



# Taylor Bubble Velocity Measurement by Using Image Processing

## ARTICLE INFO

### Article Type

Original Research

### Authors

Ramezani M. H.<sup>1\*</sup>,  
Noroozi M. M.<sup>1</sup>,  
Madahian R.<sup>1</sup>,  
Ansari M. R.<sup>1</sup>

### How to cite this article

Ramezani M. H., Noroozi M. M.,  
Madahian R., Ansari M. R. Taylor  
Bubble Velocity Measurement by  
Using Image Processing. Modares  
Mechanical Engineering, 2021;  
21(11):757-765.

<sup>1</sup> Faculty of Mechanical Engineering,  
Tarbiat Modares University, Tehran,  
Iran.

### \*Correspondence

Address: Faculty of Mechanical  
Engineering, Tarbiat Modares  
University, Tehran, Iran.

Phone:

Fax: -

Ramezanimohamadhossein@gmail.com

### Article History

Received: 08 February, 2021

Accepted: 07 June, 2021

ePublished: 27 September, 2021

## ABSTRACT

The purpose of this study is to generate two-phase flow patterns and to obtain a flow pattern map for two phases as water and air in a vertical pipe which is made of transparent Plexiglas. The pipe specification is 50 mm diameter and 390 cm length. In this attempt the average velocity of the Taylor bubble will be calculate. In order to facilitate this research work, a two phase flow was designed, built and adjusted at Tarbiat Modares University Two-phase flow laboratory. Three flow patterns as bubbly, slug and churn flow are generated and examined for 320 runs of different superficial velocities of air and water. A seven-layer distributor with the ability to change the number of bubbles produced is used to create a bubbly flow pattern at the air inlet. The effect of the superficial velocities of each phase on the flow pattern was evaluated and a flow pattern map was presented for 320 different data. By processing the images obtained from the high-speed camera, the average Taylor bubble velocity was calculated for different flow conditions with uncertainty in calculating the velocity. Also, for 5 different velocities of the liquid phase, a diagram of the average velocity of Taylor velocity with increasing gas velocity was drawn and compared with the Nicklin correlation which can be found in the literature.

**Keywords** Two-Phase Flow, Vertical Pipe, Experimental Method, Flow Pattern, Taylor Bubble Velocity

## CITATION LINKS

[1] Modelling flow pattern transitions for steady upward gas-liquid flow in vertical tubes [2] Visual technique for detection of gas-liquid two-phase flow regime in the airlift pump [3] Measurement of vertical gas-liquid two-phase flow by electromagnetic flowmeter and image processing based on the phase-isolation [4] Effect of diameter and axial location on upward gas-liquid two-phase flow patterns in intermediate-scale vertical tubes [5] Experimental study on transition of flow pattern and phase distribution in upward air-water two-phase flow along a large vertical pipe [6] Experiments on upwards gas liquid flow in vertical pipes [7] Interfacial and wall friction factors of swirling annular flow in a vertical pipe [8] Comparison of data processing algorithm performance for optical and conductivity void probes [9] Void fraction measurements of steam-water two-phase flow in vertical rod bundle: Comparison among different techniques [10] A  $\gamma$ -ray tomographic scanner for imaging voidage distribution in two-phase flow systems [11] High-resolution gas-oil two-phase flow visualization with a capacitance wire-mesh sensor [12] Void fraction measurement using electrical capacitance tomography and high speed photography [13] Comparison between electrical capacitance tomography and wire mesh sensor output for air/silicone oil flow in a vertical pipe [14] Application of electrical resistance tomography in bubble columns for volume fraction measurement [15] ERT investigation on horizontal and vertical counter-gravity slurry flow in pipelines [16] Investigation of the effect of the electrode distance on the impedance void meter performance in the two-phase flow measurement [17] Void fraction and flow regime in adiabatic upward two-phase flow in large diameter vertical pipes [18] Design and performance prediction of an impedance void meter applied to the petroleum industry [19] Void fraction measurement of gas-liquid two-phase flow from differential pressure [20] Two-phase flow in vertical tubes

## اندازه‌گیری سرعت حباب تیلور به کمک پردازش تصویر

محمدحسین رضائی\*

مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

محمد مهدی نوروزی

مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

رضا مداحیان

مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

محمد رضا انصاری

مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

### چکیده

هدف از این پژوهش، ایجاد انواع الگو جریان دوفازی و بدست آوردن نقشه الگو جریان برای دو فاز آب و هوا در یک لوله عمودی از جنس پلکسی گلس شفاف به قطر ۵۰ میلی‌متر و طول ۳۹۰ سانتی‌متر و محاسبه سرعت میانگین حباب تیلور است. سیستم آزمایشگاهی لازم جهت انجام این پژوهش در آزمایشگاه جریان‌های چندفازی دانشگاه تربیت مدرس توسط تیم تحقیقاتی جریان‌های چندفازی طراحی و ساخته شده است. سه الگوی جریان حبابی، اسلاگ و متلاطم برای ۳۲۰ سرعت ظاهری مختلف آب و هوا ایجاد و بررسی شدند. برای ایجاد الگوی جریان حبابی در ورودی هوا از یک توزیع‌کننده هفت طبقه با قابلیت تغییر در تعداد حباب‌های تولید شده، استفاده شده است. تاثیر سرعت ظاهری هر فاز بر الگوی جریان مورد ارزیابی قرار گرفت و نقشه الگو جریان برای ۳۲۰ داده مختلف رسم شد. به کمک پردازش تصاویر بدست آمده از دوربین سرعت بالا، سرعت میانگین حباب تیلور برای حالت‌های جریانی مختلف به همراه عدم قطعیت در محاسبه سرعت محاسبه شد. همچنین به کمک نتایج بدست آمده برای ۵ سرعت مختلف از فاز مایع نمودار تغییر سرعت متوسط حباب تیلور با افزایش سرعت فاز گازی رسم و با رابطه نیکلین مقایسه شد.

**کلیدواژه‌ها:** جریان دوفازی، لوله عمودی، روش تجربی، الگوی جریان، سرعت حباب تیلور

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱۱/۲۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۳/۱۷

\*نویسنده مسئول: Ramezanimohamadhossein@gmail.com

### ۱- مقدمه

جریان‌های دوفازی گاز-مایع در انواع کاربردهای صنعتی از جمله بویلرها، برج‌های تقطیر، راکتورهای شیمیایی، راکتورهای هسته‌ای و خطوط انتقال نفت مشاهده می‌شود. اندازه‌گیری شاخصه‌های جریان دوفازی مانند الگوی جریان و کسرجمعی بسیار مهم است زیرا شاخصه‌هایی همچون افت فشار و ضریب انتقال حرارت وابسته به نوع الگوی جریان هستند به همین علت شناسایی الگوی جریان و محاسبه کسرجمعی نقش تأثیرگذاری در ایمنی عملیاتی، کنترل فرآیند و قابلیت اطمینان فرآیندهای مختلف دارد. به همین منظور پژوهش‌های زیادی در زمینه ایجاد الگوهای جریان و بررسی نحوه توزیع فازها شده است. برای شناسایی تجربی الگوی جریان دوفازی سه روش نظری، مبتنی بر مشاهده و غیربصری وجود دارد. در روش نظری با استفاده از

خصوصیات فیزیکی جریان، الگوی جریان برای سرعت‌های مختلف هر فاز پیش‌بینی می‌شود و براساس آن نقشه الگوی جریان رسم می‌شود. این نقشه‌های الگوی جریان که براساس روابط نظری به‌دست آمده‌اند برای حالت خاصی از شرایط فیزیکی و هندسی جریان هستند و قابل تعمیم برای تمام لوله‌ها با قطرهای مختلف نیستند. تایتل برای لوله‌ای به قطر ۵۰ میلی‌متر براساس روابط نظری نقشه تغییرات الگوی جریان دوفازی آب و هوا را بر حسب سرعت ظاهری هر فاز ارائه کرد که تا به امروز در بسیاری از کارهای تجربی برای مقایسه نتایج مورد استفاده قرار گرفته است<sup>[1]</sup>. در روش‌های بصری یا مبتنی بر مشاهده به کمک دوربین‌های سرعت بالا و پردازش تصویر، الگوهای جریان شناسایی می‌شوند و می‌توان به کمک این روش تأثیر شاخصه‌هایی همچون قطر لوله، طول لوله، هندسه ورودی فازها را بر الگوی جریان بررسی کرد. در روش‌های غیر بصری به کمک حسگرهای الکترونیکی، نوری و پرتویی الگوی جریان، نحوه توزیع فازها و سرعت هر یک از فازها را می‌توان به‌دست آورد. حنفی زاده و همکاران به کمک پردازش تصاویر به‌دست آمده از دوربین سرعت بالا طول حباب تیلور را در لوله‌ای به قطر ۵۰ میلی‌متر به‌دست آوردند<sup>[2]</sup>. یانگ و همکاران به کمک روش پردازش تصویر قطر ستون فاز گازی در رژیم حلقوی را به‌دست آوردند<sup>[3]</sup>. انصاری و همکاران به کمک دوربین سرعت بالا و پردازش تصویر به مقایسه چهار الگوی جریان حبابی، اسلاگ، متلاطم و حلقوی در دو لوله به قطرهای ۴۰ و ۷۰ میلی‌متر پرداختند. با رسم نقشه الگوی جریان برای هر دو لوله مشاهده کردند که در لوله با قطر ۷۰ میلی‌متر ناحیه جریان‌های اسلاگ و متلاطم به ترتیب کوچکتر و بزرگتر از ناحیه جریان‌های اسلاگ و متلاطم در لوله با قطر ۴۰ میلی‌متر است و همچنین مرز بین تغییر الگوی جریان از حبابی به اسلاگ در لوله با قطر ۷۰ میلی‌متر نسبت به لوله با قطر ۴۰ میلی‌متر در سرعت‌های پایین‌تر فاز گازی ایجاد می‌شود<sup>[4]</sup>. آکیموتو و همکاران به منظور ایجاد جریان حبابی در لوله‌ی عمودی به قطر ۲۰۰ میلی‌متر در انتهای مسیر هوا از یک پخش‌کننده هوا با سوراخ‌هایی به قطر ۴۰ میکرومتر استفاده کردند<sup>[5]</sup>. پراسر و همکاران تأثیر نوع پخش‌کننده هوا بر الگوی جریان را در لوله‌ای به قطر ۲۰۰ میلی‌متر بررسی کردند. پخش‌کننده اول دارای ۶۰ سوراخ به قطر ۶ میلی‌متر است و پخش‌کننده دوم از ۱۵۲ سوراخ به قطر ۰/۸ میلی‌متر تشکیل شده است. آن‌ها نشان دادند که قطر حباب‌های ایجاد شده توسط پخش‌کننده اول به بیشینه مقدار ۵۰ میلی‌متر می‌رسد در حالی که در پخش‌کننده دوم بیشینه قطر حباب برابر ۱۲/۵ میلی‌متر است<sup>[6]</sup>. فوتوهای و همکاران با استفاده از روش شیر سریع‌بند (Quick Closing Valve (QCV)) تغییرات کسرجمعی را برای جریان دوفازی آب و هوا در لوله‌ای به قطر ۴۰ میلی‌متر بررسی کردند<sup>[7]</sup>. میلز و همکاران برای محاسبه کسرجمعی از دو کاوشگر

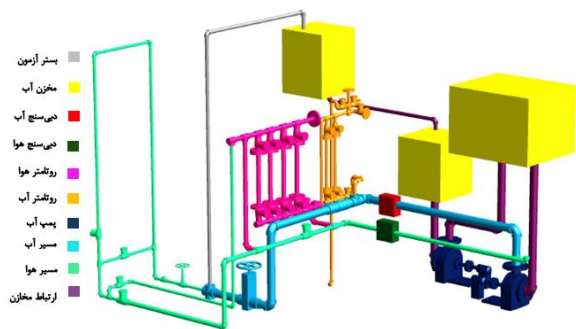
لوله‌ای به قطر ۱۵۰ میلی‌متر از حسگر امپدانس الکتریکی استفاده کردند. آن‌ها تغییرات کسرحمی بر حسب زمان را برای سه الگوی جریان حبابی، اسلاگ و چرن به دست آوردند و همچنین با قرار دادن دو حسگر امپدانس الکتریکی در دو ارتفاع مختلف تفاوت الگوی جریان در طول لوله را بررسی کردند [17]. روسا و همکاران روشی مبتنی بر اندازه‌گیری ولتاژ خروجی از حسگرهای امپدانس الکتریکی را برای محاسبه کسرحمی ارائه دادند. با اندازه‌گیری ولتاژ خروجی از حسگر امپدانس الکتریکی و مقایسه آن با کسرحمی به دست آمده از روش شیر سریع‌بند رابطه بین تغییرات کسرحمی و ولتاژ خروجی از حسگر امپدانس الکتریکی را برای سه الگوی جریان حبابی، اسلاگ و حلقوی به دست آوردند [18]. ژیاپین و همکاران با ارائه مدلی به کمک روش فشار دیفرانسیل براساس اختلاف فشار دو نقطه از بخش آزمون کسرحمی را محاسبه کردند و نتایج حسگرهای شبکه سیمی و مقاومت الکتریکی مقایسه کردند که نتایج حاصل از مدل ارائه شده با نتایج هر دو حسگر تطابق مناسبی داشت [19]. تیکلین و همکاران رابطه (۱) را برای محاسبه سرعت حباب تیلور ارائه دادند [20].

$$U_T = 1/2(U_{sg} + U_{sl}) + 0/35\sqrt{gD} \quad (1)$$

که در آن  $U_{sg}$  و  $U_{sl}$  به ترتیب سرعت ظاهری فاز گازی و فاز مایع،  $g$  شتاب گرانش و  $D$  قطر لوله هستند.

## ۲- بستر آزمون و سیستم آزمایشگاهی

به منظور مطالعه و بررسی رفتار جریان دوفازی در لوله عمودی مطابق شکل ۱ یک سامانه آزمایشگاهی در آزمایشگاه جریان‌های چندفازی دانشگاه تربیت مدرس طراحی و ساخته شد. طول لوله بستر آزمون ۳۹۰ سانتی‌متر و قطر آن ۵۰ میلی‌متر است که به منظور مشاهده و عکس‌برداری از جریان، لوله‌ای از جنس پلکسی‌گلس شفاف استفاده شده است. فاز مایع و فاز گازی از پایین بستر آزمون جهت ایجاد جریان همسو وارد می‌شوند. فاز مایع مورد استفاده شده در این پژوهش آب شهری و فاز گازی، هوا می‌باشد. فاز مایع از طریق لوله‌ای به قطر ۲ اینچ وارد بستر آزمون می‌شود برای اندازه‌گیری دبی آب از دو روتامتر و یک دبی‌سنج الکترومغناطیسی با بیشینه خطای ۰/۵ درصد استفاده



شکل ۱) سیستم آزمایشگاهی و بستر آزمون

نوری و رسانایی استفاده کردند. هر کاوشگر در ۱۴ موقعیت شعاعی کسرحمی را محاسبه می‌کند. بیشینه اختلاف نتایج دو کاوشگر در محاسبه کسرحمی برابر ۱۰ درصد است [8]. گیا و همکاران به کمک غلظت‌سنجی اشعه گاما کسرحمی را به دست آوردند و با نتایج روش فشار دیفرانسیل مقایسه کردند. بیشینه اختلاف نتایج برابر ۱۵ درصد بود [9]. کومار و همکاران با استفاده از روش توموگرافی اشعه گاما به مقایسه نحوه توزیع فازها در دو ارتفاع مختلف پرداختند و نقشه توموگرافی توزیع فازها را به دست آوردند [10]. داسیلوا و همکاران با توسعه یک حسگر شبکه سیمی کسرحمی را برای جریان دوفازی روغن سیلیکونی و هوا به دست آوردند. این حسگر قادر به اندازه‌گیری کسرحمی در سیالات غیر رسانا است. آن‌ها تغییرات کسرحمی بر حسب زمان را برای سه الگوی جریان حبابی، اسلاگ و متلاطم به دست آوردند و همچنین پروفیل تغییرات کسرحمی در راستای شعاعی را به ازای سرعت‌های مختلف فاز گازی رسم کردند [11]. سردشپند و همکاران از حسگر خازن الکتریکی برای محاسبه کسرحمی استفاده کردند. آن‌ها نقشه توموگرافی توزیع فازها را به دست آوردند و با نتایج حاصل از دوربین سرعت بالا مقایسه کردند [12]. آزوپاردی و همکاران با استفاده از حسگرهای شبکه سیمی و خازن الکتریکی تغییرات کسرحمی را به دست آوردند که بیشینه اختلاف در نتایج دو حسگر برابر ۴ درصد بود. آن‌ها علت اختلاف در نتایج را این عنوان کردند که حسگر خازن الکتریکی کسرحمی را در ناحیه‌ای به اندازه طول الکترودهای حسگر اندازه‌گیری می‌کند در حالی که حسگر شبکه سیمی در یک مقطع عملیات اندازه‌گیری را انجام می‌دهد [13]. یانگ و همکاران به مقایسه روش‌های توموگرافی مقاومت الکتریکی و فشار دیفرانسیل در محاسبه کسرحمی پرداختند. با قرارگیری حسگرهای فشار و مقاومت الکتریکی در دو ارتفاع مختلف از لوله تغییرات کسرحمی را به ازای سرعت‌های مختلف فاز گازی به دست آوردند که میانگین اختلاف نتایج دو روش برای مقطع اول برابر ۶/۴۹ درصد و برای مقطع دوم برابر ۵/۸۸ درصد است [14]. فرج و همکاران با استفاده از دو حسگر مقاومت الکتریکی سرعت حرکت حباب‌های فاز گسسته را به دست آوردند. با اندازه‌گیری فاصله بین دو حسگر و تأخیر زمانی بین دو سیگنال خروجی از هر حسگر، تغییرات سرعت فاز گسسته را به ازای سرعت‌های مختلف فاز پیوسته به دست آوردند [15]. دانگ و همکاران به کمک شبیه‌سازی به بررسی اثر فاصله الکترودهای رینگ در حسگر امپدانس الکتریکی بر محاسبه کسرحمی پرداختند و سپس با به دست آوردن حالت مطلوب برای فاصله بین الکترودها در یک آزمایش تجربی به مقایسه نتایج حاصل از حسگر امپدانس الکتریکی و کاوشگر رسانایی در محاسبه کسرحمی پرداختند که بیشینه اختلاف در نتایج دو حسگر برابر ۱۵ درصد بود [16]. شلگل و همکاران برای بررسی جریان دوفازی در



شکل ۳) پخش‌کننده هوا



شکل ۴) نحوه ورود فازها

فازها استفاده می‌شود. دو مخزن دیگر برای ذخیره آب استفاده می‌شوند. آب شهری ابتدا وارد یکی از این مخزن‌ها شده سپس توسط پمپ تک‌فاز وارد مخزن دوم می‌شود مخزن دوم به نحوی طراحی شده است که بتواند همواره آب را به کمک پمپ سه‌فاز در حد ثابت به جریان بیندازد. لازم به ذکر است نوسان در دبی آب می‌تواند باعث تغییر مکان الگوهای جریان و در نهایت خطا در اندازه‌گیری شود. با تغییر سرعت ظاهری آب در محدوده  $0.169-1.089$  m/s و سرعت ظاهری هوا در محدوده  $0.394-0.27$  m/s سه الگوی جریان حبابی، مخروطی و متلاطم در بستر آزمون ایجاد شده و مورد ارزیابی قرار گرفته است. فرآیند انجام آزمایش به این نحو است که دبی آب در یک مقدار مشخص ثابت نگه داشته می‌شود و دبی هوا در محدوده اندازه‌گیری دبی‌سنج‌ها از مقدار کمینه تا بیشینه افزایش می‌یابد تا در هر مرحله الگوهای جریان ایجاد شده و مرز تغییر بین هر الگو جریان در دبی ثابت آب مشخص گردد. در مرحله بعد دبی آب را افزایش داده و با ثابت نگه داشتن آن مراحل قبل به طور مشابه تکرار می‌شود. برای ثبت و شناسایی الگوهای جریان از دوربین سرعت بالا با سرعت فیلم‌برداری ۹۶۰ فریم بر ثانیه استفاده شده است.

### ۳- نتایج

هدف اصلی در پژوهش حاضر ایجاد انواع الگوی جریان، بررسی تأثیر سرعت فازها بر الگوی جریان و تعیین سرعت حرکت حباب‌های تیلور است. به همین منظور با انجام ۳۲۰ آزمایش در شرایط جریانی مختلف سه الگوی جریان حبابی، اسلاگ و متلاطم شناسایی و مورد ارزیابی قرار گرفته است. شکل ۵ نمونه‌ای از تصاویر این سه الگوی جریان را نشان می‌دهد.

شده است. روتامترهای آب دبی‌های کمتر از ۱ متر مکعب بر ساعت را اندازه‌گیری می‌کنند و دبی‌های بیشتر از این مقدار توسط دبی‌سنج الکترومغناطیسی اندازه‌گیری می‌شود. برای تامین هوا از دمنده هوا و کمپرسور هوا استفاده شده است. دمنده هوا قادر به تامین هوا با فشار ۱ bar است و برای تامین هوا با فشارهای بالاتر از کمپرسور استفاده می‌شود. اندازه‌گیری میزان دبی هوا توسط چهار روتامتر و یک دبی‌سنج ورتکسی با بیشینه خطای ۱ درصد انجام می‌شود. برای اندازه‌گیری دبی‌های کمتر از ۰/۶ متر مکعب بر ساعت از روتامترهای هوا و برای دبی‌های بیشتر از این مقدار از دبی‌سنج ورتکسی استفاده می‌شود. شکل ۲ دبی‌سنج‌های آب و هوا و همچنین جدول ۱ مشخصات و بازه اندازه‌گیری هر دبی‌سنج را نشان می‌دهد.

هوا از طریق لوله‌ای به قطر ۰/۵ اینچ وارد بستر آزمون می‌شود که در انتهای مسیر هوای ورودی به بستر آزمون از یک پخش‌کننده هوا استفاده شده است. این پخش‌کننده همان‌طور که در شکل ۳ نشان داده شده است از چند طبقه تشکیل شده است که با تغییر تعداد طبقات آن می‌توان تعداد حباب‌های تولید شده را با توجه به الگوی جریان مورد نظر کاهش یا افزایش داد. شکل ۴ نحوه ورود فازها و محل قرارگیری پخش‌کننده هوا را نشان می‌دهد. جریان دوفازی پس از خروج از بستر آزمون وارد یک مخزن رو باز می‌شود تا فرآیند تفکیک فازها انجام گیرد. هوا به عنوان فاز سبک‌تر وارد اتمسفر می‌شود و آب به عنوان فاز سنگین‌تر در این مخزن جمع می‌شود سپس وارد مخزن ذخیره آب می‌شود تا توسط پمپ سه‌فاز در ادامه آزمایش دوباره مورد استفاده قرار گیرد. سیستم آزمایشگاهی از سه مخزن تشکیل شده است. مخزن اول همان مخزن روباز است که جهت تفکیک

جدول ۱) مشخصات دبی‌سنج‌های هوا و آب

نوع دبی‌سنج	اندازه مسیر	محدوده اندازه‌گیری (m³/h)	خطای اندازه‌گیری
دبی‌سنج ورتکسی هوا	اینچ ۱	۸۷ - ۱	$\pm 2\%$ برای $10000 < Re < 20000$ و $\pm 1\%$ برای $Re \geq 20000$
دبی‌سنج الکترومغناطیسی آب	اینچ ۲	۴۰ - ۱	کمتر از ۰/۵ درصد



روتامتر آب و هوا



دبی‌سنج ورتکسی هوا



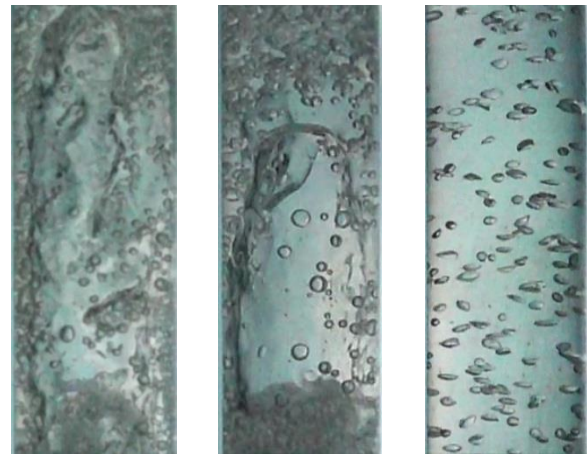
دبی‌سنج الکترومغناطیسی آب

شکل ۲) دبی‌سنج‌های آب و هوا



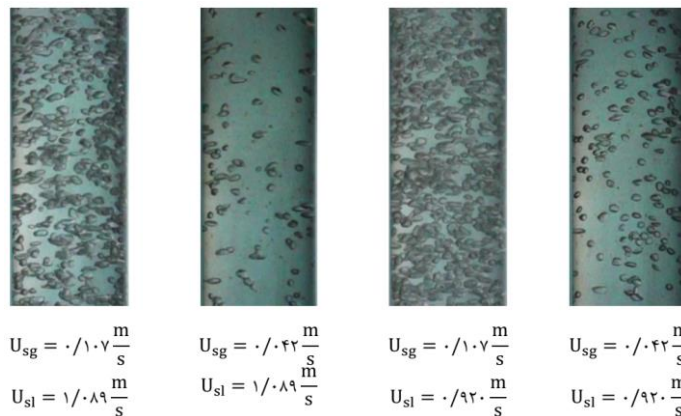
افزایش می‌یابد و در اثر برخورد حباب‌ها با هم حباب‌های بزرگتری ایجاد می‌شود که باعث می‌شود در طول لوله الگوی جریان تغییر کند. همچنین مشاهده می‌شود که در سرعت ثابت فاز گازی افزایش سرعت فاز مایع باعث کاهش تعداد حباب‌های هوا می‌شود.

الگوی اسلاگ: با افزایش سرعت فاز گازی و برخورد حباب‌ها با یکدیگر حباب‌های بزرگتری تشکیل می‌شوند این حباب‌ها معمولاً قطری معادل قطر لوله دارند. این حباب‌های مخروطی شکل به حباب تیلور معروف هستند. به انتهای حباب‌های تیلور دنباله‌ای از حباب‌های کوچک هوا متصل است که هم سرعت با حباب تیلور در حرکت هستند. بین دو حباب تیلور فاز پیوسته‌ای از مایع وجود دارد که در آن تعدادی حباب کوچک هوا نیز مشاهده می‌شود. با بررسی تصاویر ضبط شده توسط دوربین سرعت بالا می‌توان مشاهده کرد که فیلم نازکی از فاز مایع بین حباب تیلور و دیواره لوله قرار دارد که در خلاف جهت حرکت جریان به سمت پایین در حرکت است. شکل ۷ نحوه رشد و حرکت حباب تیلور را  $U_{sg} = 0.081 \frac{m}{s}$  و  $U_{sl} = 0.169 \frac{m}{s}$  نشان می‌دهد.

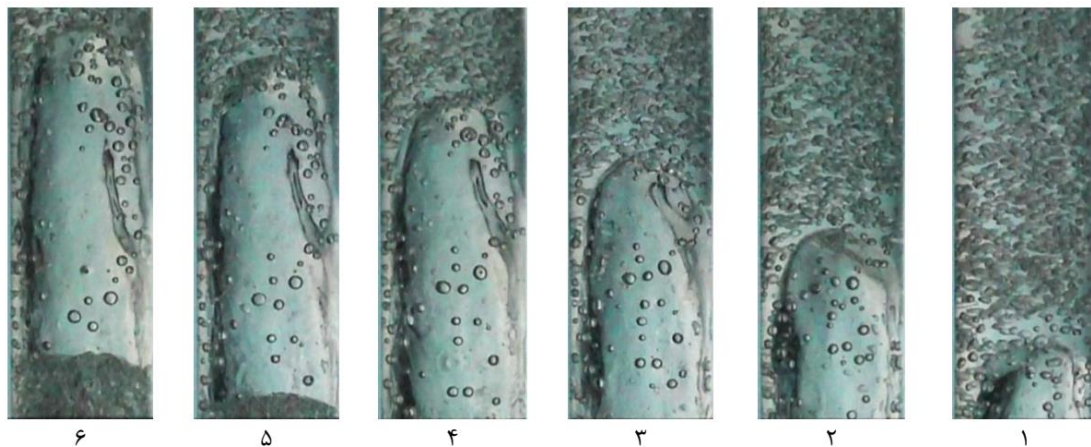


شکل ۵) سه الگوی جریان مشاهده شده در لوله‌ای به قطر ۵۰ میلی‌متر

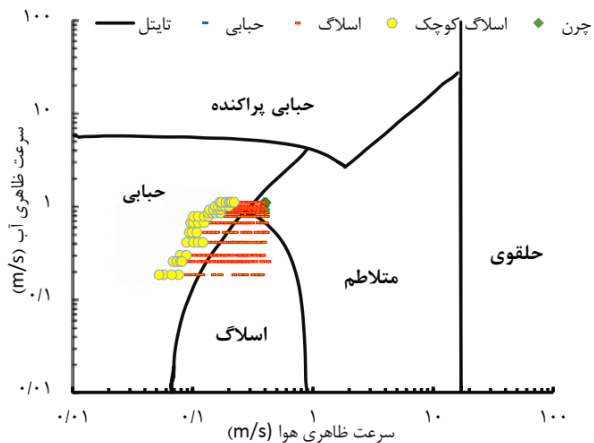
الگو حبابی: اولین الگویی که در لوله عمودی مشاهده می‌شود الگوی جریان حبابی است. در این الگو، حباب‌های هوا در فاز پیوسته مایع در حرکت هستند. در طی حرکت حباب‌ها، برخی از حباب‌ها متلاشی می‌شوند و برخی نیز با یکدیگر برخورد کرده و تشکیل حباب‌های بزرگتری را می‌دهند. مطابق شکل ۶ با افزایش سرعت فاز گازی در سرعت ثابت فاز مایع تعداد حباب‌های هوا افزایش می‌یابد به همین علت احتمال برخورد حباب‌ها با یکدیگر



شکل ۶) الگوی جریان حبابی در سرعت‌های مختلف هر فاز



شکل ۷) نحوه رشد و حرکت حباب تیلور



شکل ۹) نقشه الگو جریان

جریان ذکر نشده است به همین علت‌ها مشاهده می‌شود که در سرعت ظاهری پایین‌تر هوا نسبت به آنچه تایتل ارائه کرده است الگوی جریان از حبایی به اسلاگ تغییر می‌کند. این تفاوت در نقشه‌های الگوی جریان خود بیانگر اهمیت نحوه ورود فازها به خصوص فاز گازی و تأثیر آن بر الگوی جریان است.

در شکل ۱۰ نحوه تغییر الگوی جریان از حبایی به اسلاگ با افزایش سرعت ظاهری هوا نشان داده شده است. با افزایش سرعت ظاهری فاز هوا تعداد حباب‌های هوا افزایش می‌یابد که منجر به افزایش احتمال برخورد حباب‌ها با یکدیگر و تشکیل حباب‌های بزرگتر می‌شود. با برخورد حباب‌ها با یکدیگر حباب‌های مخروطی شکل کوچکی ایجاد می‌شود که با افزایش سرعت ظاهری هوا این حباب‌های مخروطی کوچک با یکدیگر برخورد کرده و تشکیل حباب‌های مخروطی بزرگتری را می‌دهند که قطری معادل قطر لوله دارند.

### ۳-۲- سرعت سنجی حباب تیلور

با بررسی تصاویر ضبط شده توسط دوربین سرعت بالا به کمک روش‌های پردازش تصویر می‌توان سرعت حرکت حباب تیلور را به دست آورد. دوربین سرعت بالا از الگوی جریان با سرعت ۹۶۰ فریم بر ثانیه تصویربرداری می‌کند که فاصله زمانی هر فریم برابر با ۰/۰۰۱۰۴ ثانیه است. مطابق شکل ۱۱ می‌توان میزان جابجایی حباب تیلور را در دو فریم تصویر مختلف به دست آورد. با اندازه‌گیری فاصله زمانی بین دو فریم تصویر انتخاب شده و میزان جابجایی حباب تیلور می‌توان سرعت حرکت حباب تیلور در طول لوله را از رابطه (۲) به دست آورد.

$$U_T = \frac{H_2 - H_1}{(f_2 - f_1) \times \Delta t} \quad (2)$$

که  $f_1$  و  $f_2$  به ترتیب شماره فریم تصویر اول و دوم و  $\Delta t$  فاصله زمانی بین دو فریم متوالی است.

شکل ۱۲ نمونه‌ای از اندازه‌گیری موقعیت حباب تیلور به کمک روش پردازش تصویر را نشان می‌دهد.

الگوی متلاطم: با افزایش سرعت فاز گازی و شکسته شدن حباب‌های تیلور یک بی‌نظمی و اغتشاش در جریان ایجاد می‌شود. در این نوع الگوی جریان حباب‌های تیلور باریک‌تر شده و ساختار آن دچار اعوجاج می‌شود. شکل ۸ نمونه‌ای از این الگو جریان را نشان می‌دهد.

### ۳-۱- نقشه الگوی جریان

با بررسی الگوهای جریان برای ۳۲۰ شرایط جریانی مختلف نقشه الگو جریان بر حسب سرعت‌های ظاهری مختلف هر فاز مطابق شکل ۹ رسم شد. این نقشه بیانگر نوع الگوی جریان در ارتفاع ۲۷۰ سانتی‌متری از ابتدای بستر آزمون است. نقشه به دست آمده در شکل ۹ با نقشه الگوی جریان تایتل که مختص لوله عمودی با قطر ۵۰ میلی‌متر است، مقایسه شده است. همانطور که مشاهده می‌شود روند تغییرات الگوهای جریان ایجاد شده در این پژوهش مشابه نقشه الگوی جریان تایتل است اما مرز بین تغییر الگوهای جریان در سرعت‌های کمتر فاز گازی نسبت به آنچه تایتل پیشنهاد کرده است، نمایان می‌شود علت اول این تفاوت در نقشه‌های الگوی جریان این است که نقشه الگوی جریان تایتل بر اساس روابط نظری به دست آمده که دارای فرضیه‌هایی بوده که ممکن است نسبت به حالت واقعی دارای نواقصی باشد و همچنین نحوه ورود فازها به خصوص فاز گازی در نقشه الگو جریان تایتل پیش‌بینی نشده است در حالی که در این پژوهش از یک پخش‌کننده چند طبقه برای ورود هوا به بستر آزمون استفاده شده است که به تولید حباب‌های هوا کمک می‌کند. علت دوم را می‌توان در یکسان نبودن محل شناسایی جریان در پژوهش حاضر با نقشه الگوی جریان تایتل بیان کرد زیرا تغییر در ارتفاع محل شناسایی باعث جلو افتادن یا به تعویق افتادن الگوهای جریان می‌شود همانطور که ذکر شد در این پژوهش الگوهای جریان در ارتفاع ۲۷۰ سانتی‌متر از ابتدای بستر آزمون شناسایی شده‌اند در حالی که در نقشه الگوی جریان محل شناسایی الگوهای

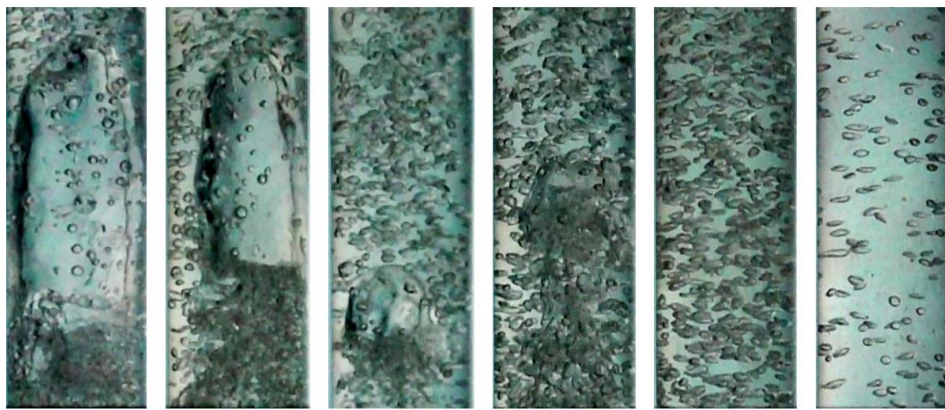


$U_{sg} = 0/416$   
 $U_{sl} = 1/070$



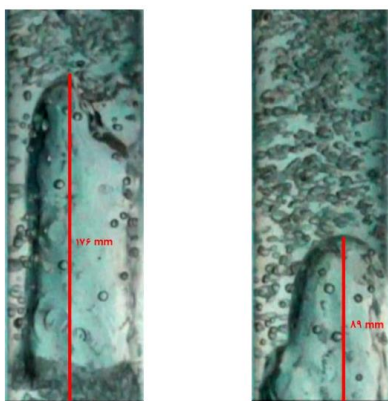
$U_{sg} = 0/397$   
 $U_{sl} = 1/004$

شکل ۸) الگوی جریان متلاطم



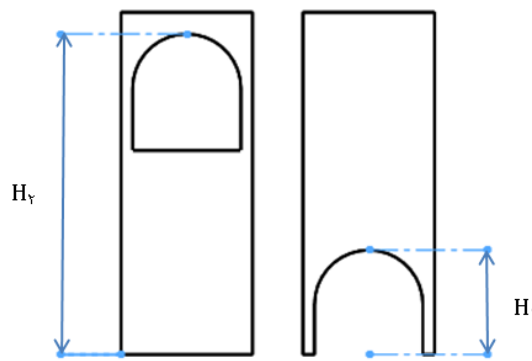
اسلاگ	اسلاگ	اسلاگ کوچک	گذر از حبابی به اسلاگ	حبابی	حبابی
$U_{sg} = 0.214 \frac{m}{s}$	$U_{sg} = 0.142 \frac{m}{s}$	$U_{sg} = 0.122 \frac{m}{s}$	$U_{sg} = 0.117 \frac{m}{s}$	$U_{sg} = 0.071 \frac{m}{s}$	$U_{sg} = 0.041 \frac{m}{s}$
$U_{sl} = 0.523 \frac{m}{s}$	$U_{sl} = 0.523 \frac{m}{s}$	$U_{sl} = 0.523 \frac{m}{s}$	$U_{sl} = 0.523 \frac{m}{s}$	$U_{sl} = 0.523 \frac{m}{s}$	$U_{sl} = 0.523 \frac{m}{s}$

شکل ۱۰ نحوه تغییر جریان از حبابی به اسلاگ



فریم تصویر ۵۵۶      فریم تصویر ۵۰۱

شکل ۱۲ موقعیت حباب تیلور در دو فریم تصویر



شکل ۱۱ موقعیت حباب تیلور در تصویر

تیلور برابر  $\frac{m}{s} 0.00054$  است که بیانگر بالا بودن دقت در روش مورد استفاده است.

برای درک بهتر تاثیر سرعت فازها بر سرعت حباب تیلور در ۵ سرعت مختلف فاز مایع با ثابت نگه داشتن دبی آب و افزایش گام به گام سرعت فاز گازی سرعت میانگین حباب تیلور برای ۳۹ حالت مختلف ارزیابی شد که روند تغییرات آن در شکل ۱۳ نشان داده شده است.

جدول ۲ سرعت و عدم قطعیت میانگین حباب تیلور

ردیف	سرعت ظاهری آب (m/s)	سرعت ظاهری هوا (m/s)	سرعت میانگین حباب تیلور (m/s)	عدم قطعیت میانگین (m/s)
۱	0.382158	0.99237631	0.977	0.0017
۲	0.509544	0.99237631	1/146	0.0040
۳	0.509544	0.156908472	1/201	0.0019
۴	0.63693	0.156908472	1/385	0.0022
۵	0.792624	0.156908472	1/553	0.0039
۶	0.63693	0.22435411	1/495	0.0036
۷	0.792624	0.22435411	1/579	0.0054

برای بررسی دقت نتایج عدم قطعیت مربوط به اندازه‌گیری سرعت حباب تیلور بررسی می‌شود. سرعت متوسط حباب تیلور تابعی از مکان و زمان است، لذا مطابق رابطه (۳) می‌توان عدم قطعیت را برای اندازه‌گیری سرعت حباب تیلور بدست آورد.

$$U_T^2 = \left(\frac{\partial u_T}{\partial H}\right)^2 U_H^2 + \left(\frac{\partial u_T}{\partial t}\right)^2 U_t^2 \quad (3)$$

که در آن  $U_H$  و  $U_t$  به ترتیب عدم قطعیت مربوط به اندازه‌گیری طول و زمان هستند. همچنین  $\frac{\partial u_T}{\partial H} = \frac{1}{\Delta t}$  و  $\frac{\partial u_T}{\partial t} = \frac{-H}{\Delta t^2}$  است. عدم قطعیت در اندازه‌گیری زمان برابر با نصف زمان شاتر دوربین است و عدم قطعیت در اندازه‌گیری طول برابر با طول یک پیکسل از تصویر است. دوربین استفاده شده در این پژوهش دارای سرعت شاتر 0.00078125 ثانیه است بنابراین عدم قطعیت زمان برابر 0.00039672 ثانیه است و عدم قطعیت اندازه‌گیری مکان برابر ۱ میلی‌متر است. جدول ۲ سرعت میانگین حباب تیلور و عدم قطعیت در اندازه‌گیری سرعت میانگین را برای چند حالت مختلف از سرعت‌های ظاهری آب و هوا نشان می‌دهد. بیشترین مقدار عدم قطعیت میانگین برای محاسبه سرعت میانگین حباب



سرعت‌های مختلف هر فاز به راحتی ایجاد کرد. در این پژوهش اثر تغییر سرعت فازها بر الگوی جریان مورد ارزیابی قرار گرفت و مشاهده شد که افزایش سرعت فاز گازی با ثابت نگه داشتن سرعت فاز مایع باعث افزایش تعداد حباب‌های هوا و در نهایت تغییر الگو جریان از حبابی به اسلاگ می‌شود. برای ۷ حالت جریان مختلف سرعت حباب تیلور با استفاده از روش پردازش تصویر به دست آمده و بیشینه عدم قطعیت در اندازه‌گیری برابر  $0.0005 \frac{m}{s}$  است که نشان از دقت بالای این روش دارد. نحوه تغییرات سرعت متوسط حباب تیلور با افزایش سرعت هر یک از فاز نشان داده شده است و همچنین با برازش خطی داده‌ها رابطه‌ای بین تغییرات سرعت متوسط حباب تیلور با مجموع سرعت فازها به دست آمد که با رابطه لیکلین مقایسه شد. رابطه به دست آمده در این پژوهش مشابه رابطه لیکلین است و تفاوت دو رابطه در مقدار عدد ثابت است.

#### فهرست علائم

H	ارتفاع (m)
Re	عدد رینولدز
t	زمان (s)
$U_s$	سرعت ظاهری ( $ms^{-1}$ )

#### زیرنویس

g	فاز گازی
l	فاز مایع
T	مربوط به حباب تیلور

**تشکر و قدردانی:** نویسندگان این مورد را بیان نکردند.

**تاییدیه اخلاقی:** نویسندگان مقاله اعلام می‌دارند که تمام موارد اخلاقی نشر در مورد مقاله رعایت شده است.

**تعارض منافع:** نویسندگان مقاله اعلام می‌دارند که هیچ‌گونه تعارض منافی بین عوامل دخیل در این پژوهش وجود ندارد.

**سهم نویسندگان:** نویسندگان این مورد را بیان نکردند.

**منابع مالی:** تمامی هزینه‌ها توسط اساتید راهنما تامین شده است.

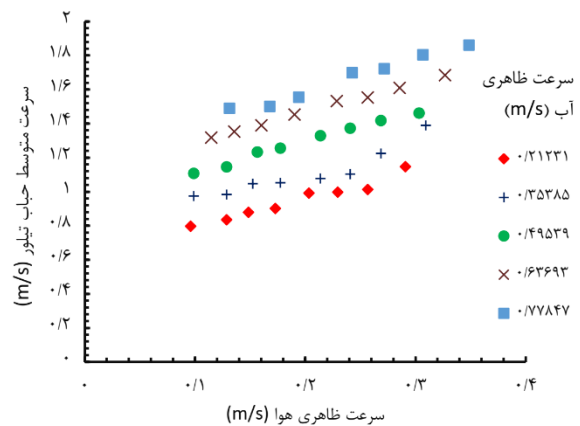
#### منابع

- 1- Taitel Y, Bornea D, Dukler AE. Modelling flow pattern transitions for steady upward gas-liquid flow in vertical tubes. *AIChE Journal*. 1980;26(3):345-54.
- 2- Hanafizadeh P, Ghanbarzadeh S, Saidi MH. Visual technique for detection of gas-liquid two-phase flow regime in the airlift pump. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2011;75(3-4):327-35.
- 3- Yang Y, Wang D, Niu P, Liu M, Zhang C. Measurement of vertical gas-liquid two-phase flow by electromagnetic flowmeter and image processing based on the phase-isolation. *Experimental Thermal and Fluid Science*. 2019;101:87-100.
- 4- Ansari MR, Azadi R. Effect of diameter and axial location on upward gas-liquid two-phase flow

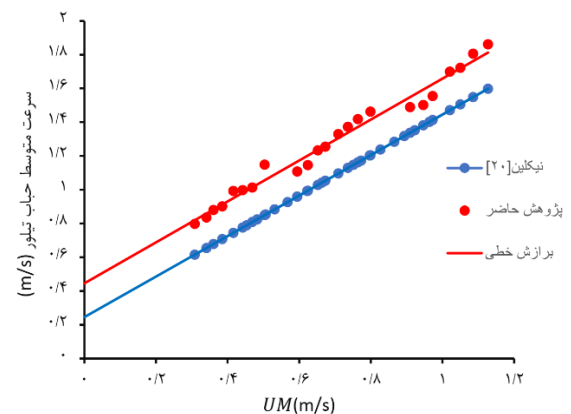
نتایج حاصل از این پژوهش در شکل ۱۴ با نتایج حاصل از رابطه لیکلین [20] که در مقدمه به آن اشاره شده است، مقایسه شده است. علت تفاوت در نتایج را می‌توان تاثیر اندک قطر لوله در رابطه لیکلین، تفاوت در هندسه‌های ورودی هر فاز و محل اندازه‌گیری سرعت در طول لوله بیان کرد و همچنین مقایسه نتایج به دست آمده تجربی کار حاضر با نتایج نظری لیکلین می‌تواند علت اصلی اختلاف نتایج باشد. با برازش خطی داده‌ها می‌توان رابطه خطی بین سرعت حباب تیلور با مجموع سرعت فازها به دست آورد. رابطه خطی به دست آمده مشابه رابطه لیکلین است با این تفاوت که ضریب ثابت به دست آمده از نتایج تقریباً دو برابر ضریب ثابت در رابطه لیکلین است.

#### ۴- نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

جهت انجام پژوهش حاضر سیستم آزمایشگاهی جریان دوفازی همسوی رو به بالا در آزمایشگاه جریان‌های چند فازی دانشگاه تربیت مدرس توسط تیم تحقیقاتی جریان‌های چندفازی طراحی و ساخته شده است. این سیستم با بهره‌گیری از پخش‌کننده هوا با طراحی مخصوص قادر به تولید حباب‌هایی هم اندازه و با تعداد متغیر است. همچنین این پخش‌کننده کمک می‌کند تا بتوان الگوهای جریان به خصوص الگوی حبابی و اسلاگ را در



شکل ۱۳) تغییرات سرعت حباب تیلور با افزایش سرعت فازها



شکل ۱۴) مقایسه تغییرات سرعت متوسط حباب تیلور بر حسب جمع سرعت ظاهری فازها



applied to the petroleum industry. *Measurement Science and Technology*. 2012 ;23(5):055304.

19- Jia J, Babatunde A, Wang M. Void fraction measurement of gas-liquid two-phase flow from differential pressure. *Flow Measurement and Instrumentation*. 2015 ;41:75-80.

20- Nicklin DJ. Two-phase flow in vertical tubes, *Trans. Inst. Chem. Engr.*. 1962;40(1):61-8.

patterns in intermediate-scale vertical tubes. *Annals of Nuclear Energy*. 2016 ;94:530-40.

5- Ohnuki A, Akimoto H. Experimental study on transition of flow pattern and phase distribution in upward air-water two-phase flow along a large vertical pipe. *International journal of multiphase flow*. 2000 ;26(3):367-86.

6- Schütz H, Pietruske P, Manera A, Carl H, Beyer M, Prasser HM. Experiments on upwards gas/liquid flow in vertical pipes. 2007.

7- Funahashi H, Kirkland KV, Hayashi K, Hosokawa S, Tomiyama A. Interfacial and wall friction factors of swirling annular flow in a vertical pipe. *Nuclear Engineering and Design*. 2018 ;330:97-105.

8- Mills C, Schlegel JP. Comparison of data processing algorithm performance for optical and conductivity void probes. *Experimental and Computational Multiphase Flow*. 2020;2(3):174-85.

9- Gui M, Liu Z, Liao B, Wang T, Wang Y, Sui Z, Bi Q, Wang J. Void fraction measurements of steam-water two-phase flow in vertical rod bundle: Comparison among different techniques. *Experimental Thermal and Fluid Science*. 2019 ;109:109881.

10- Kumar SB, Moslemian D, Duduković MP. A  $\gamma$ -ray tomographic scanner for imaging voidage distribution in two-phase flow systems. *Flow Measurement and Instrumentation*. 1995 ;6(1):61-73.

11- Da Silva MJ, Thiele S, Abdulkareem L, Azzopardi BJ, Hampel U. High-resolution gas-oil two-phase flow visualization with a capacitance wire-mesh sensor. *Flow Measurement and Instrumentation*. 2010 ;21(3):191-7.

12- Sardeshpande MV, Harinarayan S, Ranade VV. Void fraction measurement using electrical capacitance tomography and high speed photography. *Chemical Engineering Research and Design*. 2015 ;94:1-1.

13- Azzopardi BJ, Abdulkareem LA, Zhao D, Thiele S, Da Silva MJ, Beyer M, Hunt A. Comparison between electrical capacitance tomography and wire mesh sensor output for air/silicone oil flow in a vertical pipe. *Industrial & engineering chemistry research*. 2010 ;49(18):8805-11.

14- Yang C, Wang H, Cui Z. Application of electrical resistance tomography in bubble columns for volume fraction measurement. In 2012 IEEE international instrumentation and measurement technology conference proceedings 2012 (pp. 1199-1203). IEEE.

15- Faraj Y, Wang M. ERT investigation on horizontal and vertical counter-gravity slurry flow in pipelines. *Procedia Engineering*. 2012 ;42:588-606.

16- Dang Z, Zhao Y, Wang G, Ju P, Zhu Q, Yang X, Bean R, Ishii M. Investigation of the effect of the electrode distance on the impedance void meter performance in the two-phase flow measurement. *Experimental Thermal and Fluid Science*. 2019 ;101:283-95.

17- Schlegel JP, Sawant P, Paranjape S, Ozar B, Hibiki T, Ishii M. Void fraction and flow regime in adiabatic upward two-phase flow in large diameter vertical pipes. *Nuclear Engineering and Design*. 2009 ;239(12):2864-74.

18- Rosa ES, Flora BF, Souza MA. Design and performance prediction of an impedance void meter