



## Experimental Analysis of Micro- Nano Bubble Formation inside Venturi Tube with High Speed Photography and Image Processing

### ARTICLE INFO

#### Article Type

Original Research

#### Authors

Ghannadi M.<sup>1</sup> PhD,  
Saghravani S.F.\*<sup>1</sup> PhD,  
Niazmand H.<sup>2</sup> PhD

#### How to cite this article

Ghannadi M, Saghravani S.F, Niazmand H. Experimental Analysis of Micro- Nano Bubble Formation inside Venturi Tube with High Speed Photography and Image Processing. Modares Mechanical Engineering. 2019;19(12):3039-3049.

<sup>1</sup>Civil Engineering Department, Shahrood University, Shahrood, Iran  
<sup>2</sup>Mechanical Engineering Department, Ferdowsi University, Mashhad, Iran

#### \*Correspondence

Address: Civil Engineering Department, Shahrood University, Shahrood, Iran  
Phone: -  
Fax: -  
saghravani@shahroodut.ac.ir

#### Article History

Received: December 2, 2018  
Accepted: May 26, 2019  
ePublished: December 21, 2019

### ABSTRACT

In this research, micro-nano bubbles formation inside the venturi tube has been investigated using image processing technique and high-speed photography. For the purpose, two models of venturi tubes with different dimensions were made of light and transparent plexiglass and then they were tested with various water flow discharges. After the injection of air into the venturi tube, a high-speed camera has been used to capture images of two-phase flows passing through the venturi tube. The captured images were processed by MATLAB software. After investigating the results and obtaining the average diameter of the bubbles, the number of Micro-Nano bubbles and the velocity in the center of venturi tube have been calculated and the related graphs have been analyzed. The results show that reducing bottleneck length and increasing flow discharge inside the venturi tube lead to the formation of smaller bubbles and the number of Micro-Nano bubble increases.

**Keywords** Micro-Nano Bubbles; Matlab; Venturi Tube; Image Processing; High Speed Photography

### CITATION LINKS

[1] Stability of nanobubbles by quantum ... [2] Evaporation dynamics of ... [3] Washing effect of ... [4] Reduction of turbulent skin friction by ... [5] Focused ultrasound propagation in water containing many therapeutical ... [6] Bubble generation for aeration and other ... [7] Microbubble ... [8] Impact of groundwater salinity on bioremediation enhanced by ... [9] Atkins physical ... [10] Evidence of the existence and the stability of nano-bubbles in ... [11] Water treatment by induced air flotation using ... [12] Bubbles, drops and ... [13] Principle and applications of microbubble and nanobubble ... [14] Zeta potential of microbubbles in aqueous solutions: electrical properties ... [15] Micro- and Nano bubbles: fundamentals and ... [16] Base and technological application of micro-bubble ... [17] Free-radical generation from collapsing microbubbles ... [18] Entrapped air in ... [19] Annular two-phase ... [20] A study of two-phase flow in inclined ... [21] Two-phase flow in complex ... [22] Bubble formation at a single orifice in highly ... [23] Size of bubbles generated from porous ... [24] Permeation of liquid through porous glass membrane ... [25] Gas-inducing impeller design and ... [26] A theoretical model for bubble formation at a frit surface in ... [27] Bubbles size distribution formed by depressurizing ... [28] Effect of pressure on bubble size in dissolved air ... [29] Experimental study on the new micro-bubble generator ... [30] Generation of micro gas bubbles of uniform diameter in an ... [31] Generation of submicron bubbles using venturi ... [32] Water treatment technology and facility in ... [33] Injection performance and influencing factors in self-priming ... [34] Numerical simulation of venturi ejector reactor in yellow phosphorus ... [35] Study on flow in Venturi-mixer EGR for a turbo charged diesel ... [36] An approach to evaluate Venturi-device effects on gas wells ... [37] Digital image ... [38] Robust analysis of cavitating flows in the Venturi ... [39] Investigation of air-water two phase flow through a ... [40] Modelling the performance of venturi ... [41] Development of a pressure drop model for a variable throat venturi ... [42] CFD modeling of droplet dispersion in a Venturi ... [43] Simulating the effects of structural parameters on the hydraulic ... [44] Numerical cavitation model for simulation of mass flow stabilization ... [45] Numerical simulation of asymmetric flow in Venturi ... [46] The numerical simulation of the influence of ... [47] Geometry and head loss in Venturi injectors through computational fluid ... [48] Analysis on the effect of venturi tube structural parameters on fluid ... [49] Application of image processing techniques in ... [50] Fluctuating characteristics of two-phase air-water slug ... [51] Image processing techniques for high-speed ... [52] Develop a high speed photography technique ... [53] A visualized study of the motion of individual bubbles in ...

## تحلیل آزمایشگاهی شکل‌گیری میکرو- نانو حباب در لوله ونتوری به کمک عکس‌برداری پرسرعت و پردازش تصویر

مهین قنادی PhD

گروه مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

سیدفضل‌اله ساغروانی\* PhD

گروه مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

حمید نیازمند PhD

گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

### چکیده

در این تحقیق با استفاده از عکس‌برداری پرسرعت و تکنیک پردازش تصویر تشکیل میکرو- نانو حباب در لوله ونتوری مورد بررسی قرار گرفته است. برای این منظور دو نمونه لوله ونتوری با ابعاد مختلف از جنس پلکسی‌گلس که سبک و شفاف است ساخته شده و با دبی‌های مختلفی از جریان آب مورد آزمایش قرار گرفته‌اند. پس از تزریق هوا به داخل لوله ونتوری، با استفاده از دوربین با سرعت بالا از جریان دو فاز عبوری از داخل لوله ونتوری عکس‌برداری شده است. عکس‌های تهیه شده توسط نرم‌افزار متلب مورد پردازش قرار گرفته است. پس از بررسی نتایج و به دست آوردن قطر متوسط حباب‌ها، تعداد میکرو- نانو حباب‌ها و سرعت در مرکز لوله ونتوری به دست آمده و نمودارهای مربوطه مورد تحلیل قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که کاهش طول بخش گلوگاه باعث ریزش حباب‌ها می‌شود و با افزایش دبی جریان در لوله ونتوری نیز حباب‌ها ریزش می‌شوند و میکرو- نانو حباب‌های بیشتری تشکیل می‌شود.

**کلیدواژه‌ها:** میکرو- نانو حباب، متلب، لوله ونتوری، پردازش تصویر، عکس‌برداری پرسرعت

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۹/۱۱

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۳/۰۵

\* نویسنده مسئول: saghravani@shahroodut.ac.ir

### ۱- مقدمه

فناوری نانو توانایی طراحی ساختارها را با دقت و ظرافت مولکولی اتمی فراهم می‌آورد. این به معنای مهندسی دقیق یک ساختار در حد میلیاردم یا همان نانومتر است. ساختارهایی که با این دقت تهیه می‌شوند، خصوصیات ویژه و منحصر به فردی از خود نشان می‌دهد. انتظار می‌رود تا سال ۲۰۵۰ میلادی این فناوری بتواند چهره زندگی بشر را به طور کلی تغییر دهد. دلیل اهمیت فناوری نانو فقط کوچک بودن ابعاد آن نیست. کوچک بودن ابعاد مواد در محدوده نانو باعث تغییر در ویژگی‌های ذاتی آن‌ها از جمله رنگ، استحکام، واکنش‌پذیری و غیره می‌شود و همین تغییر در ویژگی‌ها است که باعث می‌شود دانشمندان، علاقه‌مند به استفاده فناوری نانو در رشته‌های مختلف، برای بهتر شدن زندگی انسان باشند. در واقع فناوری نانو یک فناوری جدید نیست، بلکه استفاده از تغییر در ویژگی‌های مواد در محدوده ابعادی نانو است و بر تمام فناوری‌هایی که انسان تاکنون به دست آورده است تأثیر می‌گذارد. به دلیل گستردگی بسیار زیاد فناوری نانو و ارتباط نزدیک آن با علوم و فناوری‌های دیگر و به دلیل این که این فناوری یک فناوری بین رشته‌ای است، نمی‌توان آن را متعلق به یک رشته یا زمینه علمی خاص دانست و برای پیشرفت در این فناوری همکاری بین رشته‌های مختلف ضروری است. امروزه حوزه‌های تحقیقاتی مرتبط با نانو گسترش بسیاری یافته است. یکی از این حوزه‌ها، بررسی خواص نانوسیالات است. مفهوم نانوسیال به شکل جدیدی از محیط‌های چند فازی اشاره می‌کند که از طریق معلق‌ساختن ذرات با اندازه نانو در سیال پایه تهیه می‌شوند.

میکرو حباب‌ها و نانوحباب‌ها، حباب‌های بسیار کوچکی هستند. معمولاً حباب‌های در محدوده ۱۰ تا ۱۰۰۰ میکرومتر را میکرو حباب، کمتر از ۱۰ میکرومتر را نانوحباب و بزرگتر از ۱۰۰۰ میکرومتر را ماکرو حباب می‌نامند[1].

در فرآیندهای شیمیایی، بیوشیمی و پتروشیمی و موارد دیگر از حباب‌های گاز پراکنده شده در داخل مایع به وفور استفاده می‌شود، مانند فرآیندهای اکسیداسیون، پلیمریزاسیون، کلرزی، آلکیلاسیون، تخمیر و هیدروژناسیون. اهمیت ویژه حباب‌های هوا در تصفیه فاضلاب می‌باشد[2]. از کاربردهای جالب میکرو حباب‌ها می‌توان به اثر میکرو حباب‌ها در شستشو و از بین چربی‌ها[3] و اثرات کاملاً مکانیکی آن‌ها در کاهش درگ در جریان سیالات اشاره کرد. طوری که به گزارش *مادوان* و همکاران در سال ۱۹۸۴ با استفاده از میکرو حباب‌ها درگ حدود ۸۰٪ کاهش می‌یابد[4]. یکی از کاربردهای کمتر شناخته شده میکرو حباب‌ها در التراسوند درمانی در اعمال جراحی می‌باشد؛ طوری که میکرو حباب‌ها انرژی ارتعاشی التراسونیک را به انرژی حرارتی تبدیل می‌کنند[5]. میکرو حباب‌ها کاربردهای فراوان دیگری نیز دارند ولی با توجه به اینکه روش‌های موجود جهت تولید میکرو حباب‌ها گران قیمت یا ناکارآمد هستند، زیاد مورد توجه قرار نمی‌گیرد، البته اخیراً راه حل‌های امیدوارکننده‌ای برای حل این مساله یافت شده است[6,7].

میکرو حباب‌ها و نانوحباب‌ها هر یک رفتار منحصر به فردی از خود نشان می‌دهند و با توجه به این موضوع کاربردهای متفاوتی در تصفیه آب دارند. میکرو حباب‌ها و نانوحباب‌ها دارای سطح ویژه بالایی هستند و با کاهش قطر حباب، سطح ویژه آن‌ها افزایش می‌یابد[8]. اختلاف فشار داخلی و بیرونی میکرو- نانوحباب‌ها خیلی زیاد است. فشار گاز درون یک حباب بیشتر از فشار بیرون آن است که این ناشی از کشش سطحی می‌باشد. فشار داخلی حباب‌ها از معادله یانگ- لاپلاس محاسبه می‌شود[9]. علت دیگری که باعث ثبات حباب نانو می‌شود به بار الکتریکی سطح حباب مربوط می‌شود که در اندازه‌گیری‌های پتانسیل زتا قابل مشاهده است. مقدار مطلق بالای پتانسیل زتا می‌تواند عدم به هم پیوستن حباب‌ها را از طریق نیروی دافعه یون‌ها روی سطحشان توجیه کند. انقباض گازهای داخل حباب باعث جذب یون‌ها روی سطح حباب می‌شود که باعث تعادل نیروهای دافعه کولن با نیروهای کشش سطحی می‌شود و باعث ثبات حباب‌های نانو می‌شود[10].

سرعت بالا آمدن نهایی میکرو حباب‌ها و نانوحباب‌ها بسیار کند است، پس از تشکیل یک حباب سریعاً به سرعت نهایی خود می‌رسد[11]. برای حباب‌های کوچک کروی اندازه سرعت نهایی با استفاده از قانون استوک قابل محاسبه است[12]. بار سطحی و سرعت بالا آمدن حباب‌ها فاکتورهای اصلی در تشخیص خصوصیات میکرو حباب‌ها و نانوحباب‌ها است[13]. بار سطحی هر میکرو حباب با توجه به سرعت حرکت آن و مقدار پتانسیل زتا تعیین می‌گردد. در حقیقت به علت ایستایی بالای میکرو حباب‌ها مقدار پتانسیل زتای آن‌ها را می‌توان به راحتی اندازه‌گیری کرد. در آب مقطر میکرو حباب‌های هوا، زتا پتانسیل را تا حدود ۳۵ میلی‌ولت افزایش می‌دهند. بنابراین می‌توان گفت که میکرو حباب‌ها در دامنه گسترده‌ای از pH، دارای بار منفی هستند و در واقع قسمتی از ثبات نانوحباب‌ها به بار الکتریکی سطح حباب مربوط است[14]. با کاهش قطر حباب، فشار داخلی حباب افزایش می‌یابد و با افزایش فشار داخلی، انحلال‌پذیری نانوحباب‌ها در آب افزایش می‌یابد. بنابراین از آنجایی که با افزایش فشار داخلی انحلال گاز در مایع افزایش می‌یابد، نرخ کوچک شدن میکرو حباب‌ها نسبت به ماکرو حباب‌ها بیشتر است[15]. اندازه میکرو حباب‌ها به

محققین رویکردهای مختلفی را در پیش گرفته‌اند که از آن جمله می‌توان به انجام آزمایش بر مدل‌های فیزیکی ساده که بتوان از آن‌ها در تحلیل مسائل علمی و مهندسی استفاده کرده و به معادلات ساده‌تری دست یافت، اشاره کرد [20].

در حالت کلی با طبقه‌بندی انواع حالات توزیع فصل مشترک بین دو فاز گاز و مایع که اصطلاحاً رژیم یا الگوی جریان نامیده می‌شوند، می‌توان به توضیح و تفسیر این نوع جریان‌ها پرداخت. باید توجه داشت که این رژیم‌های جریان معمولاً به وسیله موقعیت و شکل هندسی خط لوله و جهت جریان و خواص فیزیکی و شدت جریان هر یک از فازها و شار حرارتی وارد بر دیواره لوله تحت تأثیر قرار می‌گیرند. شایان ذکر است که علی‌رغم کوشش‌های بسیار زیادی که برای طبقه‌بندی انواع رژیم‌های جریان دوفازی به عمل آمده است، ولی اغلب این روش‌ها کیفی و منطبق بر نقطه نظرات شخصی محققین هستند. به طوری که تاکنون رژیم‌های جریان مختلفی تعریف گردیده و دامنه گسترده‌ای از اسامی برای این منظور مورد استفاده قرار گرفته است. ۷ نوع الگوی توزیع برای جریان‌های دوفازی در خطوط لوله افقی وجود دارد: جریان حبابی، جریان تویی یا قالبی، جریان لایه‌ای، جریان موجی، جریان لخته‌ای، جریان حلقوی، جریان قطره‌ای [21].

برای تولید میکروحباب‌ها به طور معمول از نازل یا روزنه استفاده می‌شود [22]. حباب‌های ریز معمولاً به وسیله واسطه‌های خلل و فرج دار [23]، نازل‌های جریان ثابت [22]، غشا [24]، پخش‌کننده گاز که با میکس‌کننده‌ها ترکیب شده‌اند [25، 26] تولید می‌شوند. اما تولید میکروحباب‌ها با این روش‌ها به علت جلوگیری از بهم‌آمیختگی حباب‌ها سخت است [27]. به همین علت میکروحباب‌ها اغلب به وسیله روش‌های مختلفی تولید می‌شوند که می‌توان آن‌ها را برحسب نوع مکانیزمشان به ۳ دسته نوع فشاری، نوع کاویتاسیونی و نوع جریان چرخشی تقسیم کرد.

سیستم تولید میکروحباب نوع فشاری، بر پایه قانون هنری استوار است. بر اساس این قانون در فشار بالا گاز بیشتری می‌تواند داخل مایع حل شود. در مولد نوع فشاری، مایع در فشار بالا با گاز اشباع شده و سپس از طریق یک کانال نازل در محیط معمولی با فشار اتمسفر تزریق می‌شود. در فرآیند سقوط ناگهانی فشار، میکروحباب‌ها تشکیل می‌شوند. این نوع روش تولید میکروحباب در سیستم‌های تصفیه آب و فاضلاب به کار می‌رود. سیستم شناورسازی هوای محلول (DAF) از این نوع می‌باشد که در آن هوا در فشار ۰/۴ تا ۰/۵ مگاپاسکال در آب حل شده و سپس از طریق نازل‌های کاهش فشار به یک مخزن آزاد می‌شود. اندازه حباب‌های تولید شده با استفاده از سیستم نوع فشاری بین ۱۰ تا ۱۰۰ میکرومتر می‌باشد [28]. علاوه بر این میانگین اندازه حباب‌ها با افزایش فشار اشباع کاهش پیدا می‌کند اما افزایش فشار در بالاتر از ۰/۵ مگاپاسکال تأثیر خیلی کمی بر اندازه حباب‌ها دارد [29]. در نوع کاویتاسیونی، زمانی که فشار محیطی در یک نقطه از سیال به زیر فشار بخار می‌رسد، سیال در دمای محیط دچار یک تغییر فاز می‌شود که منجر به تولید فضاهای خالی می‌شود که به آن حباب‌های کاویتاسیون گفته می‌شود. کاویتاسیون در پمپ‌ها، پروانه‌ها و موتورهای رخ می‌دهد که معمولاً در اکثر این موارد فرآیندی نامطلوب و زیان‌آور است. با این حال محققان برای تولید میکروحباب از این پدیده استفاده می‌کنند؛ لوله ونتوری یک مثال از همین مورد می‌باشد [30]. لوله ونتوری دارای یک شکل مخروطی می‌باشد. اگر یک پمپ، سیال را به داخل لوله ونتوری منتقل کند، در بخش فشرده لوله ونتوری افزایش سرعت رخ می‌دهد و هم‌زمان فشار کاهش پیدا

علت انحلال گازهای درونی در آب و ایستایی بالا به تدریج کاهش می‌یابد. در اثر انحلال و متلاشی شدن میکروحباب‌ها، نانو حباب‌ها به وجود می‌آیند و در طی این فرآیند رادیکال‌های آزاد تولید می‌گردند که به علت واکنش‌پذیری بالا به عنوان ضد باکتری و ضد بو مورد استفاده قرار می‌گیرند [16].

یک حباب معمولی (ماکرو حباب) مسیری به سمت بالا را با سرعت زیاد طی می‌کند و پس از رسیدن به سطح متلاشی می‌شود. یک نانو حباب می‌تواند درون آب در جهت‌های مختلفی حرکت کند و برای مدت زمان طولانی (مثلاً چند ماه) پایدار بماند و به تدریج کوچک شده و محو می‌گردد. میکروحباب‌ها بیشتر جهت تخریب آلاینده‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد چرا که زمانی که میکروحباب در میانه راه متلاشی می‌شود، منجر به تولید رادیکال‌های OH<sup>•</sup> [17] و موج شوک در آن ناحیه می‌گردد. ترکیدن میکروحباب می‌تواند منجر به متلاشی شدن آلاینده‌های آلی محلول در آب مثل آفت‌کش‌ها شود. همچنین ترکیدن میکروحباب می‌تواند به میکروزدایی آب کمک کرده و نسبت به روش‌های مرسوم مثل کلرزنی آب، کم‌هزینه‌تر بوده و اثرات جانبی ناچیزی دارد. گاز میکروحباب در بیشتر موارد، هوا یا نیتروژن می‌باشد. اما استفاده از گاز ازن نیز جهت تولید میکروحباب، تأثیرات قابل توجهی در رفع آلودگی آب دارد. نانو حباب‌ها برخلاف میکروحباب‌ها قدرت تخریبی بالایی ندارند اما ماندگاری بالایی داشته و می‌توانند در همه جهت‌ها حرکت کنند. این ویژگی نانو حباب‌ها این امکان را می‌دهد که برای حمل و جابه‌جایی ذرات معلق و آلاینده‌های موجود در آب بسیار مناسب باشند. نانو حباب‌ها نسبت سطح به حجم بسیار بیشتری در مقایسه با حباب‌های معمولی دارند در نتیجه ذرات معلق بیشتری با خود حمل می‌کنند. نانو حباب‌ها می‌توانند در جهت پاکسازی و رفع آلودگی‌های تاسیسات زیر آب مؤثر واقع شوند. نانو حباب‌ها می‌توانند در جهت‌های مختلف حرکت کنند و به منافذ ریز نیز ورود پیدا کنند. با این ویژگی، می‌توانند آلودگی‌های متصل به سطوح و درزها در زیر سطح آب را جدا کرده و با خود حمل کنند. این رسوبات و آلودگی‌ها که محل مناسبی برای رشد عوامل بیماری‌زا می‌باشد، به صورت ویژه می‌توان نانو حباب‌ها را جهت رفع رسوبات از روی منافذ غشاهای فیبری یا غشاهای نانوفیلتراسیون مورد استفاده قرار داد. این فناوری به صورت چشمگیری منجر به افزایش طول عمر و کارکرد غشا می‌شود.

وقتی دو سیال متفاوت (مانند آب و هوا) با ویژگی‌های فیزیکی مختلف به صورت هم‌زمان در یک مجرا داشته باشند، جریان دوفازی شکل می‌گیرد. اندرکنش بین دوفاز سبب می‌شود که الگوهای مختلفی از جریان به صورت تصادفی رخ دهد [18]. الگوی جریان چگونگی توزیع هر فاز جریان در برابر فاز دیگر، در مجرای حرکت سیال است. مهم‌ترین علامت مشخصه جریان‌های دوفازی وجود فصل مشترک بین فازهای گاز و مایع است که اشکال مختلفی دارد. از دیدگاه نظری، امکان پیدایش دامنه نامحدودی از فصول مشترک مختلف بین دو فاز وجود دارد، اما عموماً تأثیر کشش سطحی بین دو فاز منجر به پیدایش فصل مشترک‌های منحنی شکل می‌شود و در پایان تمامی آن‌ها تبدیل به اشکال کروی (نظیر قطره‌ها و حباب‌ها) می‌شوند [19].

هرچند جریان‌های دوفازی نیز از کلیه قوانین حاکم بر مکانیک سیالات تبعیت می‌کنند، اما از آنجا که عوامل زیادی سبب نامعینی و پیچیدگی این نوع جریان‌ها در مقایسه با جریان‌های تک‌فازی می‌شوند، سیستم‌های جریان دوفازی به شدت پیچیده‌اند (حتی جریان دوفازی یک‌بعدی در مجاری). برای غلبه بر این پیچیدگی‌ها،

آنهایی که شامل نمایش ماتریسی هستند، در زمان کمتری نسبت به زبانی مانند C یا فترن قابل انجام است. این نرم افزار دارای خانواده‌ای از راه حل‌های کاربردی به نام جعبه ابزار می‌باشد. هر جعبه ابزار مجموعه‌ای از توابعی به نام *file-M* یا *M-function* است که قابلیت متلب را برای حل یک مسأله بخصوص گسترش می‌دهد. یکی از جعبه ابزارهای بسیار کاربردی متلب، جعبه ابزار پردازش تصویر (IPT) نام دارد. این جعبه ابزار و گویایی زبان متلب باعث شده است تا عملیات پردازش تصویر به صورت فشرده و واضح میسر گردد و از این رو متلب را در رده نخست نرم افزارهای پردازش تصویر قرار داده است. با توجه به قابلیت‌های مناسب نرم افزار متلب، از این نرم افزار به منظور انجام عملیات پردازش تصویر استفاده شده است.

## ۲- مروری بر مطالعات پیشین

به تازگی بسیاری از محققان به طور تئوری و تجربی درباره تأثیر پارامترهای ساختاری لوله و نتوری بر فشار و سرعت در داخل لوله مطالعه نموده‌اند. رودیو و کانگو مجموعه‌ای از پارامترهای بهینه شده با استفاده از مدل کاویتاسیون را برای لوله و نتوری پیشنهاد کرده‌اند [38]. گویتا و همکاران آزمایش جریان دوفازی هوا و آب را در یک کانال و نتوری را انجام دادند و دریافتند که با افزایش فضای خالی، ضریب جریان دوفازی افزایش می‌یابد [39]. با استفاده از روش تجربی و نظری، پارامترهای اسکرابر و نتوری از جمله افت فشار درون گلو، انتشار قطره و ضریب جذب گرد و غبار مورد بررسی قرار گرفتند. از میان این پارامترها، افت فشار تابعی از نسبت گاز- مایع، سرعت گاز در گلوگاه و مساحت گلوگاه می‌باشد [40-42]. ژو و همکاران با استفاده از یک روش عددی پیشنهاد کردند که افزایش زاویه پخش باعث افزایش شار جرمی می‌شود و یک زاویه انتشار مطلوب ۳۰ درجه را به دست آورد [35].

سان و نیو به طور عددی اثرات نسبت انقباض و زاویه پخش را در شار جرمی و درجه خلاء در لوله و نتوری را بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که حداقل فشار در تقاطع بین بخش انقباض و گلو اتفاق می‌افتد [43]. با توجه به اختلاف فشار بین ورودی و خروجی لوله و نتوری، افزایش فشار ورودی باعث کاهش فشار گلو می‌شود. علاوه بر این، با توجه به فشار ورودی، افزایش اختلاف فشار بین ورودی و خروجی لوله و نتوری موجب می‌شود که فشار گلو بیشتر شود. با افزایش اختلاف فشار بین ورودی و خروجی و نسبت انقباض، شار جرمی نیز افزایش می‌یابد [35, 44]. جیانگ و همکاران دریافتند که افزایش میزان انقباض، افت فشار در لوله و نتوری را افزایش می‌دهد. آن‌ها پیشنهاد کردند که نسبت انقباض بین ۰/۲۵ تا ۰/۵۵ با افت فشار ۶۰ تا ۸۳ کیلوپاسکال متغیر است [45, 46]. مانزانو و همکاران در سال ۲۰۱۶ با استفاده از نرم افزار فلوینت پارامترهای هندسی که بیشترین تأثیر را بر افت هد در تزریق کننده‌های و نتوری می‌گذارند، مورد مطالعه قرار دادند و پارامترهای هندسی را برای دستیابی به بهترین عملکرد هیدرولیکی مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که گرد کردن گوشه‌های محل اتصال بخش انقباض به بخش گلوگاه و بخش گلوگاه به بخش انتشار در لوله و نتوری باعث کاهش افت می‌شود و وقوع کاویتاسیون به تعویق می‌افتد. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که طول بخش گلوگاه تأثیر چندانی بر افت هد ندارد ولی قطر بخش گلوگاه و قطر بخش انقباض و بخش انتشار تأثیر زیادی بر افت هد دارند. همچنین آن‌ها دریافتند که قطر بزرگتر و در عین حال زاویه پخش کوچکتر، بهترین عملکرد هیدرولیکی را دارد [47].

می‌کند که این امر منجر به مکش گاز از طریق لوله و نتوری می‌شود. زمانی که فشار در پایین دست دوباره بیشتر می‌شود حباب‌های وارد شده به سیال تجزیه می‌شوند که این مسئله منجر به تولید حباب‌های کوچکتر می‌شود [32]. گاز تشکیل دهنده حباب نیز بر وقوع کاویتاسیون تأثیر دارد. هال در سال ۱۹۷۰ دریافت که کاویتاسیون به طور مستقیم به محتوی هوای نامحلول بستگی دارد. کاویتاسیون را می‌توان از طریق افزودن مواد شیمیایی آلی بهبود بخشید. ثابت شده است که بعضی مواد باعث ایجاد تعداد بیشتر فضاهای خالی کوچکتر می‌شود که این امر به علت تثبیت این فضاهای خالی و پیشگیری از متلاشی شدن و بهم آمیختگی آن‌ها است. مولد نوع جریان چرخشی دارای شکل مخروطی می‌باشد. تولید میکرو حباب با پمپاژ آب از مسیر مماسی به داخل مولد آغاز می‌شود، سیال با یک حرکت چرخشی در راستای دیوار داخلی، جریان پیدا می‌کند که منجر به ایجاد یک گردابه می‌شود. مرکز گردابه دارای سطح فشار پایین می‌باشد، به همین دلیل گاز به داخل آن وارد می‌شود. زمانی که سیال هوا را از مولد با سرعت چرخشی بسیار بالا خارج می‌کند، هوا تبدیل به حباب‌های میکرو می‌شود [7].

یک لوله و نتوری از سه قسمت اصلی شامل بخش انقباض، بخش گلوگاه و بخش انتشار تشکیل می‌شود. وقتی جریان از قسمت گلوگاه عبور می‌کند سطح مقطع کاهش یافته و سرعت جریان را همراه با یک افت فشار افزایش می‌دهد. این پدیده به عنوان یک اثر و نتوری شناخته می‌شود که باعث ایجاد خلاء می‌شود و پدیده کاویتاسیون اتفاق می‌افتد. در سال‌های اخیر، لوله‌های و نتوری به طور گسترده‌ای در اندازه‌گیری جریان، انتقال گاز طبیعی، سیستم احتراق داخلی موتور و تصفیه پساب صنعتی و حذف گرد و غبار استفاده شده است. به عنوان مثال، در انتقال گاز طبیعی، استفاده از جت لوله و نتوری باعث اختلاط بین گاز تولید شده با فشار کم و گاز طبیعی با فشار بالا می‌شود [33, 34]. در تمیز کردن فاضلاب‌های صنعتی، اسکرابر و نتوری با هدف تخلیه آب توسط یک گاز با سرعت بالا در بخش گلوگاه به منظور حذف گرد و غبار مورد استفاده قرار می‌گیرد [35]. کوپرز و همکاران [36] به طور تئوری در مورد گاز تولید شده توسط لوله و نتوری در چاه گاز مطالعه کرده‌اند. به عبارت بهتر، استفاده از لوله و نتوری در ترکیب و بهبود واکنش شیمیایی بسیار مفید است و به این ترتیب موجب افزایش کارایی می‌شود. بنابراین درک جریان سیال و تغییرات فشار در لوله و نتوری به منظور صرفه جویی در انرژی صنعتی اهمیت زیادی دارد.

یکی از روش‌های نسبتاً جدید که در علم هیدرولیک نیز مورد توجه قرار گرفته است، استفاده از تصاویر دیجیتال و پردازش اطلاعات آن‌ها است. برخلاف چشم انسان که صرفاً قادر به دیدن محدوده مرئی طیف الکترومغناطیسی نور است، ماشین‌های تصویربرداری تقریباً تمامی طیف الکترومغناطیس که از اشعه گاما تا امواج رادیویی گسترده است را تشخیص می‌دهند. بنابراین پردازش تصاویر کاربردهای گسترده و متنوعی را در بر می‌گیرد. یک تصویر را می‌توان به صورت یک تابع دوبعدی  $f(x, y)$  تعریف کرد که  $x, y$  مختصات مکانی و  $f$  شدت تصویر در آن مختصات مکانی خاص می‌باشد. هنگامی که  $f(x, y)$  و  $x, y$  به صورت محدود و ناپیوسته باشند، تصویر را یک تصویر دیجیتالی می‌نامند. با این توصیف هر تصویر دیجیتالی با اندازه  $M \times N$  را می‌توان به صورت ماتریس نمایش داد که آن را ماتریس تصویر می‌نامند. هر درایه این آرایه به عنوان المان تصویر یا پیکسل نامیده می‌شود [37]. نرم افزار متلب یک زبان سطح بالا برای محاسبات فنی است و المان اصلی آن، آرایه می‌باشد. بدین ترتیب در متلب بسیاری از مسائل تکنیکی محاسباتی، مخصوصاً



ونتوری پرداخته‌اند، آن‌ها به این نتیجه رسیدند که همه حباب‌ها به ویژه حباب‌های بزرگتر به محض ورود به بخش انتشار قبل از شکسته شدن تغییر شکل قابل توجهی پیدا می‌کنند و همچنین دریافتند که همه حباب‌ها به ویژه حباب‌های بزرگتر در بخش انتشار شکسته و ریزتر می‌شوند و افزایش دبی جریان فروپاشی حباب‌ها را تشدید می‌کند ولی محل فروپاشی حباب را چندان تغییر نمی‌دهد[53].

در پژوهش حاضر از نوع کابیناسیونی برای تولید میکرو حباب استفاده شده است. از لوله ونتوری برای ایجاد کابیناسیون بهره برده شده است. ملاحظه می‌شود تمامی مطالعات انجام شده برای بررسی حباب‌ها در لوله‌های افقی و عمودی می‌باشد و روی میکرو- نانو حباب‌های ایجاد شده توسط لوله ونتوری تحقیقات چندانی صورت نگرفته است، لذا در این تحقیق سعی می‌شود با استفاده از عکس‌برداری پرسرعت و تکنیک پردازش تصویر، تشکیل میکرو- نانو حباب در لوله ونتوری و سرعت و قطر حباب‌ها مورد بررسی قرار گیرد. در این تحقیق دو لوله ونتوری با ابعاد مختلف ساخته شده و با دبی‌های مختلفی از جریان آب مورد آزمایش قرار گرفته‌اند.

### ۳- مواد و روش‌ها

در این تحقیق دو نمونه لوله ونتوری از جنس پلکسی گلس ساخته شده است. مقطع لوله مستطیلی به عرض  $1/6$  و ارتفاع  $3$  سانتی‌متر می‌باشد. طول لوله  $1/5$  متر می‌باشد. ارتفاع بخش گلوگاه  $0/3$  سانتی‌متر است. جریان آب با سه دبی  $0/16$ ،  $0/29$  و  $0/42$  لیتر بر ثانیه از داخل لوله عبور داده شده است و در کل  $6$  مدل آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفته است.

انتخاب جنس پلکسی گلس به این خاطر بود که هم مقاومت خوبی دارد و هم به خاطر شفافیتی که دارد به راحتی می‌توان از جریان سیال در داخل لوله در محیط آزمایشگاه عکس‌برداری نمود. برای برش فومیزه داخل لوله از دستگاه برش CNC استفاده گردید تا شیب‌ها از دقت کافی برخوردار باشد. در مسیر جریان آب پس از پمپ یک جریان برگشتی در نظر گرفته شده است که با تنظیم شیر آن میزان آب ورودی به سیستم کنترل می‌شود. پس از یکنواخت شدن جریان آب در داخل سیستم، هوا به داخل سیستم تزریق شد و از رفتار جریان و حباب‌های ایجاد شده تصویربرداری گردید. برای شناسایی بهتر حباب‌ها از آب رنگی استفاده شده است. شکل شماتیک دستگاه و ابعاد نمونه‌های آزمایشگاهی ساخته شده جهت تصویربرداری در شکل ۱ نشان داده شده است.

به منظور محاسبه مساحت فازهای گاز و مایع و نواحی اختلاط، شرایط آزمایشگاهی مانند نورپردازی، فاصله دوربین از مدل و سایر پارامترها به نحوی تنظیم شدند تا حباب‌ها و حرکت آن‌ها به خوبی شناسایی شوند. در این مطالعه از دوربین پرسرعت dimax s1 کارخانه سازنده PCO ساخت کشور آلمان با حداکثر سرعت  $4500$  فریم بر ثانیه استفاده شده و در فاصله حدوداً یک متری از مدل قرار گرفته است. تمرکز بر نمونه به گونه‌ای انتخاب شد تا تصاویر وضوح کافی برای تفکیک فازها از هم را داشته باشند. نورپردازی توسط دو پرژکتور صورت گرفت. برای تفکیک پذیری بهتر فازها از هم، نور در پشت مدل به صفحه‌ای سفید تابانیده شد. برای کم کردن تأثیر سایر منابع روشنایی، آزمایش در اتاق تاریک در آزمایشگاه تحقیقاتی آشکارسازی و ردیابی واقع در آزمایشگاه مرکزی دانشگاه صنعتی شاهرود انجام گرفته است. رزولوشن تصاویر  $1008 \times 1008$  پیکسل می‌باشد. تنظیمات دوربین روی حالت حداکثر  $4500$  فریم بر ثانیه انتخاب گردید تا به علت بالا بودن سرعت جریان در صدم ثانیه رفتار

در سال  $2017$ ، ژانگ با استفاده از نرم‌افزار فلوئنت به بررسی سرعت و فشار در لوله ونتوری پرداخته است. وی با تغییر دادن نسبت انقباض، زاویه پخش و نسبت طول بخش گلوگاه به قطر لوله ونتوری و تغییر مقادیر فشار ورودی و خروجی در لوله ونتوری به بررسی تغییرات سرعت و فشار در داخل لوله ونتوری پرداخته است. وی به این نتیجه رسید که زمانی که نسبت انقباض کمتر از  $0/2$  و زاویه پخش کمتر از  $35$  درجه باشد، سرعت در طول لوله ونتوری توزیع نامتقارن دارد. همچنین وی به این نتیجه رسید که حداقل فشار در محل تقاطع بخش گلوگاه و بخش انقباض در لوله ونتوری اتفاق می‌افتد یعنی دقیقاً در جایی که فشار به شدت تغییر می‌کند. نسبت طول بخش گلوگاه به قطر تأثیر کمی بر سرعت در داخل لوله ونتوری دارد ولی با افزایش نسبت انقباض سرعت در داخل لوله ونتوری به سرعت افزایش می‌یابد[48].

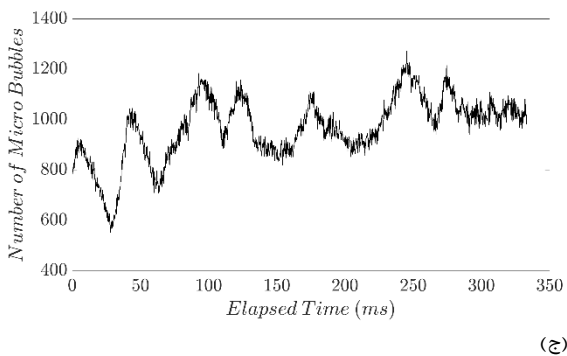
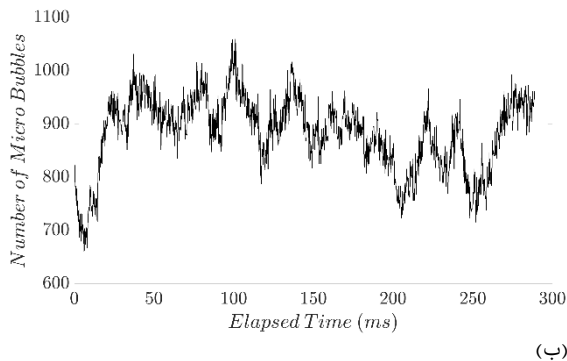
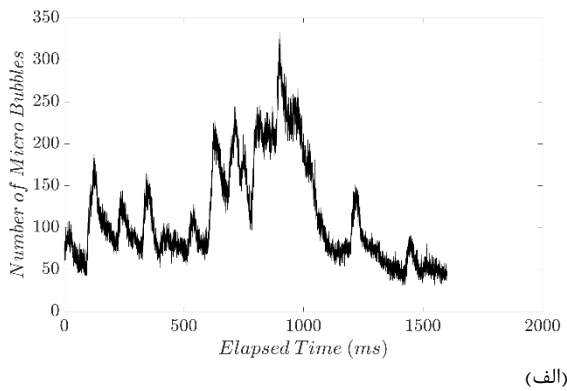
در تحقیقی آزمایشگاهی به شناسایی خودکار حباب در جریان حبابی- اسلاگی در یک لوله قائم کوچک پرداخته شد. این روش بر اساس تکنیک پردازش تصویر است (با اعمال فیلتر برای کاهش نویزها، شناسایی لبه‌ها و آستانه‌گیری). این روش به طور خودکار می‌تواند پارامترهای مربوط به حباب از جمله متوسط قطر و طول حباب را به طور دقیق شناسایی کند. این پارامترها نقش مهمی را در پیش‌بینی دینامیک توزیع فضای خالی و رفتار فضای خالی در جریان دوفازی بازی می‌کند که در صنایع بسیاری از جمله فرآیندهای شیمیایی و راکتورهای هسته‌ای با آن مواجه می‌شوند[49].

در تحقیقی دیگر به مدل‌سازی آزمایشگاهی جریان دوفازی آب و هوا در تونل‌ها و مجاری تحت فشار و بهره‌گیری از تکنیک‌های پردازش تصاویر به منظور تعیین مشخصات ویژه نوسانی جریان دوفازی آب و هوا پرداخته شد. طبق بررسی‌ها، با افزایش دبی آب، طول موج امواج نوسانی و ارتفاع امواج کاهش می‌یابد. ضمناً با افزایش دبی هوا، ارتفاع موج و طول آن کوچکتر می‌شود. به صورت کیفی می‌توان ملاحظه کرد که با افزایش دبی هوا پیروی امواج نوسانی منظم‌تر می‌شود. ضمن اینکه طول موج و پیروی موج کاهش می‌یابد. بررسی انجام شده روی اطلاعات آزمایشگاهی نشان می‌دهد که طول موج در امواج برابر قطر مجرا است[50].

در تحقیقی دیگر با استفاده از تکنیک پردازش تصویر به اندازه‌گیری مشخصات جریان دوفازی در جریان اسلاگ در لوله افقی پرداخته شد. با تکنیک پردازش تصویر به طور خودکار پارامترهای مربوط به حباب از جمله فرکانس، ابعاد و سرعت تخمین زده می‌شود[51]. در تحقیق دیگری از یک ستون حبابی مکعبی در اندازه آزمایشگاهی استفاده شد و با استفاده از روش عکس‌برداری پرسرعت و ارائه روش‌های جدید پردازش تصویر، مهم‌ترین ویژگی‌های هیدرودینامیکی جریان حباب‌ها مانند قطر، سرعت، خطوط جریان فاز گاز و بسامد نوسان توده حباب‌ها اندازه‌گیری شده است. ستون ساخته شده دارای سطح مقطع  $0/20 \times 0/20$  سانتی‌متر و ارتفاع  $120$  سانتی‌متر است. سرعت ظاهری گاز بین  $0/1$  تا  $0/7$  سانتی‌متر بر ثانیه در تغییر است. از  $3$  دوربین گوناگون با سرعت‌های  $20$ ،  $500$  و  $600$  تصویر در ثانیه برای اندازه‌گیری ویژگی‌های حباب‌ها استفاده شد و برای پردازش تصویرها، تحلیل داده‌ها و محاسبه ویژگی‌های حباب از نرم‌افزار متلب استفاده شد. بسامد نوسان توده حباب با روشی نو و با دقت  $95\%$  به دست آمد. اندازه قطر ساتر حباب‌ها، در شرایط همپوشانی حباب‌ها از  $6/5$  تا  $8/5$  میلی‌متر و با دقت  $99/8\%$  محاسبه شده است[52].

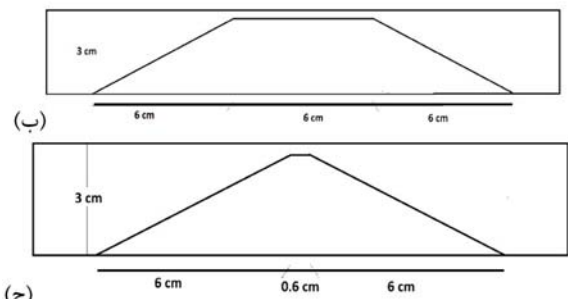
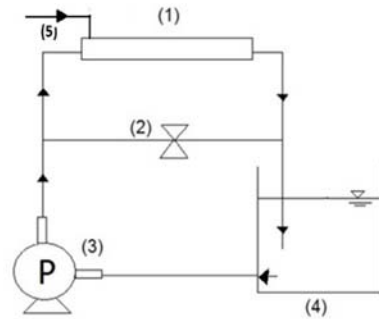
ژائو و همکاران به بررسی حرکت حباب‌های منفرد در داخل لوله

پس از پردازش تمامی عکس‌ها، تعداد میکرو- نانوحباب‌ها در همه فریم‌ها به دست آمده است. نمودار تغییرات تعداد میکرو- نانوحباب‌ها نسبت به زمان برای مدل شماره ۱ و ۲، در سه دبی مورد آزمایش به ترتیب در نمودارهای ۱ و ۲ نشان داده شده است. طبق نتایج ثبت شده در نمودارهای ۱ و ۲، ملاحظه می‌شود که با گذر زمان تعداد میکرو- نانوحباب‌ها کمتر می‌شود یا تقریباً ثابت می‌ماند، به این دلیل است که با گذر زمان میکرو- نانوحباب‌های تشکیل شده حرکت کرده و به جلو رفته‌اند و از محدوده عکاسی خارج شده‌اند. اگر امکان عکاسی از کل لوله فراهم بود می‌توان پایداری میکرو- نانوحباب‌ها را بررسی نمود. جهت مقایسه بهتر، نمودار ماکزیمم تعداد میکرو- نانوحباب‌ها در دبی‌های مختلف برای مدل‌های شماره ۱ و ۲ در نمودار ۳ رسم شده است.



نمودار (۱) تعداد میکرو- نانوحباب‌ها در زمان‌های مختلف در مدل شماره ۱؛ الف:  $Q=0.16\text{lit/s}$ ؛ ب:  $Q=0.29\text{lit/s}$ ؛ ج:  $Q=0.42\text{lit/s}$

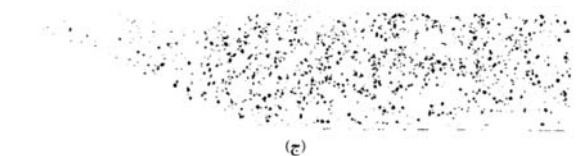
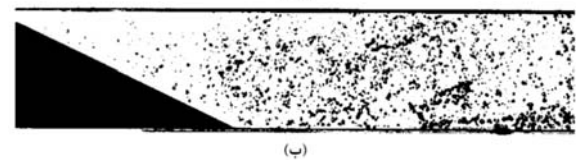
حباب‌ها قابل بررسی باشد. تصاویر تهیه شده با استفاده از نرم‌افزار MATLAB R2016a مورد پردازش قرار گرفته است. با کدنویسی در متلب، حباب‌های بزرگتر از ۱۰۰۰ میکرومتر که مرز بین میکروحباب و ماکروحباب است حذف شده و حباب‌های کوچکتر از ۱۰۰۰ میکرومتر شناسایی و شمارش شدند.



شکل (۱) الف: شماتیک دستگاه (۱- مدل، ۲- شیر bypass، ۳- پمپ آب، ۴- مخزن آب، ۵- تزریق هوا)، ب: نمونه آزمایشگاهی مدل شماره ۱، ج: نمونه آزمایشگاهی مدل شماره ۲

#### ۴- بحث و بررسی نتایج

تمامی عکس‌های گرفته شده با کدنویسی در نرم‌افزار متلب مورد پردازش گرفتند. برای نمونه یکی از عکس‌های اولیه و پردازش شده برای مدل شماره ۲ تحت دبی ۰/۲۹ لیتر بر ثانیه در شکل ۲ آورده شده است.



شکل (۲) الف: تصویر اولیه، ب: تصویر باینری، ج: تصویر پردازش شده در مدل شماره ۲ با دبی ۰/۲۹ لیتر بر ثانیه

با توجه به نمودارهای ۱، ۲ و ۳ ملاحظه می‌شود که در هر دو مدل، با افزایش دبی جریان تعداد میکرو- نانو حباب‌های تشکیل شده نیز افزایش می‌یابد که این نتیجه کاملاً با یافته‌های ژائو و همکاران [53] تطابق دارد. نمودارها نشان می‌دهد که در مدل شماره ۲ تعداد میکرو- نانو حباب‌های تشکیل شده در هر سه دبی مورد آزمایش، بیشتر از مدل شماره ۱ است، یعنی وقتی که طول بخش گلوگاه کوتاه تر شده است میکرو- نانو حباب‌های بیشتری تشکیل شده است. زمانی که دبی جریان کمتر است تعداد میکرو- نانو حباب‌های تشکیل یافته در هر دو مدل تقریباً یکسان است و کوچکتر شدن طول بخش گلوگاه تأثیر چندانی بر شکل‌گیری میکرو- نانو حباب نداشته است.

برای به دست آوردن سرعت از ردیابی حباب در فریم‌های مختلف استفاده شده است. با توجه به ابعاد مدل و رزولوشن دوربین استفاده شده، هر پیکسل ۰/۱۴ سانتی متر می‌باشد. اگر دوربین با سرعت  $m$  فریم بر ثانیه عکس‌برداری کند و حباب فاصله  $\Delta X$  را بعد از  $n$  فریم طی کند، سرعت در نقاط مختلف از رابطه ۱ محاسبه می‌شود:

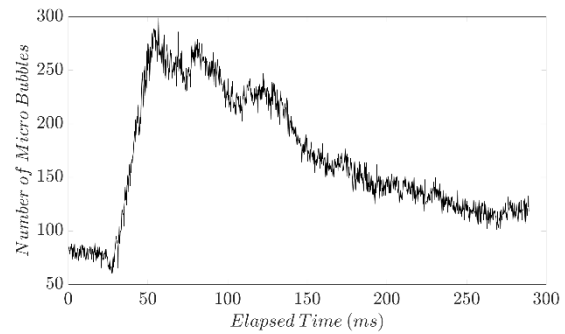
$$V = \frac{\Delta X}{\Delta t} = \frac{\Delta X}{\frac{n}{m}} = \frac{\Delta X \cdot m}{n} = \frac{(X_2 - X_1) \cdot m}{n} \times 0.014 \quad (1)$$

برای نمونه، ردیابی حباب‌ها در فاصله دو گام زمانی یعنی معادل ۰/۴۴ میلی‌ثانیه در دبی ۰/۱۶ لیتر بر ثانیه برای مدل شماره ۲ در شکل ۳ آورده شده است. در شکل ۴، فرآیند خروج حباب از بخش گلوگاه و وارد شدن آن به بخش انتشار و ترکیب و ریزش حباب در فریم‌های متوالی برای مدل شماره ۲ تحت دبی ۰/۱۶ لیتر بر ثانیه نشان داده شده است. با توجه به سرعت دوربین مورد استفاده که ۴۵۰۰ فریم بر ثانیه است، هر فریم با گام زمانی ۰/۲۲۲ میلی‌ثانیه می‌باشد. ملاحظه می‌شود حباب بعد از خروج از گلوگاه که وارد بخش انتشار لوله ونتوری می‌شود، به تدریج که سطح مقطع لوله ونتوری در این قسمت بزرگتر می‌شود و سرعت جریان شروع به کم شدن می‌کند و فشار شروع به افزایش می‌کند، پدیده کاویتاسیون اتفاق افتاده و حباب بزرگ شکسته شده و تبدیل به حباب‌های ریزتر می‌شود.

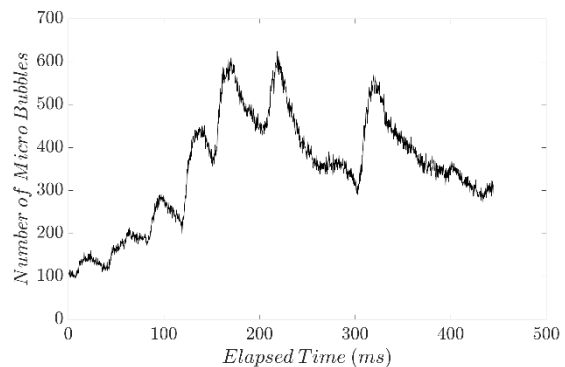
با توجه به شکل ۴ ملاحظه می‌شود که به محض ورود حباب به بخش انتشار حباب سریعاً تغییر شکل می‌دهد و پس از ورود به بخش انتشار دچار فروپاشی می‌شود که با نتایج ژائو و همکاران [53] کاملاً تطابق دارد. پس از ردیابی حباب‌ها و محاسبه سرعت در نقاط مختلف، نمودار تغییرات سرعت در مرکز لوله ونتوری برای تمامی مدل‌ها رسم شده است. نمودار تغییرات سرعت در نقاط مختلف در مرکز لوله ونتوری، برای مدل‌های شماره ۱ و ۲ در سه دبی مورد آزمایش به ترتیب در نمودارهای ۴ و ۵ آورده شده است.

با توجه به نمودار رسم شده در نمودارهای ۴ و ۵ ملاحظه می‌شود که با افزایش دبی در هر دو مدل، سرعت نیز افزایش یافته است که این با رابطه تئوری دبی  $Q=A.V$  تطابق دارد و صحت نتایج آزمایشگاهی را بیان می‌کند.

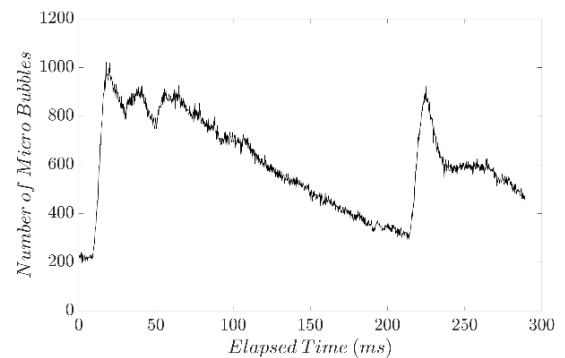
با توجه به نمودارهای رسم شده، ملاحظه می‌شود که در قسمت گلوگاه چون سطح مقطع ۰/۱ برابر سطح مقطع در ورودی لوله است، لذا انتظار می‌رود که سرعت در این قسمت تقریباً ۱۰ برابر سرعت در ورودی لوله باشد که این نتیجه نیز از این تحقیق حاصل شده است. برای مثال چون ابعاد سطح مقطع لوله ۳×۱/۶ سانتی‌متر است بنابراین سرعت در قسمت ورودی مدل‌های ۱ و ۲ با دبی ۰/۱۶ لیتر بر ثانیه برابر با ۰/۳۳۳ متر بر ثانیه می‌باشد و مطابق نمودار مربوط به این دبی در نمودارهای ۴ و ۵، ملاحظه می‌شود که سرعت در گلوگاه حدوداً ۴ متر بر ثانیه به دست آمده است که با تقریب خوبی با ۳/۳۳ متر بر ثانیه برابری می‌کند.



(الف)

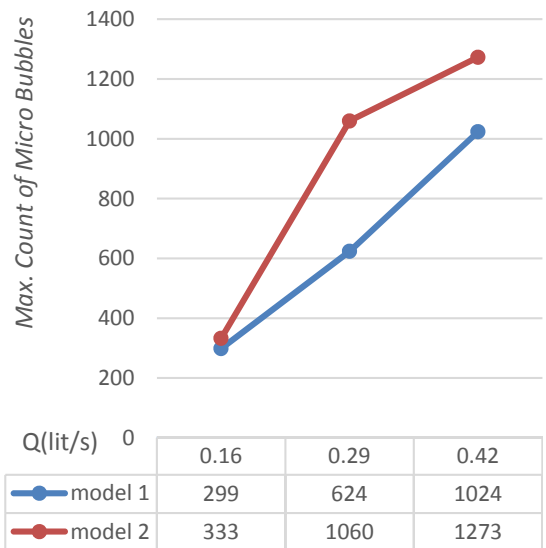


(ب)

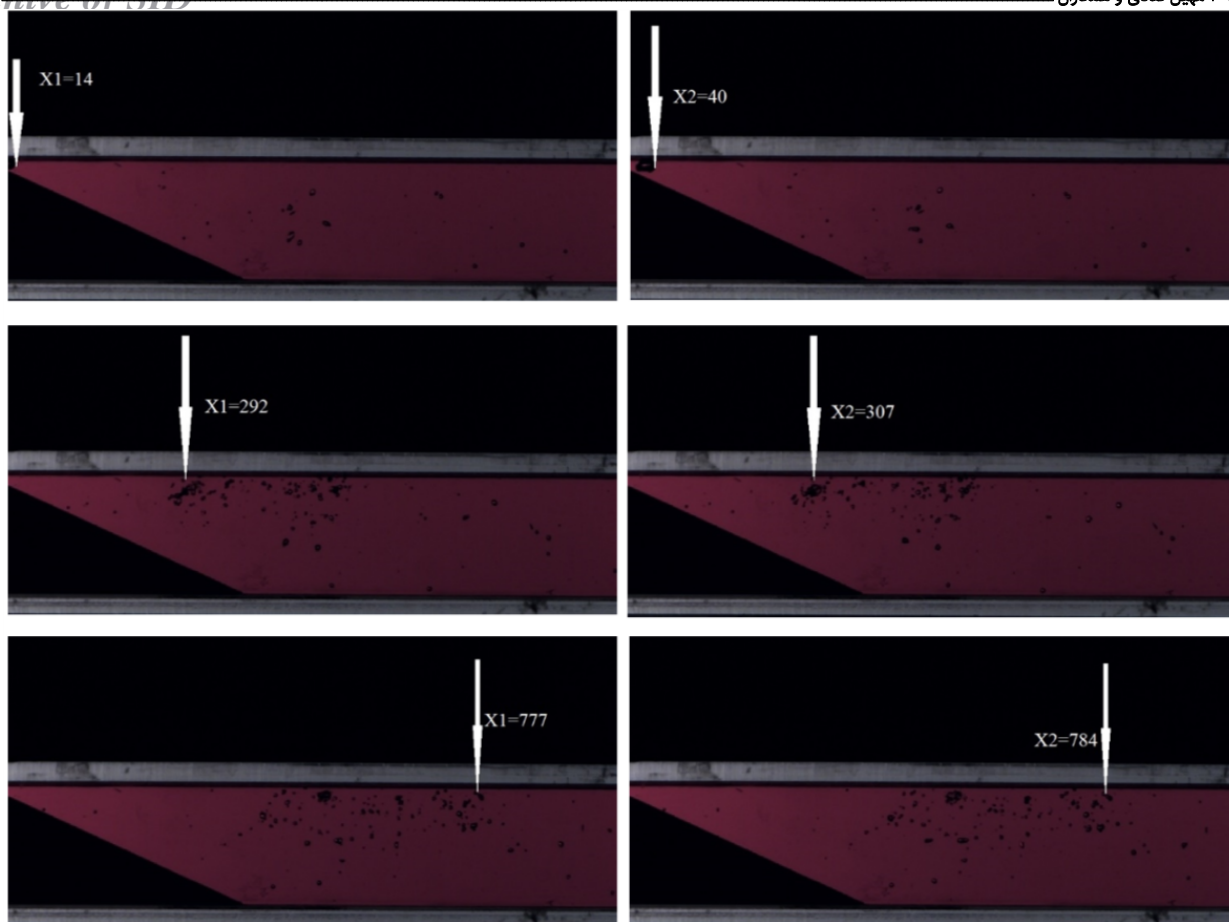


(ج)

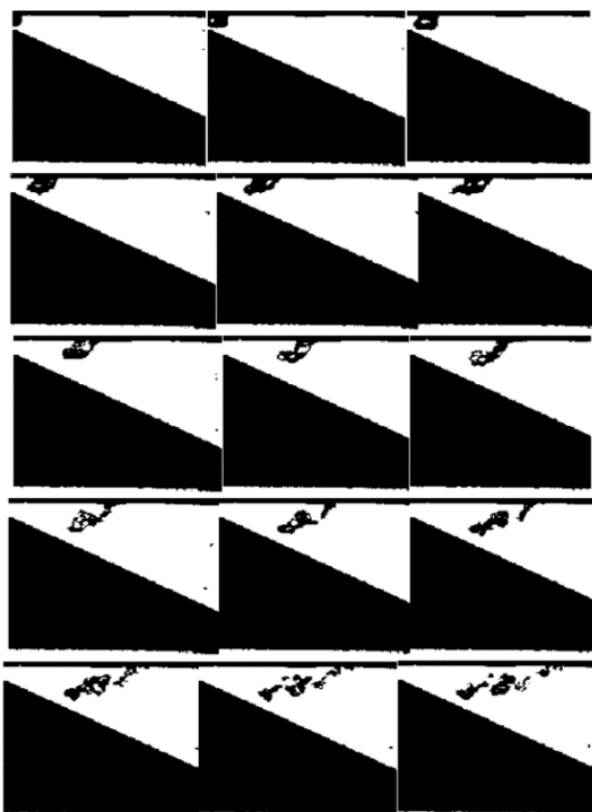
نمودار (۲) تعداد میکرو- نانو حباب‌ها در زمان‌های مختلف در مدل شماره ۲: الف:  $Q=0.16 \text{ lit/s}$  ب:  $Q=0.29 \text{ lit/s}$  ج:  $Q=0.42 \text{ lit/s}$



نمودار (۳) ماکزیمم تعداد میکرو- نانو حباب‌ها در دبی‌های مختلف برای مدل‌های شماره ۱ و ۲



شکل ۳) ردیابی حباب‌ها در زمان‌های مختلف در مرکز لوله و نتوری برای محاسبه سرعت در مدل شماره ۲ با دبی ۰/۱۶ لیتر بر ثانیه



شکل ۴) ردیابی حباب‌ها در زمان‌های مختلف و شکسته شدن حباب بعد از خروج از گلوگاه در مدل شماره ۲ با دبی ۰/۱۶ لیتر بر ثانیه



داد زمانی که دبی جریان کمتر است تغییر طول بخش گلوگاه تأثیر قابل توجهی در تعداد میکرو-ناب‌حباب‌ها ندارد و با افزایش دبی جریان و کوچک‌تر شدن بخش گلوگاه، میکرو-ناب‌حباب‌های بیشتری تشکیل شده است. کوچک‌تر شدن طول بخش گلوگاه تأثیر چندانی روی تغییرات سرعت در لوله ونتوری ندارد.

در مطالعات بعدی سعی می‌شود، همین نمونه‌ها تحت تحلیل عددی با استفاده از نرم‌افزار OpenFOAM قرار گیرد و نتایج حاصل از تحقیق با نتایج عددی مقایسه شود.

**تشکر و قدردانی:** نویسندگان مقاله از مسئولین محترم آزمایشگاه تحقیقاتی آشکارسازی و ردیابی دانشگاه صنعتی شاهرود تقدیر و تشکر می‌نمایند.

**تأییدیه اخلاقی:** این مورد توسط نویسندگان بیان نشد.

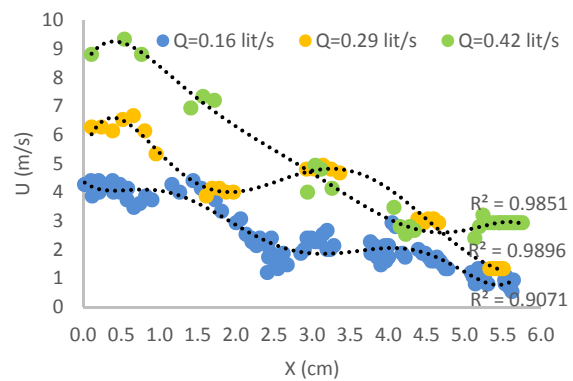
**تعارض منافع:** این مورد توسط نویسندگان بیان نشد.

**سهم نویسندگان:** مهین فنادی (نویسنده اول)، پژوهشگر اصلی (۳۴٪)؛ سیدفضل‌اله ساغروانی (نویسنده دوم)، پژوهشگر اصلی (۳۳٪)؛ حمید نیازمند (نویسنده سوم)، پژوهشگر اصلی (۳۳٪)

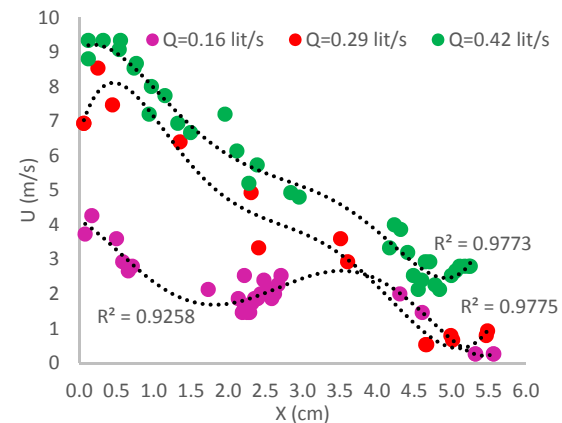
**منابع مالی:** توسط دانشگاه صنعتی شاهرود تأمین شده است.

## منابع

- 1- Prevenslik T. Stability of nanobubbles by quantum mechanics. In: Proceeding of topical problems of fluid mechanics; 2014 Feb 19-21; Institute of Thermomechanics, Czech Academy of Sciences, Prague. p. 113-116.
- 2- Zimmerman WB, Al-Mashhadani MKH, Bandulasena HCH. Evaporation dynamics of microbubbles. Chemical Engineering Science. 2013;101:865-877.
- 3- Wataneabe K. Washing effect of Microbubbles. In: Proceedings of FLUCOME 2013. 12<sup>th</sup> International Conference on Fluid Control, Measurements, and Visualization; 2013 Nov 18-23; Nara, Japan. p. OS1-01-1.
- 4- Madavan NK, Deutsch S, Merkle CL. Reduction of turbulent skin friction by Microbubbles. The Physics of Fluids. 1984;27(2):356.
- 5- Kanagawa T. Focused ultrasound propagation in water containing many therapeutical Micro-bubbles. In: Proceedings of FLUCOME 2013. 12<sup>th</sup> International Conference on Fluid Control, Measurements, and Visualization; 2013 Nov 18-23; Nara, Japan. p. OS6-04-4.
- 6- Zimmerman WB, Tesar V. Bubble generation for aeration and other purposes. British Patent GB20060021561, Filed Oct 2006 [cited 2018 Sep 23]. Available from: <https://patents.google.com/patent/US20100002534>
- 7- Zimmerman WB, Tesar V, Butler S, Bandulasena HCH. Microbubble generation. Recent Patents in Engineering. 2008;2(1):1-8.
- 8- Li H, Hu L, Xia Z. Impact of groundwater salinity on bioremediation enhanced by micro-nano bubbles. Materials. 2013;6(9):3676-3687.
- 9- Atkins PW, De Paula J. Atkins physical chemistry. 8<sup>th</sup> Edition. New York: Oxford University Press; 2006.
- 10- Ushikubo FU, Forukawa T, Nakagawa R, Enari M, Makino Y, Kawagoe Y, et al. Evidence of the existence and the stability of nano-bubbles in water. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. 2010;361(1-3):31-37.
- 11- Li P, Tsuge H. Water treatment by induced air flotation using microbubbles. Journal of Chemical Engineering of



نمودار ۴) منحنی تغییرات سرعت در مرکز لوله ونتوری در مدل شماره ۱



نمودار ۵) منحنی تغییرات سرعت در مرکز لوله ونتوری در مدل شماره ۲

سرعت در ورودی مدل‌های ۱ و ۲ با دبی ۰/۲۹ لیتر بر ثانیه برابر با ۰/۶ متر بر ثانیه است و مطابق نمودارهای رسم‌شده در نمودارهای ۴ و ۵ برای این دبی، ملاحظه می‌شود که سرعت در قسمت گلوگاه برای مدل شماره ۱ در این دبی تقریباً ۰/۶ متر بر ثانیه و برای مدل شماره ۲ تقریباً ۰/۷ متر بر ثانیه به دست آمده است که با دقت خوبی با سرعت ۰/۶ متر بر ثانیه برابری می‌کنند.

همچنین سرعت در ورودی مدل‌های ۱ و ۲ با دبی ۰/۴۲ لیتر بر ثانیه برابر با ۰/۹ متر بر ثانیه است و مطابق نمودارهای رسم‌شده در شکل ۴ و نمودار ۴ برای این دبی، ملاحظه می‌شود که سرعت در قسمت گلوگاه برای مدل شماره ۱ و ۲ در این دبی تقریباً ۰/۹ متر بر ثانیه به دست آمده است که با دقت خوبی با سرعت ۰/۹ متر بر ثانیه برابری می‌کنند. با مقایسه نمودارهای ۴ و ۵ ملاحظه می‌شود که با کوچک‌تر شدن طول بخش گلوگاه، سرعت، اندکی کاهش یافته است ولی در کل می‌توان گفت تغییر طول گلوگاه تأثیر چندانی روی تغییرات سرعت ندارد و فقط تغییرات دبی روی سرعت تأثیرگذار است.

در تحقیقات بعدی این تغییرات سرعت با نتایج حاصل از تحلیل عددی مقایسه خواهد شد. یکنواخت‌نبودن منحنی تغییرات سرعت در نمودارهای ۴ و ۵ می‌تواند ناشی از وجود حباب و حرکت حباب باشد.

## ۵- نتیجه‌گیری

نتایج نشان می‌دهد که با کوچک‌تر شدن طول بخش گلوگاه تعداد میکرو-ناب‌حباب‌هایی که در لوله ونتوری تشکیل می‌شود، افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش دبی جریان در داخل لوله ونتوری میکرو-ناب‌حباب‌های بیشتری تشکیل می‌شود. ولی نتایج نشان

Series. 2016;739:012058.

32- Tutsumi K. Water treatment technology and facility in future. *Kagaku Soti*. 2004;1:71-80. [Japanese]

33- Zhou Y, Shun Z, Gu H, Miao Z. Injection performance and influencing factors in self-priming Venturi scrubber. *CIESC Journal*. 2015;66(1):99-103.

34- Wang XJ, Tang L, Jiang Z. Numerical simulation of venturi ejector reactor in yellow phosphorus purification system. *Nuclear Engineering and Design*. 2014;268:18-23.

35- Zhu Y, Chao MA, Zhang XW. Study on flow in Venturi-mixer EGR for a turbo charged diesel engine. *Transactions of CSICE*. 2002;(6):546-550.

36- Quiroz-Pérez E, Vázquez-Román R, Lesso-Arroyo R, Barragán-Hernández VM. An approach to evaluate Venturi-device effects on gas wells production *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2014;116:8-18.

37- Gonzalez RC, Woods RE. *Digital image processing*. 3<sup>rd</sup> Edition. New York: Pearson Prentice Hall; 2008.

38- Rodio MG, Congedo PM. Robust analysis of cavitating flows in the Venturi tube. *European Journal of Mechanics - B/Fluids*. 2014;44(2):88-99.

39- Gupta B, Nayak AK, Kandar TK, Nair S. Investigation of air-water two phase flow through a venturi. *Experimental Thermal and Fluid Science*. 2016;70:148-154.

40- Pulley RA. Modelling the performance of venturi scrubbers. *Chemical Engineering Journal*. 1997;67(1):9-18.

41- Viswanathan S. Development of a pressure drop model for a variable throat venturi scrubber. *Chemical Engineering Journal*. 1998;71(2):153-160.

42- Ahmadvand F, Talaie MR. CFD modeling of droplet dispersion in a Venturi scrubber. *Chemical Engineering Journal*. 2010;160(2):423-431.

43- Sun Y, Niu W. Simulating the effects of structural parameters on the hydraulic performances of Venturi Tube. *Modelling and Simulation in Engineering*. 2012;2012:458368.

44- Konstantinov S, Tselishev D, Tselishev V. Numerical cavitation model for simulation of mass flow stabilization effect in ANSYS CFX. *Modern Applied Science*. 2015;9(4):21-31.

45- Jiang Y, Yang M, Guo C, Shen S. Numerical simulation of asymmetric flow in Venturi tube. *CIESC Journal*. 2014;6(S1):223-228.

46- Shen SW, Yang M, Jiang YH, Wang ZY. The numerical simulation of the influence of Venturi burner's structure on rich/lean separation. *Journal of Engineering Thermophysics*. 2015;36(2):347-350.

47- Manzano J, Palau CV, de Azevedo BM, do Bomfim GV, Vasconcelos DV. Geometry and head loss in Venturi injectors through computational fluid dynamics. *Engenharia Agrícola*. 2016;36(3):482-491.

48- Zhang JX. Analysis on the effect of venturi tube structural parameters on fluid flow. *AIP Advances*. 2017;7(6):065315.

49- Bui Dinh T, Choi TS. Application of image processing techniques in air/water two phase flow. *Mechanics Research Communications*. 1999;26(4):463-468.

50- Kabiri Samani A. Fluctuating characteristics of two-phase air-water slug flow in pressurized pipelines. *Journal of Water and Wastewater*. 2009;20(2):62-68. [Persian]

51- do Amaral CEF, Alves RF, da Silva MJ, Arruda LVR, Dorini L, Morales REM, Pipa DR. Image processing techniques for high-speed videometry in horizontal two-

Japan. 2006;39(8):896-903.

12- Clift R, Grace JR, Weber ME. *Bubbles, drops and particles*. Mineola: Dover publications Inc; 2005.

13- Agarwal A, Jern Ng W, Liu Y. Principle and applications of microbubble and nanobubble technology for water treatment. *Chemosphere*. 2011;84(9):1175-1180.

14- Takahashi M. Zeta potential of microbubbles in aqueous solutions: electrical properties of the gas-water interface. *Journal of Physical Chemistry B*. 2005;190(46):21858-21864.

15- Tsuge H, editor. *Micro- and Nano bubbles: fundamentals and applications*. Boca Raton: CRC press; 2014.

16- Takahashi M. Base and technological application of micro-bubble and nanobubble. *Materials Integration*. 2009;22(5):2-19.

17- Takahashi M, Chiba K, Li P. Free-radical generation from collapsing microbubbles in the absence of a dynamic stimulus. *Journal of Physical Chemistry B*. 2007;111(6):1343-1347.

18- Martin CS. Entrapped air in pipelines. In: *Proceeding of the 2<sup>nd</sup> International Conference on Pressure Purges*; 1976 Sep 22-24; Cranfield, Bedford, England.

19- Hewitt GFH, Taylor NSH. *Annular two-phase flow*. Oxford: Pergamon Press; 1970.

20- Beggs HD, Brill JP. A study of two-phase flow in inclined pipes. *Journal of Petroleum Technology*. 1973;25(5):607-617.

21- Levy S. *Two-phase flow in complex systems*. New York: John Wiley & Sons, Inc; 1999.

22- Terasaka K, Tsuge H. Bubble formation at a single orifice in highly viscous liquids. *Journal of Chemical Engineering of Japan*. 1990;23(2):160-165

23- Miyahara T, Tanaka A. Size of bubbles generated from porous plates. *Journal of Chemical Engineering of Japan*. 1997;30(2):353-355.

24- Yazawa T, Nakamichi H, Tanaka H, Eguchi K. Permeation of liquid through porous glass membrane with surface modification. *Journal of the Ceramic Society of Japan*. 1988;96(1109):18-23.

25- Forrester SE, Rielly CD, Carpenter KJ. Gas-inducing impeller design and performance characteristics. *Chemical Engineering Science*. 1998;53(4):603-615.

26- Johnson BD, Gershey RM, Cooke RC, Sutcliffe WH. A theoretical model for bubble formation at a frit surface in a shear field. *Separation Science and Technology*. 1982;17(8):1027-1039.

27- Vlyssides AG, Mai ST, Barampouti EMP. Bubbles size distribution formed by depressurizing air-saturated water. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2004;43:2775-2780.

28- Han M, Park Y, Lee J, Shim J. Effect of pressure on bubble size in dissolved air flotation. *Water Supply*. 2002;2(5-6):41-46.

29- Fujiwara A, Takagi S, Watanabe K, Matsumoto Y. Experimental study on the new micro-bubble generator and its application to water purification system. In: *Proceeding of the 4<sup>th</sup> Joint Fluids Summer Engineering Conference*; 2003 July 6-10; Honolulu, Hawaii, USA. ASME/SME; 2003. p. 469-473.

30- Makuta T, Takemura F, Hihara E, Matsumoto Y, Shoji M. Generation of micro gas bubbles of uniform diameter in an ultrasonic field. *Journal of Fluid Mechanics*. 2006;548:113-131.

31- Wiraputra IGPAE, Edikresnha D, Munir MM, Khairurrijal. Generation of submicron bubbles using venturi tube method. *Journal of Physics: Conference*

column. NSMSI Journal. 2014;32(4):71-80. [Persian]

53- Zhao L, Mo Z, Sun L, Xie G, Liu H, Du M, Tang J. A visualized study of the motion of individual bubbles in a venturi- type bubble generator. Progress in Nuclear Energy. 2017;97:74-89.

phase slug flow. Flow Measurement and Instrumentation 2013;33:257-264.

52- Asadi H, Hormozi F. Develop a high speed photography technique and image processing to determine the bubble characteristics in the bubble