

شبیه‌سازی عددی جریان دو فاز گاز- سیال لخته‌ای

در یک میکرو لوله خیس

نیما سام‌خانیانی^۱ و محمدرضا انصاری^۲

دانشکده فنی مهندسی

دانشگاه تربیت مدرس

(تاریخ دریافت: ۹۰/۱۰/۱۹؛ تاریخ پذیرش: ۹۲/۰۶/۲۷)

چکیده

در این تحقیق، حل عددی مستقیم جریان غیرقابل تراکم دو فاز گاز- مایع برای حرکت حباب در میکرو لوله‌ای به شعاع ۱۰ میکرون ارائه شده است. سطح مشترک بین دو فاز از روش حجم سیال (VOF) با مدل نیروی سطحی پیوسته (CSF) تعقیب می‌شود. جریان نیوتنی است و با روش گسسته‌سازی حجم محدود و از طریق الگوریتم پیزو حل می‌شود. شبیه‌سازی عددی بر روی شبکه یکنواخت متقارن محوری و با شرایط مرزی تناوبی و برای مقادیر مختلف گرادیان فشار، دوره حباب و کسر تهی صورت می‌گیرد. در تمامی شبیه‌سازی‌ها مقدار متوسط گرادیان فشار در طول لوله ثابت می‌باشد. شبیه‌سازی عددی در محدوده رینولدزی ۵ تا ۲۱۰ برای فاز مایع و ۰/۳ تا ۷ برای فاز گاز انجام می‌گیرد. نتایج عددی با نقشه رژیم جریان دو فاز سریزاوار سازگار است. رابطه خطی بین نسبت حجمی گاز و کسر تهی وجود دارد. افت فشار و ضخامت فیلم سیال با نتایج تجربی مقایسه شده‌اند. اندازه فیلم سیال محاسبه شده به رابطه ایراندوست نزدیک‌تر می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: روش حجم سیال، دینامیک حباب، مدل یک سیالی، جریان لخته‌ای، جریان دو فاز، نرم‌افزار اوپن فوم

Numerical Simulation of Gas-liquid Slug Flow in a Wet Microtube

N. Samkhaniani and M.R. Ansari

Eng. Dep't.

Tarbiat Modares Univ.

(Received: 17 January, 2010; Accepted: 25 April, 2013)

ABSTRACT

In this paper, direct numerical simulation of two-phase incompressible gas-liquid flow for simulation of bubble motion in a microtube is presented. Microtube radius is 10 μm . The interface is tracked using volume of fluid (VOF) method with continuous surface force (CSF) model. The flow is solved using a finite volume scheme, based on PISO algorithm. Numerical simulation is performed on a axisymmetric mesh with cyclic boundary condition for different values of pressure gradient, void fraction, and bubble period. The mean pressure gradient is fixed for each simulation and the superficial Reynolds numbers of gas and liquid are 0.3 – 7 and 5 – 210, respectively. The numerical results are coincident with Serizawa regime map and there is a linear relation between void fraction and gas flow ratio. Pressure drop and liquid film thickness are compared with different empirical correlations. The computed liquid film thickness is closer to Irandoust correlation.

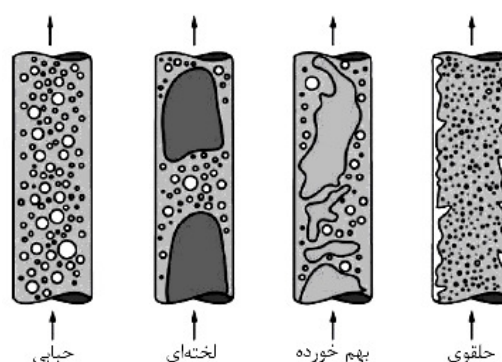
Keywords: VOF Method, Bubble Dynamics, One-fluid Model, Slug Flow, Two-Phase Flow, Open FOAM Code

۱- دانشجوی دکترا: nima.samkhaniani@modares.ac.ir

۲- دانشیار (نویسنده پاسخگو): mra_1330@modares.ac.ir

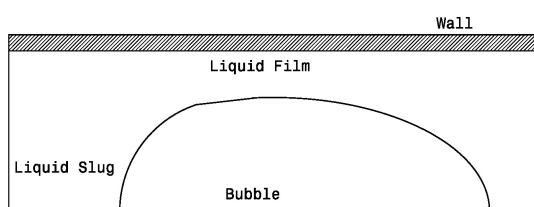
۱- مقدمه

جریان دوفاز مایع- گاز در بسیاری از فرآیندهای صنعتی و بیولوژیکی روی می‌دهد. تقسیم جریان دو فاز مایع- گاز به رژیم‌های مختلف بسیار معمول است. این تقسیم‌بندی براساس توزیع هر فاز در حجم انجام می‌گیرد. معمولاً توزیع فاز در حجم تحت تأثیر نیروهای حجمی همچون گرانش و اینرسی و نیروهای سطحی همچون تنش سطحی و نیروی لزجت قرار دارد. با این وجود ۴ و ۵ رژیم اصلی: رژیم حبابی^۱، رژیم لخته‌ای^۲، رژیم بهم خورده^۳ و رژیم حلقوی^۴ تقریباً در تمامی نمودارهای رژیم جریان مشاهده می‌شود (شکل ۱).



شکل (۱): رژیم‌های مختلف جریان دوفاز [۱].

می‌شود. در این شبیه‌سازی فرض شده است که همواره دیواره لوله خیس است یعنی همواره لایه نازک فیلم سیال حباب را از دیواره جدا می‌کند. این فرض برای ساده‌سازی شبیه‌سازی و عدم بررسی حالت خشکی محلی و موضوعاتی همچون زاویه تماس استاتیکی یا دینامیکی حباب و اثرات آن بر رفتار جریان صورت می‌گیرد (شکل ۲). در میکروکانال‌ها هنگامی که دبی جریان کم یا متوسط است جریان لخته‌ای مشاهده می‌شود. مؤلفه ظاهری این جریان که بخش اعظم نقشه رژیم جریان دوفاز در میکروکانال‌ها را دربرمی‌گیرد، قطاری از حباب^۵ است که توسط مایع از هم جدا شده‌اند. رژیم جریان لخته‌ای با نام‌های دیگر همچون جریان تیلور^۶، جریان پلاگ^۷، جریان قطعه‌ای^۸، جریان متناوب^۹ و جریان قطار حباب^{۱۰} نیز شناخته می‌شود [۳]. این جریان به طور گسترده در فرآیندهای صنعتی همچون تصفیه‌سازی، خنک‌کاری دستگاه‌های الکترونیکی و مبدل‌های حرارتی روی می‌دهد [۴].



شکل (۲): دیواره (وجود لایه سیال بین حباب و دیواره در جریان لخته‌ای).

دو روش عمده در شبیه‌سازی جریان‌های دو فاز، روش یک سیال^{۱۱} و روش دوسیال^{۱۲} است. از روش یک سیال در مقابل روش دو سیال به روش مستقیم حل جریان دو فاز نام برده می‌شود [۵]. زیرا در این روش حرکت سطح مشترک به طور مستقیم و از حل معادله جابه‌جایی حاصل می‌شود. این روش تنها نیاز به حل یک دسته از معادلات پایستاری برای حل هر دوفاز است.

در سیستم دوفاز گاز و مایع، در هر لحظه در هر ناحیه از میدان محاسباتی حداقل یکی از دوفاز وجود دارد. چنانچه دو سیال مخلوط نشدنی باشند، این دوفاز با یک لایه میانی

بین جریان دوفاز در میکروکانال‌ها با جریان دوفاز در ابعاد معمولی تفاوت‌هایی وجود دارد. مهم‌ترین تفاوت این جریان در کانال با ابعاد میکرو نسبت به کانال‌های معمولی این است که در میکروکانال‌ها جریان آرام می‌باشد. در میکروکانال‌ها رینولدز بین ۱۰۰ تا ۴,۰۰۰ مدنظر است. همچنین با کوچک‌تر شدن اندازه‌ی کانال، نیروهای سطحی در مقابل نیروهای حجمی دارای اهمیت می‌شوند. بنابراین، در میکروکانال‌ها نیروی کاپیلاری (تنش سطحی) دارای اهمیت می‌شود و جهت کانال نسبت به قائم اهمیت چندانی ندارد [۱]. همچنین رژیم جریان در میکروکانال‌ها از دینامیک ساده‌تری برخوردارتر است و آن را می‌توان یک جریان دوبعدی فرض کرد [۲].

از بررسی‌های آزمایشگاهی تنها داده‌های کلی همچون افت فشار، انتقال حرارت کلی و غیره را می‌توان مشخص کرد، اما از بررسی عددی می‌توان به اطلاعات کامل‌تری در زمینه میدان سرعت، میدان دما و غیره دست یافت. در این تحقیق به شبیه‌سازی عددی جریان لخته‌ای در میکرولوله پرداخته

- 5- Bubble Train Regime
- 6- Taylor Flow
- 7- Plug Flow
- 8- Segmented Flow
- 9- Intermittent Flow
- 10- Bubble Train Flow
- 11- One Fluid Method
- 12- Two Fluid Method

- 1- Bubbly
- 2- Slug
- 3- Churn
- 4- Annular

روش‌های فصل مشترک دقیق و پخشی برای مدل‌سازی جریان تیلور [۱۱]، مطالعه پایداری جریان تیلور به روش حجم سیال [۱۲] و مطالعه آزمایشگاهی طول حباب و افت فشار در رژیم اسلاگ در میکرولوله [۱۳] اشاره کرد.

۲- شبیه‌سازی عددی

در این بخش معادلات حاکم بر جریان دو فاز همدمما به روش یک سیال مطرح می‌شود. سپس به شرایط مرزی و نحوه آماده‌سازی مسئله پرداخته می‌شود.

۲-۱- معادلات حاکم بر جریان دو فاز همدمما

معادله پیوستگی برای کل دامنه محاسباتی از رابطه (۱) محاسبه می‌شود دو فاز غیرقابل تراکم در نظر گرفته شده‌اند و تغییر فاز روی نمی‌دهد.

$$\nabla \cdot (\bar{U}) = 0 \quad (1)$$

معادله ممنتیم از رابطه (۲) محاسبه می‌شود تنش سطحی به صورت ترم چشمه f در معادلات ممنتیم ظاهر شده است. برای حل معادلات ممنتیم از الگوریتم پیرو استفاده شده است.

$$\frac{\partial(\rho U)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U U) = -\nabla p + \nabla \cdot (\mu(\nabla U^T + \nabla U)) + f \quad (2)$$

در این رابطه، f تنش سطحی همچون یک نیروی حجمی در معادلات ممنتیم ظاهر می‌شود و مقدار آن به جز در سطح مشترک صفر می‌باشد. مقدار تنش سطحی σ در امتداد سطح مشترک یکسان نیست اما برای ساده‌سازی، آن را در تمامی طول سطح مشترک ثابت در نظر می‌گیرند. در این تحقیق روش نیروی سطحی پیوسته $^y [6]$ رابطه (۳) به کار رفته است. مزایای این روش، محاسبه تنش سطحی تنها با استفاده از مقادیر تابع نشانگر فاز می‌باشد. این روش نیاز به بازسازی سطح^۸ برای اعمال تنش سطحی را از بین می‌برد.

$$f = \sigma \kappa n \delta_s, \quad \kappa = -\nabla \cdot n = -\nabla \cdot \left(\frac{\nabla \alpha}{|\nabla \alpha|} \right), \quad \delta_s = \nabla \alpha \quad (3)$$

در این رابطه، α تابع نشانگر فاز است که بیانگر حجم سیال از یک فاز به حجم کل سلول است (رابطه ۴). این روش در سیالات غیرقابل تراکم معادله پیوستگی را ارضا می‌کند.

$$\alpha(x, t) = \frac{V_{phase1}}{V} = \begin{cases} 1 & \bar{x} \in \text{phase1} \\ 0 < \alpha < 1 & \bar{x} \in \text{interface} \\ 0 & \bar{x} \in \text{phase2} \end{cases} \quad (4)$$

مشخص از هم جدا می‌شوند، که به آن سطح مشترک^۱ گفته می‌شود. روش‌های متنوعی برای تعیین موقعیت سطح مشترک دو فاز وجود دارد. این روش‌ها به دو زیر گروه روش‌های اویلری همچون: روش حجم سیال [۶]، روش مجموع سطوح^۲ [۷] و روش‌های لاگرانژی: روش ردیابی پیشانی^۳ [۸] تقسیم می‌شوند.

روش حجم سیال براساس نحوه پیگیری سطح به دو دسته عمده تقسیم می‌شوند: (۱) تعقیب سطح از طریق بازسازی سطح (۲) تعقیب سطح از طریق فشردگی سطح و استفاده از روش‌های درجه بالا^۴ [۴].

در این تحقیق، از روش یک سیال و روش تعقیب سطح حجم سیال که در نرم‌افزار متن‌باز این فوم^۵ وجود دارد، استفاده شده‌است. این بسته دینامیک سیالات محاسباتی که کتابخانه‌ای از کدهای عددی به زبان ++C می‌باشد ظف به صورت آزاد در دسترس می‌باشد [۹].

داده‌های مربوط به میکروکانال به نحوی نامشخص است. عدم قطعیت در داده‌های تجربی ناشی از پارامترهای مختلف مانند غیریکنواختی در سطح مقطع هندسه کانال و یا اثر ورودی و خروجی و یا ناشی از اثرات ناشناخته زبری سطح است که باعث افت فشار محلی می‌گردد [۱۰]، وجود پایگاه داده متفاوت و گاهی متناقض یک بحث در میان محققان به وجود آورده است که کدام دسته از روابط تجربی صحیح است و آیا امکان استفاده از روابط تجربی ماکروکانال در میکروکانال‌ها وجود دارد یا نه؟ [۱۰] گوپتا^۶ و همکاران [۳] مروری جامع بر کارهای آزمایشگاهی و روش‌های متنوع حل عددی بر جریان تیلور در کانال‌هایی با ابعاد میکرو پرداخته‌اند. در ادامه این بررسی‌ها در این مطالعه به بررسی هیدرودینامیک جریان لخته‌ای همچون: افت فشار، ضخامت فیلم و سرعت حباب پرداخته می‌شود و نتایج حل عددی با روابط تجربی مقایسه می‌گردد. هدف از این تحقیق بررسی امکان به کارگیری روش حجم سیال برای مدل‌سازی‌های جریان دو فاز در کانال با ابعاد میکرو و صحت نتایج حاصل از این روش عددی و انتخاب داده‌های صحیح تجربی از میان داده‌های مختلف اشاره کرد. از کارهای مشابه در این زمینه می‌توان به بررسی عددی جریان تیلور به روش مجموع سطوح در میکرولوله [۲]، مقایسه و بررسی

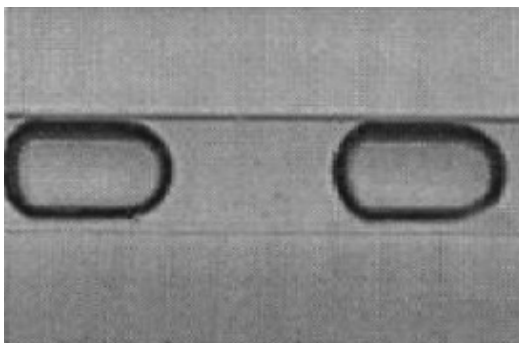
- 1 Interface
- 2- Level Set Method
- 3- Front Tracking Method
- 4- High Order Scheme
- 5- Open FOAM
- 6- Gupta

7- Continous Surface Force (CSF)

8- Interface Reconstruction

پرش فشار (رابطه ۱۰) اعمال شده است، بدین ترتیب متوسط گرادیان فشار در طول مدل سازی ثابت مانده است.

$$P_{outlet}(L) - P_{inlet}(0) = gradp \times L \quad (10)$$



شکل (۳): جریان لخته‌ای در میکرولوله [۳].

با توجه به عدد نادسن حدود ۰/۰۰۶ برای هوا، برای دیواره شرط عدم لغزش در نظر گرفته شده است. در زمان صفر یک حباب طبق رابطه (۱۱) در دامنه قرار داده شده است.

$$\left(\frac{r}{R}\right)^2 + \left(\frac{z}{L} - 0.5\right)^2 = (0.75\alpha)^2 \quad (11)$$

در این رابطه، α کسر تهی^۵، R شعاع و L طول میکرولوله است. مقدار گرادیان فشار و کسر تهی در هر شبیه‌سازی مقدار ثابتی است. مدل سازی تحت شرایط مختلف اولیه، گرادیان فشار، کسر تهی و دوره‌ی حباب در محدوده جریان اسلاگ صورت پذیرفته است. این مقادیر در جدول ۱ با قلم پر رنگ آمده است. دوره حباب، نسبت طول به شعاع میکرولوله است. جریان در زمان صفر در شرایط سکون قرار دارد.

شبیه‌سازی عددی مشابه با آزمایش‌های سریزواوا^۶ و همکاران [۱۴] بر روی میکروکانال دایره‌ای به قطر $20 \mu m$ صورت گرفته است. ویژگی‌های فیزیکی جریان در جدول ۲ آمده است.

در رابطه (۱۲) مقدار عدد اتوس که بیانگر نسبت اثرگذاری نیروی گرانش به نیروی تنش سطحی است بسیار کوچک می‌باشد به گونه‌ای که می‌توان اثر نیروی گرانش را در مسئله نادیده انگاشت.

$$E_o = \frac{g \Delta \rho d^2}{\sigma} \quad (12)$$

در این رابطه، E_o عدد اتوس و d قطر لوله می‌باشد. مقدار عدد اتوس در این تحقیق $5/44 \times 10^{-5}$ می‌باشد.

مقدار تابع نشانگر فاز از حل رابطه (۵) به دست می‌آید [۶].

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \bar{U} \cdot \nabla \alpha = 0 \quad (5)$$

رابطه بالا در سیالات غیرقابل تراکم با رابطه زیر برابر است که برای گسسته‌سازی به روش حجم محدود مناسب تر می‌باشد.

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha \bar{U}) = 0 \quad (6)$$

از آنجا که سطح مشترک در این کد عددی از نوع پخشی^۱ می‌باشد یعنی سطح مشترک نه یک خط بلکه یک ناحیه مابین ۲ تا ۳ سلول می‌باشد. برای نازک نگه داشتن ناحیه سطح مشترک از روش فشردگی سطح^۲ بهره می‌برند. در نهایت رابطه رابطه (۷) برای حرکت سطح مشترک با الگوریتم میولس^۳ حل می‌گردد. در این رابطه برای فشردگی سطح مشترک ترم $\alpha(1-\alpha)U_\alpha$ به معادله جابه‌جایی اضافه شده است که تنها در ناحیه سطح مشترک دارای مقدار است. مقدار این ترم در فاز مایع و گاز صفر است و U_α میدان سرعت مناسب برای فشردگی سطح است.

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha \bar{U}) + \nabla \cdot (\alpha(1-\alpha)\bar{U}_\alpha) = 0 \quad (7)$$

در این رابطه، ρ چگالی و μ ویسکوزیته به ترتیب از رابطه (۸) و (۹) محاسبه می‌شوند.

$$\rho(x, t) = \rho_1 + (\rho_2 - \rho_1)\alpha \quad (8)$$

$$\mu(x, t) = \mu_1 + (\mu_2 - \mu_1)\alpha \quad (9)$$

۲-۲- آماده‌سازی مدل

جریان لخته‌ای (شکل ۳) شامل جریان متناوب و پیوسته حباب‌های تقریباً یکسان است که با لایه نازک سیال از دیواره جدا می‌شوند.

دینامیک حباب در میکروکانال‌ها ساده‌تر است و جریان لخته‌ای در میکرولوله، متقارن محوری و متناوب می‌باشد. بنابراین برای کاهش حجم محاسبات، هندسه متقارن محوری و شرایط تناوبی^۴ در مرزهای ورودی و خروجی اعمال شده است. با اعمال شرایط مرزی تناوبی، مقادیر جریان در خروجی به مقادیر ورودی نگاشت می‌شود. با عبور جریان از لوله، نیروی لزجت (اصطکاک) منجر به افت فشار در طول مسیر می‌شود. برای جایگزینی فشار افت‌کرده بین خروجی لوله و ورودی به آن

1- Diffuse Interface

2- Interface Compression Method

3- MULES: Multi-dimensional Universal Limiter with Explicit Solution

4- Periodic Condition

5- Void Fraction

6- Serizawa

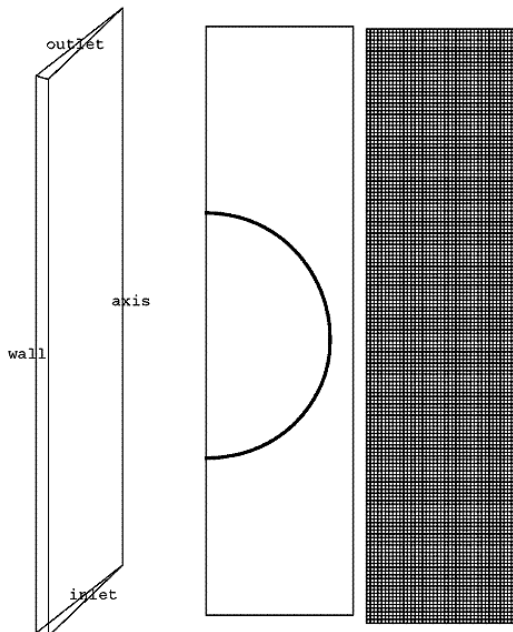
جدول (۱): شرایط آماده‌سازی مدل عددی و نتایج حاصل از حل عددی.

| حالت | کسر تهی | گرادیان فشار (Mpa/m) | تناوب حباب (L/R) | سرعت ظاهری مایع (m/s) | سرعت ظاهری گاز (m/s) | نسبت جریان گاز β |
|------|---------|-------------------------|---------------------|--------------------------|-------------------------|---------------------------|
| A | ۰/۲ | ۸۵ | ۴ | ۰/۷۳۶ | ۰/۲۸۱ | ۰/۲۸ |
| B | ۰/۲ | ۵۷۰ | ۴ | ۴/۹۷۹ | ۱/۹۳۲ | ۰/۲۸ |
| C | ۰/۲ | ۸۵۰ | ۲ | ۷/۲۲۳ | ۲/۹۷۴ | ۰/۲۹ |
| D | ۰/۲ | ۸۵۰ | ۳ | ۷/۷۶۲ | ۳/۳۶ | ۰/۲۹۵ |
| E | ۰/۲ | ۸۵۰ | ۴ | ۷/۹۷۵ | ۳/۸۲۲ | ۰/۳۲ |
| F | ۰/۲ | ۸۵۰ | ۸ | ۸/۳۶۸ | ۳/۸۶ | ۰/۳۱۵ |
| G | ۰/۲ | ۱۰۰۰ | ۴ | ۹/۲ | ۵/۰۴ | ۰/۳۵ |
| H | ۰/۳ | ۸۵ | ۴ | ۰/۴۹ | ۰/۲۸ | ۰/۳۶ |
| I | ۰/۴ | ۸۵ | ۴ | ۰/۳۷ | ۰/۳۲ | ۰/۴۶ |

است که از رابطه (۱۳) محاسبه می‌شود. در این رابطه، Q_L و Q_G به ترتیب دبی حجمی جریان مایع و گاز و A سطح مقطع کانال دایره‌ای می‌باشد.

$$j_L = \frac{Q_L}{A}, j_G = \frac{Q_G}{A} \quad (12)$$

در شکل ۵ نتایج شبیه‌سازی‌های عددی (●) در محدوده جریان لخته‌ای (□) بر روی نقشه جریان سرریزوا و همکاران [۱۴] قرار گرفته است. شبیه‌سازی در محدوده رینولدز ۵-۲۱۰ برای فاز مایع و ۰/۳-۷ برای فاز گاز انجام شده است.



شکل (۴): از چپ به راست: هندسه متقارن محوری، حباب در لحظه صفر و مش یکنواخت.

جدول (۲): ویژگی‌های فیزیکی جریان.

| | | |
|---------------------|----------------------|----------|
| چگالی مایع | ۱۰۰۰ | kg/m^3 |
| چگالی گاز | ۱/۲ | kg/m^3 |
| لزجت سینماتیکی مایع | $8/9 \times 10^{-7}$ | m^2/s |
| لزجت سینماتیکی گاز | $1/5 \times 10^{-5}$ | m^2/s |
| تنش سطحی | ۰/۰۷۲ | N/m |

۳- نتایج

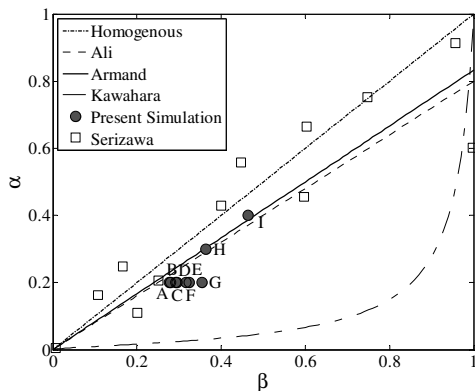
مدل‌سازی بر روی شبکه متقارن محوری با سلول‌های یکنواخت و با تعداد مختلف گره آزموده شده است و اندازه سلول $0.25 \mu m$ برابر با ۴۰ سلول در جهت شعاع می‌باشد که برای مدل‌سازی کفایت می‌کند (شکل ۴). مدل‌سازی تا زمانی که جریان به حالت پایدار برسد ادامه می‌یابد. جریان لخته‌ای در زمانی کمتر از 10^{-4} ثانیه به حالت پایداری می‌رسد. در کسر تهی‌های بالا (بالتر از ۰/۴) برای مدل‌سازی جریان لخته‌ای و پیگیری سطح نزدیک دیواره، از آنجا که سطح مشترک بین ۲ تا ۳ سلول پخش می‌باشد، پالایش مش^۱ نزدیک دیواره ضروری است.

۳-۱- نقشه رژیم جریان

مقدار گرادیان فشار و کسر تهی برای همه‌ی حالات مدل‌سازی در جدول ۱ داده شده است، سرعت سطحی^۲ جواب مسئله است

1- Mesh Refinement
2- Superficial Velocity

خطی بین کسر تهی و نسبت جریان حجمی گاز را نشان می‌دهد که به رابطه تجربی علی و همکاران [۱۶] برای مینی کانال مستطیلی و رابطه آرمند [۱۵] برای کانال‌های معمولی نزدیک می‌باشد.



شکل (۶): نسبت جریان حجمی گاز (β) به کسر تهی (α)، مقایسه حل عددی (●) با نتایج سریزاوا (□) و روابط تجربی جدول ۳.

۳-۳- افت فشار

در این بخش افت فشار (گرادیان فشار در جدول (۱) با رابطه معروف لاکهارت-مارتینلی^۲ مقایسه شده است. این رابطه برای محاسبه افت فشار جریان دو فاز در کانال‌هایی با ابعاد معمولی ارائه شده است. این مقایسه برای بررسی امکان اعمال این رابطه در میکروکانال‌ها صورت گرفته است. پارامتر لاکهارت-مارتینلی و ضریب اصطکاک^۳ در رابطه (۱۶) تعریف شده است.

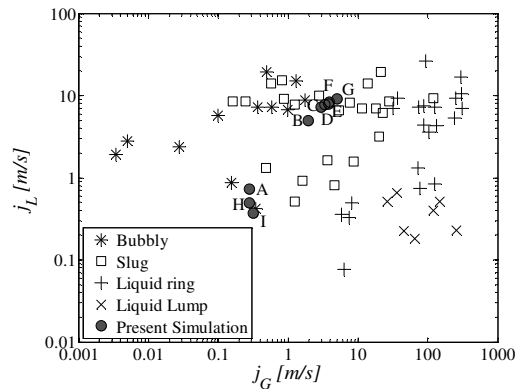
$$\Phi_L^2 = \frac{(-dP/dz)_{TP}}{(-dP/dz)_{LO}}, \quad X^2 = \frac{(-dP/dz)_{LO}}{(-dP/dz)_{GO}} \quad (16)$$

چیشهلوم^۴ [۱۸] پارامتر لاکهارت-مارتینلی را با رابطه (۱۷) به ضریب اصطکاک مرتبط کرد، که در آن، C ضریب چیشهلوم از جدول ۴ محاسبه می‌شود.

$$\Phi_L^2 = 1 + \frac{C}{X} + \frac{1}{X^2} \quad (17)$$

میشیما و هیبیکی [۱۹] برای جریان دو فاز آب و هوا در مینی لوله به ابعاد ۴-۱ mm رابطه (۱۸) را برای محاسبه مقدار C پیشنهاد داده‌اند که در این تحقیق، مقدار C از رابطه زیر ۰/۱۳ می‌باشد:

$$C = 2[1 - \exp(-0.319D_h)] \quad (18)$$



شکل (۵): مقایسه حل عددی (●) جریان لخته‌ای با نقشه رژیم سریزاوا و همکاران [۱۴].

۲-۲- نسبت جریان حجمی گاز

جدول ۳ روابط تجربی بین کسر تهی (α) و نسبت جریان حجمی گاز^۱ (β) را نشان می‌دهد. نسبت جریان حجمی گاز از رابطه (۱۴) محاسبه می‌شود، U_G سرعت گاز و U_{tp} سرعت جریان دو فاز می‌باشد.

$$\beta = \frac{Q_G}{Q_G + Q_L} = \frac{j_G}{j_L + j_G} = \alpha \frac{U_G}{U_{tp}} \quad (14)$$

جدول (۳): روابط تجربی بین کسر تهی و جریان حجمی گاز.

| توضیحات | مراجع | روابط تجربی |
|-------------------------------|---------------|--|
| لوله با ابعاد معمولی | آرمند [۱۵] | $\alpha = 0.833\beta$ |
| کانال مستطیلی $D_h = 1mm$ | علی [۱۶] | $\alpha = 0.8\beta$ |
| جریان همگن $U_G = U_L$ | - | $\alpha = \beta$ |
| میکرولوله $D_h = 100\mu m$ | کاواهارا [۱۷] | $\alpha = \frac{C_1\beta^{0.5}}{1 - C_2\beta^{0.5}}$ |

ثوابت C_1 و C_2 در رابطه کاواهارا به ابعاد کانال حساس می‌باشد و از رابطه زیر تعریف می‌شوند:

$$C_1 = \frac{0.266}{1 + 13.6 \exp(-6.88D_h)}, \quad C_2 = 1 - C_1, \quad (15)$$

که در آن، D_h قطر هیدرودینامیکی کانال برحسب میلی‌متر می‌باشد. در این تحقیق $D_h = 0.2 mm$ می‌باشد و مقدار $C_1 = 0.207$ و $C_2 = 0.793$ از رابطه (۱۵) به دست می‌آید. در شکل ۶ نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی با روابط تجربی جدول ۳ مقایسه شده است. نتایج شبیه‌سازی عددی یک رابطه

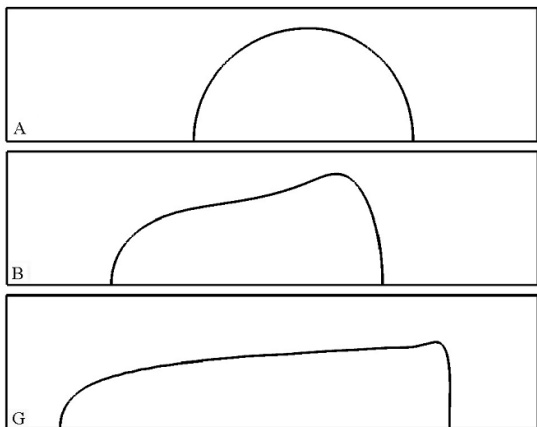
2- Lockhart-Martinelli Parameter

3- Friction Multiplier

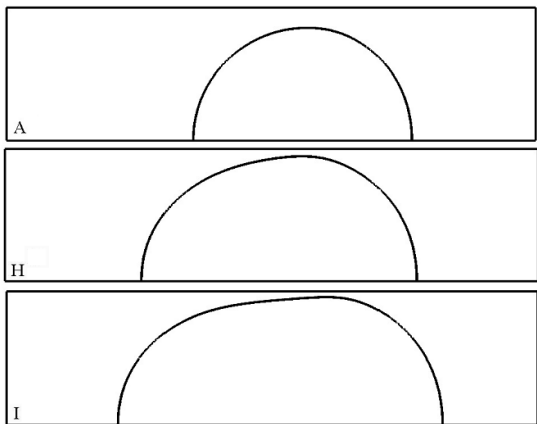
4- Chisholm

1- Gas Flow Ratio

جواب قطعی درباره تأثیر هر یک از این پارامترها بر شکل حباب نیاز به بررسی بیشتر دارد. آزمایش‌ها نشان می‌دهد که ضخامت سیال به عدد کاپیلاری ($Ca_b = \mu_l U_b / \sigma$) بستگی دارد که U_b سرعت مطلق حباب^۱ است.



شکل (۸): تغییر شکل حباب با افزایش گرادیان فشار، A، B (۸۵)، G و (۱۰۰۰).

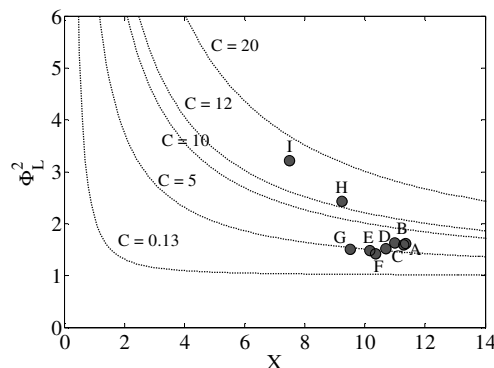


شکل (۹): تغییر شکل حباب با افزایش کسر تهی، A (۰/۲)، H (۰/۳) و I (۰/۴).

بریترتون [۲۱] فرض کرد که جریان لایه فیلم سیال، بین حباب و دیواره، خزشی است. او از تئوری روغنکاری به رابطه‌ای تحلیلی زیر برای محاسبه اندازه فیلم سیال دست یافت. هنگامی که عدد کاپیلاری به صفر میل می‌کند. یعنی برای مقادیر کوچک کاپیلاری رابطه (۱۹) باید جواب دقیق مسئله باشد، اما داده‌های آزمایشگاهی نشان می‌دهد که اندازه لایه فیلم سیال از مقدار تحلیلی بریترتون بزرگ‌تر می‌باشد.

جدول (۴): ضرایب چیشهولم برای رابطه (۱۷).

| C | گاز | مایع |
|----|-------|-------|
| ۲۰ | مغشوش | مغشوش |
| ۱۲ | مغشوش | آرام |
| ۱۰ | آرام | مغشوش |
| ۵ | آرام | آرام |



شکل (۷): مقایسه افت فشار از حل عددی با رابطه لاکهارت - مارتینلی برای محاسبه‌ی افت فشار.

در میکروکانال‌ها جریان مایع و گاز هر دو آرام می‌باشد. نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی نشان می‌دهد که رابطه لاکهارت- مارتینلی برای کسر تهی ۰/۲ صحیح می‌باشد، اما با افزایش کسر تهی انحراف از مقدار رابطه چیشهولم برای حالت آرام دو فاز $C=5$ بزرگ‌تر می‌شود.

در شکل ۷ رابطه چیشهولم برای حالت‌های I و H که به ترتیب دارای کسر تهی ۰/۳ و ۰/۴ هستند، جریان مغشوش برای فاز گازی پیش‌بینی می‌کند. بنابراین استفاده از رابطه لاکهارت - مارتینلی با استفاده از ضرایب چیشهولم برای میکروکانال‌ها باید با احتیاط صورت بپذیرد.

۳-۴- فیلم سیال

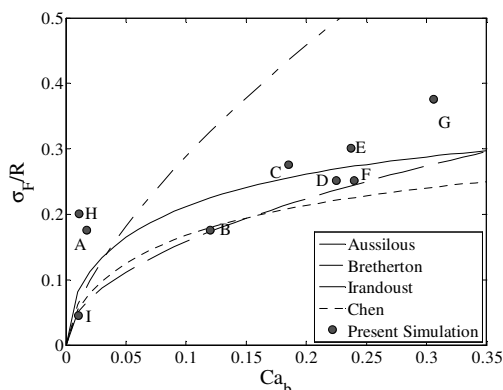
در جریان لخته‌ای حباب سریع‌تر از مایع حرکت می‌کند، ضخامت لایه فیلم سیال در بسیاری از کاربردهای صنعتی همچون پوشش کاتالیزست در راکتورهای مونولیت [۲۰] و یا انتقال حرارت از دیواره کانال به مایع [۲] دارای اهمیت است. در این بخش اندازه فیلم سیال از پارامترهای هندسی جریان لخته‌ای با روابط تجربی و تحلیلی مقایسه می‌شود.

شکل حباب در جریان لخته‌ای به گرادیان فشار (شکل ۸)، کسر تهی (شکل ۹) و طول تناوب حباب بستگی دارد. اما

1- Bubble Absolute Velocity

جدول (۵): روابط تجربی برای محاسبه ضخامت فیلم سیال در جریان لخته‌ای.

| مراجع | محدوده اعمال رابطه | ضخامت فیلم سیال بی‌بعد δ_F/R |
|--------------------------|---------------------------------------|--|
| چن [۲۲] | $5 \times 10^{-5} \leq Ca \leq 0.3$ | $0.5 \times Ca^{1/2}$ |
| آسیلوس و همکاران [۲۳] | $10^{-3} \leq Ca \leq 1.4$ | $\frac{1.34 \times Ca^{2/3}}{(1 + 2.5(1.34 \times Ca^{2/3}))}$ |
| ایراندوست و همکاران [۲۰] | $9.5 \times 10^{-4} \leq Ca \leq 1.9$ | $0.36(1 - \exp(-3.08 \times Ca^{0.54}))$ |



شکل (۱۰): مقایسه اندازه فیلم سیال با روابط تجربی جدول ۶.

۴- جمع‌بندی

در این تحقیق جریان پیوسته حباب در میکروکانال دایره‌ای مدل‌سازی شد. در شبیه‌سازی عددی فرض شد که همواره بین دیواره و حباب یک لایه نازک سیال وجود دارد. همچنین با فرض هندسه متقارن محوری و شرایط مرزی تناوبی برای مدل عددی از حجم محاسبات کاسته شد. تمامی نتایج حاصل از حل عددی به درستی در محدوده جریان لخته‌ای در نقشه رژیم جریان سریزاور قرار گرفت. در بررسی روابط تجربی امکان اعمال روابط تجربی جریان دوفاز در ماکرولوله‌ها برای جریان در میکرولوله‌ها مورد توجه قرار گرفت. رابطه خطی بین کسر تهی و نسبت حجمی گاز را ابتدا آرمنند برای ماکرولوله‌ها ارائه کرد و سپس بررسی تجربی علی‌بر روی میکروکانال‌های مستطیلی نشان داد که چنین رابطه خطی برای میکروکانال‌های مستطیلی نیز صادق است. در این تحقیق از حل عددی مشخص شد که این رابطه در میکروکانال دایره‌ای نیز برقرار است. در رابطه با افت فشار مشخص شد که امکان استفاده از روابط لاکهارت - مارتینلی تنها برای کسر تهی‌های پایین (کوچک‌تر از ۰/۲) وجود دارد. همچنین ضخامت فیلم سیال با تعدادی از روابط تجربی مورد مقایسه قرار گرفت این مقایسه

این اختلاف بین مقدار تحلیلی و مقدار تجربی با نیروهای بین مولکولی، زبری سطح دیواره و غیره توجیه می‌شود [۴].

$$\frac{\delta_F}{R} = 1.34 Ca^{2/3} \quad (19)$$

تعدادی دیگری از روابط تجربی و محدوده اعمال آن در جدول ۵ آمده است. ابعاد هندسی حباب شامل طول و پهناي حباب از حل عددی در جدول ۶ آورده شده است.

جدول (۶): پارامتر هندسی حباب در جریان لخته‌ای.

| حالت | طول حباب (μm) | پهنای حباب (μm) |
|------|----------------------------|------------------------------|
| A | ۱۶/۳ | ۸/۲۴ |
| B | ۲۰/۳ | ۸/۲۴ |
| C | ۱۱/۷ | ۷/۲۴ |
| D | ۱۸/۷ | ۷/۴۹ |
| E | ۲۵/۲ | ۶/۹۹ |
| F | ۳۹/۳ | ۷/۴۹ |
| G | ۲۹/۰ | ۶/۲۴ |
| H | ۲۸/۰ | ۷/۹۹ |
| I | ۲۴/۲ | ۹/۵۵ |

شکل ۱۰ نشان می‌دهد که اندازه فیلم سیال از حل عددی از اندازه فیلم سیال محاسبه شده از رابطه بریترتون کوچک‌تر است و توافق نسبتاً مناسبی بین رابطه ایراندوست و همکاران [۲۰] و مدل‌سازی حاضر وجود دارد. در روابط فوق از اثر نیروی اینرسی صرف‌نظر گشته است برای آنکه در مقادیر کوچک کاپیلاری وابستگی کمی بین داده‌های تجربی و عددی رینولدز Re وجود دارد.

11. Aland, S., Boden, S., Hahn, A., Klingbeil, F., Weismann, Ma., and Weller, S. "Quantitative Comparison of Taylor Flow Simulations, Based on Sharp- and Diffuse-interface Models", *Int. J. Numer. Meth. Fluids*, Vol. 00, No. 1, pp. 1-20, 2012.
12. Öztaskin, M. C., Wörner, M., and Soyhan, H. S. "Numerical Investigation of the Stability of Bubble Train Flow in A Square Minichannel", *Phys. Fluids*, Vol. 21, No. 4, pp. 1-17, 2009.
13. Kawahara, A., Sadatomi, M., and Shimokawa, S. "Lengths of Bubble and Slug and Pressure Drop In Gas-liquid Slug Flow in Microchannels", *Multiphase Sci. and Tech.*, Vol. 24, No. 3, pp.239-256, 2012.
14. Serizawa, A., Feng, Z., and Kawara, Z., "Two-phase Flow in Microchannels", *Exp. Therm. Fluid Sci.*, Vol. 26, No.6, pp. 703-714, 2002.
15. Armand, A.A., and Treschev, G.G. "The Resistance During the Movement of a Two-phase Systems in Horizontal Pipe", *Izv. Vses. Teplotek. Inst. 1*, Vol. 1, No. 1, pp. 16-23, 1946.
16. Ali, M.I., Sadatomi, M., and Kawaji, M. "Adiabatic Two-phase Flow in Narrow Channels between Two Flat Plates", *Can. J. Chem. Eng.*, Vol. 71, No. 5, pp. 657-666, 1993.
17. Kawahara, A., Chung, P.M.Y., and Kawaji, M. "Investigation of Two Phase Flow Pattern, Void Fraction and Pressure Drop in a Microchannel", *Int. J. Multiphase Flow*, Vol. 28, No. 9, pp. 1411-1435, 2002.
18. Chisholm, D., "A Theoretical Basis for the Lockhart-Martinelli Correlation for Two-phase Flow", *Int. J. Heat and Mass Transfer*, Vol. 10, No. 12, pp. 1767-1778, 1967.
19. Mishima, K. and Hibiki, T. "Some Characteristics of Air-water Two Phase Flow in Small Diameter Vertical Tubes", *Int. J. Multiphase Flow*, Vol. 22, No. 4, pp. 703-723, 1996.
20. Irandoust, S. and Andersson, B. "Mass-transfer and Liquid-phase Reactions in a Segmented 2-phase Flow Monolithic Catalyst Reactor", *Chem. Eng. Sci.*, Vol. 43, No. 12, pp. 1983-1988, 1988.
21. Bretherton, F.P. "The Motion of Long Bubbles in Tubes", *J. Fluid Mech.*, Vol. 10, No. 2, pp. 166-188, 1961.
22. Chen, J.D. "Measuring the Film Thickness Surrounding a Bubble Inside a Capillary", *J. Colloid and Interface Sci.*, Vol. 109, No. 2, pp. 341-349, 1986.
23. Aussilous, P. and Quéré, D. "Quick Deposition of a Fluid on the Wall of a Tube", *Phys. Fluids.*, Vol. 12, No. 10, pp.2367-2371, 2000.

نشان داد که شبیه‌سازی عددی شکل حباب را به طور قابل قبولی نشان می‌دهد. البته بررسی جریان پیوسته حباب در کانال‌ها به بررسی‌ها بیشتری نیاز دارد. از موضوعاتی که می‌تواند در تحقیقات بعدی مورد توجه قرار گیرد، بررسی خشکی محلی با بررسی تماس حباب با دیواره و زاویه تماس دینامیکی یا استاتیکی، بررسی انتقال حرارت جابه‌جایی بدون تغییر فاز و یا همراه با تغییر فاز می‌باشد.

۵- مراجع

1. Thome, J.R. "Boiling in Microchannels: A Review of Experiment and Theory", *Int. J. Heat and Fluid Flow*, Vol. 25, No. 2, pp. 128-139, 2004.
2. Fukagata, K., Kasagi, N., Ua-arayaporn, P., and Himeno, T. "Numerical Simulation of Gas-liquid Two-phase Flow and Convective Heat Transfer in a Micro Tube", *Int. J. Heat and Fluid Flow*, Vol. 28, No. 1, pp. 72-82, 2007.
3. Gupta, R., Fletcher, D.F., and Haynes, B.S. "Taylor Flow in Microchannels: A Review of Experimental and Computational Work", *J. Comput. Multiphase Flows*, Vol. 2, No. 1, pp. 1-32, 2010.
4. Angeli, P. and Gavriilidis, A. "Hydrodynamics of Taylor Flow in Small Channels: A Review", *The Institution of Mechanical Engineers, Part C: J. Mech. Eng. Sci.*, Vol. 222, No. 5, pp. 737-751, 2008.
5. Lakehal, D., Meier, M., and Fulgosi, M. "Interface Tracking Towards the Direct Simulation of Heat and Mass Transfer in Multiphase Flows", *Int. J. Heat and Fluid Flow*, Vol. 23, No. 3, pp. 242-257, 2002.
6. Brackbill, J.U., Kothe, D.B., and Zemach, C. "A Continuum Method for Modeling Surface Tension", *J. Comput. Phys.*, Vol. 100, No. 2, pp. 335-354, 1992.
7. Sussman, M., Fatemi, E., Smereka, P., and Osher, S. "An Improved Level Set Method for Incompressible Two-phase Flows", *Comp. Fluids*, Vol. 27, No. 5, pp. 663-680, 1998.
8. Unverdi, S. and Tryggvason, G. "A Front-tracking Method for Viscous, Incompressible Multi-fluid Flows", *J. Comput. Phys.*, Vol. 100, No. 1, pp. 25-37, 1992.
9. Weller, H. G., Taboral, G., Jasak, H., and Fureby, C. "A Tensorial Approach to Computational Continuum Mechanics, Using Object-oriented techniques", *Computers In Phys.*, Vol. 12, No. 1, pp. 620-632, 1998.
10. Ghiaasiaan, S.M. "Two Phase Flow, Boiling and Condensation in Conventional and Miniature System", Cambridge Univ. Press, 2008, New York.