شرکت ملی گاز ایران

پژوهشکده اندازه گیری جریان سیالات

مجله

اندازه‌گیری و کنترل جریان سیالات

JOURNAL OF FLOW MEASUREMENT AND CONTROL

ویژه نامه عدم قطعیت

شماره اول: بهار ۱۴۰۰

بسم الله الرحمن الرحیم

اندازه‌گیری و کنترل جریان سیالات
شماره اول: بهار ۱۴۰۰

فهرست

سخن مدیر مسئول ۳
دکتر سید حسن هاشم آبادی

مروری بر فعالیت‌های پژوهشکده اندازه‌گیری جریان سیالات ۶
دکتر جویا معروفی

ویژه‌نامه عدم قطعیت ۱۰

محاسبه عدم قطعیت ایستگاه‌های میترینگ ۱۱
مهندس پژمان محمدی
دکتر سید حسن هاشم آبادی

ساخت و محاسبه عدم قطعیت بانک سونیک‌نازل در شرکت مهندسی توسعه راهبردی انرژی پارس ۲۹
مهندس بهروز یزدان شناس شاد
مهندس حامد دباغی

محاسبه عدم قطعیت ترکیبی سیستم میترینگ گاز پالایشگاه شهید هاشمی‌نژاد بر اساس استاندارد ISO-5168 ..... ۴۳
دکتر ایمان اکبری
مهندس مازیار سیاح نژاد
مهندس نرجس السادات رضوی

محاسبه عدم قطعیت اندازه‌گیری خطای نشاندهی در کالیبراسیون یک کنتور آب خانگی ۶۰
مهندس حامد خرمی

مبانی عدم قطعیت سیستم‌های اندازه‌گیری گاز و منابع آن ۷۲
مهندس سجاد ترابی

مصاحبه با مهندس عبدالله فاضلی فارسانی ۷۹

مدیر مسئول: دکتر سید حسن هاشم آبادی
سر دبیر: دکتر جویا معروفی
طراح: سید علی ذبیحی

تهران- رسالت خیابان هنگام- دانشگاه علم و صنعت - پژوهشکده اندازه‌گیری جریان سیالات
تماس:۷۷۴۴۱۹۳۰ فکس: ۷۷۲۴۰۲۲۷
Email: info@flowmeasurement.ir
website:www.flowmeasurement.ir

سخن مدیرمسئول

دکتر سید حسن هاشم‌آبادی

با توجه به اینکه کشور ایران ذخایر عظیم نفت و گاز در جهان را داراست و از طرفی با بحران جدی آب مواجه است، بحث سیستم‌های اندازه‌گیری از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. با توجه به خلاءهای موجود در حوزه اندازه‌گیری در صنایع مختلف از جمله نفت، گاز، پالایش، پتروشیمی و آب و فاضلاب، نیاز به ارتقاء این دانش در صنایع مختلف به شدت احساس می‌شود. در راستای ارتقاء سیستم‌های اندازه‌گیری در کشور، گروه پژوهشی میترینگ نفت، گاز و فرآورده دانشگاه علم و صنعت ایران در سال ۱۳۸۸ با مشارکت نخبگان دانشگاه و صنعت با هدف کمک به ارتقاء و بهبود وضعیت سیستم‌های اندازه‌گیری کمی و کیفی سیالات هیدروکربنی در کشور آغاز به کار نمود و توانست در سال ۱۳۹۰ مجوز فعالیت را به عنوان تنها قطب فعال میترینگ در کشور از وزارت نفت اخذ نماید. باتوجه به ضرورت دستیابی به دانش فنی ساخت فلومترها در داخل کشور، توسعه زیرساخت‌های کالیبراسیون تجهیزات میترینگ گاز و همچنین توسعه شبکه اندازه‌گیری هوشمند، تفاهم‌نامه تاسیس "انستیتو اندازه‌گیری هوشمند گاز" با حمایت شرکت ملی گاز در دی ماه ۱۳۹۴ در دانشگاه علم و صنعت امضا و از سال ۱۳۹۶ رسماً این انستیتو شروع به فعالیت کرد. از طرفی وجود درخواست‌هایی از سایر بخش‌ها از جمله وزارت نیرو برای مدیریت منابع آب باعث شد فعالیت‌ها در قالب پژوهشکده اندازه‌گیری جریان سیالات با تصویب هیات امنای دانشگاه علم و صنعت ایران از سال ۱۳۹۶ ادامه یابد.

هدف اصلی ایجاد پژوهشکده ترسیم چشم‌انداز، ارائه راهبردها، تدوین برنامه‌های کوتاه مدت، میان مدت و بلند مدت درخصوص اندازه‌گیری دقیق، مستمر، ایمن و اقتصادی سیالات در صنایع مختلف می‌باشد. پژوهشکده اندازه‌گیری جریان سیالات با توجه به سابقه گذشته امکان ارائه مشاوره و اجرای پروژه‌های مربوط به میترینگ در کشور را دارا می‌باشد و در محورهای زیر فعالیت می‌نماید:

- استانداردهای ISO ، ASTM، IP، IGS، IPS، API در زمینه اندازه‌گیری نفت، گاز، محصولات پتروشیمی و فرآورده‌های نفتی و آب
- نقل و انتقال و بارگیری نفت، گاز و فرآورده
- روش‌های دینامیک و استاتیک اندازه‌گیری نفت، گاز و فرآورده (مخازن ساحلی / نفتکش – میترینگ و ...)
- طراحی ایستگاه‌های میترینگ
- سیستم‌های نمونه‌گیری نفت خام
- طراحی و ساخت سیستم‌های میترینگ جریان‌های تک‌فازی و چند فازی
- پرووینگ و کالیبراسیون تجهیزات اندازه‌گیری مایع، گاز و چند فازی
- هوشمند سازی تجهیزات، انتقال داده، مانیتورینگ، تحلیل داده
- مشاوره در خرید، نصب و راه‌اندازی تجهیزات میترینگ

خداوند متعال را بسیار شکرگزارم پس از برگزاری موفق چهار دوره از همایش و نمایشگاه ملی اندازه‌گیری جریان سیالات در صنایع نفت، گاز، پالایش و پخش، پتروشیمی و آب توفیق انتشار اولین شماره مجله "اندازه‌گیری و کنترل جریان سیالات" از سوی پژوهشکده اندازه‌گیری جریان سیالات حاصل شد. از جهت اهمیت عدم قطعیت در اندازه‌گیری جریان سیالات که به درستی می‌تواند در تمامی ابعاد مدیریتی، اقتصاد میترینگ و بهره‌برداری از سامانه‌های میترینگ در کشور نقش به‌سزایی داشته باشد، تصمیم

گرفته شد اولین شماره مجله ویژه‌نامه "آنالیز عدم قطعیت" باشد. امیدواریم همان‌گونه‌که همایش‌های برگزار شده توانست در ایجاد شبکه متخصصین، انتقال تجربه و ارتقاء سطح دانش میترینگ در کشور بسیار تاثیرگذار باشند، انتشار این مجله نیز بتواند بستری برای ارائه آخرین دستاوردهای علمی–پژوهشی درحوزه‌های مختلف میترینگ، پر کردن خلاء های موجود و همچنین برقراری ارتباط بیشتر علمی بین پژوهشگران و متخصصان دانشگاهی و مراکز صنعتی ایجاد نماید. لذا دبیرخانه مجله مشتاقانه ازکلیه اساتید، دانشجویان، پژوهشگران، متخصصین دانشگاهی، مراکز پژوهشی و صنعتی دعوت به عمل می‌آورد تا با ارائه نتایج پژوهش‌های اصیل و منتشرنشده و تجربیات خود بر غنای علمی این نشریه بیفزایند. امید است که با انتشار این مجله به پیشرفت مرزهای علم کمک کوچکی کرده باشیم.

با آرزوی پیشرفت و سربلندی میهن عزیزمان

مروری بر فعالیت‌های پژوهشکده اندازه‌گیری جریان سیالات

دکتر جویا معروفی؛ مدیر اجرایی پژوهشکده اندازه‌گیری جریان سیالات

در فراخوان اواخر سال ۱۳۸۹ وزارت نفت در خصوص ایجاد گروه‌های تخصصی در دانشگاه‌ها، ضرورت‌های تشکیل گروه پژوهشی اندازه‌گیری (میترینگ)، در قالب پیشنهادی از طریق پرتال وزارت نفت به همراه معرفی تیم همکار (دانشگاهی و صنعتی) اعلام گردید. در سال ۱۳۹۰ مجوز فعالیت برای این گروه به عنوان تنها قطب فعال میترینگ در کشور از سوی وزارت نفت صادر شد. در گام بعدی، موافقت‌نامه همکاری انجام طرح‌های اولویت‌دار حوزه پایین‌دست صنعت نفت میان مدیران شرکت ملی گاز ایران با دانشگاه علم و صنعت ایران در وزارت علوم، تحقیقات و فناوری امضاء گردید. این موافقت‌نامه با حضور وزرای علوم، تحقیقات و فناوری و نفت و روسای دانشگاه‌های برتر، در دی ماه ۱۳۹۴ امضا شد. بر این اساس، طرح ایجاد انستیتو اندازه‌گیری هوشمند گاز در طرح‌های اولویت‌دار حوزه پایین‌دست صنعت نفت به دانشگاه علم و صنعت ایران سپرده شد. پس از دو سال، با توجه به گستردگی فعالیت‌ها و نیازهای متنوعی که در واحدهای صنعتی کشور شناسایی شده بود، پیشنهادی جهت تاسیس پژوهشکده اندازه‌گیری جریان سیالات در دانشگاه تهیه شد و این پیشنهاد در نشست هیات امنای دانشگاه در اسفند ماه ۱۳۹۶ به تصویب رسید. هم اکنون پژوهشکده اندازه‌گیری جریان سیالات به عنوان قطب علمی میترینگ کشور در زمینه‌های زیر در حال فعالیت است:

- مشاوره در طراحی و ساخت انواع سیستم‌های میترینگ
- مشاوره در انتخاب سیستم‌های اندازه‌گیری
- تدوین استانداردهای بین‌المللی
- انجام پژوهش‌های بنیادین و کاربردی در حوزه میترینگ
- مشاوره در کالیبراسیون کنتورها

- راه‌اندازی و تعمیرات
- برگزاری همایش و کارگاه‌های تخصصی

یکی از بخش‌های مهم و فعال پژوهشکده اندازه‌گیری جریان سیالات، انستیتو اندازه‌گیری هوشمند گاز است که از خروجی تفاهم دی ماه ۱۳۹۴ مابین وزارت علوم، تحقیقات و فناوری و وزارت نفت حاصل گردیده و یکی از چهار انستیتوی رسمی شرکت ملی گاز می‌باشد که در سه حوزه ساخت، کالیبراسیون و هوشمندسازی تجهیزات میترینگ مورد نیاز صنعت گاز در حال فعالیت است. این انستیتو با توسعه شبکه متخصصین حوزه اندازه‌گیری جریان سیالات به بیش از سه هزار شخصیت حقیقی و حقوقی، جهت رفع نیازهای میترینگ در حوزه گاز از تخصص این شبکه استفاده می‌نماید. انستیتو اندازه‌گیری هوشمند گاز در گام اول به شناخت مشکلات صنعت گاز کشور در هر سه حوزه ساخت، کالیبراسیون و هوشمندسازی می‌پردازد و سپس با استفاده از نیروها و امکانات انستیتو به همراه بهره بردن از ظرفیت شرکت‌های توانمند و ذی‌صلاح و شخصیت‌های متخصص و با تکیه بر توانمندی‌های بومی، به تعریف روش‌ها و رویکردهای گوناگون جهت حل مشکل موجود می‌پردازد و در نهایت مسیر بهینه فرآیندی، عملیاتی و اقتصادی را جهت رفع چالش‌های صنعت گاز مشخص می‌نماید. خروجی این رویکرد، منجر به ساخت تجهیزات اندازه‌گیری مدرن با دقت بالا و صرف هزینه کمتر نسبت به محصولات وارداتی، ایجاد چرخه‌های مناسب کالیبراسیون تجهیزات اندازه‌گیری، هوشمندسازی تجهیزات و شبکه اندازه‌گیری گاز کشور و ایجاد آزمایشگاه‌های مرجع جهت تست و آزمون تجهیزات مورد استفاده در صنعت اندازه‌گیری گاز در کشور خواهد شد.

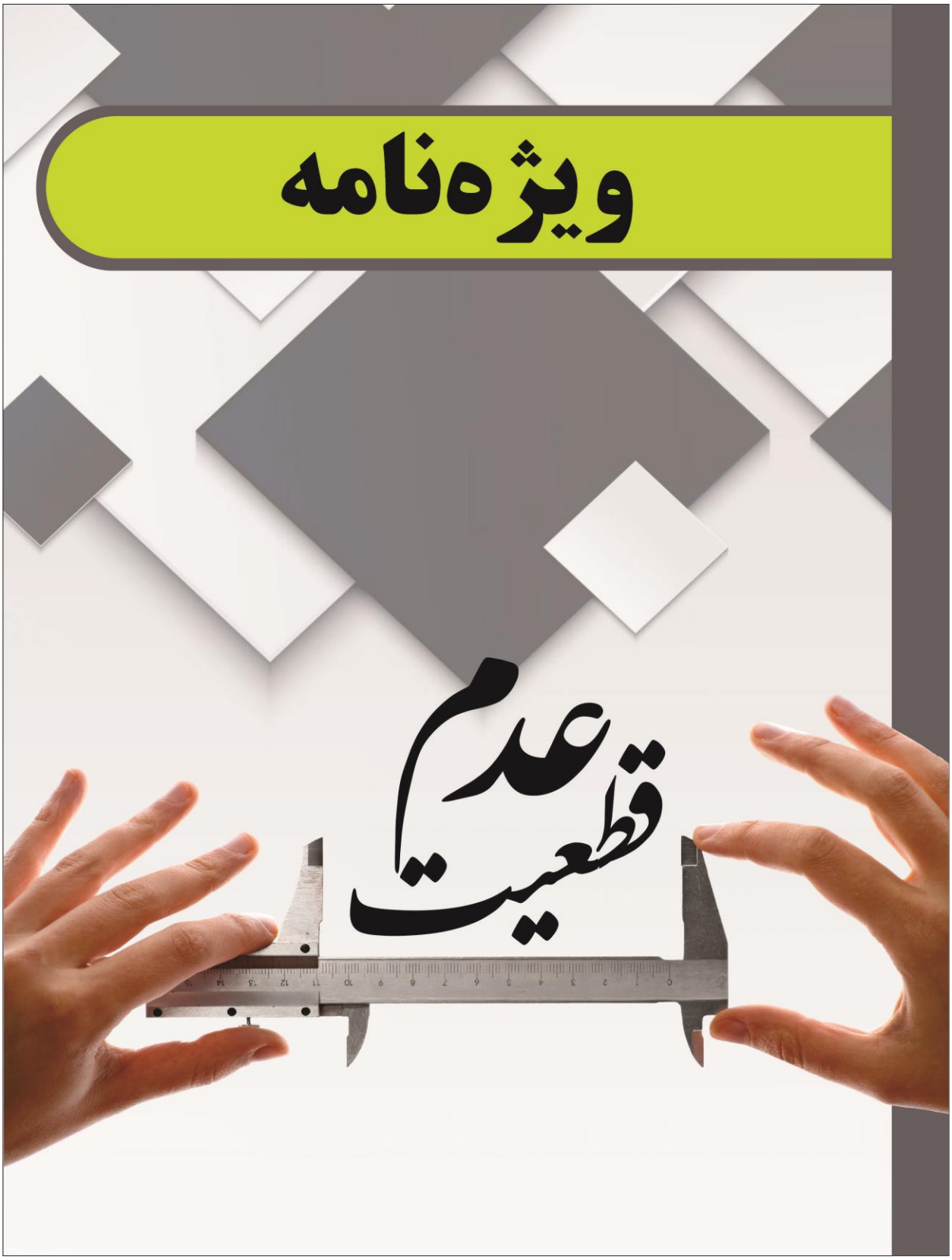
شکل ۱ : شماتیکی از آزمایشگاه فلولوپ هوای فشرده جهت صحت‌سنجی کنتورهای سایز پایین و متوسط

دستاوردهای ملموس جاری و آتی انستیتو اندازه‌گیری هوشمندگاز به صورت تیتروار به شرح ذیل است:

- ساخت اولین نمونه بومی دستگاه فلوکامپیوتر گازی
- ساخت اولین نمونه بومی آنالیزور نقطه شبنم آب و هیدروکربن جهت استفاده در پارس جنوبی
- ساخت نمونه کنتور مناسب به منظور اندازه‌گیری جریان گاز فلر
- ساخت اولین نمونه بومی دستگاه دانسیته‌متر با تکنولوژی منتخب جهت سنجش دانسیته گازها
- توسعه اولین نرم‌افزار بومی محاسبه عدم قطعیت ایستگاه‌های اندازه‌گیری گاز
- افزایش دقت اندازه‌گیری گاز خانگی با ارتقای کیفیت قطعات کنتورهای دیافراگمی (باکالیت و دیافراگم)
- ایجاد آزمایشگاه‌های مرجع

شکل ۲ : شماتیکی از بخشی از دستاوردهای ملموس انستیتو اندازه‌گیری هوشمند گاز در آینده نزدیک: آنالیزور نقطه شبنم، میز تست عملکرد و کالیبراتور کنتورهای گاز و فلوکامپیوتر گازی

پژوهشکده اندازه‌گیری جریان سیالات با وظیفه‌ای که از آبان ۱۳۹۹ از طرف وزارت نیرو و شرکت مادرتخصصی مدیریت منابع آب به او محول شده است، مسئول فرآیند ارزیابی تست و آزمون‌های کنتورهای هوشمند چاه‌های کشاورزی در سراسر کشور می‌باشد. پژوهشکده اندازه‌گیری جریان سیالات با رویکرد حمایت از تولید داخلی و ارتقای سطح کیفی محصولات تولید شده، ضمن بررسی مدارک و مستندات شرکت‌های تولید کننده کنتورهای هوشمند چاه‌های کشاورزی، پس از بازدید میدانی و نمونه‌برداری از خط تولید، فرآیند نظارت بر آزمون‌های هیدرولیک، الکتریکال و اجرای تست‌های عملکرد را برای هر یک از سازندگان و برای سایزهای گوناگون کنتور تولید شده انجام می‌هد. همچنین پژوهشکده در این مسیر با توجه به استانداردهای معتبر بین‌المللی و ملی و با توجه به ظرفیت فناورانه شرکت‌های فعال در کشور، اقدام به بازنگری و به‌روزرسانی مشخصات فنی و عملکردی کنتورهای هوشمند حجمی و سایر ابزارهای سنجش خواهد نمود. پژوهشکده اندازه‌گیری جریان سیالات جهت شناخت بیشتر مشکلات حوزه میترینگ کشور در صنایع نفت، گاز، پالایش، پتروشیمی و آب و همچنین شناخت نیروهای متخصص حقیقی و حقوقی در این حوزه و تقویت و ارتقاء شبکه متخصصین حوزه میترینگ کشور اقدام به برگزاری همایش‌های اندازه‌گیری جریان سیالات نموده است. این همایش‌ها که تا به حال، چهار دوره از آن برگزار شده است، محیط مناسبی برای هم‌اندیشی و تبادل تجربیات، آموزش و آگاهی افراد مرتبط، تعامل نزدیک افراد، شرکت‌ها و سازمان‌های ذیربط و همچنین شناسایی فناوری‌های نوین اندازه‌گیری و توانمندی‌ها، چالش‌ها و نیازهای موجود در صنعت میترینگ کشور می‌باشد. آخرین دوره همایش اندازه‌گیری جریان سیالات در صنایع نفت، گاز، پالایش و پتروشیمی و آب در آذر ۱۳۹۸ برگزار شد و ان‌شاءالله پنجمین دوره همایش مذکور در تاریخ ۷ و ۸ دی ماه سال جاری برگزار خواهد گردید.


ویژه‌نامه
عدم قطعیت

محاسبه‌ی عدم قطعیت ایستگاه‌های میترینگ مجهز به فلومتر آلتراسونیک مطابق استاندارد ISO-5168 (مطالعه موردی ایستگاه CGS شماره۲ نکا مازندران)

پژمان محمدی
کارشناس ارشد اندازه‌گیری و توزیع گاز شرکت گاز استان اصفهان
سیدحسن هاشم‌آبادی
استاد تمام دانشکده مهندسی شیمی، نفت وگاز دانشگاه علم و صنعت ایران

محاسبه‌ی عدم قطعیت ایستگاه‌های میترینگ

پژمان محمدی

کارشناس ارشد اندازه گیری وتوزیع گاز شرکت گاز استان اصفهان

آزمایشگاه تحقیقاتی CFD ، دانشگاه علم و صنعت ایران

سیدحسن هاشم آبادی

استاد تمام دانشکده مهندسی شیمی، نفت وگاز دانشگاه علم وصنعت ایران

پژوهشکده اندازه گیری جریان سیالات

چکیده

یکی از مهمترین مباحث در اندازه‌گیری صحیح و دقیق گاز، عدم قطعیت فلومتر به عنوان ابزار اندازه‌گیری است و یکی از مهم‌ترین موارد آن عدم قطعیت ترکیبی سیستم اندازه‌گیری، برهم‌کنش‌ها و اثرات متقابل یکایک اجزا سیستم اندازه‌گیری بر یکدیگر و نهایتاً بر عدم قطعیت کلی سیستم می‌باشد. در این مقاله ضمن پرداختن به محاسبه عدم قطعیت ترکیبی یک ایستگاه اندازه‌گیری مجهز به فلومتر آلتراسونیک، عدم قطعیت ترکیبی ایستگاه CGS شماره ۲ نکا مازندران مطابق استاندارد ISO-5168 محاسبه شده است. براساس نتایج حاصل از این پژوهش، در دبی عبوری برابر با ۳۳۱۴۶ sm^3/hr، عدم قطعیت ترکیبی سیستم مورد مطالعه برابر با ۰/۷۲۱۱درصد به دست آمده است. بیشترین عدم قطعیت المانی نیز مربوطه به پارامتر شرایط عملیاتی و بهره‌برداری فلومتر آلتراسونیک (۰/۵۰۳۸درصد) است. پس از این پارامتر، پارامترهای فشار، کالیبراسیون کنتور در شرایط فشار بالا (HP)، نسبت ضریب تراکم‌پذیری، تکرارپذیری در شرایط عملیاتی، دما و انحراف از خطا در شرایط کالیبراسیون به ترتیب بیشترین عدم قطعیت را دارا می‌باشند. این امر بیانگر آن است که در محدوده مجاز بودن عدم قطعیت المان‌های سیستم اندازه‌گیری (به ویژه فلومترآلتراسونیک) به صورت مجزا ملاک عمل نمی‌باشد، چراکه خطای مجموع و ترکیبی ایستگاه اندازه‌گیری بیشتر از عدم قطعیت تک‌تک المان‌ها می‌باشد. همچنین بر طبق محاسبات صورت پذیرفته و پیش‌بینی مدل، در دبی ۱۰ و ۲۵ هزار متر مکعب بر ساعت، به ترتیب عدم قطعیت ترکیبی این سیستم ۳/۵ و ۱ درصد پیش‌بینی می‌شود. این امر حاکی از تاثیر قابل توجه دبی بر عدم قطعیت مخصوصاً در دبی‌های کمتر از ۲۰ درصد دبی ماکزیمم در ایستگاه‌های مجهز به فلومتر آلتراسونیک می‌باشد.

کلمات کلیدی: عدم قطعیت ترکیبی، فلومترآلتراسونیک، استاندارد ISO-5168، ایستگاه CGS نکا ، پارامتر شرایط عملیاتی

۱. مقدمه

امروزه فلومترهای آلتراسونیک یکی از هوشمندترین و مدرن‌ترین میترهای اندازه‌گیری فلو در سطح دنیا می‌باشد و به دلایل متعدد از جمله خطای بسیار کم و عدم حساسیت بالا نسبت به کثیفی گاز طبیعی، استفاده از این نوع فلومتر طی سال‌های اخیر در شرکت ملی گاز ایران نیز رشد قابل توجهی پیدا نموده است. براساس آمارها روزانه حدود ۶۰۰ میلیون مترمکعب گاز در کشور توزیع می‌شود که از این مقدار، حداقل ۷۰ درصد حجم گاز توزیع شده با استفاده از فلومترهای آلتراسونیک محاسبه می‌گردد. کاربرد این نوع میترها با توجه به تکنیک ساخت، همچنین عدم قطعیت‌های موجود در ایستگاه اندازه‌گیری، طراحی کنتور و نصب و راه‌اندازی با ملاحظاتی همراه می‌باشد و لذا خطای بسیار کم در اندازه‌گیری این حجم زیاد گاز علاوه بر ضرر و زیان مالی، منجر به بروز مشکلات متعدد در اندازه‌گیری گاز در سیستم انتقال و توزیع شده و با ایجاد چالشی بزرگ در خصوص توجیه فراگیر شدن این نوع از کنتورهای پیشرفته، مشکلاتی از قبیل گازهای محاسبه نشده (گم شده) را نیز به وجود خواهد آورد.

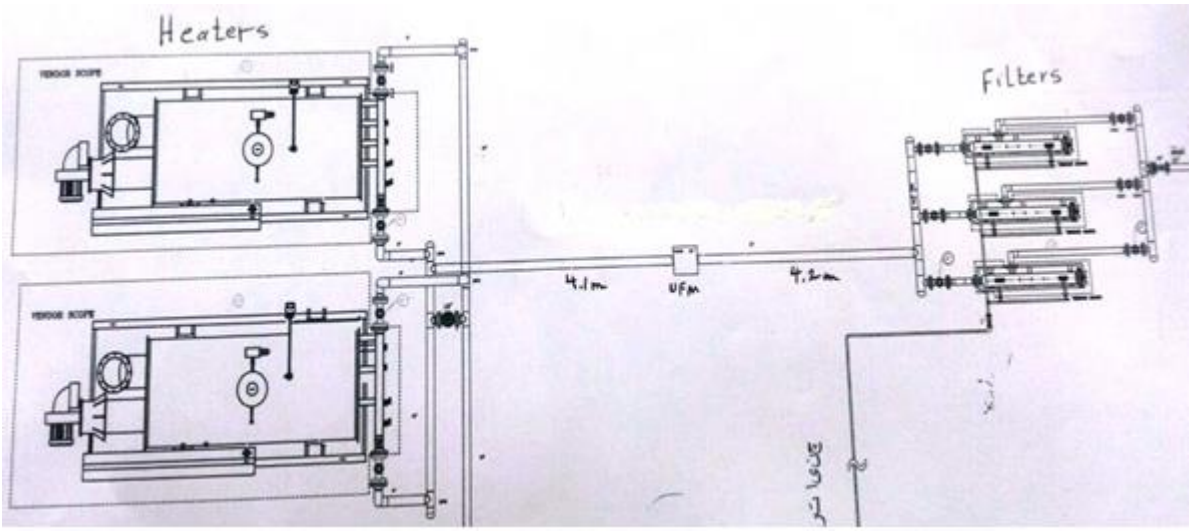
یکی از مهمترین مباحث در اندازه‌گیری صحیح گاز، عدم قطعیت فلومتر به عنوان ابزار اندازه‌گیری است. در این زمینه بر طبق استانداردها و دستورالعمل‌های مربوطه، لازم است عدم قطعیت تک‌تک اجزاء سیستم اندازه‌گیری نظیر المان اندازه‌گیری (به عنوان مثال فلومترآلتراسونیک)، ترانسمیتر دمای محیط، دما و فشار گاز در فلومتر و غیره در محدوده مجاز باشد. علاوه بر این، یکی از موارد بسیار حیاتی که متاسفانه امروزه به آن توجه زیادی نمی‌شود، عدم قطعیت ترکیبی سیستم اندازه‌گیری و برهم‌کنش‌ها و اثرات متقابل اجزاء سیستم اندازه‌گیری بر یکدیگر و بر عدم قطعیت کلی سیستم است. در استاندارد ISO-5168 به روند محاسبه‌ی عدم قطعیت ترکیبی سیستم اندازه‌گیری پرداخته شده است[۱]. در این راستا در این پژوهش به محاسبه‌ی عدم قطعیت

ترکیبی سیستم میترینگ ایستگاه CGS شماره دو نکا مازندران پرداخته شده است.

۲. روش تحقیق

۲-۱- شرح ایستگاه اندازه‌گیری مجهز به فلومتر آلتراسونیک

فلومترهای آلتراسونیک یک از آخرین و به‌روزترین ابزارهای اندازه‌گیری دبی است که با سرعت انتقال صوت بین دو مبدل که یکی در بالا و دیگری در پایین است، دبی جریان عبوری محاسبه می‌گردد [۲] و به لحاظ تئوریک این نوع دبی‌سنج‌ها بسیار دقیق می‌باشند و خطایی در حدود ۰٫۱٪ دبی واقعی دارند [۳]. درشکل (۱) ایستگاه CGS شماره دو نکا مازندران مجهز به فلومتر آلتراسونیک به همراه متعلقات آن نشان داده شده است.



شکل ۱: ایستگاه CGS شماره ۲ نکا مازندران مجهز به فلومتر آلتراسونیک ۱۲اینچ

علاوه بر دما و فشار گاز، دانسیته گاز نیز یکی از پارامترهای مورد نیاز برای تعیین دبی گاز عبوری است. برای محاسبه دانسیته، عموماً از سه روش زیر استفاده می شود:

می‌تواند مقداری ثابت و پیش فرض بوده که در این صورت خطایی در محاسبات دبی حجمی گاز وارد می‌شود یا این‌که به صورت برخط اندازه‌گیری شود.

۲- ترکیب اجزاء گاز با استفاده از دستگاه کروموتوگرافی آنلاین اندازه‌گیری می‌شود و با استفاده از ترکیب اجزاء گاز ضریب تراکم‌پذیری، دانسیته و همچنین ارزش حرارتی گاز محاسبه می‌شود.

۱- دانسیته با استفاده از دانسیته‌متر نصب شده در پایین‌دست جریان اندازه‌گیری می‌گردد. ترکیب درصد گاز برای محاسبه ضریب تراکم‌پذیری و ارزش حرارتی گاز استفاده می‌شود. ترکیب درصد گاز

دانسیته و همچنین ارزش حرارتی گاز محاسبه می‌شود.

۳- ترکیب اجزاء گاز با استفاده از نمونه‌برداری نقطه‌ای و آنالیز در آزمایشگاه تعیین می‌گردد. از این ترکیب اجزاء به دست آمده و همچنین دما و فشار برای محاسبه ضریب تراکم‌پذیری، دانسیته و همچنین ارزش حرارتی گاز استفاده می‌شود.

۲-۲- معادلات حاکم و مبانی محاسباتی

طبق استاندارد ISO 17089:1 [۲] و همچنین استاندارد AGA شماره ۹ [۴] رابطه دبی حجمی عبوری از فلومتر آلتراسونیک به شکل زیر ارائه شده است.

$$q_m = \rho\, q_v \qquad (۱)$$

در رابطه فوق ρ دانسیته در بالادست جریان است که با استفاده از دستگاه دانسیته‌متر اندازه‌گیری شده یا با استفاده از معادله گاز واقعی و با مشخص بودن دما و فشار و همچنین ضریب تراکم‌پذیری گاز، محاسبه می گردد. طبق رابطه گاز واقعی، دانسیته گاز در بالادست را می‌توان به صورت زیر نوشت.

$$\rho = \frac{MP}{ZRT} \qquad (۲)$$

بر این اساس و با کارکرد رابطه‌ی فوق و جایگزینی در رابطه (۱) و همچنین استفاده از ضریب تراکم‌پذیری برای محاسبه دانسیته، رابطه دبی حجمی در شرایط استاندارد را می‌توان به صورت زیر نوشت.

$$q_{v0} = \frac{P Z_0 T_0}{P_0 Z T} q_v \qquad (۳)$$

رابطه فوق دبی حجمی استاندارد عبوری از فلومتر آلتراسونیک را نشان می دهد که تابع پارامترهایی نظیر حجم عبوری از فلومتر آلتراسونیک با استفاده از استاندارد ISO 17089:1، فشار و دمای خط و ضریب تراکم‌پذیری است. براین اساس می‌توان گفت که عدم قطعیت نیز تابع عدم قطعیت هریک از پارامترهای معادله‌ی (۳) است. در نتیجه فرمول عدم قطعیت ترکیبی دبی حجمی استاندارد اندازه گیری شده به شکل رابطه زیر حاصل می‌گردد [۵].

$$\left(\frac{U(q_{v0})}{q_{v0}}\right)^2 = \left(\frac{U(q_v)}{q_v}\right)^2 + \left(\frac{U(P)}{P}\right)^2 + \left(\frac{U(T)}{T}\right)^2 + \left(\frac{U(Z/Z_0)}{Z/Z_0}\right)^2 \qquad (۴)$$

همان‌گونه که مشاهده می‌شود، عدم قطعیت ترکیبی فلومتر آلتراسونیک، تابع عدم قطعیت تک‌تک المان‌های موثر بر اندازه‌گیری است. از طرف دیگر در استاندارد ISO-5168 بر محاسبه‌ی عدم قطعیت المان‌های اندازه‌گیری دو روش تفصیلی و کلی ارائه شده است. در روش کلی، عدم قطعیت هر یک از پارامترهای رابطه (۴) مقداری ثابت در نظر گرفته می‌شود. اما در روش تفصیلی عدم قطعیت‌های ارائه شده در رابطه (۴)، براساس عدم قطعیت جزئی پارامترهای المان مربوطه تعیین می‌گردد. به عنوان مثال روش تفصیلی برای محاسبه عدم قطعیت

مربوط به دما و فشار به ترتیب در روابط (۵) و (۶)

نشان داده شده است.

$$U\left(T\right)^2 = U\left(T_{elem.tran}\right)^2 + U\left(T_{stab.tran}\right)^2 + U\left(T_{RFI}\right)^2 + U\left(T_{temp}\right)^2 + U\left(T_{stab.elem}\right)^2 + U\left(T_{misc}\right)^2 \quad (۵)$$

$$U\left(P\right)^2 = U\left(P_{tran}\right)^2 + U\left(P_{stab}\right)^2 + U\left(P_{RFI}\right)^2 + U\left(P_{temp}\right)^2 + U\left(P_{atm}\right)^2 + U\left(P_{misc}\right)^2 \quad (۶)$$

همان‌گونه که نشان داده شده است، تک‌تک المان‌های ترانسمیتر دما و ترانسمیتر فشار بر عدم قطعیت اثر ناشی از فشار و دمای خط تاثیر می‌گذارند. جزئیات روابط مربوط به عدم قطعیت پارامترهای نشان داده شده در رابطه (۴) به شرح روابط زیر آمده است[۵].

$$\left(\frac{U\left(q_v\right)}{q_v}\right)^2 = \left(\frac{U\left(q_{v.cal}\right)}{q_v}\right)^2 + \left(\frac{U\left(q_{v.field}\right)}{q_v}\right)^2 \quad (۷)$$

$$\left(\frac{U\left(q_{v.field}\right)}{q_v}\right)^2 = \left(\frac{U\left(q_{v.field.rept}\right)}{q_v}\right)^2 + \left(\frac{U\left(q_{v.field.cond}\right)}{q_v}\right)^2 \quad (۸)$$

$$\left(\frac{U\left(q_{v.cal}\right)}{q_v}\right)^2 = \left(\frac{U\left(q_{v.cal.dev}\right)}{q_v}\right)^2 + \left(\frac{U\left(q_{v.cal.ref}\right)}{q_v}\right)^2 + \left(\frac{U\left(q_{v.cal.rept}\right)}{q_v}\right)^2 \quad (۹)$$

۲-۳- مشخصات کلی سیستم میترینگ و ایستگاه اندازه‌گیری مورد مطالعه

سیستم اندازه‌گیری مورد مطالعه یک دستگاه فلومتر آلتراسونیک ۱۲ اینچ کلاس ۶۰۰ برند Elster مدل Q-SONIC Plus با ۶ مسیر اندازه‌گیری می‌باشد. با توجه به این‌که فشار، دما، دبی و دیگر پارامترهای خط به صورت لحظه‌ای تغییر می‌کند، از اطلاعات مربوط به تابستان سال ۱۳۹۸ سیستم میترینگ ایستگاه CGS شماره دو نکا مازندران جهت پارامترهای عملیاتی ورودی مورد نیاز استفاده شده است. در جدول (۱) مشخصات ایستگاه اندازه‌گیری مجهز به فلومتر آلتراسونیک مورد مطالعه نشان داده شده است

.جدول۱-پارامترهای عملیاتی سیستم اندازه‌گیری فلومتر آلتراسونیک مورد مطالعه

پارامتر	مقدار
فشار خط(bar-abs)	۵۵,۸۶۷۹
دما (^{0}C)	۲۵,۰۰۲۴
دبی حجمی استاندارد (sm^3/hr)	۳۳۱۴۶
قطر داخلی تیوب میتر(mm)	۲۹۴,۸۵
ضخامت متوسط دیواره بدنه(mm)	۳۰,۵۴
ضریب انبساط حرارتی بدنه میتر در ^{0}C ۲۰ ($1/^0K$)	۰,۰۰۰۰۰۱۱
ضریب انبساط فشار بدنه میتر در ^{0}C ۲۰ (kN/mm^2)	۲۰۰

در ایستگاه اندازه‌گیری مورد مطالعه از روش تفصیلی مطابق استاندارد AGA No.8 برای محاسبه ضریب تراکم‌پذیری و نهایتاً دانسیته گاز طبیعی استفاده می‌شود. مقدار پارامترهای ضریب تراکم‌پذیری و دانسیته با استفاده از این روش در جدول (۲) نشان داده شده است.

جدول ۲- پارامترهای ضریب تراکم‌پذیری و دانسیته با استفاده از روش تفصیلی مطابق استاندارد AGA No.8 برای ایستگاه گاز مورد مطالعه

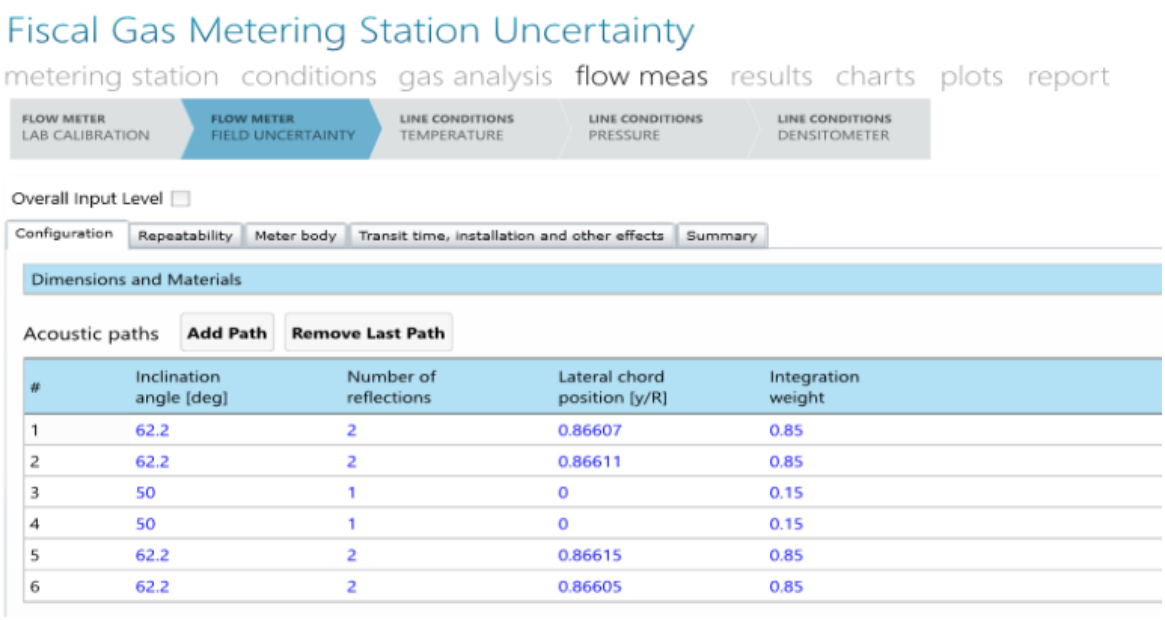
پارامتر	AGA No.8 Detailed
ضریب تراکم‌پذیری در شرایط مرجع	**0.99775**
ضریب تراکم‌پذیری در شرایط عملیاتی خط	**0.89574**
دانسیته گاز در شرایط عملیاتی(kg/m^3)	**0.4465365**

در این مقاله ضریب تراکم‌پذیری با استفاده از ترکیب اجزاء گاز طبیعی و توسط استاندارد AGA شماره ۸ تفصیلی تعیین شده است [۶]. شایان ذکر است عدم قطعیت ناشی از ضریب تراکم‌پذیری در شرایط مرجع براساس روش یاد شده به میزان ۰,۱ درصد با عدم قطعیت به دست آمده با استفاده از روش ISO-6976 به مقدار ۰,۰۵۲۲ نیز مقایسه شده که حدود ۰,۰۵ درصد بیشتر می‌باشد. همچنین ترکیب درصد اجزاء گاز طبیعی برای استفاده در روش AGA شماره ۸ بر اساس نمونه‌برداری صورت گرفته با استفاده از GC پژوهشگاه صنعت نفت تعیین و ارائه شده است.

جدول ۳- ترکیب درصد اجزاء گاز براساس نتایج آزمایشگاهی آنالیز گاز

ردیف	ماده	جزء مولی(درصد)	ردیف	ماده	جزء مولی(درصد)
۱	متان	۹۰,۶	۷	نرمال پنتان	۰,۰۴
۲	اتان	۳,۴	۸	هگزان وسنگین تر	۰,۰۲
۳	پروپان	۱,۱	۹	نیتروژن	۳,۴
۴	ایزوبوتان	۰,۱۶	۱۰	دی اکسیدکربن	۱
۵	نرمال بوتان	۰,۲۲	۱۱	سولفید هیدروژن	۱,۱۴ ppm
۶	ایزوپنتان	۰,۰۵	۱۲	آب	----

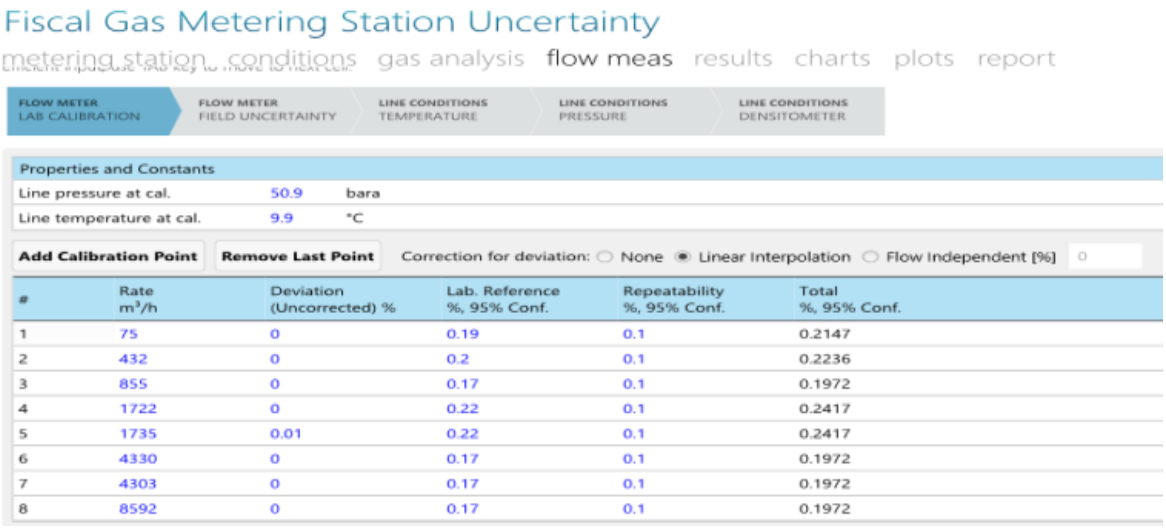
در این تحقیق به محاسبه عدم قطعیت ترکیبی سیستم اندازه‌گیری جریان گاز طبیعی ایستگاه CGS ۱۲۰ هزار متر مکعبی نکاء شرکت گاز استان مازندران پرداخته شده است. همان‌گونه که بیان گردید، برنامه انجام محاسبات بر طبق استاندارد ISO-5168 در برنامه تحت وب برای محاسبه عدم قطعیت تدوین شده است. برنامه مذکور شامل سربرگ‌های پارامترهای عملیاتی، ایستگاه اندازه‌گیری، شرایط و ترکیب اجزاء گاز طبیعی، شرایط عملیاتی خط، آنالیز گاز، پارامترهای اندازه‌گیری دبی بر اساس شاخص تعداد مسیرهای آکوستیک، زاویه انحراف ترانسدیوسرها، تعداد انعکاس در مسیرها، اطلاعات مورد نیاز در محاسبه عدم قطعیت محل نصب کنتور و سربرگ‌های فشار و دمای خط و ... است که تعدادی از آن‌ها در شکل های (۲) و (۳) نشان داده شده است.



#	Inclination angle [deg]	Number of reflections	Lateral chord position [y/R]	Integration weight
1	62.2	2	0.86607	0.85
2	62.2	2	0.86611	0.85
3	50	1	0	0.15
4	50	1	0	0.15
5	62.2	2	0.86615	0.85
6	62.2	2	0.86605	0.85

شکل۲: زیربرگ پارامترهای عملیاتی فلومتر آلتراسونیک مورد مطالعه جهت محاسبه عدم قطعیت ترکیبی ایستگاه

همانطور که در تصویر شکل (۲) قابل مشاهده است، عدم قطعیت ناشی از شرایط نصب و بهره‌برداری فلومتر آلتراسونیک مشتمل بر ۵ بخش پیکربندی (نحوه چیدمان مسیرها و ترنسدیوسرها)، تکرارپذیری، مشخصات بدنه فلومتر، عدم قطعیت ذاتی ناشی از انتقال زمانی و عدم قطعیت مجموع ناشی از نصب فلومتر می‌باشد. پس از تکمیل اطلاعات پارامترهای موثر در محاسبه میزان عدم قطعیت ۵ بخش یاد شده با استفاده از پارامترهای مندرج در اسناد فنی و گواهینامه کالیبراسیون HP فلومتر مورد نظر در نرم‌افزار تحت وب، عدم قطعیت مجموع در شرایط نصب و بهره‌برداری استخراج می‌گردد.



Fiscal Gas Metering Station Uncertainty

metering station conditions gas analysis flow meas results charts plots report

FLOW METER LAB CALIBRATION | FLOW METER FIELD UNCERTAINTY | LINE CONDITIONS TEMPERATURE | LINE CONDITIONS PRESSURE | LINE CONDITIONS DENSITOMETER

Properties and Constants

Line pressure at cal.	50.9	bara
Line temperature at cal.	9.9	°C

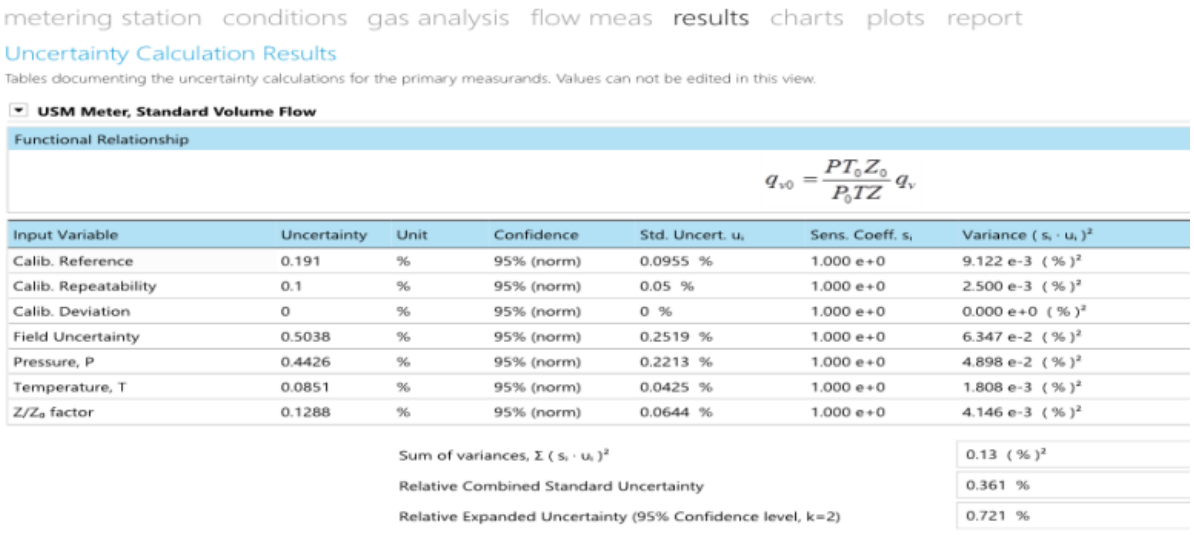
Add Calibration Point | Remove Last Point | Correction for deviation: None / Linear Interpolation / Flow Independent [%]

#	Rate m³/h	Deviation (Uncorrected) %	Lab. Reference %, 95% Conf.	Repeatability %, 95% Conf.	Total %, 95% Conf.
1	75	0	0.19	0.1	0.2147
2	432	0	0.2	0.1	0.2236
3	855	0	0.17	0.1	0.1972
4	1722	0	0.22	0.1	0.2417
5	1735	0.01	0.22	0.1	0.2417
6	4330	0	0.17	0.1	0.1972
7	4303	0	0.17	0.1	0.1972
8	8592	0	0.17	0.1	0.1972

شکل۳: زیربرگ پارامترهای کالیبراسیون HP فلومتر آلتراسونیک جهت محاسبه عدم قطعیت ترکیبی ایستگاه

۲-۴- نتایج و بحث روی نتایج

پس از وارد کردن تمامی داده‌های مورد نیاز جهت انجام محاسبات [۷]، عدم قطعیت تک‌تک المان‌های اندازه‌گیری و عدم قطعیت ترکیبی ایستگاه اندازه‌گیری تعیین می‌گردد. در شکل (۴) نتایج حاصل از محاسبه‌ی عدم قطعیت نشان داده شده است.



metering station conditions gas analysis flow meas results charts plots report

Uncertainty Calculation Results

Tables documenting the uncertainty calculations for the primary measurands. Values can not be edited in this view.

USM Meter, Standard Volume Flow

Functional Relationship

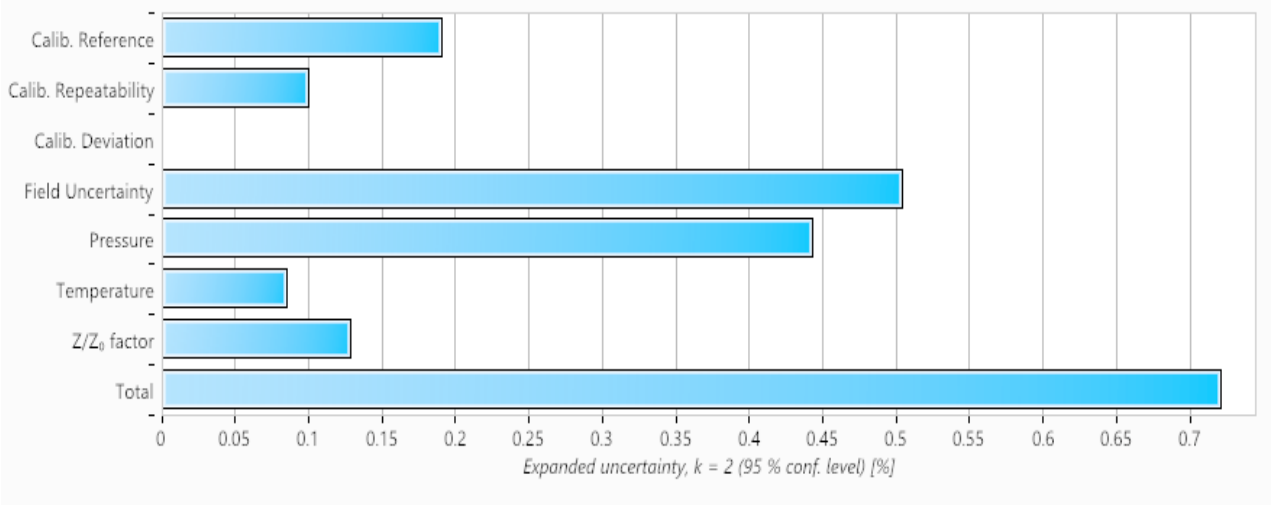
$$q_{v0} = \frac{PT_0Z_0}{P_0TZ} q_v$$

Input Variable	Uncertainty	Unit	Confidence	Std. Uncert. u_i	Sens. Coeff. s_i	Variance $(s_i \cdot u_i)^2$
Calib. Reference	0.191	%	95% (norm)	0.0955 %	1.000 e+0	9.122 e-3 (%)²
Calib. Repeatability	0.1	%	95% (norm)	0.05 %	1.000 e+0	2.500 e-3 (%)²
Calib. Deviation	0	%	95% (norm)	0 %	1.000 e+0	0.000 e+0 (%)²
Field Uncertainty	0.5038	%	95% (norm)	0.2519 %	1.000 e+0	6.347 e-2 (%)²
Pressure, P	0.4426	%	95% (norm)	0.2213 %	1.000 e+0	4.898 e-2 (%)²
Temperature, T	0.0851	%	95% (norm)	0.0425 %	1.000 e+0	1.808 e-3 (%)²
Z/Z_0 factor	0.1288	%	95% (norm)	0.0644 %	1.000 e+0	4.146 e-3 (%)²

Sum of variances, $\Sigma (s_i \cdot u_i)^2$	0.13 (%)²
Relative Combined Standard Uncertainty	0.361 %
Relative Expanded Uncertainty (95% Confidence level, k=2)	0.721 %

شکل۴ : نتایج نهایی حاصل از محاسبات عدم قطعیت ایستگاه CGS ۱۲۰ هزار متر مکعبی نکاء شرکت گاز استان مازندران

در نمودار میله‌ای شکل (۵) نیز عدم قطعیت پارامترهای موثر و همچنین عدم قطعیت ترکیبی نشان داده شده است.

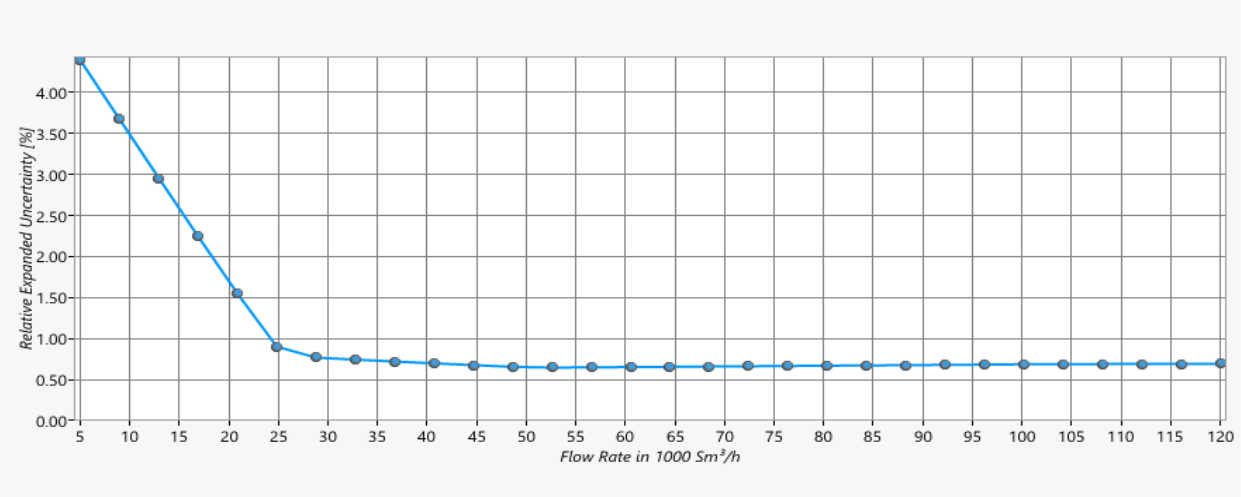


شکل۵: عدم قطعیت پارامترهای موثر و همچنین عدم قطعیت ترکیبی ایستگاه CGS ۱۲۰ هزار متر مکعبی نکا شرکت گاز استان مازندران

همانطور که در جدول و در شکل نشان داده شده است، عدم قطعیت ترکیبی سیستم مورد مطالعه ۰,۷۲۱ درصد می‌باشد. بیشترین عدم قطعیت مربوط به شرایط بهره‌برداری و نصب کنتور (۰,۵۰۳۸ درصد) است. در بخش ۷ استاندارد ISO 17089-1 عدم قطعیت کنتور آلتراسونیک حداکثر ۰,۳ درصد محاسبه شده است [۲] که باتوجه به عدم قطعیت مجموع کنتورآلتراسونیک بر اساس مشخصات کنتور و اطلاعات وارد شده در نرم‌افزار و محاسبات صورت گرفته مطابق رابطه (۸) حدود ۰,۲۵۶ درصد است که با عدد به دست آمده در این پژوهش برای عدم قطعیت کنتورآلتراسونیک همخوانی داشته و مطابقت دارد. پس از عدم قطعیت شرایط بهره‌برداری و نصب کنتور آلتراسونیک، پارامترهای فشار، عدم قطعیت مرکز کالیبراسیون، عدم قطعیت تکرارپذیری کنتور، نسبت ضریب تراکم‌پذیری و دما به ترتیب بیشترین عدم قطعیت را به خود اختصاص داده‌اند. در مورد نسبت ضریب تراکم‌پذیری در شرایط عملیاتی خط نسبت به ضریب تراکم‌پذیری در شرایط استاندارد (Z/Z_0)، ذکر این نکته ضروری است که بر طبق

گزارش AGA شماره ۸، چنانچه فشار عملیاتی در محدوده صفر تا ۱۲۰ بار و دمای گاز در محدوده ۸- تا ۶۲ درجه‌ی سانتیگراد باشد، خطای محاسباتی Z و Z_0 حدود ۰/۱ درصد است و با توجه به این‌که در ایستگاه مورد مطالعه بر اساس اطلاعات جدول شماره (۲) از همین روش محاسباتی در فلوکامپیوتر استفاده شده است، لذا عدم قطعیت ۰/۱۵ درصد به دست آمده در این مطالعه با احتساب عدم قطعیت‌های Z ، Z_0 و نسبت Z/Z_0 برای محاسبه ضریب تراکم‌پذیری و همچنین دانسیته، چندان دور از واقعیت نمی‌باشد. همچنین لازم به ذکر است، علیرغم این‌که حداکثر عدم قطعیت المان‌های اندازه‌گیری حدود ۰/۵ درصد است، اما نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که عدم قطعیت ترکیبی سیستم اندازه‌گیری مورد مطالعه ۰/۷۲۱ درصد است. این امر بیانگر این موضوع است که نمی‌توان به در محدوده مناسب بودن عدم قطعیت المان‌های اندازه‌گیری اکتفا نمود، چراکه خطای ترکیبی سیستم اندازه‌گیری بیشتر از عدم قطعیت تک‌تک المان‌های سیستم اندازه‌گیری است که عامل مهم شرایط نصب و بهره‌برداری از المان‌هایی است که در محاسبه عدم قطعیت کلی در نظر گرفته می‌شود. پارامترهای فوق، عدم قطعیت ایستگاه اندازه‌گیری مورد مطالعه را در دبی عبوری برابر با $33146\ sm^3/hr$ نشان می‌دهد. در شکل (۶) عدم قطعیت ترکیبی در محدوده دبی ۵۰۰۰ تا ۱۲۰۰۰۰ استاندارد متر مکعب بر ساعت نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، در دبی حدود ۱۰ هزار استاندارد متر مکعب در ساعت، عدم قطعیت این سیستم ۳/۵ درصد و در دبی حدود ۲۰ هزار استاندارد متر مکعب درساعت، عدم قطعیت این ایستگاه ۱/۵ درصد پیش‌بینی می‌شود. این موضوع نشان می‌دهد که تاثیر دبی بر عدم قطعیت در فلومترهای آلتراسونیک بسیار مهم است و به عبارتی فقط در دبی‌های بیشتر از ۲ برابر q_t (۲۰ درصد ماکزیمم دبی عبوری از ایستگاه اندازه‌گیری) عدم قطعیت ترکیبی سیستم اندازه‌گیری به کمتر از مقدار یک درصد می‌رسد. شایان ذکر است این مقدار در میترهای اریفیس در دبی‌های بیشتر از ۷۰ درصد

دبی ماکزیمم به مقدار یک درصد نزدیک می‌شود و به تنهایی همین موضوع می‌تواند عدم قطعیت بسیار مناسب، دقت اندازه‌گیری بالا و اهمیت فلومترهای آلتراسونیک را نسبت به دیگر میترها نشان دهد.



شکل۶- تغییرات درصد عدم قطعیت بر حسب دبی گاز عبوری ایستگاه CGS ۱۲۰ هزار متر مکعبی نکا شرکت گاز استان مازندران

۳- نتیجه‌گیری

در این مطالعه به محاسبه عدم قطعیت ترکیبی اندازه‌گیری جریان گاز طبیعی در ایستگاه CGS/TBS شماره ۲ نکا استان مازندران با استفاده از یک فلومتر آلتراسونیک ۱۲ اینچ نصب شده در مسیر ورودی به هیترها پرداخته شده است. برنامه انجام محاسبات بر طبق استاندارد ISO-5168 در برنامه‌ی تحت وب برای محاسبه عدم قطعیت تدوین گردیده است. اطلاعات مورد نیاز برای انجام محاسبات شامل اطلاعات مربوط به کالیبراسیون دستگاه‌ها و گواهی‌نامه‌های کالیبراسیون دستگاه‌ها، اطلاعات مربوط به گواهی‌نامه کالیبراسیون فشار بالای کنتور آلتراسونیک مورد مطالعه، اطلاعات

مسیرهای آکوستیک (تعداد مسیرها، زاویه انحراف ترنسدیوسرها، تعداد انعکاس در مسیرها)، اطلاعات مورد نیاز در محاسبه عدم قطعیت محل نصب کنتور، اطلاعات مربوط به دما و فشار و ... از مدارک مربوطه استخراج شده و به همراه اطلاعات ذکر شده ایستگاه مذکور در برنامه‌ی کامپیوتری جهت انجام محاسبات عدم قطعیت استفاده شده است. نتایج حاصل از این پژوهش نشان می‌دهد که عدم قطعیت ترکیبی ایستگاه مورد مطالعه در دبی ۳۳۱۴۶ sm^3/hr حدود ۰/۷ درصد است. بیشترین عدم قطعیت مربوط به پیش‌بینی می‌شود. این موضوع نشان می‌دهد که تاثیر دبی بر عدم قطعیت در فلومترهای آلتراسونیک بسیار مهم است و به عبارتی فقط در دبی‌های بیشتر از ۲ برابر q_t (۲۰ درصد ماکزیمم دبی عبوری از ایستگاه اندازه‌گیری) عدم قطعیت ترکیبی سیستم اندازه‌گیری به کمتر از مقدار ۱درصد می‌رسد. لازم به ذکر است علیرغم این‌که حداکثر عدم قطعیت المان‌های اندازه‌گیری حدود ۰/۵ درصد است، اما شرایط بهره‌برداری و نصب کنتور (۰,۵۰۳۸ درصد) وکمترین عدم قطعیت نیز مربوط به پارامتر انحراف از مقدار دبی (در مرکز کالیبراسیون HP) به میزان صفر درصد می‌باشد. پس از پارامتر عدم قطعیت شرایط بهره‌برداری و نصب کنتور آلتراسونیک، پارامترهای فشار، عدم قطعیت مرکز کالیبراسیون، عدم قطعیت تکرارپذیری کنتور، نسبت ضریب تراکم‌پذیری و دما به ترتیب بیشترین عدم قطعیت را دارا می‌باشند. در دبی حدود۱۰ هزار استاندارد متر مکعب در ساعت، عدم قطعیت این سیستم ۳/۵درصد نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که عدم قطعیت ترکیبی سیستم اندازه‌گیری مورد مطالعه ۰/۷۲۱ درصد است. این امر بیانگر این موضوع است که نمی‌توان به در رنج مناسب بودن عدم قطعیت المان‌های اندازه‌گیری اکتفا نمود، چراکه خطای ترکیبی سیستم اندازه‌گیری بیشتر از عدم قطعیت تک‌تک المان‌های سیستم اندازه‌گیری است.

تشکر و قدردانی:

از جناب آقای دکتر محسن مهتاجی رئیس محترم اندازه‌گیری و توزیع گاز شرکت گاز استان مازندران که در ارائه مدارک و مستندات فنی و گزارش‌های مصرف ایستگاه مورد مطالعه در شرایط عملیاتی، کمال همکاری را داشته، تشکر و قدردانی ویژه می‌گردد.

مراجع

1. ISO 5168,"Measurement of fluid flow – Procedures for the evaluation of uncertainties," ISO Geneva, 2005.

2. ISO 17089-1"Measurement of fluid flow in closed conduits — Ultrasonic meters for gas —Part 1: Meters for custody transfer and allocation Measurement," 2012.

3."Calibration services of Euroloop Results", number EG.003634 , page 2, 2017.

4. AGA Report No.9 "Measurement of Gas by Multipath Ultrasonic Meters," Third Edition, July 2017.

5. Lunde P. and Froysa K.E., "Hand book of Uncertainty Calculation for Ultrasonic fiscal gas flow metering stations." Norwegian Society for Oil and Gas Measurement, 2014.

6. Starling K.E. and Savidge, J.L, "Compressibility Factors of Natural Gas and Other Related Hydrocarbon Gases", American Gas Association Transmission Measurement Committee Report No.8, Arlington ,USA, 1994.

7. "High Pressure Euroloop Certificates for USM with serial number 69511140." October 2017.

ساخت و محاسبه عدم قطعیت بانک سونیک‌نازل در شرکت مهندسی توسعه راهبردی انرژی پارس

بهروز یزدان‌شناس‌شاد
رئیس اداره نظارت بر پروژه‌های ساخت شرکت تعمیرات نیروگاهی ایران
حامد دباغی
مدیرعامل شرکت مهندسی توسعه راهبردی انرژی پارس

ساخت و محاسبه عدم قطعیت بانک سونیک‌نازل در شرکت مهندسی توسعه راهبردی انرژی پارس

بهروز یزدان‌شناس شاد

دکترای مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران

رئیس اداره نظارت بر پروژه‌های ساخت شرکت تعمیرات نیروگاهی ایران

حامد دباغی

کارشناسی مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران

مدیرعامل شرکت مهندسی توسعه راهبردی انرژی پارس

چکیده:

در این مقاله به موضوع ساخت و محاسبه عدم قطعیت کل یک بانک سونیک‌نازل آزمایشگاهی(سه نازله) که در شرکت مهندسی راهبردی انرژی پارس طراحی و ساخته شده است پرداخته می‌شود. بانک‌های سونیک‌نازل به عنوان یکی از ابزارهای صحت‌سنجی دبی‌سنج‌های گازی استفاده می‌شوند. در این مقاله ضمن بررسی مراحل محاسبه عدم قطعیت نوع-A و نوع-B دستگاه ذکر شده، به تاثیرگذاری و وزن هریک از پارامترهای دما، فشار، رطوبت گاز، عدم قطعیت سونیک‌های خریداری شده و ... پرداخته می‌شود و پارامترهای تاثیرگذارتر در عدم قطعیت نوع-B معرفی می‌گردند. اگر چه عدم قطعیت نوع-A به صورت آماری قابل استخراج است، اما عدم قطعیت نوع-B با توجه به وزن اثرگذاری و عدم قطعیت جزء جزء سیستم بدست می‌آید. در انتهای مقاله نشان داده می‌شود که از بانک سونیک‌نازل ساخته شده می‌توان برای صحت‌سنجی کنتورهای گاز G4 استفاده نمود و مشخص می‌گردد که در صورت نیاز به دقت اندازه گیری بالاتر، می‌توان با استفاده از ابزارهای دقیق جانبی با کیفیت و دقت بالاتر به عدم قطعیت‌های بهتری رسید.

کلید واژه: بانک سونیک‌نازل، عدم قطعیت نوع-A، عدم قطعیت نوع-B، صحت‌سنجی

۱. مقدمه

در رابطه با دبی‌سنج‌های اندازه‌گیری دبی گاز تحت فشار (شرایط عملکردی)، عموماً دو روش صحت‌سنجی و کالیبراسیون پیشنهاد می‌شود. اولین روش مربوط به استفاده از مستر میترها است که عموماً در روش‌های حجمی مستر میترهای پیشنهادی از نوع توربینی و یا اولتراسونیک‌های زمان-گذر چند پرتوی هستند. دومین روش استفاده از بانک سونیک‌نازل است. صحت‌سنج‌های بانک سونیک‌نازل به شدت پایدار، تکرارپذیر و عموماً دارای عدم قطعیت ٪۰/۲۵ می‌باشند و در صورت کالیبراسیون می‌توانند عدم قطعیتی حتی بهتر از ٪۰/۱ نیز داشته باشند.

امروزه از شش آزمایشگاه معتبر کالیبراسیون در اروپا شامل NEL (UK)، K-Lab (Norway)، NMI (Netherland)، Gas de France، CESAME (France) و PTB/Ruhrgas (Germany) که همگی اعضای EUROMET هستند، استفاده می‌گردد. بر طبق گزارش شماره ۴۷۴ که توسط EUROMET به ثبت رسیده است، شرکت‌های K-Lab، Gas de France و CESAME از صحت‌سنج‌های بانک سونیک‌نازل برای صحت‌سنجی دبی‌سنج‌های گازی استفاده می‌کنند. همچنین بانک‌های سونیک‌نازل به عنوان استاندارد ثانویه در بسیاری از آزمایشگاه‌های معتبر در سرتاسر دنیا برتری خود را به اثبات رسانده‌اند [۱].

یکی از مزیت‌های مهم بانک‌های سونیک‌نازل استفاده از آن‌ها جهت صحت‌سنجی دبی‌سنج‌های گازی در شرایط تحت خلاء، اتمسفریک و تحت فشار است. در رابطه با محاسبه عدم قطعیت باید اذعان کرد که در کل هیچ روش قطعی برای تعیین تمامی مولفه‌های عدم قطعیت و محاسبه نهایی آن وجود ندارد.

معمولاً روش‌های انجام شده برای محاسبه عدم قطعیت به عواملی مانند نوع تجهیز، ویژگی سیال و سازگاری آن با تمام بخش‌ها بستگی دارد.

۲. سونیک‌نازل‌ها

نازل‌های جریان بحرانی (جریان سونیک) در تست کنتورهای گاز خانگی و تجاری (دیافراگمی، روتاری و توربینی) به طور گسترده در صنعت توزیع و انتقال گاز طبیعی استفاده می‌شوند. امروزه در بسیاری از مراکز فروش کنتورهای گازی، مراکز تعمیر، سازندگان و ... "صحت‌سنج‌های سونیک‌نازل" به عنوان ابزار اولیه‌ای برای اندازه‌گیری دقت و کارایی کنتور پذیرفته شده‌اند. در بسیاری از موارد، صحت‌سنج سونیک‌نازل برای تست کنتورهای خانگی و یا تجاری سبک جایگزین صحت‌سنج نوع بل می‌شود. مزیت‌های استفاده از سونیک‌نازل‌های جریان بحرانی را می‌توان به شرح ذیل بیان کرد: دارای سطح بالایی از صحت و دقت می‌باشند. روشی سریعتر برای تست کنتورهای گازی می‌باشند. قابلیت تشخیص خودکار برای موارد کالیبراسیون، تعمیرات و نگهداری و نگرانی‌های مربوط به عیب‌یابی را دارند.

از آنجایی که صحت‌سنج‌های سونیک‌نازل قابلیت اندازه‌گیری‌های همزمان فشار، دما و رطوبت نسبی را دارند، بنابراین نیاز به کنترل‌های سخت‌گیرانه شرایط محیطی کاهش می‌یابد.

۲-۱- توسعه سونیک‌نازل و نیاز به استفاده از آن

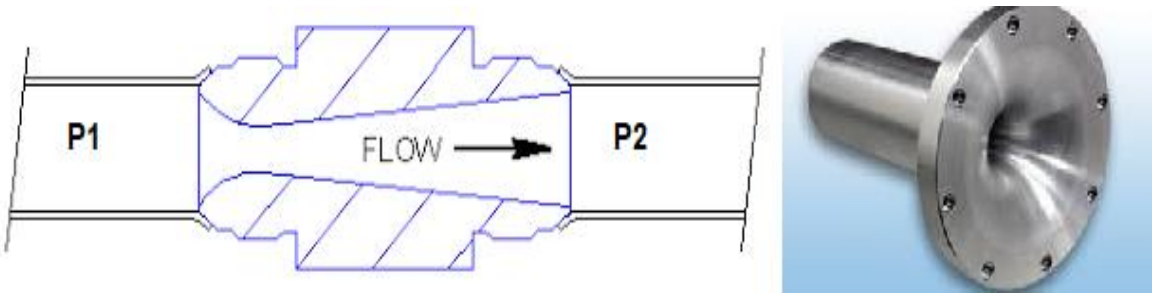
استفاده از سونیک‌نازل‌ها به نیاز به دقت بالا در اندازه‌گیری دبی سیالات، به ویژه در صنعت گاز مرتبط می‌گردد. استفاده از سونیک‌نازل‌ها به عنوان یک استاندارد ثانویه برای تست دبی‌سنج‌های گازی، هم به صورت میدانی و هم به صورت ثابت آزمایشگاهی پیشنهاد می‌شوند و جایگزینی مناسب هم برای صحت‌سنج نوع بل و هم نوع اندازه‌گیری‌های اوریفیسی می‌باشند. دو استاندارد طراحی کلی برای سونیک‌نازل وجود دارد.

۱- سونیک‌نازل با گلوگاه استوانه‌ای

۲- سونیک با گلوگاه حلقوی

در ایالات متحده آمریکا به طور معمول از طراحی با گلوگاه حلقوی به جای استوانه‌ای استفاده می‌شود. آزمایش‌هایی که در دهه ۱۹۸۰ انجام شد، نشان داد که طراحی گلوگاه استوانه‌ای سبب ایجاد ناپایداری‌هایی در جریان می‌گردد.

شکل (۱) نمونه‌ای از یک سونیک‌نازل را نشان می‌دهد. در یک سونیک‌نازل هنگامی که نسبت فشار پایین‌دست در خروجی سونیک به فشار بالادست در ورودی از حد معینی کمتر شود، سرعت جریان گاز در گلوگاه به سرعت صوت در سیال می‌رسد. در این صورت بیشترین نرخ دبی جرمی سیال از سونیک‌نازل عبور می‌کند که مقدار آن به پارامترهای فشار و دمای بالادست و همچنین قطر گلوگاه بستگی دارد.



شکل ۱ : نمایی از یک سونیک‌نازل

از آنجایی که در این حالت نرخ دبی به شرایط پایین دست بستگی ندارد، بنابراین نوسانات پایین دست جریان، تاثیری بر نرخ دبی عبوری نخواهد داشت و به همین دلیل است که بانک‌های سونیک‌نازل صحت‌سنج‌هایی بسیار پایدار با تکرارپذیری و عدم قطعیتی خوب هستند. دبی جرمی تحت شرایط واقعی از رابطه (۱) بدست می‌آید [۳].

$$q_{mi} = \frac{A_{nt} . C_d . C_{*i} . P_o}{\sqrt{\frac{R . T}{M}}} \qquad (۱)$$

که در رابطه (۱) A_{nt} مساحت گلوگاه نازل، C_d، ضریب تخلیه نازل، C_{*i} تابع جریان بحرانی، برای یک جریان آیزنتروپیک یک بعدی، P_0 فشار سکون بالادست نازل، T_0 دمای مطلق سکون بالادست نازل، M جرم مولی گاز و R ثابت عمومی گاز کامل است. همانطور که در رابطه (۱) مشاهده می‌شود، عدم قطعیت اندازه‌گیری به عدم قطعیت‌های مربوط به اندازه‌گیری مساحت گلوگاه، اندازه‌گیری فشار و دمای بالادست، محاسبه دقیق جرم مولی مخلوط گاز، تلرانس‌های هندسی بانک سونیک‌نازل و شرایط هندسی بالادست نازل - به طوریکه مانع از تحریف و چرخش جریان شود - بستگی دارد. پارامترهای اشاره شده در فوق در محاسبه عدم قطعیت نوع-B موثر می‌باشند، اما می‌توان برای اندازه‌گیری عدم قطعیت با استفاده از نتایج آماری و محاسبات آماری از عدم قطعیت نوع-A استفاده کرد. معمولاً عدم قطعیت نوع-B هنگامی استفاده می‌شود که داده‌برداری‌های آماری کافی موجود نباشد.

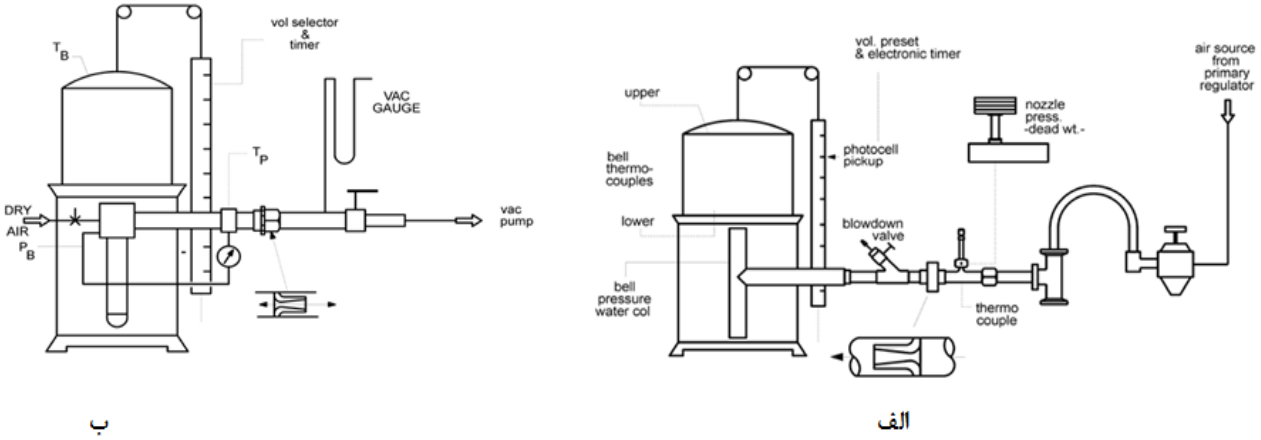
دو روش برای این که نرخ دبی حجمی در طول سونیک‌نازل تعیین شود وجود دارد:

۱- اندازه‌گیری فیزیکی قطر گلوگاه نازل

۲- کالیبراسیون با استفاده از حجم استاندارد

اندازه‌گیری فیزیکی ساده‌ترین روش برای تعیین نرخ دبی نازل است. با اندازه‌گیری قطر گلوگاه نازل، مساحت گلوگاه بدست می‌آید و سپس با استفاده از رابطه (۱) دبی حجمی قابل برآورد کردن است. با این حال، اندازه‌گیری قطر گلوگاه نازل همیشه عملی نیست. برای مثال برای کاربردهای اندازه‌گیری گاز خانگی که مصرف کمتر از ۱۰۰ فوت مکعب بر ساعت دارند، قطر گلوگاه نازل کمتر از ۰,۱ اینچ است. در این شرایط اثر ضخامت لایه مرزی می‌تواند بر ضریب تخلیه نازل تاثیر گذار باشد [۲].

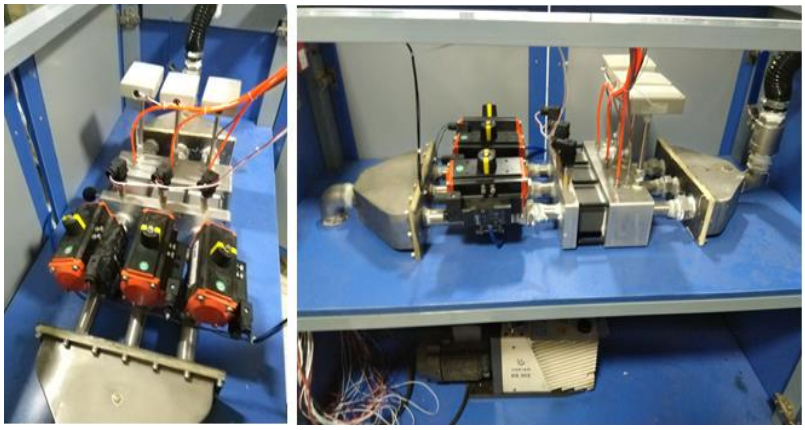
سونیک‌نازل‌ها در صنعت گاز می‌توانند با صحت‌سنج نوع بل به عنوان یک استاندارد حجمی کالیبره بشوند. با استفاده از صحت‌سنج نوع بل دو روش برای کالیبره کردن سونیک‌نازل وجود دارد: روش تحت فشار مثبت مطابق با شکل (۲) الف و تحت فشار اتمسفریک (یا اندکی خلاء) مطابق با شکل (۲) ب.



شکل۲. الف) کالیبراسیون سونیک‌نازل توسط صحت‌سنج نوع بل تحت فشار مثبت، ب) کالیبراسیون سونیک‌نازل توسط صحت‌سنج نوع بل تحت فشار اتمسفریک یا انداکی خلاء [۲]

۳. طراحی و ساخت صحت‌سنج بانک سونیک‌نازل برای کنتور دیافراگمی مدل G-4

بر اساس نیاز شرکت مهندسی توسعه راهبردی انرژی پارس در سال ۱۳۹۵ تصمیم گرفته شد تا یک صحت‌سنج که از نوسانات پایین‌دست خود تاثیر نگیرد ساخته شود که بهترین گزینه در این رابطه بانک سونیک‌نازل بود. از این رو بر اساس استاندارد ISO 9300 طراحی یک بانک سونیک‌نازل برای صحت‌سنجی کنتورهای دیافراگمی مدل $G-4$ برای بررسی عملکرد کنتور در سه نقطه q_{min} ، $0.2q_{max}$ و q_{max} و سپس ساخت آن آغاز شد. شکل (۳) نمایی از برخی از اجزای صحت‌سنج مذکور را نشان می‌دهد.



شکل۳. بانک سونیک‌نازل (سه نازله) برای صحت‌سنجی کنتورهای دیافراگمی مدل G4

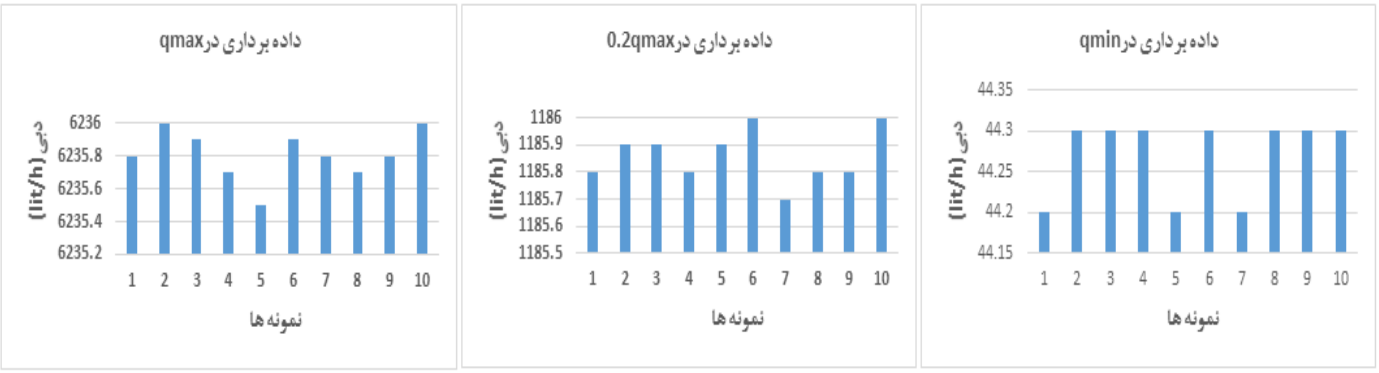
۳-۱ بررسی عملکرد بانک سونیک‌نازل ساخته شده

داده‌برداری از بانک سونیک‌نازل ساخته شده در سه دبی q_{min}، $0.2q_{max}$ و q_{max} با فاصله زمانی ۱۰ ثانیه برای ثبت هر دبی انجام شد. بنابراین برای ثبت ۱۰ نمونه از هر دبی کمینه ۱۰۰ ثانیه زمان صرف شد. جدول (۱) نتایج حاصل از داده‌برداری را نشان می‌دهد.

جدول۱ : داده‌برداری در سه نقطه از محدوده اندازه‌گیری کنتور دیافراگمی

نمونه‌برداری	q1	q2	q3	q4	q5	q6	q7	q8	q9	q10
qmin	44.2	44.3	44.3	44.3	44.2	44.3	44.2	44.3	44.3	44.3
0.2qmax	1185.8	1185.9	1185.9	1185.8	1185.9	1186	1185.7	1185.8	1185.8	1186
qmax	6235.8	6236	6235.9	6235.7	6235.5	6235.9	6235.8	6235.7	6235.8	6236

نمودارهای میله‌ای در شکل‌های (۴) الف تا (۴) پ نحوه نوسان خروجی کنتور را در بازه داده‌برداری نشان می‌دهند.



الف ب پ

شکل۴ الف) خروجی صحت‌سنج سونیک‌نازل الف) در دبی qmin ب) در دبی 0.2qmax پ) در دبی qmax

۴. محاسبه عدم قطعیت

۴-۱ بررسی عدم قطعیت اندازه‌گیری نوع-A مربوط به بانک سونیک‌نازل:

به منظور محاسبه عدم قطعیت نوع-A گام‌های زیر اجرا شد. گام اول، محاسبه میانگین داده‌برداری در هر نقطه که از رابطه (۲) محاسبه می‌شود.

$$\bar{q} = \frac{\sum_{i=1}^{N} q_i}{N} = \frac{\sum_{i=1}^{10} q_i}{10} \qquad (۲)$$

گام دوم، محاسبه انحراف معیار داده‌ها در هر نقطه که از رابطه (۳) محاسبه می‌شود.

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N} (\bar{q} - q_i)^2}{N-1}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{10} (\bar{q} - q_i)^2}{9}} \qquad (۳)$$

گام سوم، محاسبه انحراف استاندارد میانگین که به عبارتی عدم قطعیت استاندارد نوع-A نیز است و با استفاده از رابطه (۴) بدست می‌آید.

$$\sigma_m = \frac{\sigma}{\sqrt{N}} = \frac{\sigma}{\sqrt{10}} \qquad (۴)$$

با توجه به روابط فوق، جدول(۲) میانگین، انحراف معیار و انحراف معیار میانگین در هر نقطه از داده‌برداری را نشان می‌دهد.

جدول۲. میانگین، انحراف معیار و انحراف معیار استاندارد صحت‌سنج سونیک‌نازل در سه نقطه از دبی

اطلاعات آماری	میانگین (m^3/h)	انحراف معیار (m^3/h)	انحراف معیار میانگین (m^3/h)
qmin	0.04427	0.0000483	0.0000279
0.2qmax	1.18586	0.0000966	0.0000558
qmax	6.23581	0.0001524	0.0000880

در حوزه مهندسی، عموماً سطح اطمینان ٪۹۵ به‌کار برده می‌شود، لذا عدم قطعیت در این سطح از اطمینان برای هریک از داده‌برداری‌های فوق طبق رابطه (۵) محاسبه می‌شود. با توجه به سطح اطمینان ٪۹۵ مقدار k برابر ۲ است. پس عدم قطعیت با چنین سطحی از اطمینان برای دبی در سه نقطه مذکور طبق جدول ۳ بدست آمد.

$$U = k\,u \qquad (۵)$$

جدول۳. عدم قطعیت بانک سونیک‌نازل در هر نقطه از نمونه برداری دبی گاز

اطلاعات آماری	عدم قطعیت با سطح اطمینان ٪۹۵ (lit/h)	درصد عدم قطعیت با سطح اطمینان ۹۵ درصد (٪)
qmin	0.0558	0.1260
0.2qmax	0.1116	0.0094
qmax	0.1760	0.0028

با توجه به اطلاعات جدول (۳)، بدترین حالت مربوط به qmin با عدم قطعیت ٪۰/۱۳ می‌شود. لذا می‌توان نتیجه گرفت که عدم قطعیت نوع-A از بانک سونیک‌نازل ساخته شده بهتر از ٪۰/۱۳است. چنین نتیجه‌ای قطعاً به دلیل ذات پایدار این دسته از صحت‌سنج‌ها است که از نوسانات پایین‌دست تاثیرپذیر نیستند.

۴-۲ محاسبه روابط عدم قطعیت نوع-B مربوط به بانک سونیک‌نازل

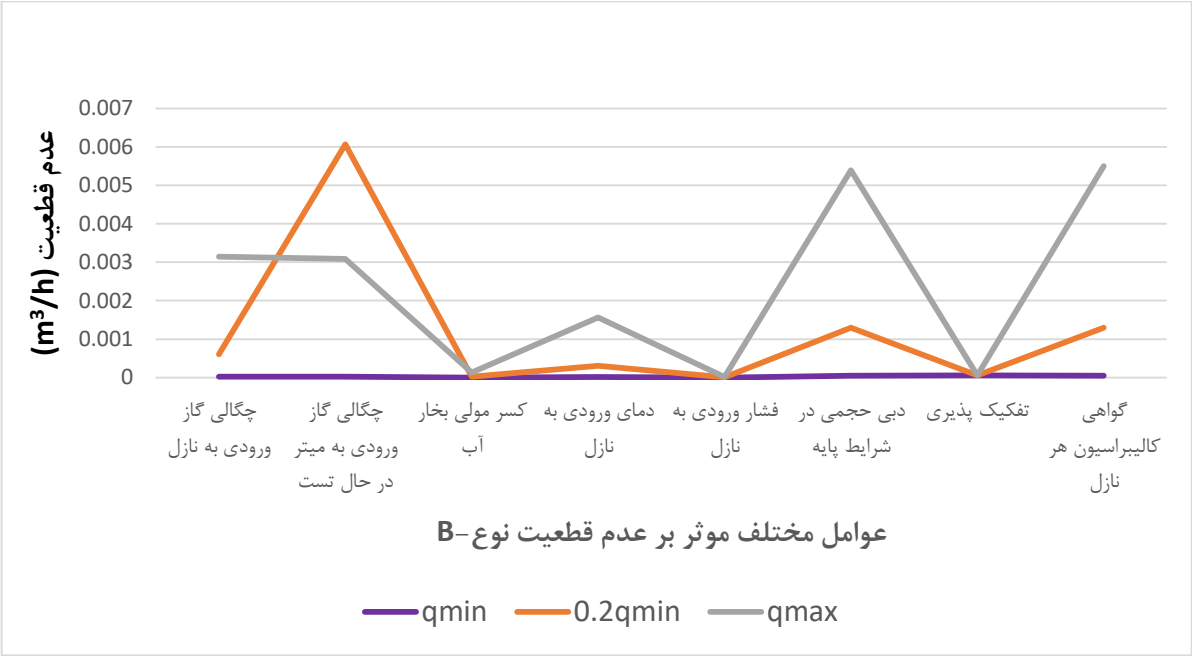
معادله اساسی دبی حجمی در حالت جریان واقعی و هنگام وجود جریان بحرانی در گلوگاه نازل برای سونیک‌های خریداری شده و بر اساس گواهینامه مرکز کالیبراسیون CMI (موسسه مترولوژی چک) از رابطه (۶) محاسبه می‌شود:

$$Q_{V,M} = \frac{\rho_D}{\rho_M}\left(1+0.169\chi_V\right).\sqrt{\frac{T_D}{293.15}}.\left[1+c_{p,E}.\left(P_D-1000mbar\right)\right].Q_{V,20,tr,1000} \qquad (۶)$$

که در معادله (۶) $Q_{V,M}$ نرخ جریان حجمی در شرایط عمومی، ρ_D چگالی هوا قبل از ورود به نازل، ρ_M چگالی هوا در کنتور در حال تست، χ_V کسر مولی رطوبت هوا، T_D دمای ترمودینامیکی در ورودی نازل، $c_{p,E}$ فاکتور تصحیح برای تغییر در فشار مطلق در ورودی نازل، P_D فشار مطلق در ورودی نازل $Q_{V,20,tr,1000}$ مقدار دبی حجمی در شرایط حالت پایه (۲۰ درجه سلسیوس و ۱۰۰۰ میلی بار) است. بر اساس رابطه (۶) عدم قطعیت نوع-B از رابطه (۷) بدست می‌آید:

$$u_{sonic\ nozzle}=\sqrt{\begin{array}{l}\left(u_{\rho_D}\times\frac{\partial Q_{V,M}}{\partial\rho_D}\right)^2+\left(u_{\rho_M}\times\frac{\partial Q_{V,M}}{\partial\rho_M}\right)^2+\left(u_{\chi_V}\times\frac{\partial Q_{V,M}}{\partial\chi_V}\right)^2\\+\left(u_{T_D}\times\frac{\partial Q_{M,V}}{\partial T_D}\right)^2+\left(u_{P_D}\times\frac{\partial Q_{V,M}}{\partial P_D}\right)^2+\left(u_{Q_{V,20,tr,1000}}\times\frac{\partial Q_{V,M}}{\partial Q_{V,20,tr,1000}}\right)^2\\+u^2_{Resolution}+u^2_{Calibration}\end{array}} \quad (۷)$$

که در معادله (۷) $u_{Resolution}$ عدم قطعیت مربوط به تفکیک‌پذیری صحت‌سنج بانک سونیک‌نازل، $u_{Calibration}$ عدم قطعیت مربوط به هر یک از سونیک‌های موجود در صحت‌سنج بانک سونیک‌نازل و بر اساس گواهی کالیبراسیون آنها است. بعد از محاسبات مربوط، تاثیر هر یک از پارامترهای موثر در اندازه‌گیری دبی توسط بانک سونیک نازل در شکل (۵) نشان داده شده است.



شکل۵: تاثیر عوامل مختلف بر عدم قطعیت نوع-B

عمده ترین تاثیر را بر عدم قطعیت نوع-B عواملی مانند عدم قطعیت در گواهی سونیک‌نازل‌ها، عدم قطعیت در دبی حجمی در شرایط پایه در گواهی کالیبراسیون، عدم قطعیت ترانسمیتر دما و عدم قطعیت مربوط به محاسبات چگالی دارند. جدول (۴) عدم قطعیت بر حسب متر مکعب بر ساعت و همچنین عدم قطعیت بر حسب درصد را با سطح اطمینان ٪۹۵ برای دبی‌های مختلف ارائه می‌دهد.

جدول ۴ : عدم قطعیت کل با سطح اطمینان ٪۹۵ در دبی‌های q_{min}، $0.2q_{max}$ و qmax

عدم قطعیت کل با سطح اطمینان ٪۹۵	q_{min}	$0.2q_{max}$	q_{max}
بر حسب m^3/h	0.0002	0.0041	**0.0180**
بر حسب ٪	0.45	0.35	**0.29**

همانطور که جدول (۴) نشان می‌دهدْ عدم قطعیت کل با سطح اطمینان ٪۹۵ در دبی q_{min} برابر با ٪۰/۴۵ استْ و در دبی $0.2q_{max}$ تا q_{max} برابر با ٪۰/۳۵ است. به نظر می‌رسد که بانک سونیک‌نازل ساخته شده قابلیت استفاده در کالیبراسیون دبی‌سنج‌های دیافراگمی مدل G-4 را دارد. در صورتی که نگاه شرکت ملی گاز ایران به این موضوع خیلی سخت‌گیرانه‌تر باشدْ به راحتی می‌توان با انتخاب ترنسمیتر دمای دقیق‌تر به عدم قطعیت‌های به مراتب بهتری دست یافت.

۵. نتیجه گیری

بر اساس محاسبات و نتایج حاصله، می‌توان نتیجه‌گیری کرد که بیشترین تاثیر در افزایش عدم قطعیت دستگاه بانک سونیک‌نازل را عوامل عدم قطعیت نازل‌ها بر اساس گواهی کالیبراسیون، عدم قطعیت در دبی حجمی در شرایط پایه بر اساس گواهینامه مربوط به هر نازل، عدم قطعیت در اندازه‌گیری دمای گاز ورودی به نازل و عدم قطعیت مربوط به محاسبات چگالی گاز ورودی به نازل و دبی‌سنج در حال تست دارند. عمده ترین عامل تاثیر گذار بر افزایش عدم قطعیت چگالی گاز ورودی مربوط به ترانسمیتر دما است. بنابراین به نظر می‌رسد با انتخاب ترانسمیتر دمایی با عدم قطعیت پایین‌تر می‌توان تاثیر سه عامل آخر را به شدت کاهش داد. اما برای کاهش تاثیر دو عامل اول باید سونیک‌هایی با عدم قطعیت بهتر خریداری کرد. لذا شرکت مهندسی توسعه راهبردی انرژی پارس توانایی طراحی و تولید صحت‌سنج‌های بانک سونیک‌نازل مطابق با استاندارد ISO-9300 را برای صحت‌سنجی کنتورهای گاز دیافراگمی در مدل‌های مختلف اعلام می‌دارد.

قدردانی و تشکر

در انتها لازم می‌دانم از مساعدت‌ها و همکاری شرکت مهندسی توسعه راهبردی انرژی پارس و صبر و تحمل مدیرعامل محترم آن شرکت جهت به ثمر رسیدن و اجرای این پروژه تشکر و قدردانی نمایم.

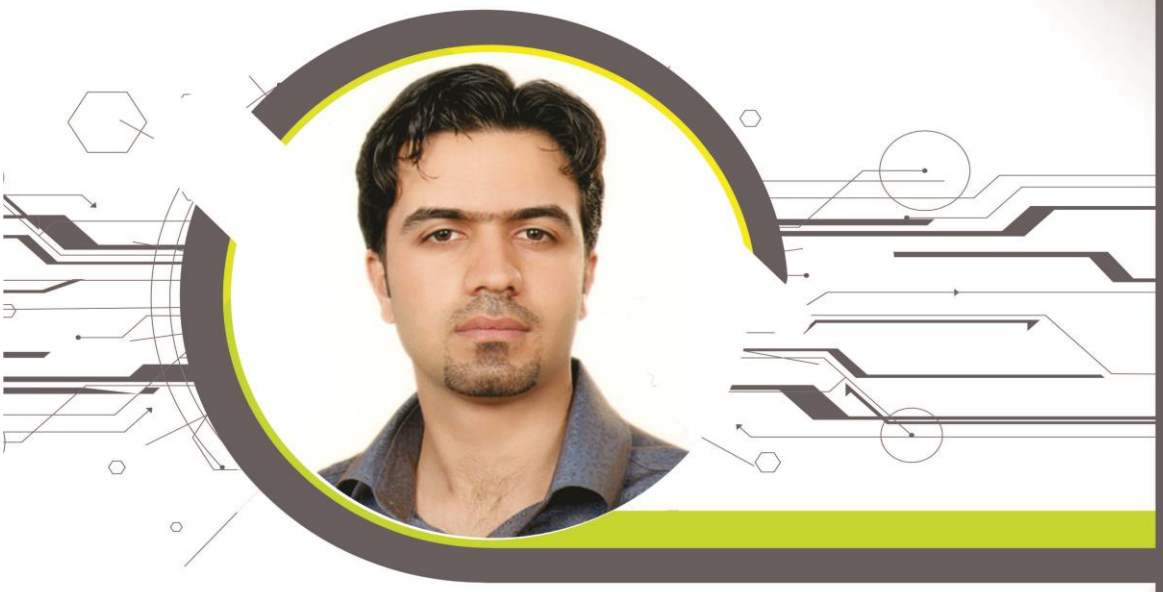
۲-۱۳- مراجع

[1] Probert, C. "An inter-comparison of high pressure gas facilities at six European laboratories using a turbine meter and a venturi meter calibration package." (2000).

[2] AGA, American Gas Association, “The Theory and Operations of Meter Shop Sonic Nozzle Proving Systems for the Natural Gas Industry”, Catalog No. XQ0308, (March 2003).

[3] International standard ISO 9300, “Probert, C. "An inter-comparison of high pressure gas facilities at six European laboratories using a turbine meter and a venturi meter calibration package”, second edition, (2005).

محاسبه‌ی عدم قطعیت ترکیبی سیستم میترینگ گاز پالایشگاه شهید هاشمی‌نژاد بر اساس استاندارد ISO-5168



ایمان اکبری
استادیار دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، دانشکده فنی و مهندسی
مازیار سیاح‌نژاد
کارشناس ارشد کنترل کیفیت گاز طبیعی، واحد اندازه‌گیری مدیریت دیسپچینگ ملی گاز ایران
نرجس السادات رضوی
مدیرعامل شرکت دانش‌بنیان کاوش انرژی ایرانیان

محاسبه‌ی عدم قطعیت ترکیبی سیستم میترینگ گاز پالایشگاه شهید هاشمی‌نژاد بر اساس استاندارد ISO-5168

ایمان اکبری
دکترای مهندسی شیمی، استادیار دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات دانشکده فنی و مهندسی
مازیار سیاح‌نژاد
کارشناس ارشد کنترل کیفیت گاز طبیعی، واحد اندازه‌گیری مدیریت دیسپچینگ ملی گاز ایران
نرجس السادات رضوی
مدیرعامل شرکت دانش‌بنیان کاوش انرژی ایرانیان

چکیده:

در اندازه‌گیری گاز، محاسبه و تعیین عدم قطعیت ابزارهای اندازه‌گیری از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. یکی از موارد بسیار مهم در این زمینه عدم قطعیت ترکیبی سیستم اندازه‌گیری و برهم‌کنش‌ها و اثرات متقابل اجزاء سیستم اندازه‌گیری بر یکدیگر و بر عدم قطعیت کلی سیستم است. در این مقاله به محاسبه‌ی عدم قطعیت ترکیبی سیستم میترینگ اریفیسی پالایشگاه گاز شهید هاشمی‌نژاد طبق استاندارد ISO-5168 پرداخته شده است. طبق نتایج حاصل از این پژوهش، در دبی عبوری ۱۰۴۷۰۷/۶۸ Sm^3/hr، عدم قطعیت ترکیبی سیستم مورد مطالعه برابر با ۰/۸۹۷ درصد به دست آمده است. بیشترین عدم قطعیت مربوط به ضریب تخلیه‌ی اریفیس (۰/۶۰۸۹ درصد) است. پس از این پارامتر، پارامترهای اختلاف فشار، فشار، قطر لوله، قطر روزنه‌ی اریفیس، دانسیته، نسبت ضرایب تراکم‌پذیری دما و و فاکتور انبساط به ترتیب بیشترین عدم قطعیت را دارند. این امر بیانگر این موضوع است که خطای ترکیبی سیستم اندازه‌گیری بیشتر از عدم قطعیت تک‌تک المان‌ها بوده و نمی‌توان تنها به در محدوده‌ی مجاز بودن عدم قطعیت المان‌های اندازه‌گیری به صورت مجزا اکتفا نمود. همچنین بر طبق پیش‌بینی مدل، در دبی حدود ۳۵ هزار متر مکعب بر ساعت، عدم قطعیت این سیستم نزدیک به ۵ درصد پیش‌بینی می‌شود. این امر حاکی از تأثیر قابل توجه دبی بر عدم قطعیت به خصوص در میتر اریفیسی است.

کلمات کلیدی: عدم قطعیت ترکیبی، اریفیس، استاندارد ISO-5168، پالایشگاه شهید هاشمی‌نژاد، ضریب تخلیه‌ی اریفیس

۱. مقدمه

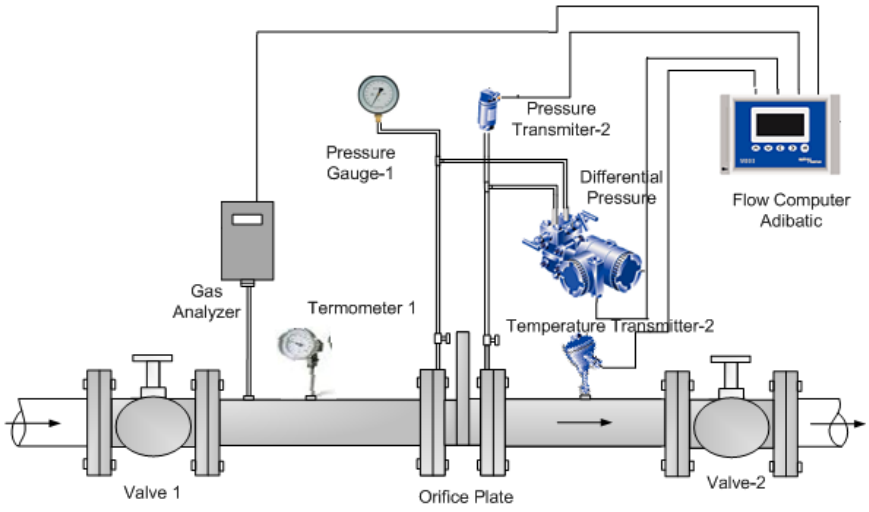
با توجه به افزایش ضریب نفوذ گاز در کشور و روند رو به رشد تولید و مصرف گاز در سال‌های اخیر، لازم است تا به مبحث اندازه‌گیری دقیق و صحیح گاز به عنوان یک چالش و مسأله‌ی بسیار مهم، توجه ویژه‌ای نمود. طبق آمارها میزان گاز مصرفی کشور در سال ۱۳۹۴ بالغ بر ۱۵۸ میلیارد متر مکعب گزارش شده است. خطای بسیار کم در اندازه‌گیری این حجم زیاد گاز علاوه بر ضرر و زیان مالی، منجر به مشکلات متعددی در اندازه‌گیری گاز در سیستم انتقال و توزیع شده و مشکلاتی از قبیل مبحث گازهای گمشده را به وجود می‌آورد.

یکی از مهم‌ترین مباحث در اندازه‌گیری صحیح گاز، عدم قطعیت فلومتر به عنوان ابزار اندازه‌گیری است. در این زمینه بر طبق استانداردها و دستورالعمل‌های مربوطه، لازم است عدم قطعیت تک‌تک اجزاء سیستم اندازه‌گیری نظیر المان اندازه‌گیری (به عنوان مثال، اریفیس)، دماسنج، ترانسمیتر دما و فشار و ... در محدوده‌ی مجاز باشد. علاوه بر این، یکی از موارد بسیار حیاتی که متأسفانه امروزه به آن توجه زیادی نمی‌شود، عدم قطعیت ترکیبی سیستم اندازه‌گیری و برهم‌کنش‌ها و اثرات متقابل اجزاء سیستم اندازه‌گیری بر یکدیگر و بر عدم قطعیت کلی سیستم است. در استاندارد ISO-5168 به روند محاسبه‌ی عدم قطعیت ترکیبی سیستم اندازه‌گیری پرداخته شده است [۱]. در این راستا در این مقاله به محاسبه‌ی عدم قطعیت تکمیلی سیستم میترینگ گاز پالایشگاه گاز شهید هاشمی‌نژاد پرداخته شده است.

۲. روش تحقیق

۲-۱. شرح ایستگاه اندازه‌گیری اریفیسی

اریفیس یکی از ابزارهای اندازه‌گیری دبی است که بر اساس افت فشار سیال، دبی جریان عبوری را تعیین می‌نماید [۲]. در شکل (۱) یک ایستگاه اریفیسی به همراه متعلقات آن نشان داده شده است.



شکل ۱ : یک ایستگاه اریفیسی به همراه متعلقات آن

یک ایستگاه اندازه‌گیری اریفیسی از یک صفحه اریفیس استاندارد به همراه ابزار اندازه‌گیری اختلاف فشار (مطابق با استاندارد ISO5167:2) که اختلاف فشار قبل و بعد از اریفیس را اندازه‌گیری می‌نماید، تشکیل شده است [۳]. بر اساس بخش ۵-۲-۲-۳ استاندارد NORSOK I-104، فشار در بالادست صفحه‌ی اریفیس و دمای جریان گاز در پائین‌دست صفحه اریفیس نیز باید اندازه‌گیری شود [۴]. علاوه بر دما و فشار گاز، دانسیته‌ی گاز نیز یکی از پارامترهای مورد نیاز برای تعیین دبی گاز عبوری است. برای محاسبه‌ی دانسیته، عموماً از سه روش زیر استفاده می‌شود: ۱- دانسیته با استفاده از دانسیته‌متر نصب شده در پائین‌دست جریان اندازه‌گیری می‌گردد. ترکیب درصد گاز برای محاسبه‌ی ضریب تراکم‌پذیری و ارزش حرارتی گاز استفاده می شود. ترکیب درصد گاز می‌تواند مقدار ثابت و پیش‌فرض بوده یا اینکه اندازه‌گیری شود.

۲- ترکیب اجزاء گاز با استفاده از دستگاه کرموتوگرافی آنلاین اندازه‌گیری می‌شود و با استفاده از ترکیب اجزاء گاز ضریب تراکم‌پذیری، دانسیته و همچنین ارزش حرارتی گاز محاسبه می‌شود.

۳- ترکیب اجزاء گاز با استفاده از نمونه‌برداری نقطه‌ای و آنالیز در آزمایشگاه تعیین می‌گردد. از این ترکیب اجزاء به دست آمده و همچنین دما و فشار برای محاسبه‌ی ضریب تراکم‌پذیری، دانسیته و همچنین ارزش حرارتی گاز استفاده می‌گردد.

۲-۲- معادلات حاکم و مبانی محاسباتی

طبق استاندارد ISO 5167:2 [۳] و همچنین بخش دوم گزارش AGA شماره ۳ [۵] رابطه‌ی دبی حجمی عبوری از اریفیس به شکل رابطه (۱) ارائه شده است.

$$q_m = \frac{C}{\sqrt{1-\left(\frac{d}{D}\right)^4}} \varepsilon \frac{\pi d^2}{4} \sqrt{2\rho_1 \Delta P} \qquad (۱)$$

در رابطه‌ی (۱)، ρ دانسیته در بالادست جریان است که با استفاده از دستگاه دانسیته‌متر اندازه‌گیری شده یا با استفاده از معادله‌ی گاز واقعی و با مشخص‌بودن دما و فشار و همچنین ضریب تراکم‌پذیری گاز محاسبه می‌گردد. طبق رابطه‌ی گاز واقعی، دانسیته‌ی گاز در بالادست را می‌توان به صورت رابطه (۲) نوشت:

$$\rho_1 = \frac{1}{Z_1}\frac{P_1}{RT_1} \qquad (۲)$$

بر این اساس و با کاربرد رابطه‌ی (۲) و جایگزینی در رابطه (۱) و همچین استفاده از ضریب تراکم‌پذیری گاز برای محاسبه‌ی دانسیته، رابطه‌ی دبی حجمی در شرایط استاندارد را می‌توان به صورت رابطه (۳) نوشت.

$$q_{v0} = \frac{P_1 T_0 Z_0}{P_0 T_1 Z_1} \frac{C}{\sqrt{1-\left(\frac{d}{D}\right)^4}} \varepsilon \frac{\pi d^2}{4} \sqrt{\frac{2Z_1 R T_1 \Delta P}{P_1 m}} = \frac{Z_0 T_0}{P_0} \frac{C}{\sqrt{1-\left(\frac{d}{D}\right)^4}} \varepsilon \frac{\pi d^2}{4} \sqrt{\frac{2P_1 R \Delta P}{Z_1 m T_1}} \qquad (۳)$$

رابطه‌ی (۳) دبی حجمی استاندارد عبوری از اریفیس را نشان می‌دهد که تابع پارامترهایی نظیر اختلاف فشار، فشار بالادست، قطر اریفیس و قطر لوله، ضریب تراکم‌پذیری و ... است. ضریب تخلیه‌ی اریفیس و همچنین پارامتر انبساط آن با استفاده از استاندارد ISO 5167:2 محاسبه می‌گردد. بر این اساس می‌توان گفت که عدم قطعیت نیز تابع عدم قطعیت هر یک از پارامترهای معادله‌ی (۳) است. در نتیجه فرمول عدم قطعیت ترکیبی دبی حجمی استاندارد اندازه‌گیری‌شده به شکل رابطه‌ی (۴) حاصل می‌گردد [۶].

$$\left(\frac{u(q_{v0})}{q_{v0}}\right)^2 = \left(\frac{u(C)}{C}\right)^2 + \left(\frac{u(\varepsilon)}{\varepsilon}\right)^2 + \left(\frac{2(d/D)^4}{1-(d/D)^4}\right)^2\left(\frac{u(D)}{D}\right)^2 + \left(\frac{2}{1-(d/D)^4}\right)^2\left(\frac{u(d)}{d}\right)^2 + \left(\frac{1}{2}\right)^2\left(\frac{u(\Delta P)}{\Delta P}\right)^2 + \left(\frac{1}{2}\right)^2\left(\frac{u(P_1)}{P_1}\right)^2 + \left(\frac{u\left(Z_0/\sqrt{mZ_1}\right)}{Z_0/\sqrt{mZ_1}}\right)^2 + \left(\frac{1}{2}\right)^2\left(\frac{u(T_1)}{T_1}\right)^2 \quad (۴)$$

همان‌گونه که مشاهده می‌شود، عدم قطعیت ترکیبی فلومتر اریفیسی، تابع عدم قطعیت تک‌تک المان‌های مؤثر بر اندازه‌گیری است. از طرف دیگر در استاندارد ISO-5168 برای محاسبه‌ی عدم قطعیت المان‌های اندازه‌گیری دو روش Detailed و Total ارائه شده است. در روش Total، عدم قطعیت هر یک از پارامترهای رابطه‌ی (۴) مقداری ثابت در نظر گرفته می‌شود. اما در روش Detailed عدم قطعیت‌های ارائه شده در رابطه‌ی (۴)، بر اساس عدم قطعیت جزئی پارامترهای المان مربوطه تعیین می‌گردد. به عنوان مثال رابطه‌ی Detailed برای محاسبه‌ی عدم قطعیت مربوط به دما در رابطه (۵) نشان داده شده است.

$$u_c^2(\hat{T}) = u^2(\hat{T}_{elem,transm}) + u^2(\hat{T}_{stab,transm}) + u^2(\hat{T}_{RFI}) + u^2(\hat{T}_{temp}) + u^2(\hat{T}_{stab,elem}) + u^2(\hat{T}_{vinbration}) + u^2(\hat{T}_{power}) + u^2(\hat{T}_{cable}) + u^2(\hat{T}_{misc}) \quad (۵)$$

همانگونه که نشان داده شده است، تک‌تک المان‌های دماسنج بر عدم قطعیت اثر ناشی از دماسنج تأثیر می‌گذارند. روابط مربوط به عدم قطعیت دیگر پارامترهای نشان داده شده در رابطه‌ی (۴) در مرجع (۶) آورده شده است که در اینجا با توجه به محدودیت‌ها از ذکر آن‌ها صرف نظر شده است.

همانگونه که بیان گردید هدف از این مقاله، محاسبه‌ی عدم قطعیت اندازه‌گیری دبی حجمی گاز با استفاده از روابط فوق و پارامترهای آن برای یکی از سیستم‌های میترینگ اریفیسی پالایشگاه گاز شهید هاشمی‌نژاد است. در بخش بعد به بیان مشخصات سیستم مورد مطالعه و پارامترهای مورد نیاز جهت انجام محاسبات پرداخته شده است.

۲-۱. مشخصات کلی سیستم مورد مطالعه

سیستم مورد مطالعه یکی از رن‌های اریفیسی با قطر نامی ۲۰ اینچ است. با توجه به اینکه فشار، دما، دبی و دیگر پارامترهای خط به صورت لحظه‌ای تغییر می‌نماید، از اطلاعات مربوط به یکی از روزهای پائیز سال ۱۳۹۵ جهت پارامترهای عملیاتی ورودی مورد نیاز استفاده شده است. در جدول (۱) مشخصات ایستگاه اریفیسی مورد مطالعه‌ی سیستم نشان داده شده است.

جدول ۱. پارامترهای عملیاتی سیستم اریفیسی مورد مطالعه

ردیف	پارامتر	مقدار
۱	فشار خط (bar_abs)	۶۳/۳۵۷۴
۲	دما (°C)	۲۸/۶۲۵۵
۳	دبی حجمی استاندارد (Sm^3/hr)	۱۰۴۷۰۷/۶۸
۴	قطر لوله (mm)	۴۷۷/۹۸۴
۵	قطر روزنه اریفیس (mm)	۳۱۷/۹۴۴
۶	ضریب انبساط حرارتی لوله (1/°C)	۰/۰۰۰۰۱۱۲
۷	ضریب انبساط حرارتی اریفیس (1/°C)	۰/۰۰۰۰۱۷۳

در ایستگاه اندازه‌گیری مورد مطالعه، از روش NX-19 برای محاسبه‌ی ضریب تراکم‌پذیری و نهایتاً دانسیته‌ی گاز استفاده می‌شود. پارامترهای مورد استفاده برای محاسبه‌ی ضریب تراکم‌پذیری با استفاده از این روش در جدول (۲) نشان داده شده است.

جدول ۲. پارامترهای ورودی جهت محاسبه‌ی ضریب تراکم‌پذیری با استفاده از روش NX-19

ردیف	پارامتر	مقدار
۱	وزن مخصوص (S.Gr)	۰/۵۶۷۲۵۲
۲	جزء مولی نیتروژن (درصد)	۰/۵۲۸
۳	جزء مولی دی‌اکسیدکربن (درصد)	۰/۲۱۹

در این مقاله ضریب تراکم‌پذیری با استفاده از ترکیب اجزاء گاز و توسط گزارش AGA شماره ۸ تفصیلی [۷] نیز تعیین شده است و نتایج حاصل با نتایج به دست آمده با استفاده از روش NX-19 مقایسه شده است تا عدم قطعیت ضریب تراکم‌پذیری تعیین گردد. ترکیب درصد اجزاء گاز برای استفاده در روش AGA شماره ۸ در جدول (۴) نشان داده شده است.

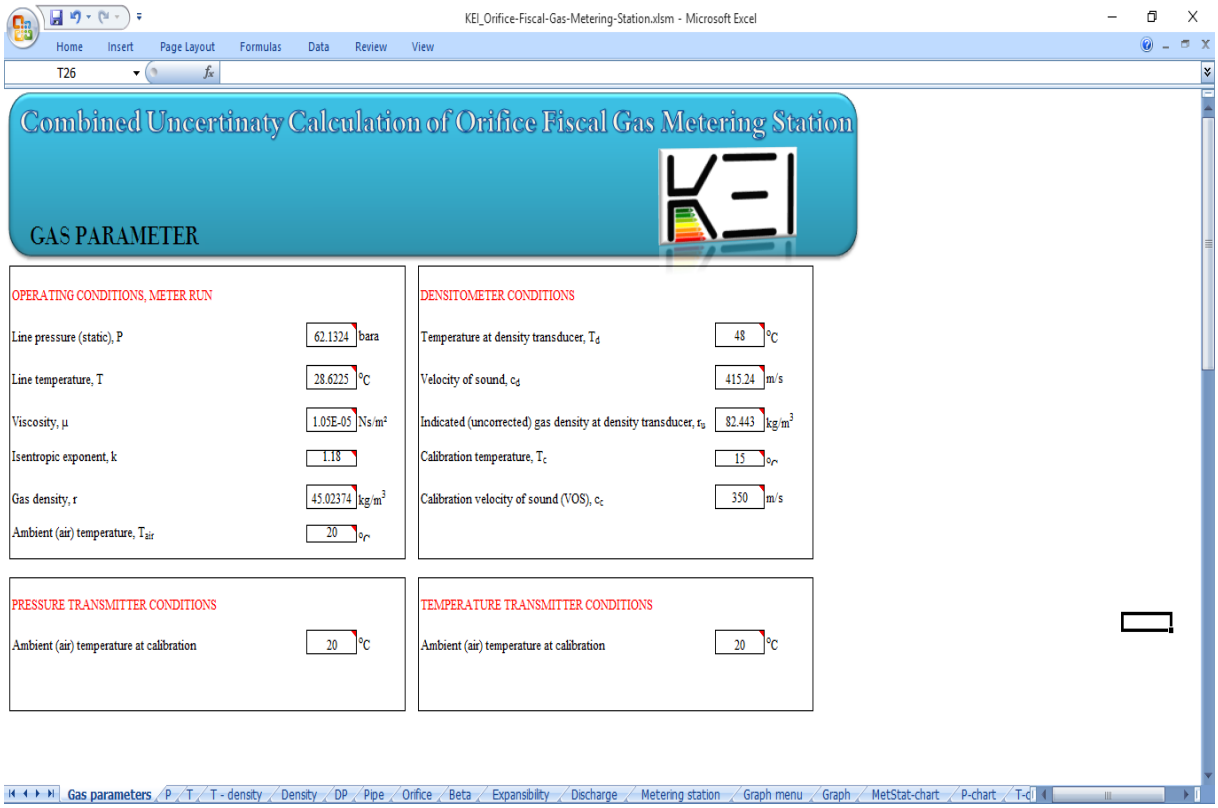
جدول ۴. ترکیب درصد اجزاء گاز بر اساس نتایج آزمایشگاهی آنالیز گاز

ردیف	ماده	جزء مولی (درصد)	ردیف	ماده	جزء مولی (درصد)
۱	متان	۹۸/۳۹۲	۷	نرمال‌پنتان	۰/۰۱۹
۲	اتان	۰/۵۷۸	۸	هگزان و سنگین‌تر	۰/۰۸۱
۳	پروپان	۰/۱	۹	نیتروژن	۰/۵۲۸
۴	ایزوبوتان	۰/۰۳	۱۰	دی‌اکسیدکربن	۰/۲۱۹
۵	نرمال‌بوتان	۰/۰۳۵	۱۱	سولفید هیدروژن	۲/۶ppm
۶	ایزوپنتان	۰/۰۱۸	۱۲	آب	۵/۸ppm

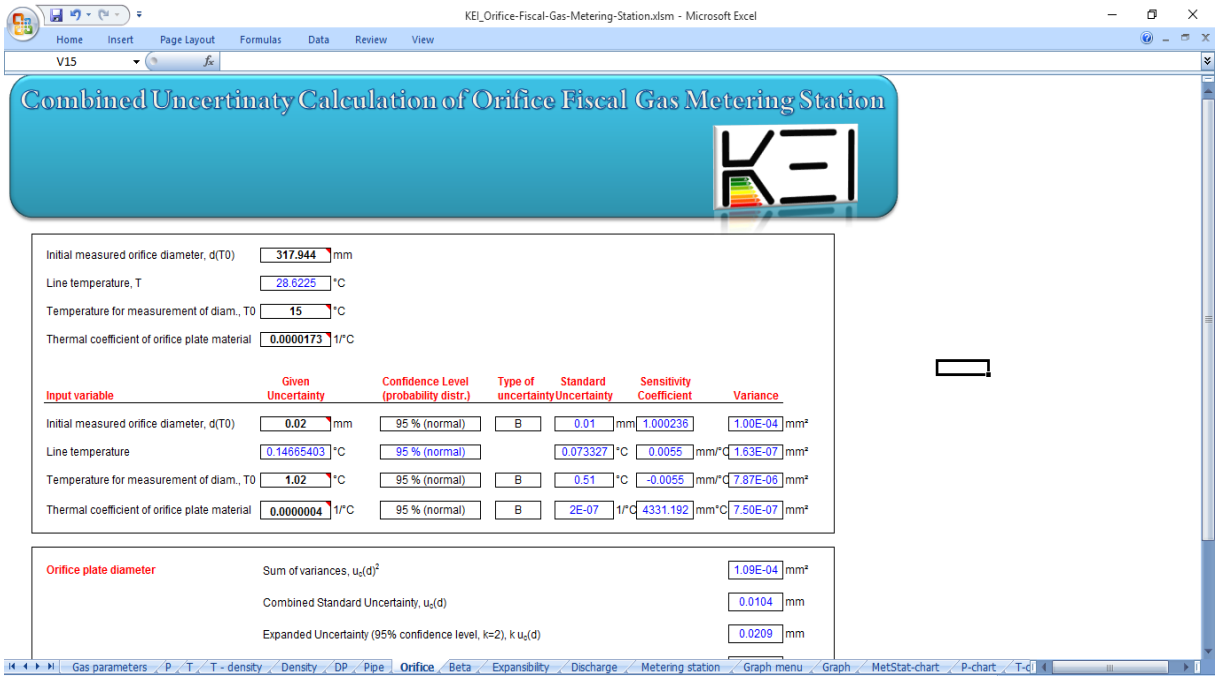
دیگر اطلاعات مورد نیاز برای انجام محاسبات شامل اطلاعات مربوط به کالیبراسیون دستگاه‌ها و گواهی‌نامه‌های کالیبراسیون دستگاه‌ها، اطلاعات مربوط به اندازه‌گیری ابعاد اریفیس و لوله، اطلاعات مربوط به ترنسمیترهای دما و فشار و ... از مدارک مربوطه استخراج شده و به همراه اطلاعات ذکر شده در جداول فوق در برنامه‌ی کامپیوتری جهت انجام محاسبات استفاده شده است. برنامه‌ی محاسبات در نرم‌افزار اکسل ایجاد شده است.

۲-۴. نتایج و بحث روی نتایج

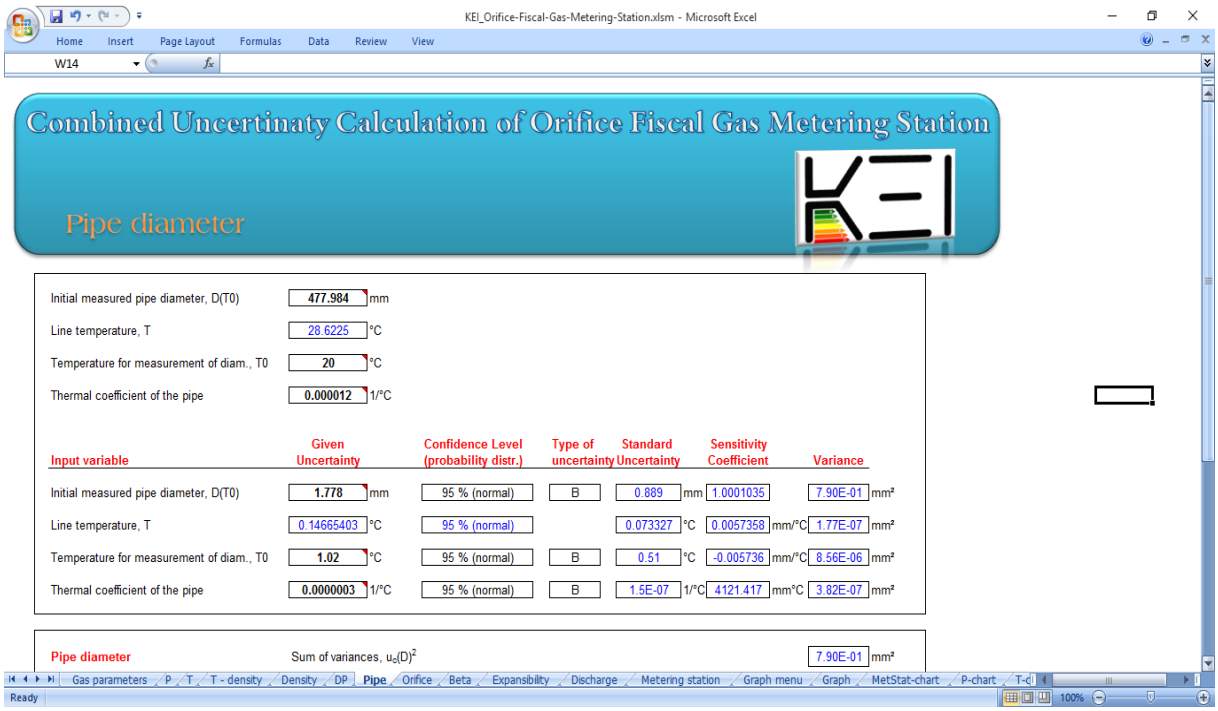
در این مقاله به محاسبه‌ی عدم قطعیت ترکیبی سیستم اندازه‌گیری جریان گاز طبیعی پالایشگاه گاز هاشمی‌نژاد پرداخته شده است. همان‌گونه که بیان گردید، برنامه‌ی انجام محاسبات بر طبق استاندارد ISO-5168 در برنامه‌ی اکسل برای محاسبه‌ی عدم قطعیت تدوین شده است. برنامه‌ی مذکور شامل سربرگ‌های پارامترهای عملیاتی، فشار، دما، اختلاف فشار، مشخصات لوله، اریفیس و ... است که تعدادی از آن‌ها در شکل‌های زیر نشان داده شده است.



شکل ۲. تصویر فایل اکسل ایجاد شده جهت محاسبه‌ی عدم قطعیت ترکیبی گاز (زیربرگ پارامترهای عملیاتی گاز)



شکل ۳. تصویر فایل اکسل ایجاد شده جهت محاسبه‌ی عدم قطعیت ترکیبی گاز (زیربرگ مشخصات صفحه اریفیس)

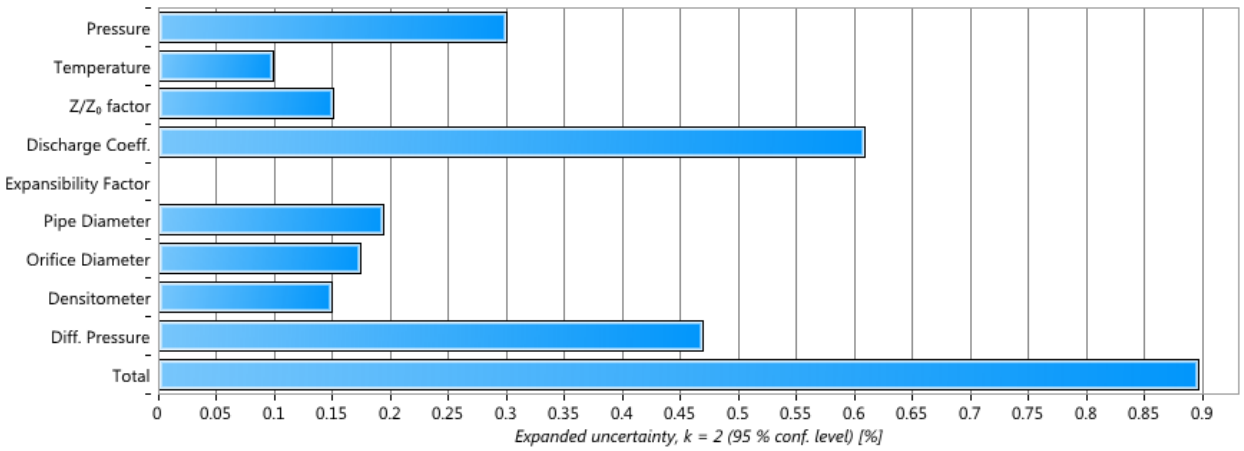


شکل ۴. تصویر فایل اکسل ایجاد شده جهت محاسبه‌ی عدم قطعیت ترکیبی گاز (زیربرگ مشخصات لوله)

پس از واردکردن تمامی داده‌های مورد نیاز جهت انجام محاسبات، عدم قطعیت تک‌تک المان‌های اندازه‌گیری و عدم قطعیت ترکیبی سیستم تعیین می‌گردد. در جدول (۵) نتایج حاصل از محاسبه‌ی عدم قطعیت نشان داده شده است

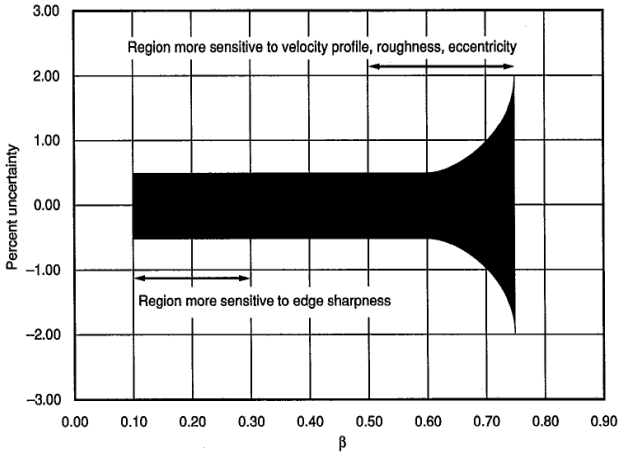
جدول ۵: نتایج حاصل از محاسبات عدم قطعیت

Input Variable	Uncertainty	Unit	Confidence	Standard uncertainty. u_i,	Sensitivity coeff. s_i,	Variance $(S_i \cdot u_i)^2$
Pressure, P	0.3	%	95% (norm)	0.15 %	1.000 e+0	2.251 e-2
Temperature, T	0.0994	%	95% (norm)	0.0497 %	1.000 e+0	2.471 e-3
Z/Z_o factor	0.1512	%	95% (norm)	0.0756 %	1.000 e+0	5.719 e-3
Discharge Coefficient, C	0.6089	%	95% (norm)	0.3044 %	1.000 e+0	9.267 e-2
Expansibility Factor, ε	0.0007	%	95% (norm)	0.0003 %	1.000 e+0	1.083 e-7
Pipe Diameter, D	0.4	%	95% (norm)	0.2 %	4.869 e-1	9.481 e-3
Orifice Diameter, d	0.07	%	95% (norm)	0.035 %	2.487 e+0	7.576 e-3
Densitometer, ρ	0.3	%	95% (norm)	0.15 %	5.000 e-1	5.625 e-3
Diff. Pressure, ΔP	0.9396	%	95% (norm)	0.4698 %	4.999 e-1	5.514 e-2
Sum of Variances, $\sum (s_i \cdot u_i)^2$						**0.2012 (%)^2**
Relative Combined Standard Uncertainty						**0.449 %**
Relative Expanded Uncertainty						**0.897 %**



شکل ۵: نمودار میله‌ای عدم قطعیت پارامترهای مؤثر و همچنین عدم قطعیت ترکیبی

همانگونه که هم در جدول و هم در شکل نشان داده شده است، عدم قطعیت ترکیبی سیستم مورد مطالعه کمتر از ۰/۹ درصد (۰/۸۹۷) است. بیشترین عدم قطعیت مربوط به ضریب تخلیه‌ی اریفیس (۰/۶۰۸۹ درصد) است. در بخش اول استاندارد API MPMS - شکل (۶) - عدم قطعیت در محاسبه‌ی ضریب تخلیه‌ی اریفیس نشان داده شده است [۸].



شکل ۶: نمودار درصد عدم قطعیت ضریب تخلیه اریفیس بر حسب β [۸]

در این استاندارد ذکر شده است که کمترین عدم قطعیت مربوط به ضریب تخلیه‌ی اریفیس، برای β برابر با ۰/۶ حاصل می‌شود. در ایستگاه مورد مطالعه، پارامتر β (نسبت قطر روزنه‌ی اریفیس به قطر لوله در شرایط دمایی خط) برابر با ۰/۶۶۲۵ است. با توجه به شکل (۶) در β= ۰/۶۶۲۵ عدم قطعیت کمی بیشتر از ۰/۵ است که با عدد به دست آمده در این پژوهش برای عدم قطعیت ضریب تخلیه، همخوانی دارد.

پس از این پارامتر، پارامترهای اختلاف فشار، فشار، قطر لوله، قطر روزنه‌ی اریفیس، دانسیته، نسبت ضریب تراکم‌پذیری و دما به ترتیب بیشترین عدم قطعیت را دارند. کمترین عدم قطعیت نیز مربوط به فاکتور انبساط است که چندان دور از ذهن نیست.

اما در مورد نسبت ضریب تراکم‌پذیری در شرایط خط لوله به نسبت ضریب تراکم‌پذیری در شرایط استاندارد (Z/Z_o)، ذکر این نکته ضروری است که بر طبق گزارش AGA شماره ۸، چنانچه فشار عملیاتی در محدوده‌ی صفر تا ۱۲۰ بار و دمای گاز در محدوده‌ی ۸- تا ۶۲ درجه‌ی سانتیگراد باشد، خطای محاسبه‌ی ضریب تراکم‌پذیری کمتر از ۰/۱ درصد است. اما در ایستگاه مورد مطالعه از روش NX-19 استفاده می‌شود که این روش به خصوص برای گازهای فقیر (گازهای با متان زیاد یا ارزش حرارتی کم) خطای بیشتری نسبت به روش AGA شماره ۸ دارد. در جدول (۶) مقادیر ضریب تراکم‌پذیری با استفاده از این دو روش مقایسه شده است.

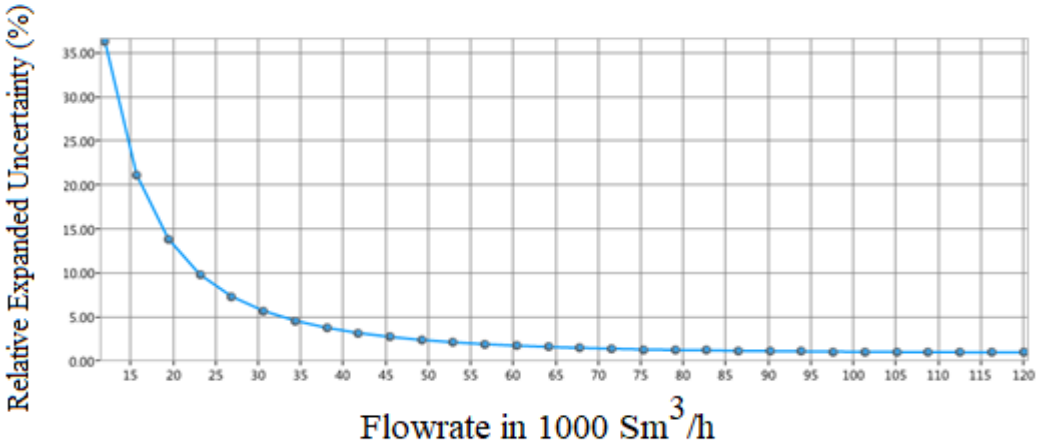
جدول ۶: مقایسه ضریب تراکم‌پذیری و دانسیته با استفاده از روش NX-19 و AGA شماره ۸ تفصیلی برای گاز مورد مطالعه

ردیف	پارامتر	NX-19	AGA No.8 Detailed
۱	ضریب تراکم‌پذیری در شرایط مرجع	۰/۹۹۷۹۸	۰/۹۹۷۹۴
۲	ضریب تراکم‌پذیری در شرایط عملیاتی لوله	۰/۹۰۰۴۴۸	۰/۹۰۱۵۲
۳	دانسیته گاز در شرایط عملیاتی (kg/m^3)	۴۵/۱۱۶۷	۴۵/۰۲۳۷۴

لذا عدم قطعیت ۰/۱۵ درصد به دست آمده در این مقاله برای محاسبه‌ی ضریب تراکم‌پذیری و همچنین دانسیته، چندان دور از واقعیت نیست.

همچنین لازم به ذکر است، علیرغم اینکه حداکثر عدم قطعیت المان‌های اندازه‌گیری حدود ۰/۶ درصد است، اما نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که عدم قطعیت ترکیبی سیستم مورد مطالعه نزدیک ۰/۹ درصد است. این امر بیانگر این موضوع است که نمی‌توان به تنها به رنج بودن عدم قطعیت المان‌های اندازه‌گیری به صورت مجزا اکتفا نمود، چرا که خطای ترکیبی سیستم اندازه‌گیری بیشتر از عدم قطعیت تک‌تک المان‌های سیستم اندازه‌گیری است.

پارامترهای فوق، عدم قطعیت ایستگاه اندازه‌گیری مورد مطالعه را در دبی عبوری برابر با ۱۰۴۷۰۷/۶۸ استاندارد متر مکعب بر ساعت نشان می‌دهند. در شکل (۷) عدم قطعیت ترکیبی در دبی ۱۲۰۰۰ تا ۱۲۰۰۰۰ استاندارد متر مکعب بر ساعت نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، در دبی حدود ۳۵ هزار مترمکعب بر ساعت، عدم قطعیت این سیستم نزدیک به ۵ درصد پیش‌بینی می‌شود. این امر نشان می‌دهد که تأثیر دبی بر عدم قطعیت به خصوص در میتر اریفیسی بسیار مهم است و در دبی‌های کمتر از دبی نامی، هر چند تجهیزات اندازه‌گیری نظیر دماسنج‌ها و ترنسمیترها و ... خطای کمی داشته و کالیبره شده باشند، اما عدم قطعیت ترکیبی می‌تواند بسیار بیشتر از عدم قطعیت تک‌تک المان‌های اندازه‌گیری باشد.



شکل ۷: نمودار تغییرات درصد عدم قطعیت بر حسب دبی گاز عبوری

۳. نتیجه‌گیری

در این مقاله به محاسبه‌ی عدم قطعیت ترکیبی اندازه‌گیری جریان گاز طبیعی برای سیستم میترینگ اریفیسی پالایشگاه گاز شهید هاشمی‌نژاد با قطر نامی ۲۰ اینچ پرداخته شده است. برنامه‌ی انجام محاسبات بر طبق استاندارد ISO-5168 در برنامه‌ی اکسل برای محاسبه‌ی عدم قطعیت تدوین گردیده است. اطلاعات مورد نیاز برای انجام محاسبات شامل پارامترهای عملیاتی، اطلاعات مربوط به کالیبراسیون دستگاه‌ها و گواهی‌نامه‌های کالیبراسیون دستگاه‌ها، اطلاعات مربوط به اندازه‌گیری ابعاد اریفیس و لوله، اطلاعات مربوط به ترنسمیترهای دما و فشار و ... در برنامه‌ی کامپیوتری جهت انجام محاسبات استفاده شده است. نتایج حاصل از این پژوهش نشان می‌دهد که عدم قطعیت ترکیبی سیستم مورد مطالعه کمی کمتر از ۰/۹ درصد است. بیشترین عدم قطعیت مربوط به ضریب تخلیه‌ی اریفیس (۰/۶۰۸۹ درصد) و کمترین عدم قطعیت نیز مربوط به فاکتور انبساط (۰/۰۰۰۳ درصد) است. پس از ضریب تخلیه، پارامترهای اختلاف فشار، فشار، قطر لوله، قطر روزنه‌ی اریفیس، دانسیته، نسبت ضرایب تراکم‌پذیری و دما به ترتیب بیشترین عدم قطعیت را دارند. پارامترهای فوق، عدم قطعیت ایستگاه اندازه‌گیری مورد مطالعه را در دبی عبوری برابر با ۱۰۴۷۰۷/۶۸ نشان می‌دهند. در دبی حدود ۳۵ هزار متر مکعب بر ساعت، عدم قطعیت این سیستم نزدیک به ۵ درصد پیش‌بینی می‌شود. این امر نشان می‌دهد که تأثیر دبی بر عدم قطعیت به خصوص در میتر اریفیسی بسیار مهم است. همچنین لازم به ذکر است علیرغم اینکه حداکثر عدم قطعیت المان‌های اندازه‌گیری حدود ۰/۶ درصد است، اما نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که عدم قطعیت ترکیبی سیستم مورد مطالعه نزدیک ۰/۹ درصد است. این امر بیانگر این موضوع است که نمی‌توان به تنها به رنج بودن عدم قطعیت المان‌های اندازه‌گیری به صورت مجزا اکتفا نمود، چرا که خطای ترکیبی سیستم اندازه‌گیری بیشتر از عدم قطعیت تک‌تک المان‌های سیستم اندازه‌گیری است.

مراجع

[1] ISO 5168, “Measurement of fluid flow – Procedures for the evaluation of uncertainties,” ISO. Geneva, 2005.

[2] ISO 5167-1, “Measurement of fluid flow by means of pressure differential devices inserted in circular cross-section conduits running full – Part 1: General principles and requirements,” ISO, Geneva, 2003.

[3] ISO 5167-2, “Measurement of fluid flow by means of pressure differential devices inserted in circular cross-section conduits running full – Part 2: Orifice plates,” ISO, Geneva, 2003.

[4] NORSOK I-104: “Fiscal measurement system for hydrocarbon gas,” NORSOK standard I-104, Rev. 3, November 2005.

[5] Orifice Metering of Natural Gas and other related Hydrocarbon fluid, AGA3, Part1, Third Edition, October 1990.

[6] Dahl, E., Frøysa, K.-E. and Lunde, P., 2003, “Handbook of Uncertainty Calculations-Fiscal Orifice Gas and Turbine Oil Metering Stations”, Issued by Norwegian Society for Oil and Gas Measurement (NFOGM) and Norwegian Petroleum Directorate.

[7] Starling, K.E. and Savidge, J.L., 1994 (2nd Printing), Compressibility Factors of Natural Gas and Other Related Hydrocarbon Gases, American Gas Association Transmission Measurement Committee Report No. 8, Arlington, USA.

[8] “Natural Gas Fluids Measurement,” API Standard, Chapter 14, Section 3, Part 1, “General Equations and Uncertainty Guidelines,” Third Edition, September 1990.

محاسبه عدم قطعیت اندازه‌گیری خطای نشاندهی در کالیبراسیون یک کنتور آب خانگی

حامد خرمی

پژوهشگر حوزه فلومتری آب و اندازه‌شناسی

محاسبه عدم قطعیت اندازه‌گیری خطای نشاندهی در کالیبراسیون یک کنتور آب خانگی

حامد خرمی

کارشناسی مهندسی مواد دانشگاه کرج

پژوهشگر حوزه فلومتری آب و اندازه‌شناسی

چکیده:

اندازه‌گیری را می‌توان پر کاربرد ترین فن در مهندسی و صنعت تولید و خدمات دانست، کاربردهایی که دانش اندازه‌گیری در طراحی، ساخت، ارائه و کنترل کیفیت محصولات و خدمات دارد در میان تمام دانش‌های مشترک حوزه‌های صنعتی و خدماتی بی‌بدیل است. در علم اندازه‌شناسی علاوه بر نیاز به تخصص در زمینه‌هایی مانند آمار و ریاضیات، نیاز به دانش نظری و تجربی در صنعت مورد نظر نیز وجود دارد. از مهم‌ترین حوزه‌های علم اندازه‌شناسی می‌توان به عدم قطعیت و تخمین آن در اندازه‌گیری اشاره نمود و این‌گونه بیان داشت که اندازه‌گیری بدون در نظر گرفتن و ارزیابی عدم قطعیت آن، تنها بدست آوردن نتایج در قالب اعدادی است که نمی‌توان معنا و تفسیر دقیقی برای آن‌ها بیان داشت. در واقع اندازه‌گیری زمانی انجام می‌شود که بخواهیم بر مبنای نتایج حاصل شده مقایساتی انجام دهیم یا تصمیمی اتخاذ کنیم که در هر دو حالت نیازمند آگاهی از تخمین عدم قطعیت آن اندازه‌گیری هستیم. به عبارت دیگر تخمین عدم قطعیت، شاخص کیفیت یک اندازه‌گیری است و این امر اهمیت موضوع عدم قطعیت در اندازه‌گیری را کاملا نشان می‌دهد. یکی از صنایعی که از اندازه‌گیری در آن در قالب جریان‌سنجی استفاده می‌شود صنعت آب است. الزام محقق شدن درآمد حاصل از توزیع و بازگشت سرمایه صرف شده برای تامین آب و همچنین دست یافتن به اهدافی مانند بهینه‌سازی مدیریت مصرف آب (آشامیدنی، صنعتی و کشاورزی)، اهمیت این اندازه‌گیری را نشان می‌دهد. بنابراین یکی از اقدامات حیاتی در صنعت آب، اندازه‌گیری حجم آب توزیع شده در شبکه‌های آب خانگی، صنعتی و کشاورزی است. تجهیز اندازه‌گیری که برای این منظور استفاده می‌شود کنتور آب است. با توجه به آن‌چه که در مورد اندازه‌گیری مطرح شد، ارزیابی عملکرد (ارزیابی درستی) یک کنتور آب گامی است که باید پیش از بهره‌برداری از آن برداشته شود. این کار نیز از طریق اندازه‌گیری و محاسبه خطای کنتور در مقایسه با یک وسیله مرجع (حجم مرجع) انجام می‌شود و از آنجا که خروجی این اندازه‌گیری، تصمیم‌گیری در مورد مجاز بودن بهره‌برداری کنتور بر مبنای نتایج حاصل شده می‌باشد، تخمین عدم قطعیت به عنوان شاخص کیفیت اندازه‌گیری و مبنای مقایسه نتایج اهمیت پیدا می‌کند. در این مقاله به محاسبه و ارزیابی تخمین عدم قطعیت در اندازه‌گیری خطای نشاندهی یک کنتور آب خانگی با روش کالیبراسون حجمی

پرداخته شده است. فشار آب آزمون در ورودی 500 kPa بوده و از نرخ جریان آزمون استاندارد 2500 l/h استفاده شده است. بعد از محاسبه خطای کنتور به روش ذکر شده در متن، تخمین عدم قطعیت به روش پایین به بالا (Bottom-Up) یا همان مدل‌سازی (ISO GUM) برای اندازه‌گیری غیر مستقیم محاسبه شده است. مدل استاندارد استخراج شده برای محاسبه خطای کنتور، $e_x = \frac{\delta V_{ix}+\delta V_{ix2}+\delta V_{ix1}}{V_x} - 1$ می‌باشد. کمیت‌های ورودی مقدار دهی شده و منابع عدم قطعیت برای هر یک از آن‌ها مشخص و مقدار آن‌ها با استفاده از مقادیر مرجع، مشخصات فنی تجهیز و یا تکرار اندازه‌گیری تعیین شده است. تخمین عدم قطعیت استانداردِ هر یک از منابع بر اساس دامنه انحرافات و توزیع متناسب با نوع عدم قطعیت برآورد شده است. محاسبه ضریب حساسیت برای هر مولفه عدم قطعیت صورت پذیرفته و عدم قطعیت استاندارد مرکب محاسبه شده است. در ادامه بودجه عدم قطعیت برای هریک از مولفه‌های عدم قطعیت (کمیت‌های ورودی) و نهایتاً برای خطای نشاندهیِ یک‌بار اندازه‌گیری، استخراج و جدول‌بندی شده است. در ادامه آزمون تکرارپذیری انجام شده و بودجه عدم قطعیت برای خطای میانگین نیز استخراج شده است. با تخمین درجه آزادی به روش برآورد توزیع عدم قطعیتِ هر مولفه، نوع عدم قطعیت و تخمین سهم آن، درجه آزادی موثر، ϑ_{eff} محاسبه و فاکتور پوششی نهایی، $k = 2.28$ برای احتمال پوشش ٪۹۵ بدست آمده است. در نهایت با استفاده از این فاکتور، عدم قطعیت بسط یافته (Expanded Uncertainty) به شکل عدم قطعیت نسبی برای خطای نسبیِ حاصل شده، تخمین زده شده است: $U = k.u(e_{xav}) = 2.28 \times 0.91 \times 10^{-3} = 2 \times 10^{-3}$، بدین ترتیب در آزمون انجام شده خطای نسبی کنتور به صورت $k = 2.28\ ,\ 95\%$ (0.001 ± 0.002) گزارش می‌شود.

در این مقاله تلاش شده است که از هر دو نوع عدم قطعت (عدم قطعیت نوع A و نوع B) در تخمین عدم قطعیت نهایی استفاده شود. هرچند انحراف معیار حاصل از نتایج تکرارپذیری با ضریب پوششی درست، تخمین مناسبی از عدم قطعیت در این اندازه‌گیری می‌باشد، اما تلاش بر این بوده است که با پرداختن به نوع دیگر عدم قطعیت نیز، تخمین بسیار دقیق‌تری از عدم قطعیت، البته با تسلط بر مفاهیم و عوامل فیزیکی اثرگذار در این اندازه‌گیری بدست آید.

کلمات کلیدی: اندازه‌گیری، عدم قطعیت، کنتور آب خانگی، کالیبراسیون

کالیبراسیون یک کنتور آب خانگی شامل تعیین خطای نسبی نشاندهی کنتور در یک گستره نرخ جریان مشخص می‌باشد. اندازه‌گیری یاد شده با استفاده از یک تجهیز آزمون (test rig) که نرخ جریان مورد نیاز را با فشاری تقریباً معادل 500 kPa (فشار رایج در شبکه آب شهری) برقرار می‌کند، انجام می شود. آب به یک مخزن روباز هدایت شده و در آن جمع می‌شود. این مخزن قطعاً کالیبره بوده و برای تعیین حجم آب مرجع استفاده می‌شود. در ابتدای اندازه‌گیری، این مخزن خالی می‌باشد. مخزن تجمیع دارای یک گلویی باریک است و به یک شاخص که از طریق آن ارتفاع آب در مخزن (میزان پر بودن مخزن) مشخص می‌شود، متصل است. کنتوری که قرار است کالیبره شود، بین دو مخزن (مخزن تغذیه و مخزن تجمیع) قرار می‌گیرد. کنتور دارای یک شمارنده مکانیکی مجهز به نشانگر (عقربه) می‌باشد. اندازه‌گیری در نرخ جریان 2500 l/h به روش شروع و پایان ایستا انجام می‌شود. روش شروع و پایان ایستا بدان معناست که در آغاز و در انتهای اندازه‌گیری (قبل و بعد از آزمون) نرخ جریان صفر می‌باشد. نشاندهی کنتور در ابتدا و انتهای اندازه‌گیری (قبل و بعد از آزمون) ثبت گردیده و همچنین ارتفاع آب در مخزن تجمیع نیز در انتهای اندازه‌گیری ثبت می‌شود. به همین ترتیب دما و فشار آب داخل کنتور و دمای آب در داخل مخزن تجمیع نیز ثبت می‌شوند.

خطای نسبی نشاندهی، e_x ، در یک بار اندازه‌گیری به صورت ذکر شده در فرمول (۱) محاسبه می‌شود:

$$e_x = \frac{\delta V_{ix} + \delta V_{ix2} + \delta V_{ix1}}{V_x} - 1 \qquad (۱)$$

$$V_x = (V_{is} + \delta V_{is})\big(1 + \alpha_S(t_s - t_0)\big)\big(1 + \alpha_W(t_x - t_s)\big)\big(1 - K_W(P_x - P_s)\big) \qquad (۲)$$

ترم‌های روابط (۱) و (۲) به شرح جدول (۱) می‌باشد.

جدول ۱ : توضیح ترم‌های روابط (۱) و (۲)

ترم‌های روابط (۱) و (۲)	توضیح ترم‌های معادلات (۱) و (۲)
$\Delta V_{ix} = V_{ix2} - V_{ix1}$	اختلاف در نشاندهی های کنتور
V_{ix1}, V_{ix2}	نشاندهی کنتور در آغاز و انتهای اندازه‌گیری
$\delta V_{ix1}, \delta V_{ix2}$	تصحیح‌های مربوط به تفکیک‌پذیری نشاندهی کنتور
V_x	حجمی که در حین اندازه‌گیری تحت شرایط مشخصی مانند فشار P_x ، و دمای t_x در ورودی کنتور از داخل آن عبور می‌کند
V_{is}	حجم نشاندهی شده در شاخص گلویی مخزن تجمیع در پایان اندازه‌گیری
δV_{is}	تصحیح حجم نشاندهی شده در شاخص گلویی مخزن تجمیع که به تفکیک‌پذیری این شاخص مربوط می‌شود
α_S	ضریب انبساط حرارتی حجم ماده تشکیل‌دهنده بدنه مخزن
t_s	دمای مخزن تجمیع
t_0	دمای مرجعی که مخزن در آن کالیبره شده است
α_W	ضریب انبساط حرارتی حجم آب
t_x	دمای آب در ورودی کنتور
K_W	ضریب قابلیت فشردگی آب
P_s	فشار در مخزن تجمیع (مقدار این فشار صفر می‌باشد مگر آنکه فشار خارجی به آن اعمال شود)
P_x	فشار آب در ورودی کنتور

۱– مخزن تجمیع (V_{is}, t_0)

گواهی کالیبراسیون مخزن حجمی مبین آن است که شاخص گلویی، حجم 200 l را در دمای مرجع $t_0 = 20°C$ نشان می‌دهد و عدم قطعیت کالیبراسیون، 0.1% با فاکتور پوششی $k = 2$ می‌باشد. بدین ترتیب عدم قطعیت بسط یافته مقدار نهایی 0.2 l با فاکتور پوششی $k = 2$ خواهد بود.

۱–۱– تفکیک پذیری شاخص مخزن تجمیع (δV_{is})

سطح آب داخل مخزن تجمیع با تفکیک پذیری ± 1 میلیمتر قابل تشخیص است. از آنجا که ضریب شاخص مخزن $0.02\ ^{l}/_{mm}$ می‌باشد (هر یک میلیمتر بر روی شاخص، معادل $0.02\ l$ است)، بنابراین انحراف حجم آب داخل مخزن تجمیع با مقدار نشاندهی مشاهده شده آن با مقدار تفکیک پذیری $\pm 0.02\ l$ تخمین زده می‌شود.

۱–۲– دمای آب و دمای مخزن تجمیع (α_s, t_s)

دمای آب در مخزن تجمیع 15°C با تلورانس $\pm 2\ K$ برآورد شده است. حدود مشخص شده تمامی منابع عدم قطعیت احتمالی از قبیل کالیبراسیون سنسورهای دما، تفکیک‌پذیری نمایشگر دما و تغییرات دمایی در داخل مخزن را شامل می‌شود. ضریب انبساط ماده تشکیل دهنده مخزن (فولاد) در بازه دمایی در نظر گرفته شده برابر با $\alpha_S = 51 \times 10^{-6} K^{-1}$ می‌باشد. از آنجا که عدم قطعیتی به همراه این ضریب ارائه نشده است، بنابراین فرض می‌شود که مقدار عدم قطعیت آن برابر با بازه کوچکترین رقم معنادار باشد. بدین ترتیب در چنین شرایطی فرض می‌شود که انحرافات ناشناخته (تصادفی) در گستره‌ی $\pm 0.5 \times 10^{-6} K^{-1}$ قرار بگیرد.

۱–۳– دمای آب داخل کنتور (α_W, t_x)

دمای آب در ورودی کنتور 16 °C برآورد شده است که تلورانس آن $\pm 2\ K$ می‌باشد. حدود بیان شده، تمامی منابع عدم قطعیت محتمل از قبیل سهم کالیبراسیون سنسورها، تفکیک‌پذیری در نمایشگر دما و تغییرات اندک دمایی حین انجام اندازه‌گیری را شامل می‌شود. ضریب انبساط حجمی آب را می‌توان از یک هندبوک مواد استخراج کرد که مقدار آن معادل ضریب مشخص $\alpha_W = 0.15 \times 10^{-3} K^{-1}$ در بازه دمایی در نظر گرفته شده می‌باشد. از آنجا که

هیچ مقدار عدم قطعیتی به همراه این ضریب ارائه نشده است، بنابراین فرض می‌شود که مقدار عدم قطعیت آن برابر با بازه تغییرات کوچکترین رقم معنادار باشد. بدین ترتیب در چنین شرایطی فرض می شود که انحرافات ناشناخته (تصادفی) در گستره ی $\pm 0.5 \times 10^{-5} K^{-1}$ قرار بگیرد.

۱–۴– اختلاف فشار آب بین مخزن و کنتور (k_W, P_s, P_x)

فشار آب در ورودی کنتور برابر با $500\ kPa$ بوده و انحراف نسبی آن بیش از $\pm 10\%$ نمی‌باشد. در طول مسیر ورودی کنتور تا مخزن تجمیع، فشار آب به $0\ kPa$ می رسد (شرایط فشار اتمسفریک). ضریب فشردگی آب را می توان از هندبوک‌های مواد بدست آورد که مقدار آن در بازه‌ی دمایی در نظر گرفته شده معادل $k_W = 0.46 \times 10^{-6} kPa^{-1}$ می‌باشد. از آنجا که هیچ مقدار عدم قطعیتی به همراه این ضریب ارائه نشده است، مجدداً فرض می‌شود که مقدار عدم قطعیت برای این کمیت برابر با بازه تغییرات کوچکترین رقم معنادار باشد. بنابراین در چنین شرایطی انحرافات نامشخص در گستره‌ی $\pm 0.005 \times 10^{-6} kPa^{-1}$ قرار می‌گیرد.

۱–۵– همبستگی

هیچ یک از کمیت‌های ورودی با یکدیگر همبسته نیستند.

۱–۶– بودجه عدم قطعیت (V_x)

در جدول (۲) بودجه عدم قطعیت (V_x) بر حسب کمیت‌های گوناگون دخیل در محاسبات عدم قطعیت و کمیت‌های توضیح داده شده در جدول (۱) ذکر شده است.

جدول ۲ : بودجه عدم قطعیت (V_x) بر حسب کمیت‌های گوناگون دخیل در محاسبات عدم قطعیت

کمیت X_i	تخمین x_i	عدم قطعیت استاندارد $u(x_i)$	توزیع احتمال	ضریب حساسیت C_i	مقدار مولفه عدم قطعیت $u_i(y)$
V_{is}	200.02 l	0.10	نرمال	1.0	0.10 I
δV_{is}	0.0 l	0.0115 I	مستطیلی	1.0	0.0115 I
α_S	51×10^{-6} k^{-1}	0.29×10^{-6} K^{-1}	مستطیلی	-1000 I.K	-0.29×10^{-3} I
t_s	15 °C	1.15 K	مستطیلی	-0.0198 $I.K^{-1}$	-0.0228 I
α_W	0.15×10^{-3} k^{-1}	2.9×10^{-6} K^{-1}	مستطیلی	200 I.K	0.58×10^{-3} I
t_x	16 °C	1.15 K	مستطیلی	-0.0300 $I.K^{-1}$	-0.0346 I
K_W	0.46×10^{-6} kpa^{-1}	2.9×10^{-6} kPa^{-1}	مستطیلی	-100 I.kPa	-0.29×10^{-3} I
P_x	500 kPa	29 kPa	مستطیلی	-9.2×10^{-6} $I.kPa^{-1}$	-0.0027 I
P_s	0.0 Pa	-	-	-	-
V_x	199.95 l				0.109 l

نتایج حاصل شده بیانگر آن است که نشاندهی حجم در شاخص گلویی مخزن تجمیع بیشتر از هر مولفه دیگری بر عدم قطعیت استاندارد اندازه‌گیری حجم مرجع تاثیر می‌گذارد و بیشترین سهم عدم قطعیت را به خود اختصاص می‌دهد. توزیع نهایی نیز نرمال نیست، بلکه یک توزیع مستطیلی است که باید در ادامه محاسبات مربوط به عدم قطعیت خطای نشاندهی کنتور مد نظر قرار گیرد.

۲- نشاندهی کنتور ($\Delta V_{ix}, \delta V_{ix1}, \delta V_{ix2}$)

کنتوری که قرار است کالیبره شود دارای تفکیک پذیری $0.2\ l$ بوده که گستره آن در هر دو مرتبه قرائت کنتور (قرائت قبل از برقراری جریان و قرائت پس از پایان جریان) برابر با $\pm 0.1\ \mathrm{l}$، به عنوان بزرگترین انحراف ناشی از تفکیک‌پذیری خواهد بود.

۲-۱- بودجه عدم قطعیت (e_x)

در جدول (۳) بودجه عدم قطعیت (e_x) بر حسب کمیت‌های گوناگون دخیل در محاسبات عدم قطعیت و کمیت‌های توضیح داده شده در جدول (۱) ذکر شده است.

جدول ۳ : بودجه عدم قطعیت (e_x) بر حسب کمیت‌های گوناگون دخیل در محاسبات عدم قطعیت

کمیت X_i	تخمین x_i	عدم قطعیت استاندارد $u(x_i)$	توزیع احتمال	ضریب حساسیت C_i	مقدار مولفه عدم قطعیت $u_i(y)$
ΔV_{ix}	200 I	—	نرمال	—	—
δV_{ix1}	0.0 I	0.058 I	مستطیلی	$-5.0 \times 10^{-3}\ \mathrm{l^{-1}}$	-0.29×10^{-3}
δV_{ix2}	0.0 I	0.058 I	مستطیلی	$-5.0 \times 10^{-3}\ \mathrm{l^{-1}}$	-0.29×10^{-3}
V_x	199.95 I	0.109 I	مستطیلی	$-5.0 \times 10^{-3}\ \mathrm{l^{-1}}$	-0.55×10^{-3}
e_x	0.0003				0.68×10^{-3}

۳- تکرار پذیری کنتور

خطای نشاندهی حاصل از آزمون کنتور که هر بار در نرخ جریان ثابت $2500\ l/h$ انجام می‌شود، پراکندگی قابل ملاحظه‌ای را نشان می‌دهد. به همین علت خطای نسبی نشاندهی سه بار اندازه‌گیری

می‌شود. نتایج حاصل از این سه بار اندازه‌گیری به شکل مشاهدات مستقل، e_{xj}، در نظر گرفته می‌شود و به این صورت متوسط خطای نشاندهی e_{xav} برابر خواهد بود با:

$$e_{xav} = e_x + \delta e_x \qquad (۳)$$

که در آن e_x: خطای نسبی نشاندهی یک بار اندازه‌گیری و δe_x ضریب تصحیح خطای نشاندهی بدست آمده در اندازه‌گیری‌های مختلف، مربوط به عدم تکرار پذیری کنتور می‌باشد.

۳-۱- اندازه گیری ها (e_x)

در جدول (۴) مقادیر خطای نسبی نشاندهی در سه اندازه‌گیری گوناگون ذکر گردیده است که تکرارپذیری آزمایش نیز مورد تایید قرار گیرد. چرا که جهت تایید فرآیند آزمون انجام شده، تکرارپذیری به عنوان یکی از ملزومات هر آزمایشی باید مورد بررسی قرار گیرد.

جدول ۴ : مقادیر خطای نسبی نشاندهی در سه اندازه‌گیری گوناگون

شماره تکرار اندازه‌گیری	خطای نسبی نشاندهی
۱	0.0003
۲	0.0005
۳	0.0022

که با توجه به مقادیر ذکر شده در جدول (۴)، میانگین حسابی خطاهای نسبی نشاندهی برابر با $\bar{e}_x = 0.001$ ، انحراف استاندارد تجربی برابر با $S(e_{xj}) = 0.001$ و میزان عدم قطعیت استاندارد برابر با $u(\bar{e}_x) = S(\bar{e}_x) = \frac{0.001}{\sqrt{3}} = 0.00060$ می‌باشد.

۳-۲- بودجه عدم قطعیت (e_{xav})

در جدول (۵) بودجه عدم قطعیت (e_{xav}) بر حسب کمیت‌های گوناگون دخیل در محاسبات عدم قطعیت و کمیت‌های توضیح داده شده در جدول (۱) ذکر شده است.

جدول ۵ : بودجه عدم قطعیت (e_{xav}) بر حسب کمیت‌های گوناگون دخیل در محاسبات عدم قطعیت

کمیت X_i	تخمین x_i	عدم قطعیت استاندارد $u(x_i)$	درجه آزادی v_{eff}	توزیع احتمال	ضریب حساسیت C_i	مقدار مولفه عدم قطعیت $u_i(y)$
e_x	0.001	0.60×10^{-3}	2	نرمال	1.0	0.60×10^{-3}
δe_x	0.0	0.68×10^{-3}	∞	نرمال	1.0	0.68×10^{-3}
e_{xav}	0.001		10			0.91×10^{-3}

۴- عدم قطعیت بسط یافته

چون درجه آزادی موثر عدم قطعیت استاندارد مربوط به میانگین خطای نسبی نشاندهی کوچک است. بنابراین فاکتور پوششی باید مطابق جداول درجه آزادی اصلاح شود که در رابطه (۴) ذکر شده است.

$$U = k.u(e_{xav}) = 2.28 \times 0.91 \times 10^{-3} = 2 \times 10^{-3} \quad (۴)$$

۵- تفسیر نتایج گزارش شده

میانگین خطای نسبی نشاندهی کنتور آب که در نرخ جریان 2500 l/h اندازه‌گیری شده است برابر خواهد بود با 0.001 ± 0.002. عدم قطعیت بسط یافته گزارش شده نیز در قالب عدم قطعیت استاندارد ضرب در فاکتور پوششی $k = 2.28$ که از درجه آزادی موثر توزیع t (توزیع دانش‌آموز)، $\vartheta_{eff} = 10$، حاصل شده و متناظر با احتمال پوشش 95 % می‌باشد، بدست می‌آید.

مبانی عدم قطعیت سیستم‌های اندازه‌گیری گاز و منابع آن

سجاد ترابی

کارشناس ارشد پژوهشکده اندازه‌گیری جریان سیالات دانشگاه علم و صنعت ایران

مبانی عدم قطعیت سیستم‌های اندازه‌گیری گاز و منابع آن

سجاد ترابی

کارشناسی ارشد مهندسی شیمی دانشگاه علم و صنعت ایران

کارشناس ارشد پژوهشکده اندازه‌گیری جریان سیالات

۱– مقدمه:

گاز طبیعی منبع سوخت و انرژی است که با افزایش تقاضای آن، بهینه‌سازی عملکرد شبکه گاز و توسعه‌ی شبکه‌ی موجود مورد توجه قرار گرفته است. شبکه‌ای که به درستی برنامه‌ریزی و طراحی می‌شود، میزان هزینه‌ها را به طور قابل توجهی کاهش می‌دهد و سطح رضایت مشتریان را نیز افزایش می‌دهد. مبادله گاز بین تولیدکننده و مصرف‌کننده گاز منوط به تنظیم یک قرارداد صحیح و اصولی بین طرفین می‌باشد که صحت و دقت این اندازه‌گیری‌ها برای حسابداری، مدیریت، امنیت و تعادل فیزیکی شبکه‌های گاز طبیعی بسیار مهم است که چنانچه درست انجام نشود، به ویژه در قراردادهای بین‌المللی، سبب ایجاد مشکلات بین طرفین می‌گردند که رفع آن‌ها نیاز به صرف هزینه و زمان زیادی دارد. یکی از مباحث مهم که از ملزومات قرارداد بوده و مورد توجه کارشناسان می‌باشد، محاسبه عدم‌قطعیت کلی سیستم اندازه‌گیری می‌باشد که بر طبق استانداردها و دستورالعمل‌های مربوطه، تابع عدم قطعیت تک‌تک اجزا موثر بر اندازه‌گیری است.

در زمان مبادله گاز، فروشنده و خریدار هر دو میزان گاز را توسط سیستم میترینگ جداگانه اندازه‌گیری می‌کنند و در اغلب اوقات اختلاف فاحشی بین دو کنتور وجود دارد که باعث ایجاد دعوای تجاری و حقوقی می‌گردد. لذا برآورد فاکتور عدم قطعیت در میترینگ گاز از ملزومات قرارداد منعقده بین خریدار و فروشنده می‌باشد. در حقیقت این فاکتور باعث توافق خریدار و فروشنده در رابطه با هر یک از سیستم‌های میترینگ می‌شود و ذکر آن در اسناد پیوست قرارداد اجباری می‌باشد. به عبارت دیگر هنگامی که با انتقال مالکیت فروش، صادرات و

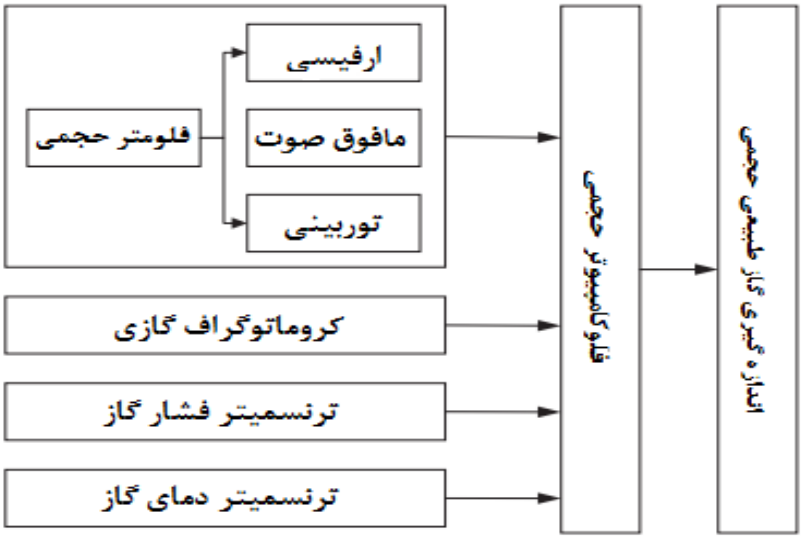
واردات ترکیب‌های هیدروکربنی نفت و گاز سر و کار داریم، عدم قطعیت در موارد جزئی و عدم استفاده از سیستم‌های نظارتی بالادست خسارت مالی قابل توجه به بار خواهد آورد.

این متدولوژی شامل آنالیز فردی برای هر منبع عدم قطعیت است؛ عدم قطعیت‌هایی را که در هر متغیر به طور جداگانه دخالت می‌کنند و سهم هر متغیر را بر مقدار نهایی محاسبه و سپس با هم ترکیب می‌کند که متأسفانه امروزه به آن توجه زیادی نمی‌شود. در استاندارد ISO 5168 به روند محاسبه عدم قطعیت ترکیبی سیستم اندازه‌گیری پرداخته شده است.

۲– سیستم اندازه‌گیری حجمی گاز طبیعی

انواع مختلفی از ابزارهای اندازه‌گیری حجمی در سیستم‌های خط لوله انتقال گاز، از جمله کنتورهای اریفیسی، توربینی و مافوق صوت وجود دارد. مقدار اندازه‌گیری شده از کنتور فقط بیانگر دبی جریان آنی گاز اندازه‌گیری شده در شرایط عملیاتی است که باید در شرایط مرجع استاندارد با توجه به معادلات ریاضی در زمان واگذاری تجارت، به مقدار دبی جریان تبدیل شود. در سیستم‌های اندازه‌گیری، محاسبات حجم واقعی گاز در کنتور انجام شده و محاسبات حجمی استاندارد گاز در داخل تصحیح کننده یا فلوکامپیوترها انجام می‌پذیرد. کنتورهای حجمی وسیله تعیین میزان گاز عبوری از ایستگاه بوده و آن را به صورت حجمی اندازه‌گیری می‌نمایند، فارغ از اینکه آن حجم شامل چه ترکیبی بوده و در چه دما و فشاری اندازه‌گیری شده است. برای محاسبه مورد اول از آنالیز گاز استفاده می‌شود و برای محاسبه مورد دوم از فرستنده دما و فشار استفاده می‌شود.

یک سیستم اندازه‌گیری حجمی برای گاز طبیعی شامل چندین دستگاه است: یک فلومتر حجمی، فرستنده فشار، فرستنده دما، کروماتوگراف گازی و فلوکامپیوتر. فلوچارت زنجیره اندازه‌گیری حجمی گاز طبیعی در شکل (۱) نشان داده شده است.



شکل ۱ : فلوچارت زنجیره اندازه‌گیری حجمی گاز طبیعی

۳- عدم قطعیت سیستم اندازه‌گیری حجمی گاز طبیعی

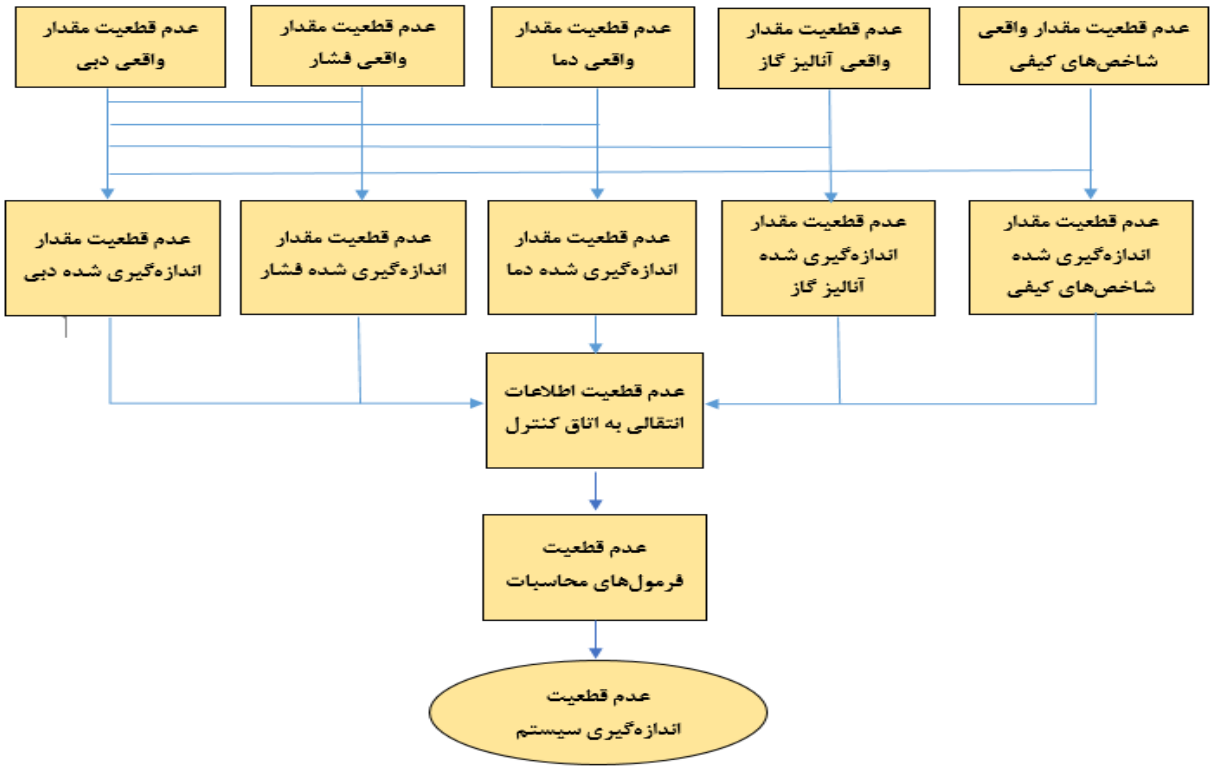
عدم قطعیت ایجاد شده با استفاده از روش تحلیلی ابزارهای بسیار مفیدی برای بهینه‌سازی سیستم‌های اندازه‌گیری در اختیار قرار می‌دهد، زیرا اثر تغییرات عدم قطعیت ورودی بر عدم قطعیت خروجی را می‌توان بسیار سریع مشاهده کرد. همچنین روند توسعه عدم قطعیت می‌تواند از این جهت مفید باشد که به درک کاملی از عملکرد سیستم اندازه‌گیری کمک می‌کند. منابع عدم قطعیت ورودی را می‌توان برای تعیین این‌که کدام منابع بیشترین تأثیر را در عدم قطعیت کلی دارند، طبقه بندی کرد. به طور کلی در محاسبه عدم قطعیت اندازه‌گیری حجم گاز با توجه به مطالب ذکر شده می‌بایست به موارد ذیل

توجه کرد:

- ❖ تأثیر عدم قطعیت اندازه‌گیری دبی
- ❖ تأثیر عدم قطعیت اندازه‌گیری فشار
- ❖ تأثیر عدم قطعیت اندازه‌گیری دما

تأثیر عدم قطعیت اندازه‌گیری ضریب تراکم‌پذیری گاز.

برای محاسبه عدم قطعیت اندازه‌گیری انرژی گاز علاوه بر موارد فوق، تاثیر عدم قطعیت اندازه‌گیری ارزش حرارتی نیز باید مورد توجه و بررسی قرار گیرد. با توجه به المان‌های موجود در سیستم‌های اندازه‌گیری جریان گاز ذکر شده، زنجیره‌ای از عدم قطعیت این المان‌ها به وجود خواهد آمد که در نهایت منجر به عدم قطعیت کلی یک سیستم میترینگ می‌گردد. این المان‌ها شامل روش آنالیز مؤلفه‌هایی است که باعث عدم قطعیت می‌شود، مانند اندازه-گیری فشار، اندازه‌گیری دما، ضریب تراکم‌پذیری و حجم در شرایط جریان. فلوچارت زنجیره عدم قطعیت سیستم اندازه‌گیری گاز طبیعی در شکل (۲) نشان داده شده است.



شکل ۲ : فلوچارت زنجیره عدم قطعیت سیستم اندازه‌گیری گاز طبیعی

۴- نتیجه‌گیری

به طور کلی عدم قطعیت را می‌توان نمود کمی کیفیت نتیجه اندازه‌گیری دانست. در این مطالعه اهمیت اندازه‌گیری عدم قطعیت در سیستم‌های اندازه‌گیری گاز طبیعی بیان شدند. در ادامه به بررسی سیستم‌های اندازه‌گیری حجمی گاز پرداخته شد و عواملی که باعث ایجاد عدم قطعیت می‌شوند به صورت کلی بیان شدند.

۵- منابع

1- Standard and B. ISO, "Measurement of fluid flow–Procedures for the evaluation of uncertainties," BS ISO, vol. 5168, p. 2005, 2005.

2- Y. Xie, X. Wang, and F. Mai, "Calculation of theoretical transmission loss in trunk gas pipeline," Advances in Mechanical Engineering, vol. 11, no. 12, p. 1687814019895440, 2019.

۷ و ۸ دی ۱۴۰۰
دانشگاه علم و صنعت ایران
۵ همایش و نمایشگاه ملی
اندازه گیری جریان سیالات
در صنایع نفت، گاز، پالایش و پخش، پتروشیمی و آب
5th
IranianFlow
Measurement
Conference
(IrFMC)
محورهای همایش
حقوق اندازه گیری
هوشمندسازی اندازه گیری
استانداردهای ملی و بین المللی در اندازه‌گیری
انواع فناوری‌های مربوط به میترینگ (اندازه‌گیری کمی و کیفی) در جریان تک فازی و چند فازی
انتخاب، اجرا، بهره‌برداری، نگهداری و تعمیر تجهیزات اندازه گیری و پرووینگ
مهلت ارسال مقالات: ۱۵ آذر ۱۴۰۰
آدرس دبیرخانه اجرایی:
تهران ، میدان رسالت ، خیابان فرجام، خیابان حسینعلی، مرکز رشد دانشگاه علم و صنعت ایران، پلاک ۹، شرکت مهندسی فرایند گستر آرتیمان
۰۲۱۷۷۴۴۱۹۳۰
۰۲۱۷۷۲۴۰۲۲۷
۰۹۰۱۱۶۱۷۵۱۷
info@flowmeasurement.ir
www.Flowmeasurement.ir

مصاحبه با مهندس عبدالله فاضلی فارسانی

مدیرکل محترم دفتر حفاظت و بهره‌برداری منابع آب زیرزمینی

۱- به نظر شما، اهمیت اندازه‌گیری جریان سیالات در صنعت آب و مدیریت منابع آب در چیست؟

از آنجایی که ما در کشور و منطقه خشک و فرا خشک قرار گرفتیم و منابع آب ما محدود است و نیازهای ما بسیار بیشتر از منابعی است که در اختیار داریم، ناچاریم که اندازه‌گیری روی مصرف و به ویژه برداشت آب داشته باشیم. با توجه به محدودیت منابعِ در اختیار ما و به لحاظ حفظ آب جهت توسعه و نیازهای ضروری و اساسی همه مردم، لازم و ضروری است که کنترل‌های لازم بر روی برداشت آب صورت گیرد و همچنین برای استفاده بهتر و بهره‌وری لازم از آب، لازم است که کنترل مصرف نیز انجام شود و مصرف صحیحی از منابع آب موجود و در اختیار، صورت پذیرد. از آنجایی که عمده مصارف در کشور ما در بخش کشاورزی است، اهمیت فراوانی دارد که تا با کنترل برداشت و مصرف آب، بتوان به گونه شایسته‌ای از منابع آب موجود استفاده نمود. بنابراین به دلیل کمیاب بودن آب – این سیال حیاتی – در کشور ما ضروری است که اندازه‌گیری لازم – به ویژه در مصارف و برداشت‌های عمده – صورت پذیرد.

۲-با توجه به اهمیت میترینگ جریان سیالات در صنعت آب و با توجه به خلاءهای موجود در این حوزه، آیا اقدامات صورت گرفته در کشور تا به حال را متناسب با میزان اهمیت میترینگ و میزان خلاءهای موجود در این حوزه می‌بینید؟

میترینگ در بحث منابع آب مورد استفاده در بخش کشاورزی یک کارِ نوپا است. هرچند که در کشور ما سازندگان و تولیدکنندگانی وجود دارد که قدمت فعالیت آن‌ها به ده‌ها سال می‌رسد و ابزارهای اندازه‌گیری تولید شده توسط آن‌ها روی خطوط انتقال و یا نقاط تحویل در آب سطحی مورد استفاده قرار می‌گرفت و یا این‌که از ده‌ها سال قبل واردات ابزارهای اندازه‌گیری و کنتور صورت می‌گرفت و میترینگ بر روی منابع آب در نقاط محدود یا خاصی توسط ابزارهای مذکور انجام می‌شده است. ولی در مجموع این صنعت در بحث مدیریت منابع آب نوپا است و در حال حاضر جوابگوی نیاز ما در کشور نیست.

با توجه به وجود حدود ۵۰۰ هزار حلقه چاهی که نقش بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی را دارند و همچنین حدود ۲۰۰ هزار نقطه برداشت آب سطحی و با عنایت به این‌که حدود ۱۰٪ از این موارد، مجهز به ابزارهای اندازه‌گیری می‌باشند، در نتیجه تا رسیدن به هدف اندازه‌گیری جامع و کامل، راه درازی در پیش است و صنعت کنونی و تولید کنونی نتوانسته است پاسخگوی نیاز ما باشد و متناسب با نیازی که ما داریم و برنامه‌ای که هر ساله تدوین می‌کنیم حرکت کنیم و تولید لازم را داشته باشیم. البته لازم است به این نکته اشاره کنم که علیرغم نوپا بودن این صنعت، رشد، ارتقاء و نوآوری‌های آن در چند سال اخیر قابل توجه بوده است . اگر به صورت سیستمایتک و برنامه‌ریزی شده روی این صنعت تمرکز گردد، قطعاً با توجه به قابلیت‌های آن می‌تواند موجب مرتفع شدن نیازهای ما گردد، ولی سرعت بخشیدن به آن یکی از خلاءهایی است که امروزه احساس می‌گردد و لازم است که از ظرفیت جامعه دانشگاهی، پژوهشکده‌های مختلف و صنعتگران توانمند در این خصوص استفاده‌های لازم و حداکثری صورت پذیرد تا بتوان با استفاده از استعدادهای موجود در کشور و به کارگیری آن‌ها، این خلاء پر شود.

در موضوع فرهنگ‌سازی و آموزش در جامعه بهره‌برداران و ترغیب آن‌ها به موضوع اندازه‌گیری آب مورد برداشت به عنوان یک بخش مهم در توسعه میترینگ آب در کشور کارهای زیادی پیش رو داریم و لازم است در دستگاه‌های مسئول و مرتبط با موضوع به گونه‌ای عمل شود که جامعه مصرف‌کننده آب به اهمیت اندازه‌گیری آب مصرفی آگاه شده و از میترینگ استقبال کند.

۳- توانمندی‌های بومی و داخلی را در حوزه میترینگ در بخش‌های تحقیقاتی و صنعتی (اعم از نیروهای متخصص، امکانات آزمایشگاهی و تجهیزات صنعتی) چگونه می‌بینید؟

آنچه که بنده در مدت تصدی موضوع ابزارهای اندازه‌گیری در حوزه منابع آب در شرکت مدیریت منابع آب برآورد کرده‌ام، این است که توانمندی‌های مناسب و قابلیت‌های خوبی در کشور وجود دارد. موسسات تحقیقاتی و پژوهشکده‌های اندازه‌گیری جریان سیالات در برخی دانشگاه‌های کشور مانند دانشگاه علم و صنعت ایران، دانشگاه امیرکبیر و پژوهشگاه نیرو فعال است که این مراکز از گذشته تا به اکنون، همکاری‌های مناسبی در جهت حل مشکلات این حوزه صنعتی داشته‌اند و از طرفی هم سازندگان، تولیدکنندگان و متخصصان خوبی در این حوزه در کشور وجود دارد. با عنایت به این موارد و

همچنین با توجه به غنای نیروی انسانی از لحاظ استعداد و تخصص و همچنین وجود مراکزی جهت پشتیبانی علمی، فنی و تولید، در مورد پیشبرد این صنعت جای نگرانی نیست؛ اما با همه این اوصاف، ظرفیت‌ها جهت توسعه این صنعت کم است و باید این ظرفیت‌ها افزایش یابد. در این راستا باید سازندگان فعلی که محصول دقیق‌تری با قیمت مناسب‌تری تولید می‌کنند، مورد حمایت قرار گرفته تا تیراژ تولید این سازندگان افزایش یابد.

۴-به نظر شما، مهم‌ترین چالش‌های پیش رو در بخش اندازه‌گیری جریان سیالات در حوزه مدیریت منابع آب چیست؟

در مورد مهم‌ترین چالش‌های پیش رو می‌توان به بحث منابع مالی در اختیار سازندگان اشاره کرد که با فقر منابع مالی برای گسترش واحدهای تولید مواجه می‌باشند. از طرفی با توجه به مشکلاتی که در حوزه انتقال پول به خارج از کشور به وجود آمده است، چالش دیگر، بروز مشکلاتی است که در حوزه واردات تجهیزات و قطعاتی پدید آمده است که وابسته به خارج از کشور است. شایان ذکر است که اعتماد سازندگان به دولت و مدیریت منابع آب کشور و اطمینان از بازار موجود و ثبات سیاست‌ها در این خصوص، بسیار اهمیت دارد که سازندگان نباید این قضیه را به عنوان یک چالش در نظر بگیرند و می‌بایست با اعتماد و اطمینان بیشتری نسبت به ثبات سیاست‌های موجود قدم بردارند که در راستای این اعتماد، بتوانند با قدرت و قوت، مسیر تولید را ادامه دهند.

۵- اقدامات پژوهشکده اندازه‌گیری جریان سیالات در حوزه ارزیابی سازندگان کنتورهای هوشمند حجمی چاه‌های کشاورزی را چگونه ارزیابی می‌کنید؟

هر چند مدت کوتاهی است که همکاری ما با پژوهشکده اندازه‌گیری جریان سیالات دانشگاه علم و صنعت ایران آغاز شده است، اما در همین مدت کوتاه، سازماندهی، تشکیل کارگروه‌ها، تیم‌های فنی و تیم‌های اجرایی لازم قابل توجه بوده است و پژوهشکده اندازه‌گیری جریان سیالات توانسته است در این مسیر، شروع مناسبی داشته باشد. با این اوصاف، نیاز است که نشست‌هایی با سازندگان نیز برگزار گردد و نظرات و پیشنهادات سازندگان اخذ گردد، هر چند که به صورت پراکنده این اقدام انجام شده است. با شروع مناسبی که اتفاق افتاده است و با اخذ نظرات سازندگان و تولیدکنندگان، ان‌شاءالله بتوانیم روند خوبی را در پیش بگیریم و همکاری‌های پژوهشکده اندازه‌گیری جریان سیالات دانشگاه علم و صنعت در این خصوص قابل توجه و قابل تقدیر بوده است و با برنامه‌ریزی مناسبی که با آقای دکتر هاشم‌آبادی انجام داده‌اند، گمان می‌کنم که بتوانیم در مسیر درستی قرار بگیریم. در این راستا لازم است جلب اعتماد متقابل و همکاری متقابل با سازندگان صورت پذیرد و بین طرفین، گفتگوهای سازنده و جلسات مرتب و مکرری برگزار شود تا در این مسیری که گام گذاشته‌ایم، بتوانیم به خوبی در خصوص ارزیابی سازندگان اقدام کنیم و محصول آن‌ها را بررسی و در صورت تایید، جهت ورود به بازار مصرف، معرفی کنیم.

۶-افق و چشم‌انداز میترینگ را در صنعت آب کشور چگونه ارزیابی می‌کنید؟

همان‌گونه که عرض کردم، هرچند ما در حوزه میترینگ در مدیریت منابع آب نوپا هستیم، اما با اختراعات و ابتکاراتی که در این زمینه صورت گرفته است، اعم از ساخت ابزارهای هوشمند آب و برق به صورت توأمان و همچنین ابزارهای سنجش حجمی و هوشمند، توانسته‌ایم گام‌های بلندی را برداریم و در این مدت کوتاه، محصولات تولیدکنندگان مکرراً در همین چند سال اخیر و در همین زمان محدود با

تحول الکترونیک و تحول در دانش ساخت این ابزارها مواجه بوده است و توانسته است قابلیت‌های خود را نشان دهد. بنده، افق و چشم‌انداز میترینگ را با توجه به پتانسیل‌هایی که از سازندگان دیده‌ایم و همچنین پتانسیل و دانش فنی پژوهشکده اندازه‌گیری جریان سیالات، آزمایشگاه‌ها و توانمندی‌های علمی و فنی که در کشور در این خصوص وجود دارد، روشن می‌بینم. فقط باید با تخصیص منابع مالی و حمایت از تولیدکنندگان و همچنین سازماندهی لازم در خصوص ارزیابی محصولات و جلب همکاری‌های سازمان ملی استاندارد در خصوص استانداردسازی محصولات تولید شده و معرفی آن محصولات به بازار، بتوانیم خلاءهای موجود را پر کنیم. بنابراین اگر قادر باشیم چالش‌هایی را که در عرایض پیشین ذکر شد برطرف کنیم، آینده خوب و امیدبخشی برای کشور تجسم می‌کنم.

لیست کارگاه‌های آموزشی حوزه گاز پژوهشکده اندازه‌گیری جریان سیالات

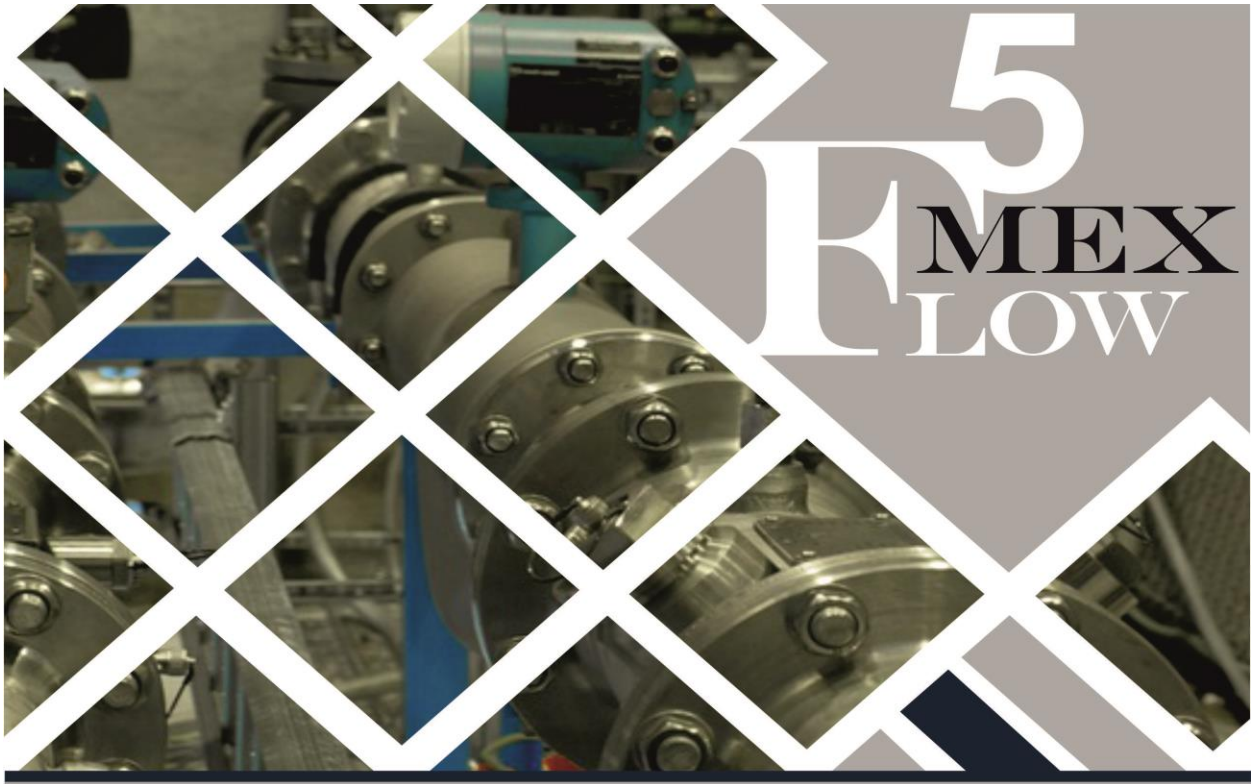
کد دوره	نام کارگاه	کد دوره	نام کارگاه
FM01	استانداردهای اندازه‌گیری گاز	FM02	آشنایی با کنتورهای دیافراگمی گاز طبیعی (عملکرد، اصول، طراحی، سایزینگ، کالیبراسیون، نصب و بهره برداری)
FM03	آشنایی با شاخص‌های اندازه‌گیری کیفی نفت خام و فراورده‌های نفتی	FM04	اسپکتروفوتومتر ماوراء بنفشUV/visb
FM05	اندازه‌گیری دینامیک فرآورده‌های نفتی	FM06	کروماتوگرافی گازی GC
FM07	مبانی ابزار دقیق	FM08	کالیبراسیون تجهیزات اندازه‌گیری فشار
FM09	جذب اتمی	FM10	اندازه‌گیری‌های مبتنی بر استفاده از اشعه گاما
FM11	Multiphase Flow Metering	FM12	تصحیح‌کننده‌های گاز
FM13	آشنایی با کالیبراسیون و Meter Proving	FM14	پرووینگ و کالیبراسیون میترها و پرورهای سیستم میترینگ کاستودی ترانسفر
FM15	طیف سنجی مادون قرمز IR	FM16	آشنایی با میترهای التراسونیک و جابجایی مثبت و سیستم‌های پرووینگ مربوطه (محل اجرا: پایانه صادراتی شرکت پایانه‌های نفتی در عسلویه)
FM17	کالیبراسیون تجهیزات اندازه‌گیری دما	FM18	آشنایی با تجهیزات اندازه‌گیری پرتوی(اشعه گاما) در صنایع شیمیایی، نفت، گاز، پتروشیمی، پالایشگاهی و نیروگاهی
FM19	کالیبراسیون مخازن ذخیره استوانه‌ای ایستاده	FM20	کار با فلوکامپیوتر و تصحیح کننده‌ها
FM21	کارگاه شیوه بازدید دوره‌ای از ایستگاه‌ها و نحوه راستی‌آزمایی تجهیزات اندازه‌گیری گاز	FM22	کنتورهای توربینی، اوریفیسی و تصحیح‌کننده‌های گاز طبیعی
FM23	اندازه‌گیری سیالات (آشنایی با مبنای عملکرد جریان‌سنج‌ها)	FM24	کنتورهای آلتراسونیک
FM25	استانداردهای ابزار دقیق	FM26	Custody Transfer
FM27	آشنایی با انواع کاربرد، ملحقات و کالیبراسیون میترهای توربینی گاز طبیعی با کاربرد تبادلاتی گاز طبیعی	FM28	اندازه‌گیری online ترکیبات سولفوری موجود در گاز طبیعی
FM29	آنالیز عدم قطعیت (Uncertainty Analysis)	FM30	IOT(Internal of Things)for Smart Measurement
FM31	آشنایی با سیستم‌های اسکادا و تلمتری(دیسپچینگ)	FM32	سرویس و تایید گواهی میترهای اوریفیسی (Orifice Meter Inspection and Recertification)
FM33	سرویس و تایید گواهی میترهای التراسونیک (Ultrasonic Flow Meter Inspection and Recertification)	FM34	مبانی طراحی و کالیبراسیون ظروف معیار و پرور های حجمی
FM35	فلومتر اختلاف فشاری		

لیست کارگاه‌های آموزشی حوزه آب پژوهشکده اندازه‌گیری جریان سیالات

کد دوره	نام کارگاه	کد دوره	نام کارگاه
FM100	انتخاب و طراحی کنتورهای آب	FM101	اصول طراحی، تعمیر و نگهداری کنتور الکترومغناطیس
FM102	کنتورهای الکترومغناطیس	FM103	آشنایی با مکانیزم‌های اندازه‌گیری جریان درصنعت آب و فاضلاب (آبفا)
FM104	مدیریت کاهش مصرف آب خانگی و صنعتی	FM105	کنتورهای آب خانگی

لیست کارگاه‌های آموزشی حوزه CFD پژوهشکده اندازه‌گیری جریان سیالات

کد دوره	نام کارگاه	کد دوره	نام کارگاه
CFD1	دوره مقدماتی آشنایی با OpenFOAM	CFD2	OpenFOAM و شبیه‌سازی جریان‌های چند فازی
CFD3	شبیه‌سازی CFD با استفاده از COMSOL (مقدماتی)	CFD4	شبیه‌سازی جریان‌های احتراقی با نرم‌افزار Fluent
CFD5	شبیه‌سازی جریان‌های چند فازی با Fluent	CFD6	مبانی شبیه‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی(CFD)
CFD7	شبیه‌سازی CFD با استفاده از نرم‌افزار Fluent & Gambit (مقدماتی)	CFD8	شبیه‌سازی CFD با استفاده از نرم‌افزار Fluent & Gambit (پیشرفته)
CFD9	شبیه‌سازی جریان‌های واکنش‌دار با Fluent	CFD10	کارگاه پیشرفته کدنویسی UDF در Fluent



پنجمین نمایشگاه صنعت میترینگ کشور

همزمان با

پنجمین همایش ملی اندازه‌گیری جریان سیالات

در صنایع نفت، گاز، پالایش و پخش، پتروشیمی و آب

دی ماه ۱۴۰۰، دانشگاه علم و صنعت ایران

پژوهشکده اندازه‌گیری جریان سیالات

دانشگاه علم و صنعت ایران

ArProDEC
شرکت مهندسی فرآیند گستر آریمان (سهامی خاص)
شماره ثبت ۲۷۷۶۷۹

تهران-رسالت خیابان هنگام-دانشگاه علم و صنعت-واحد پژوهشکده اندازه‌گیری جریان سیالات
Email: info@flowmeasurement.ir
website:www.flowmeasurement.ir
تماس: ۷۷۴۴۱۹۳۰
فکس: ۷۷۲۴۰۲۲۷