن ضریب تراکم‌پذیری گاز طبیعی و معادله حالتی بر مبنای این مطالعات در فاصله بین سالهای ۱۹۵۶ تا ۱۹۶۲ زیر نظر پروفیسور زیمرمن در دانشگاه اوهایو بسط و گسترش داده شد و نهایتاً در رساله‌ای توسط موسسه AGA در سال ۱۹۶۲ منتشر گردید.

در ادامه در سال ۱۹۸۵ رساله‌ای جهت محاسبه دقیق ضریب تراکم‌پذیری گاز طبیعی با در نظر گرفتن اثرات دما و فشار و گستره اجزای تشکیل‌دهنده گاز به سرپرستی پرفیسور کنت.ای. در دانشگاه اوکلاهما انتشار یافت. گزارش منتشر شده با توجه به میزان دقتی که در محاسبات داشت، قابلیت استفاده از روش مدنظر را در وسائل اندازه‌گیری دقیق گاز، از جمله دبی‌سنجها ممکن می‌نمود. اما در ادامه نتایج مطالعات مذکور در سالهای ۱۹۸۵ تا ۱۹۹۰ دچار تغییر و تکامل چشمگیری گشت و داده‌های جدید

بدست آمده از نتایج آزمایشهای دقیق انجام شده توسط موسسه GERG بر روی گاز طبیعی نشان دادند که معادله حالت بدست آمده توسط پرفسور کنت.ای. و همکاران در سال ۱۹۸۴ نیاز به بازبینی و اعمال تغییرات قابل توجهی دارد.

نهایتاً با توجه به نتایج مفید بدست آمده از داده های آزمایشگاهی و داده های تحلیلی، پرفسور ریچارد جاکوبسن و همکاران در یک پروژه همکاری مشترک بین دو موسسه GRI و GERG آمریکا، با تکمیل مطالعات پیشین، بازبینی های مفصلی در جهت رفع خطای نتایج استحصال شده از روش تحلیلی، بر روی متد مذکور ارائه دادند و نتیجه مطالعات خود را در قالب یک استاندارد مورد پذیرش موسسه AGA در سال ۱۹۹۲ تدوین نمودند [۳۰].

۳-۲-۱- شرح و بسط روش ۸ AGA

گزارش AGA جزئیات اطلاعات مورد نیاز برای محاسبه ضریب تراکم پذیری و چگالی گاز طبیعی و مخلوط گازها تا ۲۱ عنصر و سایر گازهای هیدروکربنی را در اختیار ما قرار می دهد. برای محاسبه ضریب تراکم پذیری گاز طبیعی با استفاده از استاندارد AGA دو روش موجود است که ابتدا به شرح مختصری درباره این دو و تبیین تفاوت های آنها پرداخته می شود [۳۰].

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

در جدول (۳-۱) محدوده تعریف شده نرمال که روش (G.C.M) در آن قابل بکارگیری است آورده شده است و برای گازهای خشک و شیرین کاربرد دارد.

اما روش دوم که تحت عنوان (D.C.M), Detail Characterization Method شناخته می‌شود، در محدوده وسیعتری از دما، چگالی و فشار گاز طبیعی قابل بکارگیری می‌باشد. استفاده از این روش امکان محاسبه ضریب تراکم‌پذیری را در محدوده دمایی ۱۳۰- درجه سانتیگراد تا ۴۰۰ درجه تا فشارهای بالاتر از ۲۸۰ Mpa با دقت مطلوب امکان پذیر می‌سازد [۳۰]. با توجه به محدوده نسبتاً وسیع دما و فشار، که در روش (D.C.M) تعریف شده است، محاسبات ضریب تراکم‌پذیری Z گاز طبیعی بر مبنای این روش تبیین خواهد شد.

جدول ۳-۱: محدوده مجاز ترکیبات گاز طبیعی برای استفاده از روش G.C.M

محدوده مجاز	کمیت
۰.۵۵۴-۰.۸۷	چگالی نسبی
۱۸.۷ - ۴۵.۱ Mj/m ^۳	مقدار حرارتی گراس
۴۵ - ۱۰۰	درصد مولی متان
۰ - ۵۰	درصد مولی نیتروژن
۰ - ۳۰	درصد مولی دی اکسید
۰ - ۱۰	درصد مولی اتان
۰ - ۴	درصد مولی پروپان
۰ - ۱	درصد مولی بوتان
۰ - ۰.۳	درصد مولی پنتان
۰ - ۰.۲	درصد مولی هگزان
۰ - ۰.۲	درصد مولی هلیوم
۰ - ۱۰	درصد مولی هیدروژن
۰ - ۰.۳	درصد مولی مونو اکسید
۰	درصد مولی آرگون
۰	درصد مولی اکسیژن
۰ - ۰.۰۵	درصد مولی آب
۰ - ۰.۰۲	درصد مولی سولفید

این روش، خطای محاسبه ضریب تراکم‌پذیری و چگالی را برای ترکیبات گاز طبیعی که درصد مولی هگزان و هیدروکربنهای سنگین بیش از ۱٪ است، کاهش می‌دهد. همچنین ضریب دوم ویریا برای آب و ترکیبات آن با متان، اتان، نیتروژن و دی‌اکسید کربن برای کاهش خطای محاسبات گاز طبیعی همراه با بخار آب است.

۳-۳- عدم قطعیت‌ها [۳۰]

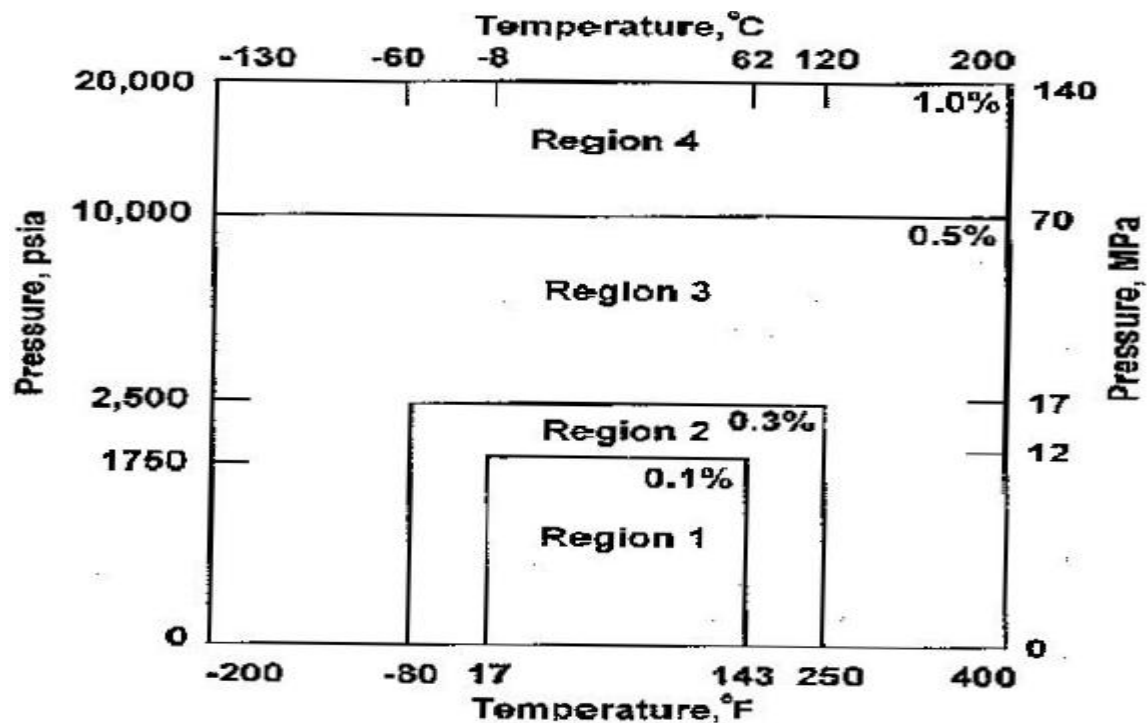
عدم قطعیت مربوط به محاسبات ضریب تراکم‌پذیری چه از روش D.C.M و چه G.C.M به ترکیبات گاز طبیعی و شرایط فشاری و دمایی کاری بستگی دارد. خطاهای محاسبه اندازه‌گیری از این دو روش با جداول اطلاعاتی موسسات GRI و GERG مقایسه شده و نتایج خوبی به دست آمده است.

۳-۳-۱- عدم قطعیت روش D.C.M

عدم قطعیت مورد انتظار این روش در محدوده شکل (۳-۱) برای رنج نرمال مشخصات گاز طبیعی برای عناصر با درصد مولی‌های مطابق جدول (۳-۱) می‌باشد. برای مشخصات خارج از جدول این روش خطای متوسطی دارد و برای مقادیر خارج از ناحیه ۱ شکل (۳-۱) این خطا بزرگ می‌باشد. جداول اطلاعاتی موسسات GRI و GERG صحت این روش را برای ناحیه ۱ و بخشی از نواحی ۲، ۳ و ۴ تأیید کرده‌اند.

۳-۳-۲- عدم قطعیت روش G.C.M

عدم قطعیت مورد انتظار این روش برای رنج نرمال مشخصات گاز طبیعی در داخل ناحیه ۱ از شکل (۳-۱) قرار می‌گیرد. خارج از این محدوده این معادلات کاربرد نداشته و نباید استفاده شوند.



شکل ۳-۱: محدوده خطا برای محاسبه ضریب تراکم‌پذیری از روش AGA ۸. مرجع [۳۰]

۳-۳-۳- توصیه‌ها

روش G.C.M به خاطر سادگی برای دماهای ۰ تا ۵۵ درجه سانتیگراد و فشارهای تا ۸.۳ مگاپاسکال برای مقادیر جدول (۳-۱) به کار می‌روند. برای تمام شرایط دیگر و ترکیبات دیگر گاز از روش D.C.M استفاده می‌شود.

با توجه به محدوده‌ی نسبتاً وسیع دما و فشار، که در روش Detail Characterization Method (D.C.M) تعریف شده است، محاسبات در این پایان نامه بر مبنای این روش تبیین خواهد شد.

۳-۴- روابط ریاضی مورد استفاده در حل مسأله

در این بخش ابتدا به روابط مورد نیاز برای تعیین ضریب تراکم پذیری و چگالی گاز طبیعی از روش D.C.M و سپس به نحوه محاسبه توان آیزنتروپیک و ویسکوزیته (لزجت) سیال پرداخته می شود.

۳-۴-۱- معادلات و روابط مربوط به روش D.C.M

معادله مورد استفاده در این روش از دو بخش سری توانی برای شرایط چگالی کم و تابع نمایی برای شرایط چگالی زیاد تشکیل شده است [۳۰].

ضریب تراکم پذیری Z توسط معادله (۳-۴) تعریف می شود که در معادله مذکور P فشار گاز، T دما حجم V ، n تعداد مولهای گاز و R ثابت گاز می باشد [۳۵].

$$Pv_m = nZRT \quad (۴-۳)$$

که $v_m = 1/\rho_m$. همچنین دانسیته مولار که در اینجا با ρ_m نمایش داده می شود، توسط رابطه (۳-۳) تعریف می شود:

$$\rho_m = n/V \quad (۵-۳)$$

با توجه به رابطه (۳-۵) دانسیته جرمی و دانسیته مولار توسط رابطه (۳-۶) به همدیگر مربوط می باشند:

$$\rho = M_r \times \rho_m \quad (۶-۳)$$

که در این رابطه، ρ دانسیته جرمی، ρ_m دانسیته مولار و M_r جرم مولی می باشد که از رابطه (۳-۷) محاسبه می شود:

$$M_r = \sum_{i=1}^N X_i M_{r_i} \quad (۷-۳)$$

در رابطه فوق X_i ، کسر مولی جزء i ام از مخلوط گاز، M_r جرم مولی جزء i ام و N تعداد اجزای تشکیل دهنده گاز می‌باشند.

حال با استفاده از روابط (۵-۳) و (۶-۳) و جایگذاری آنها در معادله (۴-۳) روابط (۸-۳) و (۹-۳) بدست خواهند آمد که در این دو رابطه، دانسیته جرمی و مولی بر حسب ضریب تراکم‌پذیری Z بیان شده‌است:

$$\rho_m = P / ZRT \quad (۸-۳)$$

$$\rho = M_r P / ZRT \quad (۹-۳)$$

معادله مربوط به ضریب تراکم‌پذیری Z در روش D.C.M به شکل کانسرواتو زیر می‌باشد: [۳۰]

$$Z = 1 + B\rho_m - \rho_r \sum_{n=1}^{\Delta} C_n^* + \sum_{n=1}^{\Delta} C_n^* (b_n - c_n k_n \rho_r^{k_n}) \rho_r^{b_n} e^{-c_n \rho_r^{k_n}} \quad (۱۰-۳)$$

که در این معادله، Z ضریب تراکم‌پذیری، B ضریب دوم ویریا، ρ_r دانسیته کاهیده، b_n ، k_n ، c_n ضرائب ثابت پارامتری و C_n^* نیز یک ضریب می‌باشند که مقادیر آنها تابع ترکیبات تشکیل دهنده گاز طبیعی و دمای گاز می‌باشند [۳۰]. در ادامه به تعریف هر کدام از پارامترهای بکار رفته در معادله (۱۰-۳) پرداخته خواهد شد.

دانسیته کاهیده ρ_r ، توسط رابطه (۱۱-۳) با دانسیته مولار ارتباط پیدا می‌کند. که K در این رابطه پارامتری تحت عنوان پارامتر سائز مخلوط است که توسط رابطه (۱۲-۳) تعریف می‌شود و از مشخصه‌های مربوط به ساختار شیمیایی اجزا می‌باشد [۳۲].

$$\rho_r = K^3 \rho_m \quad (۱۱-۳)$$

$$K^5 = \left[\sum_{i=1}^N X_i K_i^{5/2} \right]^2 + 2 \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N X_i X_j (K_{ij}^5 - 1) (K_i K_j)^{5/2} \quad (۱۲-۳)$$

لازم به توضیح است که در رابطه (۳-۱۲) K_i و K_j به ترتیب پارامترهای مربوط به سائز اجزاء i ام و j ام بوده و K_{ij} پارامتر سائز برهمکنش اجزای j و i می‌باشند که در مرجع [۳۰] مقادیر آنها بسته به ترکیبات و اجزای مختلف گازهای تشکیل دهنده مخلوط گاز طبیعی آورده شده است.

ضریب دوم ویریل که در معادله (۳-۱۰) با پارامتر B نمایش داده شده است، از رابطه (۳-۱۳) بدست می‌آید. که در این رابطه نیز N تعداد اجزای موجود در مخلوط گاز می‌باشد [۳۰].

$$B = \sum_{n=1}^{N-1} a_n T^{-u_n} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N y_i y_j B_{nij}^* E_{ij}^{u_n} (K_i K_j)^{\frac{r}{2}} \quad (۳-۱۳)$$

در معادله (۳-۱۳)، پارامتر B_{nij}^* از رابطه (۳-۱۴) بدست می‌آید که در آن $a_n, u_n, g_n, q_n, f_n, S_n$ و W_n پارامترهای ثابت معادله حالت یا ضرایب مشخصه دودویی مربوط به اجزای گازهای تشکیل دهنده مخلوط می‌باشند که بسته به حالت‌های مختلف، مقادیر آنها در جدول ۴ مرجع [۳۰] آورده شده است.

$$B_{nij}^* = (G_{ij} + 1 - g_n)^{g_n} (Q_i Q_j + 1 - q_n)^{q_n} \times (F_i^{1/2} F_j^{1/2} + 1 - f_n)^{f_n} (S_i S_j + 1 - s_n)^{s_n} (W_i W_j + 1 - w_n)^{w_n} \quad (۳-۱۴)$$

در رابطه (۳-۱۴)، پارامترهای مشخصه تناظر نام دارند که در حالت‌های مختلف برهمکنش ذرات نسبت به یکدیگر در مخلوط گاز، مقادیر آنها اعداد ثابت متفاوتی می‌باشد و در جدول (۵) مرجع [۳۰] آورده شده است. همچنین لازم به ذکر است که مقدار W_i برای تمام اجزای مخلوط بجز H_2O صفر بوده و F_i نیز بجز برای H_2 در رابطه بالا مقدار صفر را دارا می‌باشد.

پارامترهای دودویی E_{ij} ، G_{ij} که به ترتیب پارامترهای انرژی برهمکنشی ضریب دوم و ویریل و پارامتر

دودویی موقعیت یا جهت ذرات نامیده می‌شوند نیز توسط روابط (۳-۱۵) و (۳-۱۶) تعریف می‌شوند:

$$E_{ij} = E_{ij}^* (E_i E_j)^{1/2} \quad (۳-۱۵)$$

$$G_{ij} = \frac{G_{ij}^* (G_i + G_j)}{2} \quad (۳-۱۶)$$

که در این دو رابطه نیز E_{ij}^* پارامتر برهمکنش دودوئی انرژی ضریب دوم ویریل، برای دو جزء i, j برای یک موقعیت یا جهت خاص این دو جزء در مخلوط گاز می باشد [۳۲]. که مقادیر این دو پارامتر برای حالت‌های مختلف ترکیبات مخلوط نسبت به همدیگر، در ۶ مرجع [۳۰] آورده شده‌اند. در نهایت ضریب C_n^* که تابعی از ترکیب اجزای تشکیل دهنده و دمای گاز می باشد، در رابطه (۳-۱۷) تعریف می شود [۳۰].

$$C_n^* = a_n(G + 1 - g_n)^{g_n}(Q^2 + 1 - q_n)^{q_n} \times (F + 1 - f_n)^{f_n} U^{u_n} T^{-u_n} \quad (۳-۱۷)$$

اما پارامترهای U, G, Q, F ، که به ترتیب پارامترهای انرژی، موقعیت، کوادراتیو و دما بالای مخلوط نام دارند، توسط روابطی که در ادامه خواهند آمد، محاسبه می شوند:

$$U^5 = \left[\sum_{i=1}^N X_i E_i^{5/2} \right]^2 + 2 \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^{N-1} X_i X_j (U_{ij}^5 - 1) (E_i E_j)^{5/2} \quad (۳-۱۸)$$

$$G = \sum_{i=1}^N X_i G_i + \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N X_i X_j (G_{ij}^* - 1) (G_i + G_j) \quad (۳-۱۹)$$

$$Q = \sum_{i=1}^N X_i Q_i \quad (۳-۲۰)$$

$$F = \sum_{i=1}^N X_i^2 F_i \quad (۳-۲۱)$$

۳-۴-۲- تعیین ضریب تراکم پذیری و چگالی گاز طبیعی

در محاسبه ضریب تراکم پذیری گاز طبیعی توسط روش D.C.M، نخست بایستی ترکیبات گاز و درصد مولی هر کدام مشخص شوند. اما با توجه به مشخص بودن دمای مطلق و فشار مطلق گاز، مشکل اساسی محاسبه چگالی مولار یا ρ_m می باشد که بایستی با استفاده از تعریف معادله حالت یادشده برحسب فشار محاسبه گردد.

همانطور که در معادله (۸-۳) نشان داده شد، چگالی مولار تابعی از فشار مطلق گاز می‌باشد. در نتیجه با جایگذاری معادله (۱۰-۳) در معادله (۸-۳) یک معادله برای فشار بر حسب معادله حالت و به شکل نمایی بدست خواهد آمد:

$$P = \rho_m RT \left[1 + B\rho_m - \rho_r \sum_{n=1}^{\infty} C_n^* T^{-u_n} \right] + \rho_m RT \left[\sum_{n=1}^{\infty} C_n^* T^{-u_n} (b_n - c_n k_n \rho_r^{k_n}) \rho_r^{b_n} \exp(-c_n \rho_r^{k_n}) \right] \quad (22-3)$$

که در این معادله R ثابت گاز، ρ_m دانسیته مولار و ρ_r دانسیته کاهیده می‌باشد.

بدین ترتیب وقتیکه فشار، دما و ترکیبات گاز مشخص باشند، تنها مقدار مجهول در معادله (۲۲-۳) دانسیته مولار ρ_m می‌باشد.

پس از بدست آمدن روابط مدنظر جهت حل مسئله و استحصال مقادیر پارامترهای مورد نیاز اشاره شده در فرمولها، یک الگوریتم نیوتون-رافسون برای حل تکراری مناسب جهت حل ρ_m انتخاب شده است [۳۴].

پس از مشخص شدن مقدار ρ_m در معادله (۲۲-۳) مقادیر چگالی ρ و ضریب تراکم پذیری Z به ترتیب از روی روابط (۶-۳) و (۸-۳) به دست می‌آیند.

۳-۴-۳- تعیین ظرفیت های حرارتی و توان آیزنتروپیک

طبق رابطه (۲۳-۳) تمام خواص فیزیکی جریان به جز فاکتور انبساط، ε معلوم هستند. ε از رابطه (۳-۳) به دست می‌آید:

$$\dot{m} = C\varepsilon\pi \frac{d^2}{4} \times \frac{\sqrt{2\Delta p \cdot \rho}}{\sqrt{(1-\beta^4)}} \quad (23-3)$$

$$\varepsilon = 1 - (0.351 + 0.256\beta^4 + 0.93\beta^8) \times \left[1 - \left(\frac{P_1 - \Delta P}{P_1} \right)^{\frac{1}{k}} \right] \quad (24-3)$$

که برای محاسبه ε به نیاز به مقدار توان آیزنتروپیک ، K ، گاز طبیعی داریم. هر چند K تأثیر کمی بر روی فاکتور انبساط که برای در نظر گرفتن اثر اصطکاک وارد معادله (۳-۲۳) می‌شود، دارد ولی برای دقت بیشتر در محاسبات نرخ جریان ، باید به صورت دقیق تعیین شود.

هنگامی که یک جریان گاز از میان سطح مقطع کوچکتر یک ابزار اندازه گیری اختلاف فشاری مانند اریفیس عبور می کند ، به یک فشار کمتر منبسط می شود. اگر این طول انبساط کوتاه و اختلاف فشار ایجاد شده در سیال به دلیل تغییر سطح مقطع، کوچک باشد می توان فرض انبساط آیزنتروپیک کرد. در این شرایط روابط میان فشار و حجم به صورت زیر است:

$$\frac{p_1}{p_2} = \left(\frac{V_2}{V_1} \right)^k = \left(\frac{\rho_1}{\rho_2} \right)^k \quad (25-3)$$

محاسبات مربوط به توان آیزنتروپیک بستگی به این دارد که گاز، ایده‌آل فرض شود یا یک گاز واقعی. اگر گاز ایده‌آل فرض شود، توان آیزنتروپیک $\kappa = \frac{C_p}{C_v}$ می‌باشد که C_p ظرفیت حرارتی ویژه در فشار ثابت و C_v ظرفیت حرارتی ویژه در حجم ثابت هستند. ولی در دما ها و فشار های بالا که در صنایع گاز زیاد با آن برخورد می‌کنیم، رفتار گاز به طور مشخص از رفتار گاز ایده‌آل انحراف پیدا می‌کند [۳۲]. سولیوان پیشنهاد می‌کند که برای کاربردهای دقیق نظیر اندازه‌گیری جریان، به تأثیر تفاوت رفتار گاز واقعی از ایده‌آل توجه شود [۳۱].

در این تحقیق از روابط ذکر شده در مرجع [۲۹] برای تخمین K استفاده می‌کنیم.

با فرض اینکه انتروپی ، S ، یک بار تابعی از دما و حجم مخصوص باشد ، $s = s(T, v_m)$ ، و یک بار تابعی از دما و فشار باشد ، $s = s(T, P)$ ، اگر از تابع S دیفرانسیل کامل بگیریم داریم:

$$ds = \left(\frac{\partial s}{\partial T}\right)_{v_m} dT + \left(\frac{\partial s}{\partial v_m}\right)_T dv_m \quad (26-3)$$

$$ds = \left(\frac{\partial s}{\partial T}\right)_p dT + \left(\frac{\partial s}{\partial p}\right)_T dp \quad (27-3)$$

که T دما، p فشار، S انترپی و v_m حجم مخصوص می باشد.

اگر طبق تعریف و روابط [۳۳] داشته باشیم:

$$C_{m,v} = \left(\frac{\delta u}{\delta T}\right)_{v_m} \quad (28-3)$$

$$C_{m,p} = \left(\frac{\delta h}{\delta T}\right)_p \quad (29-3)$$

$$du = Tds + pdv_m \quad (30-3)$$

$$dh = Tds - v_m dp \quad (31-3)$$

با تقسیم طرفین معادله (۳۰-۳) بر dT و ثابت نگه داشتن v_m و با توجه به معادله (۲۸-۳)، داریم:

$$C_{m,v} = T \left(\frac{\partial s}{\partial T}\right)_{v_m} \quad (32-3)$$

و همچنین با تقسیم طرفین معادله (۳۱-۳) بر dT و ثابت نگه داشتن P و با توجه به معادله (۲۹-۳) داریم:

$$C_{m,p} = T \left(\frac{\partial s}{\partial T}\right)_p \quad (33-3)$$

از طرفی طبق روابط ماکسول:

$$\left(\frac{\partial s}{\partial v_m}\right)_T = \left(\frac{\partial p}{\partial T}\right)_{v_m} \quad (34-3)$$

$$\left(\frac{\partial s}{\partial p}\right)_T = -\left(\frac{\partial v_m}{\partial T}\right)_p \quad (35-3)$$

و با جایگذاری روابط (۳۲-۳) و (۳۴-۳) در (۲۶-۳) و جایگذاری روابط (۳۳-۳) و (۳۵-۳) در (۲۷-۳) به ترتیب می‌رسیم به :

$$ds = \frac{C_{m,v}}{T} dT + \left(\frac{\partial p}{\partial T} \right)_{v_m} dv_m \quad (۳۶-۳)$$

$$ds = \frac{C_{m,p}}{T} dT - \left(\frac{\partial v_m}{\partial T} \right)_p dp \quad (۳۷-۳)$$

با کم کردن معادله (۳۶-۳) از معادله (۳۷-۳) و تقسیم نتیجه بر dv_m ، با ثابت نگه داشتن P داریم:

$$C_{m,p} - C_{m,v} = T \left(\frac{\partial v_m}{\partial T} \right)_p \left(\frac{\partial p}{\partial T} \right)_{v_m} \quad (۳۸-۳)$$

چون خواص ترمودینامیکی توابع نقطه‌ای می‌باشند یعنی کمیاتی که فقط بستگی به حالت دارند و مستقل از مسیرند، می‌توانیم دیفرانسیل دقیق بگیریم. به عنوان مثال فرض کنید: $dz = Mdx + Ndy$ اگر X و Y و Z همگی توابع نقطه‌ای باشند رابطه مهم زیر برقرار خواهد بود :

$$\left(\frac{\partial M}{\partial y} \right)_x = \left(\frac{\partial N}{\partial x} \right)_y \quad (۳۹-۳)$$

همچنین در مورد توابع نقطه‌ای ترتیب دیفرانسیل گیری در مشتق دوم، اختلافی به وجود نمی‌آورد. بنابراین با دیفرانسیل دقیق از رابطه (۳۶-۳) می‌رسیم به :

$$\left(\frac{\partial C_{m,v}}{\partial v_m} \right)_T = T \left(\frac{\partial^2 p}{\partial T^2} \right)_{v_m} \quad (۴۰-۳)$$

رابطه بالا را به صورت انتگرالی می‌نویسیم :

$$C_{m,v} = C_{m,vI} + T \int_{v_{mI} \rightarrow \infty}^{v_m} \left(\frac{\partial^2 p}{\partial T^2} \right)_{v_m} dv_m \quad (۴۱-۳)$$

که v_m و v_{mI} ، $C_{m,vI}$ به ترتیب ظرفیت حرارتی ایده آل مولی در حجم ثابت، حجم مولی متناظر با گاز ایده آل و حجم مولی گاز واقعی هستند. رفتار گازهای واقعی در فشارهای پایین یا حالت $v_{mI} \rightarrow \infty$ به سمت رفتار گاز ایده آل میل می کند. با جایگزینی رابطه $p = ZRT\rho_m$ در (۳-۴۱) داریم :

$$C_{m,v} = C_{m,PI} - R - RT \times \int_{\rho_{mI}}^{\rho_m} \frac{1}{\rho_m} \left(\gamma \left(\frac{\partial Z}{\partial T} \right)_{\rho_m} + T \left(\frac{\partial^2 Z}{\partial T^2} \right)_{\rho_m} \right) d\rho_m \quad (۳-۴۲)$$

که $C_{m,PI}$ ظرفیت حرارتی ایده آل مولی در فشار ثابت می باشد. با جایگذاری مشتقات اول و دوم

رابطه (۳-۱۰) نسبت به دما با ثابت نگه داشتن ρ_m و انتگرال گیری از رابطه بالا به رابطه ای برای $C_{m,v}$

دست می یابیم :

$$C_{m,v} = C_{m,PI} - R + RT\rho_r (\gamma C. + TC_{\gamma} - C_{\gamma}) \quad (۳-۴۳)$$

$$C. = \sum_{n=1}^{n=18} C_n^{*'} - \frac{B'}{k^{\gamma}} \quad (۳-۴۴)$$

$$C_{\gamma} = \sum_{n=1}^{n=18} C_n^{*''} - \frac{B''}{k^{\gamma}} \quad (۳-۴۵)$$

$$C_{\gamma} = \sum_{n=1}^{n=18} \left(-\gamma \frac{u_n}{T} C_n^{*'} + T \left(\frac{u_n(u_n + 1)}{T^{\gamma}} \right) C_n^{*''} \right) \times \rho_r^{b_n-1} e^{(-c_n \rho_r^{k_n})} \quad (۳-۴۶)$$

که B' و B'' و $C_n^{*'}$ و $C_n^{*''}$ مشتقات اول و دوم رابطه (۳-۱۳) و (۳-۱۷) نسبت به دما هستند.

$$B' = - \sum_{n=1}^{n=18} a_n u_n T^{-u_n-1} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N y_i y_j B_{nij}^{*'} E_{ij}^{u_n} (K_i K_j)^{\gamma} \quad (۳-۴۷)$$

$$B'' = \sum_{n=1}^{n=18} a_n u_n (u_n + 1) T^{-u_n - 2} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N y_i y_j B_{nij}^* E_{ij}^{u_n} (K_i K_j)^{\frac{2}{3}} \quad (48-3)$$

$$C_n^{*'} = -\frac{u_n}{T} C_n^* \quad (49-3)$$

$$C_n^{*''} = -\frac{u_n + 1}{T} C_n^{*'} \quad (50-3)$$

برای پیدا کردن $C_{m,v}$ از رابطه (۴۲-۳) ابتدا باید $C_{m,p}$ را به دست بیاوریم که از رابطه زیر تعیین می‌شود.

$$C_{m,PI} = \sum_{j=1}^N y_j C_{m,PI}^j \quad (51-3)$$

که y_j کسر مولی جزء j ام مخلوط است. طبق مرجع [۳] $C_{m,PI}^j$ از روش زیر به دست می‌آید:

$$C_{m,PI}^j = a_j + b_j \left(\frac{C_j/T}{\sinh(C_j/T)} \right)^2 + d_j \left(\frac{e_j/T}{\cosh(e_j/T)} \right)^2 \quad (52-3)$$

و ضرایب معادله (۵۲-۳) از جدول (۲-۳) به دست می‌آیند.

جدول ۲-۳: ضرایب معادله ظرفیت حرارتی مولی ایده‌آل در فشار ثابت برای مخلوطهای گازی. مرجع [۲۹]

e	d	c	b	a	اجزای گاز
۹۹۱.۹۶	۴۱۶.۰۲	۲۰.۸۶.۹	۷۹۹۳۳	۳۳۲۹۸	متان Methane
۷۵۲.۸۷	۷۳۲۲۳	۱۶۵۵.۵	۱۳۴۲۲۰	۴۰.۳۲۶	اتان Ethane
۷۲۳.۶	۱۱۶۸۰۰	۱۶۲۶.۵	۱۹۲۴۵۰	۵۱۹۲۰	پروپان Propane

با معلوم شدن مجهولات معادله (۴۲-۳)، $C_{m,v}$ تعیین می‌شود و با رجوع به معادله (۳۸-۳) برای یافتن $C_{m,p}$ ابتدا باید ترم $\left(\frac{\partial v_m}{\partial T}\right)_p$ و $\left(\frac{\partial P}{\partial T}\right)_{v_M}$ را محاسبه کرد.

$$\left(\frac{\partial v_m}{\partial T}\right)_p = \frac{R}{p} \left[Z + T \left(\frac{\partial Z}{\partial T}\right)_p \right] \quad (۵۳-۳)$$

$$\left(\frac{\partial P}{\partial T}\right)_{v_M} = R\rho_m [Z + T(C_v - \rho_r c.)] \quad (۵۴-۳)$$

که

$$\left(\frac{\partial Z}{\partial T}\right)_p = \frac{R(TZ)^r \times C_v - PZ[TK^r \times C. + C_v]}{R(TZ)^r + PTC_v} \quad (۵۵-۳)$$

$$C_v = \sum_{n=1}^{n=\Delta\lambda} -\frac{u_n}{T} C_n^* (b_n - c_n k_n \rho_r^{k_n}) \rho_r^{b_n} e^{-c_n \rho_r^{k_n}} \quad (۵۶-۳)$$

$$C_v = C_\delta + \sum_{n=1}^{n=\Delta\lambda} C_n^* D_{1n} \quad (۵۷-۳)$$

$$C_\delta = B - K^r \sum_{n=1}^{n=1\lambda} C_n^* \quad (۵۸-۳)$$

$$D_{1n} = K^r \left[b_n^r - c_n k_n (r b_n + k_n - c_n k_n \rho_r^{k_n}) \rho_r^{k_n} \right] \times \rho_r^{b_n-1} e^{-c_n \rho_r^{k_n}} \quad (۵۹-۳)$$

با جاگذاری روابط (۴۲-۳)، (۵۳-۳) و (۵۴-۳) در (۳۸-۳) $C_{m,p}$ به دست می‌آید. مرجع [۳] تعریفی

به شکل زیر برای توان آیزنتروپیک ارائه کرده است:

$$\kappa = -\frac{C_{m,p}}{C_{m,v}} \left(\frac{\partial P}{\partial v_m} \right)_T \left(\frac{v_m}{P} \right) \quad (۶۰-۳)$$

که در رابطه بالا، $\left(\frac{\partial P}{\partial v_m} \right)_T$ به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\left(\frac{\partial P}{\partial v_m} \right)_T = \left(\frac{\partial P}{\partial \rho_m} \right)_T \left(\frac{\partial \rho_m}{\partial v_m} \right)_T = -RT\rho_m^2 (Z + \rho_m C_f) \quad (۶۱-۳)$$

۴-۴-۳- تعیین ضریب ژول - تامسون

با استفاده از ضریب ژول تامسون می‌توانیم تعیین کنیم که یک گاز در اثر انبساط، افت دما یا افزایش دما دارد. ضریب ژول - تامسون عبارتست از تغییرات دما در اثر تغییر فشار در آنتالپی ثابت:

$$\mu_{JT} = \left(\frac{\partial T}{\partial P} \right)_h \quad (۶۲-۳)$$

مقدار تجربی این ضریب که تابعی از دما و فشار سیستم است از اندازه‌گیری تغییر دما و فشار گاز بین دو لحظه متفاوت محاسبه می‌شود. ضریب ژول تامسون خاصیتی شدتی است زیرا نسبت تغییرات دو خاصیت شدتی را بیان می‌کند.

گازهای کامل دارای ضریب ژول تامسون صفر می‌باشند زیرا طبق تعریف گاز کامل گازی است که نیروهای بین مولکولی آن صفر است لذا تراکم و انبساط گاز که باعث تغییر فاصله مولکول‌ها می‌شود انرژی درونی سیستم را تغییر نمی‌دهد. بنابراین تغییرات گرمایی حاصل نمی‌شود. ولی در گازهای حقیقی این ضریب عددی است مثبت یا منفی که مثبت یا منفی بودن آن برحسب نوع گاز تابع دما و فشاری است که بر گاز اعمال می‌شود.

برای هر گاز یک نقطه معکوس وجود دارد که به دما و فشار وابسته است. زمانیکه ضریب ژول - تامسون مثبت است انبساط گاز موجب سرد شدن و تراکم گاز موجب گرم شدن آن می‌شود. زیرا مثبت بودن نشان از هم جهت بودن دما و فشار دارد. زمانیکه ضریب ژول تامسون منفی باشد و فشار سیال از

فشار نقطه معکوس بیشتر باشد، انبساط موجب گرم شدن گاز می‌شود تا زمانی که روی خط انتالپی ثابت به نقطه معکوس برسیم. پس از آن دمای گاز کاهش یافته تا به دمای اولیه قبل از انبساط می‌رسد و سپس دما رو به کاهش بیشتر می‌رود ولی تراکم گاز باعث کاهش دما می‌شود.

ضریب ژول-تامسون نقشی در فرایند محاسبه نرخ جرمی جریان ندارد، ولی برای دقت بهتر در تعیین دمای سیال در بالا دست اریفیس برای محاسبه چگالی، به کار می‌رود. در فصل چهارم به طور مختصر راجع به اثر این ضریب در اندازه‌گیری جریان بحث خواهیم کرد.

از رابطه اساسی زیر شروع می‌کنیم:

$$dh = T ds + v dP \quad (۶۳-۳)$$

با تقسیم طرفین بر dP در T ثابت داریم :

$$\left(\frac{\partial h}{\partial P}\right)_T = T \left(\frac{\partial s}{\partial P}\right)_T + v \quad (۶۴-۳)$$

با استفاده از روابط ماکسول ، $\left(\frac{\partial s}{\partial P}\right)_T = -\left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_P$

$$\left(\frac{\partial h}{\partial P}\right)_T = -T \left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_P + v \quad (۶۵-۳)$$

$$dh = \left(\frac{\partial h}{\partial P}\right)_T dP + \left(\frac{\partial h}{\partial T}\right)_P dT \quad (۶۶-۳)$$

با جایگزینی (۶۴-۳) در (۶۶-۳) و استفاده از تعریف ظرفیت حرارتی فشار ثابت داریم:

$$dh = \left[v - T \left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_P \right] dP + C_p dT \quad (۶۷-۳)$$

با تقسیم طرفین بر dp در h ثابت می‌رسیم به :

$$\left(\frac{\partial T}{\partial P}\right)_h = \frac{1}{C_p} \left[-v + T \left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_p \right] \quad (68-3)$$

با جایگزین کردن $v = ZRT/P$ در رابطه (۶۸-۳) در نهایت خواهیم داشت:

$$\mu_{JT} = \frac{\left[T \left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_p - v \right]}{C_p} = \frac{RT^2}{PC_p} \left(\frac{\partial Z}{\partial T}\right)_p \quad (69-3)$$

با جاگذاری رابطه (۵۵-۳) در رابطه مذکور، می‌توان مقدار عددی ضریب ژول-تامسون را به دست آورد.

۳-۴-۵- تعیین ویسکوزیته

ویسکوزیته سیال به صورت مقاومت در برابر جریان یافتن که از طرف مولکولهای سیال اعمال می‌شود تعریف می‌شود. مرجع [۳۵] رابطه ای دو مرحله ای معروف به رابطه کار-کوبایاشی - باروز را که در سال ۱۹۵۴ تدوین شده، ارائه کرده است که ابتدا ویسکوزیته گاز را در دما و فشار اتمسفر با توجه به عناصر غیرآلی و وزن مخصوص گاز محاسبه می‌کند. ویسکوزیته فشار اتمسفریک μ_1 طبق رابط زیر بیان می‌شود:

$$\mu_1 = \mu_{1HC} + \mu_{1N_2} + \mu_{1CO_2} + \mu_{1H_2S} \quad (70-3)$$

$$\begin{aligned} \mu_{1HC} = & 8,188 \times 10^{-3} - 6,15 \times 10^{-3} \log(\gamma_g) \\ & + (1,709 \times 10^{-5} - 2,062 \times 10^{-6} \gamma_g) T \end{aligned} \quad (71-3)$$

$$\mu_{1N_2} = [9,59 \times 10^{-3} + 8,48 \times 10^{-3} \log(\gamma_g)] y_{N_2} \quad (72-3)$$

$$\mu_{1CO_2} = [6,24 \times 10^{-3} + 9,08 \times 10^{-3} \log(\gamma_g)] y_{CO_2} \quad (73-3)$$

$$\mu_{1, H_2S} = [3,73 \times 10^{-3} + 8,49 \times 10^{-3} \log(\gamma_g)] y_{H_2S} \quad (74-3)$$

و در رابطه زیر قرار می دهیم:

$$\begin{aligned} \mu_r = \ln \left(\frac{\mu_g}{\mu_1} T_{Pr} \right) &= a. + a_1 P_{Pr} + a_2 P_{Pr}^2 + a_3 P_{Pr}^3 \\ &+ T_{Pr} (a_4 + a_5 P_{Pr} + a_6 P_{Pr}^2 + a_7 P_{Pr}^3) \\ &+ T_{Pr}^2 (a_8 + a_9 P_{Pr} + a_{10} P_{Pr}^2 + a_{11} P_{Pr}^3) \\ &+ T_{Pr}^3 (a_{12} + a_{13} P_{Pr} + a_{14} P_{Pr}^2 + a_{15} P_{Pr}^3) \end{aligned} \quad (75-3)$$

که ثابتهای a تا a_{15} در مرجع [35] ذکر شده‌اند.

$$P_{Pr} = \frac{P}{P_{PC}} \quad (76-3)$$

$$T_{Pr} = \frac{T}{T_{PC}} \quad (77-3)$$

$$P_{PC} = 678 - 0,5(\gamma_g - 0,5) - 206,7 y_{N_2} + 440 y_{CO_2} + 606,7 y_{H_2S} \quad (78-3)$$

$$T_{PC} = 326 + 315,7(\gamma_g - 0,5) - 240 y_{N_2} - 83,3 y_{CO_2} + 133,3 y_{H_2S} \quad (79-3)$$

که فشار بر حسب psi و دما بر حسب درجه Rankin باید وارد شود. بعد از آنکه μ_r از سمت راست رابطه (3-68) به دست آمد، ویسکوزیته گاز، μ_g ، در فشار و دمای مورد نظر بر حسب سانتی‌پواس cp به دست می‌آید:

$$\mu_g = \frac{\mu_1}{T_{Pr}} e^{\mu_r} \quad (80-3)$$

هنگامی که مقدار نرخ جرمی جریان معلوم باشد، برای یافتن Re به ویسکوزیته نیاز داریم:

$$\text{Re} = \frac{\dot{m}}{\pi d \mu} \quad (۸۱-۳)$$

از Re برای به دست آوردن اختلاف فشاری که در اثر عبور دبی معلوم از اریفیس مشخصی رخ می‌دهد و نیز برای طراحی قطر اریفیس هنگام داشتن دبی و اختلاف فشار معلوم، استفاده می‌کنیم.

فصل چهارم

معرفی استاندارد ISO ۵۱۶۷

۴-۱- مقدمه

موسسه بین المللی استاندارد سازی (ISO) یک مجموعه جهانی از اعضای سازمان استاندارد است که تهیه استانداردهای بین المللی در کمیته های تخصصی این موسسه صورت می پذیرد و استاندارد تهیه شده در هر کمیته، برای رأی گیری بین اعضا چرخانده می شود و برای تصویب باید حداقل ۷۵٪ اعضای کمیته در رأی گیری شرکت داشته باشند. ISO ۵۱۶۷ با عنوان " اندازه گیری جریان سیال بوسیله ابزارهایی که با سیال اختلاف فشار عمل می کنند در مجراهای با مقاطع دایروی " شامل ۴ قسمت شده که در بخش اول اصول عمومی، تعاریف، اصطلاحات و اطلاعاتی راجع به انتخاب روش اندازه گیری جریان و محاسبه خطا به ما می دهد. در سه بخش بعدی به ترتیب هندسه و روش استفاده (نصب و عملکرد) صفحات اریفیس، نازل و لوله و نتوری را تحت پوشش قرار می دهد. که ما فقط به ISO ۵۱۶۷-۱ [۳۶] و ISO ۵۱۶۷-۲ [۲۸] استاندارد مورد نظر برای طراحی و استفاده از صفحات اریفیس می پردازیم.

ISO ۵۱۶۷ فقط برای ابزارهای اختلاف فشاری و در جریانهای زیر صورت و هنگامی که سیال تک فاز باشد کاربرد دارد و برای جریانهای ضربه ای و متناوب کارایی ندارد. به وسیله ای که برای اندازه گیری جریان در داخل لوله کار گذاشته می شود ابزار اولیه (Primary Device) می گویند که این ابزار شامل اتصالات فشاری هم می شود. در این استاندارد از ابزار اولیه صحبت می شود.

۴-۲- اصطلاحات مورد نیاز [۳۶]

- *اتصالات فشاری*^۱ : شیارهای حلقوی یا مجراهای گردی که در دیواره لوله تعبیه می‌شوند به طوری که کف مجرا با سطح داخل لوله همسطح باشد. معمولاً این اتصالات به صورت سوراخ‌هایی دایروی هستند اما در شرایط معین به صورت شیارهای حلقوی ممکن است باشند.
- *صفحه اریفیس*^۲ : صفحه نازکی که سوراخی دایروی در آن ماشینکاری شده است.
- *نسبت قطر β* : نسبت قطر سوراخ اریفیس به قطر اریفیس.
- *توان ایزنتروپیک K* : نسبت تغییرات نسبی فشار به تغییرات نسبی چگالی تحت شرایط آدیاباتیک برگشت‌پذیر را توان ایزنتروپیک گویند. و برای تعیین ضریب انبساط گازها ε به کار می‌رود و با طبیعت گاز و دما و فشار آن تغییر می‌کند. برای گازهایی که K آنها در محدوده‌های وسیع دما و فشار منتشر نشده است، از نسبت ظرفیت گرمایی مخصوص در فشار ثابت به ظرفیت گرمایی مخصوص در حجم ثابت استفاده می‌شود.
- *ضریب تخلیه C_d* ^۳ : ضریبی است که برای جریان‌های غیر قابل تراکم تعریف می‌شود و مقدار دبی واقعی عبور کننده از سوراخ اریفیس را به مقدار جریانی که از راه روابط تئوری بدست می‌آید مرتبط می‌کند. برای یک جریان غیر قابل تراکم فرمول به شکل زیر است:

$$C_d = \frac{q_m \sqrt{1 - \beta^4}}{(\pi/4) d^2 \sqrt{2 \Delta p \cdot \rho}} \quad (1-4)$$

کالیبراسیون یک ابزار اولیه بوسیله سیال غیر قابل تراکم نشان می‌دهد که ضریب تخلیه برای یک ابزار اندازه‌گیری مشخص فقط به عدد رینولدز بستگی دارد.

^۱ Pressure Tapping

^۲ Orifice Plate

^۳ Discharge Coefficient

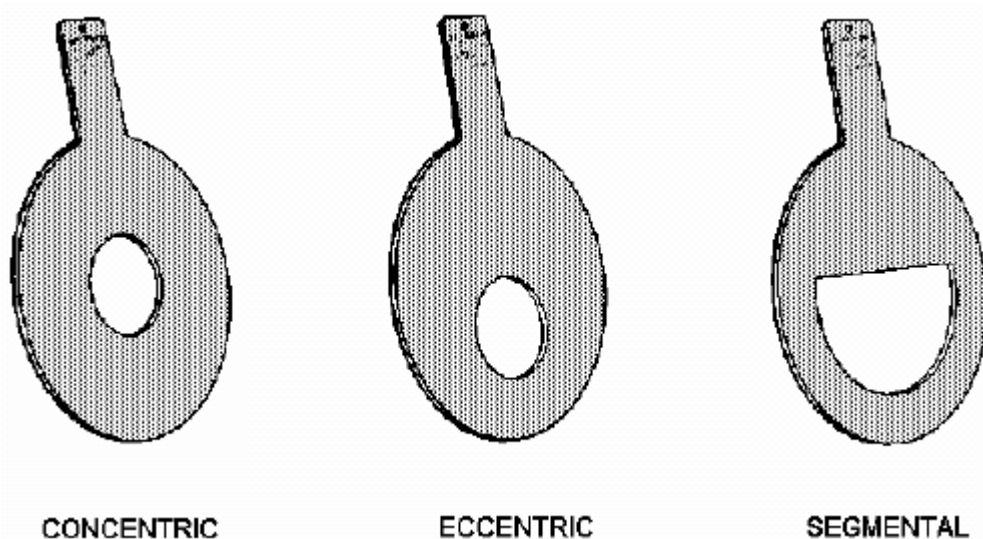
- فاکتور انبساط ε : فاکتوری که برای محاسبه تراکم پذیری سیالات مورد استفاده قرار می گیرد.

$$\varepsilon = \frac{q_m \sqrt{1 - \beta^4}}{(\pi/4) d^2 C_d \sqrt{2 \Delta p \cdot \rho}} \quad (2-4)$$

فاکتور انبساط در سیالات غیر قابل تراکم برابر ۱ و در سیالات تراکم پذیر (گازها) کمتر از ۱ است. آزمایشات گواه این می باشد که فاکتور انبساط عملاً مستقل از عدد رینولدز است و فقط به نسبت فشار و توان ایزونتروپیک بستگی دارد.

۳-۴- مشخصات صفحات اریفیس

انواع مختلف صفحه اریفیس در شکل (۱-۴) نمایش داده شده است.



شکل ۱-۴: انواع صفحات اریفیس

اریفیس های خارج از مرکز^۴ و قطعه ای^۵ برای غلبه بر مشکلاتی مربوط به سیالاتی که حاوی ذرات جامد هستند (سوسپانسی) استفاده می شوند. ذرات جامد موجود در سیالات سوسپانسی بتدریج در محل

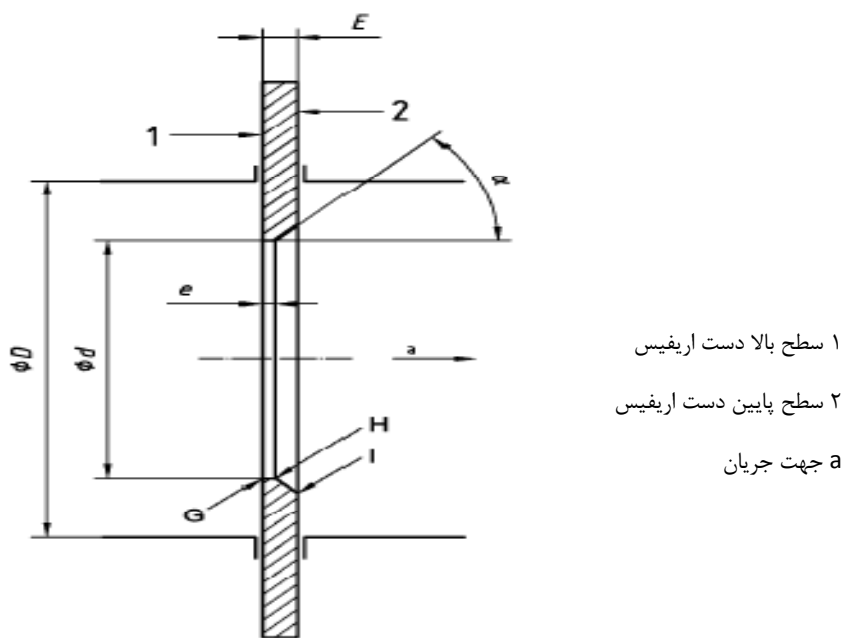
^۴ Eccentric

^۵ Segmental

نصب صفحه اریفیس و پایین لوله ته نشین شده و بتدریج باعث کاهش قطر موثر لوله می‌شوند. در نتیجه در محاسبه دبی مربوطه ایجاد خطا می‌کند. استفاده از اریفیس خارج از مرکز یا قطعه ای به جریان اجازه می‌دهد که با سرعت خود، قسمت پایین لوله را جاروب کرده، مانع از رسوب کردن ذرات جامد در ته خط شود.

شکل یک صفحه اریفیس استاندارد از مقطع جانبی در شکل (۲-۴) نشان داده شده است. قسمتی از صفحه اریفیس که در داخل لوله قرار می‌گیرد باید دایروی و هم مرکز با لوله باشد دو سطح صفحه نیز هموار و موازی هستند [۲۸].

هنگام طراحی و نصب صفحات اریفیس باید مراقب اعوجاج^۶ و تغییر شکل های ناشی از اختلاف فشار دو طرف آن باشیم.



شکل ۲-۴: نمایی از مقطع جانبی صفحه اریفیس

^۶ Distortion

- صفحه بالادست اریفیس^۷ :

صفحه اریفیس در طرف بالادست در هنگام نصب باید عاری از هرگونه خمش بوده و کاملاً صاف باشد و زبری سطح نیز باید در دایره ای به قطر D و هم مرکز با سوراخ اریفیس ، $Ra < 10^{-4} d$ باشد.

- صفحه پایین دست اریفیس^۸ :

سطح پایین دست اریفیس باید کاملاً موازی با سطح بالادست بوده و ضروری نیست که پرداخت سطح آن مانند پرداخت سطح بالادست ، با کیفیت بالا انجام شود.

- ضخامت صفحه اریفیس ، E و ضخامت سوراخ ، e باید مطابق شرایط زیر باشند :

$$0.005 D \leq e \leq 0.02 D \quad (3-4)$$

$$e \leq E \leq 0.05 D$$

- برای جلوگیری از خم شدن و تغییر شکل صفحه اریفیس ناشی از فشار بیش از حد جریان، اگر E ضخامت صفحه از e ، ضخامت سوراخ اریفیس بیشتر باشد، صفحه باید به طرف پایین دست پخی^۹ داشته باشد یعنی $\alpha = 45^\circ \pm 15^\circ$.

- سطح بالادستی G نباید دنداندار بوده و شعاع لبه های آن نباید از $0.0004 d$ بزرگتر باشد. اگر $d \geq 25 \text{ mm}$ باشد ، بازرسی چشمی کافی است و لبه های G نباید نور را منعکس کنند.

- سطح بالادست باید کاملاً قائمه باشد . گلوگاه اریفیس محدوده بین لبه های G و H است. چون لبه های H و I در محدوده جریان بازگشتی و جدایش جریان^{۱۰} قرار دارند کیفیت سطح بالایی نمی خواهند.

- قطر اریفیس باید بزرگتر مساوی 12.5 mm و β نسبت قطرهای آن باید بین 0.1 تا 0.75 باشد.

^۷ Upstream Face

^۸ Downstream Face

^۹ Bevel

^{۱۰} Separated flow

اگر از اریفیس برای اندازه‌گیری جریان‌هایی که ممکن است جهت آنها معکوس شود، استفاده می‌کنیم صفحه اریفیس باید شرایط زیر را داشته باشد:

- (۱) اریفیس نباید زاویه α داشته باشد.
- (۲) هر دو سطح آن باید کیفیتی مطابق با سطح بالادست داشته باشند.
- (۳) ضخامت صفحه و ضخامت سوراخ باید برابر باشند . $e = E$

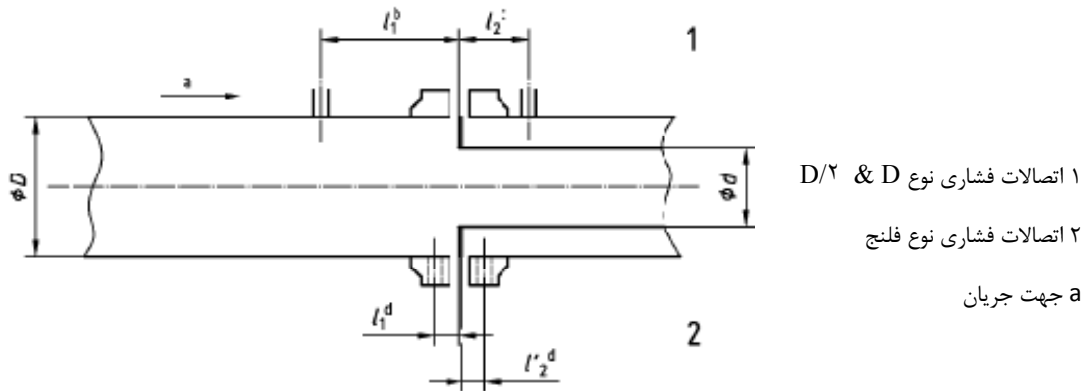
۴-۴- اتصالات فشاری [۲۸]

برای هر صفحه اریفیس برای اندازه‌گیری اختلاف فشار به یک اتصالات فشار در بالادست و یک اتصالات فشار در پایین‌دست صفحه اریفیس نیاز داریم.

ما از ۳ نوع اتصالات فشاری شامل اتصالات فلنجی، اتصالات گوشه‌ای و $D/2$ & D استفاده کنیم. محل قرار گرفتن هر کدام از این اتصالات تفاوت آنها را مشخص می‌کند.

۴-۴-۱- اتصال فلنجی و نوع $D/2$ & D (Flange and $D/2$ & D Tapping)

همانطور که از شکل (۳-۴) دیده می‌شود l فاصله بین خط مرکزی اتصال فشاری و سطح مورد نظر اریفیس می‌باشد.



شکل ۳-۴: مکان نصب اتصالات فشاری برای انواع فلنجی و D/۲ & D

برای اتصالات D/۲ & D، l_1 بین $0.9D$ تا $1.1D$ تغییر می‌کند.

l_2 نیز باید شرایط زیر را ارضا کند:

- وقتی $\beta \leq 0.6$ باشد: $0.48D \leq l_2 \leq 0.52D$

- وقتی $\beta > 0.6$ باشد: $0.49D \leq l_2 \leq 0.51D$

هر دو فاصله l_1 و l_2 باید از سطح بالادست اندازه گرفته شوند.

برای اتصالات نوع فلنجی محدوده تغییرات فاصله l_1 و l_2 به شرح زیر است:

- وقتی $\beta > 0.6$ باشد و $D < 150 \text{ mm}$ باشد: $l_1 = l_2 = 25.4 \pm 0.5 \text{ mm}$

- وقتی $\beta \leq 0.6$ یا $\beta > 0.6$ و $150 < D < 1000$ باشد: $l_1 = l_2 = 25.4 \pm 1 \text{ mm}$

l_2 فاصله بین سطح پایین دست اریفیس تا محل اتصالات فشاری در پایین دست می‌باشد.

سوراخ این اتصالات باید دایروی بوده و همسطح با سطح داخلی لوله باشند و خط مرکزی آنها باید

یک زاویه ۹۰ درجه با خط مرکزی لوله داشته باشد.

قطر سوراخ اتصالات فشاری باید کوچکتر از $0.13D$ کمتر از 13 mm باشد. ارتفاع این اتصالات

حداقل باید ۲.۵ برابر قطر داخل آنها باشد.

و اتصالات فشاری بالادست و پایین دست باید در یک صفحه فضایی قرار گرفته باشند.

۲-۴-۴- اتصالات گوشه ای (Corner Tapping)

همانطور که از شکل (۴-۴) مشخص است این اتصالات یا می توانند به صورت شیارهای حلقوی باشند

یا به صورت اتصالات گوشه ای مجزا.

این اتصالات از میان دیواره لوله عبور کرده و با سطح اریفیس تماس پیدا می کنند. a ، قطر اتصالات

مجزا یا عرض شیارهای حلقوی از روابط زیر محاسبه می شوند:

برای بخار و سیالات تمیز:

- وقتی $\beta \geq 0.65$ باشد: $0.005 D \leq a \leq 0.03 D$

- وقتی $\beta < 0.65$ باشد: $0.01 D \leq a \leq 0.02 D$

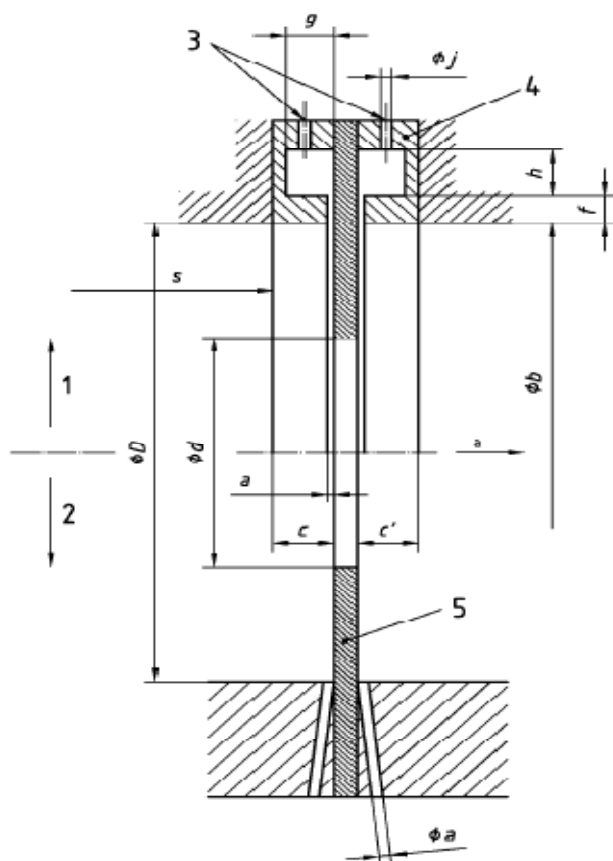
اگر $D < 100 \text{ mm}$ باشد ، مقدار a تا 2 mm مجاز می باشد.

برای هر مقدار β :

- برای سیالات تمیز: $1 \text{ mm} \leq a \leq 10 \text{ mm}$

- برای بخار و در حالت شیارهای حلقوی : $1 \text{ mm} \leq a \leq 10 \text{ mm}$

- برای بخار و گازهای تقطیر شده و در حالت اتصالات مجزا : $4 \text{ mm} < a \leq 10 \text{ mm}$



- ۱ اتصالات گوشه‌ای با شیرهای حلقوی
- ۲ اتصالات گوشه‌ای مجزا
- ۳ اتصالات فشاری
- ۴ محافظه اتصالات فشاری
- ۵ صفحه اریفیس
- a جهت جریان

شکل ۴-۴: مکان نصب اتصالات فشاری برای نوع اتصالات گوشه‌ای

۴-۵- اصول روشهای اندازه گیری

۴-۵-۱- روش تعیین نسبت قطر β

در عمل هنگام تعیین نسبت قطر برای وسیله اندازه‌گیری جریان که در یک خط لوله نصب شده است

و مقادیر C_d و ε ناشناخته می‌باشند، گامهای زیر را انجام می‌دهیم:

الف) انتخاب نوع ابزار اندازه‌گیری .

ب) داشتن مقدار دبی جریان و اختلاف فشار متناظر با آن.

سپس معادله را به شکل زیر بازنویسی می‌کنیم:

$$\frac{C \varepsilon \beta^2}{\sqrt{1 - \beta^4}} = \frac{q_m}{\pi d^2 \sqrt{\Delta p} \cdot \rho} \quad (4-4)$$

و با روش تکرار و خطا C و ε را به دست می‌آوریم. و سپس β معین می‌شود.

یک C_d و ε اولیه حدس می‌زدیم و در معادله بالا قرار داده و β اولیه حاصل می‌شود که از روی آن d و

سپس از فرمول $q_m = C_d \varepsilon \frac{\pi}{4} d^2 \frac{\sqrt{\Delta p} \cdot \rho}{\sqrt{1 - \beta^4}}$ را پیدا می‌کنیم. اگر با مقدار واقعی دبی برابر نبود، در C_d و ε

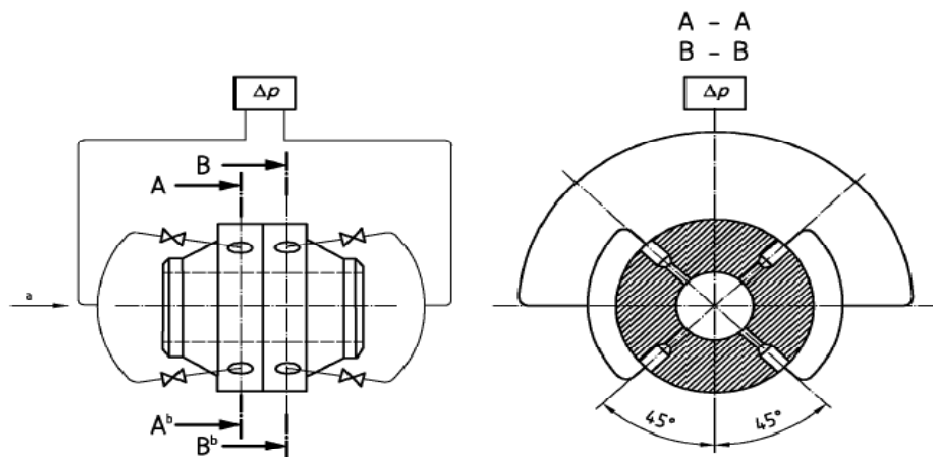
تغییر ایجاد می‌کنیم [۳۶].

۴-۵-۲- اندازه‌گیری فشار استاتیک

فشار استاتیک سیال به وسیله یک اتصال فشاری مجزا یا چند اتصال فشاری یا بوسیله حلقه‌های فشار

سنجی انجام می‌شود. اگر از ۴ اتصال فشاری برای پیدا کردن فشار بالادست یا پایین‌دست استفاده

می‌کنیم بهترین حالت چینش اتصالات مانند شکل (۴-۵) می‌باشد [۳۶].



شکل ۴-۵: نحوه چینش اتصالات فشاری برای اندازه‌گیری فشار استاتیک

۴-۵-۳- اندازه‌گیری دما

دمای سیال ترجیحاً باید در پایین دست ابزار اولیه اندازه‌گیری شود و به مراقبت‌های خاص نیاز دارد. دهانه ترمومتر باید حداقل فضا را اشتغال کند. فاصله کارگذاری ترمومتر تا ابزار اولیه حداقل باید ۵D باشد (اگر سیال گاز باشد باید ۱۵ D باشد). اگر ترمومتر در بالادست نصب شود، مطابق شکل (۲-۶) باعث اغتشاش در جریان می‌شود.

مطابق محدودیت‌های اعمال شده در ISO ۵۱۶۷ معمولاً فرض می‌کنیم که در محل اتصال اندازه‌گیری اختلاف فشار، دما در بالا دست و پایین دست یکسان است. به هر حال هنگامیکه سیال، گاز ایده‌آل نیست و دقت بالایی نیاز داریم، ضروری است که دمای سیال بالادست را از روی دمای سیال پایین‌دست محاسبه کنیم.

با فرض انبساط آنتالپی ثابت بین این دو نقطه این رابطه به شکل زیر است:

$$\Delta T = \mu_{JT} \cdot \Delta \omega \quad (۵-۴)$$

که $\Delta \omega$ افت فشار دائم سیستم، بسته به نوع وسیله اندازه‌گیری به دست می‌آید. و ضریب ژول -

تامسون μ_{JT} ، نیز از رابطه (۳-۶۲) به دست می‌آید [۳۶].

۴-۵-۴- نیازمندیهای عمومی برای اندازه‌گیری

- وسیله اصلی (Primary Device)

باید طبق بخشهای مختلف ISO ۵۱۶۷ ساخته، نصب و استفاده شود. این نکته باید ذکر گردد که ظاهراً سیالات خنثی نیز قشری را بر روی ابزار اصلی می‌پوشانند که می‌تواند به مرور در ضریب تخلیه خطا ایجاد کند.

ابزار اصلی باید از موادی ساخته شود که ضریب انبساط حرارتی آنها α معلوم باشد.

- ماهیت سیال

سیال می تواند تراکم پذیر یا غیر تراکم پذیر باشد.

باید بتوان گفت سیال تک فاز و از نقطه نظر فیزیکی و حرارتی همگن باشد.

محلول های کلوئیدی با درجه پراکندگی زیاد مثل شیر می توانند تک فاز فرض شود.

- شرایط جریان

جریان نباید ضربه ای باشد. نرخ جریان ثابت بوده و در عمل نسبت به زمان به آهستگی تغییر کند.

عدم قطعیت های ذکر شده در ISO ۵۱۶۷ هنگامی معتبر هستند که تغییر فازی در سیال در طی عبور

از وسیله اصلی رخ ندهد. افزایش اندازه سوراخ یا گلولی باعث کاهش اختلاف فشار می شود که باعث

جلوگیری از تغییر فاز می شود [۳۶].

۴-۵-۶- نیازمندیهای نصب:

- روشهای اندازه گیری فقط برای سیالات جاری در لوله با مقاطع دایروی کاربرد دارد و سطح مقطع لوله

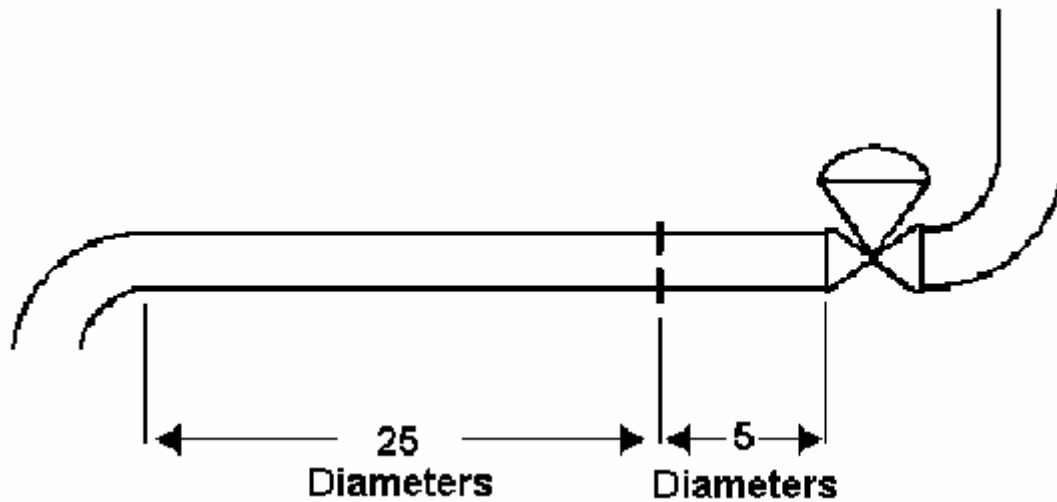
در محل اندازه گیری باید پر از سیال باشد.

- وسیله اندازه گیری باید بین دو قسمت استوانه ای مستقیم لوله با قطر یکسان جاگذاری شود ، با

حفظ حداقل فاصله برای انشعابات یا مسیرهای کور که بسته به نوع و خصوصیات وسیله اندازه گیری

و نسبت قطر β و ماهیت اتصالات لوله تغییر می کند. در حالت کلی کفایت که طول مستقیم لوله در

قسمت بالادستی را ۲۵ برابر قطر لوله و در قسمت پایین دستی ، ۵ برابر قطر لوله در نظر بگیریم.



شکل ۴-۶ : یک نمونه از اتصالات قبل و بعد از صفحه اریفیس

- زبری سطوح باید در حد قابل قبول بمانند.
- در حالیکه اختلاف دمای محیط و سیال قابل توجه باشد، عایق بندی وسیله اندازه گیری و لوله لازم است.
- اگر شرایط اختصاصی ذکر شده برای نصب وسایل اندازه گیری قابل حصول نباشند به شرط اینکه جریان دارای چرخش آزاد بوده و کاملاً توسعه یافته باشد، شرایط استاندارد ISO ۵۱۶۷ هنوز دارای کاربرد هستند. شرایط چرخش آزاد وقتی می تواند فرض شود، که زاویه چرخش تمام نقاط کمتر از ۲ درجه باشد.
- پروفیل سرعت قابل قبول برای جریان وقتی برقرار است که در هر نقطه از مقطع لوله نسبت سرعت محوری به سرعت ماکزیمم، با این نسبت در مقطعی دورتر مانند $100D$ مطابقت داشته باشد.

۴-۶- بهبود دهنده (Flow Conditioner) و یکنواخت کننده (Straightener) [۳۶]

برای کاهش طول مستقیم لوله در قسمت بالادستی (قبل از صفحه اریفیس) می توان از پره‌های یکنواخت‌کننده و بهبوددهنده جریان استفاده شود. وظیفه ی این پره‌ها مناسب کردن پروفیل جریان برای اندازه‌گیری بهینه می‌باشد.

اصولاً تفاوت مشخصی بین بهبوددهنده ها و یکنواخت‌کننده ها وجود دارد. وسایلی که تنها پیچش جریان را کاهش می‌دهند بعنوان Straightener طبقه‌بندی می‌شوند. وسایلی که پیچش جریان را کاهش داده و پروفیل تغییر شکل داده را نیز از بین می‌برند، بعنوان Conditioner طبقه‌بندی می‌گردند. این پره‌ها اغتشاش به وجود آمده در سیال که ناشی از اتصالات می‌باشد را از بین می‌برند. برای استفاده از این مستقیم کننده‌های جریان، ابتدا باید شرایط تست زیر را گذرانده باشند.

یک شرایط دهنده جریان برای یک نوع ابزار اندازه‌گیری با نسبت قطر تا ۰.۶۷ می‌تواند به کار رود. در حالت استفاده از ابزار اولیه با نسبت قطر ۰.۶۷ ضریب تخلیه ای که در حالت استفاده از طول مستقیم لوله بدست می‌آید، حدود ۰.۲۳٪ بیشتر از حالتی است که از شرایط دهنده جریان و در شرایط زیر استفاده می‌کنیم:

(۱) در شرایط جریان خوب

(۲) در پایین دست یک شیر دروازه ای که ۵۰٪ بسته است.

(۳) در پایین دست یک وسیله که چرخش قوی ایجاد می‌کند. (چرخش ۲۰ درجه ای در فاصله طولی

(۳۰ D

استفاده از یک شرایط دهنده جریان منوط به قبولی در تستهایی که در این استاندارد معرفی شده اند

می‌باشد. همچنین وقتی که شرایط دهنده جریان در آزمایشی با یک عدد رینولدز قبول شد، باید با یک

عدد رینولدز دیگر نیز تست شود به طوریکه دو عدد رینولدز انتخابی دارای شرایط زیر باشند:

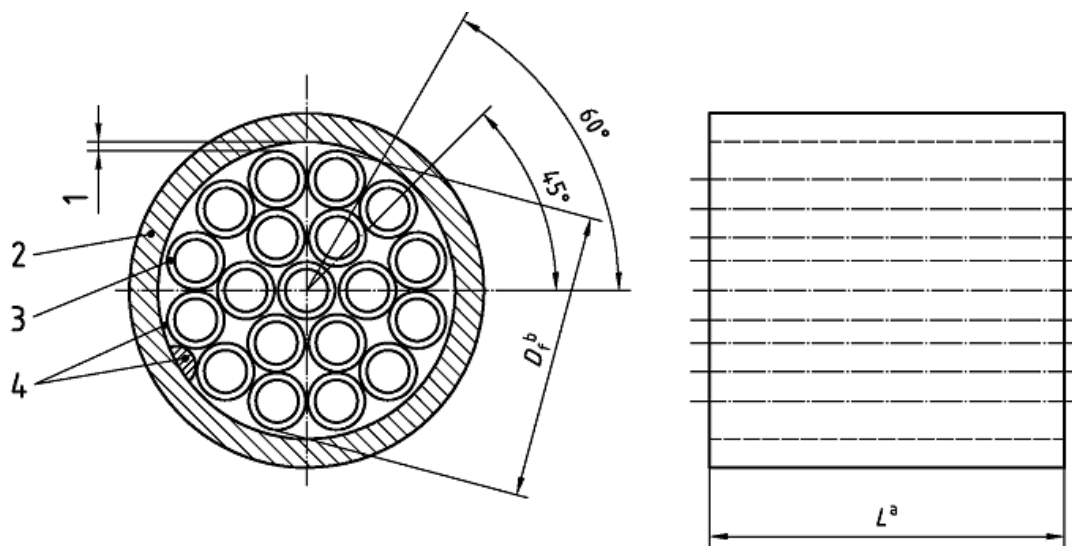
$$10^4 \leq Re_{low} \leq 10^6 \quad , \quad Re_{high} \geq 10^6$$

(۶-۴)

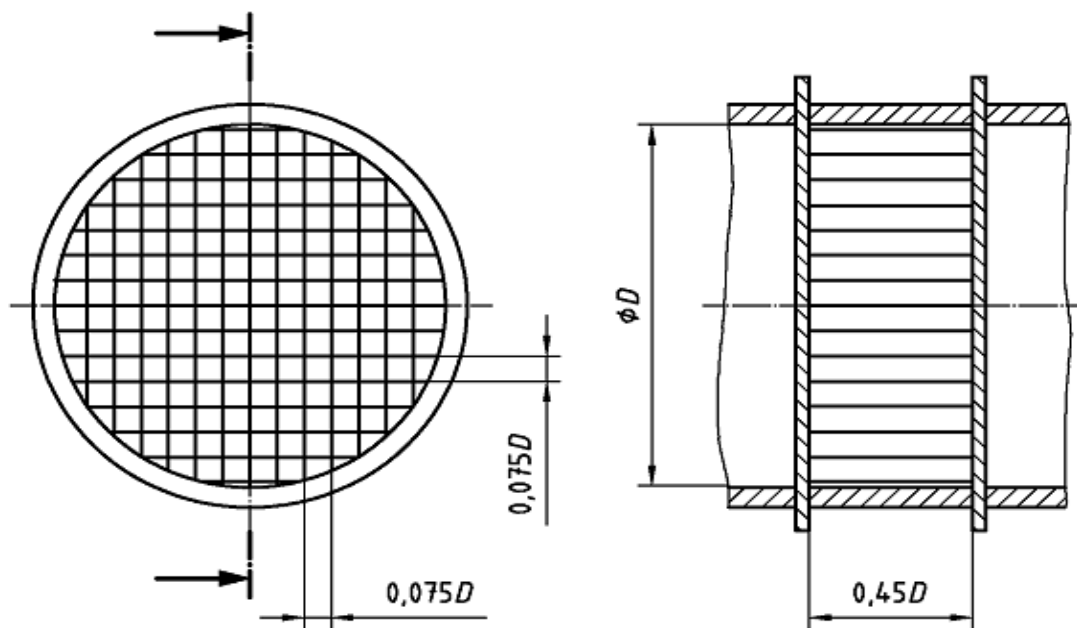
$$\lambda(Re_{low}) - \lambda(Re_{high}) \geq 0.0036$$

و λ ضریب اصطکاک لوله است که از روی نمودار مودی بدست می‌آید.

چند نمونه از این پره‌ها در شکل های زیر آمده است.



شکل ۴-۷: مستقیم‌کننده جریان از نوع ۱۹ لوله‌ای



شکل ۴-۸: مستقیم کننده جریان از نوع AMCA

۹-۴- محاسبه ضرایب و خطاهای مربوط به صفحه اریفیس [۲۸]

۹-۴-۱- محدودیتهای استفاده از اتصالات فشاری

هنگام استفاده از اتصالات گوشه‌ای و $D/2$ و D باید:

- $d \geq 12.5 \text{ mm}$
- $50 \text{ mm} \leq D \leq 1000 \text{ mm}$
- $0.1 \leq \beta \leq 0.75$
- برای $0.1 \leq \beta \leq 0.56$: $Re \geq 5000$
- برای $\beta > 0.56$: $Re \geq 16000 \beta^2$

هنگام استفاده از اتصالات فلنجی باید:

$$d \geq 12.5 \text{ mm} \quad -$$

$$50 \text{ mm} \leq D \leq 1000 \text{ mm} \quad -$$

$$0.1 \leq \beta \leq 0.75 \quad -$$

$$\text{Re} \geq 5000, \text{Re} \geq 170 \beta^2 D \quad -$$

۴-۹-۲- ضرایب

• ضریب تخلیه :

ضریب تخلیه C_d از رابطه ریدر - هریس - گالاگر (۱۹۹۸) از رابطه زیر به دست می آید:

$$C = 0.5961 + 0.0261\beta^2 - 0.216\beta^8 + 0.000521 \left(\frac{1.6\beta}{\text{Re}_D} \right)^{0.7} \\ + (0.0188 + 0.0063A)\beta^0 \left(\frac{1.6}{\text{Re}_D} \right)^{0.3} + (0.043 + 0.08e^{-0.1L_1} - 0.123e^{-\gamma L_1}) \quad (7-4) \\ + \times (1 - 0.11A) \frac{\beta^4}{1 - \beta^4} - 0.31(M'_r - 0.8M'_r{}^{1.1})\beta^{1.3}$$

وقتی $D < 71.12 \text{ mm}$ آنگاه عبارت زیر باید به رابطه ی (۷-۴) اضافه شود :

$$+ 0.0011(0.75 - \beta) \left(2.8 - \frac{D}{25.4} \right)^{0.7} \quad (8-4)$$

که در آن:

$$L_1 = \frac{l_1}{D}$$

$$L'_r = \frac{l'_r}{D}$$

$$M'_r = \frac{2 L'_r}{1 - \beta}$$

$$A = \left(\frac{19000\beta}{\text{Re}_D} \right)^{0.8}$$

• ضریب انبساط گاز :

فرمول تجربی که برای تعیین ضریب انبساط به دست آمده ، چنین است :

$$\varepsilon = 1 - (0,351 + 0,256\beta^4 + 0,93\beta^8) \left[1 - \left(\frac{P_1 - \Delta P}{P_1} \right)^{1/\kappa} \right] \quad (9-4)$$

۳-۹-۴- عدم قطعیت ها

• ضریب تخلیه :

برای هر نوع از اتصالات فشاری ، اگر فرض کنیم مقادیر β و D و Re بدون خطا معلوم هستند، داریم:

$$0.1 \leq \beta < 0.2 \quad - \quad \% (0.7 - \beta)$$

$$0.2 \leq \beta \leq 0.6 \quad - \quad \% 0.5$$

$$0.6 < \beta \leq 0.75 \quad - \quad \% (1.667\beta - 0.5)$$

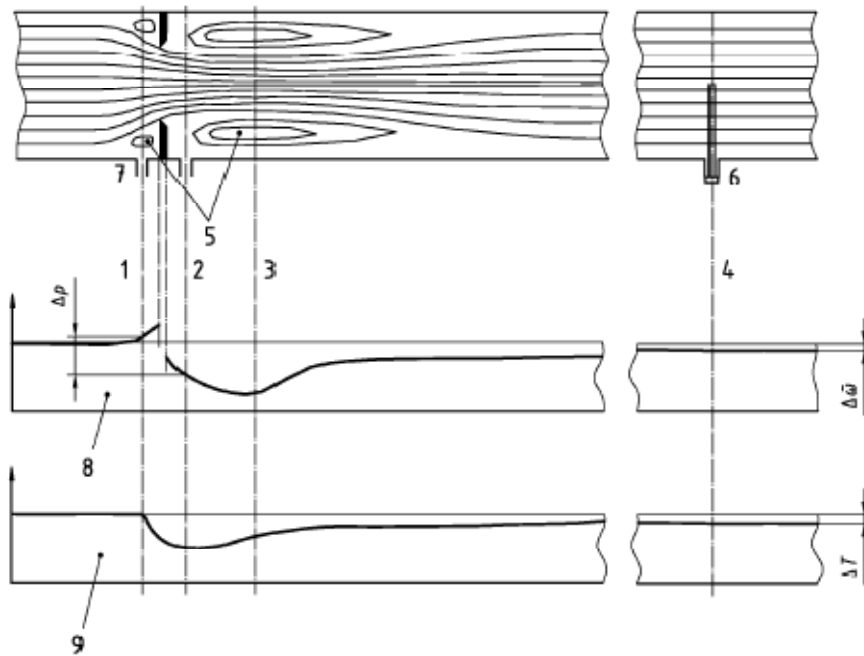
• ضریب انبساط گاز :

$$3,5 \frac{\Delta p}{\kappa p_1} \%$$

۱۰-۴- افت فشار دائمی

طبق استاندارد ISO ۵۱۶۷ افت فشار دائمی $\Delta\omega$ با رابطه زیر به اختلاف فشار Δp وابسته است [۲۸]:

$$\Delta\omega = \frac{\sqrt{1 - \beta^4(1 - C^2)} - C\beta^2}{\sqrt{1 - \beta^4(1 - C^2)} + C\beta^2} \Delta p \quad (10-4)$$



راهنمای اعداد

- ۱- صفحه اتصالات فشاری بالادست
- ۲- صفحه اتصالات فشاری پایین دست
- ۳- محل بالاترین سرعت جریان (Vena Contracta)
- ۴- ترمو متر
- ۵- جریان های ثانویه
- ۶- محل قرار گرفتن ترمو متر
- ۷- اتصالات فشاری
- ۸- توزیع فشار در روی دیواره
- ۹- توزیع دمای متوسط

شکل ۴-۹: پروفیل تقریبی جریان و توزیع فشار و دما در یک سیستم اریفیس متر

فصل پنجم

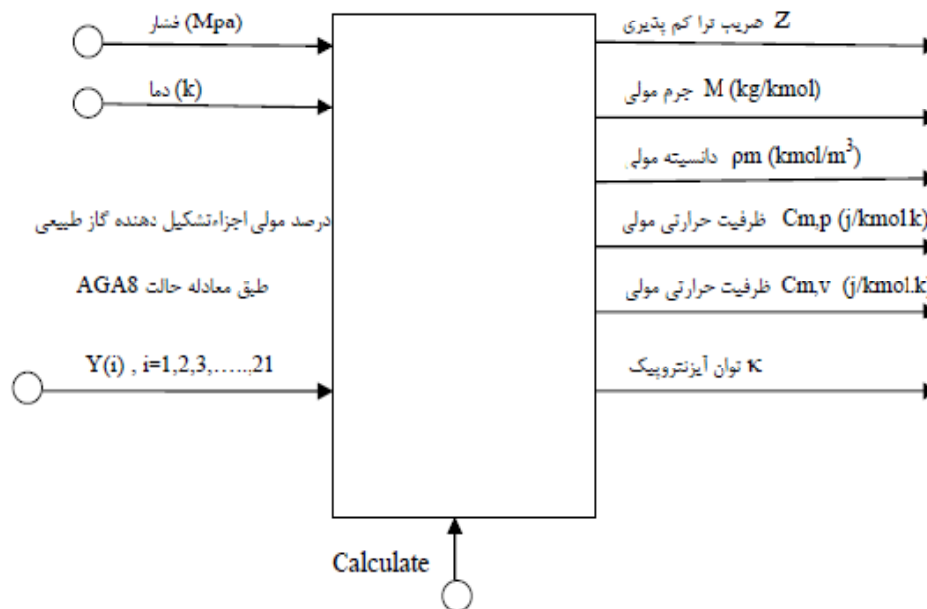
توسعه نرم افزار طراحی اریفیس

۵-۱- مقدمه

یکی از اهداف تحقیق حاضر، توسعه نرم افزار جهت کاربردهای:

- محاسبه نرخ جرمی جریان، اگر قطر اریفیس و اختلاف فشار معلوم باشند.
- محاسبه اختلاف فشار به وجود آمده در سیال در عبور از صفحه اریفیس، اگر نرخ جرمی و قطر اریفیس معلوم باشند.
- محاسبه قطر سوراخ اریفیس، اگر نرخ جرمی جریان و اختلاف فشار معلوم باشند.

از آنجا که کاربردهای این نرم افزار، نیاز به ورودیهای اولیه مختلف و متنوعی برای هر کاربرد را ایجاد می کند، لذا زبان برنامه نویسی ویژوال بیسیک که برای دریافت اطلاعات با کاربر رابطه خوبی برقرار می کند و نیز قابلیت های محاسباتی آن بالا می باشد، برای طراحی نرم افزار انتخاب شده است.



شکل ۵-۱ : مکانیزم ورود اطلاعات برای محاسبه خواص ترمودینامیکی گاز طبیعی با روش ۸ AGA

۵-۲- مراحل توسعه نرم افزار

پس از آنکه به خصوصیات و قابلیت‌های زبان برنامه نویسی ویژوال بیسیک آشنا شدیم و اصول برنامه نویسی با کمک دستورهای مورد نیاز را فرا گرفتیم، در چند مرحله نرم افزار را توسعه می‌دهیم.

۵-۲-۱- مرحله اول: محاسبه چگالی و ضریب تراکم پذیری

در مرحله اول، هدف از برنامه نویسی محاسبه چگالی ρ و ضریب تراکم‌پذیری، Z می‌باشد. برای رسیدن به این هدف به ترتیب زیر عمل می‌کنیم:

The screenshot shows the 'Orifice Designing Software' interface. It features a central logo of a stylized 'M' shape. On the left, there are input fields for 'Temperature: (C)' (77) and 'Pressure: (kpa)' (200). Below these are several empty input fields for 'viscosity (pa.s)', 'Molecular Weight: (kg/kmole)', 'Cm.p: (kj/kg.k)', 'Cm.v: (kj/kg.k)', 'Isentropic Exponent :k', and 'Joul- Thampson (K/Mpa)'. At the bottom left, there are two dropdown menus labeled 'Calculate:' (set to 'Combo1') and 'Tapping:' (set to 'Combo2'). An 'Exit Program' button is located at the bottom center. On the right side, there is a table for 'Mole Component' with columns for various gases and their corresponding values. A 'Calculate' button is positioned below the table. At the bottom right, there are two more input fields for 'Compressibility factor' and 'Density: (Kg/m^3)'. An 'Add' button and a dropdown menu are located at the top right of the component table.

Mole Component:	
Methane:	.79942
Nitrogen:	0.09939
Carbon dioxide:	.02090
Ethane:	.05029
Propane:	0.030
Water:	0
Hydrogen sulfide:	0
Hydrogen:	0
Carbon monoxide:	0
i-Butane:	0
n-Butane:	0
i-Pentane:	0
n-Pentane:	0
n-Hexane:	0
n-Heptane:	0
n-Octane:	0
n-Nonane:	0
n-Decane:	0
Helium:	0
Argon:	0
Oxygen:	0

شکل ۵-۲: نمایشی از صفحه ورود اطلاعات نرم افزار طراحی اریفیس

• قدم اول

در قدم اول جداول ثوابت موجود در استاندارد AGA [۳۰] را به صورت اطلاعات پایه در متن برنامه وارد می کنیم. به این منظور از جداول ۴ و ۵ و ۶ استاندارد AGA سود برده ایم. توضیحات مربوط به جداول فوق به تناسب اولویت استفاده، در فصل سوم (معرفی روش ۸ AGA) آورده شده است.

• قدم دوم

در این مرحله پس از اینکه مقادیر دما و فشار کاری گاز طبیعی توسط کاربر وارد نرم افزار شد، از روابط مرجع [۳۰] استفاده کرده و به ترتیب ابتدا K پارامتر سایز مخلوط، B ضریب دوم ویریا و G_{ij} و E_{ij} پارامترهای دودویی انرژی برهمکنشی و موقعیت ضریب دوم ویریا و C_n^* ضریب وابسته به ترکیبات گاز را محاسبه می کنیم.

در محاسبات این برنامه، تعداد عناصر تشکیل دهنده مخلوط گاز طبیعی را ۲۱ عنصر در نظر می گیریم. برای تعیین پارامتر سایز مخلوط از جداول ۵ و ۶ و برای تعیین ضریب دوم ویریا از جداول ۴ و ۵ مرجع [۳۰] سود برده ایم.

• قدم سوم

پس از مشخص شدن تمام ضرایب رابطه (۳-۲۲)، از یک الگوریتم تکرار نیوتون رافسون برای به دست آوردن مقدار ρ_m انتخاب کرده ایم. و سپس نرم افزار مقادیر درصد مولی ۲۱ عنصر تشکیل دهنده گاز طبیعی را از کاربر دریافت نموده و با قرار دادن آنها در روابط ذکر شده در فصل سوم، مقادیر چگالی و ضریب تراکم پذیری معلوم می شوند .

Mole Component:	
Methane:	.85
Nitrogen:	.05
Carbon dioxide:	.02
Ethane:	.03
Propane:	0.05
Water:	0
Hydrogen sulfide:	0
Hydrogen:	0
Carbon monoxide:	0
i-Butane:	0
n-Butane:	0
i-Pentane:	0
n-Pentane:	0
n-Hexane:	0
n-Heptane:	0
n-Octane:	0
n-Nonane:	0
n-Decane:	0
Helium:	0
Argon:	0
Oxygen:	0

Compressibility factor:	0.9976434
Density: (kg/m ³)	1.31065

calculate

شکل ۵-۳: صفحه ورود اطلاعات درصد مولی اجزاء برای محاسبه چگالی و ضریب تراکم پذیری

۵-۲-۲- مرحله دوم: تعیین ظرفیت های حرارتی و توان آیزنتروپیک و ضریب ژول تامسون

و ویسکوزیته

در مرحله دوم برنامه نویسی هدف، به دست آوردن ظرفیت های ویژه حرارتی در حجم ثابت و فشار

ثابت با کمک روش AGA8 و محاسبه توان آیزنتروپیک و همچنین تعیین ضریب ژول - تامسون با

استفاده از روابط مرجع [۳۰] و محاسبه ویسکوزیته از روابط مرجع [۳۵] می باشد.

• قدم اول

ابتدا به کمک رابطه (۳-۴۳) و با استفاده از ضرایب به دست آمده در مرحله اول ظرفیت ویژه حرارتی حجم ثابت و با کمک رابطه (۳-۳۸) ظرفیت ویژه حرارتی فشار ثابت به دست می آید.

• قدم دوم

سپس با استفاده از رابطه (۳-۶۰) با داشتن مقادیر ظرفیت های حرارتی حجم ثابت و فشار ثابت نرم افزار نوشته شده می تواند مقدار توان آیزنتروپیک را تعیین کند.

• قدم سوم

با کمک رابطه (۳-۶۲) همچنین می توان ضریب ژول - تامسون را محاسبه کرد.

• قدم چهارم

در اینجا هدف برنامه به دست آوردن مقدار ویسکوزیته گاز طبیعی برای تعیین عدد رینولدز به کمک روابط مرجع [۳۵] می باشد.

در مراحل بعدی لزوم تعیین عدد رینولدز ذکر شده است.

viscosity (pa.s):	0.00001192
Molecular Weight: (kg/kmole)	19.36
Cm,p: (kj/kg.k)	1.858
Cm,v: (kj/kg.k)	1.423
Isentropic Exponent :k	1.3030
Joul- Thampson (K/Mpa)	3.688

شکل ۴-۵ : محاسبه ظرفیتهای حرارتی ، توان آیزنتروپیک و ویسکوزیته

۵-۲-۳- مرحله سوم: محاسبه نرخ جرمی جریان

در این مرحله ابتدا کاربر باید از جعبه لیست Calculate گزینه Flow Rate و از جعبه لیست Tapping نوع اتصالات فشاری به کار رفته در سیستم اریفیس متر را انتخاب کند . سپس صفحه ای مطابق شکل (۵-۵) گشوده می شود که اطلاعات قطر لوله ، قطر اریفیس و اختلاف فشار ایجاد شده بین دو طرف اریفیس را از کاربر گرفته و با روابط موجود در متن برنامه که در فصول قبلی نیز ذکر شده است، به محاسبه نرخ جرمی جریان می پردازد. برای تعیین نرخ جرمی جریان و فاکتور انبساط به ترتیب از مراحل اول و دوم، چگالی و توان آیزنتروپیک محاسبه شده اند.

Determine Flow Rate:	
Pipe Diameter (mm):	50
Orifice Diameter (mm):	25
Pressure Differential (pa):	500
Reynolds No.	24826
Discharge Coeff.	0.6118
Expansion Factor:	0.9965
Volume Flow Rate (m ³ /s):	0.00853
Mass Flow Rate (kg/s):	0.01118

شکل ۵-۵ : محاسبه نرخ جرمی جریان

۵-۲-۴- مرحله چهارم : محاسبه قطر سوراخ اریفیس

هدف از این مرحله پیدا کردن قطر سوراخ صفحه اریفیس می باشد. به این منظور کاربر باید از جعبه لیست Calculate گزینه Orifice Diameter و از جعبه لیست Tapping، نوع اتصالات فشاری (شامل فلنج گوشه ای و $D \& D/2$) سیستم انتخاب کند که صفحه ای مطابق شکل (۵-۶) برای دریافت اطلاعات نرخ جرمی جریان، قطر لوله و اختلاف فشار ایجاد شده بین دو طرف اریفیس باز می شود و نرم افزار با روابط مناسب به محاسبه قطر سوراخ اریفیس می پردازد. در این مرحله برای تعیین عدد رینولدز از رابطه $Re = \frac{4 \dot{m}}{\pi d \mu}$ به ویسکوزیته و برای تخمین فاکتور انبساط به توان آیزنتروپیک نیاز داریم.

Determine Orifice Diameter :	
Pipe Diameter (mm):	100
Pressure Differential (pa):	500
Mass Flow Rate (kg/s):	0.05
Discharge Coeff.	0.606722
Reynolds No:	55483
Expansion Factor:	0.9965
Beta Ratio:	0.528
Orifice Diameter (mm):	52.85

شکل ۵-۶ : محاسبه قطر سوراخ صفحه اریفیس

۵-۲-۵- مرحله پنجم: محاسبه اختلاف فشار ایجاد شده بین دو طرف صفحه اریفیس

در این مرحله ما سعی در اندازه گیری اختلاف فشار ایجاد شده بین دو طرف صفحه اریفیس در حالتی که نرخ جرمی جریان و قطر لوله و قطر سوراخ اریفیس معلوم باشند، داریم. ابتدا توسط کاربر از جعبه لیست Calculate گزینه Pressure Differential و از جعبه لیست Tapping، نوع اتصالات فشاری به کار رفته در انتخاب می شود. مطابق شکل (۷-۵) نرم افزار می تواند با دریافت اطلاعات خواسته شده از کاربر به عنوان پارامترهای معلوم، اختلاف فشار ایجاد شده بین دو طرف اریفیس در شرایط مشخص را محاسبه کند. همانند مرحله قبل در این مرحله هم باید مقدار ویسکوزیته و توان آیزنتروپیک معلوم باشد.

Pressure Differential	
Pip Diameter: (mm)	100
Orifice Diameter: (mm)	50
Mass Flow Rate: (kg/s)	0.05
Reynolds no:	55482.8
Expansion Factor:	0.9958
Discharge Coeff.:	0.6081
Pressure Differential: (pa)	632.508

شکل ۷-۵: محاسبه اختلاف فشار ایجاد شده بین دو طرف اریفیس

فصل ششم

طراحی و ساخت یک نمونه عملی اریفیس و کار آزمایشگاهی

۶-۱- مقدمه

همانطور که در فصل قبل اشاره شد کل پارامترهایی که نرم‌افزار طراحی اریفیس ممکن است در مراحل مختلف با توجه به تنوع هدف از کاربر دریافت کند، عبارتند از:

- دمای مطلق
- فشار مطلق
- اختلاف فشار
- ترکیب اجزاء تشکیل دهنده مخلوط گاز طبیعی
- قطر لوله
- قطر سوراخ اریفیس
- نرخ جرمی جریان

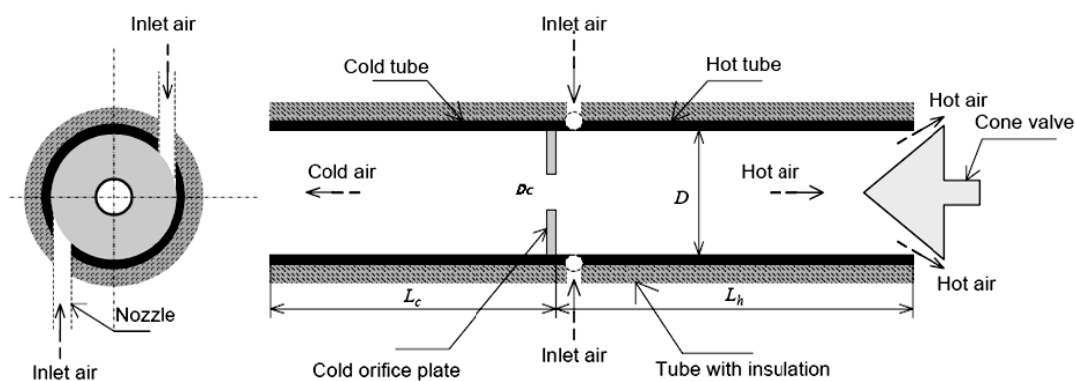
که در حالت کلی هر کدام و یا همه آنها می‌توانند به صورت فرضی به عنوان ورودی توسط کاربر به نرم‌افزار وارد شوند. لذا برای اینکه بتوانیم محدوده‌ی واقعی تغییرات هر کدام از پارامترهای بالا را برای گاز طبیعی بدانیم و در نتیجه یک استفاده بهینه و صنعتی از نرم‌افزار طراحی اریفیس در صنعت گاز کشور کرده باشیم، به سفارش شرکت گاز استان سمنان اقدام به ساخت یک نمونه عملی اریفیس متر کرده و آن را با گاز طبیعی شهر شاهرود که از پالایشگاه خانگیان سرخس تأمین می‌شود، مورد آزمایش قرار دادیم.

۶-۲- طراحی و ساخت نمونه اریفیس

برای نیل به این هدف دو صفحه مشابه اریفیس با قطر ۵۰ mm و قطر سوراخ ۲۵ mm ($\beta = 0.5$) را با رعایت کامل دستورالعمل‌های استاندارد ISO ۵۱۶۷، ذکر شده در فصل چهارم تحقیق حاضر، طراحی کرده و به دقت در کارگاه شرکت کولاب طوس ساختیم. دو سطح بالادست و پایین‌دست اریفیس را مورد پرداخت سطح قرار

داده و شرط موازی و هموار بودن سطوح هر اریفیس را رعایت کرده‌ایم. سپس با اتصالات فشاری از نوع فلنج هر دو اریفیس را به دقت در روی دولوله عبور جریان نصب کردیم. در نصب این اریفیس مترها حدود $18D$ را برای حداقل طول مستقیم لوله در بالا دست اریفیس اعمال کردیم.

دستگاه اصلی مورد آزمایش که سیال از آن عبور می‌کند، لوله گردبادی^۱ می‌باشد. اساس کار این دستگاه بر اینست که سیال ورودی به این دستگاه به دو قسمت جریان سرد و جریان گرم تقسیم می‌شود که از دو طرف لوله گردبادی مطابق شکل (۱-۶) خارج می‌شوند و ما این دو صفحه اریفیس را با رعایت حداقل طول مستقیم لوله در مسیر این دو جریان خروجی سرد و گرم قرار داده‌ایم.



شکل ۱-۶: طرحواره کلی از لوله گردبادی

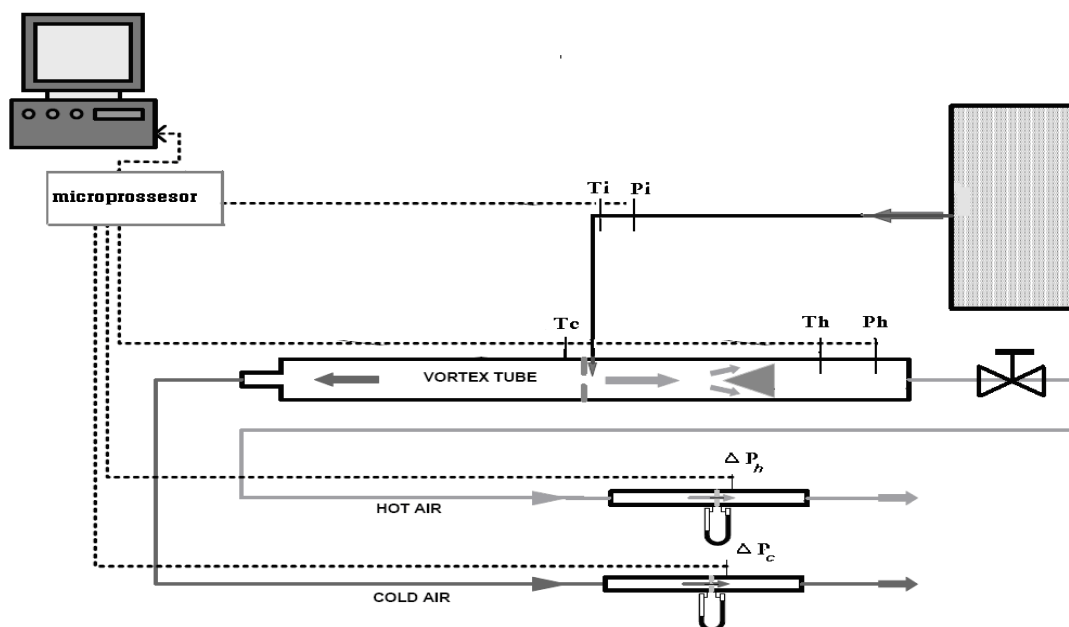
سپس در فاصله ۱ اینچی از هر دو سطح بالادست و پایین‌دست اریفیس سوراخهای گردی در دیواره لوله به طوریکه هم سطح با سطح داخلی لوله باشند، برای اندازه‌گیری اختلاف فشار دو طرف اریفیس به عنوان اتصالات فشاری نوع فلنجی ایجاد کرده و بوسیله لوله های ارتباطی به یک سنسور اختلاف فشار سنج DP متصل می‌کنیم.

¹ Vortex Tube

۳-۶- آشنایی با تجهیزات

در این فصل ابتدا با وسایل و تجهیزاتی که مورد استفاده قرار گرفته شده است، آشنا خواهیم شد و سپس به نحوه انجام آزمایش می‌پردازیم.

شکل ذیل طرحواره‌ای از وسایل مورد استفاده در این تحقیق را نمایش می‌دهد.



شکل ۳-۶: طرحواره کلی از دستگاه مورد آزمایش و نحوه اتصال آن به کامپیوتر

ابزار و وسایل مورد استفاده در این تحقیق شامل موارد ذیل بوده‌اند:

- لوله گردبادی شامل لوله گرم، لوله سرد، نازل ورودی
- ۲ عدد جریان سنج اریفسمتر ساخته شده بر اساس استاندارد ISO ۵۱۶۷
- ۳ عدد حسگر دما از نوع PT ۱۰۰
- ۲ عدد حسگر فشار (در بازه ۰-۴ و ۰-۱۰ بار)
- ۲ عدد حسگر دیجیتالی اختلاف فشار

- ۱ عدد شیر تویی برای تنظیم جریان
 - ریزپردازنده AVR ATMEGA ۳۲ و نمایشگر داده ها برای نمایش و ثبت داده‌ها دارای ۸ کانال آنالوگ ورودی (ساخت شرکت هولوگل پارس به سفارش مجریان این طرح)
 - رایانه قابل حمل و نرم‌افزار ۸۰۰ ACM (توسعه داده شده توسط شرکت هولوگل پارس به سفارش مجریان این طرح)
- لوله گردبادی ، بدنه اصلی آزمایش ما را شامل و از ۳ قسمت اساسی ذکر شده در بالا (لوله گرم ، لوله سرد و نازل ورودی و یک اریفیس که فقط برای هم مرکز کردن خطوط جریان و نه برای اندازه‌گیری دبی، استفاده می‌گردد) تشکیل می‌شود. ما در این آزمایش از نمونه اریفیس‌های ساخته شده برای اندازه‌گیری جریان‌های عبوری از لوله‌های جریان سرد و گرم استفاده می‌کنیم.
- شکل ذیل نیز دستگاه مورد استفاده را در هنگام آزمایش در یکی از ایستگاههای تقلیل فشار TBS شاهرود نمایش می‌دهد.



شکل ۳-۶ : دستگاه مورد آزمایش در محل ایستگاه تقلیل فشار شهر شاهرود

لوله گردبادی به طور کلی وسیله ای است که جریان ورودی، متقاطع با خط مرکزی لوله به دو بخش جریان سرد و جریان گرم تقسیم شده و جریان سرد پس از گذشتن از اریفیس نزدیک نازل ورودی که از این به بعد آنرا اریفیس ورودی می‌نامیم، از یک طرف دستگاه و جریان گرم بدون عبور از این اریفیس از روزه طرف دیگر دستگاه خارج می‌شود. ما برای اندازه‌گیری این دو جریان، دو اریفیس طبق استاندارد ISO ۵۱۶۷ ساخته و با در نظر گرفتن تمام توصیه های استاندارد ISO ، بر روی لوله گردبادی نصب کرده‌ایم.

۶-۳-۱- تجهیزات مکانیکی

وظایف اجزای مکانیکی دستگاه آزمایش بشرح ذیل می باشد:

- ۱ شیر ورودی : از این شیر برای تنظیم فشار ورودی استفاده می‌شود و گاز و هوا بعد از عبور از این شیر وارد لوله گردبادی می‌شود.
- ۲ لوله سرد : قسمتی از لوله گردبادی است که هوای عبوری از اریفیس ورودی وارد این قسمت می‌شود.
- ۳ اریفیس ورودی : محل قرار گرفتن اریفیس ورودی در کنار نازل ورودی جریان می‌باشد. ما از این اریفیس ها برای اندازه‌گیری استفاده نمی‌کنیم. قطر سوراخ این اریفیس ۸ میلیمتر می‌باشد.
- ۴ لوله گرم: هوایی که از اریفیس ورودی عبور نمی‌کند در این لوله جریان پیدا می‌کند.
- ۵ شیر تنظیم خروجی گرم: این شیر برای کنترل مقدار هوای خروجی گرم و در نتیجه هوای گرم می‌باشد با تنظیم این شیر مقدار جریان در قسمت گرم و سرد تغییر می‌کنند.
- ۶ جریان سنج اریفیس متر برای جریان سرد : این لوله با قطر داخلی ۵۰ میلیمتر و قطر اریفیس ۲۵ میلیمتر در مسیر خروجی سرد قرار می‌گیرد و طول لوله مستقیم برای توسعه یافتگی حدود ۹۰ سانتی متر می باشد که از آن برای اندازه‌گیری دبی خروجی سرد استفاده می‌شود. این جریان سنج بر اساس استاندارد ISO۵۱۶۷ طراحی شده است و ساخت شرکت کولاب طوس بوده است .

۷ جریان سنج اریفیس متر برای جریان گرم: مانند جریان سنج جریان سرد است در مسیر خروجی گرم قرار می‌گیرد و طول لوله مستقیم برای توسعه یافتگی حدود ۹۰ سانتی‌متر می‌باشد که از آن برای اندازه‌گیری دبی خروجی گرم استفاده می‌شود .

۸ شیر خروجی سرد: جریان گاز سرد شده بعد از عبور از اریفیس سرد از این قسمت خارج می‌شوند .

۹ شیرخروجی گرم: جریان گاز گرم شده بعد از عبور از اریفیس گرم از این قسمت خارج می‌شوند .

۶-۳-۲- تجهیزات الکترونیکی

وسایل و ابزارهای اندازه‌گیری که در این آزمایش استفاده می‌شوند عبارتند :

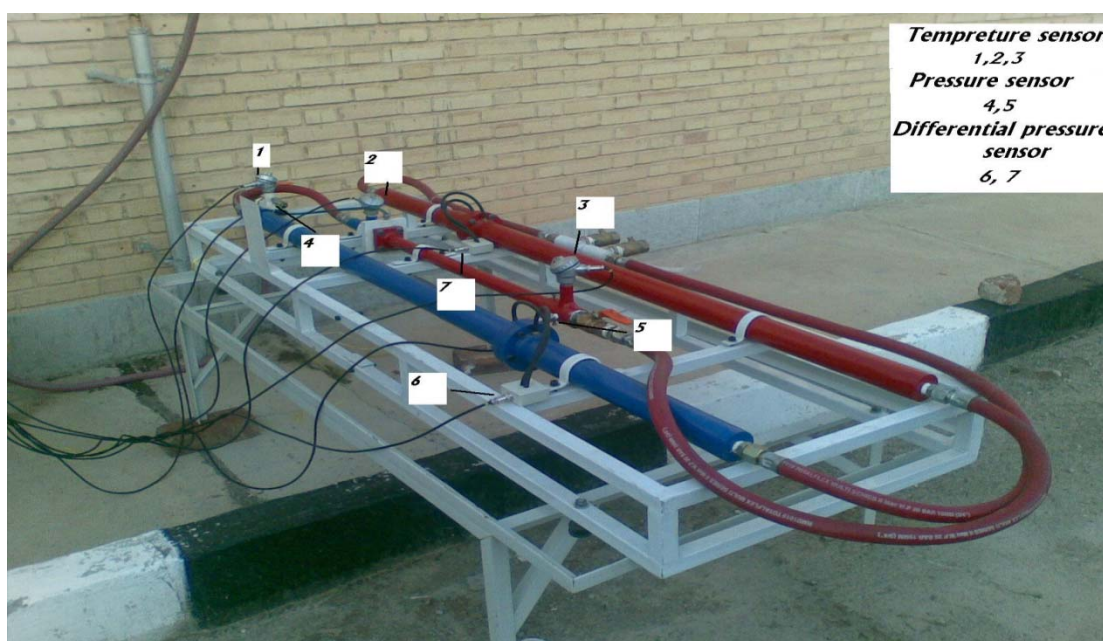
حسگرهای دما : در این آزمایش سه عدد حسگر دمای ۱۰۰ PT که بعد از شیر ورودی برای اندازه‌گیری دمای ورودی و قبل از شیر خروجی گرم برای اندازه‌گیری دمای هوای گرم و در قبل از اریفیس سرد برای اندازه دمای هوای سرد استفاده می‌شود. حسگرها از نوع سه سیم بوده که به ریزپردازنده متصل بوده و دما در نمایشگر ریزپردازنده و همچنین با توجه به اتصال ریزپردازنده به رایانه قابل حمل، در رایانه نمایش داده می‌شود. باید توجه داشت که نرم‌افزار ۸۰۰ ACM بطور خودکار اطلاعات را در یک فایل Excel ثبت می‌کند.

حسگرهای فشار : در این آزمایش ۲ عدد حسگر فشار Huba Control که یکی از آنها فشار را در بازه ۰-۴ بار و دیگر فشار ۰-۱۰ بار گزارش می‌کند و اطلاعات را به ریزپردازنده انتقال می‌دهد استفاده شده است. حسگرهای فشار نیز از نوع سه سیم بوده که بعد از شیر ورودی برای اندازه‌گیری فشار ورودی و قبل از شیر خروجی گرم برای اندازه‌گیری فشار خروجی لوله گرم استفاده شده‌اند.

• حسگرهای اختلاف سنج فشار: در هریک از جریان‌سنج‌های مورد استفاده بر اساس استانداردهای موجود برای محاسبه دبی، نیاز به اندازه‌گیری اختلاف فشار بین دو طرف اریفیس جریان سنج می‌باشد که این عمل با استفاده از دو حسگر اختلاف سنج انجام می‌گیرد. این دو اختلاف سنج با ریزپردازنده متصل بوده و اطلاعات را به ریزپردازنده منتقل می‌کنند.

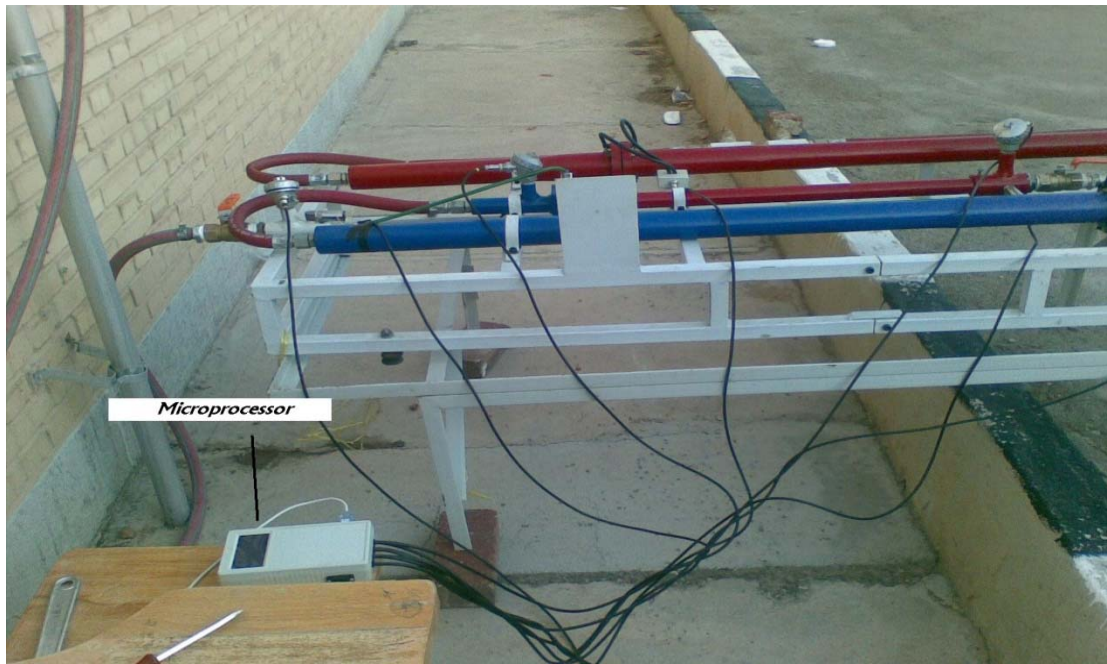
ریز پردازنده AVR ATMEGA ۳۲ و نمایشگر: در این تحقیق به سفارش مجریان یک ریز پردازنده AVR ATMEGA ۳۲ و نمایشگر توسط شرکت هولوگل پارس ساخته و در اختیار مجریان قرار گرفت. این ریزپردازنده دارای ۸ کانال آنالوگ ورودی بوده که اطلاعات حسگرها را که بر حسب جریان یا ولتاژ می‌باشد دریافت می‌کند و بعد از تبدیل این اطلاعات به فشار و دما ضمن نمایش آنها در صفحه نمایشگر، اطلاعات را به رایانه ارسال می‌کند.

رایانه و نرم افزار: در این تحقیق اطلاعات علاوه بر اینکه اطلاعات در نمایشگر ریزپردازنده نمایش داده می‌شود با استفاده از یک نرم‌افزار توسعه داده شده توسط شرکت هولوگل پارس از رایانه برای دریافت اطلاعات نیز استفاده شده‌است. همچنین برای دقت ثبت اطلاعات و عدم استفاده از روش دستی ثبت اطلاعات نرم‌افزار تمام در یک فایل Excel ذخیره می‌کند. (این عمل به کمک نرم‌افزار ACM ۸۰۰ انجام می‌شود).



شکل ۴-۶: محل قرار گرفتن سنسورهای فشار و دما (در محل محوطه دانشگاه صنعتی شاهرود)

چنان که اشاره شد در این طرح از یک ریز پردازنده اختصاصی که برای این طرح ساخته شده است، به منظور دریافت، پردازش و ارسال اطلاعات به رایانه استفاده شد.



شکل ۶-۵ : میکرو پروسور اختصاصی برای خواندن اطلاعات آزمایش

اطلاعات ارسالی به رایانه توسط نرم افزار ACM ۸۰۰ دریافت شده و ضمن نمایش اطلاعات در نمایشگر بطور خودکار در یک فایل ثبت می شود . این نرم افزار در حال استفاده در شکل ذیل نشان داده شده است.



شکل ۶-۶ : کامپیوتر و نرم افزار مورد استفاده در آزمایش

۶-۴- روش انجام آزمایش

بعد از توضیح دستگاه مورد آزمایش، اجزاء مکانیکی و وسایل اندازه‌گیری الکترونیکی، در این قسمت به شرح آزمایش انجام گرفته پرداخته می‌شود:

آزمایش مورد نظر در دانشگاه صنعتی شاهرود انجام گرفت. همچنین در یکی از ایستگاههای تقلیل فشار شهر شاهرود تکرار گردید. شکل ذیل طریقه اتصال لوله گردبادی به خط انتقال گاز داخل دانشگاه را نمایش می‌دهد. با توجه به گرمای هوا و لزوم تخلیه گاز خروجی به محیط، این عمل در بعدازظهر و شب انجام گرفت تا از خطرات احتمالی جلوگیری شود. هر چند با توجه به مقدار گاز تخلیه شده و بوی گاز استشمام شده این عمل مقداری خطرناک بنظر رسید.



شکل ۶-۷ : نحوه اتصال دستگاه به رگلاتور گاز در محوطه دانشگاه صنعتی شاهرود

روش انجام آزمایشات بدین ترتیب بود که بعد از بستن دستگاه به منبع تأمین گاز اجازه داده می‌شد که جریان برای چند دقیقه برقرار شده و به حالت پایدار برسد. در عمل، پایدار شدن جریان با توجه به عدم تغییر دمای هوای سرد و گرم قابل تشخیص بود. سپس شروع به ثبت اطلاعات در کامپیوتر می‌شد. با این کار به جریان اجازه می‌دهیم تا به حالت پایدار (steady) برسد و در نتیجه اطلاعات دریافتی دقیق‌تر باشد.

ثبت اطلاعات کاملاً بصورت خودکار بود و توسط نرم‌افزار ACM ۸۰۰ انجام می‌گرفت بعد از فشردن کلیدی توسط اپراتور این نرم‌افزار اطلاعاتی دریافتی میکروپروسسور را به صورت داده های ۱۰۰ تایی پس از یک دقیقه در یک جدول Excel ذخیره می‌کرد.

در این آزمایش جریان را از طریق نازل ورودی و اریفیس ورودی با قطر ۸ میلیمتر به داخل دستگاه لوله گردبادی هدایت کرده و بوسیله اریفیس مترهایی که در مسیر جریانهای سرد و گرم قرار دادیم، نرخ جرمی جریان را اندازه‌گیری کردیم. در این آزمایش برای بررسی تغییرات جریان های سرد و گرم از تنظیم شیر تویی استفاده می‌شد. در هر حالت فشار و دمایی ورودی ثابت و دبی خروجی گرم و سرد را از طریق تنظیم شیر خروجی گرم تغییر داده می‌شد. لازم به ذکر است برای افزایش میزان دقت برای هر حالت مشخصات حدود ۳۰۰ نقطه از کامپیوتر گرفته شده و با متوسط گیری از این نقاط، مشخصات (دمایی و فشاری) آنها و اختلاف فشار متناظر با هر اریفیس محاسبه می‌شود.

بعد از اینکه فشار و اختلاف فشار و دمای عملکرد سیستم به حالت پایدار رسید و مقادیر آنها توسط سنسورها اندازه‌گیری شد، باید آنالیز ترکیبات گاز طبیعی ورودی به سیستم شخص شود، زیرا مخلوط گاز طبیعی ترکیبی از حداکثر ۲۱ عنصر می‌باشد که تغییرات در صد مولی هر کدام می‌تواند تأثیر زیادی بر خواص گاز داشته باشد. از آنجا که معادلات حالت موجود غالباً اثر ترکیبات گاز طبیعی را مد نظر قرار نمی‌دهند برای دقت بیشتر در کار از روش ارائه شده توسط انجمن گاز آمریکا ، AGA ، استفاده می‌کنیم که از آن در تدوین نرم‌افزار طراحی سود جسته ایم.

نرم افزار طراحی اریفیس، دما و فشار کاری و اختلاف فشار اندازه گیری شده توسط آزمایش را به عنوان ورودی گرفته و ضریب تراکم پذیری گاز طبیعی و چگالی را به عنوان خروجی چاپ می کند. و در مرحله بعدی با انتخاب نوع اتصالات فشاری اریفیس مترها اقدام به محاسبه نرخ جرمی جریان می کند.

فصل هفتم

نتایج آزمایشگاهی و نتایج عددی

نرم افزار طراحی اریفیس و

معتبر سازی آنها با نتایج تجربی

۷-۱- مقدمه

در این فصل می‌خواهیم اعداد و ارقام حاصل از آزمایش اریفیس‌مترها در یکی از ایستگاه‌های تقلیل فشار گاز شهر شاهرود که در تاریخ ۱۳۸۷/۴/۷ انجام گردیده و نتایج آن از روی سنسورهای فشار و دما و اختلاف سنج فشار، قرائت شده است را در جداولی مرتب کنیم. همانگونه که در فصل قبلی ذکر شد نرم‌افزار ACM ۸۰۰ که توسط شرکت هوگل پارس تدوین شده است به صورت خودکار اعداد حاصل از اندازه‌گیری سنسورهای مختلف برای هر حالت (شیر خروجی جریان گرم در حالت‌های متفاوت باشد) را در جداول ۱۰۰ تایی Excel ذخیره می‌کند. پس از متوسط‌گیری از مقادیر دما، فشار و اختلاف فشار، آنها را وارد نرم‌افزار طراحی اریفیس (Orifice Designing Software) کرده و نرخ جرمی جریان را به دست می‌آوریم.

قبل از آنکه مقادیر نرخ جرمی جریان را با نتایج حاصل از نرم‌افزارهای موجود در بازار که به همین منظور طراحی شده‌اند (Flow Orifice و Meter Calc) مقایسه کنیم، ابتدا باید خواص فیزیکی گاز طبیعی شهر شاهرود که از حوزه خانگیان سرخس تأمین می‌شود را تعیین کرده و برخی از آنها را با خواص فیزیکی به دست آمده از سایر روشهای عددی مانند روش فوگاسیته که ماریک در مرجع [۳۲] به آن پرداخته است و یا با روش تجربی ارنست [۳۸]، قیاس کنیم تا برای یک ترکیب مشخص اجزاء گاز به صحت روشهای پیش بینی خواص گاز طبیعی که در توسعه نرم‌افزار از آنها استفاده کرده‌ایم پی ببریم.

۷-۲- آنالیز ترکیبات تشکیل دهنده گاز طبیعی پالایشگاه خانگیان

قبل از هر کاری برای استفاده از نرم‌افزار طراحی اریفیس باید ترکیبات گاز طبیعی خانگیان برای محاسبه خواص فیزیکی آن را داشته باشیم. یک مخلوط گاز طبیعی حداکثر از ۲۱ عنصر تشکیل شده

است که برای پالایشگاه خانگیران این عناصر به ۱۱ عدد می‌رسند و در صد مولی هر کدام در جدول (۷-۱) آورده شده است.

جدول ۷-۱: آنالیز تجربی ترکیبات تشکیل دهنده گاز طبیعی پالایشگاه خانگیران

Component	mole Fraction
Methane	۹۸,۶۴
Ethane	۰,۵۹۳
Propane	۰,۰۶۵
i-Butane	۰,۰۱۵
n-Butane	۰,۰۳۴
i-Pentane	۰,۰۲۶
n-Pentane	۰,۰۱۹
C _{۶+}	۰,۱۲۵
CO _۲	۰,۰۵۵
H _۲ S	۲ PPM
N _۲	۰,۴۲۸

۳-۷- محاسبه خواص فیزیکی گاز طبیعی پالایشگاه خانگیران

در این قسمت به محاسبه برخی خواص فیزیکی گاز طبیعی به کمک نرم‌افزار طراحی اریفیس و رسم آنها می‌پردازیم.

۳-۷-۱- محاسبه چگالی و ضریب تراکم‌پذیری

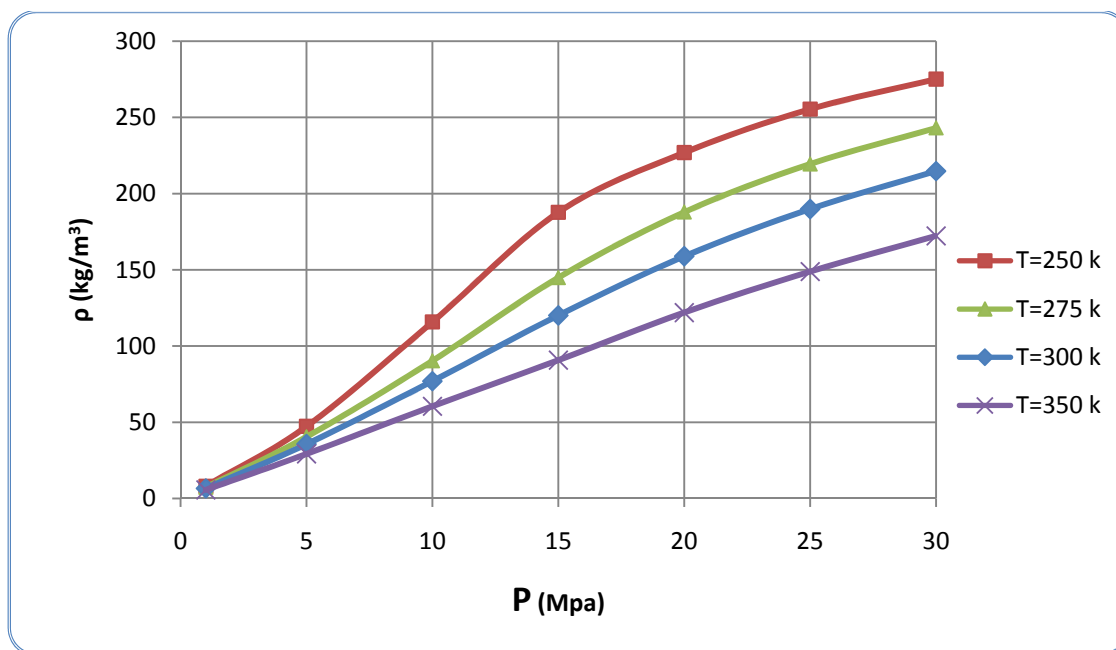
برای محدوده دمایی ۲۵۰ تا ۳۵۰ کلوین و محدوده فشاری ۱ تا ۳۰ مگاپاسکال به کمک نرم‌افزار طراحی اریفیس به محاسبه خواص چگالی و ضریب تراکم‌پذیری گاز طبیعی به منظور بررسی نحوه تغییرات آنها در دماها و فشارهای مختلف پرداخته‌ایم. مقادیر به دست آمده از نرم‌افزار طراحی به شرح جداول (۳-۷) و (۲-۷) می‌باشند.

جدول ۲-۷: مقادیر چگالی گاز طبیعی پالایشگاه خانگیران برای دما و فشارهای مختلف

P \ T	ρ (kg/m ³)			
	T= ۲۵۰ k	T= ۲۷۵ k	T= ۳۰۰ k	T= ۳۵۰ k
P=۱ MPa	۸.۱۳	۷.۳۲	۶.۶۶	۵.۶۶
P=۵ MPa	۴۷.۳۱	۴۰.۴۷	۳۵.۷۵	۲۹.۳۸
P=۱۰ MPa	۱۱۵.۹۰	۹۰.۳۲	۷۷.۰۰	۶۰.۵۱
P=۱۵ MPa	۱۸۷.۸۱	۱۴۴.۹۲	۱۲۰.۱۳	۹۰.۸۲
P=۲۰ MPa	۲۲۶.۹۲	۱۸۷.۹۴	۱۵۸.۹۵	۱۲۲.۰۲
P=۲۵ MPa	۲۵۵.۵۰	۲۱۹.۴۰	۱۸۹.۹۳	۱۴۸.۹۳
P=۳۰ MPa	۲۷۵.۱۴	۲۴۳.۱۷	۲۱۴.۸۰	۱۷۲.۳۴

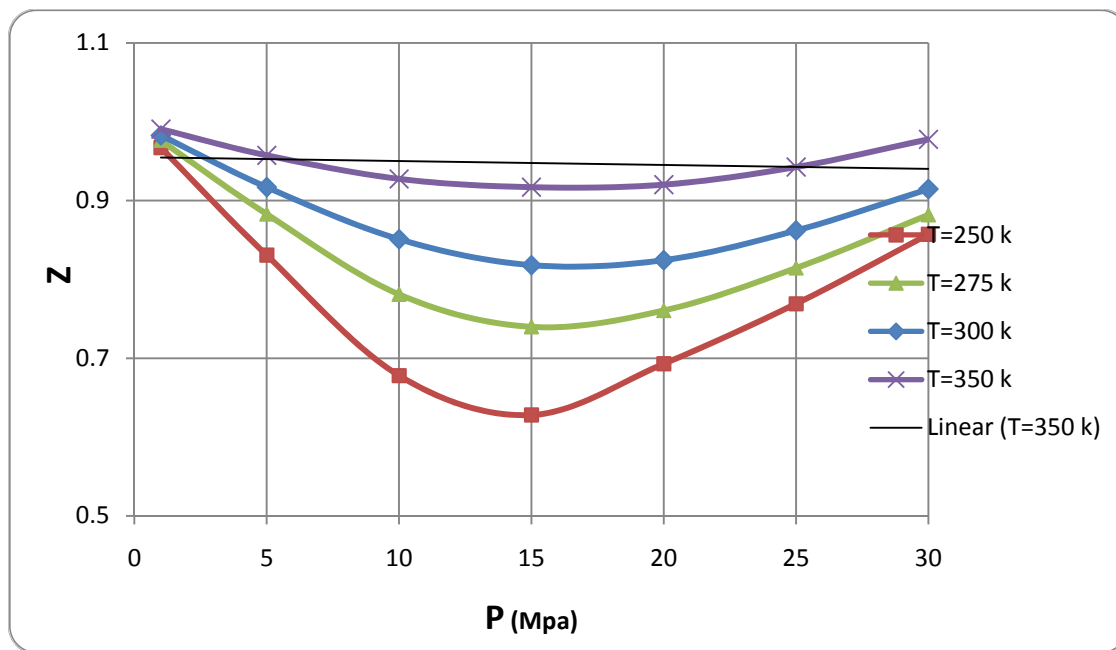
جدول ۳-۷: مقادیر ضریب تراکم پذیری گاز طبیعی پالایشگاه خانگیران برای دما و فشارهای مختلف

P	T	Z			
		T= ۲۵۰ k	T= ۲۷۵ k	T= ۳۰۰ k	T= ۳۵۰ k
P=۱ MPa		۰.۹۶۷۱	۰.۹۷۶۳	۰.۹۸۲۷	۰.۹۹۰۷
P=۵ MPa		۰.۸۳۰۷	۰.۸۸۲۸	۰.۹۱۷	۰.۹۵۷۴
P=۱۰ MPa		۰.۶۷۸	۰.۷۸۱	۰.۸۵۰۹	۰.۹۲۷۵
P=۱۵ MPa		۰.۶۲۸	۰.۷۳۹۸	۰.۸۱۸۱	۰.۹۱۷
P=۲۰ MPa		۰.۶۹۲۹	۰.۷۶۰۴	۰.۸۲۴۳	۰.۹۲۰۲
P=۲۵ MPa		۰.۷۶۹۱	۰.۸۱۴۴	۰.۸۶۲	۰.۹۴۲۶
P=۳۰ MPa		۰.۸۵۷۱	۰.۸۸۱۸	۰.۹۱۴۶	۰.۹۷۷۷



نمودار ۷-۱: تغییرات مقادیر چگالی گاز طبیعی پالایشگاه خانگیران بر حسب دما و فشار

از نمودار (۷-۱) می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش دما در یک فشار ثابت به دلیل زیاد شدن فاصله بین مولکولها در اثر جنبش زیاد آنها، تراکم مولکولها در یک حجم معین کاهش یافته و چگالی سیال کم می‌شود.



نمودار ۷-۲ : تغییرات مقادیر ضریب تراکم‌پذیری، Z، گاز طبیعی پالایشگاه خانگیران برحسب دما و فشار

نمودار (۷-۲) نشان می‌دهد که در فشارهای پایین، مقدار Z افزایش یافته و این مقدار به عدد ۱ نزدیک می‌شود، که این مساله بدلیل نزدیک شدن شرایط گاز طبیعی به گاز ایده‌آل در فشارهای پایین اتفاق می‌افتد. پایین آمدن فشار، باعث کاهش نیروهای ربایش بین ذرات i و j و همچنین کاهش تعداد برخوردهای ذرات در مخلوط گاز شده، باتوجه به اینکه در مدل ۸ AGA اثر این نوع برخوردها و نیروهای حاصله در نظر گرفته می‌شود، متعاقب این کاهش، افزایش Z را بدنبال خواهد داشت.

با افزایش فشار تا حدود ۱۵ مگاپاسکال به دلیل زیاد شدن سرعت برخورد ذرات، کاهش Z اتفاق می‌افتد، اما بعد از آن در دمای ثابت با افزایش فشار، Z شروع به افزایش می‌کند. زیرا با افزایش بیشتر

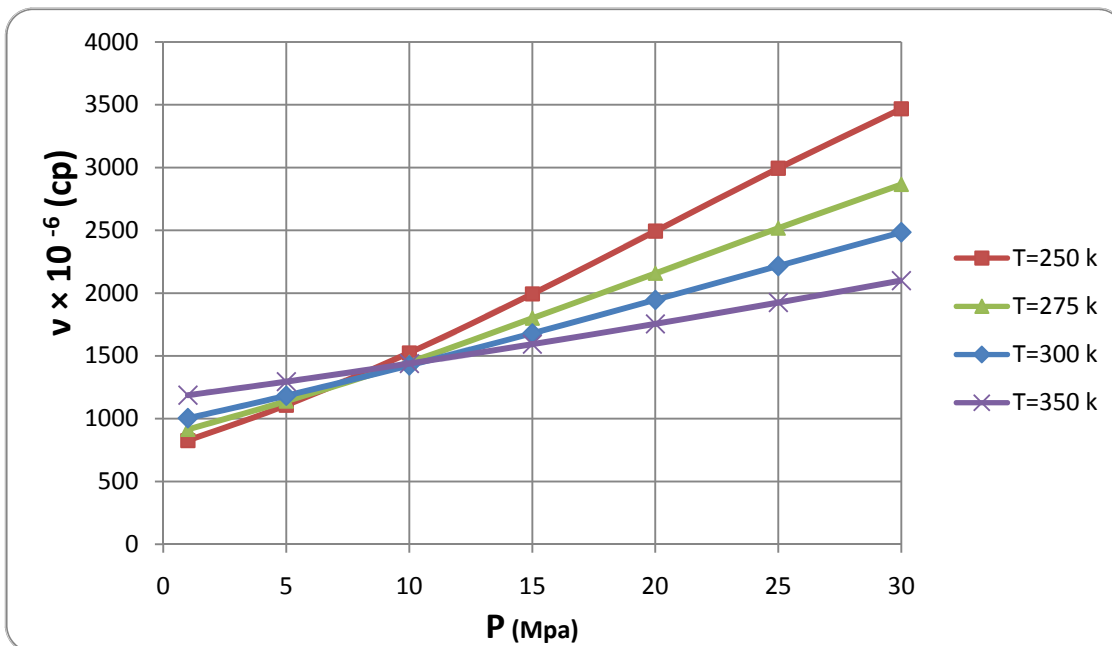
فشار، تعداد برخوردهای بین ذره‌ای در مخلوط گاز به دلیل تراکم زیاد ذرات افزایش می‌یابد اما مقدار تأثیری که افزایش تعداد برخوردهای بین ذره‌ای بر روی مقدار Z می‌گذارند کمتر از مقدار تأثیری است که افزایش نیروهای رانش بین ذره‌ای بر روی مقدار Z اعمال می‌کنند. بنابراین از جمله نکات مهم قابل استنتاج از نمودارها وابستگی شدید مقدار ضریب تراکم‌پذیری به تغییرات فشار می‌باشد.

۷-۳-۲- محاسبه ویسکوزیته

برای محاسبه خاصیت ویسکوزیته مانند خواص چگالی و ضریب تراکم‌پذیری عمل کرده و در محدوده دماهای بین ۲۵۰ تا ۳۵۰ کلوین و محدوده فشاری ۱ تا ۳۰ مگا پاسکال، مقادیر را استخراج کرده‌ایم.

جدول ۷-۴: مقادیر ویسکوزیته گاز طبیعی پالایشگاه خانگیران برای دما و فشارهای مختلف

P	T			
	T= ۲۵۰ k	T= ۲۷۵ k	T= ۳۰۰ k	T= ۳۵۰ k
P=۱ MPa	۸۲۶	۹۱۴	۱۰۰۴	۱۱۸۷
P=۵ MPa	۱۱۰۸	۱۱۴۰	۱۱۸۳	۱۲۹۵
P=۱۰ MPa	۱۵۲۴	۱۴۵۰	۱۴۲۴	۱۴۳۹
P=۱۵ MPa	۱۹۹۴	۱۸۰۰	۱۶۸۰	۱۵۹۳
P=۲۰ MPa	۲۴۹۳	۲۱۵۷	۱۹۴۶	۱۷۵۵
P=۲۵ MPa	۲۹۹۴	۲۵۱۷	۲۲۱۶	۱۹۲۵
P=۳۰ MPa	۳۴۶۸	۲۸۶۵	۲۴۸۴	۲۱۰۰



نمودار ۳-۷: تغییرات مقادیر ویسکوزیته گاز طبیعی پالایشگاه خانگیران بر حسب دما و فشار

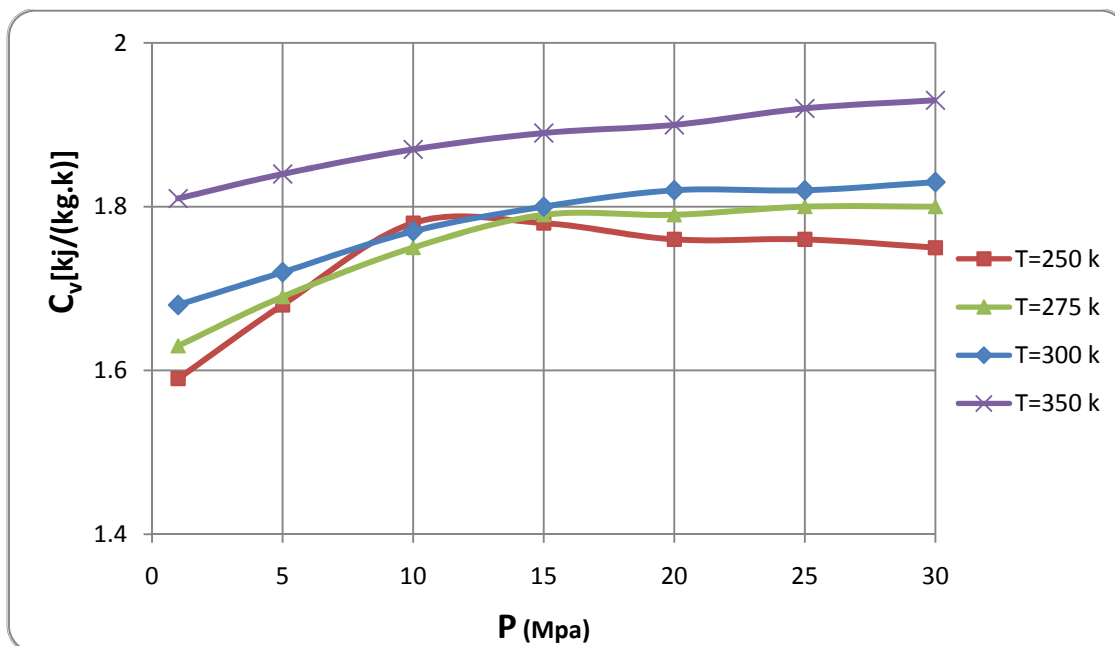
از نمودار بالا قابل مشاهده می‌باشد که با زیاد شدن دما و افزایش فشار برای گازها، مقدار گرانیوی یا لزجت سیال کمتر شده و مقاومت کمتری در مقابل جریان یافتن از خود نشان می‌دهد.

۳-۳-۷- محاسبه ظرفیتهای حرارتی حجم ثابت و فشار ثابت و توان آیزنتروپیک

برای محاسبه خواص ظرفیت حرارتی و توان آیزنتروپیک نیز مانند خواص چگالی و ضریب تراکم‌پذیری و ویسکوزیته عمل و در محدوده دماهای بین ۲۵۰ تا ۳۵۰ کلوین و محدوده فشاری ۱ تا ۳۰ مگاپاسکال مقادیر آنها را به کمک نرم‌افزار طراحی استخراج می‌کنیم و نتایج را در جدول (۳-۷) تا (۳-۷) آورده‌ایم.

جدول ۵-۷: مقادیر ظرفیت حرارتی حجم ثابت گاز طبیعی پالایشگاه خانگیران برای دما و فشارهای مختلف

P \ T	C_v [kJ/(kg.k)]			
	T= ۲۵۰ k	T= ۲۷۵ k	T= ۳۰۰ k	T= ۳۵۰ k
P=۱ MPa	۱.۵۹	۱.۶۳	۱.۶۸	۱.۸۱
P=۵ MPa	۱.۶۸	۱.۶۹	۱.۷۲	۱.۸۴
P=۱۰ MPa	۱.۷۸	۱.۷۵	۱.۷۷	۱.۸۷
P=۱۵ MPa	۱.۷۸	۱.۷۹	۱.۸۰	۱.۸۹
P=۲۰ MPa	۱.۷۶	۱.۷۹	۱.۸۲	۱.۹۰
P=۲۵ MPa	۱.۷۶	۱.۸۰	۱.۸۲	۱.۹۲
P=۳۰ MPa	۱.۷۵	۱.۸۰	۱.۸۳	۱.۹۳

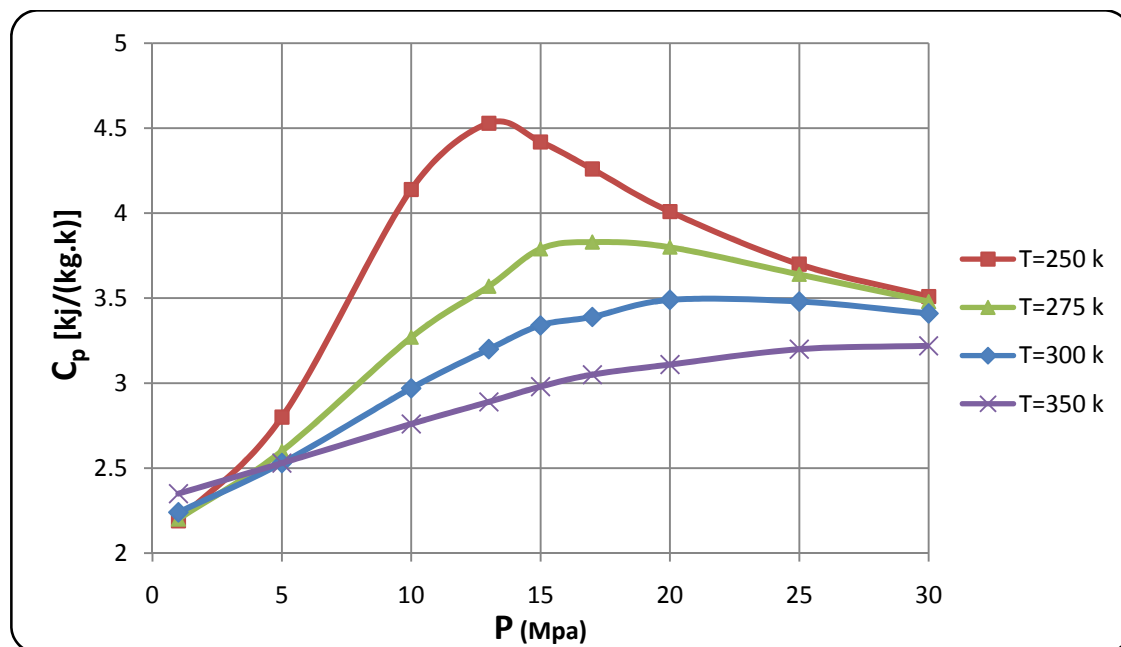


نمودار ۷-۴: تغییرات مقادیر ظرفیت حرارتی حجم ثابت گاز طبیعی پالایشگاه خانگیران بر حسب دما و فشار

نمودار تغییرات ظرفیت حرارتی حجم ثابت با افزایش فشار در دمای ثابت و افزایش دما در فشار ثابت روند صعودی دارد (به جز در چند نقطه برای دمای ۲۵۰ کلوین که قابل اغماض می باشد).

جدول ۶-۷: مقادیر ظرفیت حرارتی فشار ثابت گاز طبیعی پالایشگاه خانگیران برای دما و فشارهای مختلف

P	C_p [kJ/(kg.k)]			
	T= ۲۵۰ k	T= ۲۷۵ k	T= ۳۰۰ k	T= ۳۵۰ k
P=۱ MPa	۲.۱۹	۲.۲۰	۲.۲۴	۲.۳۵
P=۵ MPa	۲.۸۰	۲.۶۰	۲.۵۳	۲.۵۳
P=۱۰ MPa	۴.۱۴	۳.۲۷	۲.۹۷	۲.۷۶
P=۱۵ MPa	۴.۴۲	۳.۷۹	۳.۳۴	۲.۹۸
P=۲۰ MPa	۴.۰۱	۳.۸۰	۳.۴۹	۳.۱۱
P=۲۵ MPa	۳.۷۰	۳.۶۴	۳.۴۸	۳.۲۰
P=۳۰ MPa	۳.۵۱	۳.۴۸	۳.۴۱	۳.۲۲



نمودار ۷-۵: تغییرات مقادیر ظرفیت حرارتی فشار ثابت گاز طبیعی پالایشگاه خانگیران بر حسب دما و فشار

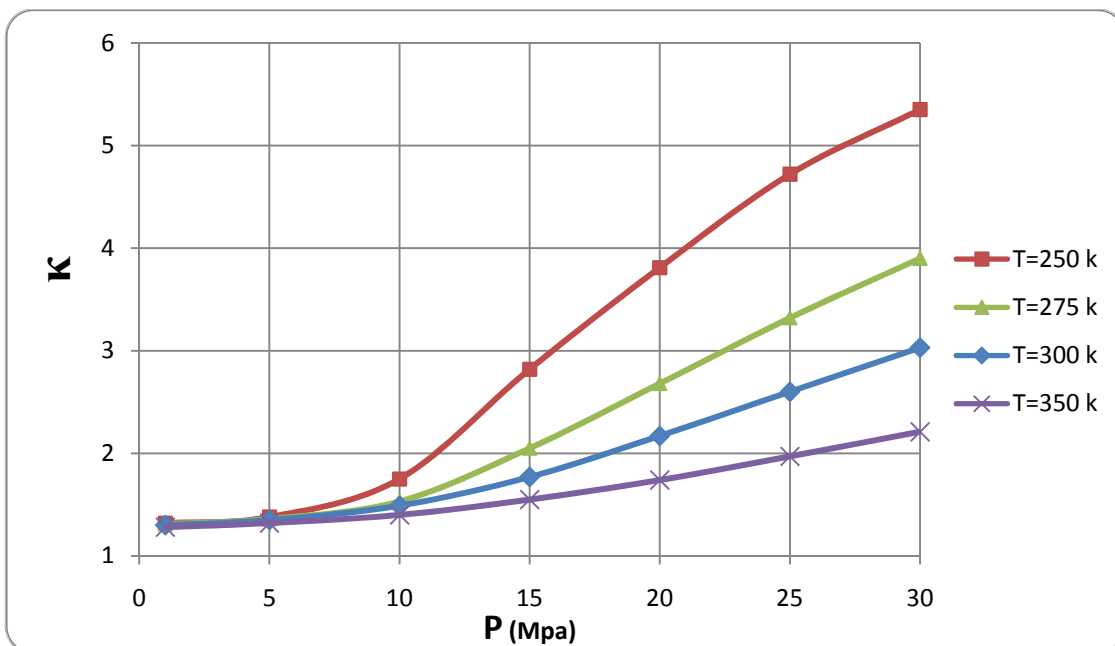
با توجه به نمودار (۷-۵) میبینیم که در فشار ۱۳ مگا پاسکال بیشترین مقدار را برای C_p در حدود 4.528 j/(gr.k) در دمای ۲۵۰ کلوین داریم.

همچنین از نمودار مشخص است که مقادیر C_p در دما و فشار خاصی دارای نقطه ماکزیمم می‌باشند که با افزایش دما، فشار متناظر با این نقطه افزایش و مقدار عددی این نقطه کاهش می‌یابد. برای دمای ۳۵۰ کلوین در فشاری حدود ۳۳ مگاپاسکال بیشترین C_p را داریم.

در ادامه، جدول تغییرات توان آیزنتروپیک گاز طبیعی پالایشگاه خانگیران را مشاهده می‌کنید.

جدول ۷-۷: مقادیر توان آیزنتروپیک گاز طبیعی پالایشگاه خانگیران برای دما و فشارهای مختلف

P \ T	K			
	T= ۲۵۰ k	T= ۲۷۵ k	T= ۳۰۰ k	T= ۳۵۰ k
P=۱ MPa	۱.۳۲	۱.۳۱	۱.۳۰	۱.۲۸
P=۵ MPa	۱.۳۸	۱.۳۶	۱.۳۵	۱.۳۲
P=۱۰ MPa	۱.۷۵	۱.۵۳	۱.۴۹	۱.۴۰
P=۱۵ MPa	۲.۸۲	۲.۰۵	۱.۷۷	۱.۵۵
P=۲۰ MPa	۳.۸۱	۲.۶۸	۲.۱۷	۱.۷۴
P=۲۵ MPa	۴.۷۲	۳.۳۲	۲.۶۰	۱.۹۷
P=۳۰ MPa	۵.۳۵	۳.۹۰	۳.۰۳	۲.۲۱



نمودار ۶-۷: تغییرات مقادیر توان آیزنتروپیک گاز طبیعی پالایشگاه خانگیران بر حسب دما و فشار

با بررسی نمودار (۶-۷) به روالی منطقی برای تغییرات K می‌رسیم. دما و فشار بحرانی برای گاز طبیعی حوزه خانگیران حدود ۱۹۵ کلوین و ۴,۵ مگاپاسکال بوده و محدوده دمایی نمودارها از دمای ۲۵۰ کلوین که بالاتر از دمای بحرانی می‌باشد، شروع شده است.

از نقطه نظر فیزیکی گاز طبیعی حوزه خانگیران در فشارهای بالاتر از فشار بحرانی و در محدوده دمایی ۲۵۰ تا ۳۵۰ کلوین به صورت بخار سوپرهیت درآمده و در این حالت انحراف از رفتار گاز ایده‌آل زیاد می‌باشد. در فشارهای پایین تر از فشار بحرانی بدون توجه به دما، گاز طبیعی رفتاری مطابق گاز ایده‌آل از خود نشان می‌دهد و توان آیزنتروپیک از رابطه $k = \frac{C_p}{C_v}$ به دست می‌آید.

با کم شدن دما در فشار ثابت، چگالی گاز و نیروهای ربایش بین مولکولها زیاد شده و رفتار ماده از گاز ایده‌آل انحراف پیدا می‌کند. از روی معادله حالت نیز می‌توان دریافت که با کم شدن دما، مقدار عددی $\left(\frac{\partial P}{\partial v_m}\right)_T$ کاهش و با دقت در رابطه ی (۳-۶۰)، در نتیجه مقدار K افزایش می‌یابد.

مشاهده می شود که این خاصیت در دمای ثابت با افزایش فشار، سیر صعودی داشته و در فشار ثابت با افزایش دما کاهش پیدا می کند.

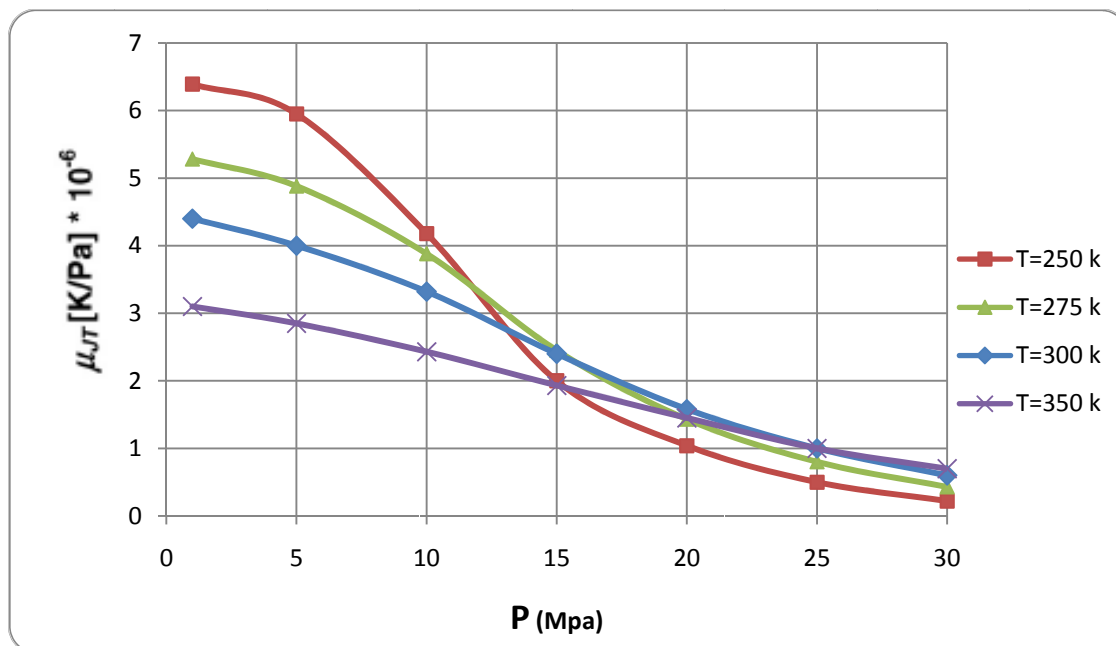
۷-۳-۴- محاسبه ضریب ژول - تامسون

برای محدوده دمایی ۲۵۰ تا ۳۵۰ کلوین و محدوده فشاری ۱ تا ۳۰ مگاپاسکال به کمک نرم افزار طراحی اریفیس به محاسبه خاصیت ژول - تامسون گاز طبیعی به منظور بررسی نحوه تغییرات آن با دما و فشار پرداخته ایم. مقادیر به دست آمده از نرم افزار طراحی در جدول (۷-۸) آمده است.

نمودار (۷-۷) نشان می دهد که با افزایش فشار مقدار ضریب ژول - تامسون کاهش می یابد و همچنین در فشار ثابت با افزایش دما این ضریب کاهش می یابد.

جدول ۷-۸: مقادیر ضریب ژول - تامسون گاز طبیعی پالایشگاه خانگیران برای دما و فشارهای مختلف

P \ T	μ_{JT} (k/Mpa)			
	T= ۲۵۰ k	T= ۲۷۵ k	T= ۳۰۰ k	T= ۳۵۰ k
P=۱ MPa	۶.۳۹	۵.۲۸	۴.۴۰	۳.۱۰
P=۵ MPa	۵.۹۵	۴.۸۸	۴.۰۰	۲.۸۵
P=۱۰ MPa	۴.۱۸	۳.۸۸	۳.۳۲	۲.۴۳
P=۱۵ MPa	۲.۰۰	۲.۴۵	۲.۴۰	۱.۹۳
P=۲۰ MPa	۱.۰۴	۱.۴۳	۱.۵۸	۱.۴۵
P=۲۵ MPa	۰.۵۰	۰.۸۰	۱.۰۰	۱.۰۰
P=۳۰ MPa	۰.۲۲	۰.۴۳	۰.۶۰	۰.۷۰



نمودار ۷-۷ : تغییرات مقادیر ضریب ژول - تامسون گاز طبیعی پالایشگاه خانگیران برحسب دما و فشار

۷-۴- معترسازی نتایج نرم افزار طراحی اریفیس

برای اطمینان از صحت نتایج نرم افزار طراحی شده برای محاسبات اریفیس باید نتایج به دست آمده را با نتایج حاصل از کار تجربی و کارهای عددی مشابه که به روشهای دیگری انجام شده اند مقایسه کرد.

۷-۴-۱- معترسازی با نتایج عددی

ایوان ماریک در مراجع [۳۲] و [۳۷] با دو ترکیب متفاوت برای گاز طبیعی از حل معادله حالت AGA ۸/۱۹۹۲ که بر پایه خاصیت فوگاسیته سیال استوار می باشد، استفاده کرده و به ترتیب در مراجع مذکور خواص توان آیزنتروپیک و ضریب ژول - تامسون را محاسبه کرده است.

مرجع [۳۲] با مخلوط گاز طبیعی با ترکیبات $X_{CH_4} = 0.8$ و $X_{C_2H_6} = 0.15$ و $X_{C_3H_8} = 0.05$ برای محاسبه خاصیت توان آیزنتروپیک پرداخته است. ما نیز با همان ترکیب برای مخلوط گاز و توسط نرم افزار

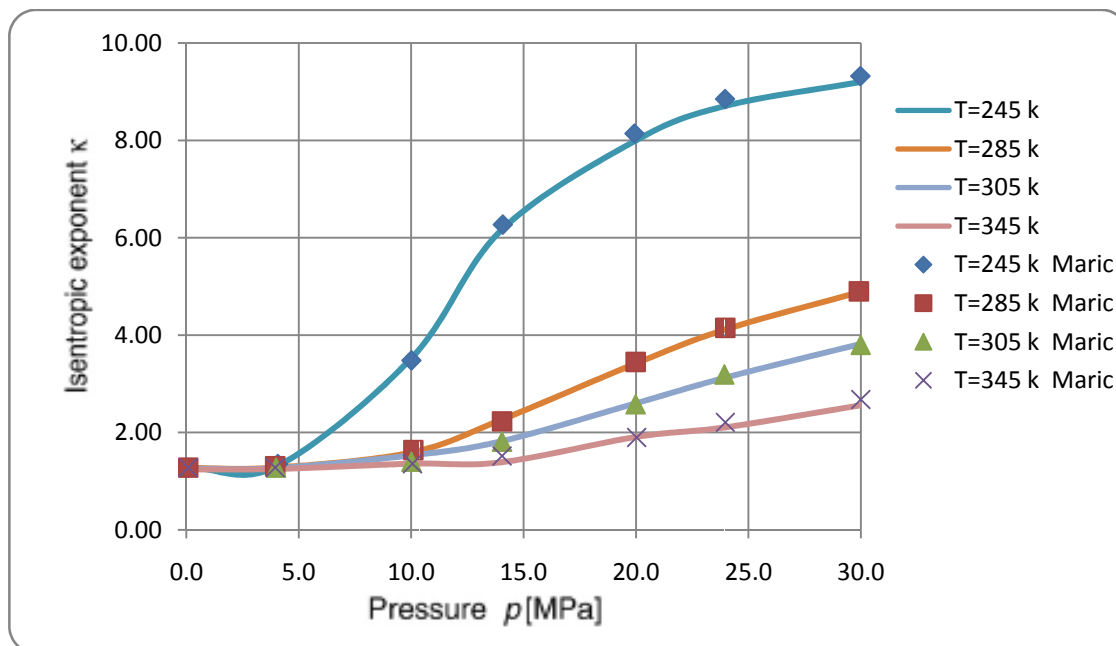
طراحی اریفیس خاصیت توان آیزنتروپیک، K ، را حساب کرده و برای مقایسه نتایج، آنها را در یک نمودار رسم کرده‌ایم.

جدول ۷-۹: نتایج توان آیزنتروپیک به دست آمده توسط مرجع [۳۲]

	K Maric			
	T= k	T= k	T= k	T= k
P= Mpa	۱.۲۸	۱.۲۸	۱.۲۸	۱.۲۸
P= Mpa	۱.۳۴	۱.۳۳	۱.۲۸	۱.۲۸
P= Mpa	۳.۴۵	۱.۶۸	۱.۴۰	۱.۳۶
P= Mpa	۶.۳۰	۲.۲۰	۱.۸۱	۱.۵۲
P= Mpa	۸.۲۴	۳.۵۲	۲.۵۸	۱.۹۰
P= Mpa	۸.۹۰	۴.۲۲	۳.۱۹	۲.۲۱
P= Mpa	۹.۲۹	۴.۹۹	۳.۸۰	۲.۶۸

جدول ۷-۱۰: نتایج توان آیزنتروپیک به دست آمده توسط نرم‌افزار طراحی اریفیس

	K Calculate			
	T= k	T= k	T= k	T= k
P= Mpa	۱.۲۸	۱.۲۷	۱.۲۶	۱.۲۴
P= Mpa	۱.۳۰	۱.۲۸	۱.۲۷	۱.۲۵
P= Mpa	۳.۵۲	۱.۵۹	۱.۵۳	۱.۳۶
P= Mpa	۶.۱۵	۲.۲۶	۱.۸۲	۱.۳۹
P= Mpa	۸.۰۰	۳.۴۲	۲.۶۰	۱.۹۱
P= Mpa	۸.۷۱	۴.۱۲	۳.۱۳	۲.۱۱
P= Mpa	۹.۲۰	۴.۸۹	۳.۸۲	۲.۵۶



نمودار ۷-۸ : مقایسه مقادیر توان آیزنتروپیک بین نتایج نرم افزار طراحی و نتایج مرجع [۳۲]

جدول ۷-۱۱ : اختلاف بین نتایج نرم افزار طراحی اریفیس و نتایج مرجع [۳۲]

	$K_{Maric} - K_{Calculate}$			
	T= k	T= k	T= k	T= k
P= . Mpa	۰.۰۰	۰.۰۱	۰.۰۲	۰.۰۴
P= Mpa	۰.۰۴	۰.۰۵	۰.۰۱	۰.۰۳
P= Mpa	-۰.۰۷	۰.۰۹	-۰.۱۳	۰.۰۰
P= Mpa	۰.۱۵	-۰.۰۶	-۰.۰۱	۰.۱۳
P= Mpa	۰.۲۴	۰.۱۰	-۰.۰۲	-۰.۰۱
P= Mpa	۰.۱۹	۰.۱۰	۰.۰۶	۰.۱۰
P= Mpa	۰.۰۹	۰.۱۰	-۰.۰۲	۰.۱۲

همانطور که از جدول (۷-۱۱) پیداست تطابق خوبی بین نتایج برقرار است و حداکثر اختلاف بین نتایج

نرم افزار طراحی اریفیس و مرجع [۳۲] برابر ۰.۲۴ و معادل ۲.۹ درصد خطا و برای دمای ۲۴۵ کلوین و

فشار ۲۰ مگاپاسکال می باشد.

مرجع [۳۷] با مخلوط گاز طبیعی با ترکیبات $X_{CH_4} = 0.859$ و $X_{C_2H_6} = 0.085$ و $X_{C_3H_8} = 0.023$ و $X_{CO_2} = 0.015$ و $X_{N_2} = 0.01$ و $X_{i-butane} = 0.0035$ و $X_{n-butane} = 0.0035$ و $X_{i-pentane} = 0.0005$ و $X_{n-pentane} = 0.0005$ برای محاسبه ضریب ژول - تامسون پرداخته است. ما نیز با همان ترکیب برای مخلوط گاز و توسط نرم افزار طراحی اریفیس ضریب ژول - تامسون، μ_{JT} ، را حساب کرده و برای مقایسه نتایج، آنها را در یک نمودار رسم کرده ایم.

جدول ۷-۱۲: نتایج ضریب ژول - تامسون به دست آمده توسط مرجع [۳۷]

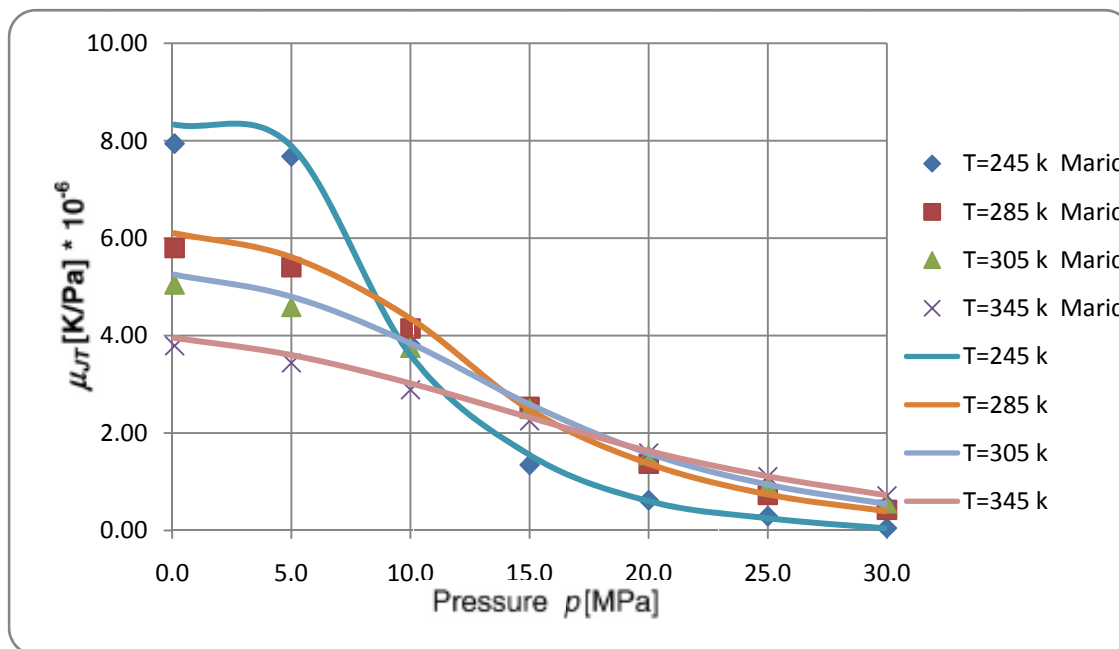
	$\mu_{JT \text{ Maric}} \text{ (k/Mpa)}$			
	T= k	T= k	T= k	T= k
P= Mpa	۷.۹۴	۵.۸۰	۵.۰۵	۳.۷۹
P= Mpa	۷.۶۸	۵.۴۰	۴.۵۹	۳.۴۴
P= Mpa	۳.۸۲	۴.۱۵	۳.۷۵	۲.۸۹
P= Mpa	۱.۳۵	۲.۵۴	۲.۴۹	۲.۲۵
P= Mpa	۰.۶۲	۱.۳۷	۱.۵۵	۱.۵۹
P= Mpa	۰.۲۹	۰.۷۳	۰.۹۱	۱.۱۱
P= Mpa	۰.۰۵	۰.۴۲	۰.۵۶	۰.۷۱

جدول ۷-۱۳: نتایج ضریب ژول - تامسون به دست آمده توسط نرم افزار طراحی اریفیس

	$\mu_{JT \text{ Calculate}} \text{ (k/Mpa)}$			
	T= k	T= k	T= k	T= k
P= Mpa	۸.۳۳	۶.۱۰	۵.۲۵	۳.۹۵
P= Mpa	۷.۸۹	۵.۶۱	۴.۸۰	۳.۶۰
P= Mpa	۳.۶۰	۴.۳۵	۳.۸۴	۳.۰۲
P= Mpa	۱.۵۵	۲.۴۸	۲.۵۹	۲.۳۲
P= Mpa	۰.۶۰	۱.۳۷	۱.۵۸	۱.۶۳
P= Mpa	۰.۲۵	۰.۷۴	۰.۹۴	۱.۱۱
P= Mpa	۰.۰۴	۰.۳۹	۰.۵۴	۰.۷۲

جدول ۷-۱۴ : اختلاف بین نتایج نرم افزار طراحی اریفیس و نتایج مرجع [۳۷]

	$(\mu_{JT}^{Maric} - \mu_{JT}^{Calculate}) \text{ (k/Mpa)}$			
	T= k	T= k	T= k	T= k
P= Mpa	-۰.۳۹	-۰.۳۰	-۰.۲۰	-۰.۱۶
P= Mpa	-۰.۲۱	-۰.۲۱	-۰.۲۱	-۰.۱۶
P= Mpa	۰.۲۲	-۰.۲۰	-۰.۰۹	-۰.۱۳
P= Mpa	-۰.۲۰	۰.۰۶	-۰.۱۰	-۰.۰۷
P= Mpa	۰.۰۲	۰.۰۰	-۰.۰۳	-۰.۰۴
P= Mpa	۰.۰۴	-۰.۰۱	-۰.۰۳	۰.۰۰
P= Mpa	۰.۰۱	۰.۰۳	۰.۰۲	-۰.۰۱



نمودار ۷-۹ : مقایسه مقادیر ضریب ژول - تامسون بین نتایج نرم افزار طراحی و نتایج مرجع [۳۷]

با مشاهده جدول (۷-۱۴) مشخص می‌شود که حداکثر اختلاف بین مقادیر به دست آمده توسط مرجع [۳۷] و نتایج نرم‌افزار طراحی ۰.۳۹ معادل ۳.۱ درصد خطا و مربوط به دمای ۲۴۵ کلوین و فشار ۰.۱ مگاپاسکال می‌باشد. به طور کلی نتایج جداول (۷-۱۲) و (۷-۱۳) نزدیک به یکدیگر بوده و صحت نتایج خروجی نرم‌افزار را می‌رساند.

۷-۴-۲- معتبر سازی با نتایج آزمایشگاهی

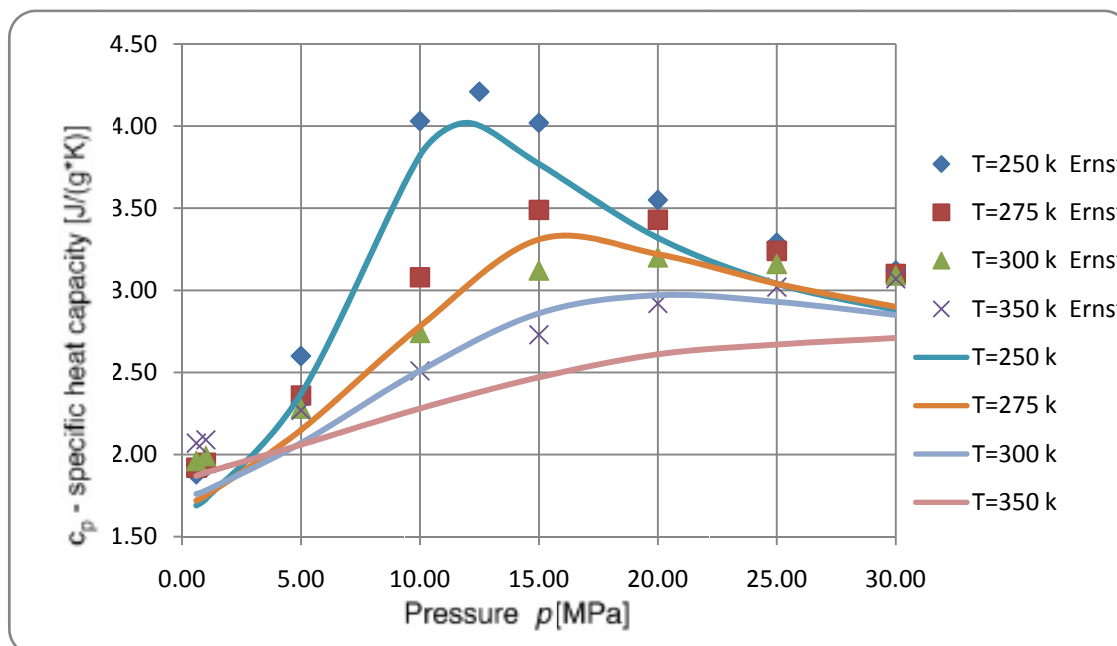
در مرجع [۳۸]، ارنست و همکاران برای محاسبه مقدار آنتالپی اقدام به اندازه‌گیری آزمایشگاهی ظرفیت حرارتی فشار ثابت C_p و ضریب ژول-تامسون μ_{JT} کرده‌اند. آنها از یگ گاز با ترکیبات $X_{CH_4} = 0.79942$ و $X_{C_2H_6} = 0.05029$ و $X_{C_2H_8} = 0.030$ و $X_{CO_2} = 0.02090$ و $X_{N_2} = 0.09939$ سود برده‌اند. ما نیز برای اعتبارسنجی نرم‌افزار طراحی اریفیس، نتایج خود را با نتایج آنها مقایسه می‌کنیم. ابتدا نتایج مربوط به ظرفیت حرارتی فشار ثابت را مورد مقایسه و اعتبارسنجی قرار می‌دهیم.

جدول ۷-۱۵: نتایج ظرفیت حرارتی فشار ثابت به دست آمده توسط آزمایشات مرجع [۳۸]

	$C_p \text{ Ernst [kJ/(kg.k)]}$			
	T= k	T= k	T= k	T= k
P= Mpa	۱.۸۸	۱.۹۲	۱.۹۶	۲.۰۷
P= Mpa	۱.۹۲	۱.۹۵	۱.۹۹	۲.۰۹
P= Mpa	۲.۶۰	۲.۳۶	۲.۲۸	۲.۲۷
P= Mpa	۴.۰۳	۳.۰۸	۲.۷۴	۲.۵۱
P= Mpa	۴.۰۲	۳.۴۹	۳.۱۲	۲.۷۳
P= Mpa	۳.۵۵	۳.۴۳	۳.۲۰	۲.۹۲
P= Mpa	۳.۲۹	۳.۲۴	۳.۱۶	۳.۰۲
P= Mpa	۳.۱۲	۳.۱۰	۳.۰۹	۳.۰۷

جدول ۷-۱۶ : نتایج ظرفیت حرارتی فشار ثابت به دست آمده توسط نرم افزار طراحی اریفیس

	C_p Calculate [kJ/(kg.k)]			
	T= k	T= k	T= k	T= k
P= Mpa	۱.۶۹	۱.۷۲	۱.۷۶	۱.۸۷
P= Mpa	۱.۷۳	۱.۷۵	۱.۷۸	۱.۸۹
P= Mpa	۲.۳۷	۲.۱۵	۲.۰۷	۲.۰۶
P= Mpa	۳.۸۲	۲.۵۸	۲.۵۱	۲.۲۸
P= Mpa	۳.۷۷	۳.۳۱	۲.۸۶	۲.۴۷
P= Mpa	۳.۳۲	۳.۲۲	۲.۹۷	۲.۶۱
P= Mpa	۳.۰۴	۳.۰۴	۲.۹۳	۲.۶۷
P= Mpa	۲.۸۸	۲.۹۰	۲.۸۵	۲.۷۱



نمودار ۷-۱۰ : مقایسه مقادیر ظرفیت حرارتی فشار ثابت بین نتایج نرم افزار طراحی و نتایج مرجع [۳۸]

جدول ۷-۱۷: اختلاف بین نتایج نرم افزار طراحی اریفیس و نتایج مرجع [۳۸]

	$(C_p \text{ Ernst} - C_p \text{ Calculate}) \quad [\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{k})]$			
	T= k	T= k	T= k	T= k
P= Mpa	۰.۱۹	۰.۲۰	۰.۲۰	۰.۲۰
P= Mpa	۰.۱۹	۰.۲۰	۰.۲۱	۰.۲۰
P= Mpa	۰.۲۳	۰.۲۱	۰.۲۱	۰.۲۱
P= Mpa	۰.۲۱	۰.۳۰	۰.۲۳	۰.۲۳
P= Mpa	۰.۲۵	۰.۱۸	۰.۲۶	۰.۲۶
P= Mpa	۰.۲۳	۰.۲۱	۰.۲۳	۰.۳۱
P= Mpa	۰.۲۵	۰.۲۰	۰.۲۳	۰.۳۵
P= Mpa	۰.۲۴	۰.۲۰	۰.۲۴	۰.۳۶

حداکثر اختلاف بین مقادیر حاصل از نرم افزار طراحی اریفیس و مقادیر آزمایشات مرجع [۳۸] در دمای ۳۵۰ کلوین و فشار ۳۰ مگاپاسکال ، $۰.۳۶ \text{ [j}/(\text{gr}\cdot\text{k})]$ می باشد که نشان دهنده تطابق مناسب بین نتایج عددی و آزمایشگاهی بوده و اعتبار نتایج نرم افزار طراحی اریفیس را به اثبات می رساند. متوسط خطای بین نتایج حدود ۷ درصد می باشد.

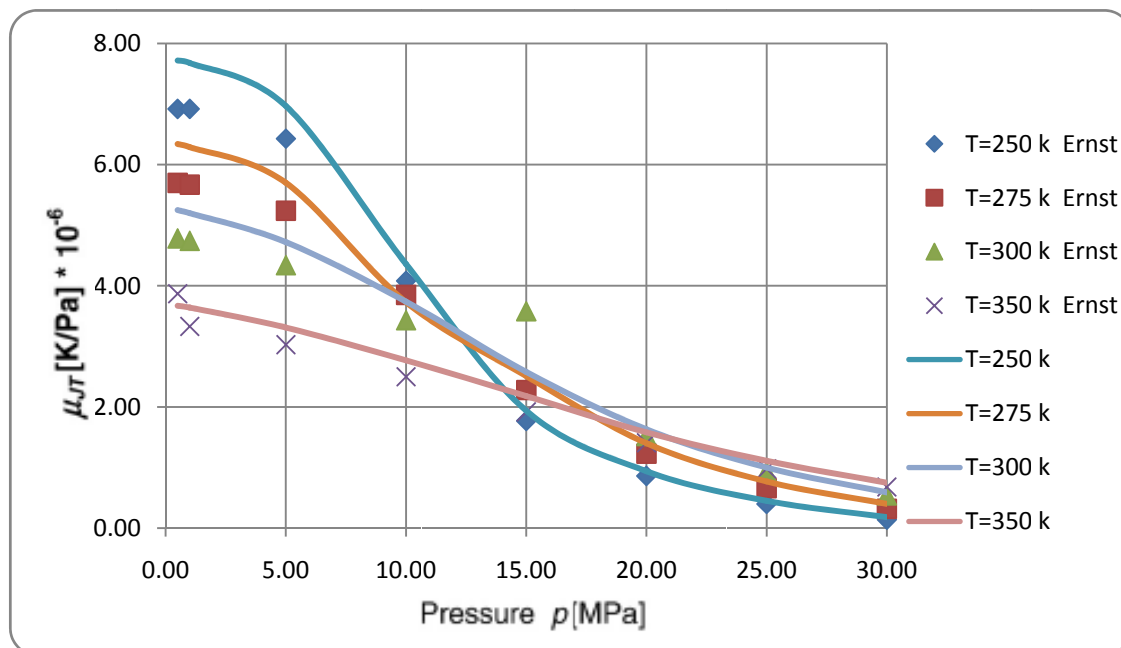
جدول ۷-۱۸: نتایج ضریب ژول - تامسون به دست آمده توسط آزمایشات مرجع [۳۸]

	$\mu_{JT} \text{ Ernst} \quad (\text{k}/\text{Mpa})$			
	T= k	T= k	T= k	T= k
P= Mpa	۶.۹۲	۵.۷۰	۴.۷۸	۳.۸۷
P= Mpa	۶.۹۲	۵.۶۷	۴.۷۴	۳.۳۳
P= Mpa	۶.۴۳	۵.۲۴	۴.۳۴	۳.۰۳
P= Mpa	۴.۰۸	۳.۸۵	۳.۴۳	۲.۵۰
P= Mpa	۱.۷۷	۲.۲۸	۳.۵۸	۱.۹۲
P= Mpa	۰.۸۶	۱.۲۳	۱.۵۲	۱.۴۱
P= Mpa	۰.۴۰	۰.۶۶	۰.۹۳	۰.۹۸
P= Mpa	۰.۱۴	۰.۳۲	۰.۵۴	۰.۶۸

در این قسمت با توجه جداول (۷-۱۸) و (۷-۱۹) به مقایسه نتایج نرم افزار طراحی اریفیس برای پیش بینی ضریب ژول- تامسون در محدوده دمایی ۲۵۰ تا ۳۵۰ کلوین و محدوده فشاری ۰.۵ تا ۳۰ مگاپاسکال با نتایج آزمایشگاهی می پردازیم.

جدول ۷-۱۹: نتایج ضریب ژول - تامسون به دست آمده توسط نرم افزار طراحی اریفیس

	μ_{JT} Calculate (k/Mpa)			
	T= k	T= k	T= k	T= k
P= Mpa	۷.۷۲	۶.۳۴	۵.۲۵	۳.۶۷
P= Mpa	۷.۶۸	۶.۲۹	۵.۲	۳.۶۴
P= Mpa	۶.۹۷	۵.۷۰	۴.۷۲	۳.۳۱
P= Mpa	۴.۳۶	۳.۷۳	۳.۷۴	۲.۷۷
P= Mpa	۱.۹۴	۲.۵۱	۲.۵۸	۲.۱۸
P= Mpa	۰.۹۴	۱.۴۰	۱.۶۳	۱.۵۸
P= Mpa	۰.۴۵	۰.۷۷	۱.۰۰	۱.۱۱
P= Mpa	۰.۱۸	۰.۴۰	۰.۵۹	۰.۷۵



نمودار ۷-۱۱: مقایسه مقادیر ضریب ژول - تامسون بین نتایج نرم افزار طراحی و نتایج مرجع [۳۸]

جدول ۷-۲۰: اختلاف بین نتایج نرم افزار طراحی اریفیس و نتایج مرجع [۳۸]

	$(\mu_{JT \text{ Ernst}} - \mu_{JT \text{ Calculate}}) \text{ (k/Mpa)}$			
	T= k	T= k	T= k	T= k
P= Mpa	-۰.۸۰	-۰.۶۴	-۰.۴۷	۰.۲۰
P= Mpa	-۰.۷۶	-۰.۶۲	-۰.۴۶	-۰.۳۱
P= Mpa	-۰.۵۴	-۰.۴۶	-۰.۳۸	-۰.۲۸
P= Mpa	-۰.۲۸	۰.۱۲	-۰.۳۱	-۰.۲۷
P= Mpa	-۰.۱۷	-۰.۲۳	۱.۰۰	-۰.۲۶
P= Mpa	-۰.۰۸	-۰.۱۷	-۰.۱۱	-۰.۱۷
P= Mpa	-۰.۰۵	-۰.۱۱	-۰.۰۷	-۰.۱۳
P= Mpa	-۰.۰۴	-۰.۰۸	-۰.۰۵	-۰.۰۷

نتایج به دست آمده از نرم افزار طراحی اریفیس و آزمایشات ارنست برای ضریب ژول - تامسون به نظر همخوانی خوبی با یکدیگر دارند و این نیز می تواند دلیلی دیگر بر اعتبار روش ۸ AGA برای پیش بینی خواص گاز طبیعی باشد. از جدول (۷-۲۰) نیز مشخص است که حداکثر اختلاف محاسبات ما نسبت به نتایج تجربی مرجع [۳۸] (k/Mpa) ۰.۸ و برای دمای ۲۵۰ کلوین و فشار ۰.۵ مگاپاسکال می باشد و با افزایش دما و فشار این اختلاف کم شده تا در ۳۵۰ کلوین و فشار ۳۰ مگاپاسکال به (k/Mpa) ۰.۰۷ می رسد.

۷-۵- نتایج آزمایشگاهی با گاز طبیعی شهر شاهرود

پس از اینکه از مقایسه نتایج نرم افزار طراحی اریفیس با نتایج تجربی و عددی دیگران، از صحت آنها مطمئن شدیم آنگاه یک سری آزمایشات تجربی بوسیله دستگاه لوله گردبادی با طول لوله گرم ۲۵۰ میلیمتر و قطر نازل ورودی جریان ۸ میلیمتر، برای گاز طبیعی شهر شاهرود به منظور محاسبه نرخ جرمی جریان عبوری از دستگاه و در محل یکی از ایستگاههای تقلیل فشار شهر انجام دادیم. بدین ترتیب که با کنترل فشار خط گاز بر روی عدد ۶ barg و با بستن تدریجی شیر خروجی جریان گرم در ۵ مرحله فشار

و دمای خروجی گرم و در نتیجه فشار و دمای خروجی سرد را تغییر می‌دادیم. اعداد مربوط به دما و فشار هر نقطه و اختلاف فشار مربوط به دو طرف اریفیس‌های جریان سرد و گرم با اتصالات نوع فلنج که بوسیله سنسورهای مربوطه اندازه‌گیری می‌شدند، توسط برنامه ۸۰۰ ACM به صورت داده های ۱۰۰ تایی در جداول Excel ذخیره می‌شدند.

هنگامی که در هر مرحله مقداری از شیر خروجی گرم را می‌بستیم، مدت زمانی را برای پایدار شدن جریان و از بین رفتن اثرات اغتشاش ایجاد شده به خاطر بسته شدن شیر، در نظر گرفته و پس از آن دو بار اقدام به ذخیره اطلاعات (۲۰۰ داده برای هر مرحله بستن شیر) می‌کردیم. این مدت زمان از روی زمان ثابت شدن اعداد نمایش داده شده در نمایشگر دیجیتال قابل استناد بود. سپس در پایان آزمایش برای وارد کردن مقادیر دما و فشار اختلاف فشار به عنوان ورودی در نرم‌افزار طراحی اریفیس جهت تخمین نرخ جرمی جریان، از این ۲۰۰ داده متوسط گیری کرده و عدد متوسط را وارد می‌کنیم. در زیر یک نمونه از داده‌های ۱۰۰ تایی را برای مرحله اول آزمایش که شیر کاملاً باز می‌باشد، آورده‌ایم.

جدول ۷-۲۱: یک نمونه نتایج اندازه‌گیری شده در آزمایشات انجام گرفته در ایستگاه تقلیل فشار شاهرود

T in (C)	T cold (C)	T hot (C)	P hot (Barg)	P in (Barg)	DP cold (Pa)	DP hot (Pa)
۳۱.۳	۲۸.۱	۳۴.۲	۱.۶۶	۶.۰۱	۱۴۰	۱۳۹
۳۱.۳	۲۷.۸	۳۴.۱	۱.۶۶	۶.۰۲	۱۴۰	۱۳۹
۳۱.۲	۲۸.۴	۳۴.۱	۱.۶۴	۶.۰۱	۱۴۰	۱۳۹
۳۱.۳	۲۸.۱	۳۳.۹	۱.۶۶	۶.۰۵	۱۴۰	۱۳۹
۳۱.۳	۲۸.۳	۳۳.۸	۱.۶۵	۶.۰۲	۱۴۰	۱۳۹
۳۱.۱	۲۸.۳	۳۴.۱	۱.۶۵	۵.۹۸	۱۴۳	۵۳
۳۱.۴	۲۸.۴	۳۳.۸	۱.۶۴	۵.۹۷	۱۴۳	۵۳
۳۱.۲	۲۸.۶	۳۴.۲	۱.۶۳	۶.۰۳	۱۴۳	۵۳
۳۱.۱	۲۸.۴	۳۴.۱	۱.۶۴	۵.۹۷	۱۴۳	۵۳
۳۰.۳	۲۷.۴	۳۳.۵	۱.۶	۵.۸۲	۹۷	۵۰
۳۰.۲	۲۷.۳	۳۳.۶	۱.۶	۵.۸۲	۹۷	۵۰

فصل هفتم : نتایج آزمایشگاهی و نتایج عددی نرم افزار طراحی اریفیس و معتبرسازی آنها با نتایج تجربی

ادامه جدول ۷-۲۱ : یک نمونه نتایج اندازه‌گیری شده در آزمایشات انجام گرفته در ایستگاه تقلیل فشار شاهرود

T in (C)	T cold (C)	T hot (C)	P hot (Barg)	P in (Barg)	DP cold (Pa)	DP hot (Pa)
۳۱.۱	۲۸.۳	۳۴	۱.۶۴	۵.۹۶	۱۰	۴۵
۳۱.۱	۲۷.۸	۳۴.۲	۱.۶۳	۵.۹۶	۱۰	۴۵
۳۱.۱	۲۸	۳۴.۱	۱.۶۳	۵.۹۳	۱۰	۴۵
۳۱.۲	۲۸.۴	۳۳.۹	۱.۶۳	۵.۹۳	۷۲	۱۰.۹
۳۱.۲	۲۸.۲	۳۴.۱	۱.۶۲	۵.۹۲	۷۲	۱۰.۹
۳۱	۲۸.۳	۳۳.۹	۱.۶۲	۵.۹۲	۷۲	۱۰.۹
۳۱.۱	۲۸.۱	۳۴.۱	۱.۶۲	۵.۹۳	۷۲	۱۰.۹
۳۱.۲	۲۸.۱	۳۴.۱	۱.۶۲	۵.۹۲	۷۲	۱۰.۹
۳۱.۱	۲۸.۲	۳۳.۹	۱.۶۱	۵.۹۱	۷۲	۱۰.۹
۳۱.۱	۲۸.۲	۳۴.۲	۱.۶۲	۵.۹۲	۱۱۲	۵۸
۳۱.۱	۲۸.۲	۳۴.۲	۱.۶۲	۵.۹۲	۱۱۲	۵۸
۳۱.۱	۲۸.۲	۳۳.۸	۱.۶۲	۵.۹۰	۱۱۲	۵۸
۳۱.۱	۲۸.۲	۳۳.۷	۱.۶۱	۵.۹۱	۱۱۲	۵۸
۳۱.۱	۲۷.۹	۳۴.۱	۱.۶۱	۵.۸۹	۱۱۲	۵۸
۳۱.۱	۲۸.۲	۳۳.۹	۱.۶۱	۵.۸۹	۵۲	۹۲
۳۰.۹	۲۸	۳۳.۸	۱.۶۱	۵.۸۷	۵۲	۹۲
۳۰.۹	۲۷.۹	۳۳.۹	۱.۶۱	۵.۸۷	۵۲	۹۲
۳۰.۹	۲۷.۹	۳۳.۸	۱.۶	۵.۸۷	۵۲	۹۲
۳۱	۲۸	۳۳.۸	۱.۶	۵.۸۷	۵۲	۹۲
۳۰.۹	۲۸.۱	۳۴.۳	۱.۶۱	۵.۸۶	۵۲	۹۲
۳۰.۸	۲۷.۷	۳۳.۹	۱.۶۱	۵.۸۶	۹۲	۴۱
۳۰.۹	۲۷.۹	۳۳.۷	۱.۶	۵.۸۵	۹۲	۴۱
۳۰.۹	۲۸.۱	۳۳.۶	۱.۶	۵.۸۶	۹۲	۴۱
۳۰.۸	۲۷.۸	۳۳.۸	۱.۶	۵.۸۶	۹۲	۴۱
۳۰.۷	۲۷.۸	۳۴	۱.۶	۵.۸۵	۹۲	۴۱
۳۰.۷	۲۸.۱	۳۴	۱.۶	۵.۸۶	۹۲	۴۱
۳۰.۸	۲۷.۹	۳۳.۸	۱.۶	۵.۸۶	۹۲	۴۱
۳۰.۷	۲۷.۷	۳۳.۹	۱.۶	۵.۸۵	۶۲	۹۵
۳۰.۷	۲۷.۸	۳۴	۱.۶	۵.۸۵	۶۲	۹۵
۳۰.۶	۲۷.۶	۳۳.۹	۱.۵۹	۵.۸۵	۶۲	۹۵
۳۰.۷	۲۷.۷	۳۳.۷	۱.۵۹	۵.۸۴	۶۲	۹۵
۳۰.۷	۲۷.۸	۳۳.۶	۱.۶	۵.۸۴	۶۲	۹۵
۳۰.۵	۲۷.۷	۳۳.۷	۱.۶	۵.۸۵	۶۳	۱۴۸
۳۰.۶	۲۷.۸	۳۳.۹	۱.۶	۵.۸۴	۶۳	۱۴۸
۳۰.۷	۲۷.۵	۳۳.۶	۱.۶	۵.۸۴	۶۳	۱۴۸
۳۰.۶	۲۷.۹	۳۳.۷	۱.۶	۵.۸۴	۶۳	۱۴۸
۳۰.۵	۲۷.۷	۳۳.۸	۱.۵۹	۵.۸۲	۶۳	۱۴۸
۳۰.۷	۲۷.۶	۳۳.۶	۱.۵۹	۵.۸۴	۷۴	۸۸

فصل هفتم: نتایج آزمایشگاهی و نتایج عددی نرم افزار طراحی اریفیس و معتبرسازی آنها با نتایج تجربی

ادامه جدول ۷-۲۱: یک نمونه نتایج اندازه‌گیری شده در آزمایشات انجام گرفته در ایستگاه تقلیل فشار شاهرود

T in (C)	T cold (C)	T hot (C)	P hot (Barg)	P in (Barg)	DP cold (Pa)	DP hot (Pa)
۳۰.۵	۲۷.۶	۳۳.۷	۱.۵۹	۵.۸۲	۶۶	۲۸
۳۰.۶	۲۷.۷	۳۳.۶	۱.۶	۵.۸۴	۶۶	۲۸
۳۰.۵	۲۷.۶	۳۳.۷	۱.۶	۵.۸۲	۶۶	۲۸
۳۰.۵	۲۷.۶	۳۳.۸	۱.۵۹	۵.۸۴	۶۶	۲۸
۳۰.۵	۲۷.۵	۳۳.۸	۱.۶	۵.۸۲	۶۶	۲۸
۳۰.۳	۲۷.۵	۳۳.۶	۱.۶	۵.۸۲	۶۶	۲۸
۳۰.۴	۲۷.۵	۳۳.۶	۱.۶	۵.۸۲	۶۶	۲۸
۳۰.۴	۲۷.۵	۳۳.۶	۱.۵۹	۵.۸۲	۲۶	۳۰
۳۰.۵	۲۷.۵	۳۳.۷	۱.۵۹	۵.۸۴	۲۶	۳۰
۳۰.۳	۲۷.۶	۳۳.۹	۱.۶۰	۵.۸۲	۲۶	۳۰
۳۰.۵	۲۷.۵	۳۳.۶	۱.۶۰	۵.۸۲	۲۶	۳۰
۳۰.۴	۲۷.۵	۳۳.۷	۱.۵۹	۵.۸۴	۲۶	۳۰
۳۰.۴	۲۷.۲	۳۳.۸	۱.۵۹	۵.۸۴	۲۶	۳۰
۳۰.۴	۲۷.۴	۳۳.۷	۱.۶۰	۵.۸۲	۹	۷۰
۳۰.۳	۲۷.۴	۳۳.۵	۱.۵۸	۵.۸۲	۹	۷۰
۳۰.۳	۲۷.۲	۳۳.۴	۱.۵۹	۵.۸۲	۹	۷۰
۳۰.۲	۲۷.۷	۳۳.۸	۱.۵۹	۵.۸۲	۹	۷۰
۳۰.۳	۲۷.۶	۳۳.۴	۱.۵۹	۵.۸۲	۹۷	۵۰

نتایج متوسط‌گیری برای تمام مراحل بسته شدن شیر انجام شده و در جدول (۷-۲۲) نتایج آورده شده

است.

جدول ۷-۲۲: نتایج متوسط‌گیری برای پارامترهای اندازه‌گیری شده

T in (C)	T cold (C)	T hot (C)	P hot (Barg)	P in (Barg)	DP cold (Pa)	DP hot (Pa)
۳۰.۳	۲۷.۳	۳۳.۴	۱.۶۰	۵.۸۶	۶۷	۵۶
۲۹.۲	۲۶.۱	۳۲.۵	۱.۶۲	۵.۹۱	۶۰	۵۹
۲۸.۹	۲۵.۸	۳۱.۹	۱.۶۵	۵.۹۲	۶۸	۵۰
۲۸.۹	۲۶.۳	۳۲.۰	۲.۰۳	۵.۹۲	۸۹	۳۵
۲۸.۷	۲۷.۷	۳۲.۶	۳.۱۷	۵.۹۲	۲۲۳	۳

فصل هفتم: نتایج آزمایشگاهی و نتایج عددی نرم افزار طراحی اریفیس و معتبرسازی آنها با نتایج تجربی

فشار خروجی جریان سرد در طول آزمایش در حدود ۰.۱ barg ثابت می ماند. برای نقاط به دست آمده از آزمایش پس از متوسط گیری، نرخ جرمی جریان های خروجی سرد و گرم را محاسبه می کنیم و نتایج در جدول (۷-۲۳) ذکر شده است.

جدول ۷-۲۳: مقایسه نتایج نرخ جرمی جریان توسط سه نرم افزار طراحی اریفیس، Flow Orifice و Meter Calc

	T in (C)	P* in (Bara)	DP (pa)	m dot Calculate (kg/s)	m dot Flow Orifice (kg/s)	m dot Meter Calc (kg/s)	
۱	جریان های سرد	۲۶.۱	۱.۱۰	۶۰	۰.۰۰۲۹۴	۰.۰۰۳۰۰	۰.۰۰۲۹۰
۲		۲۷.۳	۱.۱۰	۶۷	۰.۰۰۳۰۹	۰.۰۰۳۰۰	۰.۰۰۳۰۶
۳		۲۵.۸	۱.۱۰	۶۸	۰.۰۰۳۱۳	۰.۰۰۳۰۰	۰.۰۰۳۰۹
۴		۲۶.۳	۱.۱۰	۸۹	۰.۰۰۳۵۶	۰.۰۰۴۰۰	۰.۰۰۳۵۲
۵		۲۷.۷	۱.۱۰	۲۲۳	۰.۰۰۵۵۹	۰.۰۰۶۰۰	۰.۰۰۵۵۲
۶	جریان های گرم	۳۲.۵	۲.۶۲	۵۹	۰.۰۰۴۴۳	۰.۰۰۴۰۰	۰.۰۰۴۳۷
۷		۳۳.۴	۲.۶۴	۵۶	۰.۰۰۴۲۹	۰.۰۰۴۰۰	۰.۰۰۴۲۴
۸		۳۱.۹	۲.۶۵	۵۰	۰.۰۰۴۱۱	۰.۰۰۴۰۰	۰.۰۰۴۰۶
۹		۳۲.۰	۳.۰۳	۳۵	۰.۰۰۳۶۸	۰.۰۰۴۰۰	۰.۰۰۳۶۳
۱۰		۳۲.۶	۴.۱۷	۱۰	۰.۰۰۲۳۳	۰.۰۰۲۰۰	۰.۰۰۲۲۹

*: فشار به صورت مطلق می باشد.

از نتایج جدول (۷-۲۳) در می یابیم که اختلاف نتایج نرم افزار طراحی با نتایج نرم افزار Meter Calc در حدود ۱.۲ درصد می باشد و نشان دهنده اعتبار نتایج نرم افزار تدوین شده برای طراحی اریفیس می باشد.

فصل هشتم

نتیجه‌گیری و ارائه پیشنهادات

۸-۱- جمع‌بندی

از آنجا که معادله حالت AGA۸ مناسبترین معادله حالت برای گاز طبیعی می‌باشد، لذا در این پروژه با کمک معادله حالت AGA۸ که اثر عناصر مختلف موجود در مخلوط گاز طبیعی با درصد مولی‌های متفاوت را در نظر می‌گیرد، به پیش‌بینی خواص ترمودینامیکی گاز طبیعی پرداخته‌ایم و با نرم افزاری که به همین منظور تدوین شده است، جداول و نمودارهای خواص مختلف گاز پالایشگاه خانگیران را رسم کرده‌ایم.

نمودار تراکم‌پذیری گاز (۷-۲)، نشان می‌دهد که در فشارهای پایین، مقدار Z افزایش یافته و این مقدار به عدد ۱ نزدیک می‌شود، که این مسأله بدلیل نزدیک شدن شرایط گاز طبیعی به گاز ایده‌آل در فشارهای پایین اتفاق می‌افتد. پایین آمدن فشار، باعث کاهش نیروهای ربایش بین ذرات I و J و همچنین کاهش تعداد برخوردهای ذرات در مخلوط گاز شده، با توجه به اینکه در مدل AGA۸ اثر این نوع برخوردها و نیروهای حاصله در نظر گرفته می‌شود، متعاقب این کاهش، افزایش Z را بدنبال خواهد داشت.

با افزایش فشار تا حدود ۱۵ مگاپاسکال به دلیل زیاد شدن سرعت برخورد ذرات، کاهش Z اتفاق می‌افتد، اما بعد از آن در دمای ثابت با افزایش فشار، Z شروع به افزایش می‌کند. زیرا با افزایش بیشتر فشار، تعداد برخوردهای بین ذره‌ای در مخلوط گاز به دلیل تراکم زیاد ذرات افزایش می‌یابد اما مقدار تأثیری که افزایش تعداد برخوردهای بین ذره‌ای بر روی مقدار Z می‌گذارند کمتر از مقدار تأثیری است که افزایش نیروهای رانش بین ذره‌ای بر روی مقدار Z اعمال می‌کنند. بنابراین از جمله نکات مهم قابل استنتاج از نمودارها وابستگی شدید مقدار ضریب تراکم‌پذیری به تغییرات فشار می‌باشد.

با بررسی نمودار توان آیزنتروپیک (۷-۵)، به روالی منطقی برای تغییرات K می‌رسیم. دما و فشار بحرانی برای گاز طبیعی حوزه خانگیران حدود ۱۹۵ کلوین و ۴٫۵ مگاپاسکال بوده و محدوده دمایی نمودارها از دمای ۲۵۰ کلوین که بالاتر از دمای بحرانی می‌باشد، شروع شده است.

از نقطه نظر فیزیکی گاز طبیعی حوزه خانگیان در فشارهای بالاتر از فشار بحرانی و در محدوده دمایی ۲۵۰ تا ۳۵۰ کلوین به صورت بخار سوپرهیت درآمده و در این حالت انحراف از رفتار گاز ایده آل زیاد می‌باشد. در فشارهای پایین تر از فشار بحرانی بدون توجه به دما، گاز طبیعی رفتاری مطابق گاز ایده‌آل از خود نشان می‌دهد و توان آیزنتروپیک از رابطه ی $k = \frac{C_p}{C_v}$ به دست می‌آید.

با کم شدن دما در فشار ثابت، چگالی گاز و نیروهای ربایش بین مولکولها زیاد شده و رفتار ماده از گاز ایده آل انحراف پیدا می‌کند. از روی معادله حالت نیز می‌توان دریافت که با کم شدن دما، مقدار عددی $\left(\frac{\partial P}{\partial v_m}\right)_T$ کاهش و با دقت در رابطه ی (۳-۶۰)، در نتیجه مقدار K افزایش می‌یابد.

با استفاده از ضریب ژول- تامسون می‌توانیم تعیین کنیم که یک گاز در اثر انبساط، افت دما یا افزایش دما دارد. گازهای کامل دارای ضریب ژول تامسون صفر می‌باشند زیرا طبق تعریف گاز کامل گازی است که نیروهای بین مولکولی آن صفر است لذا تراکم و انبساط گاز که باعث تغییر فاصله مولکولها می‌شود انرژی درونی سیستم را تغییر نمی‌دهد. بنابراین تغییرات گرمایی حاصل نمی‌شود. ولی در گازهای حقیقی این ضریب عددی است مثبت یا منفی که مثبت یا منفی بودن آن برحسب نوع گاز تابع دما و فشاری است که بر گاز اعمال می‌شود.

برای هر گاز یک نقطه معکوس وجود دارد که به دما و فشار وابسته است. زمانیکه ضریب ژول- تامسون مثبت است انبساط گاز موجب سرد شدن و تراکم گاز موجب گرم شدن آن می‌شود. زیرا مثبت بودن نشان از هم‌جهت بودن دما و فشار دارد. زمانیکه ضریب ژول تامسون منفی باشد و فشار سیال از فشار نقطه معکوس بیشتر باشد، انبساط موجب گرم شدن گاز می‌شود تا زمانی که روی خط آنتالپی ثابت به نقطه معکوس برسیم. پس از آن دمای گاز کاهش یافته تا به دمای اولیه قبل از انبساط می‌رسد و سپس دما رو به کاهش بیشتر می‌رود. زمانیکه ضریب ژول تامسون منفی باشد، تراکم گاز باعث کاهش دما می‌شود.

از نمودار ضریب ژول- تامسون (۷-۷)، به این نتیجه می‌رسیم که با افزایش فشار در دمای ثابت مقدار این خاصیت کاهش یافته و در فشار ثابت نیز با کاهش دما، افزایش می‌یابد.

طبق کار ماریک [۳۷]، اگر اختلاف فشار دو طرف اریفیس خیلی پایین باشد، اثر ضریب ژول - تامسون و تغییرات دمای سیال ناچیز است و می‌توان از آن صرف‌نظر کرد ولی در اختلاف فشارهای بالاتر و نیز دماهای پایین‌تر، این اثر بیشتر ظاهر شده و تغییرات دما قابل توجه می‌شود. بنابراین منطقی است که برای اختلاف فشارهای کمتر از ۱۰۰ Kpa، ضریب ژول- تامسون را در بالادست و پایین دست اریفیس یکسان فرض کنیم.

هدف از تعیین ضریب ژول- تامسون به دست آوردن تغییرات دمای سیال پس از فرایند انبساط ژول- تامسون است که در وسایل اندازه‌گیری نرخ جریان به کمک اختلاف فشار با آن مواجه می‌شویم. برای این امر، ابتدا از رابطه (۳-۳۸) مقدار $C_{m,p}$ و سپس از رابطه (۳-۶۹) مقدار ضریب ژول- تامسون را مشخص کرده و با داشتن مقدار اختلاف فشار پس از وسیله اندازه‌گیری (اریفیس) و استفاده از رابطه (۴-۱۰) افت فشار دائمی سیستم را محاسبه کرده و با قرار دادن در رابطه (۴-۵) تغییرات دمای سیال پس از عبور از وسیله اندازه‌گیری اختلاف فشاری معین می‌شود.

مقایسه نتایج نرم افزار طراحی اریفیس با نتایج عددی مراجع [۳۲] و [۳۷] با حداکثر خطای ۲.۹ درصد، همخوانی مناسب نتایج با یکدیگر را نشان می‌دهند. خطای متوسط نتایج، به مراتب کمتر از حداکثر خطا می‌باشد.

همچنین نتایج آزمایشگاهی مرجع [۳۸] نیز با درصد خطای قابل قبولی با نتایج نرم افزار طراحی اریفیس مطابقت دارد که نشان دهنده صحت و اعتبار روش پیش‌بینی خواص ترمودینامیکی می‌باشند. در مرحله بعد برای جریان سنج اریفیس‌متر با اتصالات فشاری نوع فلنج با گاز شهر شاهرود با فشار ۶ barg به کار آزمایشگاهی پرداختیم و دما و فشار و اختلاف فشار هر لحظه را به کمک سنسورهای مربوطه

اندازه‌گیری کرده و نتایج متوسط‌گیری را به عنوان ورودی، وارد کرده و از خروجی نرم‌افزار، نرخ جرمی جریان را دریافت می‌کنیم.

با مقایسه نتایج نرخ جرمی جریان محاسبه شده توسط نرم‌افزار طراحی اریفیس با نرم‌افزارهای دیگر در می‌یابیم که اختلاف نتایج ما با نرم افزار Meter Calc که نرم‌افزار گران‌قیمتی می‌باشد، کمتر از ۱.۲ درصد می‌باشد. که نمایانگر مورد اعتماد بودن روش محاسبه و همچنین نرم‌افزار مورد استفاده می‌باشد.

۸-۲- ارائه پیشنهادات

یکی از نکاتی که می‌توان برای تحقیقات آینده بدان اشاره کرد، مقایسه خواص ترمودینامیکی به دست آمده برای گاز طبیعی از روش AGA۸ با خواص به دست آمده با سایر معادلات حالت مناسب برای مخلوط گاز طبیعی مانند Peng- Rabinson می‌باشد و اینکه اختلاف نتایج تا چه اندازه می‌تواند بر کارکردهای مختلف، به عنوان مثال در محاسبه نرخ جرمی جریان تأثیر بگذارد. و نیز می‌توان با استفاده از روش AGA۸ به محاسبه سایر خواص ترمودینامیکی مخلوط از جمله آنتالپی، انتروپی و انرژی داخلی پرداخت.

در ایستگاه‌های تقلیل فشار درون شهری (T.B.S) که به منظور تقلیل فشار از متوسط به ضعیف و نیز در ایستگاه‌های تقلیل فشار ورودی شهری (C.G.S) که جهت تقلیل فشار از قوی به متوسط کاربرد دارند و دامنه تغییرات مصرف آنها (Rangeability) در محدوده ۳ به ۱ می‌باشد، می‌توان از اریفیس‌متر برای اندازه‌گیری حجم گاز عبوری از خط انتقال گاز استفاده کرد. همچنین اریفیس‌متر برای اندازه‌گیری حجم گاز جهت تزریق در سر چاههای نفت می‌تواند مورد کاربرد قرار بگیرد.

در نهایت این نکته باید ذکر گردد که می‌توان با توسعه نرم‌افزار، آن را برای محاسبات مربوط به گلوگاه‌های نازل‌دار و لوله و نتوری تکمیل کرد.



**Shahrood University of Technology
Faculty of Mechanical Engineering**

Title:

**Develop the designing accurate orifice software
and making an experimental prototype**

by:

Yoones Bayat

Supervisors:

**Dr. Mahmood Farzaneh Gord
Dr. Shahram Hashemi Marghzar**

January 2009

مراجع

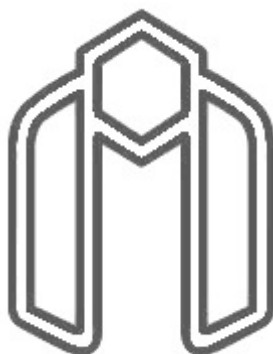
۱. Preobrazhensky V., (۱۹۸۰) " *Measurements & instrumentation in heat engineering* ", Volume I, Mir, Moscow.
۲. www.research.nigc.ir, (۱۳۸۶), " در اندازه گیری جریان گاز کدام جریان سنج را انتخاب کنیم " National Iranian Gas Company.
۳. حمید ربانی، (۱۳۸۳)، "اندازه گیری جریان سیالات " چاپ اول، آموزش و بهسازی نیروی انسانی شرکت ملی گاز ایران، صفحه ۴.
۴. نادر سلیمی، (۱۳۸۳)، "اثرات وضعیت نصب بر عملکرد دستگاههای اندازه گیری جریان"، چاپ اول آموزش و بهسازی نیروی انسانی شرکت ملی گاز ایران.
۵. Kim B. C, Pak B. C, Cho N. H, (۱۹۹۷) "Effect of cavitation and plate thickness on small diameter ratio orifice meters" *J.of Flow Measurement and Instrumentation*, vol ۸, NO ۲, pp ۸۵-۹۲.
۶. Simpson H.R,(۱۹۸۶) "Cavitation in shipboard sea water cooling system" *Cavitation and multiphase flow forum*, vol ۳۶, ASME, New York, pp ۵۴-۵۷.
۷. Kamiyama S. ,Yamasaki T. (۱۹۸۶) "Critical condition of cavitation occurrence in various liquids" *J of Fluid engineering*, vol ۱۰۸, pp ۴۲۸-۴۳۲.
۸. Oba R., Ikohagi T., Kim K.T. (۱۹۸۲) "Cavitation in an extremely limited flow through very small orifices" *j.of Fluid engineering*, vol ۱۰۴, pp ۹۴-۹۸.
۹. Stearns R.F, Johnson R.R, Jackson R.M, Larson C.A,(۱۹۵۱) "Flow Measurement with Orifice Meters", *D. Van Nostrand Co., Inc., N J.*
۱۰. Spitzer D.W,(۱۹۹۱) "Flow Measurement—practical guides for measurement and control", *Instrument Society of America, North California (USA)*, p. ۴۴۳.

١١. Puri J.S, Singh S.N, Seshadri V., Sanghi S.,(٢٠٠١)” Performance of an Adjustable Orifice Meter with Conical body”, *ISME Conference, Crescent Eng. College, pp.٤٩٠-٤٩٦.*
١٢. Puri J.S, Singh S.N, Seshadri V., Sanghi S.,(٢٠٠٠)” Feasibility of Designing an Adjustable Annular Orifice using CFD”, *٢٧th National Conference of Fluid Mechanics and Fluid Power, pp. ٢٨٦-٢٩١.*
١٣. Sondh H.S, Singh S.N, Seshadri V, Gandhi B.K , (٢٠٠٢) “Design and development of variable area orifice meter” *j. of Flow Measurement and Instrumentation* ١٣, *pp ٦٩-٧٣.*
١٤. Gopel W. , Hesse J., Zemel N, (١٩٩٤) “*Sensors—A comprehensive survey*” Mechanical Sensors, vol. ٧, VCH Publishers Inc. New York .
١٥. Gee, D., Bryzek, J. (١٩٩٥) "*New generation of disposable blood pressure transducers*",pp.٨٩-٩٤, Proceedings ٧th International Exhibition with Congress for Sensors, Transducers and Systems Sensor ٩٥, Nurnberg.
١٦. Belavič D., Soba S., Pavlin M., Ročak D. , Hrovat M. (١٩٩٨), “Silicon pressure sensors with a thick film periphery”, *Microelectronics International Vol ١٥ , No ٣, pp ٢٦-٣٠.*
١٧. Krassow H., Campabadal F., Lora-Tamayo E. (١٩٩٨)” The smart-orifice meter: a mini head meter for volume flow measurement” *j.of Flow Measurement and Instrumentation, Vol ١٠ ,pp ١٠٩-١١٥.*
١٨. Miller R.W.,(١٩٨٩)” *Flow Measurement Engineering Handbook*”, ٢nd ed. McGraw-Hill, London.

١٩. Branch J.C., (١٩٩٥) “The effects of an upstream short radius elbow and pressure tap location on orifice discharge coefficients”, *j of Flow Measurement and Instrumentation*, Vol ٦ , pp ١٥٧–١٦٢.
٢٠. Zimmermann H., (١٩٩٩) “Examination of disturbed pipe flow and its effects on flow measurement using orifice plates”, *j of Flow Measurement and Instrumentation*, Vol ١٠ , pp ٢٢٣–٢٤٠.
٢١. Laws E.M., Ouazzane A.K., (١٩٩٠) “Flow conditioner, a new development” *Flow Measurement and Instrumentation*, Vol ١ ,pp ١٦٥–١٧٠.
٢٢. Beck S.B.M, Mazille J., (٢٠٠١) “A study of a pressure differential flow meter that is insensitive to inlet conditions” *j.of Flow Measurement and Instrumentation*, Vol ١٢ , pp ٣٧٩–٣٨٤.
٢٣. Morrison Gerald L., Terracina Dwayne, Brewer Carl, Hall K.R.,(٢٠٠١) “Response of a slotted orifice flow meter to an air/water mixture” *j of Flow Measurement and Instrumentation*, vol ١٢ ,pp ١٧٥–١٨٠.
٢٤. Oliveira Jorge L. G., Passos Júlio César, Ruud Verschaeren, Cees van der Geld, (٢٠٠٨) “Mass flow rate measurements in gas–liquid flows by means of a venturi or orifice plate coupled to a void fraction sensor” *Experimental Thermal and Fluid Science*.
٢٥. Steven R.N.,(٢٠٠٢) “Wet gas metering with a horizontally mounted Venturi meter” *Flow Measurement and Instrumentation*, Vol ١٢ ,pp ٣٦١–٣٧٢.

۲۶. Lin Z.H, (۱۹۸۶) ” *Two-phase flow measurement with orifices*” Chap. ۲۹ in: Encyclopedia of Fluid Mechanics, Xian Jiao-Tong University, Xian, The People’s Republic of China.
۲۷. Geng Y., Zheng J., Shi T., (۲۰۰۶) ”Study on the metering characteristics of a slotted orifice for wet gas flow” *J of Flow Measurement and Instrumentation Vol ۱۷*, pp ۱۲۳–۱۲۸.
۲۸. ISO ۵۱۶۷-۲” *Measurement of fluid flow by means of differential devices inserted in circular cross-section conduits running full_ Part۲:Orifice Plates*”, Ref. No. ISO-۵۱۶۷-۲:۲۰۰۳(E). ISO; ۲۰۰۳(E).
۲۹. Maric Ivan, (۲۰۰۷) “ A procedure for the calculation of the natural gas molar heat capacity, the isentropic exponent, and the Joule–Thomson coefficient” *Flow Measurement and Instrumentation*, Vol ۱۸, pp ۱۸–۲۶.
۳۰. AGA ۸” *Compressibility and super compressibility for natural gas and other hydrocarbon gases*” Transmission measurement committee report No. ۸, AGA catalog no. XQ ۹۲۱۲. Second edition. ۱۹۹۲, ۳rd printing ۲۰۰۳.
۳۱. Sullivan D.A., (۱۹۸۱) “Historical review of real-fluid isentropic flow models” *Trans. ASME, Vol ۱۰۳*, pp۲۵۸–۲۶۷.
۳۲. Maric I., Galovi A., Šmuca T., (۲۰۰۵) “Calculation of natural gas isentropic exponent” *Flow Measurement and Instrumentation, Vol ۱۶*, pp ۱۳–۲۰.
۳۳. ون وایلن .گ.ج ، زونتاک ر ، بورگناک . ک ، (۱۳۸۱)، " مبانی ترمودینامیک کلاسیک " ، چاپ چهاردهم ، انتشارات نما.
۳۴. کرایه چیان ا. (۱۳۸۵) ، " محاسبات عددی برای دانشجویان علوم و مهندسی " ، تهران ، انتشارات تیهو.

٣٥. Guo .B , Ghalambor. A, (٢٠٠٥),”Natural Gas Engineering Handbook”, Gulf Publishing Company, Houston.
٣٦. ISO ٥١٦٧-١,” *Measurement of fluid flow by means of differential devices inserted in circular cross-section conduits running full_ Part ١:General principles and requirements*”, Ref. No. ISO-٥١٦٧١-١:٢٠٠٣(E). ISO; ٢٠٠٣.
٣٧. Maric I., (٢٠٠٥), “The Joule–Thomson effect in natural gas flow-rate measurements” *Flow Measurement and Instrumentation, Vol ١٦, pp ٣٨٧–٣٩٥.*
٣٨. Ernst G., Keil B., Wirbser H.,(٢٠٠١), “*Flow-calorimetric results for the massic heat capacity c_p and the Joule–Thomson coefficient of CH_4 , of (٠.٨٥ CH_4 + ٠.١٥ C_2H_6), and of a mixture similar to natural gas*”, J. Chem. Thermodynamics, Vol ٣٣,PP ٦٠١–٦١٣.



دانشگاه صنعتی شاهرود
دانشکده مهندسی مکانیک-گروه تبدیل انرژی

عنوان پایان نامه :

تولید نرم افزار طراحی و ساخت یک نمونه آزمایشی دبی سنج دقیق گاز طبیعی

دانشجو : یونس بیات

اساتید راهنما:

دکتر محمود فرزانه گرد

دکتر شهرام هاشمی مرغزار

استاد مشاور:

دکتر امیر خوشنویس

ارائه شده جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد در مهندسی مکانیک گرایش تبدیل انرژی

دی ماه ۱۳۸۷

دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده : مهندسی مکانیک

گروه : تبدیل انرژی

پایان نامه کارشناسی ارشد آقای یونس بیات

تحت عنوان:

تولید نرم افزار طراحی و ساخت یک نمونه آزمایشی دبی سنج دقیق گاز طبیعی

در تاریخ ۱۳۸۷/۱۰/۲۳ توسط کمیته تخصصی زیر جهت اخذ مدرک کارشناسی ارشد مورد ارزیابی و با درجه A مورد پذیرش قرار گرفت.

امضاء	اساتید مشاور	امضاء	اساتید راهنما
	امیر خوشنویس		محمود فرزانه گرد
			شهرام هاشمی مرغزار

امضاء	نماینده تحصیلات تکمیلی	امضاء	اساتید داور
	دکتر قطعی		محمد جواد مغربی
			محمد محسن شاهمردان