



شبیه‌سازی عددی و بررسی آزمایشگاهی الگوهای جریان دو فازی آب- هوا در کانال‌های افقی ریب‌دار

محمد رضا انصاری^{1*}، سحر جعفری²، رضا قیصری³، پویان ادیبی⁴

- 1- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران
 - 2- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران
 - 3- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه کلارکسون، نیویورک
 - 4- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس
- * تهران، صندوق پستی 143-14115. mra_1330@modares.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 10 آذر 1392
پذیرش: 02 بهمن 1392
ارائه در سایت: 23 مهر 1393
کلید واژگان:
جریان دو فازی
رژیم جریان
کانال ریب‌دار
شبیه‌سازی عددی
روش تجربی

چکیده

در این مقاله جریان دو فازی هوا-آب در کانال افقی ریب‌دار، به طور تجربی و عددی بررسی شده است. مطالعات تجربی در آزمایشگاه جریان چند فازی دانشگاه تربیت مدرس و شبیه‌سازی عددی با استفاده از مدل حجم سیال انجام شده است. به منظور بررسی تأثیر ریب‌ها بر رژیم‌های جریان، ریب‌هایی با عرض و گام‌های مختلف، روی دیواره‌های جانبی کانال تعبیه و نقشه رژیم‌های جریان ترسیم شده است. با توجه به بحرانی بودن رژیم اسلاگ در کانال‌های طولانی، جزئیات آن در کانال‌های صاف و ریب‌دار بررسی شده است. طبق مشاهدات تجربی، در کانال ریب‌دار رژیم لایه‌ای اتفاق نمی‌افتد. ریب‌گذاری محدوده رژیم اسلاگ در نقشه جریان را به طور قابل توجهی کاهش می‌دهد. مقایسه نتایج عددی و تجربی رژیم‌های مختلف جریان در سرعت‌های مشابه نشان می‌دهد که حلگر بکار رفته در پیش‌بینی رژیم‌های مختلف جریان دو فازی توانمند است. از مقایسه دو کانال ریب‌دار مشخص شد که اولین اسلاگ در کانال با ریب‌های کوچک در فاصله دورتر و زمان طولانی‌تر نسبت به ریب بزرگ تشکیل می‌شود. همچنین نتایج عددی و مشاهدات تجربی نشان می‌دهد، ریب‌دار کردن کانال در محدوده سرعت‌های کارکرد منجر به اسلاگ در کانال صاف، محدوده تشکیل اسلاگ را کوچک می‌کند اما در محدوده سرعت‌های منجر به اسلاگ در کانال ریب‌دار، شرایط تغییر رژیم به جریان اسلاگ تسهیل می‌شود که به نفع بهره‌بردار نخواهد بود.

Numerical simulation and experimental investigation of the air-water two-phase flow patterns inside a ribbed horizontal duct

Mohammad Reza Ansari^{1*}, Sahar Jafari¹, Reza Gheisari², Pouyan Adibi³

- 1- Faculty of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran
 - 2- Department of Mechanical and Aeronautical Engineering, Clarkson University, Potsdam, New York, United States
 - 3- Department of Mechanical Engineering, Hormozgan University, Bandar-Abbas, Iran
- * P.O.B. 14115- 143 Tehran, mra_1330@modares.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 01 December 2013
Accepted 22 January 2014
Available Online 15 October 2014

Keywords:
Two-Phase Flow
Flow Regime
Ribbed Rectangular Duct
Numerical Simulation

ABSTRACT

In this paper, two-phase air-water flow was investigated experimentally and simulated numerically using VOF method. The tests are conducted in Multiphase Flow Lab. of Tarbiat Modares University. In order to evaluate the rib effect on flow regimes, experimental investigation was conducted with ribs of different width and pitch where assembled on front and back side walls (side walls) of the duct during different test runs. The rib width and pitch were held constant during each test. The experimental work considered for different regimes of wavy, plug and slug which generated in the ducts with and without rib applying various phase velocities. The effects of using ribs on regime boundaries are presented in the flow diagrams and discussed in details. Compared to the smooth duct, the ribbed duct affects the different regime boundary positions noticeably. The results showed that in the duct with small sizes ribs, the first slug initiates at longer time and distance in compare to the duct equipped with bigger size ribs. The results show that for normal operational flow velocities, the ribbed duct decreases the slug area on flow diagram map in compare to smooth duct. However, ribs facilitate the slug regime initiation for phase velocities in accordance with slug generation, which is not benefit of operational condition.

1- مقدمه

بهبود عملکرد بخش‌های گوناگون این سیستم‌ها مسئله‌ای مورد توجه است. لوله‌ها و کانال‌های ریب‌دار باعث افزایش انتقال حرارت در جریان‌های تک فاز و دو فاز و نیز بهبود انتقال حرارت در پدیده‌های جوشش و چگالش می‌شود.

رفتار جریان‌های دو فازی در صنایع مختلف، ملموس و استفاده از ریب¹ برای

1- Rib

Please cite this article using:

M.R. Ansari, S. Jafari, R. Gheisari, P. Adibi, Numerical simulation and experimental investigation of the air-water two-phase flow patterns inside a ribbed horizontal duct, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 14, pp. 217-226, 2015 (In Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

رژیم کاملاً ناپایدار است و دبی جرمی، سرعت و فشار در هر مقطع از کانال در هر لحظه در حال تغییر شدید است. این امر باعث خسارات زیادی در کانال‌ها و سیستم‌های خطوط لوله می‌شود. شکل 4 طرح‌واره‌ای از این نوع رژیم را نشان می‌دهد.

2- مروری بر تحقیقات پیشین

زارنت و چارلز [2] جریان دو فازی آب و هوا را در فشار اتمسفر در لوله افقی به قطر داخلی 1/9 سانتی‌متر مطالعه کردند. ایشان از سیم‌های مارپیچی با سطح مقطع عرضی 0/81 سانتی‌متر مربع و دو نسبت گام به قطر 1/6 و 2/8 به عنوان ریب استفاده کردند. نتایج نشان داد که تغییر مرزهای جریان در این نسبت‌های گام قابل صرف‌نظر است.

ویسمن و همکاران [3] آزمایش‌هایی را در جریان دو فازی آب و هوا در لوله‌های ریب‌دار افقی در دمای اتاق و فشار اتمسفر انجام دادند. لوله‌ها به قطر 2/54 و 5/1 سانتی‌متر هم به صورت یک راهه و هم دو راهه با ارتفاع‌های 2/5، 0/64 و 0/32 سانتی‌متر با نسبت چرخش 1/2، 2/1، 2/3 و 2/5 در 3 متری ورودی لوله تعبیه شده بود. نتیجه تحقیق ایشان، ارائه نقشه جریان به منظور پیش‌بینی مرز بین رژیم‌های مختلف جریان (یعنی رژیم‌های آرام، موجی، اسلاگ و حلقوی) بوده است.

در تحقیق دیگر توسط ویسمن و همکاران [4] رفتار مبرد R-113 در حالت دو فازی درون لوله‌های افقی و با حضور ریب‌های مارپیچ مطالعه شد. مقطع ریب‌ها، دایروی به ارتفاع 0/32 سانتی‌متر و نسبت چرخش حلقوی 2/5 بود. از دو سری ریب یک راهه و دو راهه استفاده شد. جنس ناحیه آزمون لوله، شیشه‌ای به قطر داخلی 2/54 سانتی‌متر و طول 1/52 متر بود. آزمایش‌ها در دمای اتاق با فشار 3 تا 5 بار انجام شده‌اند. هدف از مطالعه ایشان به طور خاص بررسی تأثیر خصوصیات سیال بر روی رژیم‌های جریان در لوله‌های ریب‌دار بوده است.

گرادک و لبوچه [5] دیاگرام‌های جریان همسو را برای نیتروژن و آب در شرایط آدیاباتیک در یک لوله ریب‌دار با زاویه موج 90 و 40 درجه ارائه دادند. همچنین ایشان نتیجه گرفتند که در سرعت‌های ظاهری مایع کمتر از 0/3 متر بر ثانیه رژیم جریان آرام و در سرعت‌های ظاهری بالاتر از 0/3، جریان حبایی است.

کیم و همکاران [6] مسئله را با رویکرد بررسی مکانیزم‌های انتقال بین دو فاز مایع و گاز در جریان‌های دو فازی غیر همسو انجام دادند که نتایج آزمایش‌ها در مورد رژیم‌های جریان، کسر حجمی و سرعت برخاست اسلاگ ارائه شد. ریب‌های مورد استفاده، فتر مارپیچ با مقطع دایروی بود که در لوله عمودی تعبیه شده بودند.

انصاری و ارزندی [7] نقشه رژیم جریان در کانال افقی ریب‌دار - 3/6 متر ابتدایی کانال 36 متری ریب‌دار شده بود- از جنس پلکسی گلاس با مقطع مستطیلی به ابعاد 5 در 10 سانتی‌متر ارائه نمودند. ریب‌ها به صورت رودرو در کف و سقف کانال چیده شده بودند. همچنین ایشان اثر ارتفاع ریب‌ها بر تغییر مرزهای گذار بین رژیم‌ها را مطالعه و ناپایداری هیدرودینامیکی جریان دو فازی در نتیجه تغییر ارتفاع ریب‌ها را بررسی نمودند.

تحقیقات تئوری مسائل مختلف سیستم‌های چند فازی با استفاده از روش‌های دینامیک سیالات محاسباتی⁹ انجام می‌شود. این روش‌ها اجازه شبیه‌سازی جریان چند سیالی¹⁰ را در هندسه‌های پیچیده می‌دهد. همچنین



شکل 1 طرح‌واره جریان لایه‌ای



شکل 2 طرح‌واره جریان موجی



شکل 3 طرح‌واره جریان پلاگ



شکل 4 طرح‌واره جریان اسلاگ

همچنین وجود ریب، ایجادکننده جریان چرخشی و مغشوش است. در لوله‌های با مقطع دایروی، وجود ریب باعث رانش مایع به سمت دیواره لوله و جریان بخار به سمت مرکز لوله می‌شود. در چنین شرایطی جدایش دو فاز شرایط مطلوب شار حرارتی بحرانی¹ را ایجاد می‌کند.

در رژیم‌های استاندارد تعریف شده، می‌توان به رژیم لایه‌ای²، موجی³، پلاگ⁴ و اسلاگ⁵ اشاره کرد. در سرعت‌های پایین گاز و مایع رژیم حاکم بر جریان، رژیم لایه‌ای است. سطح مشترک بین دو فاز در این رژیم هموار است. شکل 1 طرح‌واره این رژیم را نشان می‌دهد.

با افزایش سرعت‌های دو فاز، رژیم جریان به رژیم موجی تغییر می‌یابد. سطح مشترک دو فاز موجی است. این امواج با دیواره بالایی هیچ برخوردی ندارند (شکل 2).

در حالتی که سرعت فاز مایع زیاد و فاز گاز کم باشد، رژیم حاکم پلاگ است. در این رژیم، حباب‌های توبی شکل به صورت منقطع، متناوب و کنشیده با اندازه‌های مختلف در محیط پیوسته از مایع در دیواره بالایی کانال، حرکت می‌کند (شکل 3).

با افزایش سرعت گاز، سطح مشترک دو فاز ناپایدار و شرایط برای رشد موج‌های روی آن فراهم می‌شود. زمانی که گاز با سرعت زیاد بر سطح مایع موجی جریان یابد، نیروی برای آیرودینامیکی⁶ ناشی از تغییر فشار بر روی موج به عنوان عامل ناپایدار کننده، به منظور غلبه بر نیروهای هیدرواستاتیکی به عنوان عامل پایدار کننده، کافی است. این موضوع به عنوان ناپایداری کلونین- هلمهولتز⁷ شناخته می‌شود. بعلاوه اثر برنولی نیز به عامل ناپایداری کمک خواهد کرد [1]. این ناپایداری سبب می‌شود که موج‌های سطح مشترک رشد کرده و در نهایت مقطع لوله را پل زده و اسلاگ تشکیل شود.

وجود رژیم‌هایی از جمله رژیم ناپایدار و مخرب اسلاگ، لزوم بررسی نوع جریان در کانال‌ها را نشان می‌دهد. جریان اسلاگ جریان پیچیده‌ای است که در بسیاری از کاربردهای مهندسی که شامل دو فاز است، اتفاق می‌افتد. این

1- Critical Heat Flux (CHF)

2- Stratified

3- Wavy

4- Plug

5- Slug

6- Aerodynamic Lifting Force

7- Kelvin- Helmholtz

8- Rise Velocity

9- CFD

10- Multi-Fluid

همکاران [14] به مطالعه سه‌بعدی جریان و انتقال حرارت در کانال ریب‌دار با مقطع مستطیلی L شکل در دو حالت چرخشی و غیر چرخشی پرداختند. متغیرها در دو مقدار چرخش⁸ (0 و 0/24) با دیواره کانال صاف و مقایسه با دیواره ریب‌دار در جریان با عدد رینولدز 25000، نسبت چگالی 0/13 و عدد ماخ ورودی 0/05 بررسی شد. در نهایت خطوط جریان، میدان بردارهای سرعت، کانتورهای عدد ماخ، فشار، دما و عدد ناسلت ارائه شد.

قحطانی و همکاران [15] به مطالعه محاسباتی جریان مغشوش و انتقال حرارت سه‌بعدی در کانال‌های با مقطع مستطیلی ریب‌دار در دو حالت ریب ثابت و چرخشی با زاویه 45 درجه در محدوده‌ای که داده‌های تجربی انتقال حرارت موجود بود؛ پرداختند.

لو و جیانگ [16] انتقال حرارت را در کانال با مقطع مستطیلی با ریب‌های زاویه‌دار به صورت تجربی و شبیه‌سازی عددی بررسی کردند. آزمایش‌ها، افزایش دبی هوا را باعث بهبود انتقال حرارت جابجایی در کانال ریب‌دار نشان داد. ایشان شبیه‌سازی‌ها را با استفاده از نرم‌افزار فلونت برای زوایای مختلف ریب‌گذاری (0، 10، 20، 30، 45، 60 و 90 درجه) انجام دادند. نتایج عددی، بالاترین ضریب انتقال حرارت جابجایی را در ریب 60 درجه پیش‌بینی کرد، اما ریب 20 درجه، بهترین عملکرد کلی حرارتی- هیدرولیکی دارد.

با توجه به اینکه عمده تحقیقات گذشته، تجربی بوده و کارهای عددی تنها در جریان تک فاز بررسی شده است؛ لذا در این پژوهش، علاوه بر بررسی تجربی تأثیر ریب‌گذاری روی نقشه جریان، به شبیه‌سازی عددی شرایط جریان دو فازی در کانال صاف و ریب‌دار نیز پرداخته شده است. شبیه‌سازی عددی جریان دو فازی به منظور تغییرات رژیم جریان در کانال‌های ریب‌دار از نوآوری‌های تحقیق حاضر است. همچنین با توجه به بحرانی بودن رژیم اسلاگ، تأثیر ریب بر این رژیم در مقایسه با کانال صاف به صورت عددی مورد بررسی قرار گرفته است.

جریان به صورت سه‌بعدی بر پایه روش VOF با استفاده از نرم‌افزار متن باز اپن‌فوم⁹ شبیه‌سازی شده است. جهت اعتبارسنجی نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی، آزمایش‌هایی در آزمایشگاه جریان چند فازی دانشگاه تربیت مدرس انجام گرفته است (شکل 5).

3- سیستم آزمایشگاهی

طرح‌واره سیستم آزمایشگاهی مورد استفاده در این پژوهش در شکل 5 نشان داده شده است. به طور معمول به دلیل دسترسی آسان، غیرقابل اشتعال و غیر سمی بودن از هوا به عنوان سیال گاز و از آب به عنوان سیال مایع در بررسی جریان دو فازی استفاده می‌شود.

آزمایش‌ها در کانال افقی با مقطع مستطیلی به ابعاد $5 \times 10 \text{ cm}^2$ (قطر معادل هیدرولیکی 6/67) و به طول 36m (طول معادل 540D) از جنس پلکسی گلاس¹⁰ انجام شده است. دیواره شفاف کانال اجازه بررسی دیداری از وضعیت جریان داخل کانال را به ناظر بیرونی می‌دهد. کانال بر روی تعدادی تکیه‌گاه فلزی با قابلیت تنظیم زاویه قرار دارد.

3-1- چرخه تأمین آب و هوا

سیستم آزمایشگاهی طراحی شده برای جریان دو فازی آب- هوا، شامل سیستم‌های تأمین هوا و آب، قسمت مخلوط‌کننده ورودی آب و هوا، کانال آزمایش همراه با مخزن‌های آب و سیستم اندازه‌گیری است.

می‌توان پدیده را در اطراف سطح مشترک در حال حرکت کنترل کرد [8]. دو دیدگاه کلی در تعقیب حرکت سطح مشترک وجود دارد. در دیدگاه اول یک شبکه در حال حرکت برای تعقیب سطح مشترک استفاده می‌شود. مطابق با تغییر هندسه و توپولوژی¹، شبکه نیز تغییر می‌کند. روش‌های مربوط به این دیدگاه، روش ردیابی پیشانی² نام دارد. در دیدگاه دوم از یک شبکه ثابت (اولری) استفاده می‌شود. برای تعقیب سطح مشترک، از روش‌های مختلفی مانند نشانگرها یا توابع، استفاده می‌شود. در روش‌های ردیابی پیشانی، سطح مشترک به طور مستقیم حل می‌شود. با حرکت سطح مشترک، المان‌های مش همسایه به گونه‌ای تنظیم شده است که حرکت سطح مشترک را دنبال کند. در روش‌های اولری سطح مشترک با استفاده از نشانگرهای خاص یا توابع رنگ در یک مش ثابت توصیف می‌شود. یکی از قدیمی‌ترین روش‌ها برای توصیف پدیده‌های مربوط به سطح مشترک، روش علامت ذره³ است. در این روش ذرات بدون جرم برای دنبال کردن حرکت یک سیال و در نتیجه حرکت سطح مشترک استفاده می‌شود. گرچه به‌کارگیری آن راحت است و برای حل دوباره سطح مشترک به طور دقیق قابل اطمینان است، اما برای توصیف تغییر شکل‌های مهم، توانمند نیست. این امر به دلیل لزوم توزیع مجدد نشانگرهاست؛ چرا که به علت تغییر شکل یا در حالت‌های گسترش سطح مشترک، بایستی ذرات جدیدی اضافه شود. از طرفی، این روش در شبیه‌سازی سه بعدی بسیار زمان‌بر و نیازمند پردازشگر محاسباتی قوی است.

یکی از روش‌های بسیار معمول دیگر روش سطوح هم‌تراز⁴ است. در این روش یک تابع فاصله علامت برای تعیین محل سطح مشترک استفاده می‌شود. در تابع فاصله علامت مقادیر مثبت و منفی، دو طرف سطح مشترک و مقدار صفر، روی سطح مشترک را نشان می‌دهد. این روش از لحاظ مفهومی، ساده و به راحتی قابل اجرا است؛ اما این امکان وجود دارد که جرم یا حجم، به خصوص در سطوح مشترک تغییر یافته، کم شود [9].

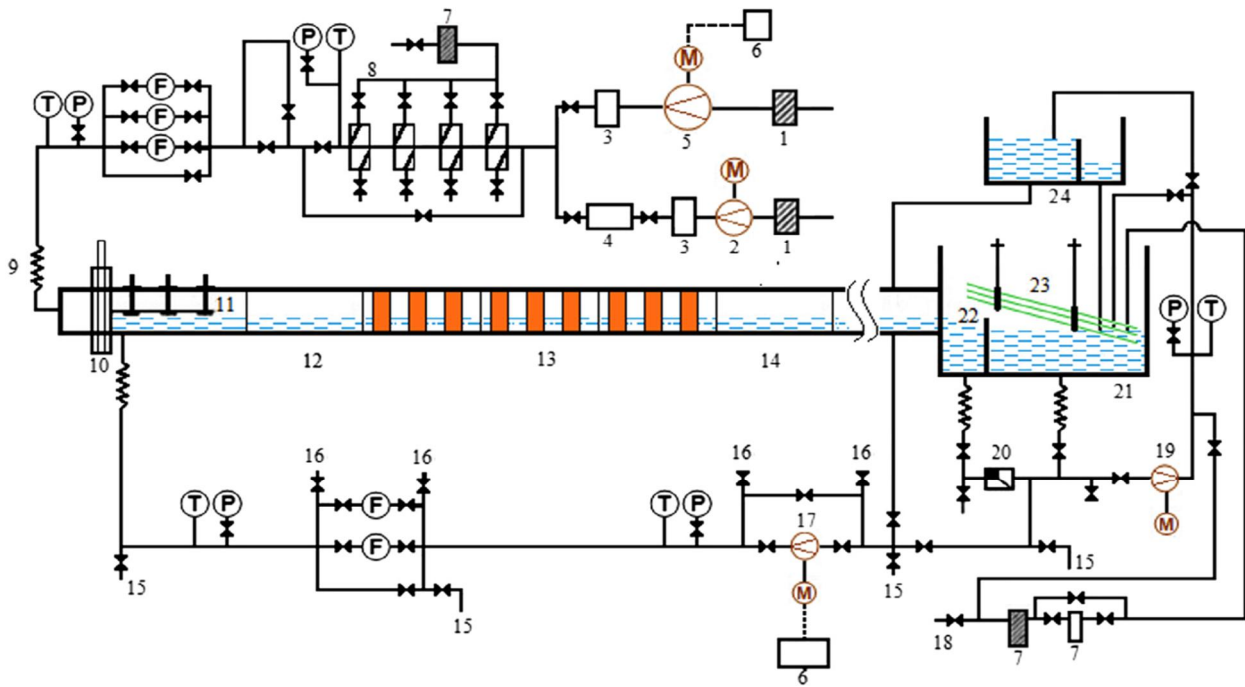
روش حجم سیال⁵ که توسط هرت و نیکولز [10] معرفی شد یکی از رایج‌ترین تکنیک‌ها در تعقیب سطح مشترک دو فاز است. ایده اصلی روش حجم سیال در تعریف تابع حجم است که مقدار صفر را برای فاز اول، مقدار یک را برای فاز دوم و مقادیر بین صفر و یک را برای سلول‌های شامل سطح مشترک در نظر می‌گیرد. این روند باعث حفظ بقای جرم می‌شود و همچنین مدت زمان محاسباتی آن چندان زیاد نخواهد بود. به موجب این ویژگی‌ها استفاده از این روش رواج بیشتری داشته است. در واقع در روش حجم سیال، حرکت سطح مشترک دنبال نمی‌شود بلکه حجم هر فاز در هر سلول به دست می‌آید و به همین دلیل گاهی این روش را با نام روش تعقیب حجم بکار می‌برند. جزئیات بیشتر این روش توسط رایدر و کوته گردآوری شده است [11].

برای تعقیب سطح مشترک به طور دقیق در هر سلول، نیاز به الگوریتمی برای بازسازی سطح مشترک است. این مرحله بر پایه کسر حجمی محلی و جهت گرادیان آن است. رایج‌ترین روش‌های بازسازی هندسی سطح در روش حجم سیال، دو روش خطوط شیب‌دار قطعه قطعه پیوسته⁶ و خطوط مستقیم⁷ هستند. جزئیات بیشتر این روش‌ها در مراجع [11-13] ارائه شده است.

شبیه‌سازی‌های عددی انجام گرفته در مورد کانال‌های ریب‌دار عمدتاً در زمینه بهبود انتقال حرارت در جریان‌های تک فاز مطرح است. لین و

1- Topology
2- Front Tracking Methods
3- Marker Particle
4- Level Set (LS)
5- Volume Of Fluid (VOF)
6- Piecewise Linear Interface Calculation (PLIC)
7- Simple Linear Interface Calculation (SLIC)

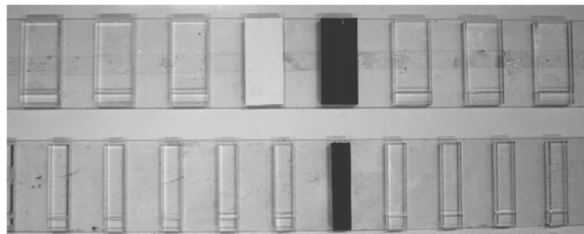
8- Rotation Numbers
9- OpenFOAM (Open Source Software)
10- Plexiglas



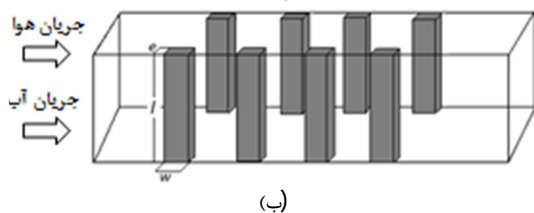
1: فیلتر هوا 2: کمپرسور 3: مخزن هوا 4: رگلاتور فشار 5: دمنده 6: سیستم کنترل 7: فیلتر آب 8: سیستم خنک‌کاری هوا 9: لوله قابل انعطاف 10: دریچه لغزشی 11: صفحه فلزی نازک 12: ورودی کانال 13: مقطع ریب‌دار 14: خروجی کانال 15: تخلیه 16: ونت 17: پمپ 18: تأمین آب 19: پمپ 20: شیر یک‌طرفه 21: مخزن 22: صفحه کنترل سطح 23: اسلاگ دمپر 24: مخزن F: فلومتر M: موتور الکتریکی P: فشارسنج T: دماسنج

شکل 5 طرح‌واره سیستم آزمایشگاهی پژوهش حاضر

متغیرهای اصلی در ریب‌گذاری، طول (l)، عرض (w) و ضخامت (e) ریب‌ها و نیز گام ریب‌گذاری (P) است (شکل‌های 7 و 8). منظور از گام، فاصله بین انتهای دو ریب متوالی است.



شکل 6 ریب‌های مورد استفاده در آزمایش‌ها و شبیه‌سازی عددی، $w=40\text{mm}$ (تصویر بالا)، $e=4\text{mm}$ ، $w=20\text{mm}$ (تصویر پایین)



شکل 7 ابعاد ریب‌های مورد استفاده (الف) و طرز قرارگیری آن‌ها در دیواره‌های جانبی کانال (ب)

در سیستم آزمایشگاهی، آب از مخزن 2 (شکل 5) بعد از عبور از دو فیلتر مختلف تأمین می‌شود. پمپ 2 (شکل 5) از طریق مخزن 2 -زمانی که سطح آب به ارتفاع مشخصی می‌رسد- آب ورودی به مخزن 1 (شکل 5) را تأمین می‌کند. سطح آب در تانک 1 ثابت نگه داشته می‌شود و آب اضافی قبل از اینکه به تانک 2 تخلیه شود، به قسمت دوم تانک 1 سرریز می‌شود. پمپ 1 (شکل 5) به یک سیستم کنترل چرخش موتور مرتبط است که در صورت لزوم نرخ جریان آب را تنظیم می‌کند. پس از عبور آب از دبی‌سنج، از پایین وارد کانال می‌شود.

برای ایجاد جریان هوا با دبی مناسب از یک دمنده استفاده شده است. هوای مکیده شده از محیط آزمایشگاه بعد از عبور از فیلتر هوا وارد دمنده و به داخل مخزن هوا فرستاده می‌شود. هوای درون مخزن که در دما و فشار بالا قرار دارد به منظور کاهش دما و هم دما شدن با آب از یک سیستم خنک‌کننده عبور می‌کند. این کار به دلیل شرط تعادل دمایی بین دو فاز مایع و گاز در ورودی کانال انجام می‌گیرد. هوا بعد از عبور از سیستم خنک‌کاری به سمت دبی‌سنج‌های هوا جریان یافته و بعد از اندازه‌گیری دمای هوا در ورودی مخلوط‌کننده، به وسیله لوله قابل انعطاف از بالا وارد قسمت مخلوط‌کننده می‌شود.

با توجه به اینکه آزمایش‌ها باید در سرعت‌های مختلف هوا انجام شود و همچنین به منظور کنترل‌پذیری بیشتر سیستم خط تأمین هوا، از یک اینورتور¹ برای کنترل دور موتور استفاده شده است که به کمک آن می‌توان دبی را در هر مقدار مشخص تأمین و تنظیم کرد.

2-3- ریب‌گذاری سطح داخلی کانال

منظور از ریب در این مقاله، قطعات مستطیل شکل از جنس پلکسی گلاس است که یک نمونه از آن‌ها در شکل 6 نشان داده شده است.

1- Inverter

کشش سطحی روی سطح مشترک محاسبه و در جهت عمود بر سطح در نظر گرفته می‌شود. انحنای سطح مشترک به صورت (8) بیان می‌شود:

$$\kappa = \nabla \cdot \left(\frac{\nabla \cdot \alpha}{|\nabla \cdot \alpha|} \right) \quad (8)$$

کسر حجمی مایع و خصوصیات میدان جریان با حل معادلات (1) تا (8) تحت شرایط اولیه و مرزی مشابه شرایط آزمایشگاهی، به دست می‌آید.

2-4- شرایط مرزی و اولیه

در لحظه $t=0$ ، پرشدگی مایع و کسر حجمی برابر $0/5$ در نظر گرفته شده است. شرط عدم لغزش، به عنوان شرط مرزی حاکم بر دیواره‌ها است. در ورودی و خروجی کانال گرادیان فشار صفر در نظر گرفته شده است. سرعت‌های ورودی مختلف برای آب و هوا اعمال شده است.

3-4- روش حل

شبیه‌سازی‌های عددی تحقیق حاضر با استفاده از نرم‌افزار متن‌باز این فوم 201 محصول شرکت این سی اف دی² انجام شده است. میدان حل، سه‌بعدی و از روش حجم محدود در گسسته‌سازی استفاده شده است. جریان تراکم ناپذیر فرض شده است. دو فاز هم‌دما می‌باشند و لذا معادله بقای انرژی حل نخواهد شد حلگر مورد استفاده، الگوریتم دو فازی حجم سیال را برای تعقیب و تسخیر سطح مشترک دو فاز بکار می‌برد. از آنجایی که گام زمانی مناسب برای پایداری حل عددی لازم است، بدین منظور عدد کورانت- فردریچز- لیوای³ $0/5$ انتخاب شده است. کوپلینگ فشار و سرعت با الگوریتم پیژو⁴ حل شده است. نرم‌افزار این فوم یک ترم مصنوعی (رابطه 9) برای خنثی کردن تأثیر دیفیوژن عددی به معادله (5) اضافه می‌کند [18].

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha u) + \nabla \cdot (\alpha(1-\alpha)U_r) = 0 \quad (9-الف)$$

$$U_r = c_r |u| \frac{\nabla \alpha}{|\nabla \alpha|}, \quad 1 < c_r < 4 \quad (9-ب)$$

ترم اضافه شده تنها در ناحیه سطح مشترک اعمال می‌شود که برای فشردگی کردن سطح مشترک و جلوگیری از تکه‌تکه شدن آن مناسب است [19]. خواص فیزیکی آب و هوا مورد استفاده در مدل‌سازی در جدول 1 آمده است.

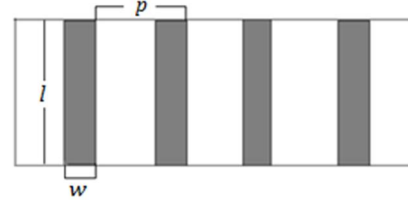
4-4- بررسی استقلال از شبکه

از آنجایی که محل آغازش اسلاگ، یکی از پارامترهای مهم در رژیم‌های جریان چند فازی است، این پارامتر به عنوان معیاری برای تعیین استقلال از شبکه انتخاب شد. بررسی‌ها برای کانال صاف و ریب‌دار انجام گرفته است.

بررسی‌ها برای کانال صاف سه بعدی به طول $2/5$ متر انجام شده است. در شبکه با ابعاد $20 \times 10 \times 6$ ، که شبکه درشت‌تری نسبت به دیگر حالت‌هاست، رژیم اسلاگ رخ نمی‌دهد. درحالی‌که در سایر شبکه‌های مورد بررسی، این پدیده در شبیه‌سازی‌ها دیده می‌شود. (شکل‌های 9-1 و 9-2).

همان‌گونه که از شکل 9-1 مشخص است، در دو شبکه‌بندی (ج) و (د) محل آغازش اسلاگ در کانال تغییر چندانی نمی‌کند؛ از این رو شبکه با ابعاد $50 \times 20 \times 10$ برای شبیه‌سازی انتخاب می‌شود.

استقلال از شبکه برای کانال ریب‌دار به طول $3/5$ ، که دو متر ابتدایی آن ریب‌دار است، به صورت زیر انجام شده است. طبق شکل 9-2، در دو شبکه‌بندی (ه) و (و) محل آغازش اسلاگ در کانال ریب‌دار تقریباً ثابت است؛



شکل 8 طرح‌واره دو بعدی ریب‌گذاری

جدول 1 خواص فیزیکی آب و هوا در دمای 20 درجه

خواص فیزیکی	آب	هوا
چگالی (kg/m ³)	1000	1
ویسکوزیته سینماتیکی (m ² /s)	10 ⁻⁶	1/48 × 10 ⁻⁵
کشش سطحی بین آب و هوا (N/m)	0/07	

4- شبیه‌سازی عددی

در این بخش به معرفی مسئله مورد بررسی پرداخته می‌شود. سپس روش شبیه‌سازی جریان در کانال تشریح خواهد شد. به منظور مطالعه تأثیر ریب‌گذاری دیواره‌های جانبی، جریان دو فازی درون کانال با هندسه آزمایشگاه جریان چند فازی دانشگاه تربیت مدرس در فضای سه بعدی شبیه‌سازی شده است.

1-4- معادلات حاکم

در روش VOF از معادلات ناوییر-استوکس به همراه معادله انتقال تعقیب سطح مشترک دو فاز استفاده می‌شود. این معادلات با روابط زیر تعریف شده است.

معادله پیوستگی:

طبق رابطه (1) داریم:

$$\nabla \cdot u = 0 \quad (1)$$

مشخصات دو فاز روی سطح مشترک از هم مستقل است. در روش حجم سیال، سطح مشترک یک مرز تیز نیست؛ بلکه تغییرات خواص فیزیکی دو فاز در سطح مشترک به صورت تابعی از خواص دو فاز تعریف می‌شود (رابطه‌های 2 و 3):

$$\rho(x, t) = \rho_g + (\rho_l - \rho_g)\alpha(x, t) \quad (2)$$

$$\mu(x, t) = \mu_g + (\mu_l - \mu_g)\alpha(x, t) \quad (3)$$

که α کسر حجمی است و به عنوان نسبت حجم هر فاز به حجم سلول تعریف می‌شود. در روش VOF از الگوی زیر (رابطه 4) پیروی می‌کند:

$$\begin{cases} \alpha = 1 & \text{فاز آب} \\ 0 < \alpha < 1 & \text{سطح مشترک بین آب و هوا} \\ \alpha = 0 & \text{فاز هوا} \end{cases} \quad (4)$$

توزیع کسر حجمی از حل معادله انتقال فازی (رابطه 5) به دست می‌آید:

$$\frac{D\alpha}{Dt} = \frac{\partial \alpha}{\partial t} + u \cdot \nabla \alpha = 0 \quad (5)$$

معادله مومنوم برای جریان تراکم ناپذیر طبق رابطه (6) است:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u) + \nabla \cdot (\rho u u) = -\nabla p + \nabla \cdot [\mu(\nabla u + \nabla u^T)] + \rho g + F_s \quad (6)$$

در این رابطه ترم F_s ناشی از کشش سطحی است. مدل کشش سطحی استفاده شده در شبیه‌سازی‌ها، مدل نیروی سطحی پیوسته¹ (CSF) است [17]. در این مدل نیروی حجمی وارده به صورت (7) محاسبه می‌شود:

$$F_s = \sigma \kappa \nabla \alpha \quad (7)$$

2- OpenCFDLtd
3- Courant-Friedrichs-Levy (CFL)
4- PISO

1- Continuum Surface Force

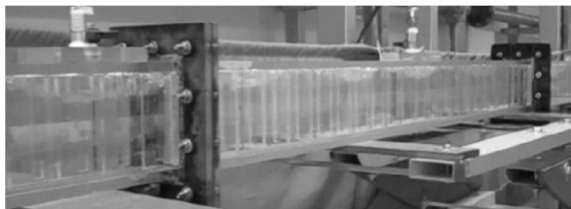
در مطالعه حاضر ریب‌گذاری روی دیواره جانبی است. این نوع ریب‌گذاری، باعث ایجاد اغتشاشات از پایین‌ترین لایه‌های هر دو سیال آب و هوا تا سطح مشترک آن‌ها می‌شود و در نتیجه سطح مشترک حتی در پایین‌ترین سرعت‌های هر دو فاز نیز دارای امواج با طول موج‌های متفاوت است.

با افزایش سرعت هوای ورودی به کانال‌های ریب‌دار، میزان ناپایداری القا شده به سطح مشترک افزایش می‌یابد. این ناپایداری در عمل خود را به صورت موج‌های با طول موج‌های کوچک‌تر از امواج رژیم موجی، در سطح مشترک نشان می‌دهد. به این معنی که هر چه سرعت فاز گاز افزایش یابد موج‌های تشکیل شده دارای طول موج‌های کمتری هستند. در شرایطی که دبی عبوری آب زیاد باشد، در ابتدای آزمایش و پیش از جریان یافتن هوا، جریان تک فاز مایع در کانال برقرار است. در لحظات اولیه جریان یافتن هوا، جریان به صورت حباب پراکنده که غالب آن‌ها در سقف کانال حرکت می‌کند، تشکیل می‌شود که اغلب بسیار ناپایدار و گذرا است. با گذشت زمان و پایدار شدن هر دو فاز در دبی‌های بالای آب، از به هم چسبیدن حباب‌های کوچک، حباب‌های بزرگی تشکیل می‌شود که منجر به ایجاد رژیم پلاگ خواهد شد (شکل 11).

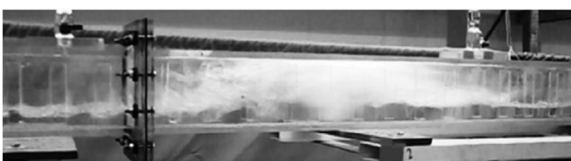
در صورت کافی بودن دبی آب، با افزایش سرعت هوا، امواج کوچک در سطح مشترک ایجاد می‌شود. این امواج طبق تئوری ناپایداری کلین-هلمهولتز رشد می‌کنند و ارتفاع آن‌ها افزایش می‌یابد. این افزایش ارتفاع تا تماس قله موج با سقف کانال ادامه می‌یابد. با پل زدن مقطع کانال توسط فاز مایع و بسته شدن مسیر گاز رژیم اسلاگ رخ می‌دهد. افزایش سرعت فاز گاز از این به بعد موجب افزایش سرعت حرکت اسلاگ‌ها و افزایش میزان حباب‌های موجود در پیشانی اسلاگ و در انتهای آن حالت اسپری شدن آب در فاز گاز می‌شود. شکل 12 رژیم اسلاگ را نشان می‌دهد.

شکل 13 نقشه رژیم جریان را در ریب‌گذاری دیواره‌های جانبی با ضخامت 4mm، عرض 20mm و 40mm با نسبت گام به ضخامت 15 و 20 نسبت به سرعت‌های ظاهری مختلف دو فاز نشان می‌دهد.

مرزها در این نقشه به صورت خطوطی با هاله‌هایی پیرامون آن‌ها نشان داده شده است. دلیل حضور این هاله‌ها عدم قطعیت در مکان دقیق تغییر رژیم می‌باشد. در واقع تغییر از یک رژیم به رژیم دیگر در جریان دو فازی همانند جریان تک فاز در یک محدوده صورت می‌گیرد و حالت آنی ندارد. مشاهده می‌شود که با افزایش نسبت گام ریب‌گذاری به ضخامت ریب، محدوده رژیم موجی افزایش می‌یابد و رژیم اسلاگ در محدوده کمتری از سرعت‌ها اتفاق می‌افتد. محدوده رژیم پلاگ تغییرات کمتری را نشان می‌دهد. می‌توان گفت برای کم کردن محدوده رژیم اسلاگ، افزایش نسبت گام به ضخامت (P/e) مناسب است.



شکل 11 رژیم پلاگ برای $u_1 = 0.8\text{m/s}$, $u_2 = 4\text{m/s}$



شکل 12 رژیم اسلاگ برای $u_1 = 0.5\text{m/s}$, $u_2 = 10\text{m/s}$

بنابراین شبکه با ابعاد $10 \times 20 \times 400$ مناسب است. به منظور کاهش زمان محاسبات در این شبیه‌سازی، شرط مرزی صفحه متقارن در نظر گرفته شده است.

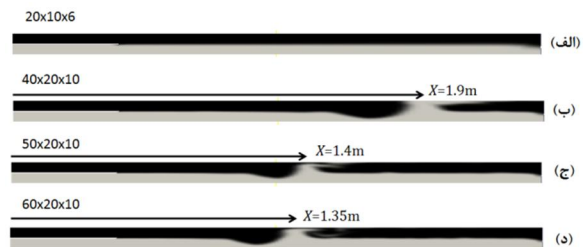
5- بحث و تشریح نتایج عددی و تجربی

در این بخش ابتدا نقشه جریان دو فازی در کانال ریب‌دار با استفاده از مشاهدات تجربی ارائه شده است. سپس با توجه به اهمیت رژیم اسلاگ در کانال‌های صاف و ریب‌دار، جزئیات این رژیم مورد بررسی تجربی و شبیه‌سازی عددی قرار گرفته است. داده‌های تجربی موید نتایج عددی می‌باشد.

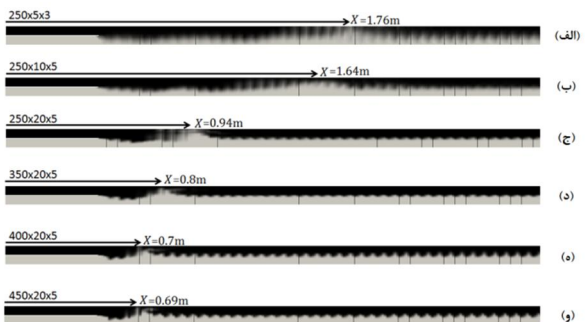
5-1- رژیم‌های جریان

آزمایش‌ها در دو نسبت گام به ضخامت 15 و 20، به ترتیب برای ریب به عرض 40mm و ضخامت 4mm و ریب به عرض 20mm و ضخامت 4mm انجام شده است. رژیم‌های موجی، پلاگ و اسلاگ در آزمایش‌ها مشاهده شده است. نکته قابل توجه در مقایسه با کانال صاف، مشاهده نشدن رژیم لایه‌ای در کانال ریب‌دار (در دیواره‌های جانبی) است.

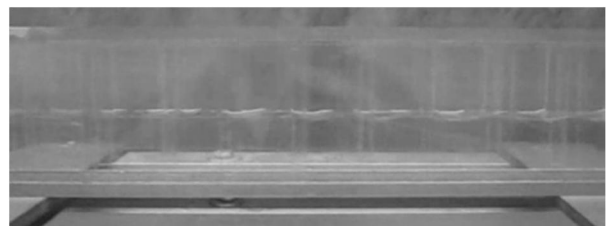
شکل 10 رژیم موجی در سرعت‌های پایین آب و هوا را نشان می‌دهد. در ریب‌گذاری دیواره‌های بالایی و پایینی کانال، رژیم لایه‌ای در سرعت‌های پایین آب و گاز دیده شده است. در کانال‌های ریب‌دار، اغتشاشات ایجاد شده به داخل جریان نفوذ می‌کند. در صورتی که این اغتشاشات به اندازه کافی قوی نباشد، نیروهای لزجی، اغتشاشات را مستهلک می‌کند و لذا تأثیر آن به سطح سیال نمی‌رسد؛ بنابراین موج در سطح سیال تشکیل نمی‌شود و رژیم لایه‌ای، غالب خواهد بود [7].



شکل 9-1 محل تشکیل اسلاگ در شبکه‌بندی‌های مختلف کانال صاف



شکل 9-2 محل تشکیل اسلاگ در شبکه‌بندی‌های مختلف کانال ریب‌دار

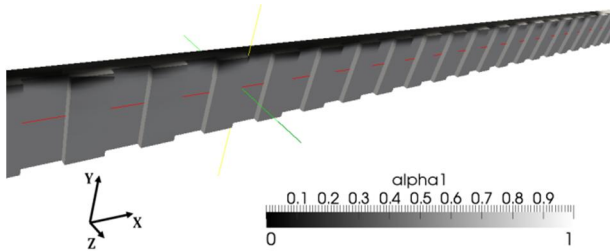


شکل 10 رژیم موجی برای $u_1 = 0.16\text{m/s}$, $u_2 = 6\text{m/s}$

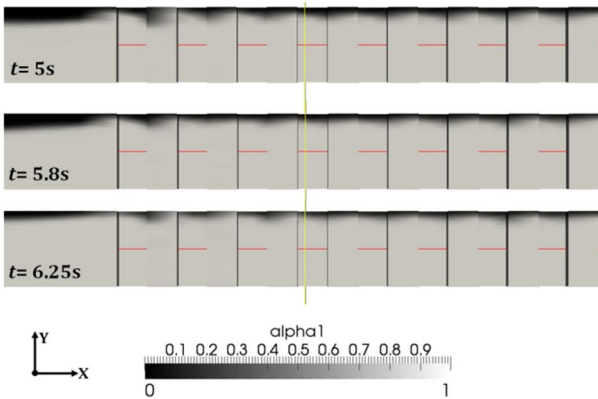
می‌شود. کسر حجمی صفر در هر کانتور، بیانگر حباب‌های هوا است که در زمان‌های مختلف، در سقف کانال تشکیل شده است. کسر حجمی یک، اشاره به فاز آب دارد.

رژیم اسلاگ با افزایش اختلاف سرعت دو فاز شکل می‌گیرد. شکل 17 کانتور کسر حجمی حاصل از شبیه‌سازی نقطه 3 می‌باشد. در این شکل روند تشکیل اسلاگ در طول کانال در زمان‌های متوالی آمده است. این نتیجه موید صحت نتایج شبیه‌سازی در مقایسه با نتایج تجربی انجام شده است (شکل 13 را ببینید).

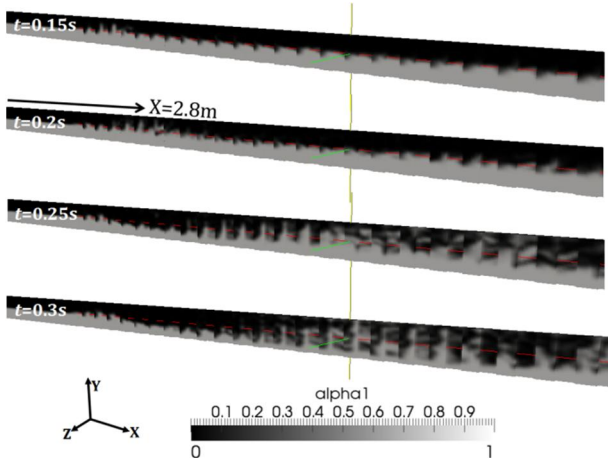
طبق مشاهدات تجربی در کانال ریب‌دار، بدنه مایع اسلاگ پس از برخورد با ریب‌ها به صورت افشانه‌ای پخش می‌شود (شکل 12). نتایج شبیه‌سازی نیز موید این مطلب است، زیرا بیشتر سلول‌های محاسباتی با حرکت اسلاگ در طول کانال دارای هر دو فاز آب و هوا هستند (شکل 17، $t=0/3s$).



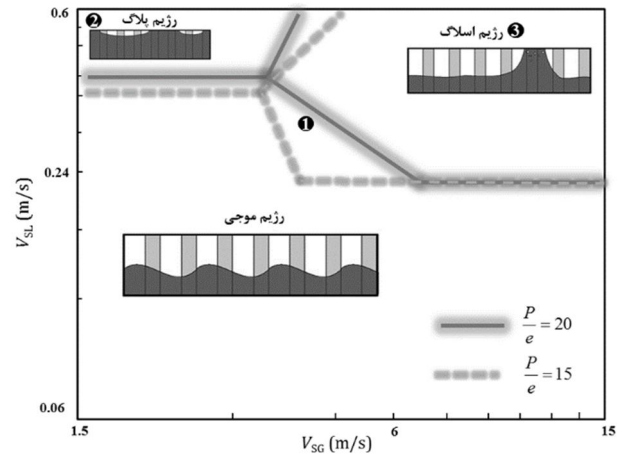
شکل 15 شبیه‌سازی سه بعدی جریان پلاگ در کانال ریب‌دار با مشخصات $e=4mm$, $u_g=0.3m/s$, $u_l=1.5m/s$, $P=80mm$, $w=40mm$



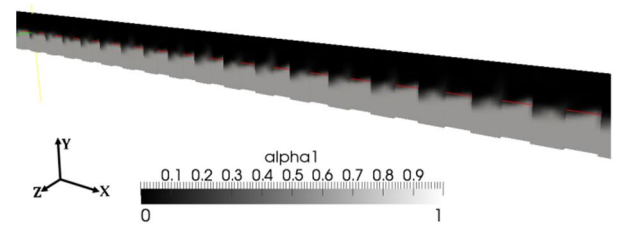
شکل 16 شبیه‌سازی سه بعدی جریان پلاگ در زمان‌های مختلف در کانال ریب‌دار (صفحه $Z=0, X-Y$) با مشخصات $e=4mm$, $u_g=2m/s$, $u_l=0.11m/s$, $P=80mm$, $w=40mm$



شکل 17 شبیه‌سازی سه بعدی جریان اسلاگ در کانال ریب‌دار در زمان‌های متوالی با مشخصات $e=4mm$, $u_g=16m/s$, $u_l=1m/s$, $P=80mm$, $w=40mm$



شکل 13 نقشه جریان در حالت‌های مختلف ریب گذاری نسبت به سرعت‌های ظاهری دو فاز (تجربی)



شکل 14 شبیه‌سازی سه بعدی جریان موجی در کانال ریب‌دار با مشخصات $e=4mm$, $u_g=4m/s$, $u_l=0.18m/s$, $P=80mm$, $w=40mm$

جدول 2 مشخصات سینماتیکی دو فاز در شبیه‌سازی عددی

شماره نقطه	سرعت فاز مایع (m/s)	سرعت فاز گاز (m/s)
1	0/18	4
2	1/5	0/3
3	1	16

به منظور صحت‌سنجی نتایج عددی، کانال ریب‌دار با مقطع مستطیلی، با ریب به مشخصات زیر در سه نقطه 1، 2 و 3 از شکل 13 شبیه‌سازی شد.

$P=80mm$, $w=40mm$, $e=4mm$, $P/e=20$

دلیل انتخاب نقاط 1، 2 و 3 این است که به ترتیب معرف سه رژیم اصلی مشاهده شده (یعنی رژیم‌های موجی، پلاگ و اسلاگ) در آزمایش‌ها است. سرعت‌های دو فاز در نقاط انتخابی طبق جدول 2 می‌باشد.

در ادامه نتایج کسر حجمی دو فاز در هر شبیه‌سازی آمده است. شکل 14 کانتور کسر حجمی حاصل از شبیه‌سازی نقطه 1 است. کسر حجمی صفر در هر کانتور، بیانگر فاز گاز و یک بیانگر فاز مایع می‌باشد. مقادیر بین صفر و یک به سطح مشترک دو فاز اشاره دارد. از شکل مشخص است که رژیم موجی بر جریان حاکم است. این نتیجه موید صحت نتایج عددی در مقایسه با نتایج تجربی انجام شده است (شکل 13 را ببینید).

شکل 15 کانتور کسر حجمی حاصل از شبیه‌سازی نقطه 2 است. از شکل مشخص است که رژیم پلاگ بر جریان حاکم است. این نتیجه موید صحت نتایج عددی در مقایسه با نتایج تجربی انجام شده است (شکل 13 را ببینید).

به منظور ارائه بهتر نتایج شبیه‌سازی، در شکل 16 رژیم پلاگ در صفحه X-Y نشان داده شده است. از آنجایی که حباب‌های تشکیل شده در این نوع رژیم کاملاً کشیده و در حال حرکت است، امکان به تصویر کشیدن کل کانال نیست. به همین دلیل تنها محل تشکیل حباب‌ها نشان داده شده است. با حرکت حباب‌ها به سمت جلو، حباب‌های دیگری جایگزین حباب‌های حاضر

جدول 3 مقایسه محل تشکیل اولین اسلاگ برای $u_g=16\text{m/s}$, $u_l=1\text{m/s}$

نوع کانال	عددی (m)	تجربی (m)	خطای نسبی (%)
ریب‌دار	2/8	2/65 [تحقیق حاضر]	5
صاف	1/8	1/6 [20]	12/5

از شکل 18 دیده می‌شود که محل تشکیل اولین اسلاگ در فاصله 1/8 متری از ورودی کانال صاف رخ می‌دهد. به منظور تأیید نتایج مربوط به محل آغاز اسلاگ در کانال صاف، از نتایج تجربی [20] استفاده شده است. طبق نتایج [20] در کسر حجمی 0/5، با سرعت‌های ظاهری آب و هوای به ترتیب 8/05m/s و 0/56m/s (متناظر با نقطه 3 در نمودار شکل 9)، محل آغاز اسلاگ در فاصله 1/6m از ورودی کانال بوده است. لذا نتایج عددی به دست آمده، با خطای 12/5% قادر به پیش‌بینی محل تشکیل اولین اسلاگ در کانال صاف بوده است.

در جدول 3 نتایج عددی و تجربی محل تشکیل اولین اسلاگ و نیز درصد خطای نسبی در شبیه‌سازی‌ها آورده شده است. طبق نتایج جدول 3 می‌توان گفت، ریب‌دار کردن کانال باعث تعویق در تشکیل اسلاگ می‌شود.

در کانال صاف، اسلاگ در $t=1/05\text{s}$ تشکیل می‌شود. درحالی‌که اولین اسلاگ در کانال ریب‌دار به محض برخورد جریان با ریب‌ها - که در 2/5 متری از ورودی کانال قرار گرفته‌اند - در زمان بسیار کوتاه‌تری در $t=0/2\text{s}$ تشکیل می‌شود؛ بنابراین، ریب عامل تشکیل سریع‌تر اسلاگ است. همچنین اسلاگ‌های تشکیل شده در کانال ریب‌دار در بازه زمانی کوتاه‌تری نسبت به کانال صاف رخ می‌دهد؛ بطوریکه در فاصله زمانی تشکیل نخستین اسلاگ در کانال صاف (یعنی 1/05s) سه اسلاگ در کانال ریب‌دار رخ می‌دهد. به بیان دیگر فرکانس تشکیل اسلاگ در کانال ریب‌دار بالاتر از صاف است.

از طرفی طبق نتایج تجربی، تأثیر ریب در کاهش محدوده رژیم اسلاگ واضح است. شکل 19 مقایسه‌ای از نقشه جریان در کانال ریب‌دار با $P/e=20$ و کانال صاف با هندسه مشابه را نشان می‌دهد.

همان‌گونه که از شکل 19 مشخص است، رژیم لایه‌ای در کانال ریب‌دار رخ نمی‌دهد و محدوده اسلاگ به طور قابل توجهی کاهش می‌یابد. به بیان دیگر ریب‌دار کردن کانال باعث جلوگیری از وقوع رژیم اسلاگ در گستره وسیعی از سرعت‌های دو فاز می‌شود. این پدیده به دلیل فشار القایی¹ زیاد گاز در کانال‌های ریب‌دار توجیه می‌شود. ریب‌ها به عنوان موانعی در مسیر حرکت هوا قرار دارد. با عبور هوا از مقاطع ریب‌دار، فشار القایی گاز افزایش می‌یابد. فشار القایی زیاد از رشد موج‌های سطح مشترک جلوگیری می‌کند. از این رو تشکیل اسلاگ به تعویق می‌افتد.

مومنوم دو فاز به عنوان عامل محرک رشد موج‌های سطح مشترک و فشار القایی به عنوان عامل مقاوم در تشکیل اسلاگ مطرح است؛ بنابراین در کانال‌های ریب‌دار، اسلاگ زمانی رخ می‌دهد که مومنوم دو فاز به حدی زیاد باشد که بر عامل مقاوم غلبه کند. به همین دلیل در کانال‌های ریب‌دار، محدوده تشکیل اسلاگ در سرعت‌های زیاد دو فاز است.

از طرفی در نتایج شبیه‌سازی‌ها مشاهده شد، با وارد شدن به محدوده اسلاگ کانال ریب‌دار (شکل 19)، در شرایط کاملاً یکسان با کانال صاف، این پدیده با شدت بیشتری اتفاق می‌افتد، یعنی اولین اسلاگ در 0/2s و اسلاگ‌های بعدی در زمان‌های کوتاهی نسبت به هم رخ می‌دهد. در این ناحیه ریب نقش خود را به عنوان عامل ناپایدار کننده جریان نشان می‌دهد و به شکل‌گیری اسلاگ در طول کانال کمک می‌کند.

محدوده $0 < \alpha < 1$ نشان‌دهنده محبوس شدن حباب‌های ریز هوا در داخل آب است؛ اما همان‌گونه که در بخش 5-2 نشان داده خواهد شد؛ در کانال صاف این پدیده مشاهده نمی‌شود؛ زیرا با حرکت اسلاگ، کسر حجمی ثابت مانده و همچنان مقدار 1 را خواهد داشت (شکل 18، $t=1/1\text{s}$).

بنابراین، حلگر بکار رفته در این تحقیق قادر به پیش‌بینی صحیح رژیم‌های مشاهده شده در آزمایش‌ها بوده است.

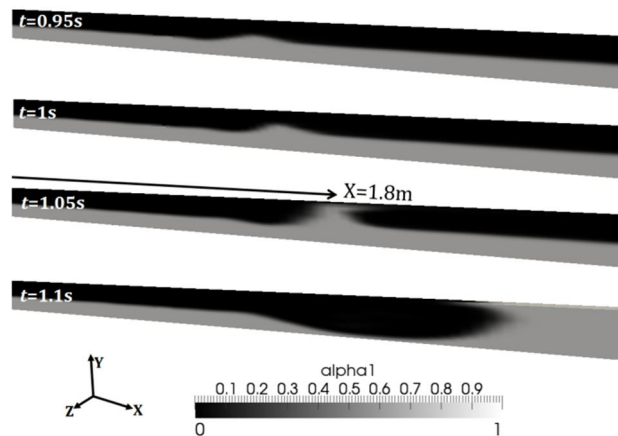
5-2- رژیم اسلاگ در کانال‌های صاف و ریب‌دار

با توجه به بحرانی و مخرب بودن رژیم اسلاگ در کانال‌های طولانی، به بررسی جزئیات آن در کانال‌های صاف و ریب‌دار پرداخته می‌شود.

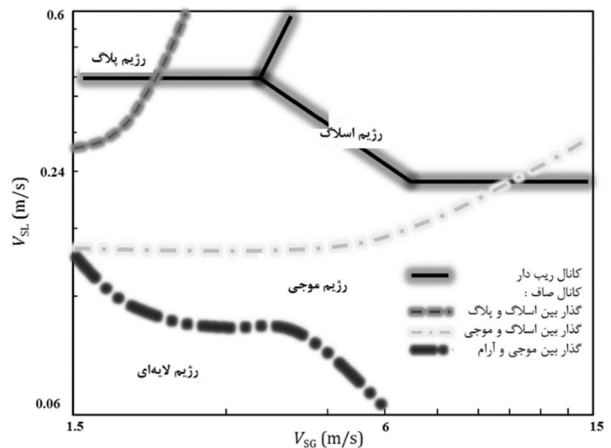
طبق نتایج شبیه‌سازی جریان اسلاگ در کانال ریب‌دار، محل تشکیل اولین اسلاگ در فاصله 2/8 متری از ورودی کانال رخ می‌دهد (شکل 17، $t=0/2\text{s}$). سپس با حرکت اسلاگ به پایین دست و برخورد با ریب‌های تعبیه شده روی دیواره‌های جانبی به سرعت پخش شده و از بین می‌رود.

بادی‌های برنجی مشاهدات آزمایش انجام شده در کانال ریب‌دار با مشخصات هندسی و سینماتیکی متناظر نقطه 3، محل آغاز اسلاگ در فاصله 2/65 متری از ورودی کانال می‌باشد. لذا نتایج عددی به دست آمده، با خطای 5% قادر به پیش‌بینی محل تشکیل اولین اسلاگ در کانال ریب‌دار بوده است.

در ادامه نتایج شبیه‌سازی عددی جریان اسلاگ در کانال صاف با هندسه مشابه کانال ریب‌دار انجام و نتایج در شکل 18 ارائه شده است.



شکل 18 شبیه‌سازی سه بعدی جریان اسلاگ در کانال صاف در زمان‌های متوالی، $u_g=16\text{m/s}$, $u_l=1\text{m/s}$



شکل 19 مقایسه رژیم جریان در کانال صاف و ریب‌دار با $P/e=20$ (تجربی)

1- Built-Up Pressure

اسلاگ را در هر یک از کانال‌های مورد بررسی نشان می‌دهد.

6- نتیجه‌گیری

در مقاله حاضر به بررسی آزمایشگاهی و شبیه‌سازی عددی تأثیر مشخصات هندسی ریب بر رژیم‌های جریان در کانال افقی با مقطع مستطیلی و مقایسه آن با کانال صاف پرداخته شده‌است. ریب‌های مورد مطالعه در دیواره‌های جانبی کانال نصب شده‌اند. نقشه رژیم جریان بر حسب سرعت‌های ظاهری دو فاز برای ریب‌هایی با نسبت گام به ضخامت‌های مختلف ترسیم شده است. نتایج به دست آمده از تحقیق به شرح زیر است:

- طبق مشاهدات تجربی، برخلاف کانال صاف، در کانال ریب‌دار این تحقیق رژیم لایه‌ای اتفاق نمی‌افتد.
- نتایج آزمایشگاهی بیانگر آن است که با ریب‌گذاری در کانال، محدوده رژیم اسلاگ در نقشه جریان به طور قابل توجهی کاهش می‌یابد.
- نتایج تجربی و شبیه‌سازی عددی، محل وقوع اسلاگ را در کانال ریب‌دار بلافاصله پس از برخورد جریان با ریب‌ها نشان می‌دهد. علاوه بر این در کانال ریب‌دار، اسلاگ با حرکت به سمت پایین دست و در مجاورت ریب‌ها به صورت افشانه روی دیواره کانال پخش شده و از بین می‌رود.
- از مقایسه نتایج عددی و تجربی رژیم‌های مختلف جریان در سرعت‌های مشابه نتیجه می‌شود که حلگر بکار رفته در پیش‌بینی رژیم‌های مختلف جریان دو فازی توانمند بوده است.

- از مقایسه دو کانال ریب‌دار مشخص می‌شود که اولین اسلاگ در کانال با ریب‌های کوچک در فاصله دورتر و زمان طولانی‌تر نسبت به ریب بزرگ تشکیل می‌شود.

- ریب‌دار کردن کانال در محدوده سرعت‌های کارکرد منجر به اسلاگ در کانال صاف، محدوده تشکیل اسلاگ را کوچک می‌کند. درحالی‌که در محدوده سرعت‌های منجر به اسلاگ در کانال ریب‌دار، تغییر رژیم به جریان اسلاگ با فرکانس بالاتری اتفاق می‌افتد. کارکرد سیستم در محدوده رژیم ناپایدار اسلاگ آن هم با فرکانس بالا موجب سیلابی شدن تأسیسات پایین دست، خوردگی شدید لوله، ناپایداری سازه‌های خط لوله و ... می‌شود که هزینه تعمیر و نگهداری سیستم را بالا خواهد برد که در این شرایط، ریب‌دار کردن کانال به نفع بهره‌بردار نیست.

7- فهرست علائم

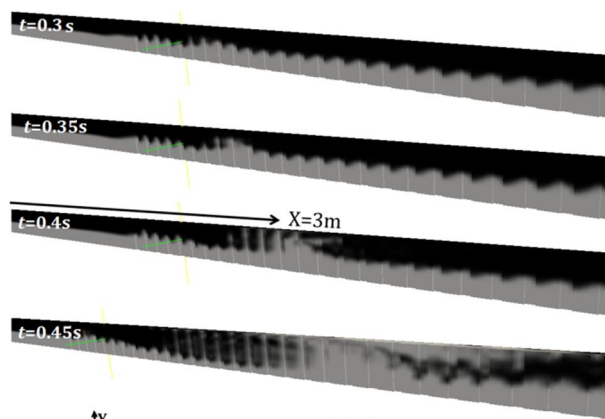
e	ضخامت ریب (mm)
g	شتاب جاذبه ($m.s^{-2}$)
l	طول ریب (mm)
P	گام ریب‌گذاری (mm)
p	فشار (Pa)
u	سرعت ($m.s^{-1}$)
w	عرض ریب (mm)

علائم یونانی

α	کسر حجمی
κ	انحنای سطح مشترک
μ	ویسکوزیته ($kg.m^{-1}.s^{-1}$)
ρ	چگالی ($kg.m^{-3}$)
σ	کشش سطحی ($N.m^{-1}$)

زیرنویس‌ها

g	فاز گاز
-----	---------



شکل 20 روند تشکیل اسلاگ در کانال ریب‌دار با ریب $w=20mm$, $e=4mm$, $u_f=16m/s$, $u_i=1m/s$, $P=60mm$

جدول 4 مقایسه محل و زمان تشکیل اولین اسلاگ برای $u_f=16m/s$, $u_i=1m/s$

نوع کانال	عرض (mm)	ضخامت (mm)	گام (mm)	محل تشکیل (m)	زمان تشکیل (s)
با ریب بزرگ	40	4	80	2/8	0/2
با ریب کوچک	20	4	60	3	0/4
صاف	-	-	-	1/8	1/05

به بیان دیگر، با وجود این که ریب‌دار کردن کانال باعث کاهش محدوده رژیم اسلاگ در نقشه الگوی جریان می‌شود، اما در محدوده تشکیل اسلاگ، این پدیده بسیار سریع‌تر و با شدت بیشتری رخ می‌دهد.

نتیجه مهم این است که ریب‌دار کردن کانال یا لوله در محدوده سرعت‌های منجر به اسلاگ در کانال صاف مناسب است؛ زیرا ریب باعث کاهش این ناحیه می‌شود (شکل 19)؛ اما اگر سرعت‌های کارکرد در محدوده رژیم اسلاگ در کانال ریب‌دار طبق شکل 19 باشد (یعنی سرعت‌های بالای دو فاز)، ریب‌دار کردن به صرفه نیست. طبق نتایج به دست آمده، در این منطقه، تشکیل اسلاگ در کانال صاف در مقایسه با کانال ریب‌دار در فاصله دورتری از ورودی و زمان طولانی‌تری تشکیل می‌شود و فرکانس اسلاگ‌های تشکیل شده به طور قابل توجهی پایین است.

در گام بعدی، ریب با مشخصات $w=20mm$, $e=4mm$, $P=60mm$ و $P/e=15$ به منظور بررسی تأثیر هندسه آن بر تشکیل رژیم اسلاگ، شبیه‌سازی شد. در این حالت با ثابت نگاه‌داشتن فضای بین ریب‌ها (40mm) و ضخامت آن‌ها (4mm) ریب‌های کوچک‌تری به عرض 20 میلی‌متر در نظر گرفته شد (جدول 4).

شکل 20 روند تشکیل اسلاگ را در این نوع از ریب‌ها نشان می‌دهد. همان‌گونه که از شکل 20 دیده می‌شود؛ اولین اسلاگ در فاصله 3 متری از ورودی کانال و در لحظه $t=0/4s$ تشکیل می‌شود. با مقایسه نتایج دو هندسه متفاوت ریب (شکل‌های 17 و 20) اولین اسلاگ در ریب کوچک نسبت به ریب بزرگ، دیرتر و در فاصله دورتری از ورودی پیش می‌آید. در واقع می‌توان گفت ریب‌های بزرگ نقش تأثیرگذارتری را دارند و ناپایداری بیشتری را به سیستم القا می‌کنند. این نتیجه با مشاهدات آزمایشگاهی نیز تأیید می‌شود. چرا که طبق شکل 13 محدوده رژیم اسلاگ در ریب‌های کوچک با نسبت گام به ضخامت 15، وسیع‌تر از ریب بزرگ با نسبت گام به ضخامت 20 است. در واقع فشار القایی بالاتری در ریب‌های بزرگ ایجاد شده که از وقوع رژیم اسلاگ جلوگیری کرده‌است. جدول 4 محل و زمان تشکیل

- [10] C.W. Hirt, B.D. Nichols, Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries, *Computational Physics*, Vol. 39, No. 1, pp.201-225, 1981.
- [11] W.J. Rider, B.D. Kothe, Reconstructing volume tracking, *Computational Physics*, Vol. 141, No. 2, pp.112-152, 1981.
- [12] R. Scardovelli, S. Zaleski, Direct numerical simulation of free-surface and interfacial flow. *Annu. Rev. Fluid Mech*, Vol. 31, No. 1, pp.567-603, 1999.
- [13] D.J. Benson, Volume of fluid interface reconstruction methods for multi-material problems, *Applied Mechanics Reviews*, Vol. 55, No. 2, pp.151-165, 2002.
- [14] Y.-L. Lin, T.I.-P. Shin, M.A. Stephens, M.K. Chyu, A numerical study of flow and heat transfer in a smooth and ribbed U-duct with and without rotation, *Heat Transfer*, Vol. 123, No. 2, pp. 219-232, 2001.
- [15] M. AL-Qahtani, H.Ch. Chen, J.Ch. Han, A numerical study of flow and heat transfer in rotating rectangular channels (AR=4) with 45 deg rib turbulators by Reynolds stress turbulence model, *Heat Transfer*, Vol. 125, No. 1, pp. 19-26, 2003.
- [16] B. Lu, P.X. Jiang, Experimental and numerical investigation of convection heat transfer in a rectangular channel with angled ribs, *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 30, No. 6, pp. 513-521, 2006.
- [17] J.U. Brackbill, D.B. Kothe, C. Zemach, A continuum method for modeling surface tension, *Computational Physics*, No. 100, pp. 335-354, 1992.
- [18] J.H.G. Weller, A new approach to VOF-based interface capturing methods for incompressible and compressible flow, Technical Report TR/HGW/04, OpenCFD Ltd., 2006.
- [19] E. Berberovic, N.P.van. Hinsberg, S. Jakirlic, Drop impact onto a liquid layer of finite thickness: dynamics of the cavity evolution, *Phys. Rev*, Vol. 79, No. 3, pp. 036306, 2009.
- [20] P. Adibi, M.R. Ansari, Experimental Investigation of Slug Initiation to Upstream Conditions of Two Phases in Long Horizontal Channels in Two Fluids, *Modares Mechanical Engineering*, In Press. (In Persian).

I فاز مایع

S ظاهری

8- مراجع

- [1] M.R. Ansari, Numerical analysis for slugging of steam-water stratified two-phase flow in horizontal duct, *Fluid Dynamics Research* 22, pp. 329-344, 1998
- [2] G.D. Zarnett, M.E. Charles, Co-current gas-liquid flow in horizontal tubes with internal spiral ribs, *Chemical. Engineering*, Vol. 47, No. 3, pp. 238-241, 1969.
- [3] J. Weisman, J. Lan, P. Disimile, Two-phase (air-water) flow patterns and pressure drop in the presence of helical wire ribs, *Multiphase Flow*, Vol. 20, No. 5, pp. 885-899, 1994.
- [4] J. Weisman, J. Lan, P. Disimile, Two-phase (air-water) flow patterns and pressure drop in the presence of helical wire ribs, *Multiphase Flow*, Vol. 22, No. 3, pp. 613-619, 1996.
- [5] M. Gradeck, M. Lebouche, Two-phase gas-liquid flow in horizontal corrugated channels, *Multiphase Flow*, Vol. 26, No. 3, pp. 435-443, 2000.
- [6] H.Y. Kim, S. Koyama, W. Matsumoto, Flow patterns and flow characteristics for counter-current two-phase flow in vertical round tube with wire-coil inserts, *Multiphase Flow*, Vol. 27, No. 19, pp. 2063-2081, 2001.
- [7] M.R. Ansari, B. Arzandi, Two-phase gas-liquid flow regimes for smooth and ribbed rectangular ducts, *Multiphase Flow*, Vol. 38, No. 1, pp. 118-125, 2012.
- [8] W. Dijkhuizen, E.I.V. van den. Hengel, N.G. Deen, M. van. Sint Annaland, Numerical investigation of closures for interface forces acting on single air-bubbles in water using volume of fluid and front tracking models, *Chemical Engineering Science*, Vol. 60, pp. 6169-6175, 2005.
- [9] M. van. Sint Annaland, W. Dijkhuizen, N.G. Deen, J.A.M. Kuipers, Numerical simulation of behavior of gas bubbles using a 3-D front tracking method, *AIChE*, Vol. 52, No. 1, pp. 99-110, 2006.