

شبیه سازی فرایند تشکیل حباب با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی

حمید رضا قربانی^۱، داریوش باستانی^۱، علی یار جوادی

چکیده

در این مقاله، فرایند تشکیل حباب از طریق وارد کردن هوا به یک اریفیس غوطه ور در یک ظرف استوانه‌ای به طور عددی مطالعه و شبیه سازی با استفاده از مدل الگوریتم حل حجم سیال^۱ انجام شده است. این کد بر مبنای روش تفاضل محدود و به صورت دو بعدی بیان می‌شود. در این مطالعه اثر دبی هوای ورودی روی سایز حباب و زمان تشکیل آن در دبی های بسیار کم مطالعه شده است.

کلمات کلیدی:

جریان دوفازی، تشکیل حباب، شبیه سازی عددی، دینامیک سیالات محاسباتی^۲

Simulation of Bubble Formation With CFD

H. R. ghorbani, D. Bastani, A. Javadi

ABSTRACT

In this paper, bubble formation process has been studied numerically by entering air into a submerged orifice placed in a cylinder. The SOLA-VOF method was used to simulate the bubble formation. In This code, complete form of Navier-stocks equations was predicted two dimension and using finite difference method. Also in this study, the effect of air flow rate on the bubble size and its formation time at very low rates was studied.

KEYWORDS:

Two Phase Flow, Bubble Formation, Numerical Simulation, CFD

۱- مقدمه

سیستم‌های چند فازی، نقش مهمی در بسیاری از فرایندهای صنعتی و طبیعی مانند تصفیه مس^۳، راکتورهای شیمیایی، نیروگاه های تولید برق^۴، موتورهای احتراق داخلی و پاک کننده ها^۵ بازی می‌کنند. انتقال حرارت و جرم در این سیستم‌ها به وسیله حرکت سیال تعیین می‌شود، بنابراین مطالعه حرکت آنها به منظور طراحی، بسیار مهم است [۱]. جریان دوفازی به عنوان زیرمجموعه ای از سیستم های چند فازی، به بهترین شکل حرکت متقابل دو نوع متفاوت از مواد^۶ را توضیح می‌دهد. تفاوت بین حالت‌های ماده می‌تواند ناشی از حالت ترمودینامیکی به نام فاز (مثل گاز، مایع یا جامد)، و یا اجزای شیمیایی آن باشد [۲]. تشکیل پروردیک حباب در یک اریفیس غوطه ور در مایع یک پدیده دو

ⁱ کارشناسی ارشد مهندسی شیمی، دانشکده مهندسی شیمی و نفت، دانشگاه صنعتی شریف
Hamidghorbani6@yahoo.com؛ تلفن: ۰۹۱۲۲۳۱۷۲۶۱

ⁱⁱ دانشیار دانشگاه صنعتی شریف

که تحت شرایط آزمایشگاهی، حجم حباب با افزایش دبی گاز، حجم محفظه گاز؛ که در زیر محفظه مایع قرار دارد، قطر داخلی نازل و تنش برشی^{۱۲} مایعات افزایش می یابد. شکل (۱) اشکال حباب رادربول فرایند تشکیل حباب نشان می دهد [۲]. زنگ و تن^{۱۳} (۲۰۰۰) یک مدل تئوری برای تشکیل حباب را که در راستای پدیده ریزش^{۱۵} در سینی های منفذ دار ایجاد می شود بیان کردند. آنها فرض کردند که حباب ها در طول فرایند تشکیل به شکل کره باقی می ماند. این فرض آنها را مجاز می کرد تا از عبارات آنالیتیکی تئوری پتانسیل جریان، به منظور مدل کردن فشار مایع اطراف حباب در اریفیس استفاده کنند. در نهایت، با استفاده از روش عددی رانگ-کوتا-ورنر^{۱۶} مرتبه پنجم و ششم و با در نظر گرفتن شرایط اولیه و مرزی مناسب، مساله را حل کردند [۱۲]. لی^{۱۷} و همکارانش در سال ۲۰۰۱ یک مدل تئوری برای مدلسازی تشکیل حباب در یک اریفیس غوطه ور در سیالات غیرنیوتنی تحت شرایط دبی-ثابت توسعه دادند [۱۶]. آنها نیز مشابه تراساکا از مدل غیرکروی استفاده کردند و معادلات حرکت در جهت شعاعی و عمودی را با معادله ترمودینامیکی گاز درحباب و محفظه زیر اریفیس ترکیب کردند. امروزه استفاده از روش های عددی در محاسبات کامپیوتری از اهمیت زیادی برخوردار بوده و به عنوان ابزاری کارآمد در طراحی وسایل مهندسی استفاده شده است. بدون شک، قسمت عمده ای از پیشرفت فن آوری و صنعت مدیون کاربرد کامپیوتر و گسترش و تکامل فنون عددی است. به همین دلیل در سال های اخیر مدل هایی بر پایه دینامیک سیالات محاسباتی^{۱۸} (CFD) به منظور مطالعه پدیده های جریان در طول فرایند تشکیل، صعود و تجمع حبابها توسعه پیدا کرده است. مدل حجم سیال^{۱۹} (VOF) را می توان به منظور توضیح حرکت حباب های گازی؛ که تغییر شکل می دهند، استفاده کرد. مدل VOF، حرکت گذرای فاز گاز و مایع را با استفاده از معادلات ناویر-استوکس حل می کند و تغییرات شکل سطح گاز-مایع را به وسیله حرکت نسبی مایع نشان می دهد. چن و لی^{۲۰} (۱۹۹۸) یک مدل VOF اصلاح شده را به منظور محاسبه تجمع و صعود حباب به سمت سطح مایع به کار بردند. والنسیا^{۲۱} و همکارانش (۲۰۰۲) به طور عددی رشد و صعود حباب های تشکیل شده در یک اریفیس غوطه ور در ظرف استوانه ای را مطالعه کردند. آنها شبیه سازی را با استفاده از مدل VOF انجام دادند و برای این کار از نرم افزارحل کننده Fluent استفاده کردند [۱]. اثر پارامترهای عددی مانند سایز شبکه و پارامترهای فیزیکی مانند قطر اریفیس و سرعت ورودی گاز روی قطر و سرعت تشکیل حباب بررسی شد. تحقیق در زمینه ورود گاز به آب به وسیله یک نازل بزرگ و

از آنجا که تشکیل حباب در یک ظرف مایع به وسیله وارد شدن جریان گاز، در تعداد زیادی از وسایل تماس دهنده گاز-مایع وجود دارد، این فرایند بسیار مطالعه شده است [۳]. هدف از پراکنده کردن گاز در مایع در این دستگاه ایجاد تماس بین دوفاز می باشد. همزدن به وسیله هوا در استخراج مایعات رادیواکتیو که به علت عدم وجود قطعات متحرک از امتیاز خاصی برخوردار است، نمونه ای از فرایند دو فازی است [۲]. راکتورهای شیمیایی، فرمونتورهای بیولوژیکی و تانک های تولید پلیمر مثالهایی دیگر از تشکیل حباب در ظرف های مایع است. از طرفی اساسی ترین روش پراکنده کردن گاز ایجاد حباب از طریق اریفیس است. بنابراین تحقیق در مورد اثرات فاکتورهای متفاوت روی شکل و حجم حباب تشکیل شده در یک اریفیس غوطه ور در مایعات مفید و سودمند به نظر می رسد [۶].

محققین زیادی در زمینه فرایند تشکیل حباب و هیدرودینامیک آن مطالعه و تحقیق کرده اند. داویسن^۴ و همکاران (۱۹۶۰)، هر دو مورد آزمایشگاهی و تئوری را در خصوص تشکیل حباب داخل یک مایع غیر ویسکوز مطالعه کرده اند. آنها روابطی بین حجم حباب ودبی برای وقتی که دبی گاز (یا فشار) ثابت است، پیدا کردند [۱۵]. پارک، تیلر و نورس^۵ (۱۹۷۶) تحقیقات وسیعی در مورد اثرات متقابل محفظه و اریفیس در تشکیل حبابها انجام دادند. آنها یک مدل مکانیکی از اثر متقابل بیان شده بر اساس یک موازنه جرمی ساده و یک رویکرد از نمودار فشار-زمان در تشکیل حباب را نشان دادند و بخوبی اثر محفظه گاز را، روی حجم حباب برای سیالات نیوتنی بیان کردند [۳]. پیش بینی حجم حباب های خارج شده از یک نازل در سیالات غیر نیوتنی تحت شرایط جریان-ثابت را البرخت و همکاران^{۱۰} (۱۹۷۷)، بحث و بررسی کردند. آنها نشان دادند که معادلات نوع $v = c(Q^2/g)^{3/5}$ به منظور پیش بینی حجم حبابها در مایعات غیرنیوتنی با دبی های بالاتر از $0.5 \times 10^{-6} m^3/s$ می تواند استفاده شود [۵].

تراساکا و تسوج^{۱۱} (۱۹۹۰) به منظور روشن شدن مکانیسم تشکیل حباب، حجم حباب، شکل حباب و فشار محفظه گاز را در طول رشد حباب به طور همزمان اندازه گیری کردند. آنها در این کار از مایعات مدل توانی^{۱۲} استفاده کردند. آنها به منظور توضیح مکانیسم تشکیل حباب، یک مدل غیرکروی اصلاح شده در هر دو مورد مایعات نیوتنی و غیرنیوتنی پیشنهاد دادند [۶]. آنها بار دیگر در سال ۲۰۰۰ تحقیقات خود را در این زمینه برای مایعات ویسکوز دارای تنش تسلیم ادامه دادند و نتیجه گرفتند

شبکه ثابت باقی می‌ماند؛ اما هویت المان‌های سیال، ثابت باقی نمی‌ماند. یک مقایسه از مزایا و معایب نسبی این روش‌ها ما را به یک تکنیک جدید که در عین سادگی بسیار موثر است، راهنمایی می‌کند. این روش، روش جرحجمی سیال VOF است.

اساس مدل VOF، ردیابی مرزهای آزاد بر مبنای جزء حجمی سیال است. در این تکنیک، تابع $F(x,y,t)$ تعریف می‌شود که مقدارش در هر نقطه پر از سیال واحد می‌باشد و برای نقاط خالی صفر است. در اصل، یک مقدار واحد از F معادل یک سلول پر از سیال و مقدار صفر معادل با سلولی خالی از سیال می‌باشد. سلول‌ها با مقادیر F بین صفر و یک شامل سطوح آزاد می‌شوند.

جهت نرمال مرز، جهتی است که مقدار F به سرعت تغییر می‌کند. وقتی که جهت نرمال و مقدار F در یک سلول مرزی مشخص شد، یک خط برش دهنده سلول می‌تواند تقریب سطح را رسم کند. به علاوه منحنی‌های سطح می‌توانند برای تعریف نیروهای کششی سطحی محاسبه شوند.

وابستگی تابع F به زمان به وسیله معادله زیر بیان می‌شود: [۱۷]

$$\frac{\partial F}{\partial t} + u \frac{\partial F}{\partial x} + v \frac{\partial F}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

جایی که (u,v) سرعت‌های سیال درجهت‌های مختصات (x,y) هستند. این معادله برای حالتی است که F با سیال حرکت می‌کند. در یک شبکه اولری فلاکس F متحرک به داخل یک سلول بایستی محاسبه شود.

روش‌های تفاضل محدود^{۲۷} اولری برای بررسی دینامیک سیالات تراکم ناپذیر بیان شده است. اولین روشی که به طور موفقیت آمیز، رفتار سطوح آزاد را پوشش داد، مدل نشانگر و سلول^{۲۸} (MAC) بود. سپس مدل‌های VOF در نسخه‌های متفاوت مثل SOLA-VOF حاصل شد. SOLA-VOF یک شبکه اولری از سلول‌های مستطیلی با سایزهای متغیر استفاده می‌کند که δx_i برای ستون i ام و δy_j برای سطر j ام است. از این شبکه متغیر در تحقیق موردنظر نیز استفاده شده است. (شکل ۲)

معادلات سیال به منظور محاسبات، معادلات ناویر-استوکس است:

$$\frac{\delta u}{\delta t} + u \frac{\delta u}{\delta x} + v \frac{\delta u}{\delta y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + g_x + \nu \left[\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \varepsilon \left(\frac{1}{x} \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{u}{x^2} \right) \right] \quad (2)$$

بررسی فرایند تشکیل و شکست حباب از طریق روش عددی به وسیله میر^{۲۹} و همکارانش انجام شده و با نتایج آزمایشگاهی مقایسه گشته است. بدین منظور آنها از یک روش اولری توانمند برای مدلسازی جریان دو فاز گاز-مایع به نام مدل-PLIC-VOF^{۳۰} استفاده کردند [۱۱].

کریشنا^{۳۱} و همکارانش صعود حباب‌ها را در یک مختصات دو بعدی، با استفاده از مدل VOF مطالعه کردند. آنها از حل کننده CFX برای حل معادلات ناویر-استوکس استفاده کردند. در ادامه، اثر متقابل حباب-حباب را بررسی کردند و نتیجه گرفتند که حبابهای بزرگ در طول صعودشان ممکن است بشکنند یا به هم ملحق گردند. [۱۸]

اخیرا تحقیقات جالبی در مورد اثرات پتانسیل الکترواستاتیک روی دینامیک فرایند تشکیل حباب صورت گرفته است. هدف آنها استفاده از پتانسیل الکترواستاتیک برای کنترل در آوردن فرایند حباب شدن است. سارنوبات^{۳۵} و همکاران (۲۰۰۳) به طور آزمایشگاهی فرایند تشکیل حباب را در مایع گلیسرول^{۳۶} تحت پتانسیل الکتریکی مطالعه کردند [۱۳].

در این تحقیق، برای اولین بار از طریق "کدنویسی" و با استفاده از الگوریتم حل حجم سیال و روش عددی تفاضل محدود به بررسی فرایند تشکیل حباب در یک سیال نیوتنی پرداخته می‌شود.

۲- روش حل عددی

با توجه به توسعه روزافزون کامپیوتر در عصر حاضر، استفاده از روش‌های عددی به خصوص استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی CFD در حل مسائل دوفازی حائز اهمیت است. برای حل مسائل دوفازی، روش‌های اولری و لاکرانژی بسیار استفاده می‌شود. تکنیک لاکرانژی، حرکت ماده را به وسیله شبکه‌ها یا اجزای فیکس شده در ماده توضیح می‌دهد. حرکت سیالات اغلب به وسیله تغییر شکل شبکه‌ها، و در یک خط قرار گرفتن سطح مشترک با خطوط شبکه بیان می‌شود. اگرچه این چنین روش‌هایی بسیار دقیقند؛ اما برای مسائلی که مرزهای آزاد تغییر شکل‌های بزرگی را طی می‌کنند مناسب نیستند. در عوض روش‌های اولری حرکت ماده را در یک شبکه ثابت توضیح می‌دهد.

نمایش لاکرانژی برای یک سیال اصولاً ساده است؛ زیرا هر منطقه از یک شبکه؛ که سیال را به المان‌هایی تقسیم می‌کند، برای همه زمان‌ها، در مورد المان‌های مشخص سیال، یکسان باقی می‌ماند. نیروهای حجمی و سطحی روی این المان‌ها به آسانی تعریف می‌شوند به طوری که محاسبه پاسخ دینامیک المان‌ها نسبتاً سرراست است. در یک نمایش اولری، اگرچه

بایستی به منظور مشخص شدن شکل جدید سیال Update شوند [۱۰].

با تکرار این قدم‌ها حل با وقفه‌های زمانی دلخواه δt ، حاصل می‌شود.

۳- محاسبات تشکیل حباب

هندس‌ه مورد مطالعه به طور شماتیک در شکل (۳) نشان داده شده است. این ظرف سیلندری با قطر ۴ سانتیمتر و ارتفاع ۵ سانتیمتر تا ارتفاع ۲ سانتیمتر از آب پر شده است. در انتهای ظرف نیز یک اریفیس با قطر ۲/۵ میلی‌متر یا ۱/۵ میلی‌متر قرار گرفته است که هوا با دبی ثابت وارد آن می‌شود.

شبکه محاسباتی مورد استفاده، دو بعدی بوده و از سیستم مختصات کارتزین استفاده می‌شود. این کد به اندازه شبکه بسیار حساس بوده و فرایند تشکیل حباب فقط در یک رنج خاصی از شبکه انجام پذیر است. در این مطالعه، اندازه شبکه ها 140×80 می‌باشد.

گام زمانی از مرتبه 10^{-5} است که به طور اتوماتیک به وسیله خود کد تغییر پیدا می‌کند. اگر تغییرات سرعت از یک مقدار مبنا کوچک‌تر باشد زمان پیش می‌رود و مساله حل می‌شود. در غیر این صورت، گام زمانی در مقدار نود و نه صدم ضرب می‌شود و برنامه ادامه می‌یابد تا به شرایط مورد نظر برسد.

پرش بسیار زیاد دانسیته بین دو فاز گاز و مایع، مشکلات عددی بسیاری در همگرایی کد ایجاد می‌کند. این مشکلات، اغلب خود را در ترم متوسط گیری دانسیته نشان می‌دهد؛ زیرا دانسیته مایع حدوداً هزار بار بزرگ‌تر از دانسیته گاز است. بنابراین در سلول‌هایی که هم فاز گاز وجود دارد و هم فاز مایع، این مشکلات ایجاد می‌شود. از طرفی محاسبه دانسیته متوسط در این سلول‌ها و استفاده آن در معادلات پیوستگی و مومنتم (معادله ۶) مانع همگرایی می‌شود. برای رفع این مشکل، دانسیته گاز به طور مجازی به وسیله یک فاکتور مرتبه ۱۰ افزایش داده شد [۸]. (با اشاره به مقاله لورین^{۲۰} در سال ۲۰۰۴) این افزایش دانسیته گاز تاثیر چندانی روی $\Delta\rho$ در معادله ندارد. بنابراین اولاً مشکل عددی کد رفع می‌شود و ثانیاً خطای ایجاد شده در اثر افزایش مجازی دانسیته گاز در شبیه سازی فرایند تشکیل حباب، بسیار کوچک و قابل چشم پوشی است.

۴- نتایج و مقایسه

در این مطالعه، دو حالت بررسی می‌شود. حالت اول، به اریفیس‌هایی با قطر ۲/۵ میلی‌متر و حالت دوم به اریفیس‌هایی با

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} +$$

$$g_y + \nu \left[\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + (\varepsilon/x) \frac{\partial v}{\partial x} \right]$$

(۳)

عناصر سرعت (u, v) به ترتیب درجهت‌های مختصات (x, y) یا جهت‌های مختصات سیلندری (r, z) است. انتخاب سیستم مختصات به وسیله مقدار ε تعیین می‌شود. اگر $\varepsilon = 0$ باشد کارتزین و اگر $\varepsilon = 1$ سیلندری است. شتاب بدنه (جاذبه) به وسیله (g_x, g_y) نوشته می‌شود و ν ضریب ویسکوزیته سینماتیک است. دانسیته سیال ρ است. برای یک سیال تراکم ناپذیر معادلات مومنتم (معادلات ۳ و ۲) بایستی با شرایط تراکم ناپذیری تکمیل و تصحیح شود.

$$\frac{\delta u}{\delta x} + \frac{\delta v}{\delta y} + \frac{\varepsilon u}{x} = 0 \quad (۴)$$

گاهی اثرات تراکم پذیری محدود کننده مجاز، مورد توجه است. (مثل امواج صوتی acoustic) که معادله (۴) بایستی با معادله (۵) جایگزین شود.

$$\frac{1}{\rho c^2} \frac{\delta p}{\delta t} + \frac{\delta u}{\delta x} + \frac{\delta v}{\delta y} + \frac{\varepsilon u}{x} = 0 \quad (۵)$$

C سرعت آدیاباتیکی صوت در سیال است. چون معادله (۵) انعطاف پذیری بیشتری را با پیچیدگی کمتر به همراه دارد، از آن به عنوان یک طرح استاندارد در SOLA-VOF استفاده می‌شود.

برای محاسبه دانسیته و ویسکوزیته در یک سلول از میانگین گیری استفاده می‌شود.

$$\rho = \rho_{air} F_{air} + \rho_{Fluid} F_{Fluid} \quad (6)$$

$$\mu = \mu_{air} F_{air} + \mu_{Fluid} F_{Fluid}$$

به طور خلاصه، روند اساسی برای پیشبرد یک حل باگذشت زمان، δt ، شامل سه قدم است:

(۱) تقریب‌های صریح^{۲۱} از معادله (۲) و (۳) که به منظور محاسبه حدس‌های اول برای سرعت‌های سطح زمانی جدید با استفاده از شرایط اولیه یا مقادیر سطح زمان قبلی برای همه موارد advective، فشار و شتاب ویسکوز استفاده می‌شود.

(۲) ارضا کردن معادله پیوستگی (معادله ۵). فشارها به طور تکراری در هر سلول تصحیح می‌شوند و تغییرات سرعت ناشی از هر تغییر فشار به سرعت‌های محاسبه شده در قدم (۱) اضافه می‌گردد. یک عمل تکرار شونده (حدس و خطا) نیاز است، چون تغییر در فشار لازم در یک سلول به منظور برآوردن معادله (۵) بالانس (موازنه) را در چهار سلول کناری به هم می‌ریزد.

(۳) در نهایت تابع F که مناطق سیال را تعریف می‌کند،

(۷) و (۸) قابل مقایسه بوده و از یک مرتبه می‌باشند و بنابراین نتایج به دست آمده از این کار مناسب و قابل قبول است. همچنین می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش قطر اریفیس، قطر حباب نیز افزایش می‌یابد.

۴-۲- اثر دبی گاز روی زمان تشکیل حباب

جداول (۳) و (۴)، اثر سرعت گاز ورودی به نازل را در نازلهایی به قطر ۲/۵ و ۱/۵ میلی‌متر نشان می‌دهد. بنابراین با افزایش سرعت گاز ورودی، زمان تشکیل حباب کاهش می‌یابد. زمان تشکیل حباب زمانی است که حباب از سر نازل جدا می‌شود. به عبارت دیگر با افزایش حجم حباب، زمان تشکیل آن کاهش می‌یابد.

۴-۳- مقایسه شکل حباب

اشکال (۴) و (۵) به ترتیب فرایند تشکیل حباب را برای اریفیسهایی با قطرهای ۲/۵ و ۱/۵ میلی‌متر و سرعت‌های ۲ و ۱/۵ سانتی‌متر بر ثانیه نشان می‌دهد. شکل (۶) که فرم حباب تشکیل شده از طریق کد مذکور را نشان می‌دهد، با شکل (۷) که به وسیله والنسیا و همکارانش [۱] در سال ۲۰۰۲ به دست آمده است، قابل مقایسه می‌باشد. آنها در تحقیق خود از مدل VOF و با استفاده از حل‌کننده Fluent 5.5، پدیده تشکیل حباب را بررسی کرده‌اند. حل‌کننده آنها بر مبنای روش عددی حجم-محدود Error! No index entries found^{۳۲} و با استفاده از الگوریتم SIMPLIC بیان شده است. سرعت گاز ورودی به نازل در تحقیق آنها ۰/۲ m/s بود. دیده می‌شود که با توجه به تفاوت سرعت بین محاسبات حاصل شده از SOLA-VOF و محاسبات والنسیا و با یکسان در نظر گرفتن قطر نازل، شکل حباب‌ها تقریباً مشابه می‌شوند. در ادامه شبیه‌سازی، حباب می‌شکند و به چند قسمت تقسیم شده و به سمت سطح مایع حرکت می‌کند. این مورد با نتایج والنسیا تطابق ندارد که ممکن است به علت تفاوت در سرعت ورودی گاز باشد.

جدول (۲): مقایسه قطر حباب (dor=1.5 mm)

UOR(cm/s)	0.5	1.	1.5	2.
Db(VOF) mm	0.60	0.81	0.99	1.11
Db(7) mm	0.53	0.69	0.83	0.92

قطر ۱/۵ میلی‌متر مربوط است. سرعت هوای ورودی به نازل ۰/۵، ۱، ۱/۵ و ۲ سانتی‌متر بر ثانیه در نظر گرفته شده است. بدیهی است با توجه به سرعت‌های در نظر گرفته شده، جریان آرام و اثرات توربولنسی قابل چشم‌پوشی است.

۴-۱- اثر دبی گاز روی قطر حباب

جداول (۱) و (۲)، اثر دبی گاز ورودی روی قطر حباب را نشان می‌دهد. در صورتی که از اثر کشش سطحی صرف نظر شود، سایز حباب به وسیله موازنه نیروهای بویانسی، اینرسی و ویسکوز برای مایعات با ویسکوزیته کم تعیین می‌شود. بر این اساس، داویسن^{۳۱} (۱۹۶۰) رابطه زیر را برای محاسبه قطر حباب ارائه کرد [۱۵]:

$$d_{Bl} = .794 d_{or}^8 u_{or}^4 \dots \dots \dots (۷)$$

که واحدها بر حسب سیستم SI می‌باشد. همچنین تریبال^{۳۲} در کتاب خود به منظور محاسبه قطر حباب برای شدت جریان‌های کم گاز $(Q_{GO} < [20(\sigma d_o g_c)^5 / (g \Delta \rho)^2 \rho_L^3]^{1/6})$ برای مایعاتی با ویسکوزیته کوچکتر از 1000 cp از رابطه زیر استفاده کرد [۲]:

$$d_{Bl} = 2.312 \left(\frac{\mu_L Q_{GO}}{\rho_L g} \right)^{1/4} \dots \dots \dots (۸)$$

هدف از بیان معادلات بالا، مقایسه نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی مذکور با نتایج معادله (۷) و (۸) می‌باشد، هر چند این معادلات، تقریبی است.

جدول (۱): مقایسه قطر حباب (dor=2.5 mm)

UOR(cm/s)	0.5	1.	1.5	2
Db(VOF) mm	0.81	1.35	1.68	2.34
Db(7) mm	0.79	1.04	1.23	1.38
Db(8) mm	0.58	0.69	0.77	0.85

باید توجه کرد که فرمول‌های تریبال، تنها در محدوده خاص قابل استفاده است و محدوده عملکرد بالایی ندارد. نتایج به دست آمده از جداول (۱) و (۲) نشان می‌دهد که با افزایش سرعت گاز ورودی به نازل، قطر حباب و به تبع آن حجم حباب افزایش می‌یابد. از طرفی، قطر حباب محاسبه شده از طریق کد در زمان‌هایی از نازل با قطر محاسبه شده از طریق معادلات

است.

در این پروسه، از دو اریفیس با قطرهای ۲/۵ و ۱/۵ میلیمتر استفاده شده و دبی گاز ورودی بسیار کم فرض شده است.

همچنین مشاهده شد که با افزایش سرعت، حجم حباب افزایش و زمان تشکیل حباب کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش قطر نازل در یک دبی ثابت، حجم حباب افزایش می‌یابد.

جدول (۲): مقایسه زمان تشکیل حباب در نازل هایی با قطر $d_{or}=1.5 \text{ mm}$

UOR(cm/s)	0.5	1.	1.5	2.
Tfor(s)	0.11	0.079	0.068	0.063

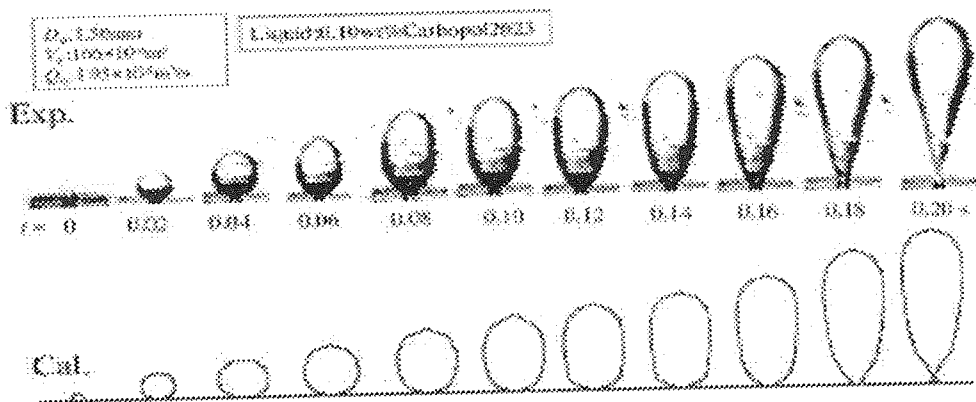
Db(8) mm	0.51	0.61	0.68	0.73
----------	------	------	------	------

جدول (۳): مقایسه زمان تشکیل حباب در نازل هایی با قطر $d_{or}=2.5 \text{ mm}$

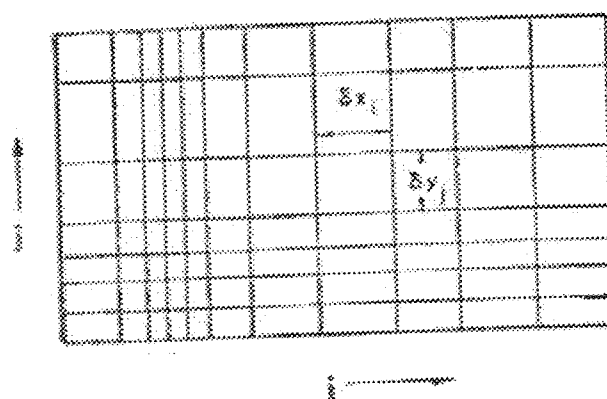
UOR(cm/s)	0.5	1.	1.5	2.
Tfor(s)	0.1	0.078	0.074	0.07

۵- خاتمه

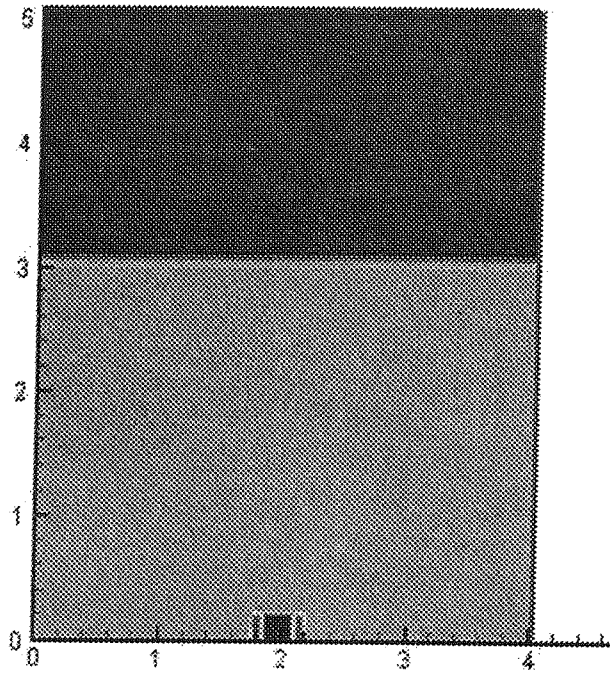
در این تحقیق، فرایند تشکیل حباب در یک ظرف استوانه‌ای شامل یک اریفیس غوطه ور در آب، شبیه سازی می‌شود. شبیه سازی با استفاده از مدل عددی SOLA-VOF صورت گرفته



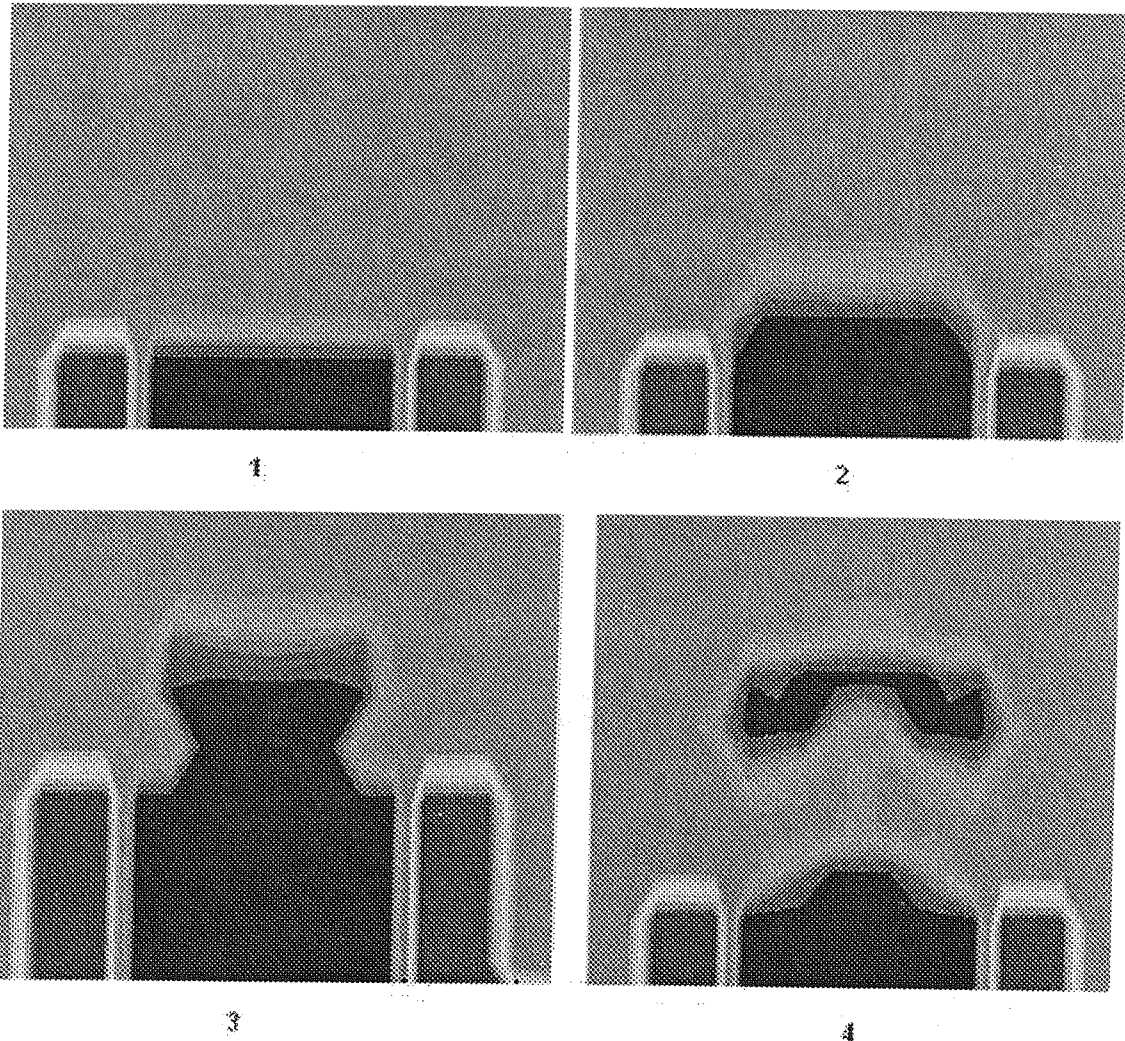
شکل (۱): مقایسه اشکال حباب در طول فرایند تشکیل حباب [۷]



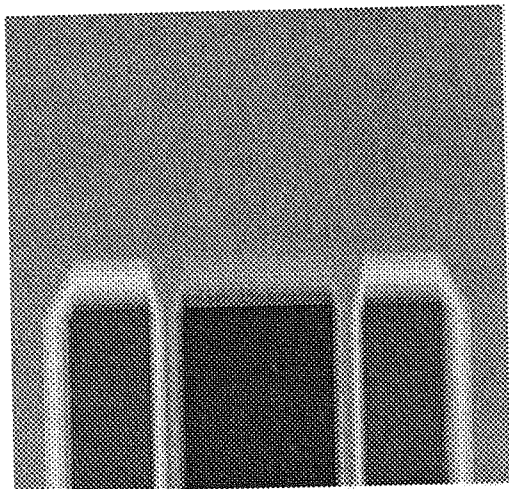
شکل (۲): یک شبکه تفاضل محدود با سلول های مستطیلی متغیر



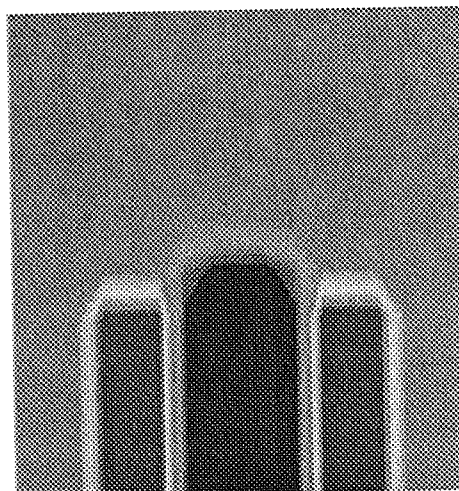
شکل (۳) : قالب محاسباتی



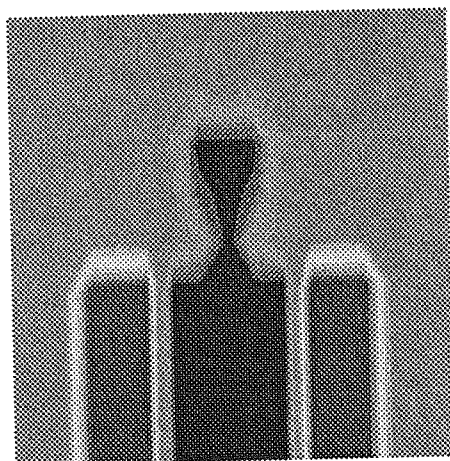
شکل (۴) : روند تشکیل حباب اول ($u_{or}=2 \text{ cm/s}$ و $d_{or}=2.5 \text{ mm}$)



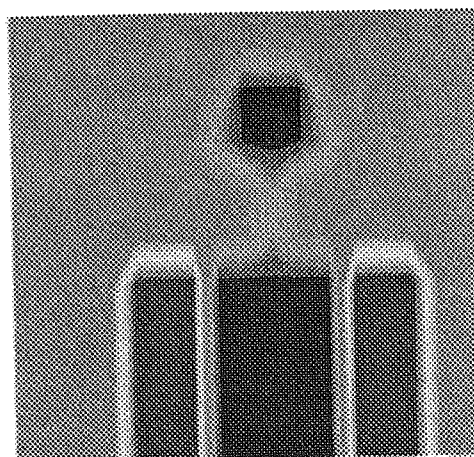
1



2

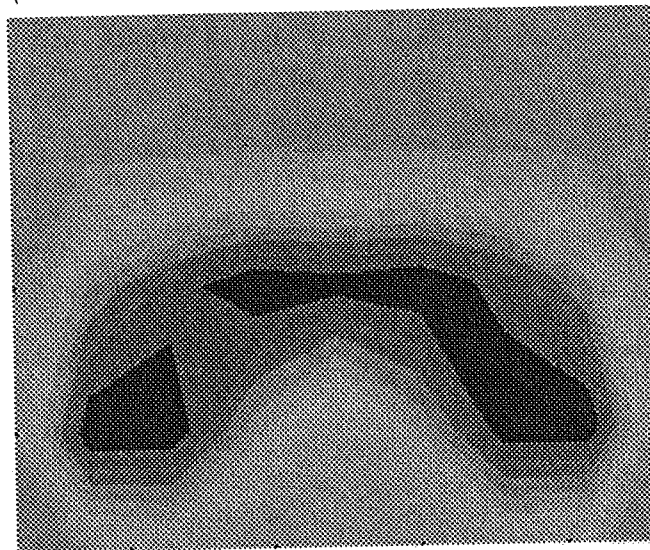


3

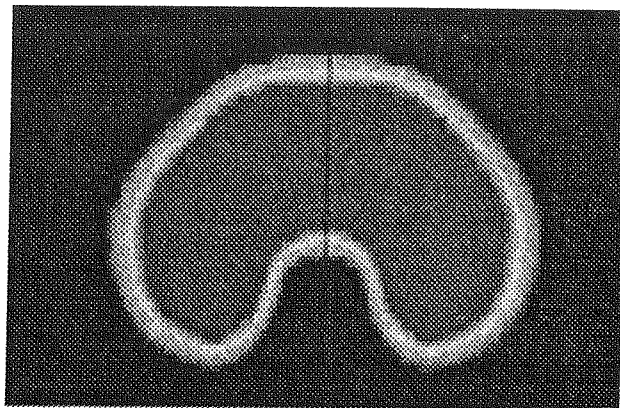


4

شکل (۵): روند تشکیل حباب اول ($u_{or}=1.5 \text{ cm/s}$ و $d_{or}=1.5 \text{ mm}$)



شکل (۶): فرم حباب اول محاسبه شده به وسیله کد



شکل (۷): فرم حباب اول محاسبه شده به وسیله Fluent (والنسیا و همکارانش ۲۰۰۲)

علائم اختصاری:

فاکتور وزنی درون یابی شده برای سلول های	ω_L	جزء حجمی سیال	F
	سمت چپ	زمان	t
فاکتور وزنی درون یابی شده برای سلول های پایینی	ω_B	سرعت در جهت X	u
فاکتور وزنی درون یابی شده برای سلول های بالایی	ω_T	سرعت پارتیکل در جهت X	up
ضریب کشش سطحی	σ	سرعت در جهت Y	v
زاویه	θ	سرعت پارتیکل در جهت Y	vp
مشخصه مختصات کارتیزین یا استوانه ای	ϵ	سرعت گاز در اریفیس	uor.....
مقدار بسیار کوچک	ϵF	قطر اریفیس	dor
فاکتور ضمنی بودن	Ω	قطر حباب	dbl
گام مکانی در جهت X	Δx	سرعت صوت	C
گام مکانی در جهت Y	Δy	فشار	P
گام زمانی	Δt	فشار کشش سطحی	Ps
		فشار داخل سلول	PN
		دبی حجمی گاز ورودی به نازل	QGo
		انحنای محلی	K
		شتاب جاذبه در جهت X	gx
		شتاب جاذبه در جهت Y	gy
		دانسیته	ρ
		دانسیته گاز	ρ_c
		دانسیته مایع	ρ_f
		دانسیته مایع	ρ_l
		پارامتر تقریب	α
		ویسکوزیته سینماتیک	ν
		تنش برشی	τ
		فاکتور over-relaxation	ω
		فاکتور وزنی درون یابی شده برای سلول های سمت	ω_R

راست

۶- مراجع

- [۱] Valencia, A; Cordova, M.; Ortega, j; "Numerical Simulation Of Gas Bubbles Formation At A Submerged Orifice In A Liquid", *Int. Comm. Heat Mass Transfer*, vol.29 No.6, 821-830,(2002)
- [۲] Kleinstreuer, Clement; "Two-Phase Flow:Theory And Applications", (2003)
- [۳] Yongjue Park, A. Lamont Tyler,Noel de Nevers, "The Chamber Orifice Interaction In The Formation Of Bubbles", *Chemical Engineering Science*,32,907-916,(1977)
- [۴] Treybal, R.. E;" *Mass Transfer Operation*", Third Edition
- [۵] Acharya, A; Mashelkar, R.. A; Ulbrecht, J;" *Bubble Formation In Non-Newtonian Liquids*", *Ind.Eng.Fundam* 17,230-232,(1978)
- [۶] Terasaka, Koichi; Tsuge, Hideki; " *Bubble Formation At A Single Orifice In Non-Newtonian Liquids*", *Chemical Engineering Science*,46,85-93,(1991)

راست

- 247-258,(2004)
- Smolianki, A; Haario, H; Luukka, P;" *Numerical Bubble Dynamics*" (2002) [۱۴]
- Davison, J. F; Schuler, B. O. G; *Trans.Instrn.Chem. Engrs.*,38,335-342,(1960) Davison J. F; Schuler, B. O. G; *Trans.Instrn Chem Engrs.*,38,335-342,(1960) [۱۵]
- Huai, Z, Li; Mouline, Youssef; Midoux, Noel; "Modelling The Bubble Formation Dynamics In Non-Newtonian Fluids" (2001) [۱۶]
- Kothe, Douglas, B; Rider, William,J;" *Comments On Modelling Integral Flows With Volume-Of-Fluid Methods*", Los Alamos National Laboratory,(1995) [۱۷]
- Krishna, R.; van Baten, J,M;" *Rise Characteristics Of Gas Bubbles In A 2D Rectangular Column: VOF Simulations Vs Experimentants*", *Int. Comm. Heat Mass Transfer*, Vol. 26, No. 7, pp 965-974, (1999) [۱۸]
- Terasaka, Koichi; Tsuge, Hideki;" *Bubble Formation At A Nozzle Submerged In Viscous Liquids Having Yield Stress*", *Chemical engineering Science*, 56,3237-3245 (2001) [۱۹]
- Laurien, Eckart; Niemann, Jens;" *Determination of the Virtual Mass Coefficient for Dense Bubbly Flows by Direct Numerical Simulation*", (2004) [۲۰]
- Merkaya, B; Durst, F; Ray, S;" *Numerical Prediction Of The Influence Of Wetting Conditions On Bubble Formation At Submerged Nozzles*",(2004) [۲۱]
- Nichols, B. D; Hirt, C. W; Hotchkiss, R. S;" *SOLA-VOF:A Solution Algorithm For Transient Fluid Flow Whit Multiple Free Boundaries* [۲۲]
- Meier, M; Andreani, M; Smith, B. L; Yadigaroglu, G;" *Numerical And Experimental Study of Large Steam-Air Bubbles Condensing In Water*",(1999) [۲۳]
- Zhang, W; Tan, R. B. H;" *A Model For Bubble Formation And Weeping At A Submerged Orifice*", *Chemical Engineering Science* ,55,6243-6250,(2000) [۲۴]
- Sarnobat, Sachin, U; Rajput, Sandeep; Bruns, Duane, D; Depaoli, David, W; Daw, C, Stuart; Nguyen, Ke;" *The Impact of External Electrostatic Fields On Gas-Liquid Bubbling Dynamics*", *Chemical Engineering Science*, 59 [۲۵]

۷- زیر نویس ها

- ۲۲) Treybal
۲۳) Finite-Volume

- ۱) SOLA-VOF
۲) CFD
۳) Copper refining
۴) Power plant
۵) Cleaning
۶) matter or media
۷) Dispersion
۸) Davison
۹) Park, Tyler, Nevers
۱۰) Ulbercht
۱۱) Trasaka, Tsuge
۱۲) Power-Law
۱۳) Shear Stress
۱۴) Zhang, Tan
۱۵) Weeping
۱۶) Runge-Kutta-Verner
۱۷) Li
۱۸) Computational Fluid Dynamics (CFD)
۱۹) Volume Of Fluid
۲۰) Chen, Li
۲۱) Valencia
۲۲) Meier
۲۳) Piecewise Linear Interface
۲۴) Krishna
۲۵) Sarnobat
۲۶) Glycerol
۲۷) Finite Difference
۲۸) Marker- and- Cell
۲۹) Explicit
۳۰) Laurien
۳۱) Davison