عدم قطعیت کلی سیستم‌های اندازه‌گیری گاز: بررسی موردی آزمایشگاه‌های کالیبراسیون کنتورهای گاز

سیدحسن هاشم‌آبادی[1*]، محمد سالمی مجرد[2]، علیرضا اسدی[3]، بهارک مردانگاهی[4]، محمدرضا سخندانی[4]

۱. استاد، پژوهشکده اندازه‌گیری جریان سیالات، دانشکده مهندسی شیمی، نفت و گاز، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

۲. کارشناسی ارشد، پژوهشکده اندازه‌گیری جریان سیالات، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

۳. کارشناسی ارشد، واحد مهندسی تعمیرات مکانیک، شرکت مجتمع گاز پارس جنوبی، بوشهر، ایران

۴. کارشناسی ارشد، واحد پژوهش و فناوری، شرکت گاز استان آذربایجان شرقی، تبریز، ایران

آدرس پست الکترونیک نویسنده مسئول مکاتبات: hashemabadi@iust.ac.ir

مقاله‌ی علمی- پژوهشی

صفحه ۱۷ - ۲۸

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۸/۱۰ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۰/۰۹

چکیده

یکی از مهم‌ترین مباحث در اندازه‌گیری صحیح گاز، عدم قطعیت کنتور به‌عنوان ابزار اندازه‌گیری است. در این زمینه بر طبق استانداردها و دستورالعمل‌های مربوطه، لازم است عدم قطعیت تک‌تک اجزاء سیستم اندازه‌گیری نظیر المان اندازه‌گیری (به‌عنوان مثال اریفیس)، دستگاه اندازه‌گیری دما و فشار و غیره در محدوده مجاز باشد. علاوه بر این، یکی از موارد بسیار حیاتی که متأسفانه امروزه به آن توجه زیادی نمی‌شود، عدم قطعیت ترکیبی سیستم اندازه‌گیری و برهم کنش‌ها و اثرات متقابل اجزاء سیستم اندازه‌گیری بر یکدیگر و بر عدم قطعیت کلی سیستم است. از این رو در این مطالعه به ارائه روابط مورد نیاز جهت محاسبه عدم قطعیت کلی آزمایشگاه‌های کالیبراسیون کنتورهای گاز در کشور پرداخته شد و در انتها نیز عدم قطعیت کلی دو مرکز به‌صورت نمونه محاسبه و گزارش شده است. یکی از این مراکز توانایی کالیبراسیون کنتورهای توربینی و دیگری توانایی کالیبراسیون کنتور دیافراگمی را دارا بود. نتایج به‌دست‌آمده نشان داده است که عدم قطعیت کلی مرکز کالیبراسیون کنتور توربینی برابر با ۰/۴۲۲درصد بوده است که انحراف کالیبراسیون کنتور مرجع، بیشترین نقش را در این عدم قطعیت کلی داشته است. همچنین محاسبه عدم قطعیت کلی مرکز کالیبراسیون کنتور دیافراگمی نشان داد بهترین عدم قطعیت کلی این مرکز ۰/۲۳درصد بوده است. مقایسه نتایج عدم قطعیت کلی این دو مرکز با معیارهای جهانی نشان داد عدم قطعیت کلی مراکز در محدوده مناسبی قرار دارد و با کالیبراسیون دوره‌ای تجهیزات اندازه‌گیری مانند کنتور مرجع و ... می‌توان این مقدار را نیز بهبود داد.

کلید واژه‌ها: عدم قطعیت کلی، کالیبراسیون، مراکز کالیبراسیون، کنتور دیافراگمی، کنتور توربینی

۱. مقدمه

گاز طبیعی به‌عنوان مطلوب‌ترین و اصلی‌ترین منبع انرژی، کاربردهای گسترده‌ای در صنایع و مناطق شهری مختلف دارد، درنتیجه با رشد جمعیت، تقاضا برای گاز طبیعی به میزان قابل‌توجهی افزایش خواهد یافت. در زمان مبادله گاز، فروشنده و خریدار هر دو میزان گاز را توسط سیستم اندازه‌گیری[1] جداگانه محاسبه می‌کنند و در اغلب اوقات اختلاف فاحشی بین

1. Metering System

دو کنتـور وجـود دارد که باعث اقامه دعاوی تجـاری و حقوقی می‌گـردد. لـذا برآورد فاکتور عـدم قطعیـت در اندازه‌گیری گاز از ملزومـات قرارداد منعقده بین خریدار و فروشـنده می‌باشـد. در حقیقـت ایـن فاکتـور باعـث توافق خریـدار و فروشـنده در رابطـه با هـر یـک از سیسـتم‌های اندازه‌گیری می‌شـود و ذکر آن در اسـناد پیوسـت قرارداد اجباری می‌باشـد. به‌عبارت‌دیگر هنگامی‌کـه بـا انتقـال مالکیـت فـروش، صـادرات و واردات ترکیب‌هـای هیدروکربنی نفت و گاز سـروکار وجود دارد، عدم قطعیت در موارد جزئی و عدم اسـتفاده از سیستم‌های نظارتی بالادست خسـارت مالی قابل‌توجه به بار خواهد آورد. درنتیجه، به‌کارگیری دسـتگاه‌های اندازه‌گیری با دقـت بالا، حائز اهمیت فراوانی اسـت تـا از دقت انتقال، اطمینان کامل حاصل شـده و از احتمال خسـارت مالی جلوگیری شـود؛ بنابراین، حتی عدم دقت‌های جزئی در اندازه‌گیـری گاز می‌تواند تأثیر قابل‌توجهی بر تراز گاز و صورتحساب‌های فروش گاز داشته باشد [۱, ۲].

هنگامی‌کـه صحبـت از اندازه‌گیـری دقیـق گاز طبیعی در ایسـتگاه‌ها به میـان می‌آید، تمـامی تجهیزات موجـود در این فراینـد نقش مهمی در آن دارند که اثر تمـام این تجهیزات در عدم قطعیت کلی نمایان می‌شـود. این تجهیزات شـامل انتقال دسـتگاه اندازه‌گیری فشـار و دما، کروماتوگراف گازی[1] (GC)، کنتور اندازه‌گیری حجمی و فلوکامپیوتر[2] می‌شود [۳].

به‌منظـور اندازه‌گیری گاز از انواع مختلف کنتورهای جریان ماننـد کنتورهای اریفیـس، توربینی و اولتراسـونیک اسـتفاده می‌شـود. کنتـور توربیـنی به‌طـور معمـول در ایسـتگاه‌های اندازه‌گیری گاز استفاده می‌شود و نحوه نصب و لوله کشی قبل و بعد از کنتـور در زمان اندازه‌گیری از جمله عواملی اسـت که به‌طور بالقوه می‌تواند تأثیر منفی بر عدم قطعیت کنتور داشـته باشد [۴]. برخی از کنتورها، مانند کنتوری‌های توربینی، نسبت به اعوجاج در توزیع سرعت بسیار حساس هستند [۵].

کگل[3] [۶] از آزمایشـگاه سـزی، بـه آنالیـز عـدم قطعیـت اندازه‌گیری تجهیزات مورد استفاده در یک ایستگاه اندازه‌گیری در کلـرادو[4] پرداخـت. در ایـن مطالعـه از اثـرات نصـب کنتور، نمونه‌بـرداری گاز، گاز مرطـوب و جریان پالـسی گاز صرف‌نظر شـد. نویسـندگان برای آنالیز عدم قطعیت، ابتـدا معادله اصلی مـورد اسـتفاده در محاسـبه جریـان گاز را کـه تابـعی از چند متغیر مختلف بود مشـخص کردند. در ادامه متغیرهایی که در اندازه‌گیری آن‌ها عدم قطعیت قابل‌توجهی وجود دارد مشخص شدند و آنالیز حساسیت برای هر یک از این متغیرها انجام شد. مقـدار عدم قطعیت برای هر متغیر محاسـبه شـد و در انتها با توجه به معادلـه ابتدایی و نیز ترکیب عـدم قطعیت هر متغیر، عدم قطعیت کلی برای سیستم مورد مطالعه مشخص شد.

کگل [۷] در مطالعـه دیگـری بـه بـررسی مقـدار عـدم قطعیـت اندازه‌گیری جریان گاز به‌وسیلـه کنتورهای توربینی[5] و اولتراسـونیک[6] پرداخت. در این مطالعـه فرآیند اندازه‌گیری و تخمین عدم قطعیت اندازه‌گیری حجمی گاز و پارامترهای مؤثر بر آن مورد پژوهش قرار گرفت.

جانسـون و کگل [۸] در مطالعـه‌ای بـه اندازه‌گیـری عـدم قطعیـت و بـررسی زنجیـره ردیـابی تجهیـزات گاز طبیـعی آزمایشـگاه سـزی در لوا پرداختنـد. زنجیره ردیـابی تجهیزات کالیبراسیـون مـورد اسـتفاده در آزمایشـگاه سـزی لـوا[7]، بـه تجهیـزات اسـتاندارد اولیه PVTt[8] انسـتیتو مـلی تکنولوژی و استاندارد (NIST[9]) با ظرفیت ۲۶ مترمکعب می‌رسید.

کگل [۹] در مطالعـه دیگـری مقـدار عـدم قطعیـت بـرای سیستم کالیبراسیون اولیه سزی که در سال ۱۹۶۹ ایجاد شده است را به دسـت آورد. این سیستم کالیبراسیون از یک مخزن سیال تراکم‌پذیر با ظرفیت اسـمی ۳۰۴ فوت مکعب و در فشار ۱۳۸ بار تشکیل شده بود.

امریس[10] و جونز[11] [۱۰] عدم قطعیت اندازه‌گیری به‌وسیله کنتور اریفیسی[12] را به‌صورت تئوری بررسی کردند. نویسندگان روابـط مورد اسـتفاده برای محاسـبه جریـان به‌وسیله اریفیس

1. Gas Chromatograph
2. Flow Computer
3. Kegel
4. Colerado
5. Turbine Meter
6. Ultrasonic Meter
7. Ceesi Lowa
8. Pressure, volume, temperature, and time
9. National Institute of Standards and Technology
10. H. Emrys
11. J. Jones
12. Orifice Meter

را بسـط داده و بـا توجه بـه پارامترهای مؤثر بـر ضریب تخلیه اوریفیـس، مقدار عدم قطعیـت اندازه‌گیری شـد. این پارامترها شامل قطر سوراخ اریفیس، ضریب تخلیه اریفیس، فشار تخلیه اریفیس، فشار سیال، دمای سیال و تجهیزات الکترونیک بودند. در انتها نیز نتایج به‌دست آمده با مقدار عدم قطعیت ارائه شده در استاندارد AGA3[1] مقایسه شد.

ناسـا[2] [۱۱] روش‌هـای مـورد اسـتفاده برای محاسـبه عدم قطعیـت ایسـتگاه اندازه‌گیـری جریـان گاز را ارائه کـرد. در این مطالعه اثرات نوع کنتور، تعداد کنتور در خطوط موازی، تجهیزات ثانویه اندازه‌گیری و نیز روش‌های محاسبه خواص فیزیکی سیال، بر عدم قطعیت اندازه‌گیری مورد بررسی قرار گرفت.

مارینهو[3] [۱۲] مقدار عدم قطعیت سیستم اندازه‌گیری دارای کنتور گاز اولتراسونیک را مطالعه کرد. در این پژوهش ابتدا روش محاسبه حجم به‌دقت مورد بررسی قرار گرفت و محاسبات مورد نیاز برای اندازه‌گیری عدم قطعیت جزئی و ترکیبی مشخص شد

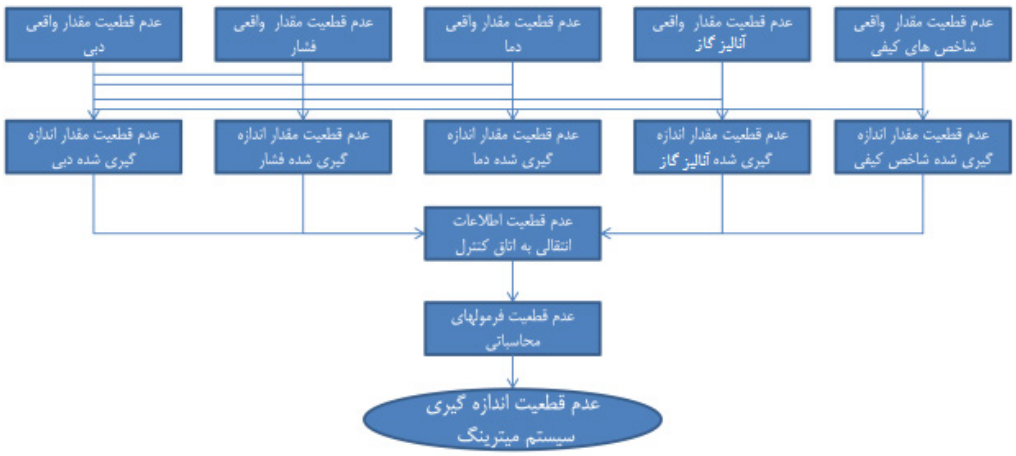
آبرنتی[4] و همکاران [۱۳] در پژوهشی روابط مورد اسـتفاده برای محاسـبه عدم قطعیت ارائه شده در اسـتاندارد ASME[5] بـا روش‌هـای ارائـه شـده در اسـتانداردهای ISO[6]، AGA، JANNAF[7] و ... مقایسه کردند.

اکبـری و همکاران [۱۴] با اسـتفاده از روابط اسـتاندارد ISO5168 به محاسبه عدم قطعیت ترکیبی سیستم اندازه‌گیری گاز پالایشـگاه شهید هاشمی نژاد پرداختند. در این مقاله به محاسـبه عدم قطعیت ترکیبی اندازه‌گیری جریان گاز طبیعی برای یکی از رن‌های اریفیسی پالایشگاه گاز شهید هاشمی نژاد با قطر نامی ۲۰ اینچ پرداخته شد.

همان‌طـور کـه در بررسی مطالعات پیشین مشـخص شـد، تاکنون محاسبه عدم قطعیت کلی مرکز کالیبراسیون کنتورهای گاز در کشـور انجام نشـده اسـت. لذا بـا توجه بـه اهمیت عدم قطعیـت کلی در فراینـد اندازه‌گیری گاز، در ایـن پژوهش ابتدا به استخراج و ارائه روابط مورد نیاز جهت محاسبه عدم قطعیت کلی مرکز کالیبراسیون پرداخته می‌شـود و در انتها محاسـبات دو مرکز کالیبراسیون مختلف به‌صورت نمونه ارائه خواهد شد.

۲. تعاریف و روابط محاسبه عدم قطعیت کلی

کلمه عدم قطعیت به معنی تردید در خصوص مقدار نتیجه اندازه‌گیـری اسـت. عدم قطعیـت اندازه‌گیـری اطلاعاتی درباره کیفیت اندازه‌گیری ارائه می‌دهد. نتیجه فقط تخمینی از مقدار واقعی می‌باشـد و فقط هنگامی کامل اسـت که بـا بیانیه‌ای در خصوص عدم قطعیت همراه باشـد [۱۴]. بـا توجه به اینکه در بیان مقدار واقعی مقادیر اندازه‌گیری شده، قطعیت کامل وجود نـدارد، لذا در خصوص سیسـتم‌های اندازه‌گیـری، زنجیره‌ای از عـدم اطمینـان به مقادیر ذکر شـده بـه وجود خواهـد آمد که درنهایت منجر به عدم قطعیت کلی[8] یک سیسـتم اندازه‌گیری می‌شـود. به‌طـورکلی زنجیـره عـدم قطعیـت یـک سیسـتم اندازه‌گیری در (شکل ۱) نشان داده شده است.



شکل ۱: زنجیره عدم قطعیت کلی [۱۴]

1. American Gas Association
2. P. Nasa
3. Marinho
4. Abernethy
5. American Society of Mechanical Engineers
6. International Organization for Standardization
7. Joint Army Navy NASA Air Force (Interagency Propulsion Committee)
8. Overal Uncertainty

به‌طورکلی در محاسبه عدم قطعیت اندازه‌گیری حجم گاز باید به موارد ذیل توجه کرد:

- تأثیر عدم قطعیت اندازه‌گیری فشار
- تأثیر عدم قطعیت اندازه‌گیری دما
- تأثیر عدم قطعیت اندازه‌گیری کنتور

با توجه به موارد ذکر شده، در ادامه روابط مورد نیاز برای محاسبه عدم قطعیت کلی مراکز کالیبراسیون دارای تجهیزات مختلف ارائه شده است.

۲-۱. روابط محاسبه عدم قطعیت کلی سونیک نازل[1]

با توجه به قانون انتشار عدم قطعیت[2]، رابطه عدم قطعیت کلی برای سونیک نازل به‌صورت ذیل درمی‌آید [۱۵]:

$$u^2(C)=C_{q_m}^2u^2(q_m)+C_{P_0}^2u^2(P_o)+C_{T_0}^2u^2(T_o) \quad (۱)$$

$u(q_m)$: عدم قطعیت مربوط به اندازه‌گیری جریان جرمی

$u(P_0)$: عدم قطعیت مربوط به اندازه‌گیری فشار

$u(T_0)$: عدم قطعیت مربوط به اندازه‌گیری دما

C_{q_m} : ضریب حساسیت اندازه‌گیری جرمی

C_{P_0} : ضریب حساسیت اندازه‌گیری فشار

C_{T_0} : ضریب حساسیت اندازه‌گیری دما

با اعمال ضریب حساسیت، رابطه عدم قطعیت به‌صورت ذیل تبدیل می‌شود [۱۶]:

$$\frac{u^2(C)}{C^2}=\frac{T_0}{P_o^2}u^2(q_m)+\frac{q_m^2T_o}{P_o^4}u^2(P_0)+\frac{q_m^2}{4P_o^2T_o}u^2(T_0) \quad (۲)$$

که در آن q_m ، T_0 و P_0 به ترتیب دبی جرمی، دما و فشار در ورودی می‌باشند. همچنین عدم قطعیت نسبی به‌صورت ذیل است [۱۶]:

$$\frac{u^2(C)}{C^2}=\frac{u^2(q_m)}{q_m^2}+\frac{u^2(P_0)}{P_o^2}+\frac{u^2(T_0)}{4T_o^2} \quad (۳)$$

۲-۲. روابط محاسبه عدم قطعیت کلی بل پروور[3]

دستگاه بل پروور شامل لوله‌ها، شیر سویچینگ و توپک‌های حجمی استاندارد است که به یکدیگر متصل شده‌اند. یک «حجم کنترل» درون لوله‌ها می‌تواند از ورودی توپک استاندارد تا خروجی کنتور تعریف شود. قانون بقای جرم به‌صورت فرمول ذیل است [۱۷]:

$$0=\frac{\partial}{\partial t}\int_V \rho dV+\int_V \rho.\vec{\upsilon}.d\vec{A} \quad (۴)$$

نرخ جریان جرمی q_m به‌صورت ذیل است [۱۷]:

$$q_m=-\int_V \rho.\vec{\upsilon}.d\vec{A}=\frac{\partial}{\partial t}\int_V \rho dV=\frac{m_e-m_b}{t}$$
$$=\frac{1}{t}(V_c\rho_e+V_L\rho_e-V_L\rho_b)+m_l \quad (۵)$$
$$=\frac{1}{t}(V_c\rho_e+V_L\Delta\rho_{eb})+m_l$$

در معادله بالا، V_c حجم جمع‌آوری در زمان آزمایش، V_L حجم مخزن، m_l جرم نشت شده در طول آزمایش، ρ_e چگالی هوا در شرایط عادی و $\Delta\rho_{eb}$ تفاوت چگالی هوا درون بل پروور بین زمان‌های شروع و پایان فرآیند کالیبراسیون است. بعد از اینکه دمای هوای درون مخزن و بل پروور ثابت شد، تغییر فشار باید کمتر از ۲ پاسکال در طول ۳ دقیقه باشد. این بدان معنی است که m_1 در طی فرآیند کالیبراسیون ناچیز است. عدم قطعیت نرخ جریان جرمی q_m به‌صورت ذیل است [۱۷]:

$$u(q_m)=[C_{V_c}^2u^2(V_c)+C_{\rho e}^2u^2(\rho_e)+C_{V_L}^2u^2(V_L)$$
$$+C_{\Delta\rho_{eb}}^2u^2(\Delta\rho_{eb})+C_t^2u^2(t)]^{\frac{1}{2}} \quad (۶)$$

ضرایب حساسیت می‌توانند با استفاده از دیفرانسیل‌گیری به دست آیند، پس ضرایب حساسیت نسبی به‌صورت ذیل هستند [۱۷]:

$$C_{V_c}=\frac{\rho_e}{t},C_{\rho_e}=\frac{V_c}{t},C_{V_L}=\frac{\Delta\rho_{eb}}{t}$$
$$C_{\Delta\rho_{eb}}=\frac{V_L}{t},C_t=\frac{-1}{t^2}(V_v\rho_e+V_L.\Delta\rho_{eb}) \quad (۷)$$

عدم قطعیت نسبی نرخ جریان جرمی به‌صورت ذیل بیان می‌شود [۱۷]:

$$\frac{u(q_m)}{q_m}=\left[\frac{1}{\frac{1}{t}(V_c\rho_e+V_L\Delta\rho_{eb})}u^2(q_m)\right]^{\frac{1}{2}}\cong\left[\frac{1}{\frac{1}{t}(V_c\rho_e)}u^2(q_m)\right]^{\frac{1}{2}} \quad (۸)$$

1. Sonic Nozzle
2. Uncertainty Propagation
3. Bell Prover

با در نظر گرفتن معادلات ۶ تا ۸، عدم قطعیت کلی از رابطه ذیل محاسبه می‌شود [۱۷]:

$$\frac{u(q_m)}{q_m}=\left[\left[\frac{u(V_c)}{V_c}\right]^2+\left[\frac{u(\rho_e)}{\rho_e}\right]^2+\left[\frac{u(\Delta\rho_{eb})}{\rho_e}\frac{V_L}{V_c}\right]^2+\left[\frac{\Delta\rho_{eb}}{\rho_e}\frac{u(V_L)}{V_c}\right]^2+\left[\frac{-u(t)}{t}\right]^2\right]^{\frac{1}{2}} \quad (۹)$$

۲-۳. روابط محاسبه عدم قطعیت کلی روتاری

عدم قطعیت ترکیبی برای کنتور روتاری به‌صورت ذیل به دست می‌آید [۱۸]:

$$U_C=[u_{p_C}^2+u_{t_C}^2+u_{P_{MUT}}^2+u_{t_{MUT}}^2+u_{K_C}^2+u_{a_{ENC}}^2+(u_{T_{AMB}}+u_{T_{STD}}+u_{T_{MUT}}+u_{\langle t_{CVf}\rangle}+u_{\langle t_{CVi}\rangle})^2 +u_{\alpha_T}^2+u_{\alpha_P}^2+u_{P_{STD}}^2+u_{\beta}^2+u_{V_{CV}}^2+u_{V_{STD}}^2+u_{\eta}^2+u_R^2]^{\frac{1}{2}} \quad (۱۰)$$

عدم قطعیت توسعه یافته با ضرب عدم قطعیت ترکیبی به‌دست آمده از رابطه بالا در یک ضریب پوششی (k) به‌صورت ذیل به دست می‌آید:

$$U_E=kU_C \quad (۱۱)$$

پارامترهای این روابط در (جدول ۱) ذکر شده است.

جدول ۱: پارامترهای معادله ۱۱

نوع سیال	توضیح
u_{P_C}	عدم قطعیت مربوط به اندازه‌گیری پالس‌های کالیبراتور
u_{t_C}	عدم قطعیت مربوط به اندازه‌گیری زمان کالیبراتور
$u_{P_{MUT}}$	عدم قطعیت مربوط به پالس‌های خروجی از کنتور در آزمایش
$u_{T_{MUT}}$	عدم قطعیت مربوط به کنتور در زمان آزمایش
u_{K_C}	عدم قطعیت مربوط به ثابت کالیبراتور (پالس‌های کالیبراتور بر واحد حجم)
$u_{K_{MUT}}$	عدم قطعیت مربوط به ضریب K کنتور (پالس‌های کنتور بر واحد حجم)
$u_{V_{MUT}}$	عدم قطعیت مربوط به متوسط زمانی نرخ جریان حجمی کنتور تحت آزمایش
$u_{V_{STD}}$	عدم قطعیت مربوط به متوسط زمانی نرخ جریان حجمی پیستون
u_{β}	عدم قطعیت مربوط به ضریب انبساط گرمایی حجمی در سیال در سیستم کالیبراسیون در دمای عملیاتی اسمی و فشار ثابت
$u_{T_{MUT}}$	عدم قطعیت مربوط به دمای متوسط زمانی در کنتور تحت آزمایش
$u_{T_{STD}}$	عدم قطعیت مربوط به دمای متوسط زمانی در پیستون
$u_{V_{CV}}$	عدم قطعیت حجم اتصالی بین کنتور و پیستون، مجموع حجم لوله‌ها از خروجی سیلندر به کنتور تحت آزمایش و حجم درون سیلندر بین پورت خروجی سیلندر و خروجی پیستون
$u_{V_{STD}}$	عدم قطعیت مربوط به حجم استاندارد در پیستون
$u_{t_{CVf}}$	عدم قطعیت مربوط به متوسط مکانی دمای سیال در انتهای محل تحویل حجم استاندارد
$u_{T_{CVi}}$	عدم قطعیت مربوط به متوسط مکانی دمای سیال در ابتدای محل تحویل حجم استاندارد
$u_{\alpha_{ENC}}$	عدم قطعیت مربوط به ضریب انبساط گرمایی انکدر
u_{α_T}	عدم قطعیت مربوط به ضریب انبساط گرمایی لوله جریان
u_{α_P}	عدم قطعیت اندازه‌گیری مربوط به ضریب انبساط فشار لوله جریان
$u_{T_{AMB}}$	عدم قطعیت مربوط به اندازه‌گیری دمای محیط
$u_{P_{STD}}$	عدم قطعیت مربوط به اندازه‌گیری فشار سیال

۲-۴. روابط محاسبه عدم قطعیت کنتور اولتراسونیک

عدم قطعیت ترکیبی برای کنتور اولتراسونیک به‌صورت ذیل به دست می‌آید [۱۹]:

$$u_C^2 = u_P^2 + u_T^2 + u_{cal}^2 + u_{comm}^2 + u_v^2 + u_{USM}^2 + u_{flocom}^2 + u_{Z/Z_0}^2 + u_\rho^2 + u_{H_s}^2 + u_q^2 + u_Q^2 \quad (۱۲)$$

که در این رابطه:

u_{cal} : عدم قطعیت استاندارد ترکیبی تخمین q_V در اثر کالیبراسیون جریان،

u_{UMS} : عدم قطعیت استاندارد ترکیبی تخمین q_V در اثر بهره‌برداری میدانی،

u_{comm} : عدم قطعیت استاندارد ترکیبی تخمین q_V در اثر سیگنال‌های ارتباطی بین تجهیزات الکترونیک کنتور و فلوکامپیوتر،

u_{flocom} : عدم قطعیت استاندارد ترکیبی تخمین q_V در اثر محاسبات فلوکامپیوتر،

u_P : عدم قطعیت استاندارد ترکیبی برای تخمین فشار خط،

u_T : عدم قطعیت استاندارد ترکیبی برای تخمین دمای خط،

u_{Z/Z_0} : عدم قطعیت استاندارد ترکیبی برای تخمین ضریب تراکم در دو حالت شرایط استاندارد و شرایط خط،

u_ρ : عدم قطعیت استاندارد ترکیبی برای تخمین چگالی،

u_{H_s} : عدم قطعیت استاندارد ترکیبی برای تخمین ارزش حرارتی گاز،

u_q : عدم قطعیت استاندارد ترکیبی برای دبی حجمی در شرایط خط،

u_Q : عدم قطعیت استاندارد ترکیبی برای دبی حجمی در شرایط استاندارد.

با در نظر گفتن u_{q_v} ، u_Q، u_{q_m} و u_{q_e} به ترتیب به‌عنوان عدم قطعیت استاندارد ترکیبی نسبی دبی حجمی

۲-۵. روابط محاسبه عدم قطعیت کنتور توربینی

عدم اطمینان استاندارد نسبی از سرعت جریان حجمی در شرایط استاندارد را می‌توان از طریق معادله ذیل به دست آورد [۲۰]:

$$\left(\frac{u(q_{v\,0,meas})}{q_{v\,0,meas}}\right)^2 = \left(\frac{u(A_{Gas}^{m,\Delta p} A_{steel}^{m,\Delta p,c})}{A_{Gas}^{m,\Delta p} A_{steel}^{m,\Delta p,c}}\right)^2 + \left(\frac{u(q_{v\,0}^{cal})}{q_{v\,0}^{cal}}\right)^2 + \left(\frac{u(q_{v\,0}^{prov})}{q_{v\,0}^{prov}}\right)^2 + \left(\frac{u(q_{v\,0}^{met})}{q_{v\,0}^{met}}\right)^2 \quad (۱۳)$$

تفسیر این معادله این است که عدم قطعیت، شامل سهم مربوط به انبساط فولاد و گاز تحت فشار، سهم مربوط به فرآیند کالیبراسیون (ترم دوم)، سهم مربوط به فرآیند Proving (ترم سوم) و سهم مربوط به اندازه‌گیری جریان (ترم آخر) می‌باشد.

۳. نتایج

۳-۱. محاسبه عدم قطعیت کلی مرکز کالیبراسیون کنتور توربینی

در این مرکز از دستگاه آزمون اتمسفریک و چهار کنتور مرجع برای اندازه‌گیری جریان هوا و کالیبراسیون کنتورهای توربینی تحت آزمایش استفاده می‌شود. در این دستگاه آزمون که به‌صورت حلقه باز است، کنتور تحت آزمایش در قسمت مکش هوای ورودی نصب شده است. مشخصات کلی دستگاه آزمون این مرکز به شرح زیر است:

جدول ۲: مشخصات دستگاه آزمون مرکز کالیبراسیون کنتور توربینی

پارامتر	مقدار
محدوده دبی (استاندارد مترمکعب بر ساعت)	۲۵۰۰-۱۵۰۰
محدوده فشار (میلی بار)	۱۰۵۰-۹۵۰
محدوده دما (°C)	۳۰-۱۵
سیال آزمایش	هوا

با توجه به ظرفیت مرکز، کنتورها و نیز سایر تجهیزات اندازه‌گیری مورد استفاده مانند اندازه‌گیرهای دما و فشار، در ادامه به انجام محاسبات عدم قطعیت و گزارش آن پرداخته شد. محاسبات عدم قطعیت مربوط به ظرفیت ۲۵۰۰ مترمکعب

بر ساعت با استفاده از دو کنتور R1 و R4 است که مدارک آن بررسی شده است. این دو کنتور به‌صورت موازی با یکدیگر نصب شده و هر کنتور یک اندازه‌گیر دما و اختلاف فشار داشت.

با توجه به روابط ارائه شده در ادامه، (جداول ۳ تا ۵) نتایج محاسبات عدم قطعیت هر مسیر و عدم قطعیت کلی برای دبی آزمایش ۲۵۰۰ مترمکعب بر ساعت ارائه شده است.

جدول ۳: نتایج محاسبات عدم قطعیت مسیر اول با کنتور R1 مرکز کالیبراسیون کنتور توربینی-دبی ۲۵۰۰ مترمکعب بر ساعت

متغیر ورودی	عدم قطعیت	واحد	اطمینان	عدم قطعیت استاندارد	ضریب حساسیت	واریانس
کالیبراسیون مرجع	۰/۱۷	٪	٪۹۵	۰/۰۸۵	۱	۰/۰۰۷۲۳
تکرارپذیری کالیبراسیون	۰/۱	٪	٪۹۵	۰/۰۵	۱	۰/۰۰۲۵
انحراف کالیبراسیون	۰/۲۳۸	٪	٪۹۵	۰/۱۱۹	۱	۰/۰۱۴۲
فشار	۰/۱	٪	٪۹۵	۰/۰۵	۱	۰/۰۰۲۵
دما	۰/۰۳۴۷	٪	٪۹۵	۰/۰۱۷۴	۱	۰/۰۰۰۳۰۱
ضریب Z/Zo	۰/۱۱۳	٪	٪۹۵	۰/۰۵۶۴	۱	۰/۰۰۳۱۸
			مجموع واریانس (٪۲)			**۰/۰۲۹۹**
			عدم قطعیت استاندارد ترکیبی (٪)			**۰/۱۷۳**
			عدم قطعیت کلی			**۰/۳۴۶**

جدول ۴: نتایج محاسبات عدم قطعیت مسیر اول با کنتور R4 مرکز کالیبراسیون کنتور توربینی-دبی ۲۵۰۰ مترمکعب بر ساعت

متغیر ورودی	عدم قطعیت	واحد	اطمینان	عدم قطعیت استاندارد	ضریب حساسیت	واریانس
کالیبراسیون مرجع	۰/۱۶	٪	٪۹۵	۰/۰۸	۱	۰/۰۰۶۴
تکرارپذیری کالیبراسیون	۰/۱	٪	٪۹۵	۰/۰۵	۱	۰/۰۰۲۵
انحراف کالیبراسیون	۰/۳۴۴	٪	٪۹۵	۰/۱۷۲	۱	۰/۰۲۹۶
فشار	۰/۱	٪	٪۹۵	۰/۰۵	۱	۰/۰۰۲۵
دما	۰/۰۳۴۷	٪	٪۹۵	۰/۰۱۷۴	۱	۰/۰۰۰۳۰۱
ضریب Z/Zo	۰/۱۱۳	٪	٪۹۵	۰/۰۵۶۴	۱	۰/۰۰۳۱۸
			مجموع واریانس (٪۲)			**۰/۰۴۴۵**
			عدم قطعیت استاندارد ترکیبی (٪)			**۰/۲۱۱**
			عدم قطعیت کلی			**۰/۴۲۲**

جدول ۵: نتایج محاسبات عدم قطعیت کلی مرکز کالیبراسیون کنتور توربینی-دبی ۲۵۰۰ مترمکعب بر ساعت

متغیر ورودی	عدم قطعیت استاندارد R1	عدم قطعیت استاندارد R4	واریانس
کالیبراسیون مرجع	۰/۰۸۵	۰/۰۸	۰/۰۰۳۴۱
تکرارپذیری کالیبراسیون	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۰۰۱۲۵
انحراف کالیبراسیون	۰/۱۱۹	۰/۱۷۲	۰/۰۱۰۹
فشار	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۰۰۱۲۵
دما	۰/۰۱۷۴	۰/۰۱۷۴	۰/۰۰۰۱۵۱
ضریب Z/Zo	۰/۰۵۶۴	۰/۰۵۶۴	۰/۰۰۳۱۸
		مجموع واریانس (٪۲)	**۰/۰۲۰۲**
		عدم قطعیت استاندارد ترکیبی (٪)	**۰/۱۴۲**
		عدم قطعیت کلی	**۰/۲۸۴**

با توجه به محاسبات انجام شده، عدم قطعیت کلی مرکز کالیبراسیون کنتور توربینی با دبی ۲۵۰۰ مترمکعب بر ساعت برابر با ۰/۲۸۴درصد به‌دست آمده است.

۳-۲. محاسبه عدم قطعیت کلی مرکز کالیبراسیون کنتور دیافراگمی

در این مرکز کالیبراسیون کنتورهای دیافراگمی توسط دو نوع کالیبراتور مرجع که شامل یک عدد بل پروور و یک عدد سونیک نازل است، انجام می‌شود.

دستگاه بل پروور به‌عنوان سیستم مرجعی برای کالیبره کردن وسایل اندازه‌گیری گاز در ظرفیت‌های مختلف و فشار ثابت، مورد استفاده قرار می‌گیرد. این سیستم با نمایش ظرفیت، فشار و دبی، وسیله مناسبی برای کالیبره کردن کنتورهای گاز دیافراگمی تجاری و خانگی می‌باشد. تمامی اطلاعات کنتورهای در حال آزمایش و مشخصات دما، فشار، جابجایی و ... توسط سنسورهای تعبیه شده در دستگاه برای انجام محاسبات، سنجش و ثبت اطلاعات مربوطه به نرم‌افزار مخصوص ارسال می‌شود. مشخصات کلی بل پروور مورد استفاده در (جدول ۶) نمایش داده شده است.

جدول ۶: مشخصات کلی بل پروور مرکز کالیبراسیون کنتور گاز دیافراگمی

ردیف	پارامتر	مقدار
۱	ظرفیت اسمی	۱۰ مترمکعب بر ساعت
۲	نام سازنده	کنترل گاز اکباتان
۳	حداقل دبی	۰/۰۲۵ مترمکعب بر ساعت
۴	حداکثر دبی	۱۲ مترمکعب بر ساعت

سنسورهای مورد استفاده در کالیبراسیون با استفاده از بل پروور عبارتند از: سنسور فشار عقربه‌ای به‌منظور اندازه‌گیری فشار سیال آزمایش، بارومتر جیوه‌ای برای اندازه‌گیری فشار محیط آزمایش، خط کش مدرج به‌منظور اندازه‌گیری اختلاف فشار، سنسور PT100 برای اندازه‌گیری دمای سیال آزمایش، یک کرنومتر برای اندازه‌گیری زمان عبور سیال و سنسور دما و رطوبت سیال آزمایش و محیط. با توجه به مشخصات و مدارک دستگاه‌های اندازه‌گیری مورد استفاده در کالیبراسیون کنتور دیافراگمی به‌وسیله بل پروور، عدم قطعیت کلی آن در (جدول ۷) ذکر شده است.

جدول ۷: عدم قطعیت کلی بل پروور مرکز کالیبراسیون کنتور دیافراگمی

ردیف	متغیر	مقدار (٪)
۱	عدم قطعیت اندازه‌گیری فشار	۰/۰۴۸
۲	عدم قطعیت اندازه‌گیری دما	۰/۰۵
۳	عدم قطعیت اندازه‌گیری اختلاف فشار	۰/۰۶۵
۴	عدم قطعیت اندازه‌گیری زمان	۰/۰۵۳
۵	عدم قطعیت کالیبراسیون ابعادی	۰/۰۴۱
۶	عدم قطعیت کلی	۰/۲۳

مشخصات کلی سونیک نازل اول مورد استفاده در (جدول ۸) نمایش داده شده است.

جدول ۸: مشخصات کلی سونیک نازل مرکز کالیبراسیون کنتور دیافراگمی

ردیف	متغیر	مقدار
۱	ظرفیت اسمی	۱۰ مترمکعب بر ساعت
۲	نام سازنده	EP GERMANY
۳	حداقل دبی	۰,۰۲۵ مترمکعب بر ساعت
۴	حداکثر دبی	۱۰ مترمکعب بر ساعت

سنسورهای مورد استفاده در کالیبراسیون با استفاده از سونیک نازل اول عبارتند از: اندازه‌گیر فشار به‌منظور اندازه‌گیری فشار سیال آزمایش، سنسور فشار برای اندازه‌گیری فشار محیط آزمایش، اندازه‌گیر اختلاف فشار به‌منظور اندازه‌گیری اختلاف فشار، اندازه‌گیر دما برای اندازه‌گیری دمای سیال آزمایش. با توجه به مشخصات و مدارک تجهیزات مورد استفاده، عدم قطعیت کلی سونیک نازل مورد استفاده در مرکز کالیبراسیون کنتور گاز دیافراگمی در (جدول ۹) ذکر شده است.

جدول ۹: عدم قطعیت کلی سونیک نازل مورد استفاده در مرکز کالیبراسیون کنتور دیافراگمی

ردیف	متغیر	مقدار
۱	عدم قطعیت اندازه‌گیری فشار	۰/۰۳۵
۲	عدم قطعیت اندازه‌گیری دما	۰/۰۵
۳	عدم قطعیت ضریب تخلیه	۰/۱۸
۴	عدم قطعیت فاکتور جریان بحرانی	۰/۱۱
۵	عدم قطعیت اندازه‌گیری قطر گلوگاه	۰/۰۵
۶	عدم قطعیت کلی	۰/۴۵

نتایج به‌دست آمده از مطالعه انجام شده نشان داده است که مقدار عدم قطعیت کلی در دو مرکز بررسی شده کمتر از ۰/۵درصد بوده است. مقایسه این اعداد با نتایج گزارش شده توسط آزمایشگاه‌های کالیبراسیون معتبر مانند مرکز کالیبراسیون فورس دانمارک نشان می‌دهد، بهترین مقدار عدم قطعیت، ۰/۳درصد و کمتر می‌باشد که این مقدار برای حجم بالای مبادلات گاز در سال است. مرکز کالیبراسیون فورس[1] مقدار ۰/۵درصد تا ۰/۳درصد در عدم قطعیت کلی را قابل قبول می‌داند و پیشنهاد می‌کند تا با انجام اقداماتی، در مسیر کاهش عدم قطعیت کلی اندازه‌گیری گام برداشت [۲۱].

۴. نتیجه‌گیری

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 به‌عنوان یک چالش و مسئله‌ی بسیار مهم، توجه ویژه‌ای نمود. یکی از مهم‌ترین مباحث در اندازه‌گیری صحیح گاز، عدم قطعیت کنتور به‌عنوان ابزار اندازه‌گیری است. در این زمینه بر طبق استانداردها و دستورالعمل‌های مربوطه، لازم است عدم قطعیت تک‌تک اجزاء سیستم اندازه‌گیری در محدوده مجاز باشد. یکی از مشکلاتی که شرکت ملی گاز ایران با توجه به وسعت شبکه انتقال و توزیع گاز و نیز حجم بسیار بالای این محصولات در کشور، با آن روبرو است میزان گاز محاسبه نشده بالاتر از استانداردهای جهانی است. منشأ اصلی وجود این گاز محاسبه نشده علاوه بر نشتی، سرقت، مصارف درون شبکه و ...، کالیبره نبودن کنتورها و تجهیزات اندازه‌گیری است. امروزه بالغبر چهارده میلیون کنتور خانگی و تجاری و بیش از چهل هزار کنتور صنعتی مورد استفاده در کشور نیاز به کالیبراسیون در آزمایشگاه‌های کالیبراسیون کنتورهای گاز دارند. محاسبات عدم قطعیت در مرحله انتخاب، خرید و نیز کالیبراسیون کنتورهای گاز خانگی، تجاری و صنعتی، نقش کلیدی ایفا می‌کند. مشخص نبودن عدم قطعیت تجهیز و پارامترهای مؤثر بر اندازه‌گیری آن در آزمایشگاه‌های کالیبراسیون سبب می‌شود اطمینان از اندازه‌گیری انجام شده به‌وسیله تجهیز کاهش یابد که این موضوع سبب افزایش مقدار گاز محاسبه نشده خواهد شد. در این مطالعه، به بررسی تجهیزات مورد استفاده در کالیبراسیون کنتورهای گاز و ارائه روابط برای محاسبه عدم قطعیت کلی کالیبراسیون کنتورهای گاز مختلف پرداخته شد. در انتها نیز با استفاده از این روابط، عدم قطعیت کلی دو مرکز نمونه که به کالیبراسیون کنتورهای دیافراگمی و توربینی می‌پرداختند، محاسبه و گزارش شد.

تشکر و قدردانی

از حمایت و پشتیبانی مالی شرکت گاز استان آذربایجان شرقی برای انجام این پژوهش، تقدیر و تشکر می‌گردد.

فهرست علائم اختصاری و زیروندها

علائم

دما [K]	T
دما در شرایط استاندارد [K]	T_0
زمان [s]	t
عدم قطعیت بسط یافته	U
عدم قطعیت استاندارد	u
حجم [m^3]	V
ضریب تراکم‌پذیری در شرایط خط	Z
ضریب تراکم‌پذیری در شرایط استاندارد	Z_0

حروف یونانی

چگالی [kg/m^3]	ρ
چگالی در شرایط استاندارد [kg/m^3]	ρ_0
سطح مقطع[m^2]	A
ضریب حساسیت	c_i
جرم[kg]	m
فشار در شرایط خط [Pa]	P
فشار در شرایط استاندارد [Pa]	P_0
دبی [h/m^3]	Q
دبی در شرایط استاندارد [h/m^3]	Q_0
دبی جرمی [kg/s]	q

زیرنویس

خروجی	e
جرمی	m
شرایط استاندارد	0

1. Force Technology

مراجع:

[1]. Arpino, F., M. Dell'Isola, G. Ficco, and P. Vigo, Unaccounted for gas in natural gas transmission networks: Prediction model and analysis of the solutions. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2014. 17: p. 58-70.

[2]. Ficco, G., M. Dell'Isola, P. Vigo, and L. Celenza, Uncertainty analysis of energy measurements in natural gas transmission networks. Flow Measurement and Instrumentation, 2015. 42: p. 58-68.

[3]. Dörr, H., T. Koturbash, and V. Kutcherov, Review of impacts of gas qualities with regard to quality determination and energy metering of natural gas. Measurement Science and Technology, 2019. 30(2): p. 022001.

[4]. Bekraoui, A., A. Hadjadj, A. Benmounah, and M. Oulhadj, Uncertainty study of fiscal orifice meter used in a gas Algerian field. Flow Measurement and Instrumentation, 2019. 66: p. 200-208.

[5]. Tang, P.W. and F.B. Energy, Pressure, Temperature, and Other Effects on Turbine Meter Gas Flow Measurement. J Sch. Gas Meas. Technol, 2015. 3.

[6]. Kegel, T., Flow Measurement Uncertainty - Analysis Based on Field Grade Components, in 4th CIATEQ Seminar on Advanced Flow Measurement. 2004.

[7]. 7. Kegel, T., Uncertainty Analysis of Turbine and Ultrasonic Meter Volume Measurements, in American Gas Association. 2005.

[8]. 8. Johnson, A. and T. Kegel, Uncertainty and traceability for the CEESI Iowa natural gas facility. Journal of research of the National Institute of Standards and Technology, 2004. 109(3): p. 345.

[9]. 9. Kegel, T., Uncertainty Analysis Of A Volumetric Primary Standard, in 5th International Symposium on Fluid Flow Measurement. 2002.

[10]. 10. Emrys, H. and J. Jones, Theoretical Uncertainty Of Orifice Flow Measurement, in International School of Hydrocarbon Measurement. 1986.

[11]. 11. NASA, P., Overall Measurement Accuracy —Determination And Influence, in American School Of Gas Measurement Technology. 2003.

[12]. 12. Marinho, F., Uncertainty In Flow Gas Measurement Systems With Ultrasonic Meters, in North Sea Flow Measurement Workshop. 2015.

[13]. 13. Abernethy, R., R. Benedict, and R. Dowdell, ASME measurement uncertainty. Journal of Fluids Engineering, 1985. 107(2): p. 161-164.

[۱۴]. ا. اکبری، م. سیاح نژاد و ن. ا. رضوی، «محاسبه عدم قطعیت ترکیبی سیستم میترینگ گاز پالایشگاه شهید هاشمی نژاد بر اساس استاندارد ایزو ۵۱۶۸»، سومین همایش ملی اندازه‌گیری جریان سیالات در صنایع نفت، گاز، پالایش، پتروشیمی و آب، ۱۳۹۵.

[15]. Johnson, R.C., Real-gas effects in critical flow through nozzles and thermodynamic properties of nitrogen and helium at pressures to 300x105 newtons per square meter (approx. 300 atm). nasa sp-3046. NASA Special Publication, 1968. 3046.

[16]. Johnson, R.C., Calculations of the flow of natural gas through critical flow nozzles. 1970.

[17]. Choi, H.M., K.-A. Park, Y.K. Oh, and Y.M. Choi, Uncertainty evaluation procedure

and intercomparison of bell provers as a calibration system for gas flow meters. Flow measurement and instrumentation, 2010. 21(4): p. 488-496.

[18]. Johnson, A.N. and J.D. Wright, Gas flowmeter calibrations with the 26 m 3 PVTt standard. NIST Special Publication, 2009. 1046.

[19]. Lunde, P., K.-E. Froysa, S. Neumann, and S. Vervik. Handbook of Uncertainty Calculations–Ultrasonic Fiscal Gas Metering Stations. in 26 th International North Sea Flow Measurement Workshop. 2003.

[20]. NFOGM, Handbook of uncertainty calculations for ultrasonic, turbine and Coriolis oil flow metering stations. 2018.

[21]. Lonna Dickenson, E. Reduce operational uncertainty in large volume gas transfers. 2024; Available from: https://forcetechnology.com/en/articles/reducing-operational-uncertainty-in-large-volume-gas-transfers.

IRANIAN JOURNAL OF GAS ENGINEERING

Volume 10 / Issue 2 / NO. 18 / Winter 2023 / Pages 17-28

Journal Homepage: www.ijge.irangi.org

Gas Measurement Systems Overall Uncertainty: Gas Meter Calibration Laboratories Case Study

Seyed Hassan Hashemabadi[1*], Mohammad Salemi Mojarad[2], Alireza Asadi[3], Bahark Mardangahi[4], Mohammad Reza Sokhandani[5]

1. Professor, Computational Fluid Dynamics (CFD) Research Laboratory, School of Chemical, Petroleum and Gas Engineering, Iran University of Science and Technology, 16846 Tehran, Iran
2. M.Sc., Fluid Flow Measurement Research Institute, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran
3. M.Sc., Mechanical Repair Engineer, South Pars Gas Complex Company, Bushehr, Iran
4. M.Sc., Research and Technology, Gas Company of East Azarbaijan Province, Tabriz, Iran

ARTICLE INFO

ORIGINAL ARTICLE

Article History:
Received: 01 November 2023
Revised: 24 December 2023
Accepted: 30 December 2023

Keywords:
Overall Uncertainty
Calibration
Calibration Centers
Diaphragm Meter
Turbine Meter

ABSTRACT

One of the most important issues in accurate gas measurement is the uncertainty of the meter as the measurement tool. According to relevant standards and guidelines, it is necessary that the uncertainty of each component of the measurement system, such as the measurement element (e.g., orifice plate), temperature and pressure transmitter devices, etc., be within the permissible range. In addition, one of the very critical issues that unfortunately is not given much attention today is the overall uncertainty of the measurement system and the interactions and mutual effects of the system components on each other and on the overall uncertainty of the system. Therefore, this study presents the necessary relationships for calculating the overall uncertainty of gas meter calibration laboratories in the country. Finally, the overall uncertainty of two centers is calculated and reported as an example. One of these centers had the ability to calibrate turbine meters and the other had the ability to calibrate diaphragm meters. The results showed that the overall uncertainty of the turbine meter calibration center was 0.422%, of which the calibration deviation of the reference meter had the greatest role in this overall uncertainty. Also, the calculation of the overall uncertainty of the diaphragm meter calibration center showed that the best overall uncertainty of this center was 0.23%.

DOR: 20.1001.1.25885251.1402.00.00

How to cite this article

S.H. Hashemabadi, M. Salemi Mojarad., A. Asadi, B. Mardangahi, M.R. Sokhandani, Gas Measurement Systems Overall Uncertainty: Gas Meter Calibration Laboratories Case Study. *Iranian Journal of Gas Engineering*. 2023; 10(2): 17-28. (https://www.ijge.irangi.org/article_712583.html)

* Corresponding Author.
E-mail address: hashemabadi@iust.ac.ir, (S.H. Hashemabadi).

Available online 31 December 2023
25885-5251/© 2023 The Authors. Published by Iranian Gas Institute.
This is an open access article under the CC BY license. (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0)