

# مطالعه تجربی و شبیه‌سازی CFD اندازه‌گیری جریان دوفازی با استفاده از دبی‌سنج روزنه‌ای

مهدی فدایی<sup>۱</sup>، فروغ عاملی<sup>۱\*</sup> و سیدحسن هاشم آبادی<sup>۲</sup>

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

۲- پژوهشکده اندازه‌گیری جریان سیالات، دانشگاه علم و صنعت ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۲/۱۱ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۷/۲۰

## چکیده

با توجه به اهمیت اندازه‌گیری جریان‌های چندفازی در صنایع نفت، گاز، پالایش و پتروشیمی، در این مطالعه به امکان‌سنجی روش‌های مختلف اندازه‌گیری جریان دوفازی آب و هوا پرداخته شده است. مدار جریان دوفازی مورد استفاده و تجهیزات آن شامل دبی‌سنج روزنه‌ای و مانومتر جیوه‌ای، با توجه به استانداردهای مربوطه طراحی و ساخته شد. در مدار دوفازی طراحی شده، دبی هر یک از فازهای آب و هوا قبل از ورود به ناحیه اختلاط و تشکیل جریان دوفازی با استفاده از دبی‌سنج‌های الکترومغناطیسی و توربینی اندازه‌گیری شدند. دبی جرمی کل عبوری از دبی‌سنج روزنه‌ای برابر با مجموع دبی‌های جرمی اندازه‌گیری شده توسط دبی‌سنج‌های الکترومغناطیسی و توربینی است. با استفاده از دبی‌سنج روزنه‌ای موجود در مدار دوفازی و مشخص بودن دبی جرمی کل جریان دوفازی عبوری از آن، افت فشار دبی‌سنج روزنه‌ای به‌زای مقادیر مختلف دبی و کسر حجمی فازهای آب و هوا در جریان دوفازی تعیین شد. محدوده تغییرات عدد رینولدز جریان دوفازی ۱۰۰۰۰-۷۴۴ و محدوده تغییرات کسر حجمی هوا ۴۰٪-۱۵٪ در نظر گرفته شد. در این مطالعه، تأثیر عدد رینولدز و کسر حجمی هوا در جریان دوفازی بر عملکرد دبی‌سنج روزنه‌ای بررسی شد. در جریان‌سنج روزنه‌ای، در اعداد رینولدز پایین که الگوی جریان پیستونی برقرار است، شیب تغییرات ضریب تخلیه برحسب عدد رینولدز جریان دوفازی، بیشتر است و با افزایش عدد رینولدز جریان دوفازی و تغییر الگوی جریان از پیستونی به لایه‌ای، این شیب کاهش می‌یابد. جریان‌سنج روزنه‌ای تحت جریان عبوری دوفازی با استفاده از مدل‌های مختلف آشفتگی مورد شبیه‌سازی CFD قرار گرفت. طبق نتایج حاصل، مدل آشفتگی ک-ا-پسیلون استاندارد نتایج دقیق‌تری نسبت به سایر مدل‌های آشفتگی حاصل نمود. پژوهش حاضر زمینه اندازه‌گیری جریان‌های دوفازی در صنایع نفت و گاز را فراهم می‌آورد.

**کلمات کلیدی:** مطالعه تجربی، شبیه‌سازی CFD، اندازه‌گیری جریان، جریان دوفازی، دبی‌سنج روزنه‌ای

## مقدمه

برای جریان‌های دوفازی را مورد مطالعه قرار دادند. منگ و همکاران [۸] بررسی‌های جامع‌تری در مورد اندازه‌گیری جریان‌های دوفازی با استفاده از ونتوری و حس‌گرهای مقاومت الکتریکی ارائه دادند. در پژوهش مذکور، ابتدا کیفیت هر فاز با استفاده از حس‌گر مقاومت الکتریکی در جریان دوفازی (آب و هوا) اندازه‌گیری شد و با استفاده از افت فشار ایجاد شده در ونتوری و روابط موجود، دبی کل و کیفیت هر فاز تعیین گردید. هالینگشید و همکاران [۹] ضریب تخلیه دبی‌سنج روزنه‌ای و ونتوری را در دبی‌های کم جریان دوفازی بررسی نمودند. طبق نتایج، با افزایش عدد رینولدز جریان دوفازی ضریب تخلیه نیز افزایش می‌یابد. مانماتا و رول [۶] عملکرد دبی‌سنج روزنه‌ای را در جریان‌های افقی تک فازی و دوفازی (آب و هوا) بررسی نمودند. از جمله کاستی‌های موجود در مطالعه الیمونتی و همکاران [۷]، منگ و همکاران [۸]، مانماتا و رول [۶] عدم بررسی تأثیر الگوهای جریان دوفازی بر اندازه‌گیری‌ها و عدم مقایسه مدل‌های مختلف آشفتگی در فرآیند شبیه‌سازی CFD بود. شابان و همکاران [۱۰] از روش‌های یادگیری ماشین به منظور محاسبه نرخ‌های مایع و گاز در جریان دوفازی عمودی عبوری از دبی‌سنج روزنه‌ای استفاده نمودند. نوع جدیدی از دبی‌سنج روزنه‌ای توسط کولینی و همکاران [۱۱] بررسی شد که دبی‌سنج روزنه‌ای میکرو نام گرفت. قطر این تجهیزات اندازه‌گیری ۱۵۰، ۳۰۰، ۶۰۰  $\mu\text{m}$  بود. عملکرد جریان دوفازی عبوری از دبی‌سنج روزنه‌ای با روش‌های یادگیری ماشین توسط طارق عزیز و همکاران [۱۲] بررسی شد.

در مطالعه حاضر، جریان دوفازی تحت شرایط عملیاتی مختلف با کسرهای حجمی متفاوت آب و هوا از دبی‌سنج روزنه‌ای عبور داده شد و با توجه به دبی جرمی کلی جریان دوفازی عبوری از دبی‌سنج روزنه‌ای که حاصل جمع دبی‌های جرمی اندازه‌گیری شده توسط دبی‌سنج‌های الکترومغناطیسی و توربینی بود، دبی جریان دوفازی

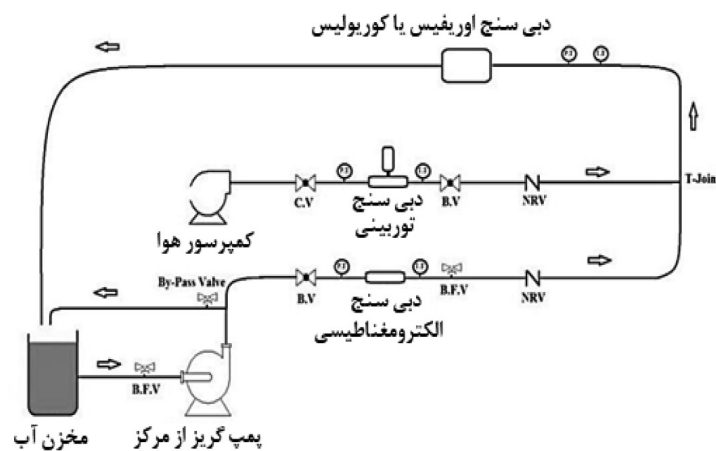
با توجه به اهمیت جریان‌های چندفازی در صنعت، پژوهش‌گران متعددی در زمینه اندازه‌گیری و مدل‌سازی آن فعالیت نموده‌اند. تحقیقات وسیعی در مورد اندازه‌گیری جریان‌های چندفازی عبوری از دبی‌سنج روزنه‌ای توسط فریرا و همکاران [۱] آغاز شد. در این پژوهش برای اندازه‌گیری جریان دوفازی عبوری از دبی‌سنج روزنه‌ای، تجزیه و تحلیل دینامیکی سیگنال دریافت شده حاصل از اختلاف فشار انجام شد و تغییرات فرکانس و دامنه سیگنال‌های دریافتی از آن‌ها مورد بررسی قرار گرفت. از جمله کاستی‌های موجود در مطالعه فریرا و همکاران [۱] تعداد نتایج آزمایشگاهی محدود برای انجام تجزیه و تحلیل بود به این صورت که تعداد کل نتایج آزمایشگاهی برابر با ۸ نقطه بود که بسیار ناچیز است. فوسا و همکاران [۲] بررسی دقیق‌تری از افت فشار جریان دوفازی عبوری از دبی‌سنج روزنه‌ای انجام دادند. این مطالعه در لوله‌های با قطر برابر با ۴۰ و ۶۰ mm و شش هندسه مختلف انجام شد. اولیورا و همکاران [۳] با استفاده از دبی‌سنج روزنه‌ای و ونتوری‌متر موفق شدند دبی جریان دوفازی عبوری از دبی‌سنج روزنه‌ای و ونتوری را اندازه‌گیری کنند. در پژوهش انجام شده از حس‌گر شبکه‌بندی شده سیمی برای تعیین کسرهای حجمی فازهای موجود در جریان دوفازی استفاده شد. در مطالعه اولیورا و همکاران [۳] تنها الگوهای جریانی لخته‌ای و حلقوی مورد مطالعه قرار گرفتند. عدم مطالعه الگوهای جریانی لایه‌ای و پیستونی از خلأهای تحقیقاتی مربوط به آن‌ها می‌باشد. دانشمندان زیادی از جمله برتلا و همکاران [۴]، جونز و زابر [۵] و مانماتا و همکاران [۶] افت فشار و خصوصیات جریان دوفازی (آب و هوا) عبوری از دبی‌سنج روزنه‌ای را اندازه‌گیری نمودند. الیمونتی و همکاران [۷] خصوصیات جریان دوفازی عبوری از دبی‌سنج روزنه‌ای، از جمله الگوهای جریانی حبابی و ثوابت تجربی در روابط موجود

تأمین می‌شود و دما، فشار و دبی هوا به ترتیب با استفاده از ترانس‌میتور دما، ترانس‌میتور فشار و دبی‌سنج توربینی اندازه‌گیری می‌شود. جریان آب نیز از طریق پمپ آب وارد مدار شده و دبی آن به صورت جداگانه قبل از مخلوط شدن با جریان هوا توسط دبی‌سنج الکترومغناطیسی اندازه‌گیری می‌شود. سپس جریان آب و هوا با همدیگر ترکیب شده و تشکیل جریان دوفازی می‌دهند. دبی کلی جریان دوفازی عبوری از دبی‌سنج روزنه‌ای از حاصل جمع دبی‌های اندازه‌گیری شده توسط دبی‌سنج‌های الکترومغناطیسی و توربینی تعیین شد. دما و فشار جریان دوفازی به ترتیب توسط ترانس‌میتور دما و ترانس‌میتور فشار اندازه‌گیری شدند. ترانس‌میتور فشار دارای قابلیت اندازه‌گیری فشار تا  $10^6$  Pa و با دقت اندازه‌گیری  $\pm 1\%$  و ترانس‌میتور دما با محدوده دمایی قابل اندازه‌گیری ۰ تا ۸ K و دقت  $\pm 0.2\%$  می‌باشد. دبی‌سنج توربینی با دقت اندازه‌گیری  $\pm 1.5\%$  جهت اندازه‌گیری دبی هوا استفاده شد. حجم مخزن آب استفاده شده برابر با  $1 \text{ m}^3$  و هد پمپ آب برابر با  $60 \text{ mH}_2\text{O}$  با حداکثر ظرفیت پمپاژ  $1 \text{ L/s}$  می‌باشد. دبی‌سنج الکترومغناطیسی برای اندازه‌گیری دبی جریان تک‌فاز آب در محدوده  $0.83 \text{ m}^3/\text{hr}$  تا  $10^{-7}$  -  $0.5/5 \times$  و با دقت  $\pm 0.5\%$  استفاده شد.

با استفاده از منحنی ضریب تخلیه دبی‌سنج روزنه‌ای به دست آمده برحسب عدد رینولدز جریان دوفازی تعیین شد. پس از تعیین نمودار ضریب تخلیه دبی‌سنج روزنه‌ای برحسب عدد رینولدز جریان دوفازی، می‌توان از دبی‌سنج روزنه‌ای جهت تعیین دبی جرمی جریان دوفازی استفاده نمود. همچنین به منظور شبیه‌سازی دبی‌سنج روزنه‌ای، هندسه دبی‌سنج روزنه‌ای طراحی شده با نرم‌افزار گمبیت ساخته شد. تعداد سلول‌های محاسباتی بهینه پس از بررسی استقلال نتایج شبیه‌سازی CFD از شبکه محاسباتی، تعیین گردید. افت فشار جریان دوفازی عبوری از دبی‌سنج روزنه‌ای به دست آمده با استفاده از شبیه‌سازی CFD با مقادیر تجربی مقایسه شد و انواع مدل‌های شبیه‌سازی CFD از نظر عملکرد با هم مقایسه شدند.

### مواد و روش انجام آزمایش

در فاز تجربی پژوهش حاضر، جریان دوفازی آب و هوا به منظور اندازه‌گیری دبی و کسرهای حجمی هر فاز مورد مطالعه قرار گرفت. مدار طراحی شده به منظور انجام آزمایش‌های مربوطه در شکل ۱ نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل مشخص است، جریان هوا توسط کمپرسور پیچشی<sup>۱</sup>



شکل ۱ مدار دوفازی طراحی شده جهت انجام آزمایش‌ها

لغزش می‌تواند از ۱ بزرگ‌تر باشد به این صورت که در جریان افقی حبابی چون حباب‌های گاز با جریان آب حمل می‌شوند لذا سرعت‌های واقعی فازهای آب و هوا برابر بوده و نسبت لغزش برابر با ۱ است در صورتی که برای الگوی جریان لایه‌ای و پیستونی مقدار ضریب لغزش می‌تواند برابر با ۱ نباشد (از ۱ بزرگ‌تر است).

$$S = \frac{V_G}{V_L} \quad (6)$$

در الگوی جریان حبابی و مه‌آلود چون حباب‌های هوا بسیار ناچیز می‌باشند سرعت واقعی فاز آب و هوا با هم برابر فرض شده و نسبت لغزش برابر با ۱ است. اگر در جریان دوفازی، نسبت لغزش برابر با ۱ باشد، جریان دوفازی همگن نامیده می‌شود و در غیراین صورت، جریان دوفازی ناهمگن نامیده می‌شود. با افزایش دبی هوا در جریان دوفازی، الگوهای جریان پیستونی، لایه‌ای و موجی تشکیل می‌شوند. در الگوهای جریانی پیستونی، لایه‌ای، موجی، لخته‌ای و حلقوی سرعت واقعی فاز گاز با سرعت واقعی فاز مایع متفاوت است. در جریان دوفازی افقی همگن، کسر حجمی هوا طبق رابطه ۷ تعیین می‌شود.

$$a = \frac{Q_G}{Q_G + Q_L} \quad (7)$$

در جریان دوفازی ناهمگن افقی، کسر حجمی هوا در جریان دوفازی طبق رابطه ارائه شده توسط باتروز [۱۳] که در رابطه ۸ نشان داده شده است، به دست می‌آید.

$$X = \left(\frac{1-x}{x}\right)^{0.9} \left(\frac{\rho_g}{\rho_l}\right)^{0.5} \left(\frac{\mu_l}{\mu_g}\right)^{0.1} \quad (8)$$

سپس کسر حجمی هوا در جریان دوفازی ناهمگن با استفاده از پارامتر لاکهارت مارتینلی به دست آمده، طبق رابطه ۹ محاسبه می‌شود [۱۴].

$$\frac{1-a}{a} = 0.28X^{0.71} \quad (9)$$

با توجه به محدوده عملیاتی مربوط به دبی آب و هوا و طبق استانداردهای طراحی دبی‌سنج روزنه‌ای<sup>۱</sup>، پارامتر بتا<sup>۲</sup> (نسبت قطر گلوگاه به قطر ورودی دبی‌سنج روزنه‌ای) برابر ۰/۵۵ تعیین شد. به منظور اندازه‌گیری افت فشار ایجاد شده در دو سر دبی‌سنج روزنه‌ای مانومتر جیوه‌ای با قطر لوله معادل با ۰/۰۸ m طراحی شد. حداکثر مقدار افت فشار قابل اندازه‌گیری با مانومتر جیوه‌ای طراحی شده ۰/۰۷ mHg معادل ۹۴۰۰۰ Pa و دقت مانومتر جیوه‌ای ۰/۰۰۰۵ mHg معادل ۶۰ Pa است. محاسبه کسر حجمی هوا و عدد رینولدز جریان دوفازی

در جریان‌های دوفازی افقی، تعیین نسبت لغزش بین فازها جهت محاسبه کسر حجمی هوا در جریان دوفازی بسیار اهمیت دارد. نسبت لغزش به صورت نسبت سرعت واقعی فاز هوا به سرعت واقعی فاز آب تعریف می‌شود. برای تعیین سرعت‌های ظاهری فازها، ابتدا سرعت ظاهری هر فاز تعیین می‌شود. روابط زیر نحوه تعیین سرعت‌های ظاهری فاز مایع رابطه ۱ و هوا رابطه ۲ را نشان می‌دهند:

$$V_{SL} = \frac{Q_L}{A} \quad (1)$$

$$V_{SG} = \frac{Q_G}{A} \quad (2)$$

سرعت مخلوط دوفازی از حاصل جمع سرعت‌های ظاهری فاز آب و هوا به صورت زیر به دست می‌آید:

$$V_M = V_{SG} + V_{SL} \quad (3)$$

با استفاده از نگاه‌داشت‌آهای مایع و گاز، سرعت واقعی فازهای آب و هوا محاسبه می‌شود. روابط زیر برای محاسبه سرعت واقعی فازهای آب و هوا مورد استفاده قرار می‌گیرد.

$$V_L = \frac{V_{SL}}{1-a} \quad (4)$$

$$V_G = \frac{V_{SG}}{1-a} \quad (5)$$

در رابطه ۶ نسبت لغزش نشان داده شده است. به طوری که وقتی دوفاز آب و هوا در لوله جریان دارند، بسته به الگوی جریان دوفازی، مقدار نسبت

1. ISO 5167 and ASME MFC-14M-2001  
2. Beta Ratio  
3. Hold up

### تأثیر کسر حجمی هوا در جریان دوفازی بر عملکرد دبی‌سنج روزنه‌ای

برای اندازه‌گیری افت فشار ایجاد شده در دو طرف دبی‌سنج روزنه‌ای از مانومتر جیوه‌ای طراحی شده در مدار جریان دوفازی استفاده شد. باتوجه به افت فشار ایجاد شده به‌ازای کسرهای حجمی مختلف هوا در جریان دوفازی، مقدار ضریب تخلیه با استفاده از رابطه ۱۳ که مربوط به تعیین دبی‌جریان عبوری از دبی‌سنج روزنه‌ای می‌باشد، تعیین شد. ضریب تخلیه به ضریبی اطلاق می‌گردد که در مقدار اندازه‌گیری شده توسط دبی‌سنج ضرب می‌شود تا مقدار واقعی جریان عبوری به‌دست آید [۱۵].

$$q_t = \frac{C_D}{\sqrt{1-\beta^4}} * \frac{\pi}{4} * d^2 * \sqrt{2\rho\Delta p} \quad (13)$$

در شکل ۲ نمودار ضریب تخلیه دبی‌سنج روزنه‌ای برحسب عدد رینولدز جریان دوفازی نشان داده شده است. به منظور بررسی تأثیر الگوی جریان دوفازی بر عملکرد صفحه اوریفیس، باید الگوی جریانی حاکم بر جریان دوفازی عبوری از صفحه اوریفیس مشخص شود. برای محاسبه الگوی جریانی حاکم بر جریان دوفازی عبوری از صفحه اوریفیس از نمودار الگوهای جریان دوفازی برای لوله‌های افقی که توسط بکر [۱۶] ارائه شد، استفاده می‌شود. محور عمودی نمودار ارائه شده توسط بکر [۱۶] عبارت است از تقسیم نرخ جرمی جریان گاز (kg/s) بر پارامتر بدون بعد لاند. در رابطه ۱۴، نحوه به‌دست آوردن پارامتر لاند بیان شده است.

پس از محاسبه کسر حجمی هوا در جریان دوفازی، چگالی و ویسکوزیته متوسط جریان دوفازی به‌ترتیب با استفاده از روابط ۱۰ و ۱۱ تعیین می‌گردند و عدد رینولدز جریان دوفازی با استفاده از رابطه ۱۲ محاسبه می‌گردد.

$$\rho_m = \rho_l * (1-\alpha) + \rho_g * \alpha \quad (10)$$

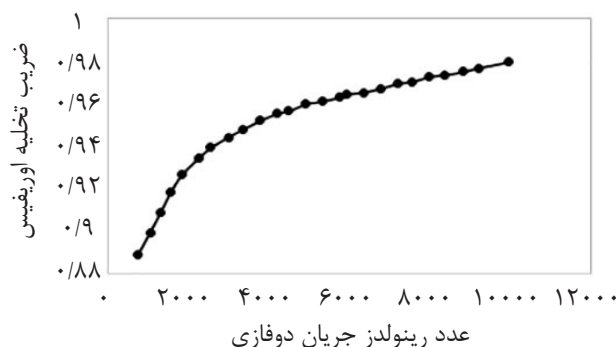
$$\mu_m = \mu_l * (1-\alpha) + \mu_g * \alpha \quad (11)$$

عدد رینولدز جریان دوفازی عبوری از دبی‌سنج روزنه‌ای طبق رابطه زیر تعیین می‌شود:

$$Re_m = \frac{\rho_m v_m D}{\mu_m} \quad (12)$$

### نتایج و تفسیر آنها

در این مطالعه، جریان دوفازی با کسرهای حجمی متفاوت آب و هوا با استفاده از دبی‌سنج روزنه‌ای مورد بررسی قرار گرفت. تأثیر کسر حجمی هوا در جریان دوفازی بر عملکرد دبی‌سنج روزنه‌ای بررسی شد و نمودار ضریب تخلیه دبی‌سنج روزنه‌ای برای جریان دوفازی با کسرهای حجمی متفاوت آب و هوا به‌دست آمد و برای تعیین دبی جرمی جریان دوفازی عبوری از دبی‌سنج روزنه‌ای استفاده شد. با توجه به نتایج تجربی به‌دست آمده از پژوهش، از جمله افت فشار دو سر دبی‌سنج روزنه‌ای، سرعت جریان دوفازی و ضریب تخلیه دبی‌سنج روزنه‌ای، شبیه‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی با استفاده از مدل‌های مختلف آشفتگی انجام شد. تفسیر کلیه نتایج حاصل در ادامه بیان شده است.



شکل ۲ ضریب تخلیه دبی‌سنج روزنه‌ای به‌ازای عدد رینولدز جریان دوفازی (محدوده تغییرات دبی آب و هوا به‌ترتیب ۰/۱۲۶ kg/s - ۰/۰۰۲۷ kg/s و ۰/۰۰۱ - ۸/۳×۱۰<sup>-۶</sup> Pa تا ۱۰۰۰۰۰ Pa و ۴۰۰۰۰۰ Pa و دمای محیط)

مرحله از آزمایش، دبی فاز آب ثابت مانده و دبی هوا به تدریج افزایش داده می‌شود. با افزایش دبی هوا در جریان دوفازی، مقدار افت فشار دو سر دبی سنج روزنه‌ای افزایش خواهد یافت. همان‌طور که در شکل ۲ دیده می‌شود به‌ازای عدد رینولدز جریان دوفازی کمتر از ۳۰۰۰ که الگوی جریان پیستونی بر جریان دوفازی عبوری حاکم است، شیب افزایش ضریب تخلیه دبی سنج روزنه‌ای نسبت به عدد رینولدز جریان دوفازی بیشتر می‌باشد. با افزایش عدد رینولدز جریان دوفازی و تغییر الگوی جریان دوفازی از پیستونی به لایه‌ای، شیب افزایش ضریب تخلیه دبی سنج روزنه‌ای نسبت به عدد رینولدز کاهش می‌یابد. کوجاسو و همکاران [۱۷]، اولیورا و همکاران [۳] هالینگشید و همکاران [۹] مشاهده نمودند که با افزایش دبی و عدد رینولدز جریان عبوری از دبی سنج روزنه‌ای افت فشار و ضریب تخلیه دبی سنج روزنه‌ای افزایش می‌یابد. نتایج آزمایشگاهی مربوط به میزان افزایش افت فشار دوسر دبی سنج روزنه‌ای بر حسب افزایش عدد رینولدز جریان دوفازی در شکل ۳ نشان داده شده است.

### شبیه‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی دبی سنج روزنه‌ای

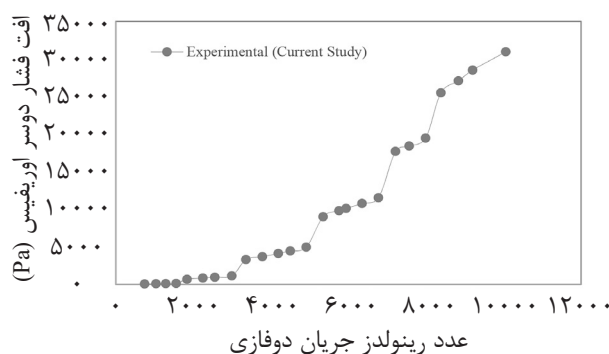
با توجه به ابعاد دبی سنج روزنه‌ای طراحی شده بر مبنای استانداردهای ISO 5167 و ASME MFC-14M-2001، شبکه مش‌بندی شده دبی سنج روزنه‌ای با نرم‌افزار گمبیت ساخته شد.

$$\lambda = \sqrt{\left(\frac{\rho_g}{0.075}\right) * \left(\frac{62.3}{\rho_l}\right)} \quad (14)$$

محور افقی نمودار الگوی جریان برای جریان دوفازی افقی بکر [۱۶] عبارت است از حاصل ضرب دبی جرمی فاز مایع در پارامتر  $\psi$ ، که پارامتر  $\psi$  به صورت رابطه ۱۵ تعریف می‌شود.

$$\psi = \frac{73}{\sigma} \left[ \mu_l + \left(\frac{62.3}{\rho_l}\right)^2 \right]^{\frac{1}{3}} \quad (15)$$

پس از تعیین پارامترهای  $\lambda$  و  $\psi$  و استفاده از دبی‌های جرمی جریان‌های مایع و هوا، نقاط مورد نظر بر روی نمودار الگوی جریان بکر درون‌یابی شده و الگوی جریانی حاکم بر جریان دوفازی تعیین می‌گردد. پس از مشخص شدن الگوهای جریانی حاکم بر جریان دوفازی عبوری از اوریفیس، کسر حجمی هوا در جریان دوفازی ناهمگن افقی طبق رابطه ۹ جهت محاسبه عدد رینولدز دوفازی استفاده می‌گردد. با توجه به شکل ۲، الگوی جریانی حاکم بر جریان دوفازی افقی عبوری از لوله تا عدد رینولدز جریان دوفازی معادل با ۳۰۰۰، به صورت پیستونی می‌باشد زیرا نقاط درون‌یابی شده در نمودار بکر در ناحیه پیستونی قرار دارند. اما وقتی عدد رینولدز دوفازی بیشتر از ۳۰۰۰ شود چون نقاط درون‌یابی شده در نمودار بکر وارد ناحیه الگوی جریان لایه‌ای می‌شوند، الگوی جریانی حاکم بر جریان دوفازی عبوری، لایه‌ای می‌شود. مطابق شکل ۲ در جریان تک‌فاز آب عبوری از دبی سنج روزنه‌ای، با افزایش دبی جریان آب، مقدار افت فشار ایجاد شده در دو سر دبی سنج روزنه‌ای افزایش می‌یابد. در هر



شکل ۳ افت فشار دبی سنج روزنه‌ای به‌ازای عدد رینولدز جریان دوفازی (محدوده تغییرات دبی آب و هوا به ترتیب ۰/۱۲۶-۰/۰۲۷ kg/s و ۰/۰۰۱-۸.3e-6 kg/s، فشار عملیاتی ۱۰۰۰۰ تا ۴۰۰۰۰ پاسکال و دمای محیط)

از معادله پیوستگی و بقای مومنتوم به صورت زیر بیان می‌شوند [۱۸]. برای هر کدام از فازها معادله پیوستگی به صورت زیر بیان می‌شود [۱۸]:

$$\frac{\partial(\alpha_p \rho_p)}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_p \rho_p \mathbf{v}_p) = \sum_{m=1}^n S_{mp} \quad (15)$$

موازنه مومنتوم برای فاز p ام به صورت زیر بیان می‌شود [۱۸]:

$$\frac{\partial(\alpha_p \rho_p)}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_p \rho_p \mathbf{v}_p) = -\alpha_p \nabla p - \nabla \cdot (\alpha_p \boldsymbol{\tau}_p) + \alpha_p \rho_p G + F_p + F_G$$

در شرایطی که مسأله در حالت پایا حل می‌شود، عبارت‌های  $\partial(\alpha_p \rho_p)/\partial t$  و  $\partial(\alpha_p \rho_p \mathbf{v}_p)/\partial t$  برابر با صفر در نظر گرفته می‌شوند. به منظور بررسی اثرات آشفتگی و خصوصیات جریان چندفازی در نزدیک دیواره لوله، از توابع دیواره استفاده شد [۱۹]. در ادامه، فرآیند بررسی دانسیته مش دبی‌سنج روزه‌ای به منظور تعیین تعداد بهینه سلول‌های شبیه‌سازی جهت افزایش دقت و کاهش زمان شبیه‌سازی انجام شده است. جهت مقایسه مدل‌های اغتشاش موجود با نتایج آزمایشگاهی، مدل‌های کا-ا‌پسیلون استاندارد، کا-ا‌پسیلون RNG، کا-ا‌مگا SST و کا-ا‌مگا STN انتخاب شدند. مدل‌های اغتشاش مذکور از جمله مدل‌های دو معادله ای هستند که دو دسته معادله به مجموعه معادلات حاکم موجود اضافه می‌کنند. مدل اغتشاش نیمه تجربی کا-ا‌پسیلون، دو معادله انتقال اضافی انرژی جنبشی آشفتگی و تلفات انرژی جنبشی آشفتگی را برای بیان رفتار جریان مغشوش به مجموعه معادلات حاکم اضافه می‌کند. در رابطه ۱۸ و ۱۹ معادلات بقای جرم و مومنتوم در جریان چندفازی بیان شده‌اند.

$$\frac{\partial(\alpha_i \rho_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\alpha_i \rho_i v_i)}{\partial x} = 0 \quad (18)$$

$$\frac{\partial(\alpha_i \rho_i v_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\alpha_i \rho_i v_i^2)}{\partial x} + \alpha_i \frac{\partial p}{\partial x} = F_i + F_{mi} \quad (19)$$

1. Wall
2. Mass Flow Inlet Boundary
3. Out Flow Boundary
4. Solver
5. Pressure Based
6. Steady

هندسه شبکه‌بندی به منظور کاهش دادن زمان اجرای شبیه‌سازی و تحلیل بهتر نتایج به صورت دوبعدی ایجاد شد. به منظور حصول اطمینان از توسعه یافتگی جریان دوفازی، طول خط لوله قبل از دبی‌سنج روزه‌ای ۱۵۰ برابر قطر لوله و طول خط لوله به‌عنوان حجم کنترل ۳/۷۵ m در نظر گرفته شد. در شکل ۴، حجم کنترل در نظر گرفته شده شامل یک دبی‌سنج روزه‌ای با نسبت قطر گلوگاه به قطر لوله معادل ۰/۵۵ نشان داده شده است. فرآیند شبیه‌سازی CFD دبی‌سنج روزه‌ای با استفاده از نرم‌افزار فلونت ۱۶ انجام شد. برای حجم کنترل در نظر گرفته شده، مجرای لوله به‌عنوان دیواره<sup>۱</sup> در نظر گرفته شد. صفحه ورودی جریان دوفازی به‌عنوان مرز ورودی جریانی جرمی<sup>۲</sup> و صفحه خروجی حجم کنترل به‌عنوان مرز جریان خروجی<sup>۳</sup> لحاظ گردید. در فرآیند شبیه‌سازی صفحه دبی‌سنج روزه‌ای، حل معادلات<sup>۴</sup> براساس فشار<sup>۵</sup> و در حالت پایا<sup>۶</sup> انجام گرفت. در قسمت مدل‌ها، از مدل چندفازی اولرین-اولرین استفاده شد. در مدل چندفازی اولرین-اولرین همه فازها به صورت پیوسته در نظر گرفته می‌شوند و در این مدل، کسر حجمی فاز پراکنده بیشتر از ۰/۱۰ می‌باشد. در نرم‌افزار فلونت برای حل معادله مومنتوم بین فازی به منظور تسریع و افزایش دقت حل از روش quick استفاده شد. تنظیمات مربوط به گسسته سازی معادلات در نرم‌افزار فلونت برای روابط مومنتوم، کسر حجمی، انرژی جنبشی اغتشاش و نرخ اتلاف آشفتگی به ترتیب از نوع quick، first or-der upwind و second order upwind می‌باشند. برای کوپل نمودن روابط سرعت و فشار از الگوریتم PISO و برای هم‌گرایی سریع تر روابط حاکم بر مسأله ضرایب UNDER RELAXATION برای فشار، چگالی، نیروهای حجمی، مومنتوم، کسر حجمی و ترم‌های اغتشاش به ترتیب ۰/۳، ۰/۹، ۰/۷، ۰/۰۰۵، ۰/۱ و ۰/۸ در نظر گرفته شدند. اگر n فاز در حجم کنترل وجود داشته باشد، معادلات حاکم بر مسأله که عبارت‌اند

$$+ \gamma_1 (2\sigma_{S_{ij}} - \frac{2}{3} \rho \Omega \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \sigma_{ij}) - \beta_1 \rho \Omega^2$$

که ضرایب  $\sigma_{\Omega_1}$ ،  $\sigma_k$ ،  $\beta_1$  و در روابط ۲۲ و ۲۳ به ترتیب برابر با ۲، ۲، ۰/۵۵۳ و ۰/۰۷۵ می‌باشند. اما مدل کا-امگا استاندارد ترکیبی از مدل کا-اپسیلون (که در نواحی دور از دیواره خوب عمل می‌کند) با مدل کا-امگا (که در نواحی نزدیک دیواره خوب عمل می‌کند) می‌باشد. این مدل از مزایای هر دو مدل استفاده نموده اما به دلیل تغییر خصوصیات از یک مدل به مدل دیگر، اغلب رفتارهای ناپایداری و یا ناهم‌گرایی ضعیفی را از خود نشان می‌دهد. روابط مدل کا-امگا SST در زیر نشان داده شده‌اند.

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \text{div}(\rho k u) \quad (23)$$

$$= \text{div}[(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}) \text{grad}(k)] + p_k - \beta^* \rho k \Omega \frac{\partial(\rho \Omega)}{\partial t} + \text{div}(\rho \Omega u) = \text{div}$$

$$[(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_{\Omega}}) \text{grad}(\Omega)] + \gamma_2 (2S_{ij} - \frac{2}{3} \rho \Omega \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \sigma_{ij})$$

$$- \beta_2 \rho \Omega^2 + 2 \frac{\rho}{\sigma_{\Omega^2} \Omega} \frac{\partial k}{\partial x_k} \frac{\partial \Omega}{\partial x_k}$$

که در این روابط ضرایب  $\beta_2$ ،  $\sigma_{\Omega_2}$ ،  $\sigma_{\Omega_1}$ ،  $\sigma_k$ ،  $\beta^*$  و به ترتیب برابر با ۱، ۲، ۱/۱۷، ۰/۴۴، ۰/۸۳ و ۰/۰۹ می‌باشند. شکل ۴ حجم کنترل در نظر گرفته شده در خط لوله جریان دوفازی را نشان می‌دهد.



شکل ۴ حجم کنترل در نظر گرفته شده در خط لوله جریان دوفازی

#### بررسی استقلال شبکه‌بندی از نتایج

در شبیه‌سازی هرچه تعداد حجم کنترل‌ها افزایش یابد، زمان و منابع سخت‌افزاری مورد نیاز جهت حل معادلات نیز افزایش می‌یابد. لذا، همواره سعی بر آن است که با کمترین تعداد مش، بهترین و دقیق‌ترین پاسخ حاصل شود. این مهم به‌دقت مطلوب مسأله نیز بستگی دارد. برای تعیین دانسیته بهینه سلول‌های شبکه‌بندی از یک پارامتر به‌عنوان معیار استفاده می‌شود.

معادلات ۲۰ و ۲۱ در واقع اثرات ناشی از جابه‌جایی و نفوذ انرژی اغتشاش را لحاظ می‌کنند. اولین متغیر، انرژی سینماتیک و دومین متغیر تلفات انرژی اغتشاش می‌باشد که در واقع مقیاس آشفتگی را تعیین می‌کند. این مدل، توسعه مدل طول اختلاط پراتل می‌باشد. معادلات انتقال انرژی جنبشی اغتشاش و نرخ تلفات انرژی جنبشی به‌صورت زیر می‌باشد [۲۰]:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \mu_i k)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} [(\mu_i + \frac{\mu_t}{\sigma_k}) \frac{\partial k}{\partial x_j}] \quad (20)$$

$$- \rho u_i u_j \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \rho \xi - 2M_i^2$$

$$\frac{\partial(\rho \xi)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \mu_i \xi)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} [(\mu_i + \frac{\mu_t}{\sigma_\xi}) \frac{\partial \xi}{\partial x_j}] \quad (21)$$

$$- f_c u_i u_j \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - f_c \rho \frac{\xi^2}{k}$$

در روابط بالا  $c_{1\xi}$  و  $c_{2\xi}$  ضرایب مدل بوده و  $f_1$  و  $f_2$  توابع میرایی برای مدل‌هایی با عدد رینولدز کم می‌باشند. از اثرات بویانسی در تولید انرژی جنبشی اغتشاش صرف نظر شده است. لذا، تولید انرژی جنبشی اغتشاش تنها به‌دلیل گرادیان سرعتی خواهد بود [۲۰]. به‌هنگام استفاده از توابع دیواره استاندارد ثابت مدل از جمله  $\sigma_k$ ،  $\sigma_\xi$ ،  $c_{1\xi}$ ،  $c_{2\xi}$  و  $c_\mu$  به ترتیب برابر با ۱/۴۴، ۱/۹۲، ۱، ۱/۳ و ۰/۰۹ می‌باشند [۲۰]. همچنین، به‌هنگام در نظر گرفتن روش حل پایا در حل معادلات، مشتقات جزئی  $\partial/\partial t(\rho k)$  و  $\partial/\partial t(\rho \xi)$  برابر با صفر می‌شوند [۲۰].

مدل کا-اپسیلون استاندارد بهترین مدل در اعتبارسنجی‌ها می‌باشد اما دارای محدودیت‌هایی از جمله عملکرد ضعیف در جریان‌هایی با رینولدز پایین می‌باشد. در مدل اغتشاش کا-امگا استاندارد دو دسته معادله برای انرژی جنبشی آشفتگی و ویسکوزیته سینماتیکی آشفته به مجموعه معادلات حاکم اضافه می‌شوند.

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \text{div}(\rho k u) = \text{div}[(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}) \text{grad}(k)] + p_m - \beta \rho k \Omega \quad (22)$$

$$- \beta \rho k \Omega$$

$$\frac{\partial(\rho \Omega)}{\partial t} + \text{div}(\rho \Omega u) = \text{div}[(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\Omega}) \text{grad}(\Omega)] \quad (23)$$



روزنه‌ای تحت جریان عبوری دوفازی، مدل آشفتگی کا-اپسیلون استاندارد بهترین نتایج را با بالاترین دقت نسبت به نتایج تجربی، پیش‌بینی می‌کند زیرا مدل کا-اپسیلون استاندارد اغتشاش را به صورت همگن در تمام جریان در نظر گرفته و فرض می‌کند که توزیع کمیت‌های مربوط به اغتشاش مشابه هم می‌باشند.

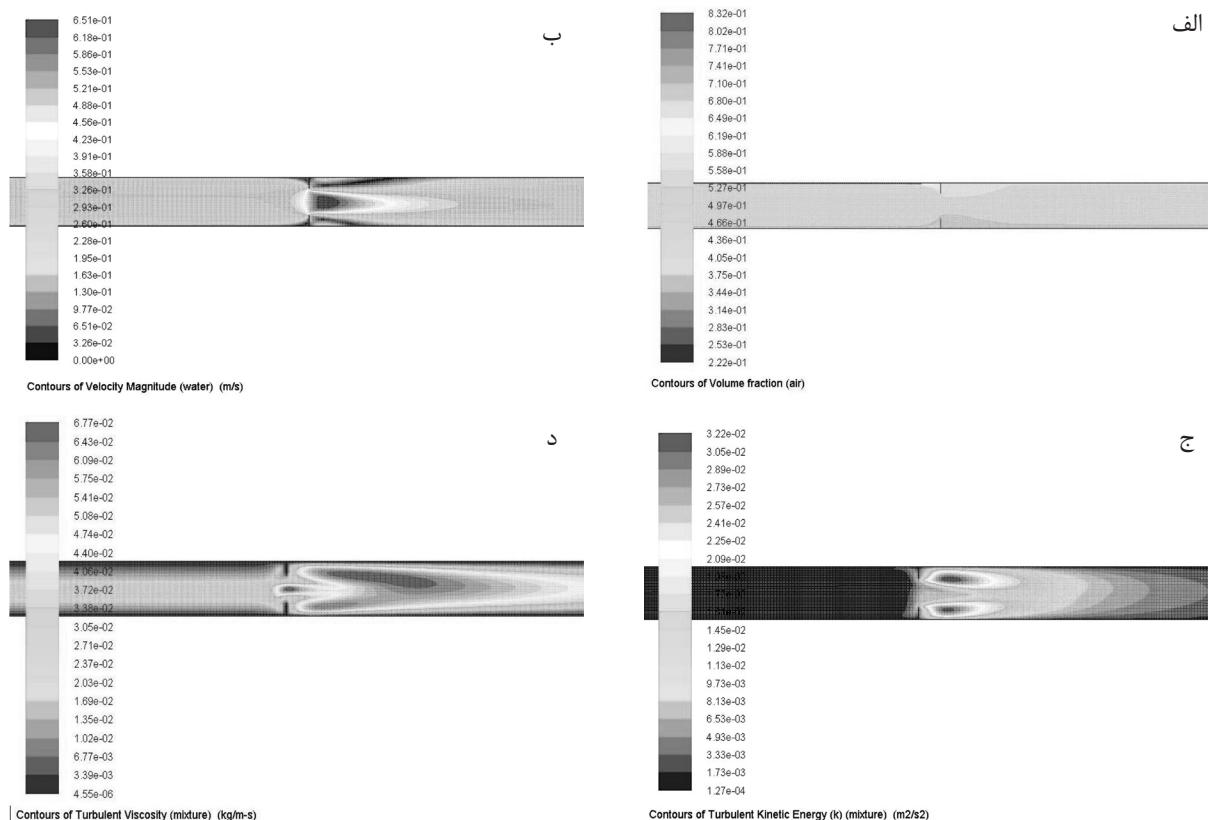
### نتیجه‌گیری

در این مطالعه، به بررسی روش اندازه‌گیری جریان دوفازی آب و هوا با استفاده از دبی‌سنج روزنه‌ای پرداخته شد. مدار جریان دوفازی مورد استفاده و تجهیزات مربوطه شامل دبی‌سنج روزنه‌ای و مانومتر جیوه‌ای، با توجه به استانداردهای موجود طراحی و ساخته شدند. تأثیر کسر حجمی هوا و عدد رینولدز جریان دوفازی بر عملکرد دبی‌سنج روزنه‌ای به منظور تعیین دبی جریان دوفازی بررسی شد. مشاهده گردید که با افزایش کسر حجمی هوا و عدد رینولدز جریان دوفازی، ضریب تخلیه دبی‌سنج روزنه‌ای افزایش می‌یابد. پس از تعیین الگوی جریان دوفازی حاکم بر جریان عبوری از دبی‌سنج روزنه‌ای با استفاده از نمودار بکر به منظور بررسی تأثیر الگوی جریان دوفازی بر عملکرد دبی‌سنج روزنه‌ای، مشاهده گردید که به‌ازای عدد رینولدز جریان دوفازی کمتر از ۳۰۰۰ که الگوی جریان پیستونی حاکم است، شیب افزایش ضریب دبی‌سنج روزنه‌ای بر حسب عدد رینولدز جریان دوفازی بیشتر بوده، اما به‌ازای عدد رینولدز بیشتر از ۳۰۰۰ که الگوی جریان لایه‌ای حاکم است، این شیب کاهش می‌یابد. مشاهده گردید که از بین مدل‌های شبیه‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی، مدل آشفتگی کا-اپسیلون استاندارد نتایج دقیق‌تری نسبت به سایر مدل‌های آشفتگی و با خطای متوسط ۲٪ نسبت به داده‌های تجربی حاصل نمود. از دستاوردهای این پژوهش می‌توان به فراهم نمودن بستر مناسب جهت ساخت جریان‌سنج‌های چندفازی صنعت نفت به منظور تعیین دبی جریان دوفازی اشاره نمود.

پارامتر معیار، سرعت جریان دوفازی در محور مرکزی حجم کنترل می‌باشد. با افزایش تعداد سلول‌های شبکه‌بندی از یک حد معین، تغییر قابل توجهی در نتایج شبیه‌سازی ایجاد نشد. اختلاف متوسط نتایج شبیه‌سازی با ۲۵۱۴۰۰ و ۲۱۳۳۰۰ سلول معادل ۰/۵٪ می‌باشد. بنابراین، تعداد بهینه سلول‌های شبیه‌سازی ۲۱۳۳۰۰ انتخاب گردید. تعیین تعداد سلول‌های بهینه برای انجام فرآیند شبیه‌سازی به کاهش زمان اجرای برنامه و افزایش دقت نتایج می‌انجامد.

### تحلیل نتایج شبیه‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی

نتایج حاصل از شبیه‌سازی مربوط به کسر حجمی هوا، نمودار سرعت فاز آب، کانتور انرژی جنبشی اغتشاش و کانتور ویسکوزیته اغتشاش جریان دوفازی به ترتیب در شکل‌های ۵ (الف)-(د) نشان داده شده است. این نتایج به‌ازای دبی جریان آب و هوا به ترتیب معادل ۰/۱۲۵ و  $10^{-4} \text{ kg/s}$  و فشار و دمای عملیاتی به ترتیب Pa ۴۰۰۰۰۰ و K ۲۹۸/۱۵ ارائه شده‌اند. همان‌طور که در این شکل مشخص است، حداکثر سرعت جریان دوفازی در خط محوری قبل از نزدیک شدن به دبی‌سنج روزنه‌ای معادل  $0/3 \text{ m/s}$  و بر روی دیواره لوله صفر است. هنگام عبور جریان دوفازی از دبی‌سنج روزنه‌ای با کاهش سطح مقطع جریان در گلوگاه دبی‌سنج روزنه‌ای، فشار کاهش یافته و سرعت جریان دوفازی تا  $0/6 \text{ m/s}$  افزایش می‌یابد، سپس سرعت جریان دوفازی به مرور کاهش می‌یابد و به دلیل وجود اثرات اصطکاکی و اتلاف انرژی، مقدار آن از مقدار سرعت جریان دوفازی قبل از ورود به دبی‌سنج روزنه‌ای کمتر می‌شود [۳ و ۱۹]. در جدول ۱ نتایج به‌دست آمده برای ضریب تخلیه دبی‌سنج روزنه‌ای تحت مدل‌های مختلف آشفتگی با نتایج تجربی بررسی و مقایسه شده‌اند. همان‌طور که از جدول ۱ مشخص است، متوسط خطا برای مدل‌های کا-اپسیلون استاندارد، کا-اپسیلون RNG، کا-امگا SST و کا-امگا STN به ترتیب برابر با ۲، ۳، ۸ و ۱۰٪ می‌باشد. بنابراین برای شبیه‌سازی دبی‌سنج



شکل ۵ الف) کانطور کسر حجمی فاز هوا، ب) کانطور مقدار سرعت فاز آب، ج) کانطور انرژی جنبشی اغتشاش جریان دوفازی و د) کانطور ویسکوزیته اغتشاش جریان دوفازی

جدول ۱ مقایسه عملکردی نتایج مدل‌های آشفتگی با نتایج تجربی

مدل اغتشاش	میزان اختلاف متوسط با نتایج آزمایشگاهی (%)
کا-اِپسیلون استاندارد	۲
کا-اِپسیلون RNG	۳
کا-امگا SST	۸
کا-امگا STN	۱۰

علائم و نشانه‌ها

- $m^3$ : مترمکعب
- $s$ : ثانیه
- $TT$ : سنجش گر دما
- $PT$ : ترانسمیتر فشار
- $BV$ : شیر توپی
- $CV$ : شیر کنترلی
- $BFV$ : شیر پروانه‌ای
- $NRV$ : شیر یک طرفه
- $V_{SL}$ : سرعت ظاهری فاز مایع (m/s)
- $Q_L$ : دبی مایع ( $m^3/s$ )
- $A$ : سطح مقطع جریان ( $m^2$ )
- $V_{SG}$ : سرعت ظاهری فاز گاز (m/s)
- $Q_g$ : دبی گاز ( $m^3/s$ )
- $V_M$ : سرعت جریان دوفازی (m/s)
- $V_L$ : سرعت واقعی فاز مایع (m/s)
- $V_G$ : سرعت واقعی فاز گاز (m/s)
- $\alpha$ : کسر حجمی فاز گاز
- $X$ : پارامتر لاکهارت-مارتینلی
- $x$ : کیفیت فاز گاز

داخلی خط لوله	$F_i$ : نیروی بین سطحی اعمال شده بر فاز $i$ ام (N)
$\Delta P$ : افت فشار دوسر دبی‌سنج روزنه‌ای (Pa)	$\rho_G$ : چگالی فاز گاز ( $\text{kg/m}^3$ )
$C_D$ : ضریب تخلیه دبی‌سنج روزنه‌ای	$\rho_L$ : چگالی فاز مایع ( $\text{kg/m}^3$ )
$q_i$ : دبی جرمی عبوری از دبی‌سنج روزنه‌ای ( $\text{kg/s}$ )	$S$ : نسبت لغزش
$\sigma$ : کشش سطحی مایع (N/m)	$\rho_m$ : چگالی متوسط جریان دوفازی ( $\text{kg/m}^3$ )
$\mu_i$ : ویسکوزیته مولکولی یا آرام (Pa.s)	$\mu_m$ : ویسکوزیته متوسط جریان دوفازی (Pa.s)
$\sigma_k$ : عدد پرائتل برای انرژی جنبشی اغتشاش	$\mu_L$ : ویسکوزیته مایع (Pa.s)
$\sigma_\xi$ : عدد پرائتل برای نرخ تلفات انرژی جنبشی اغتشاش	$\mu_G$ : ویسکوزیته گاز (Pa.s)
$\mu_i$ : ویسکوزیته آشفتگی یا ویسکوزیته گردابه‌ها	$Re_m$ : عدد رینولدز جریان دوفازی
$F_{mi}$ : نیروی جرمی عمل‌کننده بر فاز $i$ ام (N)	$D$ : قطر داخلی لوله جریان (m)
	$d$ : قطر گلوگاه دبی‌سنج روزنه‌ای (m)
	$\beta$ : نسبت قطر گلوگاه دبی‌سنج روزنه‌ای به قطر

## مراجع

- [1]. Ferreira V., "Differential pressure spectral analysis for two-phase flow through an orifice plate," International journal of pressure vessels and Piping, Vol. 73, No. 1, pp. 19-23, 1997.
- [2]. Fossa M. and Guglielmini G., "Pressure drop and void fraction profiles during horizontal flow through thin and thick orifices," Experimental Thermal and Fluid Science, Vol. 26, No. 5, pp. 513-523, 2002.
- [3]. Oliveira J. L.G., Passos J. C., Verschaeren R. and C. W. M. Geld, van der, "Mass flow rate measurements in gas-liquid flows by means of a venturi or orifice plate coupled to a void fraction sensor," Experimental Thermal and Fluid Science, Vol. 33, Issue 2, pp. 253-260, 2009.
- [4]. Bertola, V., "The structure of gas-liquid flow in a horizontal pipe with abrupt area contraction," Experimental thermal and fluid science, Vol. 28, No. 6, pp. 505-512, 2004.
- [5]. Jones Jr O. C. and Zuber N., "The interrelation between void fraction fluctuations and flow patterns in two-phase flow," International Journal of Multiphase Flow, Vol. 2, No. 3, pp. 273-306, 1975.
- [6]. Roul M. K. and Dash S.K., "Single-phase and two-phase flow through thin and thick orifices in horizontal pipes," Journal of Fluids Engineering, Vol. 134, No. 9, pp. 091301, 2012.
- [7]. Alimonti C., Falcone G. and Bello O., "Two-phase flow characteristics in multiple orifice valves," Experimental Thermal and Fluid Science, Vol. 34, No. 8, pp. 1324-1333, 2010.
- [8]. Meng, Z., Huang Zh., Wang B., Ji H., Li H. and Yan Y., "Air-water two-phase flow measurement using a Venturi meter and an electrical resistance tomography sensor," Flow Measurement and Instrumentation, Vol. 21, Issue 3, pp. 268-276, 2010.
- [9]. Hollingshead C.L., Johnson M. C., Barfuss S. L. and Spall R. E., "Discharge coefficient performance of Venturi, standard concentric orifice plate, V-cone and wedge flow meters at low Reynolds numbers," Journal of Petroleum Science and Engineering, Vol. 78, Issue 3-4, pp. 559-566, 2011.
- [10]. Shaban H. and Tavoularis S., "Measurement of gas and liquid flow rates in two-phase pipe flows by the

*application of machine learning techniques to differential pressure signals,* International Journal of Multiphase Flow, Vol. 67, pp. 106-117, 2014.

[11]. Cioncolini A., Scenini F. and Duff J., "*Micro-orifice single-phase liquid flow: Pressure drop measurements and prediction,*" Experimental Thermal and Fluid Science, Vol. 65, pp. 33-40, 2015.

[12]. Al-Qutami T. A., Rosdiazli I., Idris I. and Mohd Azmin I., "*Development of soft sensor to estimate multiphase flow rates using neural networks and early stopping,*" International Journal on Smart Sensing & Intelligent Systems, Vol. 10, Issue 1, pp. 199-222 2017.

[13]. Butterworth D., "*A comparison of some void-fraction relationships for co-current gas-liquid flow,*" International Journal of Multiphase Flow, Vol. 1, Issue 6, pp. 845-850, 1975.

[14]. Woldesemayat M. A., "*Comparison of void fraction correlations for two-phase flow in horizontal and upward inclined flows,*" Oklahoma State University, 2006.

[15]. Chisholm D. and Rooney D., "*Pressure drop during steam/water flow through orifices,*" Journal of Mechanical Engineering Science, Vol. 16, Issue 5, pp. 353-355, 1974.

[16]. Baker O. "*Design of pipelines for the simultaneous flow of oil and gas,*" in Fall Meeting of the Petroleum Branch of AIME, Society of Petroleum Engineers, 1953.

[17]. Kojasoy G., Landis F., Kwame-Mensah P. and Chang C. T., "*Two-phase pressure drop in multiple thick-and thin-orifice plates,*" Experimental thermal and fluid science, Vol. 15, Issue 4, pp. 347-358, 1997.

[18]. Fluent A., "*Fluent 12. Theory guide,*" Ansys inc., 2017

[19]. Shah M. S., Joshi J. B., Kalsi A. S., Prasad C. S. R. and Shukla D. S., "*Analysis of flow through an orifice meter: CFD simulation,*" Chemical Engineering Science, Vol. 71, pp. 300-309, 26 March 2012.

[20]. Kalkan O. O., "*Implementation of k-epsilon turbulence models in a two dimensional parallel navier-stokes solver on hybrid grids,*" 2014.



## Petroleum Research

Petroleum Research, 2019(December-January), Vol. 29, No. 108, 29-1

DOI: 10.22078/pr.2019.3642.2711

# Experimental Study and CFD Simulation of Two-phase Flow Measurement Using Orifice Flow Meter

Mehdi Fadaei<sup>1</sup>, Forough Ameli<sup>1\*</sup> and Seyed Hassan Hashemabadi<sup>1, 2</sup>

1. School of Chemical, Oil and Gas Engineering, Iran University of Science and Technology (IUST), Tehran, Iran

2. Institute of Fluid Flow Measurement, Iran University of Science and Technology (IUST), Tehran, Iran

Ameli@iust.ac.ir

DOI: 10.22078/pr.2019.3642.2711

Received: May/01/2019

Accepted: October/12/2019

## INTRODUCTION

Due to increased importance of multiphase flow metering in oil and gas industry, many researchers have studied in this area. In the research carried out by Ferreira et al [1], two-phase flow of air and water has been investigated. Moreover, the two-phase flow passing through the orifice plate has been investigated by Fossa et al [2]. Between 2008 and 2012, many scientists such as Bertola et al [3], Jones [4] and Manmatha et al [5] have measured the pressure drop and the characteristics of the two-phase flow passing through the orifice plate. In 2010, the characteristics of the two-phase flow passing through the orifice plate were studied by Alimonti et al [6]. In 2010, more

comprehensive studies on measuring two-phase flow using venturi and electrical resistive sensors were proposed by Meng et al [7]. In 2011, performance and discharge coefficients of orifice plates and venture meters for low rates of two-phase flow were investigated by Hollingshead et al [8]. In 2015, a new type of orifice plates was investigated by Cioncolini et al [9] called micro orifice. In 2017, the performance of the orifice plate for two-phase flow was studied by machine learning methods by Tareq Aziz et al [10]. In this study, two-phase flow under various operational conditions such as pressure, air and water flow rates

and volume fraction of the air was passing through the orifice plate flow meter and the total mass flow rate which was equal to the measured flow rates of electromagnetic and turbine flow meters were used to determine the orifice discharge coefficient versus Reynolds number of two-phase flow. Then the orifice plate flow meter was simulated by CFD approach. The pressure drop of the CFD simulation was compared to the empirical results, and the best turbulent model for simulation of flow through orifice plate was reported.

### EXPERIMENTAL PROCEDURE

Air and water flow were measured separately before entering the two-phase flow loop with a turbine and an electromagnetic flow meters. Then, the two-phase flow with various volumetric fractions of the air phase is entered to the orifice plate flow meter, and its performance was investigated.

### RESULTS AND DISCUSSION

Two-phase flow pressure is reduced in the orifice throat due to reduction of cross sectional area, on the other hand, velocity magnitude of the two-phase flow is increased in the orifice throat. Moreover, performances of various turbulence models were compared together. Calculated values of discharge coefficients for orifice plate were compared to those of experimental values. Mean absolute error for discharge coefficients of orifice plate using various turbulent models of standard k- $\xi$ , RNG k- $\xi$ , SST k- $\omega$  and STN k- $\omega$  were 2, 3, 8 and 10 percent respectively. Therefore, the standard k- $\xi$  turbulence model was the best model to simulate the turbulent flow in orifice plate. Comparison between the turbulence

models based on the obtained discharge coefficient of the orifice plate is shown in Table 1.

Table1: performance comparing between the turbulent models.

Turbulent model	Mean difference between simulation and empirical results [%]
Standard k-epsilon	2
RNG k-epsilon	3
Standard k-omega	8
STN k-omega	10

### CONCLUSIONS

In this study, the method of measuring two-phase flow of air and water using the orifice plate flow meter was investigated. Moreover, effects of air volume fraction and Reynolds number of two-phase flow were investigated on the orifice plate flow meter performance in order to determine the flow rate of the two-phase flow. It was observed that with an increase in air volume fraction and Reynolds number of two-phase flow, discharge coefficient of the orifice plate was increased. The standard K-Epsilon turbulence model led to better results in comparison to other turbulence models. Also, the achievement of this study is to provide the suitable approach in order to manufacture the two-phase flow for two-phase flow measurement in oil and industries.

### REFERENCES

- [1]. Ferreira, V., "Differential pressure spectral analysis for two-phase flow through an orifice plate," International journal of pressure vessels and piping, 1997. 73(1): pp. 19-23.
- [2]. Fossa, M. and G. Guglielmini, "Pressure drop and void fraction profiles during horizontal flow through thin and thick orifices," Experimental

Thermal and Fluid Science, 2002. 26(5): pp. 513-523. Fluid Science, 2002. 26(5): pp. 513-523.

[4]. Bertola, V., "*The structure of gas-liquid flow in a horizontal pipe with abrupt area contraction,*" Experimental thermal and fluid science, 2004. 28(6): pp. 505-512.

[5]. Jones Jr, O.C. and N. Zuber, "*The interrelation between void fraction fluctuations and flow patterns in two-phase flow,*" International Journal of Multiphase Flow, 1975. 2(3): pp. 273-306.

[6]. Roul, M.K. and S.K. Dash, "*Single-phase and two-phase flow through thin and thick orifices in horizontal pipes,*" Journal of Fluids Engineering, 2012. 134(9): pp. 091301.

[7]. Alimonti, C., G. Falcone, and O. Bello, "*Two-phase flow characteristics in multiple orifice valves,*" Experimental Thermal and Fluid Science, 2010. 34(8): pp. 1324-1333.

[8]. Meng, Z., et al., "*Air-water two-phase flow measurement using a Venturi meter and an electrical resistance tomography sensor,*" Flow Measurement and Instrumentation, 2010. 21(3): pp. 268-276.

[9]. Hollingshead, C.L., et al., "*Discharge coefficient performance of Venturi, standard concentric orifice plate, V-cone and wedge flow meters at low Reynolds numbers,*" Journal of Petroleum Science and Engineering, 2011. 78(3-4): pp. 559-566.

[11]. Cioncolini, A., F. Scenini, and J. Duff, "*Micro-orifice single-phase liquid flow: Pressure drop measurements and prediction,*" Experimental Thermal and Fluid Science, 2015. 65: pp. 33-40.

[12]. Al-Qutami, T.A., et al., "*DEVELOPMENT OF SOFT SENSOR TO ESTIMATE MULTIPHASE FLOW*

*RATES USING NEURAL NETWORKS AND EARLY STOPPING,*" International Journal on Smart Sensing & Intelligent Systems, 2017. 10(1).