مجله مهندسی مکانیک مدرس، اسفند 1393، دوره 14، شماره 12، ص‌ص 52-60

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

مطالعه تجربی نمودارهای جریان دوفازی گاز-مایع در شیب‌های متوالی یک زانویی بزرگ

محمدرضا انصاری[1*]، بابک حبیب‌پور[2]، ابراهیم سلیمی[2]، پویان ادیبی[3]

1- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

2- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

3- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس

*تهران، صندوق پستی 14115-143، mra_1330@modares.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 09 مرداد 1392
پذیرش: 24 مهر 1392
ارائه در سایت: 09 مهر 1393

کلید واژگان:
جریان دوفازی
شیب‌های متوالی
کانال شیب‌دار
دیاگرام جریان
کانال مستطیلی

چکیده

در تحقیق حاضر به مطالعه تجربی رژیم‌ها و نمودارهای جریان دوفازی آدیاباتیک آب-هوا در شیب‌های متوالی کانالی به شکل یک زانویی بزرگ و همچنین قسمت‌های افقی بالادست و پایین‌دست این زانویی پرداخته شده است. نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهند که ناحیه مربوط به رژیم جریان حبابی طویل بدون تأثیر از تغییرات شیب کانال، برای هر سه مقطع شیب‌دار کاملاً بر هم منطبق می‌باشد. همچنین با کاهش شیب کانال در طول مسیر، گذار از رژیم جریان مه‌آلود گردابه‌ای به حلقوی مه‌آلود، به دبی‌های بالاتر جریان گاز منتقل می‌شود. رژیم جریان حلقوی تنها در شیب اول مشاهده می‌شود. رژیم جریان اسلاگ در قسمت افقی بالادست زانویی، براساس رشد ناهمواری‌های سطح مشترک و در قسمت افقی پایین‌دست توسط حباب‌های تیلور ایجاد می‌شود. با این وجود، افزایش دبی جریان مایع، سبب رشد ناحیه مربوط به رژیم جریان اسلاگ در هر دو قسمت می‌شود. علاوه بر موارد فوق نحوه تغییرات کسر حجمی فاز گاز با دبی فازها در مقطع ورودی نیز مورد توجه قرار گرفته است.

Experimental study of gas-liquid two-phase flow in the consecutive inclinations of alarge bend

Mohammad Reza Ansari[1*], Babak Habibpour[1], Ebrahim Salimi[1], Pouyan Adibi[2]

1- Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.
2- Department of Mechanical Engineering, Hormozgan University, Bandar-Abbas, Iran
*P.O.B. 14115-143 Tehran, Iran, mra_1330@modares.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 31 July 2013
Accepted 16 October 2013
Available Online 01 October 2014

Keywords:
Two-Phase Flow
Consecutive Inclinations
Inclined Channel
Flow Diagram
Rectangular Channel

ABSTRACT

Experimental investigation of two-phase air-water flow was conducted at consecutive inclinations of a large bend (with three equal slopes in respect to each other) and including the horizontal sections of the inlet and outlet of the bend. The results show that the elongated bubble regime flows without any effect of duct inclination change and consistent for all three zones of horizontal sections of before and after the bend and the bend itself. It was also noticed, as the duct inclination decreases along the route, vortex misty flow transmits to misty annular flow at higher gas flow rates. The annular flow regime was noticed only at the first slop of the bend. Slug flow was observed at the horizontal sections upstream and downstream of the bend. The slug flow at the upstream generated by the interfacial instabilities but at the downstream formed by Taylor bubbles. Slug flow area in the flow diagram increases as liquid flow rate increase at both horizontal sections. In addition, the void fraction change rate with phases mass flow rate was considered at the duct inlet.

1- مقدمه

انتقال هم‌زمان جریان دوفازی مایع و گاز در بسیاری از کاربردهای مهندسی مانند سکوهای نفتی، سیستم‌های تهویه مطبوع، مولدهای بخار هسته‌ای، خطوط انتقال نفت و گاز، سیستم‌های سرد ساز، مبدل‌های حرارتی و راکتورهای شیمیایی مشاهده می‌شود. این انتقال ممکن است بسته به پارامترهای مختلفی مانند شکل هندسی خطوط لوله و شدت جریان یا سرعت ظاهری هرکدام از فازها و یا شار حرارتی وارد بر لوله، در قالب رژیم‌های جریان مختلفی که در واقع مشخص کننده شکل هندسی سطح مشترک بین دوفاز می‌باشند، صورت گیرد. با تغییر اساسی در هندسه‌ی سطح مشترک، گذار از یک الگوی جریان به الگوی دیگر رخ می‌دهد. هیدرودینامیک جریان، افت فشار، کسر تجمعی هر فاز، مکانیزم‌های انتقال مومنتم، جرم، گرما و همچنین پایداری سیستم‌های انتقال جریان دوفاز تا حد زیادی از یک رژیم جریان به رژیم دیگر تغییر می‌کند. در نتیجه، تعیین نوع رژیم جریان داخل کانال برای تحلیل مناسب جریان‌های دوفازی در کاربردهای مهندسی، به‌خصوص برای مقاصد طراحی خطوط انتقال جریان‌های دوفازی بسیار حائز

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:
M. R. Ansari, B. Habibpour, E. Salimi, P. Adibi, Experimental study of gas-liquid two-phase flow in the consecutive inclinations of alarge bend, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 12, pp. 52-60, 2014 (In Persian)

اهمیت می‌باشد. بر این اساس مطالعات تجربی قابل توجهی در طی چند دهه‌ی اخیر بر روی الگوهای جریان و پیش‌بینی آن‌ها صورت گرفته است.

بیکر [1] یکی از قدیمی‌ترین نقشه‌های جریان را بر اساس داده‌های موجود از کارهای دیگران، که عمدتاً مربوط به سیستم دوفازی آب-هوا بود، ارائه داد. مختصات مورد استفاده بیکر، دبی جرمی گاز و نسبت دبی جرمی فاز مایع به فاز گاز بود. همچنین وی پارامترهایی را برای تعمیم این نمودار به سیالات دیگری غیر از آب و هوا ارائه نمود. هوگندورن [2] از سرعت مخلوط دوفازی و کسر حجمی فاز گاز ورودی به‌عنوان مختصات نقشه استفاده نمود. مختصات مورد استفاده وی منجر به نواحی بسیار متراکم برای رژیم‌های مهم موجی و حلقوی شد. الشیخ و همکاران [3] گروه‌های مختلفی از اعداد بی‌بعد را برای نقشه جریان دوفازی بررسی نمودند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که هیچ کدام از جفت گروه‌های مورد بررسی توانایی پیش‌بینی مناسبی برای رژیم‌ها و مرزهای گذار بین آن‌ها را ندارند. کیم و قاجار [4] نقشه‌ی الگوی جریانی را برای سیستم آب-هوا در کانال افقی بر پایه دبی جرمی فازها ارائه دادند. که تطابق خوبی با نقشه‌های قبلی داشت. مندهین و همکاران [5] براساس داده‌های زیادی از کارهای دیگران و با توجه به نقش کسر حجمی فازها در شکل‌گیری رژیم‌های مختلف، از سرعت ظاهری[1] فازها، نسبت دبی هر فاز به سطح مقطع کل لوله، برای محورهای مختصات دیاگرام استفاده کردند. آن‌ها نتایج مناسبی از مقایسه‌ی دیاگرام خود با دیاگرام‌های ارائه شده توسط بیکر [1] و هوگندورن [2] به‌دست آوردند.

در طی سال‌های اخیر دیاگرام‌هایی که برپایه سرعت‌های ظاهری و یا دبی‌های حجمی یا جرمی فازها در مقطع ورودی کانال حاوی جریان دوفازی می‌باشند، به‌دلیل سادگی در استفاده، پذیرش بیشتری را در بین محققان داشته‌اند. با توجه به مستتر بودن مقدار کسر تهی[2] در تعریف سرعت ظاهری، در مواردی که امکان تغییرات کسر حجمی فاز گاز در مقطع ورودی کانال وجود دارد، گزارش نحوه تغییرات کسر حجمی فازها در ورودی کانال بسیار سودمند است.

با وجود مطالعات گسترده در زمینه رژیم‌های جریان، عمده این مطالعات بر جریان‌های افقی و قائم متمرکز بوده و تحقیقات کمتری در زمینه بررسی اثر شیب بر الگوهای جریان دوفازی گزارش شده است.

وایزمن وکانگ [6] جریان آب-هوای رو به بالا را تا شیب 7 درجه بر اساس دبی جرمی فازها، مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها دریافتند که تغییر شیب، تاثیری بر مرزهای گذار به رژیم‌های حلقوی[3] و پخشی[4] ندارد. بارنی و همکاران [7] به بررسی جریان دوفازی رو به بالا در شیب‌های زیاد، بر اساس سرعت ظاهری فازها پرداختند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که رژیم‌های جریان حبابی و درهم[5] به‌ترتیب در شیب‌های بالاتر از 50 و 70 درجه تشکیل می‌شوند. ادی و همکاران [8] به مطالعه تجربی جریان دوفازی در محدوده وسیعی از 0 تا 92 درجه پرداختند. آن‌ها با ترسیم دیاگرام جریان شیب‌های مورد بررسی بر اساس سرعت ظاهری فازها، رژیم‌های حبابی، اسلاگ، لایه‌ای و لایه‌ای-موجی را مشاهده نمودند. همچنین نتایج به‌دست آمده برای کسر حجمی فاز مایع را به‌صورت تابعی از دبی، شیب کانال و رژیم جریان گزارش کردند. انصاری و همکاران [9] به بررسی تجربی اثر زاویه شیب کانال S شکل بر الگوی جریان دوفازی پرداختند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که با افزایش شیب، گذار به الگوی جریان قالبی گردابه‌ای[6] در سرعت‌های ظاهری بالاتر آب صورت گرفته و به‌واسطه‌ی آن اندازه ناحیه مربوط به جریان اسلاگ[7] کوچک‌تر می‌شود.

یکی از اشکال متداول در لوله کشی نیروگاه‌ها و یا خطوط انتقال نفت وگاز، وجود شیب‌های متوالی در مسیر انتقال جریان چند فازی می‌باشد. در سیستم‌های لوله‌کشی صنعتی، مانند نیروگاه‌ها و بویلرهای بزرگ، استفاده از زانویی[8]های بزرگ با شیب‌های متوالی امری رایج است. به‌علاوه کانال‌های مورد استفاده در استخراج نفت و گاز از چاه‌های موجود در کف دریا و یا خطوط انتقال نفت و گاز، عمدتاً به‌دلیل ناهمواری بستر دریاها و یا وجود موانع طبیعی مانند مسیرهای تپه‌ای، شیب‌های متوالی زیادی را تجربه می‌کنند. با این وجود هیچ مطالعه‌ای در پیشینه‌ی پژوهش به بررسی الگوهای جریان دوفازی در مسیرهایی با شیب‌های متوالی نپرداخته‌اند.

در تحقیق حاضر رژیم‌های جریان دوفازی همجهت آب-هوا در مسیری با شیب‌های متوالی، به شکل یک زانویی بزرگ، مورد مطالعه قرار گرفته و دیاگرام جریان مربوط به هر کدام از قسمت‌های شیب‌دار و مقاطع قبل و بعد از زانویی ترسیم شده است. در رسم دیاگرام جریان، از سرعت‌های ظاهری فازها، که معمولاً در کاربردهای صنعتی به‌عنوان کمیت معلوم در کانال‌های حاوی جریان دوفازی گزارش می‌شود، برای محورهای مختصات استفاده شده است. همچنین با در نظر گرفتن اهمیت آگاهی از مقدار کسر تهی در مقطع ورودی و با توجه به ثابت نبودن مقدار آن در کار حاضر، تغییرات کسر حجمی فاز گاز در مقطع ورودی کانال، برحسب دبی حجمی فاز گاز و مایع گزارش شده است.

2- سیستم آزمایشگاهی

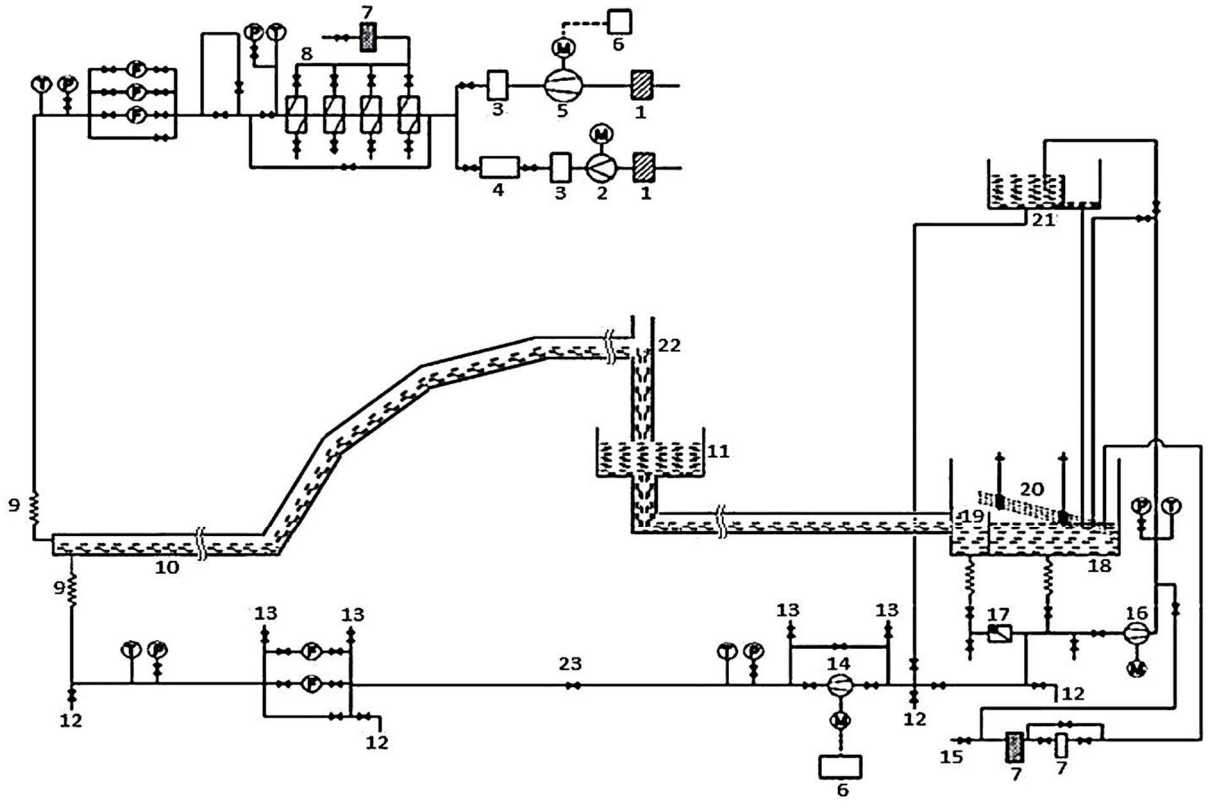
شکل 1 نمای شماتیک سیستم آزمایشگاهی مورد استفاده را نشان می‌دهد. این سیستم شامل خط تامین هوا، خط تامین آب، کانال حاوی جریان دوفازی، مخلوط کننده یا ورودی آب و هوا و تجهیزات اندازه‌گیری می‌باشد.

آب با عبور از فیلترهای در نظر گرفته شده، تانک 2 (شماره 18) را تا ارتفاع معینی پر می‌کند. سپس پمپ 2 (شماره 16) آب این تانک را به تانک1(شماره 21)، که در ارتفاع 4 متری قرار دارد، پمپ می‌کند، ارتفاع آب در این تانک ثابت می‌باشد. این مورد با سرریز آب اضافی به قسمت دوم تعبیه شده در این تانک، قبل از تخلیه به تانک شماره 2 صورت می‌گیرد. تانک شماره 1 هد مورد نیاز برای جریان آب داخل کانال را تامین می‌کند. علاوه بر این تانک، در صورت نیاز به هد بالاتر، پمپ 1 به‌طور مستقیم وارد مدار می-شود. مقدار دبی آب مورد نیاز نیز توسط شیر 23 تنظیم شده و سپس دبی، فشار و دمای آب خروجی از تانک 1، قبل از ورود به کانال اندازه‌گیری می‌شود.

هوای مورد نیاز برای جریان در داخل کانال، نیز توسط یک کمپرسور با توان 45 کیلو وات تامین می‌شود. با مکش کمپرسور، هوا از محیط آزمایشگاه با عبور از فیلتر هوا وارد مخزن هوا می‌شود. فشار هوای فشرده شده داخل مخزن، با خروج از مخزن توسط یک سیستم تنظیم کننده فشار (رگلاتور فشار)، تا فشار اتمسفر کاهش می‌یابد. همچنین دمای هوا نیز در صورت لزوم قبل از ورود به کانال حاوی جریان دوفازی، توسط یک سیستم خنک کننده هوا به دمای محیط کاهش می‌یابد. تا شرط تعادل دمایی بین دوفاز در طول

1- Superficial Velocity
2- Void Fraction
3- Annular
4- Dispersed
5- Churn

6- Vortex Plug
7- Slug
8- Bend



1: فیلتر هوا، 2: کمپرسور، 3: تانک هوا، 4: تنظیم‌کننده فشار، 5: دمنده، 6: سیستم کنترل دمنده، 7: فیلتر آب، 8: سیستم خنک کاری هوا، 9: لوله‌های انعطاف‌پذیر، 10: خط کانال شفاف، 11: تانک3، 12: درین، 13: ونت هواگیری، 14: پمپ1، 15: آب شهری، 16: پمپ2، 17: شیر یک‌طرفه، 18: تانک2، 19: صفحه کنترل سطح آب، 20: گیرنده اسلاگ، 21: تانک1، 22: جداکننده آب و هوا، 23: شیر تنظیم دبی آب، P: فشارسنج، T: ترمومتر، F: فلومتر، M: موتور الکتریکی

شکل 1 نمای شماتیک سیستم آزمایشگاهی

کانال حفظ شود. لازم به ذکر است که برای تنظیم دبی‌های مختلف هوای ورودی، از یک اینورتر برای تغییر دور موتور کمپرسور استفاده شده است. مشابه سیستم تامین آب، فشار، دما و دبی جریان هوا در مسیر تانک هوا تا ورودی کانال جریان دوفازی، در نقاط مختلفی اندازه‌گیری می‌شود.

کانال حاوی جریان دوفازی آب-هوا از جنس پلکسی گلس شفاف با مقطع مستطیلی به ابعاد داخلی $50\times100\ mm^2$ و به ضخامت 10 mm ساخته شده و امکان مشاهده بصری و ثبت رژیم‌های جریان را توسط دوربین مهیا می‌سازد. طول این کانال در قسمت افقی قبل از مقاطع شیب‌دار 15/2 m متر و در قسمت افقی بعد از مقاطع شیب‌دار در حدود 4/5m متر می‌باشد. همچنین طول کانال در هر یک از مقاطع شیب‌دار مورد مطالعه برابر 1/3m متر در نظر گرفته شده است. آب با گذر از کانال حاوی جریان دوفاز، وارد جداکننده شده و هوا به اتمسفر و آب به داخل تانک 3 و از آنجا به تانک 1 تخلیه می‌شود. لازم به‌ذکر است که تانک 3 با هدف آزادی عمل بیشتر در اجرای خط کانال درنظر گرفته شده است. شیب کانال اول با افق برابر °67/5 درجه ، شیب کانال دوم °45 درجه و شیب کانال سوم برابر °22/5 درجه می‌باشد. شکل 2 نمای شماتیک کانال مورد بررسی به‌همراه محل ثبت الگوهای جریان توسط دوربین مورد استفاده را در طول مسیر نشان می‌دهد. برای ایجاد شیب‌های مورد نظر از زانویی‌هایی با جنس پلکسی‌گلس استفاده شده است.

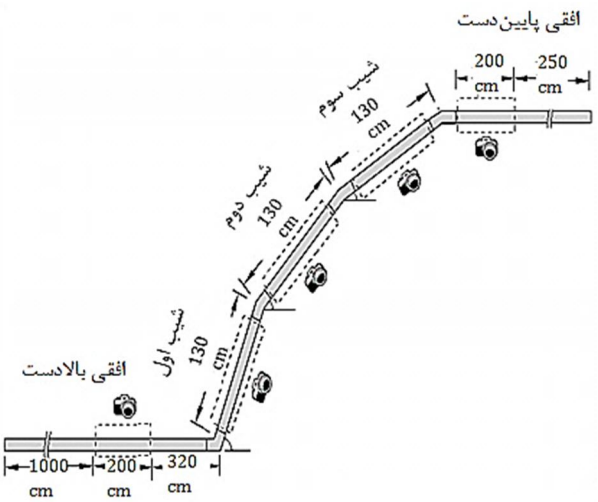
هوا و آب از طریق ورودی نشان داده شده در شکل 3 وارد خط کانال می‌شود.

همان‌طور که درشکل 3 نشان داده شده است، آب از پایین و هوا به‌صورت افقی وارد این قسمت می‌شوند. یک صفحه فلزی نازک نیز در ورودی قرار داده شده است. حضور این صفحه سبب می‌شود که جریان آب و هوا به‌صورت منظم‌تری وارد خط کانال شوند و از اغتشاشات و ناپایداری‌هایی که در اثر تقاطع مستقیم دو جریان عمود بر هم آب و هوا ممکن است در فصل مشترک دو فاز ایجاد شود، جلوگیری کرده و به توسعه یافتن جریان کمک می‌کند. بارنی و همکاران [7] نشان دادند که این نوع ورودی نسبت به انواع دیگر، پایداری بیشتری ایجاد می‌کند.

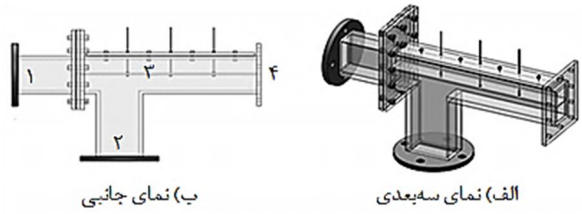
برای اندازه‌گیری دبی حجمی جریان آب از دبی‌سنج مغناطیسی با دقت $\pm0/1m^3/hr$ و برای جریان هوا از دبی‌سنج ورتکسی با دقت $\pm0/01m^3/hr$ استفاده شده است. بیشترین مقدار عدم قطعیت‌های اندازه‌گیری طبق استاندارد ASME، [10]، برای فلومتر آب و هوا به ترتیب ±1/25% و ±5% می‌باشد. برای اندازه‌گیری دمای جریان آب و هوا، قبل از ورود به کانال حاوی جریان دوفازی از دماسنج‌هایی با دقت 0/01، مطابق با کاتالوگ شرکت سازنده، و عدم قطعیت 3% استفاده شده است. همچنین فشارسنج‌های مورد استفاده در آزمایشگاه نیز از نوع پیزو الکتریک با دقت 0/01mbar و با بیشترین مقدار عدم قطعیت 1/38% می‌باشند.

برای ثبت تصاویر و فیلم‌برداری از رژیم‌های مختلف، از دوربین کانون[1] با مدل پاورشات 220[1] و سرعت شاتر 1/3200 s استفاده شده که قابلیت

1- Canon



شکل 2 قسمت‌های مختلف خط کانال مورد آزمایش به همراه نقاط ثبت الگوهای جریان



۱: ورودی هوا ۲: ورودی آب ۳: صفحه نازک فلزی ۴: خروجی به سمت کانال

شکل 3 مخلوط‌کننده آب و هوا در ورودی خط کانال

فیلمبرداری تا سرعت 240 fps و ثبت تصاویر با کیفیت 12/1 Mp را دارا می‌باشد.

3- روش انجام آزمایش

در کار حاضر، مطابق معمول به‌دلیل دسترسی آسان و ایمنی بالا از آب به‌عنوان فاز مایع و از هوا به‌عنوان فاز گاز استفاده شده است. آزمایش‌ها به‌صورت آدیاباتیک در فشار اتمسفریک و در دمای متوسط آزمایشگاه، 27°C، انجام شده‌اند. برای تعیین نقشه جریان دوفازی، ابتدا جریان آب با دبی معین در کانال برقرار شده است. پس از پر شدن کامل خط کانال و برقراری جریان پایدار آب، جریان هوا در کانال در گام‌های کوچکی تا مقدار ماکزیمم مورد نظر افزایش یافته و رژیم‌های مختلف ایجاد شده پس از اطمینان رسیدن به حالت پایدار، در طی مدت زمان تقریبی 300 S، از طریق مشاهده تعیین و توسط دوربین فیلمبرداری به مدت 120 S ثانیه، ثبت شده است. لازم به‌ذکر است که مطابق شکل 2 ثبت جریان به‌وسیله‌ی دوربین در پنج محل متفاوت در طول مسیر صورت گرفته است که عباتند از: دو متر ابتدای قسمت افقی بعد از مقاطع شیب‌دار، ناحیه‌ای به طول 200 cm در قسمت افقی قبل از مقاطع شیب‌دار و در فاصله‌ی 320 cm از ابتدای شیب اول و همچنین در فاصله‌ی بین دو زانویی متوالی برای هر یک از مقاطع شیبدار، که ناحیه‌ای در حدود 100 cm می‌باشد. برای آغاز جریان هوا در کانال، فشار هوای تامین شده توسط کمپرسور می‌بایست بر فشار هیدرواستاتیکی حاکم در ورودی کانال که ناشی از ارتفاع آب در مقاطع شیب‌دار می‌باشد، غلبه کند. در مرحله بعدی آزمایش، با قطع جریان هوا، دبی آب نسبت به حالت قبل کمی افزایش یافته و مشابه گام قبل پس از پرشدن کامل کانال، جریان هوا بتدریج در کانال زیاد شده و این روند تا تعیین کامل دیاگرام جریان ادامه یافته است. محدوده مورد بررسی برای جریان آب $1\text{-}9\ m^3/hr$ و برای هوا $0\text{-}480\ m^3/hr$ می‌باشد.

4- نتایج و بحث

4-1- رژیم‌های جریان دوفازی

تشخیص الگوهای جریان دوفازی از طریق مشاهده، امری ذهنی و وابسته به دیدگاه شخصی محققان می‌باشد. به‌طوری‌که تاکنون گستره‌ی وسیعی از اسامی برای الگوهای جریان دوفازی پیشنهاد شده است. این مورد به‌خصوص در جریان‌هایی با شیب‌های رو به بالا، که برگشت رو به پایین مایع به‌واسطه نیروی گرانش سبب دشواری در تشخیص و تمییز بین رژیم‌ها می‌شود، نمو بیشتری دارد. لذا با توجه به عدم وجود تقسیم‌بندی واحدی برای رژیم‌های جریان، توضیح جزئیات رژیم‌های مشاهده شده در تحقیق حاضر، لازم می‌باشد.

در کار حاضر به‌طور کلی 9 نوع رژیم جریان در طی آزمایش در قسمت‌های مختلف کانال مشاهده شد که از این بین پنج رژیم لایه‌ای[2]، موجی[3]، موجی غلتان[4]، اسلاگ و مه‌آلود[5] مختص قسمت‌های افقی و سه رژیم حلقوی، حبابی طویل[6] و مه‌آلود گردابه‌ای[7] مختص مقاطع شیب‌دار می‌باشند و رژیم جریان حلقوی مه‌آلود[8] به‌طور مشترک در قسمت‌های شیب‌دار و افقی بعد از مقاطع شیب‌دار مشاهده شد. شکل‌های 4 و 5 به ترتیب نشان‌دهنده‌ی رژیم‌های جریان مشاهده شده در مقاطع افقی و شیب‌دار می‌باشند. توضیحات مربوط به این رژیم‌ها به قرار زیر می‌باشد.

رژیم جریان لایه‌ای: در این نوع رژیم جریان، اندرکنش بین دوفاز ناچیز بوده و جدایش کامل بین فازها وجود دارد. جریان مایع در قسمت پایین و فاز گاز در بالای کانال قرار دارد و سطح مشترک بین آن‌ها صاف می‌باشد (شکل الف-4).

رژیم جریان موجی: در این نوع رژیم جریان که در دبی‌های پایین فاز گاز مشاهده می‌شود، تنش وارده از طرف جریان گاز بر سطح فاز مایع سبب ایجاد ناپایداری‌هایی به شکل موج در سطح مشترک دو فاز می‌شود. در این رژیم، ارتفاع این ناپایداری‌ها به اندازه‌ای نیست که به دیواره‌ی بالایی کانال برسد (شکل ب-4).

رژیم جریان اسلاگ: در این نوع رژیم جریان که ماهیت متناوب دارد، یکی از امواج ایجاد شده در سطح مشترک دوفاز رشد کرده و به دیواره بالایی کانال می‌رسد و مسیر عبور گاز را مسدود می‌کند، افزایش فشار گاز در پشت اسلاگ ایجاد شده سبب حرکت سریع این لخته مایع در جهت جریان می‌شود (شکل پ-4).

رژیم جریان موجی غلتان:این نوع رژیم جریان همانند رژیم جریان اسلاگ، ماهیت متناوب داشته و به‌واسطه رشد ناپایداری‌های فصل مشترک ایجاد می‌شود. با این تفاوت که به‌دلیل فشار بالاتر خط کانال، ناشی از بیشتر بودن دبی گاز نسبت به جریان اسلاگ، ناپایداری‌های ایجاد شده توان رشد زیاد و مسدود نمودن کامل سطح مقطع کانال را نداشته و به‌صورت توده‌های غلتان در جهت جریان حرکت می‌کنند. لازم به‌ذکر است که سرعت حرکت

2- PowerShot SX220

1- Stratified
2- Wavy
3- Roll wave
4- Misty
5- Elongated bubble
6- Vortex Misty
7- MistyAnnular

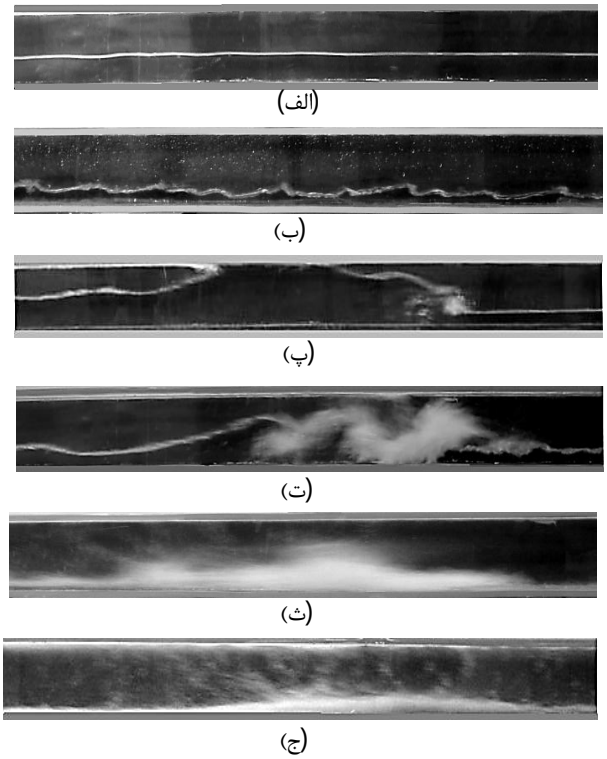
این توده‌ها به‌دلیل بسته نشدن کامل مقطع کانال و پایین‌تر بودن فشار پشت آنها نسبت به جریان اسلاگ کمتر می‌باشد (شکل ت-4).

رژیم جریان مه‌آلود: در این نوع رژیم جریان که در سرعت‌های بالای فاز گاز مشاهده می‌شود، فاز مایع به‌صورت توده‌های مه‌آلودی در کف کانال جریان داشته و قطرات زیادی از سطح ناپایدار فاز مایع جدا شده و به داخل محیط پیوسته‌ای از فاز گاز اسپری می‌شود (شکل ث-4).

رژیم جریان حباب‌های طویل یا حباب‌های تیلور[1]: در این رژیم جریان که در دبی‌های پایین فاز گاز مشاهده می‌شود، گاز به‌صورت متناوب در حباب-های بزرگ گلوله‌ای شکل با قطری تقریبا برابر با عرض کانال و در میان محیط پیوسته‌ای از مایع قرار می‌گیرد. این حباب‌ها که به حباب‌های تیلور نیز معروفند، در مقاطع شیبدار توسط فیلمی از مایع از دیواره پایینی کانال جدا می‌شوند (شکل الف-5).

رژیم جریان مه‌آلود گردابه‌ای: در این نوع از رژیم جریان که تنها در قسمت‌های شیب‌دار مشاهده می‌شود، همواره مقداری از مایع به‌دلیل مومنتم پایین وتاثیر نیروی گرانش موفق به عبور از کانال نشده و در نتیجه به‌سمت پایین بر می‌گردند و در برخورد با جریان گاز تشکیل گردابه‌هایی را می‌دهند که این گردابه‌ها عمدتاً حاوی حباب‌های ریزی در بدنه خود بوده و به‌صورت کف‌آلود دیده می‌شوند. همواره در حین تشکیل چنین گردابه‌هایی قطراتی از سطح مایع توسط گاز جدا شده و محیط مه‌آلودی در اطراف گردابه‌ها ایجاد می‌کنند(شکل ب-5).

رژیم جریان حلقوی مه‌آلود: این نوع رژیم جریان که در قسمت‌های شیب‌دار و افقی بعد از مقاطع شیب‌دار و در دبی‌های پایین‌تر گاز نسبت به جریان حلقوی ایجاد می‌شود، فاز مایع به‌صورت توده‌ای مه‌آلود در کف کانال



شکل 4 رژیم‌های جریان قسمت‌های افقی. الف) لایه‌ای، ب) موجی، پ) اسلاگ، ت) موجی غلتان، ث) مه‌آلود، ج) حلقوی مه آلود

1- Taylor

به همراه فیلمی از مایع در پیرامون کانال جریان داشته و همواره قطراتی از مایع در داخل هسته گازی حضور دارند (شکل‌های ج-4 و پ-5).

رژیم جریان حلقوی: در سرعت‌های بسیار بالای گاز، فاز مایع به صورت فیلمی در روی دیواره لوله و فاز گاز در میان آن و در مرکز کانال جریان دارد. به‌دلیل اختلاف سرعت بالای دوفاز، قطراتی از مایع ممکن است وارد هسته گازی شوند (شکل ت-5).

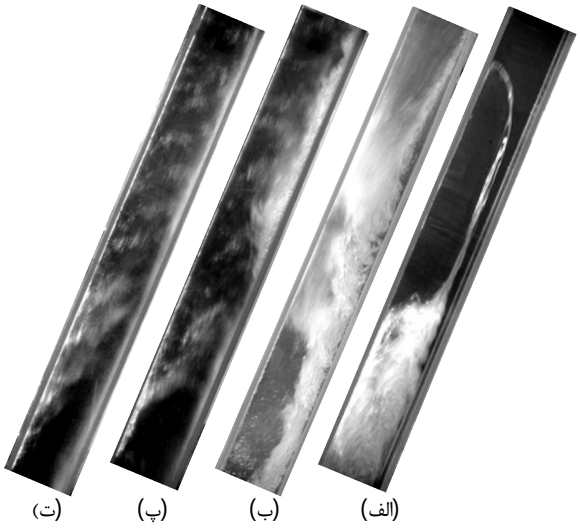
4-2- نمودارهای جریان

در کار حاضر برای تهیه دیاگرام جریان، رژیم‌های مشخص شده از طریق مشاهده، بر روی دیاگرام دوبعدی با محورافقی سرعت ظاهری جریان گاز (u_{sg}) و محور عمودی سرعت ظاهری جریان مایع (u_{sl})ترسیم شده‌اند. خطوط پهن رسم شده در این نمودارها نشان‌دهنده مرزهای گذر بین رژیم-های مختلف می‌باشد. شایان ذکر است که گذر از این خطوط به معنای تغییر سریع بین رژیم‌ها نبوده بلکه تغییر در الگوها به تدریج اتفاق می‌افتد و این خطوط در واقع نماینده نواحی گذر بین رژیم‌ها هستند. قسمت‌هایی از نمودار که با عبارت " پر از مایع[2]"مشخص شده‌اند مربوط به محدوده‌ای است که فشار هوا در مقطع ورودی توان غلبه بر فشار هیدرواستاتیکی ناشی از ارتفاع آب در مقاطع شیب‌دار را نداشته و سطح مقطع کانال پر از مایع می‌باشد.

برای مطالعه نحوه رفتار و تغییرات رژیم‌ها در خط کانال مورد نظر، دیاگرام جریان مربوط به پنج قسمت از کانال، شیب‌های اول،دوم، سوم و قسمت‌های افقی قبل و بعد از مقاطع شیب‌دار ترسیم و مورد بررسی قرار گرفته‌اند.

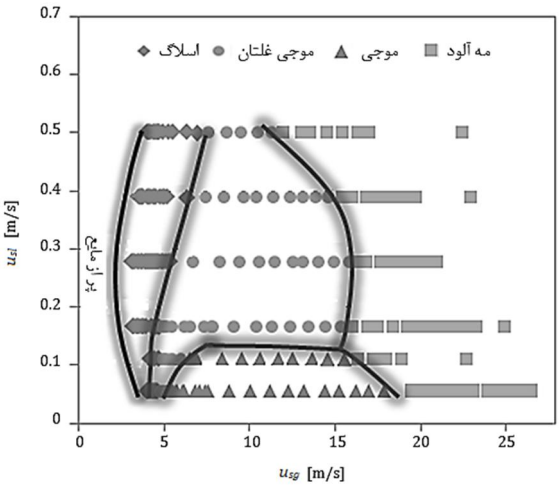
4-2-1- دیاگرام جریان قسمت افقی قبل از مقاطع شیب‌دار

شکل 6 دیاگرام جریان مربوط به قسمت افقی قبل از مقاطع شیب‌دار و نقاط مورد آزمایش را نشان می‌دهد. همان‌طوری که مشاهده می‌شود، رژیم جریان موجی تنها در سرعت‌های ظاهری مایع کمتر از 0/12 m/s و به ازای محدوده‌ی نسبتاً وسیعی از سرعت‌های ظاهری فاز گاز، u_{sg} <18/7 m/s >5/2، مشاهده می‌شود. افزایش دبی گاز سبب کاهش طول موج‌های رژیم



شکل 5 رژیم‌های جریان مقاطع شیب‌دار. الف) حبابی طویل ب) مه‌آلود گردابه‌ای پ)حلقوی مه‌آلود ت) حلقوی

2- Liquid Filled



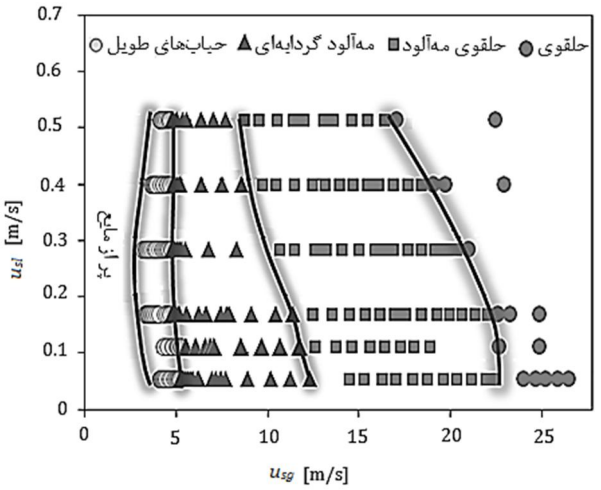
شکل 6 دیاگرام جریان قسمت افقی قبل از مقاطع شیب‌دار

جریان موجی می‌شود. با افزایش سرعت ظاهری فاز مایع درسرعت‌های ظاهری جریان گاز بالاتر از 15/5 m/s، این رژیم به رژیم جریان مه‌آلود و در سرعت‌های ظاهری جریان گاز کمتر از 15/5 m/s به رژیم موجی غلتان تبدیل می‌شود. رژیم جریان اسلاگ در سرعت‌های ظاهری پایین جریان گاز و به ازای تمام نرخ‌های جریان مایع رخ می‌دهد. مکانیزم شکل‌گیری جریان اسلاگ در این قسمت از کانال بر پایه‌ی رشد ناهمواری‌های موجود در سطح مشترک دوفاز بوده و از تئوری ناپایداری کلوین-هلمهولتز پیروی می‌کند[11]. این رژیم در سرعت‌های ظاهری پایین فاز مایع و با افزایش نرخ گاز سریعاً تبدیل به رژیم موجی غلتان می‌شود در حالی که با افزایش دبی جریان مایع و بیشتر شدن کسر حجمی مایع در طول کانال، ناپایداری‌های ایجاد شده در سطح مشترک راحت‌تر خود را به سقف کانال رسانده و مقطع لوله را می‌بندند. لذا محدوده‌ی مربوط به این رژیم با افزایش دبی یا سرعت ظاهری جریان مایع بزرگتر می‌شود. لازم به‌ذکر است که اسلاگ‌های تشکیل شده در دبی‌های پایین مایع، به‌دلیل ناپایداری‌های ناشی از برگشت مایع از مقاطع شیب‌دار، عمدتاً در قسمت انتهایی و نزدیک به مقاطع شیب‌دار تشکیل می‌شوند در حالی که افزایش دبی مایع سبب جابه‌جایی محل تشکیل اسلاگ به سمت مقطع ورودی کانال می‌شود. بالا بردن دبی جریان گاز باعث افزایش فشار هیدرودینامیکی خط کانال شده و مانع از رشد زیاد ناپایداری‌های واقع در سطح مشترک می‌شود. بنابراین افزایش سرعت ظاهری جریان گاز، سبب تبدیل رژیم جریان اسلاگ به رژیم موجی غلتان می‌شود. این رژیم در سرعت‌های ظاهری متوسط فاز گاز و بازای تمام سرعت‌های ظاهری فاز مایع، محدوده‌ی وسیعی را در مرکز نمودار اشغال کرده است. مورد جالب توجه در سرعت‌های ظاهری مایع کمتر از 0/12 m/s، انتقال رژیم جریان موجی غلتان به رژیم موجی بواسطه‌ی افزایش نرخ گاز می‌باشد. که به وضوح بیانگر تاثیر منفی افزایش فشار هیدردینامیکی بر رشد ناپایداری‌های سطح مشترک می‌باشد. رژیم نهایی قابل مشاهده بازای تمام سرعت‌های ظاهری فاز مایع، رژیم مه‌آلود می‌باشد. با توجه به اینکه با افزایش دبی جریان و کسر حجمی مایع، اندازه‌ی ناپایداری‌های موجود در سطح مشترک بزرگ‌تر و سطح مشترک مغشوش‌تر می‌شود، جریان گاز راحت‌تر میتواند قطراتی را از سطح مایع جدا و آن را در طول کانال اسپری کند. در نتیجه با افزایش سرعت ظاهری فاز مایع، مرز گذر به جریان مه‌آلود، به سمت نرخ‌های پایین‌تر فاز گاز جابه‌جا می‌شود.

4-2-2- دیاگرام جریان مربوط به شیب اول

شکل 7 دیاگرام جریان مربوط شیب اول از کانال مورد مطالعه را نشان می‌دهد.

همان‌طوری که مشاهده می‌شود، رژیم جریان حبابی طویل در سرعت‌های ظاهری پایین جریان گاز، $4<u_{sl}<5/1$، و به ازای تمام سرعت‌های ظاهری فاز مایع، ناحیه کوچکی را در نمودار جریان اشغال کرده است. مرز گذار از این رژیم تقریبا بدون تأثیر از سرعت ظاهری جریان مایع و به‌صورت خطی صاف در نمودار دیده می‌شود. این رژیم جریان به‌صورت متناوب و هم‌زمان با رژیم اسلاگ در قسمت افقی قبل از مقاطع شیب‌دار رخ می‌دهد. رسیدن یک اسلاگ بزرگ به پای شیب اول سبب پر شدن کامل مقطع کانال در قسمت شیب‌دار می‌شود. در این حالت فاز گاز با ایجاد حباب‌های بزرگ گلوله‌ای شکل از میان مایع جریان می‌یابد. با هر بار عبور یک حباب طویل، جریان کف‌آلود و مغشوشی به‌واسطه‌ی گردابه‌های ایجاد شده در پشت حباب، برقرار می‌شود تا اینکه شیب دوباره پر شده و حباب جدیدی تشکیل شود. با افزایش دبی جریان گاز و کوچک شدن اسلاگ ها در قسمت افقی و یا تبدیل آن‌ها به موج‌های غلتان، حجم مایع رسیده به پای شیب اول کم بوده لذا فرصت لازم برای پرشدن مقطع کانال وجود ندارد. در این حالت در شیب اول، تداخل بین جریان گاز و حجم مایعی که تمایل به برگشت داشته، افزایش یافته و جریان مه‌الود گردابه‌ای تشکیل می‌شود. با افزایش سرعت ظاهری جریان مایع، مومنتم مایع رسیده به شیب اول بالاتر بوده و مقدار قابل توجی از این مایع موفق به عبور از این شیب می‌شود. بنابراین با افزایش دبی مایع، ناحیه مربوط به رژیم جریان مه‌آلود گردابه‌ای کوچک‌تر می‌شود. بالا بردن دبی جریان گاز نسبت به جریان مه‌آلود گردابه‌ای سبب انتقال رژیم به جریان حلقوی مه‌آلود می‌شود. در این حالت جریان گاز سبب جدایش قطراتی از سطح مایع موجود در پایین کانال، که عمدتاً تحت تاثیر گرانش تمایل به برگشت بسوی پایین را دارد، می‌شود. این قطرات فیلمی جاری از مایع را بر روی دیواره‌های کانال تشکیل می‌دهد. همچنین در نزدیکی مرز این جریان با رژیم مه‌آلود گردابه‌ای، تشکیل گاه و بیگاه گردابه‌ها به تداوم جریان فیلم مایع ایجاد شده روی دیواره‌ها کمک می‌کند. در دبی‌های بسیار بالای فاز گاز که متناظر با رژیم جریان مه‌آلود در قسمت افقی قبل از شیب‌ها می‌باشد، قطرات رسیده به پای شیب اول از همان ابتدای کانال، با تشکیل فیلمی از مایع بر



شکل 7 نمودار جریان مربوط به شیب اول

روی دیواره‌های کانال، سبب ایجاد رژیم جریان حلقوی می‌شوند. ضخامت این فیلم جاری با بالا رفتن دبی گاز، به‌خصوص در کف کانال، کاهش می‌یابد.

4-2-3- دیاگرام جریان مربوط به شیب دوم

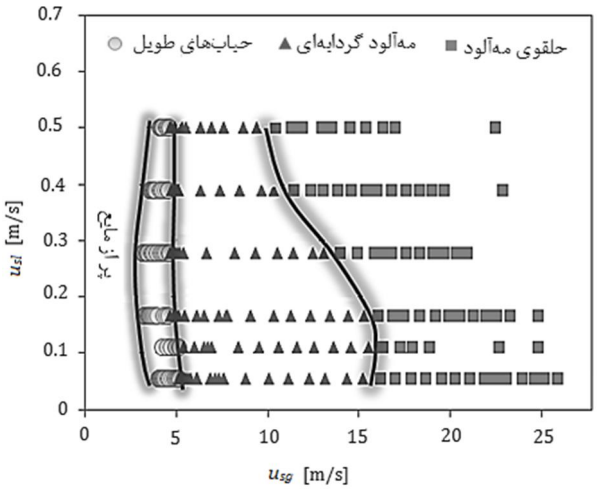
نمودار جریان مربوط به شیب دوم در شکل 8 آورده شده است.

به‌دلیل زاویه زیاد شیب اول نسبت به افق، عبور مایع از این شیب سبب افت زیاد مومنتم آن می‌شود. این مورد باعث می‌شود که تمام مایع رسیده به شیب دوم توان عبور از آن را نداشته باشد. در نتیجه همواره در محل شیب دوم، مقداری از مایع در پایین کانال با تمایل به برگشت بسوی پایین، حضور دارد. این مورد سبب گسترش زیاد ناحیه مربوط به رژیم جریان مه‌آلود گردابه‌ای نسبت به شیب اول، بویژه در سرعت‌های ظاهری پایین مایع، می‌شود. با بالا بردن سرعت ظاهری جریان مایع و افزایش مومنتم آن، مطابق آنچه که در مورد شیب اول گفته شد، مرز گذار از این رژیم به رژیم حلقوی مه‌آلود به‌سمت سرعت‌های ظاهری پایین جریان گاز جابه‌جا می‌شود. حضور آب تجمع یافته در قسمت پایین کانال، حتی در سرعت‌های بسیار بالای جریان گاز، مانع از ایجاد جریان حلقوی در شیب دوم می‌شود. این مورد سبب گسترش جریان حلقوی مه‌آلود به سرعت‌های بسیار بالای جریان گاز می‌شود. همچنین با توجه به تشابه مکانیزم شکل‌گیری جریان حبابی طویل در شیب‌های اول و دوم، ناحیه مربوط به رژیم جریان حبابی طویل در شیب دوم نیز در نرخ‌های پایین جریان گاز، $4<u_{sl}<5/1$، و منطبق بر ناحیه مربوط به شیب اول تشکیل می‌شود.

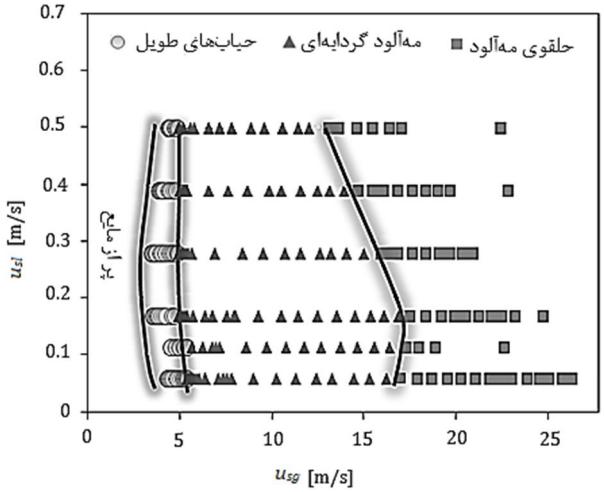
4-2-4- دیاگرام جریان مربوط به شیب سوم

شکل 9 دیاگرام جریان مربوط شیب سوم از کانال مورد مطالعه را نشان می‌دهد.

نوع رژیم‌های جریان و رفتار مرزهای گذر این شیب مانند شیب دوم می‌باشد. با این تفاوت که افت بالای مومنتم مایع در عبور از شیب‌های اول و دوم، مرز گذار از رژیم جریان مه‌آلود گردابه‌ای به حلقوی مه‌آلود را در شیب سوم، به‌سمت سرعت‌های ظاهری بالاتر فاز گاز جابه‌جا می‌کند. این مورد با وضوح بیشتری در دبی‌های بالاتر مایع قابل مشاهده است. به‌طوری‌که پایین بودن مومنتم جریان مایع رسیده به شیب سوم سبب تداوم حضور این مایع در شیب سوم و تشکیل گردابه‌ها می‌شود. به‌همین دلیل انقباض مربوط به ناحیه مه‌آلود گردابه‌ای در دبی‌های بالای مایع، در این شیب نسبت به سایر



شکل 8 نمودار جریان مربوط به شیب دوم

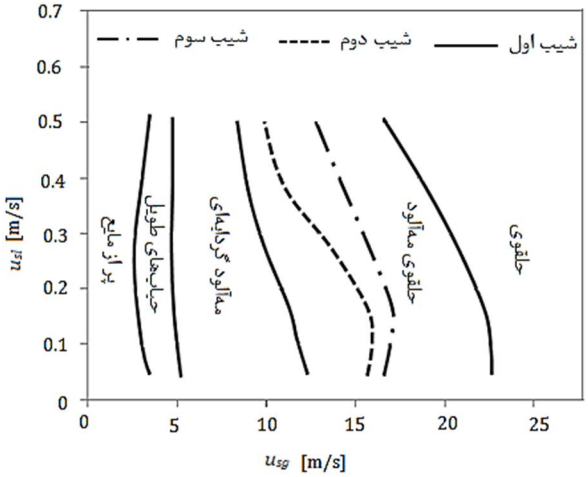


شکل 9 نمودار جریان مربوط به شیب سوم

شیب‌ها کمتر می‌باشد. مشابه آنچه که در مورد شیب دوم بیان شد، در شیب سوم نیز رژیم جریان حلقوی مشاهده نمی‌شود. ناحیه مربوط به رژیم جریان حبابی طویل در این شیب کاملاً منطبق بر شیب‌های اول و دوم می‌باشد. در واقع می‌توان گفت که در تمام دبی‌های مایع، حباب طویلی که در شیب اول تشکیل می‌شود، بدون از هم پاشیدن، از هر دو شیب بعدی عبور کرده و رژیم حبابی طویل را بر آن‌ها نیز حاکم می‌کند. لازم به‌ذکر است که سرعت حرکت حباب‌های تشکیل شده در شیب اول، هنگام عبور از شیب‌های دوم وسوم افزایش می‌یابد. این مورد ناشی از کمتر شدن فشار مقابل حباب، به‌دلیل کاهش ارتفاع ستون آب بالای حباب، می‌باشد. به‌محض تغییر رژیم شیب اول و عدم تشکیل حباب‌های طویل در این شیب، این تغییر رژیم به شیب‌های بعدی نیز منتقل می‌شود.

برای نمایش بهتر تاثیر شیب‌های متوالی بر روی رژیم‌های جریان و نحوه توزیع آن‌ها، مقایسه‌ای بین دیاگرام جریان مربوط به شیب‌های اول، دوم و سوم در شکل 10 آورده شده است.

همان‌طوری که مشاهده می‌شود، مرز گذار از رژیم جریان مه‌آلود گردابه‌ای به جریان حلقوی مه‌آلود، با کمتر شدن شیب کانال در طول مسیر به‌سمت سرعت‌های بالاتر جریان گاز جابه‌جا می‌شود به‌طوری‌که با کاهش شیب کانال در امتداد مسیر به اندازه‌ی 45 درجه، زاویه‌ی بین شیب اول



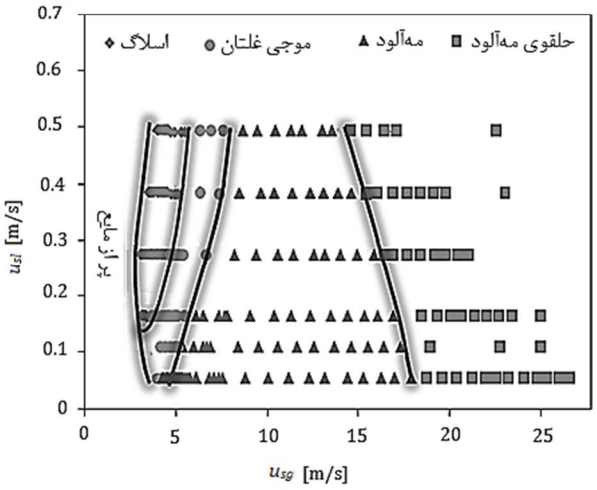
شکل 10 مقایسه نمودار جریان شیب‌های مختلف

و سوم، مرز گذار از رژیم جریان مه‌آلود گردابه‌ای به جریان حلقوی مه‌آلود به طور میانگین در حدود ۴/۳ m/s به‌سمت سرعت‌های ظاهری بالاتر جریان گاز جابه‌جا می‌شود. همچنین در محدوده‌ی جریان مورد مطالعه، انتقال از رژیم جریان حلقوی مه‌آلود به جریان حلقوی تنها در شیب اول مشاهده می‌شود و رژیم حلقوی مه‌آلود به‌عنوان الگوی نهایی جریان در شیب‌های دوم و سوم رخ می‌دهد. ناحیه مربوط به رژیم جریان حبابی طویل نیز بدون تاثیر از تغییرات شیب کانال، برای هرسه مقطع کاملاً بر هم منطبق می‌باشد.

۴-۲-۵- دیاگرام جریان قسمت افقی بعد از مقاطع شیب‌دار

شکل ۱۱ دیاگرام جریان مربوط به قسمت افقی بعد از مقاطع شیب‌دار را نشان می‌دهد.

به‌دلیل هندسه کانال مورد مطالعه، در حالتی که مقطع کانال در قسمت‌های شیب‌دار و افقی قبل از مقاطع شیب‌دار پر از مایع می‌باشد، قسمت افقی بعد از مقاطع شیب‌دار به صورت نیمه‌پر بوده و فاز مایع به‌صورت لایه‌ای در آن جریان دارد. با شروع جریان فاز گاز در دبی‌های متوسط و بالای مایع، ۰/۱۲<u_{sl}<۰/۵، ابتدا رژیم جریان اسلاگ در این ناحیه مشاهده می‌شود. نکته بسیار جالب توجه، مکانیزم متفاوت شکل‌گیری رژیم جریان اسلاگ در این قسمت از کانال، توسط حباب‌های تیلور می‌باشد. حباب‌های طویل در هنگام صعود از مقاطع شیب‌دار حجم قابل توجهی از مایع را با خود به سمت بالا می‌رانند. این حجم از مایع با رسیدن به قسمت افقی به صورت لخته‌های پیوسته‌ای مقطع کانال را به‌صورت کامل بسته و با سرعت بالایی به‌سمت پایین‌دست کانال حرکت می‌کنند. با کاهش سرعت ظاهری جریان مایع نسبت به رژیم اسلاگ، u_{sl} <۰/۱۲ m/s، حجم مایع کمتری توسط حباب طویل به‌سمت بالا حمل می‌شود. این مقدار از مایع در قسمت افقی توان مسدود کردن کامل مقطع کانال را نداشته و به صورت موج‌های غلتان، طول کانال را طی می‌کنند. همچنین افزایش سرعت ظاهری جریان گاز نسبت به رژیم اسلاگ، متناظر با انتقال رژیم از حبابی طویل به مه‌آلود گردابه‌ای در مقاطع شیب‌دار می‌باشد. در این حالت همواره تعدادی از گردابه‌های تشکیل شده در شیب سوم خود را به قسمت افقی رسانده و تشکیل موج‌های غلتان را می‌دهند. در این حالت با افزایش سرعت ظاهری گاز نسبت به رژیم موجی غلتان و بازای تمام سرعت‌های ظاهری مورد مطالعه، ۰/۰۵۵<u_{sl} <۰/۵ m/s، گردابه‌ها در هنگام ورود از شیب سوم به مقطع افقی، توسط جریان گاز به صورت قطرات و توده‌های کوچک کف آلودی به داخل کانال پخش می‌شوند و



شکل ۱۱ دیاگرام جریان قسمت افقی بعد از مقاطع شیب‌دار

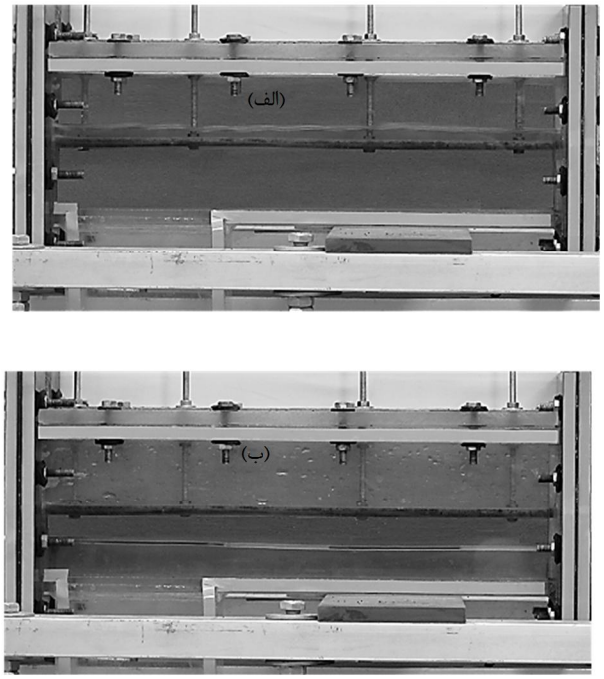
تشکیل رژیم مه‌آلود را می‌دهند. در نهایت با افزایش بیشتر سرعت ظاهری جریان گاز فیلمی جاری از مایع نیز، بواسطه قطرات بر روی دیواره‌های کناری و بالا تشکیل می‌شود. بالا رفتن دبی مایع و بیشتر شدن کسر حجمی آن سبب تسریع در شکل‌گیری فیلم مایع می‌شود به همین دلیل با افزایش دبی مایع، مرز گذار به رژیم جریان حلقوی مه‌آلود به سمت دبی‌های پایین فاز گاز جابه‌جا می‌شود.

۴-۳- تغییرات کسر تهی در مقطع ورودی

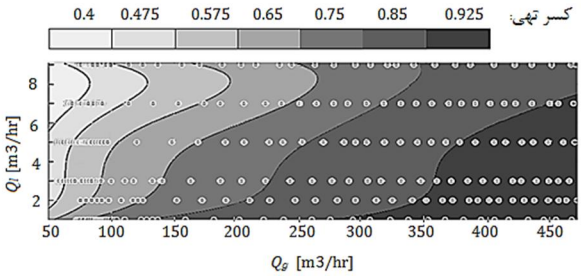
در تحقیق انجام شده فاز گاز به‌واسطه فشار ایجاد شده توسط کمپرسور، از میان مایع جریان می‌یابد. لذا با توجه به نوع ورودی مورد استفاده، تغییرات دبی جریان‌های مایع و گاز، سبب تغییر در کسر حجمی فازها در قسمت ورودی می‌شود. شکل ۱۲ نشان‌دهنده‌ی دو نمونه از تغییرات کسر تهی (α)، نسبت حجم فاز گاز به کل حجم کانال، در ورودی می‌باشد.

شایان ذکر است که بسیاری از مشخصه‌های مهم در جریان‌های دوفازی مانند وقوع برخی رژیم‌ها، فرکانس پدیده‌ها و محل تشکیل ناپایداری‌های اولیه در سطح مشترک به‌شدت، تحت تاثیر مقدار کسر حجمی فازها در مقطع ورودی می‌باشند. این کمیت همچنین به‌عنوان یکی از اطلاعات اولیه لازم در شبیه‌سازی جریان‌های دوفازی می‌باشد. لذا با توجه به اهمیتی که در مورد آگاهی از مقدار کسر حجمی فازها در مقطع ورودی وجود دارد، نحوه تغییرات کسر تهی با دبی فازها در مقطع ورودی برای کل محدوده مورد مطالعه، در شکل ۱۳ آورده شده است.

لازم به‌ذکر است که برای تهیه شکل ۱۳، مقادیر مربوط به کسر تهی در قسمت ورودی کانال، ازطریق مشاهده ثبت گردیده است. این شکل که از برازش سطح بر بیش از ۳۰۰ گروه از داده‌های مربوط به کسر تهی و دبی فازها حاصل شده، به‌عنوان ابزاری بسیار مفید برای پیش‌بینی مقدار کسر تهی ورودی متناظر با هر نقطه از نمودار جریان قابل استفاده می‌باشد. مطابق انتظار، رفتار کلی این نمودار، نشان دهنده‌ی افزایش میزان کسر تهی با بالا



شکل ۱۲ نمونه‌هایی از تغییرات کسر تهی (α) با دبی فازها، الف) Q_l=۷، Q_g=۶۴/۸ و α=۰/۴ ب) Q_l=۵، Q_g=۲۲۵/۴ و α=۰/۷۵، دبی‌ها بر حسب m^3/hr می‌باشند.



شکل 13 تغییرات کسر تهی با دبی فازها در ورودی

رفتن دبی فاز گاز، همچنین کاهش کسر تهی با افزایش دبی جریان آب می-باشد. علاوه بر این مشاهده می‌شود که میزان تغییراتی که کسر تهی، در دبی-های بالای جریان هوا تجربه می‌کند، کمتر از دبی‌های پایین هوا می‌باشد.

5- نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر به مطالعه‌ی تجربی رژیم‌های جریان دوفازی گاز-مایع در شیب‌های متوالی یک زانویی بزرگ و قسمت‌های افقی قبل و بعد از آن پرداخته شده و نمودارهای جریان مربوطه رسم شد. همچنین نحوه تغییرات کسر تهی در مقطع ورودی با دبی فازها مورد توجه قرار گرفت. عمده نتایج به‌دست آمده از آزمایش به‌شرح زیر می‌باشد.

- رژیم جریان موجی تنها در قسمت افقی قبل از مقاطع شیب‌دار و در سرعت‌های ظاهری پایین مایع مشاهده می‌شود.
- در هر دو قسمت افقی مورد مطالعه، افزایش سرعت ظاهری جریان مایع، سبب بزرگتر شدن ناحیه مربوط به رژیم جریان اسلاگ می-شود.
- مکانیزم شکل‌گیری جریان اسلاگ در قسمت افقی قبل از شیب‌ها، بر پایه رشد ناهمواری‌های سطح مشترک بوده، در حالی که این رژیم در قسمت افقی بعد از مقاطع شیب‌دار بواسطه مایع حمل شده توسط حباب‌های تیلور ایجاد می‌شود.
- ناحیه مربوط به رژیم جریان حبابی طویل بدون تاثیر از تغییرات شیب کانال، برای هر سه مقطع شیب‌دار کاملاً بر هم منطبق می-باشد. مرز گذار از این رژیم به رژیم مه‌آلود گردابه‌ای تقریباً بدون تاثیر از سرعت ظاهری جریان مایع می‌باشد.
- با کاهش شیب کانال در طول مسیر گذار از رژیم جریان مه‌آلود گردابه‌ای به حلقوی مه‌آلود در سرعت‌های ظاهری بالاتر جریان گاز رخ می‌دهد.
- در هر سه شیب مورد مطالعه، افزایش سرعت ظاهری جریان مایع سبب کوچکتر شدن ناحیه رژیم مه‌آلود گردابه‌ای می‌شود.
- رژیم جریان حلقوی تنها در شیب اول و در سرعت‌های ظاهری بسیار بالای جریان گاز مشاهده می‌شود.
- میزان تغییرات کسر تهی مقطع ورودی، در دبی‌های بالای جریان هوا، کمتر از دبی‌های پایین هوا می‌باشد.

6- مراجع

[1] O. Baker, Simultaneous Flow of Oil and Gas, *Journal of Oil and Gas,* Vol. 53, No. 7,pp. 185–195, 1954.
[2] C. J. Hoogendoorn, Gas-Liquid Flow in Horizontal Pipes, *Journal of Chemical Engineering Science,* Vol. 9, No. 4, pp. 205-217, 1959.
[3] J. N. Al-Sheikh, D. E. Saunders, R. S. Brodkey, Prediction of Flow Patterns in Horizontal Two-Phase Pipe Flow, *Journal of Canadian Chemical Engineering,* Vol. 48, No. 1, pp. 21-29, 1970.
[4] D. Kim, A. J. Ghajar, Heat Transfer Measurment and Correlations for Air-Water Flow of Different Flow Patterns in a Horizontal Pipe, *Journal of Experimental Thermal and Fluid Science,* Vol. 25, No. 8, pp. 659-676, 2002.
[5] J. M. Mandhane, G. A. Gregory, K. Aziz, A Flow Pattern Map for Gas–Liquid Flow in Horizontal Pipe, *International Journal of Multiphase Flow*, Vol. 1, No. 4, pp. 537–553, 1974.
[6] J. Weisman, S. Y Kang,Flow Pattern Transitions in Vertical and UpwardlyInclined Lines, *International Journal of Multiphase Flow,* Vol. 7, No. 3, pp. 271–291, 1981.
[7] D. Barnea, O. Shoham, Y. Taitel, Gas-liquid Flow Upward in Inclined Tubes; Flow Pattern Transition for Upward Flow, *Journal of Chemical Engineering Science,* Vol. 40, No. 1, pp.131-136, 1985.
[8] G. Oddie, H. Shi, L. J. Durlofsky, K. Aziz, B. Peffer, J. A. Holmes, Experimental Study of Two and Three Phase Flows in Large Diameter Inclined Pipes, *International Journal of Multiphase Flow,* Vol. 29, No. 4, pp. 527–558, 2003.
[9] M. R. Ansari, M. Azadi, R. Gheisari, An Experimental Investigation on the Effect of Vertical Distance and Inclination Angle of S-Shaped Channel on Two-Phase Flow Patterns, *Modares Mechanical Engineering,* Vol. 44, No. 1, pp. 1-10, 2012. (In Persian)
[10] ANSI/ASME, *Measurement Uncertainty,* PTC 19, Part I, 1986.
[11] M. R. Ansari, H. Nariai, Experimental Investigation on Wave Initiation andSlugging of Air-Water Stratified Flow in Horizontal Duct, *Journal of Nuclear Science and Technology,* Vol. 26, No. 7, pp. 681-688, 1989.