

**طراحی و بررسی عددی جریان سنج جرمی حرارتی لوله موئین به عنوان کنتور گاز خانگی\***سامان پرویزی<sup>(۱)</sup> محمود فرزانه گرد<sup>(۲)</sup> علی جباری مقدم<sup>(۳)</sup> مجید هاشمیان<sup>(۴)</sup> مهرباب عقیلی بهرامی<sup>(۵)</sup>

**چکیده** اندازه‌گیری دقیق شدت جریان جرمی گاز طبیعی همواره مسئله مهمی به‌ویژه در سطح مصارف خانگی بوده است. یکی از انواع جریان‌سنج‌های جرمی، جریان‌سنج جرمی حرارتی لوله موئین می‌باشد که برای اندازه‌گیری جریان‌های با دبی پایین استفاده می‌شود. در این مطالعه سنسخت پارامترهای مهم و تأثیر هر یک از این پارامترها در طراحی جریان‌سنج حرارتی لوله موئین بررسی شده است. برای این کار مدل سه‌بعدی یک جریان‌سنج جرمی حرارتی لوله موئین شبیه‌سازی و انتقال حرارت در لوله حسگر آن به‌صورت عددی برای گاز متان به‌عنوان گاز طبیعی تحلیل شده است. برای اعتبارسنجی روش حل عددی، به دلیل عدم وجود داده‌های آزمایشگاهی برای متان، از نیتروژن استفاده شده است که تطابق قابل قبولی را نشان می‌دهد. نتایج عددی نشان می‌دهد که عدم قطعیت این جریان‌سنج‌ها حداکثر ۱/۲۴ درصد است که برای کنتورهای خانگی قابل قبول می‌باشد.

**واژه‌های کلیدی** اندازه‌گیری جریان، جریان‌سنج حرارتی، انتقال حرارت سه‌بعدی، جریان‌سنج لوله موئین، کنتور گاز خانگی.

**Designing and Numerical Analysis of Capillary Tube Thermal Mass Flowmeter for Residential Natural Gas Meter**

S. Parvizi M. Farzaneh-Gord A. Jabari Moghadam M. Hashemian M. Aghili Bahrami

**Abstract** Accurate natural gas measurement is an important issue especially in domestic usage level. Capillary tube thermal mass flow meter is one of the most common types of mass flow meters which are mostly used for low mass flow rates. In this work, a capillary tube flow meter was simulated numerically. A three-dimensional steady state heat transfer in its sensor tube was numerically analyzed and the sensitivity of this type of flow meter was investigated. In order to validate the simulation approach, the simulation was also accomplished for Nitrogen, for which experimental data was available in the literature. It is shown that the simulation result is reasonable. Considering all the possible effective parameters, the uncertainty of the flow meter was also calculated. Numerical results show that the maximum amount of uncertainty in measurement for this type of flow meter is less than 1.24% which is acceptable for residential customers.

**Key Words** Flow metering, Thermal massflowmeter, Three-Dimensional heat transfer, Capillary tube mass flow meter, Residential Natural Gas Meter

جریان حجمی اندازه‌گیری و نتیجه در چگالی ضرب می‌شود. جریان‌سنج‌هایی که با این روش کار می‌کنند ابزار اضافی مانند حسگر فشار و دما لازم دارند تا جریان جرمی را محاسبه نمایند. برخلاف این مدل،

**مقدمه**

در بسیاری از صنایع، اندازه‌گیری جریان جرمی بر اندازه‌گیری جریان حجمی برتری دارد. دو شیوه برای اندازه‌گیری جریان جرمی وجود دارد. در روش اول

\* تاریخ دریافت مقاله ۹۴/۱۲/۱۱ و تاریخ پذیرش آن ۹۶/۱/۱۹ می‌باشد.

(۱) نویسنده مسئول، کارشناس ارشد، دانشکده مکانیک، دانشگاه شاهرود، saman.parvizi@gmail.com

(۲) استاد، دانشکده مکانیک، دانشگاه شاهرود.

(۳) دانشیار، دانشکده مکانیک، دانشگاه شاهرود.

(۴) استادیار، دانشکده مکانیک، دانشگاه شاهرود.

(۵) کارشناس ارشد، شرکت گاز استان گلستان.

جریان‌سنج‌های نوع دوم جریان جرمی را مستقیماً اندازه‌گیری می‌کنند که تغییرات فشار و دمای ورودی تأثیر ناچیزی بر آن دارد. جریان‌سنج‌های جرمی حرارتی به این دسته تعلق دارند.

اندازه‌گیری دقیق جریان گاز طبیعی کار دشواری می‌باشد؛ دلیل اصلی آن تراکم‌پذیر بودن سیال است. روش‌های مختلفی برای اندازه‌گیری جریان حجمی واقعی وجود دارد اما جریان اندازه‌گیری شده با تغییرات دما و فشار تغییر می‌کند. به همین دلیل در تمام فرایندهای صنعتی تمایل به اندازه‌گیری جریان جرمی به جای جریان حجمی وجود دارد.

یکی از وسایل اندازه‌گیری مستقیم جریان جرمی جریان‌سنج‌های جرمی حرارتی می‌باشد [1]. جریان‌سنج‌های دیافراگمی که یکی از انواع جریان‌سنج‌های جابه‌جایی مثبت است رایج‌ترین نوع وسیله اندازه‌گیری در صنعت گاز به‌ویژه مصارف خانگی است. جریان‌سنج‌های دیافراگمی، جریان حجمی گاز طبیعی را با شمارش تعداد دفعات پر و خالی شدن حجم ثابتی اندازه‌گیری می‌کنند [2]. به‌رغم مزایای این جریان‌سنج‌ها همچون قیمت پایین، محدودیت‌هایی نظیر قطعات متحرک، این نوع جریان‌سنج‌ها را نیازمند تعمیرات دوره‌ای می‌کند. اما عیب اصلی جریان‌سنج‌های دیافراگمی این است که در جریان‌های پایین مانند مصارف خانگی خطای آن بسیار زیاد است. به‌علاوه اینکه این نوع جریان‌سنج‌ها جریان حجمی را اندازه می‌گیرند. عدم دقت کنتورهای خانگی گاز طبیعی یکی از دلایل عمده گم شدن گاز طبیعی در شبکه توزیع گاز می‌باشد [4, 5]. مقدار گاز گم شده در شبکه توزیع گاز طبیعی ایران در سال ۲۰۱۳، حدود نه میلیارد مترمکعب تخمین زده شده است [5].

جریان‌سنج جرمی حرارتی با استفاده از انرژی گرمایی جریان جرمی را اندازه‌گیری می‌کند بدین صورت که گرما توسط یک گرم‌کن به جریان سیال داده می‌شود و با استفاده از مقدار گرمای داده‌شده

و اختلاف دمای ایجادشده که به کمک دو حسگر دما محاسبه می‌شود جریان اندازه‌گیری می‌شود. این نوع جریان‌سنج برای گازها بهترین کارایی را دارد زیرا ایجاد اختلاف دمای زیاد در مایعات به دلیل ملاحظات مربوط به ظرفیت گرمایی بالا مشکل است [6]. بنابراین برای سنجش جریان مایعات، طراحی خاص همراه با هزینه بالا لازم است. علاوه بر این به دلیل آنکه سنجش به‌وسیله حسگرها به‌صورت نقطه‌ای انجام می‌گیرد این نوع جریان‌سنج‌ها اطلاعاتی درمورد جریان به ما نمی‌دهند. جریان‌سنج جرمی حرارتی به دو نوع جریان‌سنج جرمی حرارتی شناور و لوله‌مویین تقسیم می‌شود. اگرچه هر دو نوع از انرژی حرارتی برای اندازه‌گیری جریان استفاده می‌کنند اما اصول کارکرد آنها کاملاً متفاوت است. در مدل لوله‌مویین سطح گرم‌شده لوله‌مویینی است که انرژی را به حجم سیال منتقل می‌کند اما در جریان‌سنج‌های شناور سطح گرم شده سطح خارجی لوله استوانه‌ای است که انرژی حرارتی را به لایه مرزی لرح پیرامون استوانه منتقل می‌کند [7].

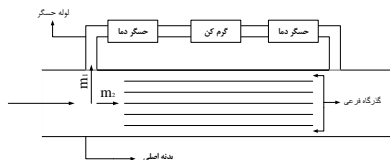
در مبحث اندازه‌گیری جریان، روش‌های متعدد و بسیاری وجود دارد که بسته به فرایند، خصوصیات سیال مورد استفاده، فشار و به خصوص دقت مورد نیاز یکی از آنها را می‌توان برای اندازه‌گیری انتخاب کرد. فیکو [2] با استفاده از مطالعات آزمایشگاهی وسیعی نشان می‌دهد که به دلیل مدت زمان استفاده، شرایط نصب و تکنولوژی ساخت، جریان‌سنج‌های دیافراگمی در گذر زمان خطای زیادی را ایجاد می‌کند. به همین دلیل تمایل به استفاده از سیستم‌های اندازه‌گیری با کارایی بهتر، روزبه‌روز بیشتر می‌شود. باید در نظر داشت که برای اندازه‌گیری جریان‌های بالاتر از مصارف خانگی در سال‌های اخیر از جریان‌سنج‌هایی مانند جریان‌سنج‌های فراصوت، صفحه روزنه‌ای و توربینی برای اندازه‌گیری جریان گاز طبیعی استفاده شده است [1].

یکی دیگر از وسایل اندازه‌گیری که به‌صورت

[19]. در نوع دیگر، که در این مطالعه بررسی شده است، انرژی گرمایی ثابت می‌باشد و جریان جرمی تابعی از اختلاف دمای ایجادشده بین دو حسگر در انرژی گرمایی ثابت است [20].

### اصول کارکرد

همان‌طور که در شکل (۱) نشان داده شده است این نوع جریان‌سنج از سه قسمت بدنه اصلی، لوله حسگر و گذرگاه فرعی تشکیل شده است. براین اساس کل جریان جرمی در خط فرایند وارد بدنه اصلی جریان‌سنج می‌شود و سپس به دو مسیر جدا تقسیم می‌شود. قسمتی از جریان وارد لوله حسگر می‌شود ( $\dot{m}_1$ ) و قسمتی از گذرگاه‌های فرعی عبور می‌کند ( $\dot{m}_2$ ). گذرگاه فرعی آرام‌ساز جریان می‌باشد که علاوه بر این کار افت فشاری ایجاد می‌کند که باعث می‌شود مقداری از جریان از لوله حسگر عبور کند. معمولاً  $\dot{m}_1$  خیلی کوچک‌تر از  $\dot{m}_2$  است. کل جریان جرمی برابر جمع جریان‌های دو مسیر می‌باشد.



شکل ۱ شماتیک جریان‌سنج حرارتی لوله‌مویین

$$\dot{m} = \dot{m}_1 + \dot{m}_2 \quad (۱)$$

$$\dot{m} = \dot{m}_1 \left( 1 + \frac{\dot{m}_2}{\dot{m}_1} \right) = c\dot{m}_1 \quad (۲)$$

عبارت  $(1 + \frac{\dot{m}_2}{\dot{m}_1})$  را نسبت گذرگاه فرعی می‌نامند. در اینجا نشان داده می‌شود اگر جریان در گذرگاه فرعی کاملاً آرام باشد نسبت گذرگاه فرعی مقداری ثابت است. به همین دلیل گذرگاه فرعی باید نقش آرام‌ساز داشته باشد و نمی‌تواند روزه‌های یا اختلاف فشاری باشد.

افت فشار در طول لوله حسگر مویین از رابطه (۳)

وسعی در اندازه‌گیری جریان جرمی استفاده می‌شود جریان‌سنج جرمی حرارتی است. شکل (۱) یک طرح‌واره از این نوع جریان‌سنج‌ها را نشان می‌دهد. کومیا و همکاران [8] حل یک‌بعدی برای انتقال حرارت لوله حسگر جریان‌سنج جرمی حرارتی لوله مویین ارائه کردند. در این مطالعه آنها از تغییرات دما در جهت شعاعی صرف‌نظر کردند و شرایط حرارتی سیال را ثابت فرض کردند. هینکل [9] از یک مدل دوبعدی برای شبیه‌سازی پدیده انتقال حرارت در لوله حسگر استفاده کردند. آنها فرض کردند که جریان در لوله حسگر از نظر حرارتی و هیدرودینامیکی کاملاً توسعه یافته است. کیم و جنگ [10] برهم‌کنش انتقال حرارت بین دیوار و سیال در لوله حسگر را از نظر عددی و آزمایشگاهی مطالعه کردند. آنها هم‌چنین انتقال حرارت پایا و گذرا را در لوله حسگر و هم‌چنین حساسیت جریان‌سنج را بررسی کردند [12-14]. ویزواناتان و همکاران [14] مدلی از جریان‌سنج‌های جرمی حرارتی را برای فشارهای بالا (۱۸bar و ۱۹/۵bar) برای اندازه‌گیری جریان هوا طراحی کردند. سائزین [16] و بیکر و گیمسون [17] برای اندازه‌گیری جریان هوا در خودرو جریان‌سنج جرمی حرارتی را طراحی و حل تحلیلی حسگرها را به‌دست آوردند. بیکر و گیمسون [17] تأثیرات روش ساخت بر دقت جریان‌سنج‌های جرمی حرارتی شناور را بررسی کردند. بارتوس [18] گزارش کرد که اندازه‌گیری دقیق جریان بستگی به غیرمغشوش بودن جریان دارد.

### جریان‌سنج حرارتی لوله‌مویین

جریان‌سنج‌های حرارتی براساس روش محاسبه انرژی تلف‌شده به دو نوع جریان ثابت و اختلاف دما ثابت تقسیم می‌شوند. در مدل اختلاف دما ثابت، جریان جرمی براساس مقدار انرژی گرمایی لازم برای ثابت نگه‌داشتن اختلاف دمای دو حسگر دما محاسبه می‌شود

برای لوله استوانه‌ای با جریان آرام کاملاً توسعه یافته به دست می‌آید [21].

$$\Delta P_{\text{sensor}} = C_{\text{tube}} \left( \frac{\mu}{\rho} \right) \dot{m}_1 \quad (3)$$

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

$$\begin{aligned} \Delta P_{\text{sensor}} = \Delta P_{\text{bypass}} &\rightarrow C_{\text{tube}} \left( \frac{\mu}{\rho} \right) \dot{m}_1 \\ &= \left( \frac{C_{\text{tube}}}{N} \right) \left( \frac{\mu}{\rho} \right) \dot{m}_2 \\ \rightarrow \frac{\dot{m}_2}{\dot{m}_1} &= N \end{aligned}$$

بنابراین:

$$\begin{aligned} \text{bypass ratio} &= N + 1m \\ &= \dot{m}_1(1 + N) = \text{Constant} \cdot \dot{m}_1 \end{aligned} \quad (4)$$

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

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

مشخصات جریان در لوله حسگر:

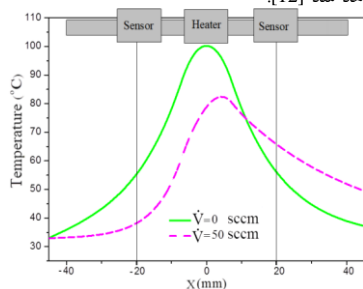
• جریان باید کاملاً آرام و توزیع سرعت کاملاً

توسعه یافته باشد.

• جریان تراکم‌ناپذیر باشد.

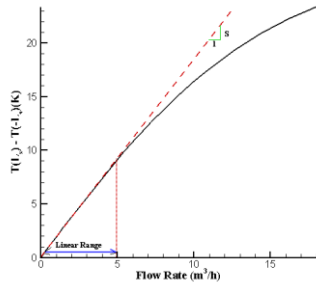
همچنین فرض می‌شود جریان در حالت پایا و خواص گاز و مواد لوله حسگر ثابت هستند. دمای لوله حسگر در عرض ضخامت لوله ثابت و دمای گاز، دمای میانگین در سطح مقطع لوله می‌باشد. این فرضیات برای لوله بلند با ضخامت کم لوله موئین با جریان آرام کاملاً توسعه یافته درست می‌باشد [22].

برای برقراری جریان آرام عدد رینولدز باید کمتر از ۲۰۰۰ باشد. در شبیه‌سازی بیشینه عدد رینولدز ۱۰۳/۴ می‌باشد که مربوط به لوله‌های موئین است. اصول کار جریان‌سنج حرارتی لوله موئین براساس قوانین اول ترمودینامیک و انتقال حرارت می‌باشد. جریان عبوری از لوله حسگر به وسیله دو حسگر دما که به طور متقارن نسبت به مرکز قرار گرفته‌اند و یک گرم‌کن که در مرکز قرار می‌گیرد اندازه‌گیری می‌شود. گرما به وسیله گرم‌کن به جریان عبوری از لوله حسگر داده می‌شود؛ همان‌گونه که در شکل (۲) نشان داده شده است در نبود جریان، حسگرها توزیع دمای متقارن را نشان می‌دهند. اما وقتی سیال در لوله حسگر جریان می‌یابد در بالادست جریان گرما از لوله حسگر به سیال و در پایین دست جریان از سیال به لوله حسگر منتقل می‌شود که باعث ایجاد اختلاف دما بین حسگرها خواهد شد [12].



شکل ۲ طرح‌واره لوله حسگر و تعریف اختلاف دمای بین دو حسگر

این اختلاف دما در دامنه خاصی با افزایش جریان



شکل ۳ تعریف بازه خطی و حساسیت جریان سنج

به صورت خطی افزایش می یابد، از این رو در این دامنه جریان عبوری از لوله حسگر رابطه مستقیمی با اختلاف دمای دو حسگر دارد که این نسبت برای هر جریان سنج باید محاسبه شود. شکل (۳) بازه خطی جریان سنج حرارتی را نشان می دهد.

بنابراین، این دامنه خطی یکی از پارامترهای مهم در طراحی جریان سنج های جرمی حرارتی لوله موین است زیرا افزایش دامنه خطی باعث امکان اندازه گیری جریان بیشتر می شود.

### حساسیت

یکی دیگر از پارامترهای مهم در طراحی جریان سنج های حرارتی لوله موین حساسیت جریان سنج می باشد. همان گونه که در شکل (۳) مشخص است حساسیت به صورت مشتق اختلاف دما نسبت به جریان در جریان صفر تعریف می شود [13]:

$$S = \frac{\partial(T_{\text{sensor tube}(L_s)} - T_{\text{sensor tube}(-L_s)})}{\partial \dot{m}} \quad (5)$$

با کاهش حساسیت، نسبت اختلاف دما به جریان جرمی کاهش می یابد. اگر اختلاف دما از دقت اندازه گیری حسگر کوچک تر شود جریان سنج حرارتی نمی تواند جریان عبوری را اندازه گیری کند. بنابراین هر چه حساسیت بالاتر باشد دقت اندازه گیری بهتر است.

### حل عددی معادلات حاکم

رابطه (۶) معادله سه بعدی پیوستگی را برای سیال عبوری از لوله حسگر بیان می کند که در آن  $u$  و  $v$  و  $w$  سرعت سیال به ترتیب در جهت های  $x$  و  $y$  و  $z$  را نشان می دهد [21].

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (6)$$

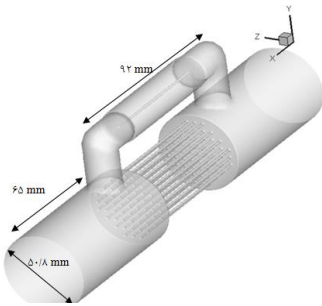
رابطه های (۷-۹) شکل سه بعدی معادله تکانه را برای حالت پایا در جهت های  $x$  و  $y$  و  $z$  نشان می دهد؛  $\rho$ ،  $\mathbf{v}$ ،  $\mathbf{p}$  و  $\mathbf{g}$  به ترتیب فشار، لزجت سینماتیکی، چگالی و شتاب جاذبه می باشند [21].

$$u \left( \frac{\partial u}{\partial x} \right) + v \left( \frac{\partial u}{\partial y} \right) + w \left( \frac{\partial u}{\partial z} \right) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad (7)$$

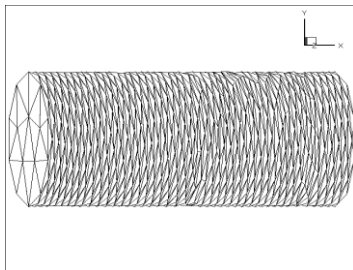
$$u \left( \frac{\partial v}{\partial x} \right) + v \left( \frac{\partial v}{\partial y} \right) + w \left( \frac{\partial v}{\partial z} \right) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) + g \quad (8)$$

$$u \left( \frac{\partial w}{\partial x} \right) + v \left( \frac{\partial w}{\partial y} \right) + w \left( \frac{\partial w}{\partial z} \right) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \nu \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \quad (9)$$

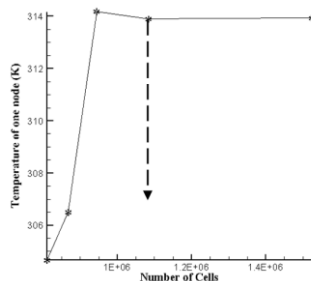
معادله (۱۰) معادله انرژی را نشان می دهد.



شکل ۴ مدل سه بعدی جریان سنج حرارتی لوله موئین



شکل ۵ نمونه مش بندی سه بعدی لوله حسگر



شکل ۶ نمودار استقلال از شبکه برای مدل سه بعدی

### انتخاب حلگر و مدل فیزیکی

بعد از اینکه شبکه و هندسه مسئله وارد نرم افزار فلوئنت شد باید شبکه از نظر ابعاد و مقیاس مناسب بررسی شود و حل کننده و مدل فیزیکی مناسب انتخاب شود. جدول (۱) نوع حلگر و مدل فیزیکی انتخاب شده در نرم افزار فلوئنت را نشان می دهد.

$$u \left( \frac{\partial T}{\partial x} \right) + v \left( \frac{\partial T}{\partial y} \right) + w \left( \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \frac{k}{\rho C_p} \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \frac{q}{\rho C_p} \quad (10)$$

در این معادله  $k$  و  $C_p$  به ترتیب هدایت حرارتی و ظرفیت گرمایی در فشار ثابت سیال،  $T$  دمای سیال و  $q$  شدت تولید حرارت در سیال است. گسسته سازی معادلات به روش حجم محدود انجام و معادلات با استفاده از نرم افزار فلوئنت ۶،۳،۲۶ حل شده است.

### مدل سازی

باتوجه به اینکه هدف از انجام این تحقیق، طراحی یک جریان سنج برای استفاده در صنعت گاز به عنوان کنتور گاز خانگی می باشد، قطر ورودی جریان سنج برابر قطر لوله ورودی کتورهای شرکت گاز و برابر با ۲ اینچ (۵۰/۸ میلی متر) در نظر گرفته شده است. قطر لوله های موئین استفاده شده در این مدل سازی براساس لوله های موجود طراحی شده است. در شکل (۴) مشخصات کلی مسئله نشان داده شده است.

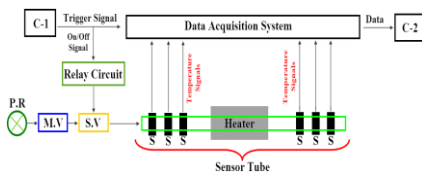
### بررسی استقلال از شبکه

از آنجاکه در تحلیل میدان جریان، وابستگی حل به شبکه محاسباتی باید ارزیابی شود، شبکه های ریز و درشت مورد بررسی قرار گرفته اند و در شبیه سازی سه بعدی برای نمونه هندسه جریان سنج با قطر لوله حسگر ۱/۴۵ میلی متر از ۱،۰۴۴،۸۰۸ سلول تشکیل شده که در شکل (۶) نمودار استقلال از شبکه آورده شده است.

## اعتبارسنجی

به دلیل **عدم وجود** داده‌های آزمایشگاهی برای متان به عنوان سیال عامل، از داده‌های آزمایشگاهی نیتروژن که توسط کیم و همکاران [12] گزارش شده است برای اعتبارسنجی روش عددی استفاده شده است. با توجه به اینکه رفتار هر دو گاز متان و نیتروژن در فشارهای پایین شبیه رفتار گاز ایده‌آل است، این مقایسه می‌تواند قابل قبول باشد.

شکل (۷) مدل آزمایشگاهی ساخته شده توسط کیم و همکاران را نشان می‌دهد [12]. در این مدل از لوله موئینی از جنس فولاد ضدزنگ به طول ۹۱ میلی‌متر استفاده شده است.



شکل ۷ مدل آزمایشگاهی انجام شده توسط کیم و همکاران [12]  
S.V: شیر اندازه‌گیری M.V، تنظیم کننده فشار: P.R، برایانه: C،  
حسگر دما: S، شیر

در مدل ارائه شده توسط کیم تمام جریان از لوله موئین عبور می‌کند. در جدول (۴) مشخصات هندسی لوله حسگر ساخته شده توسط کیم و همکاران آورده شده است.

جدول ۴ مشخصات هندسی مدل کیم و همکاران

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

شکل (۸) نتایج شبیه‌سازی عددی را در مقابل داده‌های آزمایشگاهی گزارش شده توسط کیم و همکاران نشان می‌دهد. داده‌های آزمایشگاهی توزیع دما

جدول ۱ حل گر و مدل فیزیکی انتخاب شده

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

در بیشتر موارد بیش از ۹۰٪ کسر حجمی گاز طبیعی را متان تشکیل می‌دهد [23]. بنابراین متان نزدیکترین رفتار را به گاز طبیعی دارد؛ به همین دلیل ابتدا گاز متان به عنوان سیال مورد بررسی قرار گرفت. همچنین جنس بدنه اصلی جریان سنج از فولاد و جنس عایق از پشم سنگ در نظر گرفته شده است. مشخصات فیزیکی این مواد در جدول (۲) آمده است.

جدول (۳) شرایط مرزی مسئله را نشان می‌دهد. شار حرارتی برابر  $1500 (w/m^2)$  در نظر گرفته شده است.

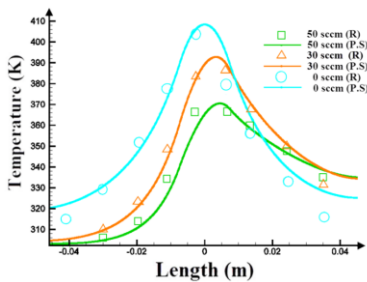
جدول ۲ مشخصات مواد استفاده شده در هندسه مدل شده

ماده	مشخصات			
	چگالی ( $kg/m^3$ )	ظرفیت گرمای ویژه در فشار ثابت ( $J/kg.K$ )	ضریب هدایت حرارتی ( $W/m.K$ )	ویسکوزیته $\times 10^{-5}$ ( $kg/m.s$ )
متان	۰/۶۵۳۶	۲۲۲۲	۰/۰۳۳۲	۱/۰۸۷
فولاد	۸۰۳۰	۵۰۲/۴۸	۱۶/۲۷	-----
پشم سنگ	۵۰	۸۴۰	۰/۰۹۲۷	-----

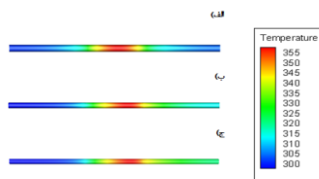
جدول ۳ شرایط مرزی اعمال شده بر مسئله

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

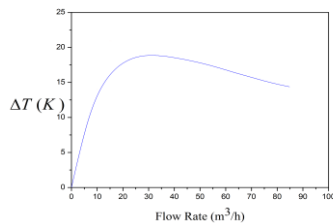
دو حسگر برحسب جریان ورودی به جریان‌سنج را برای سه هندسه بررسی شده نشان می‌دهد.



شکل ۸ مقایسه توزیع دما در طول لوله حسگر برای داده‌های آزمایشگاهی (R) و حل عددی (P.S)



شکل ۹ توزیع دما در لوله حسگر با قطر ۱/۸ میلی‌متر برای (الف) جریان ۹۱/۶ سانتی‌متر مکعب بر ساعت (ب) جریان ۴۵۸ سانتی‌متر مکعب بر ساعت (ج) جریان ۹۱۶ سانتی‌متر مکعب بر ساعت



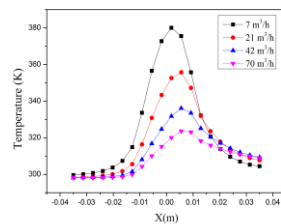
ب

شکل ۱۰ الف) توزیع دما در طول لوله حسگر ب) نمودار اختلاف دمای دو حسگر برحسب جریان ورودی به جریان‌سنج (Din=1mm, Dout=1.2mm, L=37.5mm, Ls=20mm)

برای سه جریان مختلف ۰، ۳۰ و ۵۰ سانتی‌متر مکعب بر دقیقه را گزارش می‌کنند. براساس شکل (۸) نتایج شبیه‌سازی به دمای اندازه‌گیری شده بسیار نزدیک می‌باشند اگرچه در ابتدا و انتهای لوله حسگر تفاوت‌هایی دیده می‌شود. این تفاوت‌ها ناشی از تأثیر شرایط مرزی می‌باشد. در شبیه‌سازی، جریان ورودی به صورت یکنواخت و کاملاً توسعه‌یافته بررسی شده است، در صورتیکه در عمل در ابتدا و انتهای لوله حسگر چنین شرایطی برقرار نیست. البته این انحراف از مقدار واقعی نمی‌تواند بر دقت جریان‌سنج تأثیر بگذارد زیرا آنچه در اندازه‌گیری جریان توسط جریان‌سنج حرارتی لوله‌مویین اهمیت دارد اختلاف دمای اندازه‌گیری شده به وسیله دو حسگر می‌باشد که در مکان  $L_s = \pm 7.5mm$  قرار دارد و همان‌گونه که در نمودار مشخص است اختلاف بین مقدار شبیه‌سازی و آزمایشگاهی در این نقطه ناچیز است.

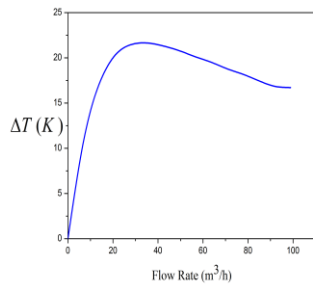
### نتایج

شکل (۹) توزیع دما برای سه جریان مختلف را نشان می‌دهد. واضح است که با افزایش جریان حرارت از بالادست جریان به سمت پایین‌دست جریان منتقل می‌شود. در شکل‌های (۱۰-۱۲) قسمت (الف) توزیع دما در طول لوله حسگر و قسمت (ب) اختلاف دمای

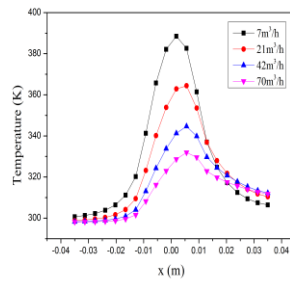


الف



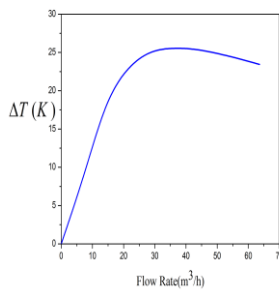


ب

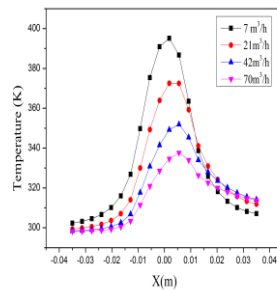


الف

شکل ۱۱ الف) توزیع دما در طول لوله حسگر ب) نمودار اختلاف دمای دو حسگر برحسب جریان ورودی به جریان سنج  
( $D_{in}=1.4mm$ ,  $D_{out}=1.6mm$ ,  $L=37.5mm$ ,  $L_s=20mm$ )



ب



الف

شکل ۱۲ مشخصات لوله حسگر  $D_{in} = 1.8mm$ ,  $D_{out} = 2mm$ ,  $L = 37.5mm$ ,  $L_s = 20mm$

الف) توزیع دما در طول لوله حسگر ب) نمودار اختلاف دمای دو حسگر برحسب جریان ورودی به جریان سنج

حساسیت ندارد. شکل (۱۵) تأثیر تفاوت مکان حسگر را نشان می‌دهد. باتوجه به این نمودار مکان حسگر بر دامنه کاری جریان سنج تأثیری ندارد، اما هرچه حسگر به مرکز لوله نزدیک‌تر باشد حساسیت جریان سنج افزایش می‌یابد. باتوجه به شکل (۱۳) تنها جریان سنج با قطر داخلی لوله حسگر ۱ میلی‌متر می‌تواند جایگزین کنتورهای خانگی G6 که در بازه کاری ۶/۱ تا ۱۰ متر مکعب بر ساعت کار می‌کند گردد و بازه خطی با قطرهای بیشتر، دامنه کاری این نوع کنتورها را پوشش

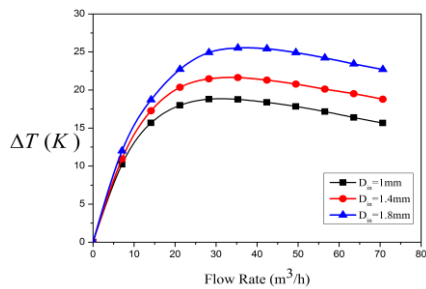
در این مطالعه تأثیر پارامترهای طراحی در حالت سه‌بعدی بررسی شده است. در شکل (۱۳) تأثیر قطر لوله حسگر بر اندازه‌گیری جریان نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود افزایش قطر لوله حسگر باعث کاهش دامنه کاری و افزایش حساسیت جریان سنج می‌شود. همچنین در شکل (۱۴) دامنه کاری جریان سنج و حساسیت جریان سنج برای سه طول لوله حسگر متفاوت بررسی شده است که نشان می‌دهد طول لوله حسگر تأثیر چندانی بر دامنه کاری و

شرایط ورودی، یعنی  $P = 1atm, T = 298K$  ضرب شود.

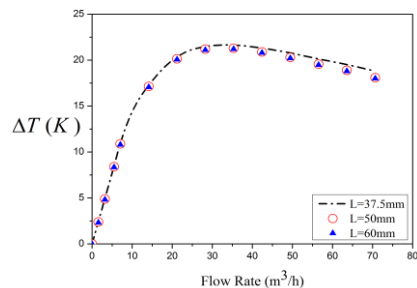
با بررسی شکل (۱۶) واضح است که خطایی به دلیل تخمین مقدار جریان جرمی با معادله خط به وجود می‌آید. شکل (۱۷) درصد این خطا را برحسب جریان جرمی نشان می‌دهد. واضح است که مقدار این خطا تا جریان حجمی  $10$  مترمکعب بر ساعت ناچیز و حداکثر حدود  $0.07\%$  و خطای میانگین حدود  $0.03\%$  می‌باشد.

$$\dot{m} = 0.7692 \times 0.6536 \times \Delta T = 0.5027\Delta T \quad (11)$$

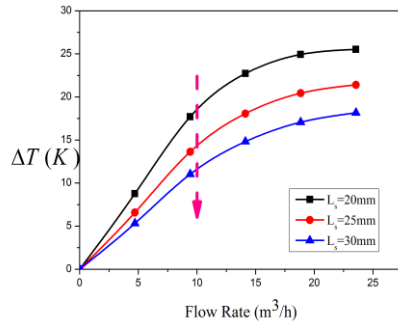
نمی‌دهد. شکل (۱۶) نمودار اختلاف دمای دو حسگر برحسب جریان ورودی به جریان‌سنج را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل مشخص است در بازه  $0$  تا  $10$  مترمکعب بر ساعت رفتار نمودار را می‌توان با یک نمودار خطی تخمین زد. بنابراین در این بازه می‌توان از تابع خطی کالیبره‌شده برای محاسبه جریان برحسب اختلاف دما استفاده کرد. با توجه به نمودار حداکثر اختلاف دما در جریان  $10$  مترمکعب بر ساعت برابر  $13$  کلوین می‌باشد. بنابراین ضریب معادله خطی جریان حجمی برحسب اختلاف دما برابر  $0.7692$  به دست می‌آید. برای به دست آوردن رابطه جریان جرمی کفایست ضریب به دست آمده در چگالی متان در



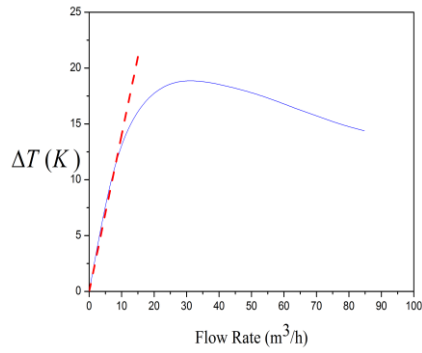
شکل ۱۳ مقایسه بازه خطی و حساسیت جریان‌سنج برای قطرهای متفاوت لوله حسگر ( $L=37.5$  mm,  $L_s=20$  mm)



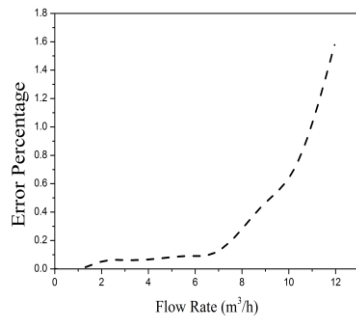
شکل ۱۴ مقایسه نمودار اختلاف دمای دو حسگر برحسب جریان برای طول‌های مختلف لوله حسگر با قطر  $1$  میلی‌متر



شکل ۱۵ مقایسه نمودار اختلاف دمای دو حسگر بر حسب جریان برای سه مکان حسگر متفاوت برای لوله حسگر با قطر ۱/۸ میلی متر



شکل ۱۶ بازه خطی برای هندسه انتخاب شده



شکل ۱۷ درصد خطای ایجادشده به دلیل تخمین نمودار با معادله خط

Commented [Virastar 1]: در شکل به جای کلمه percentage علامت % قید شود.

$$\pm \dot{m} = (2 \times (0.5027 \times 0.1)^2 + (0.01 \times 0.1)^2 + (13 \times 0.003)^2)^{\frac{1}{2}} = 0.0811 \text{ kg/h} \quad (14)$$

$$\left( \frac{0.0811}{6.536} \right) \times 100 = 1.24\% \quad (15)$$

مقدار عددی عدم قطعیت نشان می‌دهد که این نوع جریان‌سنج‌ها برای جریان‌های پایین در صنعت گاز می‌توانند با دقت بسیار خوبی مورد استفاده قرار گیرند.

### نتیجه‌گیری

هدف اصلی از انجام این تحقیق، طراحی یک جریان‌سنج جرمی لوله‌مویین برای استفاده به‌عنوان کنتور گاز خانگی بوده است. همچنین در این مطالعه، شناخت پارامترهای مهم و تأثیرگذار بر عملکرد جریان‌سنج جرمی لوله‌مویین مد نظر قرار گرفته است و تأثیر هر یک از این پارامترها در طراحی جریان‌سنج حرارتی لوله‌مویین بررسی شده است. برای این کار مدل سه‌بعدی یک جریان‌سنج جرمی حرارتی لوله‌مویین، شبیه‌سازی و انتقال حرارت در لوله حسگر آن به‌صورت عددی برای گاز متان به‌عنوان گاز طبیعی تحلیل شده است. با در نظر گرفتن پارامترهای تأثیرگذار، عدم قطعیت جریان‌سنج محاسبه شده است. برای اعتبارسنجی روش حل عددی به‌دلیل عدم وجود داده‌های آزمایشگاهی برای متان، از نیتروژن برای مقایسه استفاده شده است که تطابق قابل قبولی بین نتایج شبیه‌سازی و داده‌های آزمایشگاهی نشان داده شده است. با شبیه‌سازی و حل عددی جریان‌سنج حرارتی لوله‌مویین نتایج زیر حاصل شد:

- با افزایش قطر لوله حسگر، دامنه خطی جریان‌سنج کاهش و حساسیت آن افزایش می‌یابد.
- کاهش طول لوله حسگر در دامنه خطی و حساسیت جریان‌سنج تأثیر ناچیزی دارد.
- تغییر مکان حسگر بر دامنه کاری جریان‌سنج تأثیری

### عدم قطعیت در اندازه‌گیری

عدم قطعیت در اندازه‌گیری جریان در جریان‌سنج‌های جرمی حرارتی به‌دلیل دقت حسگرهای استفاده‌شده و اختلاف توان اسمی و واقعی گرم‌کن می‌باشد. در این مطالعه دقت اندازه‌گیری حسگرها برابر  $0.1^\circ\text{C}$  و اختلاف توان اسمی و واقعی گرم‌کن برابر  $0.1 \text{ W}$  فرض شده است. در این مطالعه از روش کلاین-مک‌کلینتوک [24] برای محاسبه عدم قطعیت استفاده شده است. براساس این روش مقدار عدم قطعیت به‌صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\pm F = \left( \left( \frac{dF}{dx_1} \varepsilon_1 \right)^2 + \left( \frac{dF}{dx_2} \varepsilon_2 \right)^2 + \dots \right)^{\frac{1}{2}} \quad (12)$$

که در این رابطه  $F$  کمیتی است که اندازه‌گیری می‌شود،  $x$  کمیت‌های تأثیرگذار در کمیت اندازه‌گیری‌شده و  $\varepsilon$  دامنه تغییرات مربوط به هر کمیت تأثیرگذار می‌باشد.

در رابطه (۱۳) توان گرم‌کن می‌باشد. برای محاسبه  $\frac{dm}{dp_h}$  مسئله برای  $0.1$  وات بالاتر و پایین‌تر از توان اسمی گرم‌کن حل شده است و سپس در یک دمای ثابت مقدار  $\frac{dm}{dp_h}$  محاسبه شده است. همچنین مقدار  $\frac{dm}{d(\Delta T)}$  از معادله خطی رابطه (۱۱) به‌دست آمده است.

$$\begin{cases} F = \dot{m} \rightarrow \frac{dm}{d(\Delta T)} = 0.5027 \\ x_1 = \Delta T \\ \varepsilon_1 = 0.1^\circ\text{C} \\ F = \dot{m} \rightarrow \frac{dm}{dp_h} = 0.01 \\ x_2 = p_h \\ \varepsilon_2 = 0.1 \text{ W} \\ F = \dot{m} \rightarrow \frac{dm}{dc} = 13 \\ x_3 = c \\ \varepsilon_3 = 0.003 \end{cases} \quad (13)$$

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

$D_{out}$	قطر خارجی لوله حسگر (m)	ندارد اما کاهش فاصله حسگر از مرکز لوله باعث افزایش دقت می شود.
F	ضریب عدم قطعیت	
g	شتاب جاذبه ( $m/s^2$ )	جریان سنج های حرارتی لوله موئین برای اندازه گیری جریان های پایین استفاده می شوند. این نوع جریان سنج ها به دلیل اندازه گیری جریان جرمی، بسیار دقیق تر از جریان سنج های حجمی هستند؛ از این رو به طور کلی می توان نتیجه گرفت که این جریان سنج ها با دقت خیلی خوبی در شبکه توزیع خانگی گاز طبیعی که در جریان های پایین کار می کنند قابل استفاده هستند.
K	ضریب هدایت حرارتی (kJ/m-K)	
L	نصف طول لوله حسگر (m)	
$L_s$	مکان حسگر بر روی لوله حسگر (m)	
$\dot{m}$	جریان جرمی (kg/h)	
N	تعداد لوله های آرام ساز جریان	
P	فشار (kPa)	
$\Delta P$	افت فشار (kPa)	
q	شدت حرارت تولیدی ( $w/m^2$ )	
S	حساسیت جریان سنج (K.h/kg)	
$\Delta T$	اختلاف دمای بین دو حسگر (K)	
T	دما (K)	

### تشکر و قدردانی

این مطالعه از حمایت شرکت گاز استان گلستان بهره مند شده است.

### علائم یونانی

$\mu$	لزجت (Pa.s)
$\rho$	چگالی ( $kg/m^3$ )
$\nu$	لزجت سینماتیکی ( $m^2/s$ )

### فهرست علائم

A	مساحت سطح مقطع لوله حسگر ( $m^2$ )
C	ضریب ثابت
$C_p$	ظرفیت گرمایی ویژه در فشار ثابت (kJ/kg-K)
$D_{in}$	قطر داخلی لوله حسگر (m)

### مراجع

- Hiismaeki, P., "Method and device for monitoring of a gas flow, in particular of a natural-gas flow", 08-Jul-1993, [International Patent Number WO1993013414](#).
- Ficco, G., "Metrological performance of diaphragm gas meters in distribution networks", *Flow Meas. Instrum.*, Vol. 37, pp. 65-72, (2014).
- Chapman, N.R. and Etheridge, D.W., "A step change in domestic metering technology from leather diaphragms to ultrasonics", *Flow Meas. Instrum.*, Vol. 5, No. 2, pp. 141-142, (1994).
- Vasconcelos, C.D., Lourenço, S.R., Gracias, A.C. and Cassiano, D.A., "Network flows modeling applied to the natural gas pipeline in Brazil", *J. Nat. Gas Sci. Eng.*, Vol. 14, pp. 211-224, (2013).
- " <http://www.ima.ir/fa/News/81845037>", accessed 18/4/2017
- Cubukcu, A.S., Romero, D.F.R. and Urban, G.A., "A dynamic thermal flow sensor for simultaneous measurement of thermal conductivity and flow velocity of gases", *Sensors Actuators A Phys.*, Vol. 208, pp. 73-87, (2014).

Commented [Virastar]: مرجع ۱ ناقص است. مجله؟ کنفرانس یا

گزارش است؟

در مرجع ۵ آدرس صفحه در سایت و روز بازدید قید شود.

مرجع ۷ ناقص است. مجله؟ کنفرانس یا گزارش است؟ صفحه قید شود.

مرجع ۸ صفحه چند تا چند است؟

مرجع ۹ هم ابتدا و انتهای صفحات قید شود.

مرجع ۱۸: VOL???- Issue???

مرجع ۲۱ ناقص است.

7. McMahon, M., "Thermal Core Technology White Paper Series A Tale of Two Thermals : Capillary & Immersible Introduction", webpage, <https://www.coursehero.com/file/27763356/A-Tale-of-Two-Thermalsdoc/> accessed 21/1/2017.
8. Komiya, K. Higuchi, F. and Ohtani, K., "Characteristics of a thermal gas flowmeter", *Rev. Sci. Instrum.*, Vol. 59, No. 3, pp. 477-479, (1988).
9. Hinkle, L.D., "Toward understanding the fundamental mechanisms and properties of the thermal mass flow controller", *Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films* 9, 2043 (1991); <https://doi.org/10.1116/1.577452>
10. Kim, S.J. and Jang, S.P., "Experimental and numerical analysis of heat transfer phenomena in a sensor tube of a mass flow controller", Vol. 44, pp. 1711–1724, (2001).
11. Han, I.Y. Kim, D.-K. and Kim, S.J., "Study on the transient characteristics of the sensor tube of a thermal mass flow meter", *Int. J. Heat Mass Transf.*, Vol. 48, No. 13, pp. 2583–2592, (2005).
12. Kim, D.-K. Han, I.Y. and Kim, S.J., "Study on the steady-state characteristics of the sensor tube of a thermal mass flow meter", *Int. J. Heat Mass Transf.*, Vol. 50, No. 5–6, pp. 1206–1211, (2007).
13. Kim, T.H., Kim, D.-K. and Kim, S.J., "Study of the sensitivity of a thermal flow sensor", *Int. J. Heat Mass Transf.*, Vol. 52, No. 7–8, pp. 2140–2144, (2009).
14. Viswanathan, M., Rajesh, R. and Kandaswamy, A., "Design and development of thermal mass flowmeters for high pressure applications", *Flow Meas. Instrum.*, Vol. 13, No. 3, pp. 95–102, (2002).
15. Sazhin, O., "Novel mass air flow meter for automobile industry based on thermal flow microsensor. I. Analytical model and microsensor", *Flow Meas. Instrum.*, Vol. 30, pp. 60–65, (2013).
16. Sazhin, O., "Novel mass air flow meter for automobile industry based on thermal flow microsensor. II. Flow meter, test procedures and results", *Flow Meas. Instrum.*, Vol. 35, pp. 48–54, (2014).
17. Baker, R.C. and Gimson, C., "The effects of manufacturing methods on the precision of insertion and in-line thermal mass flowmeters", *Flow Meas. Instrum.*, Vol. 12, No. 2, pp. 113–121, (2001).
18. Bartos, F.J., "Tame flow disturbances with the thermal massflow meter", *Control Eng. Int.*, pp. 54–55, September 1995.
19. Viswanath, R.P., Viswanathan, B. and Sastri, M.V.C., "Kinetics of reduction of Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> to Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> by the constant temperature differential thermal analysis method", *Thermochim. Acta*, Vol. 16, No. 2, pp. 240–244, (1976).
20. Cappa, P. Del Prete, Z. and Marinuzzi, F. "Experimental analysis of a new strain-gage signal conditioner based on a constant-current method", *Sensors Actuators A Phys.*, Vol. 55, No. 2–3, pp. 173–178, (1996).
21. Graebel, W., *Advanced Fluid Mechanics, 1<sup>st</sup> edition |ISSN 978-0-12-370885-4 | Academic Press*, (2007).
22. Olin, J.G., "Capillary Tube Thermal Mass Flow Meters & Controllers, A User ' s Guide", (2013).
23. Beronich, E.L., Abdi, M.A. and Hawboldt, K.A., "Prediction of natural gas behaviour in loading and unloading operations of marine CNG transportation systems", *J. Nat. Gas Sci. Eng.*, Vol. 1, No. 1–2, pp. 31–38, (2009).
24. Kline, S.J. and McClintock, F.A., "Describing Uncertainties in Single-Sample Experiments", *Mech. Eng.*, Vol. 75, pp. 3–8, (1953).