

بررسی تاثیر پارامترهای عملیاتی مختلف بر عملکرد دبی سنج فراصوت همبستگی متقابل به کمک شبیه سازی CFD

محمدامین اعلاءالدین^۱ و سیدحسن هاشم آبادی^{۱*}

۱- دانشکده مهندسی شیمی، نفت و گاز دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

۲- پژوهشکده اندازه گیری جریان سیالات دانشگاه علم و صنعت، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱۰/۱۶ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۱/۲۸

چکیده

در میان فن آوری های اندازه گیری جریان، دبی سنج فراصوت همبستگی متقابل (Cross-Correlation)، به دلیل داشتن دقت بالا، استقلال عملکرد از سرعت صوت و نداشتن افت فشار، بسیار مورد توجه قرار گرفته است. در واحدهای صنعتی، به دلیل محدودیت فضا و جانمایی خاص تجهیزات، دبی سنج، همواره در موقعیت ایده آل قرار نمی گیرد. در این شرایط، ضریب کالیبراسیون نقش مهمی را در افزایش دقت اندازه گیری جریان ایفا می کند. ضریب کالیبراسیون، تابعی از عدد رینولدز جریان، طول لوله مستقیم در بالادست دبی سنج و زبری سطح لوله است. در این پژوهش، به کمک شبیه سازی CFD و با استفاده از مدل تلاطم تنش رینولدز (RSM)، جریان هوا درون لوله در بازه عدد رینولدز $3/16 \times 10^4$ تا $3/16 \times 10^5$ شبیه سازی گردید و سپس به کمک مدل تحلیلی دبی سنج فراصوت همبستگی متقابل، اثر هر یک از پارامترهای عدد رینولدز جریان، طول لوله مستقیم در بالادست دبی سنج و زبری سطح لوله، بر عملکرد دبی سنج مورد تحلیل و بررسی قرار گرفت. نتایج شبیه سازی نشان داد که میزان انحنای پروفایل سرعت، نقش اساسی در تحلیل و بررسی میزان تغییرات ضریب کالیبراسیون دارد. با افزایش عدد رینولدز جریان، میزان انحنای پروفایل سرعت در مقطع لوله کاهش یافته و در مقابل ضریب کالیبراسیون افزایش می یابد. همچنین، نتایج نشان داد که با حرکت سیال درون لوله (قبل از پیمایش طول توسعه یافته)، میزان انحنای پروفایل سرعت، ابتدا زیاد و سپس کم می شود. در مقابل، ضریب کالیبراسیون نیز ابتدا کاهش و سپس افزایش می یابد. همچنین، این نتیجه نیز حاصل شد که با تغییر جنس لوله از کربن استیل به چدن و افزایش زبری سطح لوله، پروفایل سرعت انحنای بیشتری گرفته و در مقابل، ضریب کالیبراسیون کاهش می یابد.

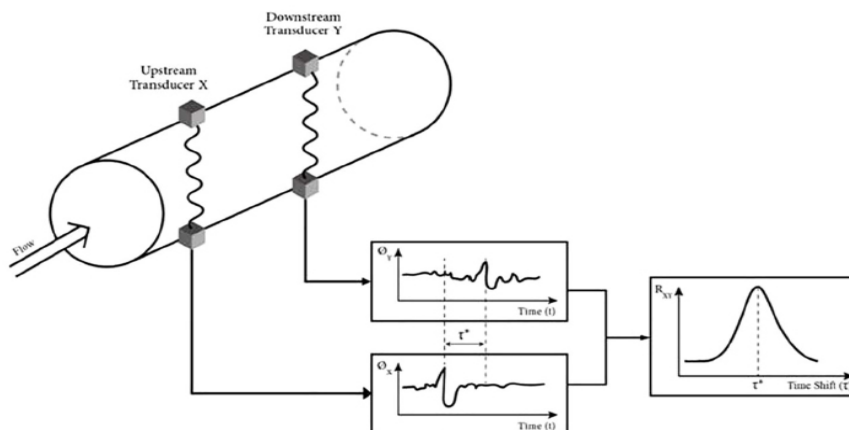
کلمات کلیدی: دبی سنج فراصوت همبستگی متقابل، ضریب کالیبراسیون، شبیه سازی CFD، پروفایل سرعت، طول توسعه یافته

مقدمه

صیانت از دارایی‌های عمومی در مبادلات نفت و گاز، مشروط به اندازه‌گیری دقیق مقدار آن‌ها است. اهمیت اندازه‌گیری در صنعت نفت و گاز، به اهمیت حفظ منافع ملی بر می‌گردد. در این راستا یکی از مهم‌ترین اقدامات لازم، اندازه‌گیری دقیق این محصولات به‌خصوص در مبادی فروش (شامل صادرات و فروش داخلی) است. دبی‌سنج‌های مختلفی از جمله صفحه اوریفیس، ونتوری، توربین و دبی‌سنج مبتنی بر امواج فراصوتی، برای اندازه‌گیری دقیق جریان سیالات تک‌فازی طراحی شده‌اند [۱]. در بین دبی‌سنج‌های مطرح شده، دبی‌سنج‌های فراصوت به‌دلیل داشتن مزایای متعددی از جمله دقت بالا، اندازه‌گیری بدون وقفه و نداشتن افت فشار در حال تبدیل شدن به گزینه نخست برای اندازه‌گیری جریان سیالات می‌باشند [۱ و ۳]. دبی‌سنج‌های فراصوت به سه دسته اختلاف زمانی، همبستگی متقابل و داپلر تقسیم می‌شوند [۴]. مهم‌ترین مزیت و برتری نوع همبستگی متقابل نسبت به سایر دبی‌سنج‌های فراصوت، مستقل بودن عملکرد آن‌ها از سرعت صوت و ضخامت لوله است [۵ و ۷]. سنسورها در دبی‌سنج همبستگی متقابل، به‌صورت مهاری^۱ روی

لوله سوار می‌شوند، به‌طوری‌که سیال هیچ تماس مستقیمی با دبی‌سنج نخواهد داشت. قرارگیری مهاری سنسورها باعث می‌شود که استفاده از این نوع دبی‌سنج، برای سیالات خورنده و یا دمای بالا، بسیار مورد توجه قرار بگیرد [۸].

مبنای عملکرد دبی‌سنج همبستگی متقابل، محاسبه زمان تأخیر رسیدن جریان از سنسور بالادست به سنسور پایین‌دست است. شماتیک نحوه عملکرد دبی‌سنج فراصوت همبستگی متقابل، در شکل ۱ آورده شده است. برخلاف انواع دیگر دبی‌سنج‌های فراصوت که در آن‌ها سنسورهای فرستنده-گیرنده به‌صورت مورب نسبت به محور لوله قرار می‌گیرند، در نوع همبستگی متقابل، سنسورها به‌صورت عمود بر محور جریان در اطراف لوله قرار می‌گیرند. در مدت زمان اندازه‌گیری جریان، فرستنده‌ها، دائماً امواج فراصوت را به‌سمت گیرنده‌های مقابل خود ارسال کرده و حرکت سیال را رصد می‌کنند. یافتن زمان تأخیر رسیدن جریان از سنسور بالادست به سنسور پایین‌دست، به‌کمک اعمال تابع ریاضی همبستگی متقابل، بر روی سیگنال‌های دریافتی صورت می‌گیرد. تابع همبستگی متقابل بر روی سیگنال‌های دریافتی به‌صورت زیر تعریف می‌شود [۵، ۹ و ۱۰]:



شکل ۱ شماتیک نحوه عملکرد دبی‌سنج همبستگی متقابل با اعمال تابع همبستگی متقابل بر روی سیگنال‌های بالادست و پایین‌دست و یافتن زمان تأخیر براساس نقطه بیشینه تابع همبستگی متقابل

1. Clamp-on

با توجه به رابطه ۳، ضریب کالیبراسیون، حاصل نسبت سرعت متوسط جریان به سرعت جابه‌جایی گردابه‌ها است. همان‌طور که پیش‌تر در توضیحات مربوط به شکل ۱ و رابطه ۲ ارائه گردید، سرعت جابه‌جایی گردابه‌ها توسط دبی‌سنج محاسبه می‌شود. در این پژوهش، از مدل دبی‌سنج فراصوت همبستگی متقابل برای محاسبه زمان تأخیر و به تبع محاسبه سرعت جابه‌جایی گردابه‌ها استفاده شده است که جزئیات مدل مربوطه در بخش مدل دبی‌سنج فراصوت همبستگی متقابل ارائه شده است. اولین تعریف از دبی‌سنج فراصوت همبستگی متقابل، توسط کولتارد ارائه شد [۵]. میلادی، یک تمرکز خود را بر روی پردازش سیگنال‌های دریافتی از سنسور قرار داد [۹]. ورچ اثر تقابل موج فراصوت با گردابه‌های جریان را بررسی نمود. او نحوه میزان‌سازی سیگنال‌های دریافتی و حذف فرکانس موج حامل را در پژوهش خود ارائه نمود [۷]. پس از آن، اشنایدر اولین مدل ریاضیاتی عملکرد دبی‌سنج همبستگی متقابل را ارائه نمود. نتایج مدل در مقایسه با داده‌های آزمایشگاهی، از دقت نسبتاً خوبی برخوردار بودند [۶]. لیسک و همکارانش، مدل ریاضیاتی پیشرفته‌تری را بر مبنای پارامترهای توصیف‌کننده جریان مغشوش ارائه نمودند. آنان به کمک پارامترهای جریان مغشوش، سیگنال دریافت شده از سنسور را مدل‌سازی و به کمک آن دبی‌جریان را محاسبه کردند [۱۰ و ۱۱]. پس از آن گورویچ و همکارانش، با مدلی متفاوت، ضریب کالیبراسیون دبی‌سنج را در طول‌های مختلف بین دو سنسور بررسی نمودند [۱۲]. تون، طول مناسب بین دو سنسور را ارائه نمود. او نشان داد که با افزایش فاصله بین دو سنسور، عملکرد دبی‌سنج به شدت کاهش می‌یابد [۱۳]. عدد رینولدز جریان [۱۰ و ۱۱]، طول مستقیم لوله قبل از دبی‌سنج [۱۲] و زبری سطح [۱۰ و ۱۱] مهم‌ترین پارامترهایی هستند که عملکرد

(۱)
$$R_{xy}(t) = \frac{1}{T} \int_0^T X(t-t) Y(t) dt$$
 به‌طوری‌که $X(t-t)$ و $Y(t)$ به‌ترتیب سیگنال دریافتی از دو سنسور بالادست و پایین‌دست در زمان $t-t$ و t می‌باشد. τ نیز گام زمانی بوده و T نیز زمان اندازه‌گیری جریان می‌باشد که به اندازه کافی بزرگ فرض می‌شود. مطابق شکل ۱، این تابع بر روی سیگنال‌های دریافتی از هر دو سنسور عمل کرده و در گام‌های زمانی متفاوت، سیگنال دریافت شده از سنسور پایین‌دست را نسبت به سیگنال دریافتی از سنسور بالادست در محور زمان، جابه‌جا کرده و شباهت دو سیگنال را بررسی می‌کند. گام زمانی که در آن، دو سیگنال نسبت به هم، بیشترین شباهت را داشته باشند، به‌عنوان زمان تأخیر τ^* رسیدن جریان از سنسور بالادست به سنسور پایین‌دست ثبت می‌شود. مطابق شکل ۱، مقدار تابع همبستگی متقابل در زمان تأخیر τ^* ، بیشینه بوده که بیانگر بیشترین شباهت بین دو سیگنال می‌باشد [۵ و ۹]. با داشتن زمان تأخیر τ^* و داشتن فاصله بین دو سنسور Δx ، می‌توان سرعت جابه‌جایی^۱ را طبق رابطه زیر محاسبه کرد.

$$K = \frac{U_{Bulk}}{U_{Convection}} \quad (2)$$

سرعت جابه‌جایی در رابطه ۲، همان سرعت جابه‌جایی ادی^۲ یا گردابه‌های جریان بوده که با سرعت متوسط جریان متفاوت می‌باشد [۶ و ۱۰]. ساختار جریان ناآرام از بسته‌های متحرک انرژی به نام ادی یا گردابه تشکیل شده است که باعث بروز اغتشاش در جریان می‌گردد. هنگامی که موج فراصوت به درون سیال ارسال می‌شود، با آشفتگی‌های جریان (گردابه‌ها) برخورد کرده و از آن‌ها تأثیر می‌پذیرد. آنچه که توسط سنسورها رصد می‌شود، جابه‌جایی گردابه‌های جریان بوده و سرعت جابه‌جایی آن‌ها، مبنای عملکرد دبی‌سنج همبستگی متقابل است. برای مرتبط ساختن سرعت جابه‌جایی گردابه‌ها به سرعت متوسط جریان، از ضریب کالیبراسیون^۳ استفاده می‌شود. ضریب کالیبراسیون برای دبی‌سنج فراصوت همبستگی متقابل، مطابق رابطه ۳ تعریف می‌شود [۹ و ۱۱].

1. Convection Velocity
2. Eddy
3. Calibration Factor

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right\} + \frac{1}{2} C_{\varepsilon 1} [P_{ii} + C_{\varepsilon 3} G_{ii}] \frac{\varepsilon}{k} - C_{\varepsilon 2} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (6)$$

$$k = \frac{1}{2} \overline{u'_i u'_i} \quad (7)$$

به طوری که u_i سرعت متوسط جریان در جهت x_i در مختصات کارتزین، ρ دانسیته سیال، p فشار، μ گرانشی سیال، μ_t گرانشی جریان مغشوش، P_{ii} ترم تولید تنش، G_{ii} اثر بویانسی، u'_i نوسانات سرعت و $-\rho \overline{u'_i u'_j}$ تنش رینولدز می باشد. σ_ε ، $\sigma_{\varepsilon 2}$ ، $\sigma_{\varepsilon 1}$ ، σ_ε نیز ثوابت معادله می باشند. مقادیر انرژی جنبشی جریان مغشوش k و نرخ تلفات جریان مغشوش نیز به کمک روابط ۶ و ۷ محاسبه می شوند.

ارائه جزئیات معادلات و ثوابت آن ها خارج از حوصله این پژوهش بوده و به مراجع مربوطه ارجاع داده می شود. برای اینکه جریان درون لوله با دقت بالایی شبیه سازی شود، از مدل تلاطم تنش رینولدز^۱ (RSM) برای یافتن تنش رینولدز استفاده شده است. تحقیقات بسیاری در مورد جریان آشفته انجام شده است که همگی بر عملکرد بهتر مدل تنش رینولدز در پیش بینی دقیق جریان های متلاطم، نسبت به مدل های ویسکوزیته گردابی^۲ از جمله $k-\varepsilon$ ، RNG $k-\varepsilon$ ، Standard $k-\varepsilon$ و Realizable $k-\varepsilon$ دلالت دارند [۱۷-۲۱]. مدل تنش رینولدز بر خلاف مدل های ویسکوزیته گردابه ای، اثر ناهمگونی^۳ جریان متلاطم را در نظر گرفته و رفتار جریان را با دقت بالاتری پیش بینی می کند [۲۱ و ۲۲].

دبی سنج همبستگی متقابل و میزان ضریب کالیبراسیون مورد نیاز را تحت تأثیر قرار می دهند. لذا هدف از این پژوهش، بررسی تأثیر هر یک از پارامترهای مذکور بر عملکرد دبی سنج فراصوت همبستگی متقابل و محاسبه ضریب کالیبراسیون مورد نیاز، به کمک شبیه سازی CFD است.

شبیه سازی CFD

هندسه مسئله

جهت بررسی عملکرد دبی سنج در شرایط عملیاتی مختلف، خط لوله به قطر متداول ۶ اینچ در نظر گرفته شده است. در استاندارد ISO-17089 و AGA-9، جهت اطمینان از توسعه یافتگی پروفایل سرعت در جریان، طولی معادل ۵۰ برابر قطر لوله در بالادست دبی سنج پیشنهاد شده است. مضاف بر آن، طولی معادل ۵ برابر قطر لوله نیز در پایین دست دبی سنج توصیه شده است [۱۴ و ۱۵]. مطابق شکل ۲، هندسه مورد استفاده در این پژوهش، به دلیل متقارن بودن جریان نسبت به محور لوله، دو بعدی است.

معادلات حاکم

در شبیه سازی CFD، معادلات پایستگی جرم و ممنتوم برای توصیف حرکت سیال حل می شود. معادله پایستگی جرم و ممنتوم برای جریان غیرقابل تراکم در شرایط پایا به ترتیب مطابق روابط ۴ و ۵ بیان می شود

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x_j} (-\rho \overline{u'_i u'_j}) \quad (5)$$



شکل ۲ هندسه مسئله

1. Reynolds Stress Model (RSM)
2. Eddy Viscosity Models (EVM)
3. Non-Isotropic

مدل دبی سنج فراصوت همبستگی متقابل

مدل ریاضیاتی دبی سنج فراصوت همبستگی متقابل جهت محاسبه زمان تأخیر، توسط لیسک و همکارانش پیشنهاد شده است [۱۰ و ۱۱]. از آنجایی که شکل گیری و تغییر فاز سیگنال های دریافتی در سنسورها، به شدت از اغتشاشات و نوسانات سرعت در جریان تأثیر می پذیرد، تمرکز مدل انتخاب شده بر روی مرتبط ساختن تغییر فاز سیگنال های دریافتی به نوسانات سرعت می باشد [۶، ۱۰ و ۱۱]. در مدل دبی سنج، برای محاسبه تغییر فاز سیگنال های دریافتی، نوسانات سرعت در طول مسیر حرکت موج به صورت کمی، با استفاده از پارامترهای جریان متلاطم، مدل سازی شده است [۱۰ و ۱۱]. از آنجایی که فاز سیگنال های دریافتی، تابعی از نوسانات سرعت در جریان می باشد، با مدل سازی ریاضیاتی نوسانات سرعت در جریان بر حسب پارامترهای جریان متلاطم، می توان تغییر فاز سیگنال های دریافتی را نیز بر حسب پارامترهای جریان متلاطم محاسبه و پیش بینی کرد. پس از مدل سازی تغییر فاز سیگنال های دریافتی به کمک پارامترهای جریان مغشوش در مرجع مربوطه، تابع همبستگی متقابل بر روی سیگنال های بالادست و پایین دست اعمال شده است. همان طور که پیش تر در رابطه ۱ و شکل ۱ توضیح داده شد، خروجی تابع همبستگی متقابل، زمان تأخیر رسیدن جریان از سنسور بالادست به پایین دست می باشد. در مرجع مدل دبی سنج، جهت ساده سازی محاسبات مربوط به تابع همبستگی متقابل، این تابع از حوزه زمانی به حوزه فرکانسی، به کمک تابع تبدیل فوریه منتقل شده است. تمرکز این پژوهش، صرفاً بر روی بررسی عملکرد دبی سنج به کمک مدل آن، در شرایط عملیاتی مختلف می باشد. لذا از ارائه تمامی جزئیات و معادلات، به دلیل حجم بالای آن صرف نظر شده و به مرجع مربوطه ارجاع داده می شود [۱۰ و ۱۱]. شکل تغییر یافته نهایی تابع همبستگی متقابل برای دبی سنج همبستگی متقابل، در حوزه

فرکانسی به صورت رابطه ۸ می باشد [۱۰].

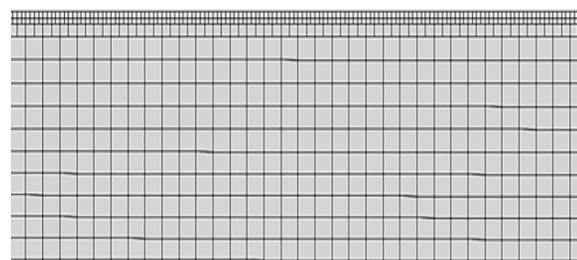
$$G_{12}(f) = 7.4 \frac{\omega_0^2}{c_0^2} \int_0^D \frac{L_{11}^2}{U} \left[\frac{(f_e^2 + \frac{11}{3}f^2)(f_e^2 + \frac{8}{3}f^2)}{(f_e^2 + \frac{8}{3}f^2)(f_e^2 + f^2)} \right] \left[1 + \left(\frac{f}{f_e}\right)^2 \right]^{-8/6} \times \exp\left(-i2\pi f \frac{\Delta x}{U}\right) dy \left(f_e \approx 0.12 \frac{U}{L_{11}}\right), U = U_{\max} \left(1 - \frac{r}{R}\right)^{1/7}, U = U_{\max} \left(1 - \frac{r}{R}\right)^{1/7} \quad (8)$$

در این رابطه $G_{12}(f)$ شکل فرکانسی تابع همبستگی متقابل، f فرکانس دریافتی، f_e فرکانس مشخصه ادی های دارای انرژی L_{11} مقیاس طولی کامل جریان مغشوش، U سرعت متوسط محوری جریان (مؤلفه محوری سرعت محاسبه شده در رابطه ۴ می باشد)، ریشه متوسط مجذور نوسانات سرعت، فاصله بین دو سنسور، c_0 سرعت متوسط صوت در سیال، ω_0 فرکانس زاویه ای انتشار موج فراصوت، D قطر لوله و Δ فاصله از فرستنده در مقطع عبور موج فراصوت می باشد.

برای محاسبه تابع $G_{12}(f)$ ، به مقادیر سرعت محوری جریان U ، انرژی جنبشی جریان مغشوش k و نرخ تلفات جریان مغشوش در طول مسیر حرکت موج فراصوت از فرستنده به گیرنده نیاز می باشد. با استفاده از شبیه سازی CFD و حل روابط ارائه شده در بخش بخش معادلات حاکم، مقادیر U ، k و ε برای جریان در تمام شبکه محاسباتی، محاسبه می شود. در مقطعی از لوله که دبی سنج قرار می گیرد، مقادیر U ، k و ε بر روی خط عبور موج فراصوت، از شبیه سازی استخراج گردیده و در رابطه ۸ جایگذاری می شود. با جایگذاری این مقادیر در رابطه ۸، تابع بر حسب فرکانس f به دست می آید. از آنجایی که هدف رابطه ۸، محاسبه زمان تأخیر می باشد، مطابق توضیحاتی که در بخش مقدمه ارائه گردید، بیشینه تابع همبستگی متقابل در حوزه زمانی، بیانگر زمان تأخیر رسیدن جریان از سنسور بالادست به سنسور پایین دست می باشد [۱۰]. با داشتن زمان تأخیر و فاصله بین دو سنسور، مطابق رابطه ۲، سرعت جابه جایی محاسبه می شود.

شرایط مرزی و شرایط عملیاتی

همان‌طور که در شکل ۲ نشان داده شده است، شرط مرزی ورودی سرعت برای ورودی لوله و فشار خروجی برای خروجی لوله تنظیم شده است. به دلیل متقارن بودن هندسه نسبت به محور لوله، از شرط مرزی محور جهت ساده‌سازی و کاهش حجم محاسبات استفاده شده است. علاوه بر این، شرط مرزی عدم لغزش برای دیواره نیز لحاظ شده است.



شکل ۳ شبکه محاسباتی تولید شده بر روی برش طولی لوله.

مطابق توصیه استاندارد AGA-9، عملیات کالیبراسیون باید در پنج دبی حجمی مختلف مطابق جدول ۱ انجام شود [۱۵]. مطابق استاندارد ISO-17089، حداکثر برای سرعت سیال در این پژوهش انتخاب گردیده است [۱۴]. سرعت‌های بالاتر از ۳۰ m/s می‌تواند منجر به فرسایش لوله شود [۲۳]. در این پژوهش، فاصله بین دو سنسور، یک برابر قطر لوله لحاظ شده است. عمده تحقیقات مشابه بر روی عملکرد دبی سنج نیز فاصله بین دو سنسور را

یک برابر قطر لحاظ کرده اند [۶، ۱۰-۱۳]. براساس توصیه طراحان و توسعه دهندگان مدل دبی سنج همبستگی متقابل، در فاصله $\frac{\Delta x}{D} = 1$ قطر مقطع لوله و $x \Delta$ فاصله بین دو سنسور می باشد، نتایج مدل از دقت و اعتبار خوبی برخوردار می باشد [۱۰ و ۱۱]. به لحاظ تئوری، هر چه فاصله بین دو سنسور بیشتر باشد، احتمال حذف گردابه‌های جریان افزایش می‌یابد [۶ و ۸]. در این حالت، شباهت بین دو سیگنال دریافتی از دو سنسور بالادست و پایین دست کاهش می‌یابد که منجر به افزایش خطای عملکرد دبی سنج می‌شود. در فواصل خیلی کوتاه بین دو سنسور نیز، احتمال تقابل و برهمکنش بین امواج فراصوت ارسالی از دو فرستنده بالادست و پایین دست، وجود دارد که عملکرد صحیح دبی سنج را مختل می‌کند [۶]. مهم‌ترین پارامترهای عملیاتی برای بررسی عملکرد دبی سنج در شرایط مختلف، در جدول ۱ ارائه شده است.

نتایج و بحث

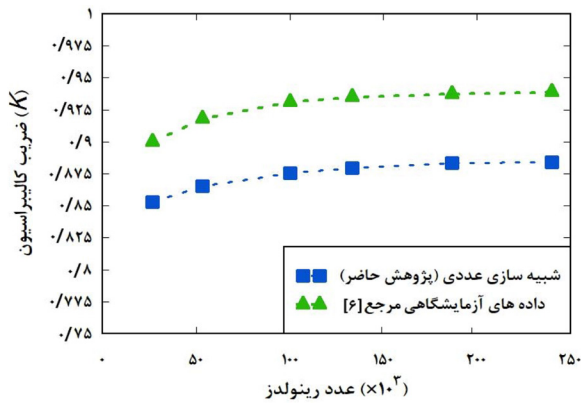
استقلال نتایج از شبکه

همگرایی محاسبات و زمان اجرا به شدت به ساختار و تعداد سلول‌های شبکه محاسباتی بستگی دارد [۲۴]. همان‌طور که در شکل ۳ نشان داده شده است، مش طراحی شده کاملاً منظم و ساختار یافته می‌باشد.

جدول ۱ شرایط عملیاتی لحاظ شده در پژوهش

پارامتر	مقدار
سیال	هوا
دانسیته (kg/m^3)	۱/۲۲۵
گرانروی ($\text{kg/m}\cdot\text{s}$)	1.789×10^{-6} در 25°C
دبی نرمال شده (-) $q_v/q_{v,\max}$	۰/۱، ۰/۲۵، ۰/۴، ۰/۷ و ۱
بیشینه سرعت سیال (m/s)	۳۰
بازه عدد رینولدز (-)	3.16×10^4 تا 3.16×10^5
فاصله بین دو سنسور به صورت نرمال شده	۱
محل تقریبی قرارگیری دبی سنج به صورت نرمال شده	۱، ۳۰ و ۵۰
زبری سطح لوله نرمال شده	۰ (بدون زبری)، ۰/۰۵ (کربن استیل)، ۰/۲۶ (چدن)

نشان داده شده است، نتایج به داده‌های آزمایشگاهی [۶] بسیار نزدیک است و متوسط خطا حدوداً ۰.۵٪ می‌باشد. اختلاف بین نتایج شبیه‌سازی و داده‌های تجربی در شکل ۵، ناشی از خطای شبیه‌سازی و خطای مدل عملکرد دبی‌سنج می‌باشد.

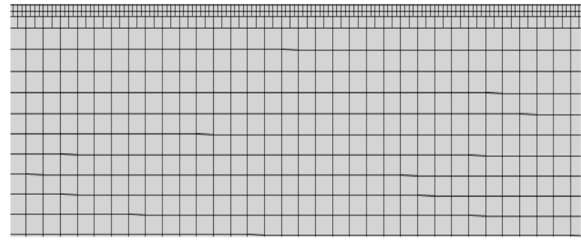


شکل ۵ اعتبارسنجی شبیه‌سازی CFD و مدل محاسباتی دبی‌سنج [۶].

شکل ۵ علاوه بر اعتبارسنجی، اثر تغییرات عدد رینولدز را بر ضریب کالیبراسیون رابطه ۳ نشان می‌دهد. مطابق شکل ۵، ضریب کالیبراسیون با افزایش عدد رینولدز، افزایش می‌یابد. با افزایش عدد رینولدز، پروفایل سرعت جریان در مقطع لوله و همچنین در مرکز لوله تخت‌تر می‌شود. لذا، نسبت سرعت در ناحیه مرکزی و هسته جریان^۲ به سرعت متوسط جریان کاهش می‌یابد. از آنجایی که سرعت جابه‌جایی محاسبه شده توسط دبی‌سنج، اساساً به سرعت هسته‌ای و مرکزی لوله وابسته است، در جریان با پروفایل تخت‌تر، سرعت جابه‌جایی کاهش می‌یابد. در نتیجه، ضریب کالیبراسیون افزایش می‌یابد [۱۰]. به کمک پروفایل سرعت توانی [۲۵] که در رابطه ۹ معرفی شده است، اعتبارسنجی دیگری بر روی نتایج شبیه‌سازی صورت گرفته و نتایج آن در شکل ۶ ارائه شده است. با توجه به شکل ۶ می‌توان گفت که شبیه‌سازی CFD با دقت بالایی توانسته است پروفایل سرعت جریان را محاسبه نماید.

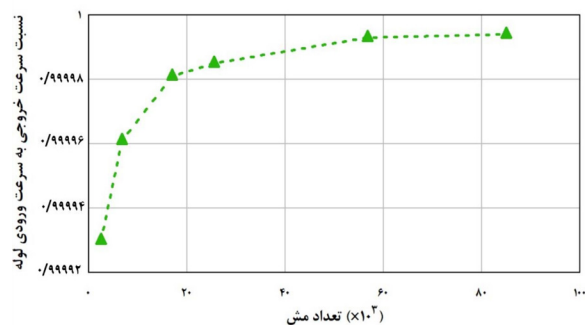
$$U = U_{\max} \left(1 - \frac{r}{R}\right)^{1/7} \quad (9)$$

1. Standard Wall Function
2. Core Velocity



شکل ۳ شبکه محاسباتی تولید شده بر روی برش طولی لوله

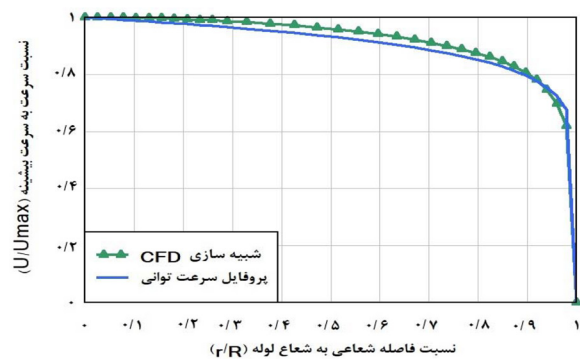
به دلیل گرادیان بالای سرعت در نزدیکی دیواره، ابعاد شبکه در این ناحیه ریزتر طراحی شده است. میزان +Y نیز در نزدیکی دیواره براساس تابع استاندارد دیواره^۱ و مدل توربولانسی تنش رینولدز، در بازه ۳۰ تا ۳۰۰ حفظ شده است. شکل ۴ تغییرات سرعت متوسط جریان در خروجی لوله را برای مش انتخاب شده نسبت به سرعت متوسط در کمترین اندازه مش، برای جریان با بیشینه سرعت ۳۰ m/s مطابق جدول ۱، به عنوان نمونه، نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که افزایش بیشتر از ۶۰ هزار شبکه، تغییری در سرعت خروجی ایجاد نمی‌شود.



شکل ۴ استقلال نتایج از مش برای بیشترین سرعت جریان

اعتبارسنجی

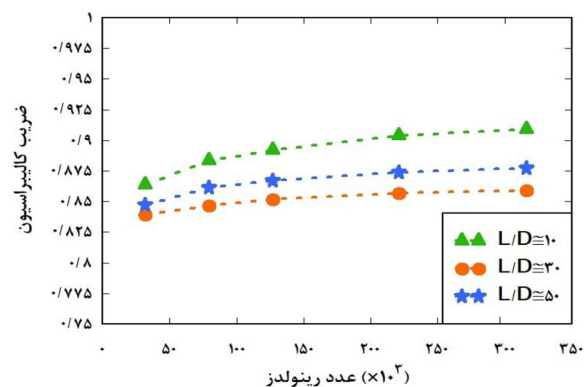
برای اعتبارسنجی شبیه‌سازی CFD، یک لوله به قطر ۴ in و با طولی معادل ۹۰ برابر قطر، مشابه هندسه مرجع در نظر گرفته شد و جریان هوا در بازه عدد رینولدز ۰.۲۶×۱۰^۵ تا ۲/۴×۱۰^۵ درون لوله با استفاده از مدل تلاطم تنش رینولدز شبیه‌سازی گردید [۶]. با استفاده از نتایج شبیه‌سازی و مدل دبی‌سنج ارائه شده در بخش بخش اعتبارسنجی، ضریب کالیبراسیون در محدوده مشخص شده رینولدز، محاسبه گردید. همان‌طور که در شکل ۵



شکل ۶ اعتبارسنجی پروفایل سرعت براساس رابطه سرعت توانی

اثر طول مستقیم لوله

علی‌رغم توصیه استانداردهای مربوطه جهت فراهم نمودن حداقل $50D$ طول لوله مستقیم در بالادست دبی‌سنج، به دلیل محدودیت در جانمایی تجهیزات و لوله‌کشی در واحدهای فرآیندی، فراهم نمودن طول مناسب لوله در بالادست دبی‌سنج عمدتاً امکان‌پذیر نیست [۴، ۲۶، ۲۷ و ۲۸]. طول لوله از آنجایی اهمیت پیدا می‌کند که می‌تواند بر شکل‌گیری پروفایل سرعت درون لوله و به تبع دقت اندازه‌گیری دبی‌سنج مؤثر باشد. شکل ۷ اثر تغییر طول لوله بالادست دبی‌سنج، بر ضریب کالیبراسیون را نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۷ می‌توان گفت که با افزایش طول مستقیم لوله در بالادست دبی‌سنج، ضریب کالیبراسیون ابتدا کاهش و سپس افزایش می‌یابد. به بیانی دیگر، در اعداد رینولدز مختلف، $K_{@L/D=10} < K_{@L/D=50} < K_{@L/D=30}$. علت این تغییرات را می‌توان در تغییرات پروفایل سرعت در مقطع لوله جستجو کرد.

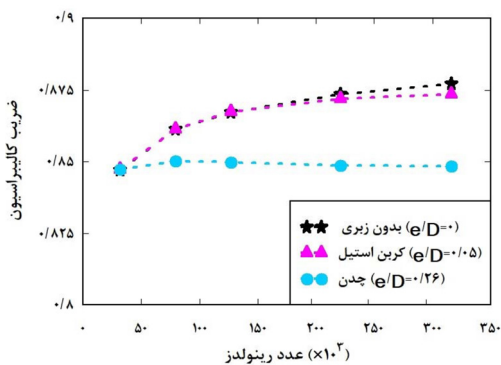


شکل ۷ اثر تغییر طول مستقیم لوله قبل از دبی‌سنج بر ضریب کالیبراسیون

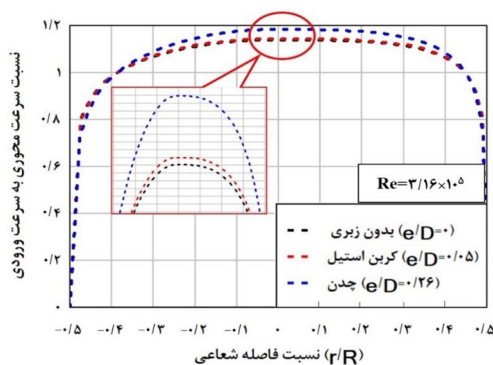
با انحنا گرفتن پروفایل سرعت در مقطع لوله، مقدار سرعت در مرکز لوله (هسته جریان) نسبت به سرعت متوسط جریان افزایش می‌یابد. از آنجایی که سرعت جابه‌جایی (Uconvection) که توسط دبی‌سنج اندازه‌گیری می‌شود، عمدتاً مربوط به سرعت در مرکز لوله می‌باشد (یا اصطلاحاً همان ناحیه هسته‌ای جریان که در آن گردابه‌های بزرگ‌تر و با انرژی بیشتر حضور دارند)، با انحنا گرفتن پروفایل سرعت، نسبت سرعت جابه‌جایی به سرعت متوسط جریان، افزایش می‌یابد [۶، ۱۰]. طبق رابطه ۳، از آنجایی که ضریب کالیبراسیون، حاصل نسبت سرعت متوسط جریان به سرعت جابه‌جایی می‌باشد، با انحنا گرفتن پروفایل سرعت، ضریب کالیبراسیون کاهش می‌یابد [۶، ۱۰]. به کمک این تفسیر، می‌توان با رسم پروفایل سرعت در مقاطع مختلف لوله و مشاهده تغییرات آن، روند تغییرات ضریب کالیبراسیون را تحلیل نمود.

شکل ۸، تغییرات پروفایل سرعت در مقطع لوله در فواصل مختلف قرارگیری دبی‌سنج ۵۰ و ۳۰ و ۱۰ (L) طول مستقیم لوله قبل از دبی‌سنج و D قطر لوله می‌باشد) را نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۸ هنگام ورود جریان به درون لوله، ضخامت لایه مرزی ناچیز بوده و پروفایل سرعت تقریباً تخت می‌باشد. در این حالت توزیع ادی‌ها در جریان یکنواخت بوده و با سرعتی نزدیک به سرعت متوسط جریان جابه‌جا می‌شوند [۶]. با حرکت سیال درون لوله، با افزایش ضخامت لایه مرزی، پروفایل سرعت در مقطع جریان انحنا پیدا می‌کند. در این حالت، سرعت در ناحیه مرکزی جریان نسبت به سرعت متوسط جریان افزایش می‌یابد. با توجه به میزان انحنای پروفایل سرعت در ناحیه مرکزی جریان، ضریب کالیبراسیون نیز تغییر می‌کند. همان‌طور که در شکل ۸ مشخص است، پروفایل سرعت در ناحیه هسته‌ای و مرکزی لوله در $L/D=30$ خمیده‌تر از $L/D=50$ و همچنین، پروفایل سرعت در $L/D=50$ خمیده‌تر از $L/D=10$ است. به بیانی دیگر، با توجه به توضیحات فوق، تغییرات سرعت در ناحیه هسته‌ای به صورت رابطه ۱۰ می‌باشد.

لوله تخت‌تر می‌شود. مطابق توضیحات مذکور در بخش‌های پیشین، با تخت‌تر شدن پروفایل سرعت در مقطع لوله، مقدار ضریب کالیبراسیون افزایش می‌یابد [۱۰].



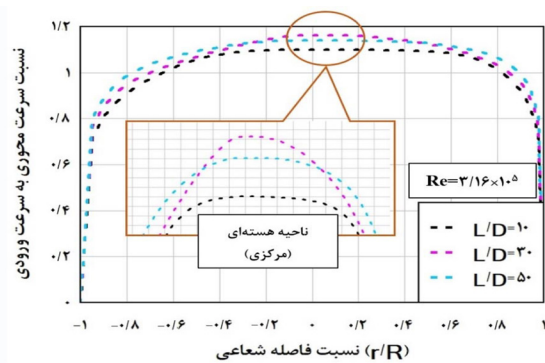
شکل ۹ اثر زبری سطح بر ضریب کالیبراسیون



شکل ۱۰ تغییر پروفایل سرعت در زبری‌های مختلف در مقطع L/D=50

نتیجه‌گیری

تغییر دبی جریان (تغییر در عدد رینولدز جریان)، کوتاه بودن طول لوله در بالادست دبی‌سنج و یا نصب دبی‌سنج بر روی خطوط با جنس متفاوت به شدت عملکرد دبی‌سنج را تحت تأثیر قرار می‌دهد. در این شرایط ضریب کالیبراسیون نقش مهمی در افزایش دقت اندازه‌گیری جریان دارد. در این پژوهش، به کمک شبیه‌سازی CFD، جریان هوا درون لوله شبیه‌سازی گردید و با استفاده از مدل تحلیلی دبی‌سنج فراصوت همبستگی متقابل، اثر هر یک از پارامترهای عدد رینولدز جریان، طول لوله در بالادست دبی‌سنج و زبری سطح لوله، بر عملکرد دبی‌سنج و ضریب کالیبراسیون، مورد بررسی و تحلیل قرار گرفت. در پژوهش حاضر نشان داده



شکل ۸ تغییر پروفایل سرعت در امتداد لوله

$$U_{conv @ L/D=10} < U_{conv @ L/D=50} < U_{conv @ L/D=30} \quad (10)$$

از آنجایی که سرعت متوسط برای هر سه مقطع از لوله یکسان است (جریان با دبی مشخصی در طول لوله در جریان است)، لذا با انحنا گرفتن پروفایل سرعت، نسبت تغییرات سرعت متوسط به سرعت جابه‌جایی به صورت رابطه ۱۱ است.

$$\frac{U_{Bulk}}{U_{conv @ L/D=30}} < \frac{U_{Bulk}}{U_{conv @ L/D=50}} < \frac{U_{Bulk}}{U_{conv @ L/D=10}} \quad (11)$$

لذا با توجه به توضیحات فوق و رابطه ۳، ضریب کالیبراسیون ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد.

$$K_{@L/D=30} < K_{@L/D=50} < K_{@L/D=10} \quad (12)$$

اثر زبری سطح

زبری سطح، مستقیماً در معادلات مربوط به دبی‌سنج وارد نشده و اثر خود را بر شکل‌گیری پروفایل سرعت نشان می‌دهد. نتایج شبیه‌سازی در شکل ۹ نشان می‌دهد که با افزایش زبری سطح، ضریب کالیبراسیون کاهش می‌یابد. برگستورم و همکارانش با تغییر زبری سطح چند لوله مختلف و مشاهده تغییر پروفایل سرعت در هر دو زیر لایه آرام و ناآرام، نتیجه گرفتند که تغییر در زبری سطح می‌تواند پروفایل سرعت در تمام مقطع لوله را تحت تأثیر قرار دهد [۲۹]. پروفایل سرعت جریان در مقطع نصب دبی‌سنج در لوله با زبری‌های مختلف در شکل ۱۰ نشان داده شده است. با توجه به شکل ۱۰، با کاهش زبری سطح، تنش دیواره کاهش یافته، به تبع گرادیان سرعت در تمام مقطع لوله کاهش یافته و پروفایل سرعت در مقطع

شده است که میزان انحنای پروفایل سرعت، نقش اساسی در تحلیل و بررسی میزان تغییرات ضریب کالیبراسیون دارد. با انحنا گرفتن پروفایل سرعت در مقطع لوله، نسبت سرعت در مرکز لوله و ناحیه هسته‌ای جریان به سرعت متوسط جریان افزایش می‌یابد. از آنجایی که سرعت جابه‌جایی اندازه‌گیری شده توسط دبی‌سنج، اساساً به سرعت در مرکز لوله وابسته است، با انحنا گرفتن پروفایل سرعت، سرعت جابه‌جایی افزایش یافته و طبق تعریف ضریب کالیبراسیون، مقدار ضریب کالیبراسیون مورد نیاز کاهش می‌یابد.

همچنین نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که دبی‌سنج در جریان با رینولدز بالاتر، عملکرد بهتری دارد. با افزایش عدد رینولدز جریان، پروفایل سرعت، تخت‌تر شده و لذا ضریب کالیبراسیون افزایش می‌یابد. همچنین با حرکت سیال درون لوله (قبل از پیمایش توسعه‌یافتگی)، به دلیل افزایش و سپس کاهش در انحنای پروفایل سرعت، ضریب کالیبراسیون نیز به تبع، ابتدا کاهش و سپس افزایش می‌یابد. متعاقباً این نتیجه نیز حاصل شد که با افزایش زبری سطح، به دلیل انحنا گرفتن پروفایل سرعت در مقطع لوله، ضریب کالیبراسیون مربوطه کاهش می‌یابد.

علائم و نشانه‌ها

q_v : دبی حجمی (m^3/s)

u_i' : نوسانات سرعت (m/s)

μ_i : گرانیوی جریان مغشوش (Pa.s)

K : انرژی جنبشی مغشوش (m^2/s^2)

مراجع

- [1]. LaNasa P J, Upp E L (2002) Liquid flow measurement, (2nd ed.), Gulf Professional Publishing.
- [2]. Mousavi S F, Hashemabadi S H, Jamali J (2020) Calculation of geometric flow profile correction factor for ultrasonic flow meter using semi-3D simulation technique, Ultrasonics 106: 106165.
- [3]. Lynnworth L C, Liu Y (2006) Ultrasonic flowmeters: Half-century progress report, 1955-2005. Ultrasonics 44.
- [4]. Zhou H, Ji T, Wang R, Ge X, Tang X, Tang S (2018) Multipath ultrasonic gas flow-meter based on multiple reference waves, Ultrasonics 82: 145-152.
- [5]. Coulthard J (1973) Ultrasonic cross-correlation flowmeters, Ultrasonics 11: 83-88.
- [6]. Schneider F, Peters F, Merzkirch W (2003) Quantitative analysis of the cross-correlation ultrasonic flow

ε : نرخ تلفات مغشوش (m^2/s^3)

ε : زبری سطح (m)

G_{12} : تابع همبستگی متقابل در بعد فرکانسی

c_0 : سرعت متوسط صوت در سیال (m/s)

p : فشار سیال (Pa)

μ : گرانیوی ($kg/(m \cdot s)$)

f : فرکانس دریافتی ($s/1$)

ω_0 : فرکانس زاویه‌ای انتشار موج فراصوت (rad/s)

ρ : دانسیته سیال (kg/m^3)

L_{11} : مقیاس طولی کامل جریان مغشوش (m)

f_e : فرکانس مشخصه ادی‌های دارای انرژی ($s/1$)

Re : عدد رینولدز جریان (-)

t : زمان (s)

τ : گام زمانی (s)

T : زمان اندازه‌گیری جریان (s)

X : فاز سیگنال بالادست (rad)

Y : فاز سیگنال پایین‌دست (rad)

Δx : فاصله محوری (m)

τ^* : زمان تاخیر دبی‌سنج (s)

$U_{convection}$: سرعت جابه‌جایی ادی (m/s)

U_{Bluk} : سرعت متوسط جریان (m/s)

K : ضریب کالیبراسیون (-)

D : قطر لوله (m)

u_i : سرعت متوسط جریان در جهت x_i (m)

v : ریشه متوسط مجذور نوسانات سرعت (m/s)

U : سرعت متوسط محوری (m/s)

L : طول لوله مستقیم در بالادست دبی‌سنج (m)

r : فاصله شعاعی از محور لوله (m)

- meter by means of system theory, *Measurement Science and Technology*, 14: 573–582.
- [7]. Worch A (1998) A clamp-on ultrasonic cross correlation flow meter for one-phase flow, *Measurement Science and Technology*, 9: 622–630.
- [8]. Fernandes C W, Bellar M D, Werneck M M (2010) Cross-correlation-based optical flowmeter, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 59: 840–846.
- [9]. Beck M S (1981) Correlation in instruments: cross correlation flowmeters, *Scientific Instruments*, 14: 7.
- [10]. Lysak P D, Jenkins D M, Capone D E, Brown W L (2008) Analytical model of an ultrasonic cross-correlation flow meter, part 2: Application, *Flow Measurement and Instrumentation*, 19: 41–46.
- [11]. Lysak P D, Jenkins D M, Capone D E, Brown W L (2008) Analytical model of an ultrasonic cross-correlation flow meter, part 1: Stochastic modeling of turbulence, *Flow Measurement and Instrumentation*, 19: 1–7.
- [12]. Gurevich A Y, Goman M G, Gurevich Y G, Lopez A M (2018) Synthetic turbulence modeling for evaluation of ultrasonic cross-correlation flow measurement, *Flow Measurement and Instrumentation*, 60: 134–143.
- [13]. Ton V A (2020) Mathematical model of ultrasonic cross correlation flow meters based on industrial experience, *Flow Measurement and Instrumentation*, 75: 101775.
- [14]. Alaeddin M A, Hashemabadi S H, Mousavi S F (2019) Measurement of fluid flow in closed conduits — Ultrasonic meters for gas-Part 1: Meters for custody transfer and allocation measurement, *BS ISO 17089-1*.
- [15]. American Gas Association (2003) *Measurement of Gas by Multipath Ultrasonic Meters*. AGA Report, 9.
- [16]. Versteeg H K, Malalasekera W (2016) *Introduction to computational fluid dynamics*, (2nd ed.), Pearson.
- [17]. Pollard A, Martinuzzi R (1989) Comparative study of turbulence models in predicting turbulent pipe flow, II - Reynolds stress and k-epsilon models, *AIAA journal*, 27: 1714–1721.
- [18]. Loyseau X F, Verdin P G, Brown L D (2018) Scale-up and turbulence modelling in pipes, *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 162: 1–11.
- [19]. Díaz D, del O, Hinz D F (2015) Performance of eddy-viscosity turbulence models for predicting swirling pipe-flow: Simulations and laser-Doppler velocimetry, *arXiv, Physics, Fluid Dynamics*, 1507.04648:1-14.
- [20]. Escue A, Cui J (2010) Comparison of turbulence models in simulating swirling pipe flows, *Applied Mathematical Modelling*, 34: 2840–2849.
- [21]. Kalpakli Vešter A, Orlu R, Alfredsson P H (2016) Turbulent flows in curved pipes: Recent advances in experiments and simulations, *Applied Mechanics Reviews*, 68.
- [22]. Crawford N, Spence S, Simpson A, Cunningham G A (2009) Numerical investigation of the flow structures and losses for turbulent flow in 90° elbow bends, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*, 223, 27–44.
- [23]. Hackett D (2012) Daniel Measurement and Control Incorporation, *Ultrasonic Meter Station Design Considerations*.
- [24]. Zhao H, Peng L, Stephane S A, Ishikawa H, Shimizu K, Takamoto M (2014) CFD aided investigation of multipath ultrasonic gas flow meter performance under complex flow profile, *IEEE Sensors Journal*, 14: 897–907.
- [25]. Cengel Y, Cimbala J (2008) *Essentials of fluid mechanics: fundamentals and applications*, (4th ed.), McGraw-Hill Education.
- [26]. Wada S, Tezuka K, Treenuson W, Tsuzuki N, Kikura H (2012) Study on the optimal number of transducers for pipe flow rate measurement downstream of a single elbow using the ultrasonic velocity profile method, *Science and Technology of Nuclear Installations*.
- [27]. Zhao H, Peng L, Takahashi T, Hayashi T, Shimizu K, Yamamoto T (2014) ANN based data integration for multi-path ultrasonic flowmeter. *IEEE Sensors Journal*, 14: 362–370.
- [28]. Alaeddin, M A, Hashemabadi, S H, Mousavi, S F (2021) Numerical Study on the Effect of Circumferential Position of Ultrasonic Transducers on Ultrasonic Cross-Correlation Flowmeter Performance Under Asymmetric Air Flow Profile, *Ultrasonics*, 106479.
- [29]. Bergström D J, Kotey N A, Tachie M F (2002) The effects of surface roughness on the mean velocity profile in a turbulent boundary layer, *Journal of Fluids Engineering*, 124, 3: 664–670.



Study on the Effect of Different Operational Parameters on Ultrasonic Cross-Correlation Flowmeter Performance Using CFD Simulation

Mohammad Amin Alaeddin¹ and Seyed Hasan Hashemabadi^{1,2*}

1. School of Chemical, Petroleum and Gas Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

2. Flow Measurement Research Center, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

Hashemabadi@iust.ac.ir

DOI: 10.22078/pr.2021.4466.3021

Received: January/05/2021

Accepted: November/12/2021

Introduction

Ultrasonic flowmeters are divided into three categories: time difference, cross-correlation and Doppler [1]. The most important advantage of ultrasonic cross-correlation flowmeter (UCCF) over the other ultrasonic flowmeters is that the performance of UCCF is independent of sound speed and tube thickness [2–4]. The basis of the cross-correlation flowmeter performance is calculation of the delay time at which the eddies in flow reaches from the upstream sensors to the downstream sensors. The delay time is calculated by applying the mathematical function of cross-correlation on both the upstream and downstream received signals [5]. Using the delay time and the distance between the two sensors, the eddies convection velocity can be easily calculated by dividing axial distance between two sensors by the delay time [2]. The calibration factor is then used to relate the fluid convection velocity to the bulk velocity which is important in flow measurement [6]. Flow Reynolds number [5,6], straight pipe length at the upstream of the flowmeter [7] and the pipe surface roughness [5,6] are the most important parameters which affect the performance of the cross-correlation flowmeter and the required calibration factor. Therefore, the purpose of this study is to investigate the effect of each of the above parameters on the performance of the ultrasonic cross-correlation flowmeter with the aid of CFD simulation.

Materials and Methods

To evaluate the performance of the flowmeter at different operating conditions, a pipeline with a typical diameter of 6 inches and the length of 55 pipe diameter was considered respecting to AGA-9 and ISO-17089 recommendation. Due to the symmetrical geometry of the pipe, a 2D plate with axis boundary condition was considered for simplicity of calculation. The inlet and outlet boundary conditions were set as “Velocity Inlet” and “Pressure Outlet” respectively. In present study, the flow medium is incompressible air and the flow Reynolds number varies from 3.16×10^4 to 3.16×10^5 . In order to simulate the flow inside the pipe with high accuracy, the Reynolds stress turbulence (RSM) model was used. Much researches have been done on turbulent flow simulation. Most of them suggested that the RSM perform better than eddy viscosity models in accurately predicting turbulent flows [8,9]. The mathematical model of cross-correlation ultrasonic flowmeter for calculation of the time delay has been proposed by Lysak et al [5,6]. In UCCF model, the delay time can be predicted in terms of turbulent flow parameters such as turbulent kinetic energy (k), turbulent dissipation rate (ϵ) and axial mean velocity (U), which they are obtained from CFD simulation [5,6].

Results and Discussion

The designed mesh was perfectly structured. Due to the high velocity gradient near the wall, the grid

dimensions in this area were smaller. The Y^+ value near the wall was kept in the range of 30 to 300 based on the standard wall function.

The calculated calibration factors at specified Reynolds number were validated against the experimental data [3]. The results are very close to the experimental data, and the average error is about 5%.

By plotting calibration factor against flow Reynolds number, it was concluded that the calibration factor increases by increasing the flow Reynolds number. As the Reynolds number increases, the flow velocity profile becomes flatter at the pipe section as well as at the center (core region) of the pipe. Therefore, the ratio of core region velocity to bulk velocity decreases. Since the convection velocity calculated by the flowmeter depends mainly on the velocity of core and central region of the pipe, in flatter velocity profile, the convection velocity decreases. As a result, the calibration factor increases.

The results showed that by increasing the straight pipe length at the upstream of the flowmeter, the calibration factor decreases and then increases. When the flow enters the pipe, the thickness of the boundary layer is negligible, and the velocity profile is almost flat. As the fluid moves through the pipe, the velocity profile at the pipe section changes and becomes more rounded. The calibration factor also changes according to the change in curvature of the velocity profile in the central region of the pipe.

Pipe roughness is not directly included in the flowmeter equations and shows its effect on velocity profile formation. As the pipe roughness decreases, the velocity gradient decreases entire the pipe section, and the velocity profile becomes flatter. As previously discussed, the calibration factor increases as the velocity profile in the pipe section becomes flatter.

Conclusions

Changes in flow rate, short pipe length at the upstream of the flowmeter or installation of flowmeters on pipes with different materials strongly affect the performance of the flowmeter. In these conditions, the calibration factor plays an important role in enhancement of the accuracy of the flowmeter. In this study, with the aid of the CFD simulation and ultrasonic cross-correlation flowmeter model, the air flow inside the pipe was simulated and the effect of the flow Reynolds number, pipe length at the upstream of the flow meter and pipe roughness on the performance of the flowmeter and required calibration factor were investigated. In the present study, it has been shown that the shape and curvature of the velocity profile plays an important role in analyzing and interpretation of the changes in calibration factor. As the velocity profile becomes more rounded at the pipe section, the ratio of core velocity increases relative to the average flow velocity. Since the convection velocity which is measured

by the flowmeter is strongly dependent on the core velocity, the convection velocity increases in flows with rounded velocity profiles. Therefore, according to the definition of the calibration factor, the required calibration factor decreases.

The simulation results also showed that the flowmeter performs better at higher Reynolds flows. As the flow Reynolds number increases, the velocity profile becomes flatter, and therefore, the calibration factor increases. Also, as the flow moves inside the pipe (prior to fully developed length), since the velocity profile curvature increases firstly and then decreases, subsequently, the calibration factor decreases firstly and then increases. Moreover, it was concluded that by increasing the pipe roughness, since the velocity profile becomes more rounded, the corresponding calibration factor decreases.

References

1. Zhou H, Ji T, Wang R, Ge X, Tang S (2018) Multipath ultrasonic gas flow-meter based on multiple reference waves, *Ultrasonics*, 82: 145–152.
2. Coulthard J (1973) Ultrasonic cross-correlation flowmeters, *Ultrasonics*, 11: 83–88.
3. Schneider F, Peters F, Merzkirch W (2003) Quantitative analysis of the cross-correlation ultrasonic flow meter by means of system theory, *Measurement Science and Technology*, 14: 573–582.
4. Worch A (1998) A clamp-on ultrasonic cross correlation flow meter for one-phase flow, *Measurement Science and Technology*, 9: 622–630
5. [5] Lysak P D, Jenkins D M, Capone D E, Brown W L (2008) Analytical model of an ultrasonic cross-correlation flow meter, part 2: Application, *Flow Measurement and Instrumentation*, 19: 41–46.
6. Lysak P D, Jenkins D M, Capone D E, Brown W L (2008) Analytical model of an ultrasonic cross-correlation flow meter, part 1: Stochastic modeling of turbulence, *Flow Measurement and Instrumentation*, 19: 1–7.
7. Gurevich A Y, Goman M G, Gurevich Y G, Lopez A M (2018) Synthetic turbulence modeling for evaluation of ultrasonic cross-correlation flow measurement, *Flow Measurement and Instrumentation*, 60: 134–143.
8. Pollard A, Martinuzzi R (1989) Comparative study of turbulence models in predicting turbulent pipe flow. II - Reynolds stress and k-epsilon models, *AIAA Journal*, 27: 1714–1721.
9. Loyseau X F, Verdin P G, Brown L D (2018) Scale-up and turbulence modelling in pipes, *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 162: 1–11.