مجله مهندسی مکانیک مدرس، اسفند 1393، دوره 14، شماره 12، ص‌ص 133-144

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

مطالعه تجربی مشخصه‌های سرعت، طول و فرکانس حباب‌های تیلور در جریان دوفازی گاز-مایع داخل 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: 08 دی 1392
پذیرش: 09 مهر 1393
ارائه در سایت: 12 مهر 1393

کلید واژگان:
جریان دوفازی
حباب‌های تیلور
کانال شیب‌دار
شیب‌های متوالی
جریان پلاگ

چکیده

در تحقیق حاضر به مطالعه تجربی مشخصه‌های حباب‌های تیلور در یک زانویی بزرگ متشکل از سه شیب متوالی پرداخته شده است. برای این منظور ابتدا نمودارهای جریان برای زانویی و مقطع افقی بالادست آن ترسیم شده است تا ناحیه مربوط به این رژیم جریان و مکانیزم تشکیل حباب‌ها تعیین شود. سپس تأثیر سرعت‌های ظاهری جریان‌های مایع و گاز و همچنین شیب کانال بر روی مشخصه‌های سرعت متوسط، طول و فرکانس حباب‌ها بررسی شده است. بر اساس نتایج بدست آمده، با افزایش سرعت ظاهری فاز گاز و کاهش شیب در طول مسیر، سرعت و طول حباب‌ها بیشتر می‌شود، درحالی که افزایش سرعت مایع، تأثیر کاهشی بر این مشخصه‌ها دارد. فرکانس حباب‌ها نیز مستقل از تغییرات شیب، با افزایش سرعت ظاهری جریان گاز، همواره کاهش یافته و با افزایش سرعت جریان مایع، ابتدا کاهش و سپس افزایش می‌یابد. در تعیین محدوده ایمن کاربردهای صنعتی، دبی جریان مایع می‌بایست، با توجه به مقدار کمینه فرکانس حباب‌ها انتخاب شود. در حالی که برای انتخاب مقدار مناسب دبی جریان گاز، همواره نوعی بهینه‌سازی بین کاهش فرکانس و افزایش سرعت حباب‌ها با کاهش طول آن‌ها لازم است. همچنین روابطی برای طول و سرعت حباب‌ها با توجه به پیشینه تحقیق بدست آمده ولی درمورد فرکانس حباب‌ها، به‌دلیل روند تغییرات متفاوت و همچنین کمبود منابع در این زمینه، روابطی بر اساس اعداد رینولدز ظاهری فازهای پیشنهاد شده است.

Experimental study of length, velocity and frequency of taylorbubbles in gas-liquid two-phase flow in a large bend

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

1- Faculty of Mechanical Engineering, TarbiatModares 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 29 December 2013
Accepted 01 October 2014
Available Online 04 October 2014

Keywords:
Two-Phase Flow
Taylor Bubbles
Inclined Channel
Consecutive Inclinations
Plug Flow

ABSTRACT

Experimental investigation conducted on Taylor bubble characteristics in a large bend including three consecutive inclinations. For this purposes, flow maps were obtained for the bend and horizontal section of upstream of the bend to define the area of this regime and mechanism of Taylor bubble formation. The effect of superficial gas-liquid velocities and the duct slope were studied on average velocity, length and frequency of bubbles. The results show, the bubble velocity and length increase as gas superficial velocity increases and the duct slope decreases. However, liquid velocity increase has decreasing effect on this characteristics. Bubble frequency is independent of slope change and reduces as gas superficial velocity increase. However, bubble frequency reduces at first and then increase as liquid superficial velocity increases. Regarding the safety regulation for industry, the minimum of the bubble frequency should be generated for the required liquid mass flow rate. Meanwhile, for the gas velocity, some optimization is required between frequency reductions with Taylor bubble velocity increase in addition to bubble length reduction. Regarding the background of the present field with shortage of results on Taylor bubbles frequency, some correlations based on the superficial Reynolds number of phases were presented for each inclination.

1- مقدمه

جریان همزمان گاز و مایع در داخل کانال، بسته به شکل هندسی سطح مشترک دوفاز، با الگوهای مختلفی صورت می‌گیرد. در این میان یکی ازمحتمل‌ترین الگوها، رژیم جریان حباب‌های تیلور[1] است. این رژیم به‌دلیل ماهیت متناوب و ناپایا، یکی از پیچیده‌ترین الگوهای جریان دوفازی است [1]

1- Taylor Bubbles

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 length, velocity and frequency of taylorbubbles in gas-liquid two-phase flow in a large bend, *Modares Mechanical Engineering,* Vol. 14, No. 12, pp. 133-144, 2014 (In Persian)

و مشخصه بارز آن، حرکت حباب‌های بزرگ و کشیده‌ای از فاز گاز و در میان محیط پیوسته‌ای از فاز مایع است. این رژیم که به رژیم پلاگ[1] نیز معروف است، در بسیاری از صنایع و کاربردهای مهندسی مانند استخراج و انتقال هیدروکربن‌ها، نیروگاه‌های زمین گرمایی، بویلرها و خنک‌کننده اضطراری راکتورهای هسته‌ای مشاهده می‌شود [3,2]. در فرایندهایی که با انتقال حرارت همراه هستند، حضور حباب‌های تیلور سبب ایجاد تغییرات قابل توجهی در ضریب انتقال حرارت داخل کانال شده و باعث ایجاد شوک‌های حرارتی به دیواره‌ی لوله می‌شود. این مورد بعنوان یکی از عوامل اصلی سوختن[2] لوله‌های بویلر در نیروگاه‌ها مطرح است. علاوه بر این، حرکت حباب‌های تیلور نوسانات شدیدی در پروفیل فشار داخل کانال ایجاد کرده [4] و سبب تشدید فرایندهای خوردگی و خستگی می‌شوند. لذا با توجه به اهمیت موضوع مطالعات روز افزونی بر روی رفتار و مشخصه‌های حباب‌های تیلور در سالیان اخیر صورت پذیرفته است.

چنگ و لین [5] با بررسی تغییرات طول حباب‌های تیلور در کانال‌هایی با شیب و قطرهای مختلف، به این نتیجه رسیدند که در دبی‌های مشابه، طول حباب‌های تیلور در کانال‌های قائم و شیب‌دار بیشتر از کانال‌های افقی بوده و افزایش قطر لوله سبب افزایش طول حباب‌ها می‌شود. یان و همکاران [6] رژیم حباب‌های تیلور را در یک کانال مستطیلی با ابعاد داخلی 43mm×3/25 mm و طول 2m و تحت شیب‌های مختلف مورد بررسی قرار دادند. بر اساس نتایج آن‌ها در ناحیه آرام، افزایش زاویه کانال نسبت به حالت قائم سبب افزایش طول حباب‌های تیلور شده، در حالی در جریان مغشوش، طول حباب‌ها حساسیت پایینی به تغییرات شیب کانال دارد. افزایش سرعت ظاهری فاز گاز، همواره موجب افزایش طول حباب‌های تیلور می‌شود. ونگ و همکاران [7] نحوه رفتار حباب‌های تیلور را با سرعت ظاهری فازها، در داخل کانالی مشابه با کار یان و همکاران [6] و در حالت قائم بررسی کردند. آنها به این نتیجه رسیدند که در محدوده $0<u_{sg}<2\text{m/s}$، طول حباب‌های تیلور به صورت تقریباً خطی با افزایش سرعت ظاهری فاز گاز افزایش می‌یابد و نرخ این تغییرات با افزایش سرعت ظاهری فاز مایع کاهش می‌یابد. کاجی و همکاران [8] با بررسی رفتار حباب‌های تیلور در لوله قائمی به قطر داخلی 52 mm، به این نتیجه رسیدند که طول حباب‌های تیلور با افزایش سرعت ظاهری فاز گاز، افزایش می‌یابد؛ در حالیکه افزایش سرعت ظاهری فاز مایع سبب کاهش طول حباب‌ها می‌شود.

نیکلین و همکاران [9] برای اولین بار مدل فلاکس رانشی[3]، رابطه (1)، را برای پیش‌بینی سرعت پیشروی حباب تیلور (u_t) در جریان مایع داخل لوله‌های قائم پیشنهاد کردند.

$$u_t = cu_m + u_d \qquad (1)$$

در این مدل فرض می‌شود که سرعت صعود یک حباب تیلور (u_t) در جریان مایع داخل لوله، برابر است با مجموع سرعت رانشی حباب در مایع ساکن (u_d) و ضریبی از سرعت مخلوط دوفازی (u_m). این رابطه با توجه به مطالعات موجود در این زمینه، به‌عنوان پرکاربردترین رابطه در پیش‌بینی سرعت پیشروی حباب‌های تیلور، توسط محققان زیادی برای لوله‌هایی با شیب‌های مختلف مورد استفاده قرار گرفته است. ونگ و همکاران [10] به مطالعه تغییرات سرعت حباب‌های تیلور در یک لوله افقی به قطر 50mm پرداختند. آن‌ها با توجه به عدد فرود جریان دوفازی، روند تغییرات سرعت حباب‌های تیلور را به دو ناحیه تقسیم‌بندی کردند؛ بطوری که برای جریان‌هایی که $\text{Fr} \le 3/5$ است، مقدار کمیت توزیع[4] (c)، برابر با 1/028 و مقدار u_d از رابطه $u_d = 0.927\sqrt{gD}$ بدست می‌آید در حالی که برای جریان‌هایی با Fr>3/5، مقدار c برابر با 1/726 و $u_d = 0$ است. کوک و بهنیا [11]، با انجام آزمایش‌هایی بر روی لوله‌هایی با شیب کم، تا 10 درجه نسبت به افق، و با قطرهای 32 و 50 میلی‌متر، رابطه $u_t = \max(1.0u_m + u_d, 1.2u_m)$ را برای کاربردهای مهندسی با دقت مناسبی پیشنهاد کردند. آن‌ها در این رابطه مقدار u_d را از برون‌یابی داده‌های مربوط به مقادیر سرعت، برای شیب‌های مختلف، در محدوده 0/4-0/2 گزارش کردند. یان و همکاران [6] تأثیر شیب لوله را بر سرعت حباب‌های تیلور، در محدوده شیب 30-0 درجه نسبت به حالت قائم، مورد بررسی قرار دادند. بر اساس نتایج بدست آمده، مقدار سرعت حباب‌های تیلور با افزایش شیب لوله از حالت قائم افزایش می‌یابد؛ آن‌ها با مطالعه تغییرات کمیت توزیع، نشان دادند که این مقدار برای جریان آرام با افزایش شیب لوله از حالت قائم، در محدوده 1/17-0/98 تغییر می‌کند. همچنین با بررسی تغییرات مقدار سرعت رانشی (u_d) نتیجه گرفتند که افزایش شیب کانال نسبت به حالت قائم سبب افزایش مقدار این کمیت می‌شود.

برخی از محققان علاوه بر توصیف نحوه تغییرات سرعت رانشی[5] حباب در مایع ساکن (u_d)، روابطی را نیز برای محاسبه این مورد پیشنهاد کرده‌اند؛ در جدول 1 تعدادی از این روابط پیشنهادی آورده شده است.

فرکانس حباب‌های تیلور در هر مقطع خاص، عبارت است از تعداد حباب‌هایی که در یک دوره زمانی معین، از مقطع مورد نظر در امتداد کانال عبور می‌کنند [15]. با وجود اهمیت بسیار بالای این مشخصه در مسائل طراحی خطوط انتقال جریاهای دوفازی، مطالعات بسیار کمی در پیشینه تحقیق در این رابطه موجود است. ونگ و همکاران [10] با بررسی نحوه تغییرات فرکانس حباب‌های تیلور با سرعت‌های ظاهری فازها به این نتیجه رسیدند که فرکانس حباب‌ها با افزایش سرعت ظاهری مایع به‌وضوح افزایش می‌یابد در حالی که این مورد وابستگی ضعیفی به سرعت ظاهری جریان گاز دارد. لابوری و همکاران [16] با مطالعه جریان قائم حباب‌های تیلور در لوله‌هایی با قطرهای کمتر از 1cm به این نتیجه رسیدند که فرکانس حباب‌ها به صورت خطی با افزایش رینولدز مخلوط دوفازی افزایش می‌یابد. ژنگ و همکاران [17] با مطالعه فرکانس حباب‌های تیلور در یک لوله قائم به قطر 35mm و طول 5m به این نتیجه رسیدند که مقدار فرکانس حباب‌ها با افزایش سرعت ظاهری جریان گاز، کاهش و با افزایش سرعت ظاهری جریان

جدول 1 روابط تجربی برای محاسبه سرعت رانشی حباب در مایع ساکن(u_d)

محققان	شکل و جهت کانال	رابطه پیشنهادی
نیکلین [9]	دایروی- قائم	$u_d = 0.355\sqrt{gD}$
کلانت و همکاران [12]	مستطیلی- قائم	$\begin{cases} u_d = 0.2\sqrt{gP} \\ P = 2(s+w) \end{cases}$
حسن وکبیر [13]	دایروی- شیب‌دار	$u_d = 0.35\sqrt{gD\sin\theta}(1+\cos\theta)^{1.2}$
ساداتومی و همکاران [14]	مستطیلی-قائم	$\begin{cases} u_d = 0.35\sqrt{\Delta\rho\, g D_h / \rho_l} \\ D_h = 2(s+w)/\pi \end{cases}$

توضیح: D قطر کانال- s و w بترتیب ارتفاع وعرض مقطع کانال- θ زاویه لوله نسبت به افق است

1- Plug
2- Burn out
3- Drift flux model

4- Distribution Parameter
5- Drift Velocity

مایع، افزایش می‌یابد. یان و همکاران [6] نیز با بررسی جریان حباب‌های تیلور در محدوده شیب 30-0 درجه نسبت به قائم، به نتایجی مشابه با نتایج ژنگ و همکاران [17] رسیدند. آن‌ها همچنین گزارش کردند که تغییرات شیب کانال تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر مقدار فرکانس حباب‌ها ندارد.

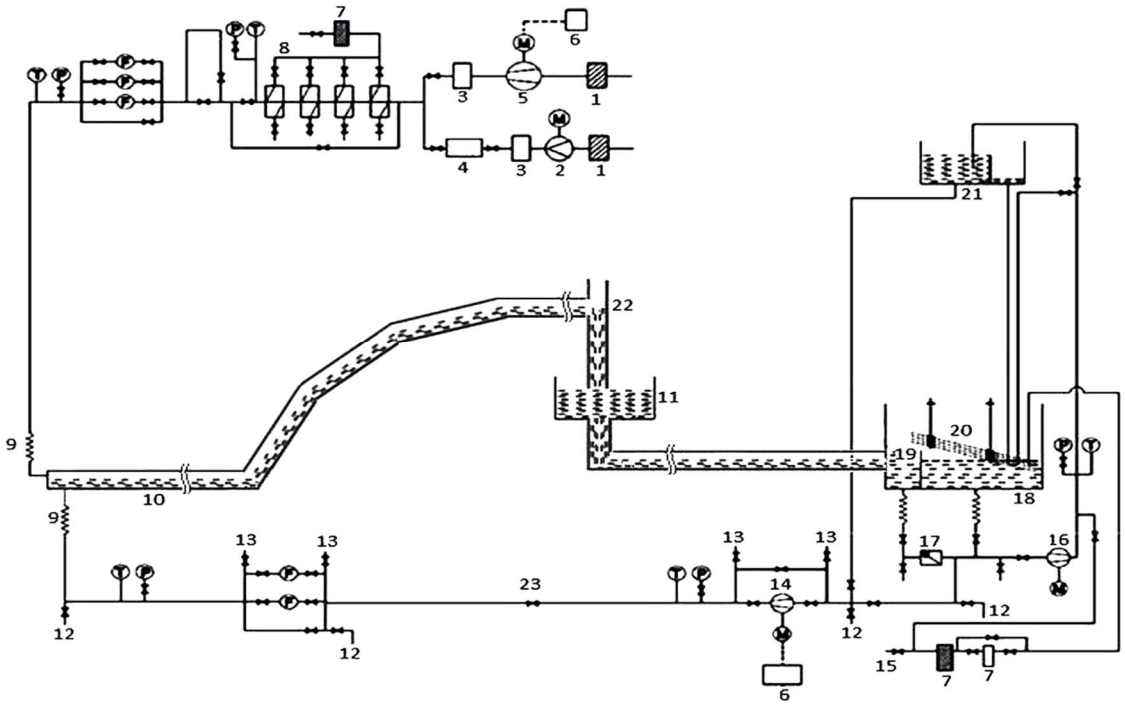
یکی از اشکال‌های بسیار متداول در سیستم لوله‌کشی واحدهای پالایشگاهی، بویلرهای بزرگ نیروگاه‌های حرارتی و همچنین خطوط انتقال نفت وگاز، وجود شیب‌های متوالی در مسیر انتقال جریان چند فازی است. چنین تغییراتی در مسیر خطوط، عمدتاً به‌دلیل ناهمواری‌های محل اجرای خطوط انتقال و یا استفاده از زانویی‌های بزرگ و رایزرها، برای عبور از موانع مسیر مشاهده می‌شود. با توجه به آنچه که در پیشینه پژوهش مورد توجه قرار گرفت، تقریباً تمام مطالعات انجام شده، مربوط به کانال‌های افقی، قائم و یا کانال‌هایی با شیب ثابت هستند بطوری که طبق تحقیقات صورت گرفته هیچ مطالعه‌ای در پیشینه پژوهش به بررسی الگوهای جریان دوفازی و همچنین مشخصات حباب‌های تیلور در مسیرهایی با شیب‌های متوالی گزارش نشده است. بر این اساس در تحقیق حاضر به مطالعه تجربی مشخصه‌های حباب‌های تیلور در یک زانویی بزرگ متشکل از سه شیب متوالی پرداخته می‌شود. برای این منظور ابتدا نمودار جریان برای این زانویی و قسمت افقی بالادست آن توسعه می‌یابد تا محدوده مربوط به رژیم جریان حباب‌های تیلور و سایر الگوهای جریان مشخص شود. سپس، بعد از بیان روند تشکیل حباب‌های تیلور بواسطه جریان بالادست زانویی، به مطالعه تأثیر دبی هر کدام از فازها و همچنین تغییرات شیب کانال بر مشخصه‌های طول، سرعت متوسط و فرکانس حباب‌های تیلور پرداخته می‌شود.

2- سیستم آزمایشگاهی

طرحواره سیستم آزمایشگاهی مورد بررسی در شکل 1 آورده شده است. در این سیستم هوای مورد نیاز برای جریان در داخل کانال، توسط یک کمپرسور با توان 45kW تأمین می‌شود. فشار هوای خروجی از مخزن کمپرسور توسط یک سیستم رگلاتور فشار، تنظیم و دمای آن توسط یک سیستم خنک‌کاری که در واقع یک مبدل پوسته و لوله‌ای است تا دمای محیط کاهش می‌یابد. بدین ترتیب شرط تعادل دمایی بین دوفاز در طول کانال حفظ می‌شود. دبی‌های مختلف هوای ورودی نیز با تغییر دور موتور توسط یک اینورتر تنظیم می‌شود. فشار، دما و دبی جریان هوا در مسیر مخزن هوا تا ورودی کانال جریان دوفازی، در نقاط مختلفی اندازه‌گیری می‌شود.

آب ورودی به سیستم نیز با عبور از فیلترهای در نظر گرفته شده، ابتدا تانک 2 را تا ارتفاع معینی پر می‌کند. سپس پمپ 2 آب این تانک را به تانک 1، که در ارتفاع 4 متری قرار دارد، پمپاژ می‌کند. برای تأمین دبی یکنواخت، ارتفاع آب در این تانک با سرریز آب اضافی به قسمت دوم تعبیه شده در این تانک ثابت می‌ماند. تانک شماره 1 هد مورد نیاز برای جریان آب داخل کانال را تأمین می‌کند. علاوه بر این تانک، در صورت نیاز به هد بالاتر، پمپ 1 به طور مستقیم وارد مدار می‌شود. مقدار دبی آب مورد نیاز نیز توسط شیر 23 تنظیم شده و مشابه سیستم تأمین هوا، دبی، فشار و دمای آب خروجی از تانک 1، در محل‌های مختلفی قبل از ورود به کانال جریان دوفازی اندازه‌گیری می‌شود.

مخلوط دوفازی آب-هوا از میان کانالی مستطیلی با ابعاد داخلی $50\times100mm^2$ و به ضخامت 10 mm جریان می‌یابد. این کانال از جنس



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

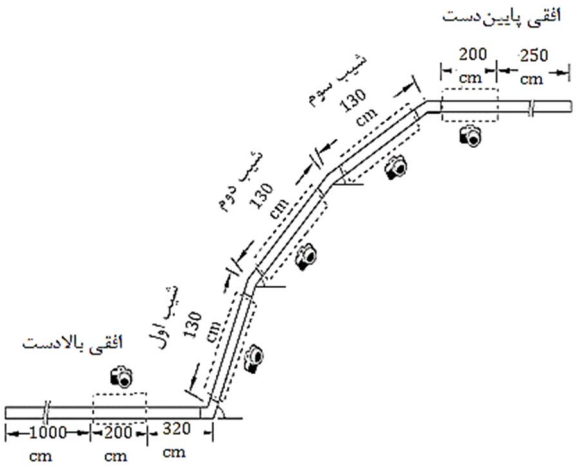
شکل 1 نمای شماتیک سیستم آزمایشگاهی

پلکسی‌گلس شفاف بوده و امکان مشاهده بصری و ثبت رژیم‌های جریان را توسط دوربین مهیا می‌کند. طول این کانال در قسمت افقی قبل از مقاطع شیب‌دار 15/2m متر و در قسمت افقی بعد از مقاطع شیب‌دار در حدود 4/5m است و در هر یک از مقاطع شیب‌دار مورد مطالعه برابر 1/3m 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 تخلیه می‌شود. لازم بذکر است که تانک 3 با هدف آزادی عمل بیشتر در اجرای خط کانال درنظر گرفته شده است. شکل 2 طرحواره کانال مورد بررسی را به همراه ابعاد، زوایا و محل تصویربرداری از جریان را در طول مسیرنشان 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 می‌شوند.همان‌طور که در شکل 3 نشان داده شده است، آب از پایین و هوا به صورت 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 بصورت 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.

در شکل 4 نمایی از کانال حاوی جریان دوفازی در مقاطع شیب‌دار و همچنین قسمت‌های افقی بالادست و پایین‌دست این مقاطع آورده شده است.

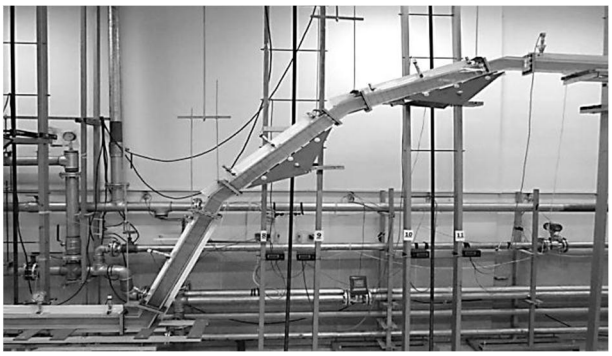
دبی حجمی جریان آب توسط دبی‌سنج مغناطیسی با دقت $\pm 0/1 m^3/hr$ و جریان هوا بوسیله دبی‌سنج ورتکسی با دقت $\pm 0/01 m^3/hr$ اندازه‌گیری می‌شوند. بیشترین مقدار عدم قطعیت‌های اندازه‌گیری طبق استاندارد



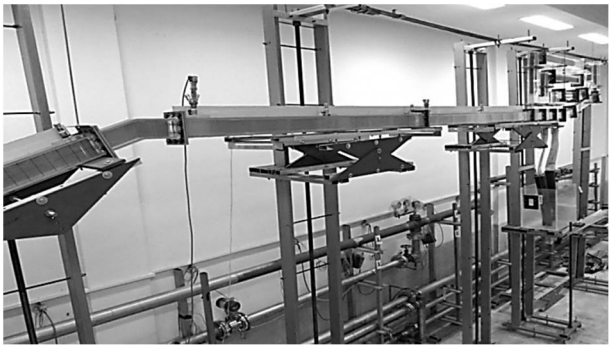
شکل 2 ابعاد کانال مورد آزمایش به همراه محل‌های تصویربرداری

شکل3 مخلوط‌کننده آب و هوا در ورودی خط کانال

(الف)



(ب)



(ج)

شکل 4خط کانال ساخته شده در قسمت‌های مختلف
(الف) افقی بالادست مقاطع شیب‌دار (ب) مقاطع شیب‌دار (ج) افقی پایین‌دست مقاطع شیب‌دار

ANSI/ASME [10] برای فلومتر آب و هوا به ترتیب ±1/25% و ±5%است. برای اندازه‌گیری دمای جریان آب و هوا، قبل از ورود به کانال حاوی جریان دوفازی از دماسنج‌هایی با دقت 0/01 و عدم قطعیت 3% استفاده شده است. همچنین فشارسنج‌های مورد استفاده در آزمایشگاه نیز از نوع پیزو الکتریک با دقت 0/01 mbar و با بیشترین مقدار عدم قطعیت 1/38% هستند.

برای ثبت تصاویر و فیلم‌برداری از دوربین کانن با مدل پاورشات و سرعت شاتر 1/3200s استفاده شده که قابلیت فیلمبرداری تا سرعت 240fps و ثبت تصاویر با کیفیت 12/1Mp را دارد. در کار حاضر به‌دلیل نیاز به تصاویر با کیفیت بالا برای تکنیک پردازش تصویر، از سرعت فیلم‌برداری 24fps استفاده شده است.

3- روش انجام آزمایش

در کار حاضر، به دلیل دسترسی آسان و ایمنی بالا از آب به عنوان فاز مایع و

از هوا به عنوان فاز گاز استفاده شده است. آزمایش‌ها به صورت آدیاباتیک در فشار اتمسفریک و در دمای متوسط آزمایشگاه، 27°C، انجام شده‌اند. برای تهیه 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 در مقاطع مختلف کانال پس از رسیدن به حالت پایدار، از طریق مشاهده، تعیین و ثبت شده‌اند. محدوده مورد بررسی برای جریان آب 1-9m^3/hr و برای هوا 0-480m^3/hr است. با تهیه نمودارهای جریان دوفازی، مطالعات با هدف بررسی طول ،سرعت و فرکانس حباب‌ها بر روی ناحیه‌ی مربوط به رژیم حباب‌های تیلور متمرکز شده و از جریان مربوط به این رژیم در هریک از نقاط مورد آزمایش، به مدت 120 S فیلمبرداری شده است. در نهایت با استخراج تصاویر مربوط به هریک از فریم‌های ثبت شده ،و بررسی دقیق این تصاویر و همچنین استفاده از روش‌های پردازش تصویر[1]، میانگین داده‌های مربوط به طول و سرعت حباب‌های تیلور در هر یک از نقاط مورد بررسی، گزارش شده است.

4- پردازش تصاویر

در کار حاضر برای تعیین مشخصه‌های حباب‌های تیلور از تکنیک‌های پردازش تصویر بهمراه مطالعه مستقیم فیلم‌های جریان استفاده شده است. برای این منظور کدی در برنامه متلب[2] بر اساس الگوریتم پیشنهادی حنفی‌زاده و همکاران [19] تهیه و برای تعیین ابعاد حباب تیلور و موقعیت مکانی نوک حباب[3] مورد استفاده قرار گرفته است. در این روش ابتدا تصاویر فریم‌های فیلم الگوی جریان، در قالب یک ماتریس دوبعدی برحسب شدت روشنایی[4] تصویر آر-جی-بی[5] ذخیره شده و سپس به تصویر سطح خاکستری[6] تبدیل می‌شود. تصویر خروجی دارای 256 سطح تیرگی، 0 مربوط به رنگ سیاه و 255 مربوط به رنگ سفید، است. در مرحله بعد، برخی از اصلاحات برای افزایش کیفیت تصویر صورت می‌گیرد. بر این اساس در گام نخست از الگوریتم تفریق تصاویر[7] برای کاهش نویزهای مربوط به پس‌زمینه کانال، با حذف طیف رنگی مربوط به آن از مرزهای حباب استفاده شده و سپس از یک فیلتر میانه‌گذر[8] برای صاف کردن مرزهای تصویر استفاده شده است. این فیلتر که در واقع یک ماتریس 3×3 است، با جایگزینی مقدار میانگین سطح تیرگی 9 درایه ماتریس، در درایه مرکزی، در حذف نویزهای نقطه‌ای و گوشه‌های تار تصویر نیز مفید است. پس از انجام اصلاحات مذکور، برای تسریع در امر پردازش و بدست آوردن اطلاعات مورد نیاز، تصویر بدست آمده به یک تصویر باینری[9] با درایه‌های 0 (رنگ سفید) و 1 (رنگ سیاه) تبدیل می‌شود. پس از تهیه تصویر باینری، از توابع مورفولوژی بازکردن[10] و بستن[11] برای حذف نقاط سیاه و همچنین پرکردن لکه‌های سفید بسیار کوچک باقی‌مانده استفاده شده است. جزئیات بیشتر مراحل فوق در منبع [19] موجود است.

1- Image Processing
2- MATLAB
3- Bubble Noise
4- Color Intensity
5- Red-Green-Blue (RGB)
6- Gray Scale
7- Image-Subtracted Algorithm
8- Median Filter
9- Binary Image
10- Opening Morphology Function
11- Closing Morphology Function

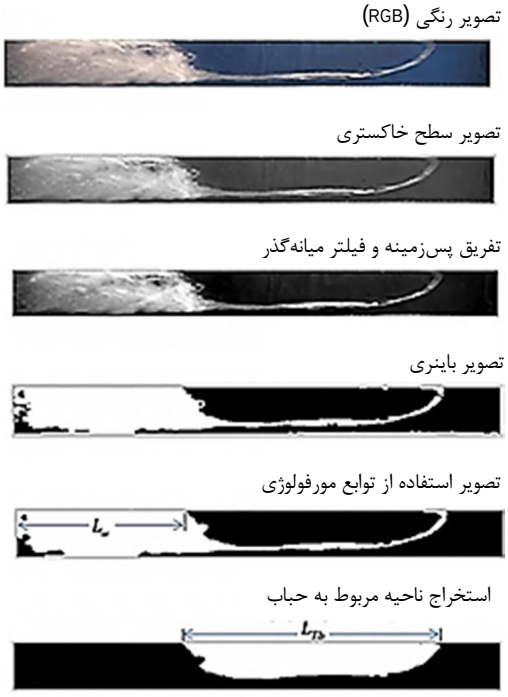
پس از تهیه تصویر باینری، ناحیه مربوط به ویک[12] پشت حباب، حذف شده و محدوده مربوطه به حباب تیلور به صورت مشخص باقی می‌ماند؛ که در نهایت با توجه به مختصات مربوط به هرکدام از پیکسل‌های سفید و سیاه، طول حباب (L_{Tb})و مکان نوک آن اندازه‌گیری می‌شود. شکل 5 روند پردازش تصویر مربوط به یک حباب تیلور را نشان می‌دهد.

سرعت متوسط صعود حباب‌های تیلور، بر اساس تغییر مکان نوک حباب در بازه زمانی مربوط به این جابجایی بدست می‌آید. شکل 6 مکان نوک یک حباب تیلور را به ترتیب در فریم‌های n_1 و n_2 مربوط به فیلم جریان نشان می‌دهد.

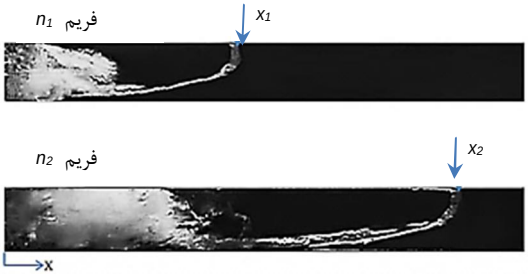
با در نظر گرفتن F به عنوان سرعت فیلم‌برداری دوربین[13]، مقدار سرعت متوسط حباب‌های تیلور از رابطه (2) بدست می‌آید.

$$u_{Tb}=\frac{F(x_2-x_1)}{n_2-n_1} \qquad (2)$$

x1 و x2 مکان حباب مورد نظر را به ترتیب در فریم‌های n1 و n2 نشان می‌دهد. در تحقیق حاضر، برای تعیین سرعت متوسط، تغییر مکان یک متر



شکل 5 روند پردازش تصویر حباب تیلور



شکل 6 مکان حباب تیلور در فریم‌های n_1 و n_2

12- wake
13- Camera Frame Rate

حباب تیلور در طول هر کدام از شیب‌ها مد نظر قرار گرفته است.

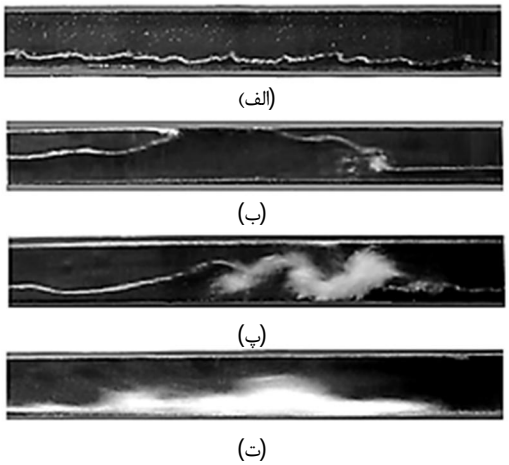
5- نتایج و بحث

5-1- نمودارهای جریان دوفازی

برای تهیه نمودارهای جریان دوفازی سیستم مورد نظر، رژیم‌های مشاهده شده، بر روی مختصات دوبعدی با محورهای مربوط به سرعت‌های ظاهری[1] فازها طبقه‌بندی شده‌اند. خطوط رسم شده در این نمودارها نشان‌دهنده مرزهای گذر بین رژیم‌های مختلف است. شایان ذکر است که گذر از این خطوط به معنای تغییر سریع بین رژیم‌ها نبوده بلکه تغییر در الگوها به تدریج اتفاق می‌افتد.

شکل 7 تصاویر مربوط به رژیم‌های جریان قسمت افقی بالادست مقاطع شیب‌دار را نشان می‌دهد.

با توجه شکل 7، چهار نوع رژیم جریان در این قسمت از کانال مورد بررسی، مشاهده شده است. در رژیم جریان موجی[2]، که تنها در سرعت‌های پایین جریان مایع مشاهده می‌شود، تنش وارده از طرف جریان گاز بر سطح مایع سبب ایجاد ناپایداری‌هایی به شکل موج در سطح مشترک دو فاز می‌شود که ارتفاع این ناپایداری‌ها به دیواره‌ی بالایی کانال نمی‌رسد. در رژیم جریان اسلاگ[3] که ماهیت متناوب دارد، یکی از ناپایداری‌های 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. رژیم جریان موجی غلتان[4] نیز همانند جریان اسلاگ ماهیت متناوب داشته و به واسطه رشد ناپایداری‌های فصل مشترک ایجاد می‌شود. با این تفاوت که به‌دلیل فشار بالاتر خط کانال، ناشی از بالا بودن دبی جریان گاز، ناپایداری‌ها توان رشد زیاد و بستن کامل سطح مقطع کانال را نداشته و به صورت توده‌های غلتان در جهت جریان حرکت می‌کنند. در دبی‌های بسیار بالای جریان گاز، فاز مایع بصورت توده‌های مه‌آلودی در کف کانال جریان داشته و قطرات زیادی از سطح این توده جدا شده و به داخل محیط پیوسته‌ای از فاز گاز اسپری می‌شود که این نوع جریان با عنوان رژیم مه‌آلود[5] در نمودار مشخص شده است.



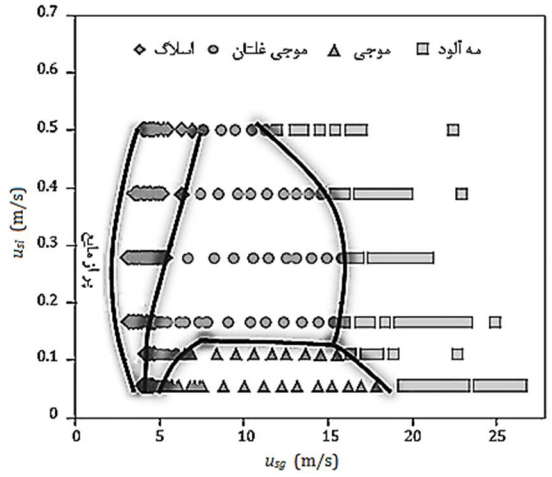
شکل 7 رژیم‌های جریان قسمت افقی.بالادست الف) موجی ب) اسلاگ پ) موجی غلتان ت) مه‌آلود

1- Superficial Velocities
2- Wavy
3- Slug
4- Rollwave
5- Misty

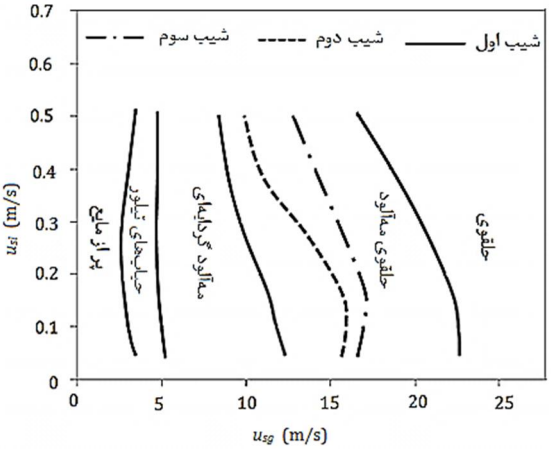
شکل 8 نمودار جریان مربوط به قسمت افقی بالادست مقاطع شیب‌دار را به همراه نقاط آزمایش نشان می‌دهد.

در مقاطع شیب‌دار، همواره برگشت قسمتی از فاز مایع بواسطه تأثیر نیروی گرانش سبب تداخل و برهمکنش بیشتر دوفاز با یکدیگر شده و تغییر نوع الگوهای جریان نسبت به قسمت افقی کانال را موجب می‌شود. شکل 9 نمودارهای جریان مربوط به شیب‌های اول، دوم و سوم را در مقایسه با یکدیگر نشان می‌دهد.

همان‌طور که از شکل 9 مشاهده می‌شود، جریان دوفازی در مقاطع شیب‌دار در غالب چهار الگوی جریان صورت می‌گیرد. در رژیم جریان حباب‌های تیلور که در سرعت‌های پایین جریان گاز مشاهده می‌شود، فاز گاز به صورت متناوب در قالب حباب‌های بزرگ گلوله‌ای شکل با قطری تقریباً برابر با عرض کانال و در میان محیط پیوسته‌ای از مایع صعود می‌کنند. این حباب‌ها در مقاطع شیب‌دار در تماس با دیواره بالایی کانال حرکت کرده و توسط فیلمی از مایع از دیواره پایینی کانال جدا می‌شوند. در رژیم جریان مه‌آلود گردابه‌ای[6] مقداری از مایع به‌دلیل مومنتم پایین و تأثیر نیروی گرانش به سمت پایین برگشته و در برخورد با جریان گاز تشکیل گردابه‌هایی را



شکل 8 دیاگرام جریان قسمت افقی قبل از مقاطع شیب‌دار



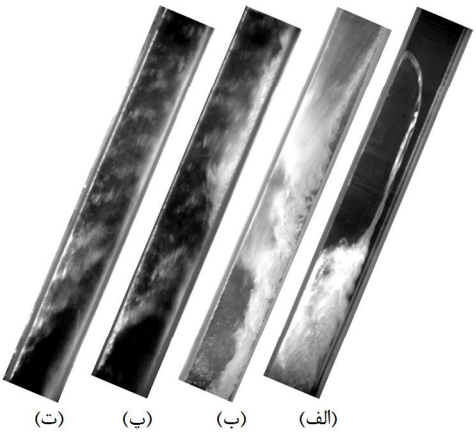
شکل 9 نمودار جریان مربوط به مقاطع شیب‌دار

6- Vortex Misty

می‌دهد که این گردابه‌ها عمدتاً حاوی حباب‌های ریزی در بدنه خود بوده و به صورت کف‌آلود دیده می‌شوند. همواره در حین تشکیل چنین گردابه‌هایی قطراتی از سطح مایع توسط جریان گاز جدا شده و محیط مه‌آلودی در اطراف گردابه‌ها ایجاد می‌کنند. در سرعت‌های بسیار بالای جریان گاز، فاز مایع به صورت فیلمی در روی دیواره لوله و فاز گاز مرکز کانال جریان می‌یابد. بدین ترتیب رژیم جریان حلقوی[1] تشکیل می‌شود. به دلیل اختلاف سرعت بالای دوفاز قطراتی از مایع ممکن است وارد هسته گازی شوند. در رژیم جریان حلقوی مه‌آلود[2] که در دبی‌های پایین‌تر جریان گاز نسبت به جریان حلقوی ایجاد می‌شود، فاز مایع به صورت توده‌ای مه‌آلود در کف کانال به همراه فیلمی از مایع در پیرامون کانال جریان داشته و همواره قطراتی از مایع در داخل هسته گازی حضور دارند. شکل ۱۰ رژیم‌های جریان دوفازی مربوط به مقاطع شیب‌دار را نشان می‌دهد.

با توجه به نمودار جریان شکل ۹، مرز گذار از رژیم جریان مه‌آلود گردابه‌ای به جریان حلقوی مه‌آلود، در طول مسیر و با کمتر شدن شیب کانال به سمت دبی‌های بالاتر جریان گاز جابجا می شود. در واقع افت بیشتر مومنتم مایع در عبور از هر شیب نسبت به شیب قبلی باعث می‌شود که تمام مایع رسیده به آن مقطع، توان عبور کامل را نداشته باشد و لذا همواره حضور مقدار بیشتری از مایع در کف کانال، که بواسطه نیروی گرانش، تمایل به برگشت بسوی پایین دارد، سبب گسترش ناحیه مربوط به رژیم جریان مه‌آلود گردابه‌ای نسبت به شیب قبلی میشود. همچنین به‌دلیل مشابه، در محدوده جریان مورد مطالعه، انتقال از رژیم جریان حلقوی مه‌آلود به جریان حلقوی تنها برای شیب اول مشاهده می‌شود. مورد قابل توجه دیگر، ناحیه مربوط به رژیم جریان حباب‌های تیلور است، همان‌طور که مشاهده می‌شود، محدوده مربوط به این ناحیه بدون تأثیر از تغییرات شیب کانال، برای هرسه مقطع شیب‌دار کاملاً بر هم منطبق است. در واقع می‌توان گفت که در تمام دبی‌های مورد مطالعه، حباب تیلوری که در شیب اول تشکیل می‌شود، بدون ازهم پاشیدن از هر دو شیب بعدی عبور کرده و رژیم حبابی تیلور را بر آن‌ها نیز حاکم می‌کند.

جزئیات بیشتر مربوط به الگوها و نمودارهای جریان سیستم مورد مطالعه، توسط انصاری و همکاران [۲۰] ارائه شده است.



شکل ۱۰ رژیم‌های جریان مربوط به مقاطع شیب‌دار الف) حباب‌های تیلور ب) مه‌آلود گردابه‌ای پ)حلقوی مه‌آلود ت) حلقوی

1- Annular
2- Misty Annular

۵-۲- روند تشکیل حباب‌های تیلور

در تحقیق حاضر عامل ایجاد حباب‌های تیلور در مقاطع شیب‌دار، برخلاف مطالعات پیشین که عمدتاً از تکنیک تزریق مستقیم فاز گاز در ستونی از مایع استفاده می‌شد، نوع رژیم جریان در قسمت افقی بالادست است. با توجه به نمودارهای شکل‌های ۸ و ۹ مشاهده می‌شود که الگوی جریان حباب‌های تیلور در قسمت‌های شیب‌دار مسیر، همزمان با رژیم جریان اسلاگ در قسمت افقی بالادست جریان رخ می‌دهد. در واقع با رسیدن یک اسلاگ مایع بزرگ به پای شیب اول، مقطع کانال در قسمت‌های شیب‌دار بطور کامل از آب پر شده و ستونی از مایع در این مقاطع شکل گرفته و جلوی جریان گاز مسدود می‌شود. با تجمع گاز در پشت سد مایع و افزایش فشار، فاز گاز به داخل ستون مایع وارد شده و با ایجاد حباب بزرگ گلوله‌ای شکلی از میان مایع جریان می‌یابد. شکل ۱۱ روند تشکیل حباب‌های تیلور را در شیب اول از کانال مورد بررسی نشان می‌دهد.

با هر بار عبور یک حباب تیلور، جریان کف‌آلود و مغشوشی در دنباله گردابه‌های ایجاد شده در پشت حباب، برقرار می‌شود تا اینکه شیب‌ها دوباره توسط اسلاگ جدیدی پر از مایع 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 کامل مقطع کانال وجود ندارد. به همین دلیل ناحیه مربوط به رژیم جریان حباب‌های تیلور به دبی‌های بالای جریان گاز گسترش نمی‌یابد. لازم به ذکر است که طبق بررسی‌های انجام شده تاکنون، چنین روند تشکیلی برای حباب‌های تیلور، در پیشینه پژوهش مورد توجه قرار نگرفته است.

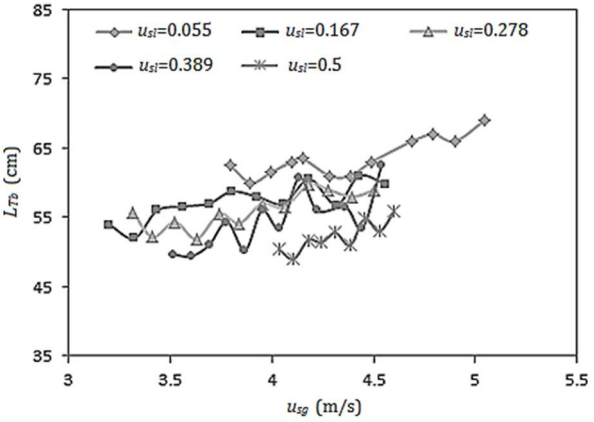
۵-۳- تغییرات طول حباب‌های تیلور

در کار حاضر با توجه به نوع سیستم مورد بررسی و محدوده جریان حباب‌های تیلور، تأثیر پارامترهای شیب کانال و دبی هر کدام از فازها بر روی طول

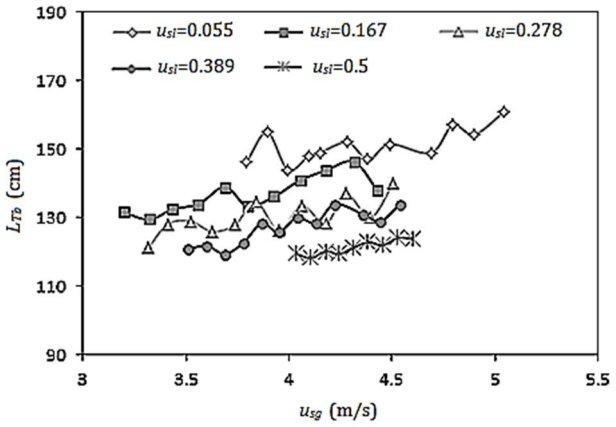
شکل ۱۱ روند شکل‌گیری حباب‌های تیلور در شیب اول

حباب‌های تیلور مورد مطالعه قرار گرفته است. برای این منظور در هر کدام از دبی‌های مورد مطالعه، مقدار طول مربوط به 10 حباب تیلور، در امتداد هر شیب اندازه‌گیری شده و مقدار متوسط آن گزارش شده است. لازم بذکر است که اندازه‌گیری طول حباب در هر شیب، زمانی صورت گرفته که نوک حباب به انتهای شیب مورد نظر رسیده باشد. شکل‌های 12 تا 14 نحوه تغییرات طول حباب‌های تیلور را با سرعت‌های ظاهری فازها، به ترتیب برای شیب‌های اول تا سوم، نشان می‌دهد.

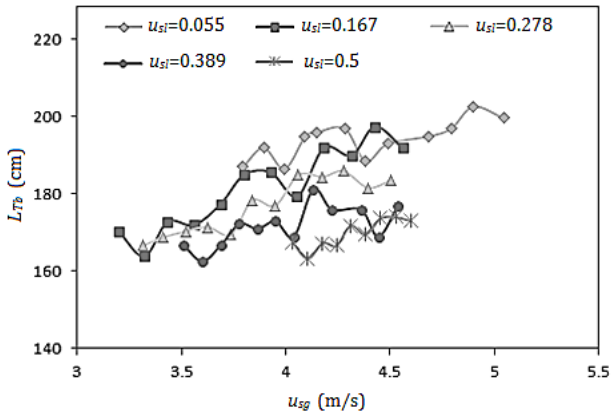
با توجه به روند کلی تغییرات در شکل‌های 12 تا 14 می‌توان بیان کرد که در تمام شیب‌های مورد مطالعه، افزایش دبی یا سرعت ظاهری جریان گاز، سبب افزایش نسبی در طول متوسط حباب‌های تیلور می‌شود در حالی که افزایش دبی جریان مایع سبب کاهش طول این حباب‌ها می‌شود. در واقع



شکل 12 تغییرات طول متوسط حباب‌هادر شیب اول



شکل 13 تغییرات طول متوسط حباب‌ها در شیب دوم



شکل 14 تغییرات طول متوسط حباب‌ها در شیب سوم

افزایش دبی جریان گاز و بدنبال آن، افزایش فشار این جریان، سبب ورود حجم بالاتری از فاز گاز به داخل ستون مایع تشکیل شده در مقاطع شیب‌دار می‌شود که افزایش طول حباب‌ها را در پی دارد؛ از طرفی با افزایش دبی جریان مایع، ارتفاع مایع پر شده در مقاطع شیب‌دار، بواسطه اسلاگی که وارد این قسمت می‌شود، بیشتر شده که موجب افزایش فشار هیدرواستاتیکی در طول مقاطع شیب‌دار می‌شود؛ و فشار بالا تأثیر کاهشی بر ورود جریان هوا و گسترش حباب‌های تیلور دارد. با کمتر شدن شیب کانال در امتداد مسیر، حباب‌های تیلور به دیواره بالایی کانال نزدیکتر می‌شوند که باعث باریکتر شدن و کشیده‌تر شدن حباب‌ها می‌شود. این مورد از یک سو و همچنین تداوم ورود جریان هوا از میان و یک دنباله حباب به داخل آن، از سوی دیگر، سبب افزایش طول این حباب‌ها در مسیر صعود می‌شوند. شکل 15 جابجایی مرز پایینی حباب تیلور به سمت دیواره بالایی کانال و باریکتر شدن آن را طی عبور از شیب‌های اول تا سوم نشان می‌دهد.

با توجه به این‌که در کار حاضر، روند کلی تغییرات طول حباب‌های تیلور با سرعت‌های ظاهری فازها، مشابه نتایج ونگ و همکاران [7] است، لذا در این تحقیق از شکل عمومی رابطه پیشنهادی آنها (رابطه‌ی 3) برای پیش‌بینی مقدار طول حباب‌ها در هریک از شیب‌های مورد مطالعه، استفاده شده است.

$$\frac{L_{Tb}}{D_h} = a \cdot u_{sl}^{*b} u_{sg}^{*c} \quad (3)$$

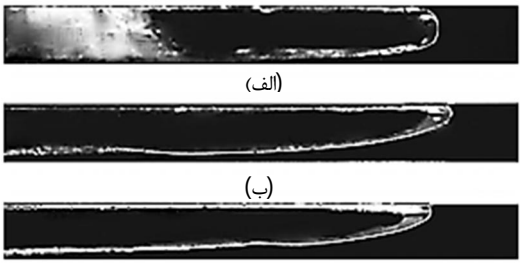
در رابطه (3) بالا a، b و c مقادیر ثابت و u_{sl}^{*}، u_{sg}^{*} و D_h به ترتیب سرعت‌های ظاهری بی‌بعد مایع و گاز و قطر هیدرولیکی کانال می‌باشند که با استفاده از روابط (4-6) محاسبه می‌شوند.

$$u_{sl}^{*} = \frac{u_{sl}}{\sqrt{gD_h}} \quad (4)$$

$$u_{sg}^{*} = \frac{u_{sg}}{\sqrt{gD_h}} \quad (5)$$

$$D_h = \frac{4A}{p} \quad (6)$$

در روابط فوق A، p و g بترتیب سطح مقطع کانال، محیط کانال و شتاب گرانشی هستند. جدول 2 مقادیر مربوط به ثابت‌های رابطه (3) در شیب‌های مختلف و همچنین بیشینه خطای موجود در محاسبه طول حباب‌های تیلور را با استفاده از این رابطه نشان می‌دهد.



(الف)

(ب)

(پ)

شکل 15 جابجایی مرز پایین حباب بسمت دیواره بالایی کانال الف) شیب اول ب) شیب دوم پ) شیب سوم، $u_{sl} = 0.278$ و $u_{sg} = 3.69$

جدول 2 مقادیر مربوط به ثابت‌های رابطه (3) بهمراه بیشینه خطای موجود

	c	b	a	بیشینه خطا نسبی|
شیب اول	0/31	-0/069	4/69	%5/91
شیب دوم	0/17	-0/083	13/58	%5/02
شیب سوم	0/237	-0/053	17	%4/86

با در نظر گرفتن مقادیر خطای موجود در جدول 2، می‌توان نتیجه گرفت که رابطه (3) با توجه به ضرایب بدست آمده، با دقت نسبتاً مناسبی برای پیش‌بینی طول حباب‌های تیلور در امتداد زانویی مورد مطالعه، قابل استفاده است.

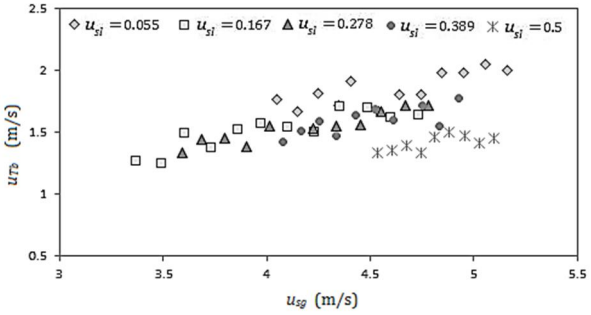
5-4- سرعت متوسط صعود حباب‌های تیلور

در بررسی نحوه تغییرات سرعت متوسط صعود حباب‌های تیلور نیز تأثیر پارامترهای شیب کانال و دبی فازهای جاری مد نظر قرار می‌گیرد. برای این منظور در هر کدام از دبی‌های مورد مطالعه، بر اساس روشی که پیشتر ذکر شد، مقدار سرعت متوسط صعود 10 حباب تیلور، طی فاصله یک متر در امتداد هر شیب اندازه‌گیری شده و مقدار متوسط آن‌ها گزارش شده است. همچنین در تحلیل نتایج بدست آمده، علاوه بر مطالعه تأثیر مستقیم دبی فازها، با توجه به ماهیت رفتار داده‌ها از مدل فلاکس رانشی، رابطه (1)، استفاده شده و در هر کدام از شیب‌ها، مقدار سرعت رانشی حباب (u_d) و کمیت توزیع (c) با استفاده از روش حداقل مربعات تعیین شده است.

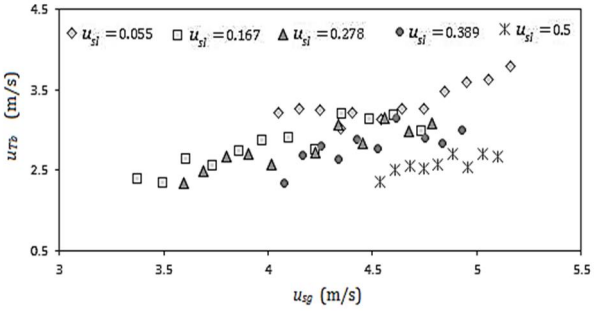
شکل‌های 16 تا 18 نحوه تغییرات سرعت متوسط صعود حباب‌های تیلور (u_{Tb}) را با سرعت‌های ظاهری فازها، در شیب‌های اول تا سوم، نشان می‌دهد.

همان‌طور که مشاهده می‌شود، مشابه نتایج مربوط به توزیع طول حباب‌های تیلور، در هر سه شیب مورد مطالعه، افزایش دبی یا سرعت ظاهری جریان گاز، سبب افزایش سرعت متوسط حباب‌های تیلور می‌شود؛ همچنین بر اساس روند کلی نتایج بدست آمده، افزایش سرعت ظاهری جریان مایع باعث کاهش ناچیز طول حباب‌ها می‌شود. در واقع با در نظر گرفتن نتایج مربوط به طول و سرعت حباب‌های تیلور در هر سه شیب مورد مطالعه، می‌توان نتیجه گرفت که نیروی بویانسی[1] اثر بسیار قابل توجهی بر سرعت صعود حباب‌های تیلوردارد؛ بطوری که حباب‌هایی که طول بیشتری دارند، بواسطه بزرگتر بودن نیروی بویانسی، از سرعت صعود بالاتری نیز برخوردار هستند. علاوه بر این، با پیشروی حباب در امتداد زانویی، از یک سو باکاهش فشار هیدرواستاتیکی مقابل حباب، به سبب کاهش ارتفاع ستون آب بالای آن و از سوی دیگر کمتر شدن مقدار نیروی پسا[2] در مقابل حرکت حباب، باریکتر شدن آن، مقدار سرعت متوسط صعود حباب‌های تیلور افزایش می‌یابند. شکل 19 نحوه تغییرات سرعت متوسط حباب‌های تیلور را با سرعت مخلوط دوفازی در مدل فلاکس رانشی، نشان می‌دهد.

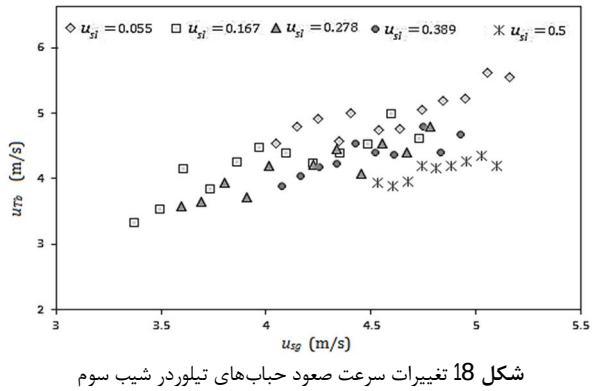
مشابه با نتایج بدست آمده توسط یان و همکاران [6]، در نمودار شکل 19 نیز مشاهده می‌شود که سرعت رانشی حباب (u_d)، با کاهش شیب کانال در امتداد مسیر، به مقدار قابل توجهی افزایش می‌یابد. برای تعیین مقادیر مربوط به این کمیت در کار حاضر، می‌توان با دقت مناسبی از رابطه (7)،



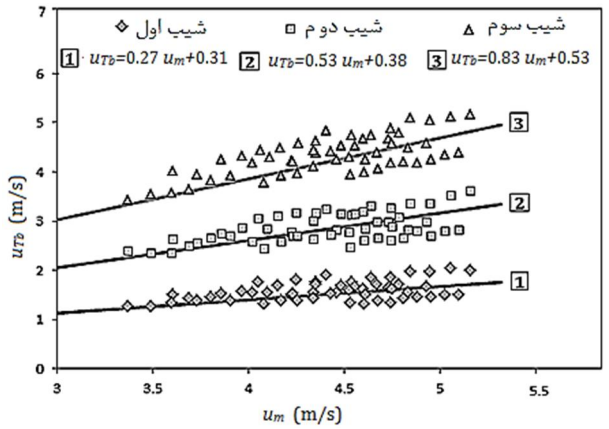
شکل 16 تغییرات سرعت صعود حباب‌های تیلور در شیب اول



شکل 17 تغییرات سرعت صعود حباب‌های تیلور در شیب دوم



شکل 18 تغییرات سرعت صعود حباب‌های تیلوردر شیب سوم



شکل 19 نحوه تغییرات سرعت صعود حباب‌های تیلور در شیب‌های مختلف در مدل فلاکس رانشی

که در واقع با در نظر گرفتن اثر شیب کانال در رابطه پیشنهادی نیکلین [12] (جدول 1) بدست آمده، استفاده کرد.

$$u_d = 0.355\sqrt{gD}\left(1+\cos^{2.74}\theta\right) \quad (7)$$

در جدول 3، مقادیر محاسبه شده از رابطه (7) در مقایسه با رابطه پیشنهادی حسن و کبیر [13] (جدول 1) و همچنین نتایج تجربی کار حاضر آورده شده است.

جدول 3 سرعت رانشی (u_d) محاسبه شده از رابطه (7) و رابطه پیشنهادی حسن وکبیر در مقایسه با نتایج تجربی

	حسن و کبیر [14] (m/s)	رابطه (7) (m/s)	نتایج تجربی کار حاضر (m/s)
سرعت رانشی در شیب اول	0/401	0/307	0/31
سرعت رانشی در شیب دوم	0/452	0/398	0/38
سرعت رانشی در شیب سوم	0/384	0/523	0/53

1- Buoyancy Force
2- Drag Force

نتایج موجود در جدول 3 نشان می‌دهد که مقدار سرعت رانشی محاسبه شده با استفاده از رابطه پیشنهادی حسن و کبیر [14]، روند یکنواختی با تغییرات شیب کانال ندارد؛ بطوری که مقدار آن، با کاهش شیب کانال ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد. لذا رابطه حسن و کبیر، با توجه به نتایج تجربی بدست آمده، برای استفاده در کار حاضر برای شیب‌های متوالی مناسب نیست.

5-5-فرکانس حباب‌های تیلور

همان‌طور که پیشتر ذکر شد، فرکانس حباب‌های تیلور در هر مقطع خاص، عبارت است از تعداد حباب‌هایی که در یک دوره زمانی معین، از مقطع مورد نظر در امتداد کانال عبور می‌کنند [15]. برای تعیین مقدار فرکانس، تعداد حباب‌های تیلوری که در مدت 120 ثانیه از هر یک مقاطع شیب‌دار عبور کرده، در سه نوبت ثبت شده و نهایتاً متوسط این مقادیر گزارش شده است. طبق مشاهدات صورت گرفته در تحقیق حاضر، تمامی حباب‌های تیلور شکل‌گرفته در شیب اول، بدون ازهم پاشیدن، از دو شیب بعدی نیز عبور کرده و همچنین بازای تمام دبی‌های مورد مطالعه، پدیده ادغام[1] حباب‌های تیلور با یکدیگر، در هیچ‌کدام از مقاطع شیب‌دار رخ نمی‌دهد؛ لذا تغییرات شیب کانال در طول مسیر، تأثیری بر مقدار فرکانس حباب‌های تیلور نداشته و نتایج گزارش شده مربوط به کل طول زانویی مورد مطالعه است. شکل 20، نحوه تغییرات فرکانس حباب‌های تیلور (f) را در سیستم مورد آزمایش و بازای دبی‌های مختلف جریان‌های مایع و گاز نشان می‌دهد.

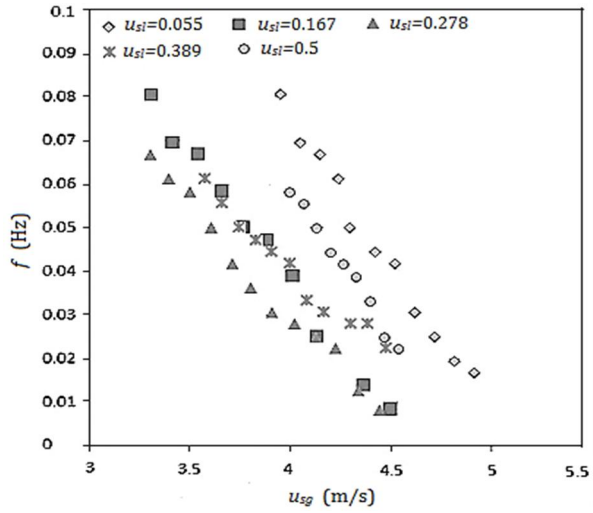
باتوجه به شکل 20 مشاهده می‌شود که به ازای تمام سرعت‌های مایع مورد آزمایش، فرکانس حباب‌های تیلور با افزایش سرعت ظاهری جریان گاز، کاهش می‌یابد. در واقع در دبی‌های بالای جریان گاز، عمده ناپایداری‌های شکل گرفته در قسمت افقی بالادست مقاطع شیب‌دار، بصورت موج‌های غلتان است. از آنجایی که حجم کمتر مایع جابجا شده توسط موج‌های غلتان نسبت به اسلاگ، توان پر کردن کامل مقطع کانال و به تبع آن تشکیل حباب‌های تیلور را ندارد، لذا با افزایش سرعت ظاهری جریان گاز، فرکانس حباب‌های تیلور کاهش می‌یابد.نکته جالب توجه از نمودار شکل 20، نحوه تغییرات فرکانس حباب‌های تیلور با دبی یا سرعت ظاهری جریان مایع است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، روند این تغییرات به صورت یکنواخت نبوده و در جریان‌هایی با عدد رینولدز ظاهری مایع[2] کمتر از 22000 (جریان‌هایی با سرعت ظاهری مایع کمتر از 0/278 متر بر ثانیه)، افزایش سرعت ظاهری جریان مایع سبب کاهش فرکانس حباب‌های تیلور می‌شود، در حالی که در جریان‌هایی که عدد رینولدز ظاهری مایع بیشتر از این مقدار است، با افزایش دبی جریان مایع، فرکانس حباب‌ها نیز افزایش می‌یابد.شایان ذکر است که برای محاسبه عدد رینولدز ظاهری مایع از رابطه (8) استفاده شده است.

$$\mathrm{Re}_{sl}=\frac{\rho_l D_{hl} u_{sl}}{\mu_l} \quad (8)$$

$$D_{hl}=\frac{4A_l}{p_l} \quad (9)$$

در روابط فوق A_l و p_l به ترتیب سطح مقطع اشغال شده و پیرامون تر شده توسط فاز مایع است.

همان‌طور که پیشتر نیز مورد توجه قرار گرفت، تشکیل حباب‌های تیلور در مقاطع شیب‌دار، وابسته به اسلاگ‌هایی است که در قسمت افقی بالادست



شکل 20 روند تغییرات فرکانس حباب‌های تیلور با سرعت‌های ظاهری فازها

ایجاد می‌شود. از آنجایی که مکانیزم تشکیل این اسلاگ‌ها عمدتاً از معیار ناپایداری کلوین-هلمهولتز[3] پیروی می‌کنند [18]، با افزایش دبی جریان مایع، اختلاف سرعت بین دوفاز کمتر شده و طبق معیار ناپایداری کلوین-هلمهولتز، امکان تشکیل اسلاگ کمتر می‌شود. لذا با کاهش فرکانس اسلاگ، فرکانس حباب‌های تیلور نیز کاهش می‌یابد. بیشتر شدن دبی جریان مایع و افزایش سرعت آن، سبب ایجاد پرش هیدرولیکی[4] در قسمت افق بالادست مقاطع شیب‌دار می‌شود. تصویر مربوط به این پرش هیدرولیکی در شکل 21 آورده شده است.

وقوع این پرش هیدرولیکی در محل ورود مایع به داخل کانال ازیک سو سبب افزایش کسر حجمی مایع در طول قسمت افقی کانال شده و از سوی دیگر باعث ایجاد ناپایداری‌هایی در سطح مشترک دوفاز و در قسمت پایین دست محل ایجاد پرش می‌شود. با افزایش کسر حجمی فاز مایع ناپایداری‌های ایجاد شده در سطح مشترک دوفاز، راحتتر خود را به سقف کانال رسانده و تشکیل اسلاگ می دهند؛ لذا فرکانس اسلاگ و به تبع آن فرکانس حباب‌های تیلور افزایش پیدا می‌کند.

برای پیش‌بینی فرکانس حباب‌های تیلور در کار حاضر ، روابط (10) و (11) به ترتیب برای جریان‌هایی با رینولدز ظاهری کمتر و بیشتر از مقدار 22000 پیشنهاد می‌شود. این روابط که با استفاده از اعداد رینولدز ظاهری فازهای گاز و مایع بدست آمده‌اند، به دلیل کمبود روابط و نتایج در پیشینه تحقیق، می‌توانند از ارزش بالایی برخوردار باشند.

شکل 21 وقوع پرش هیدرولیکی در قسمت افقی بالادست مقاطع شیب‌دار

1- Merging
2- Liquid Superficial Reynolds Number
3- Kelvin-Helmholtz
4- Hydraulic Jump

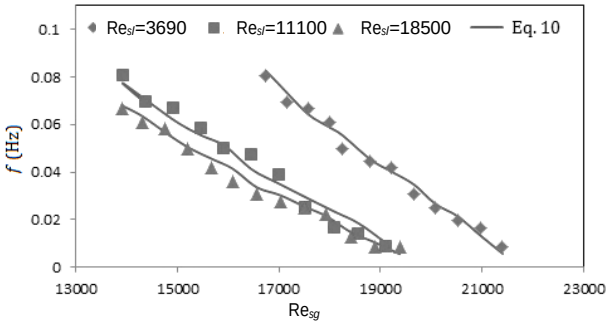
$Re_{sl} < 22000$:

$$f = 6.84\, Re_{sg}^{0.01} Re_{sl}^{-0.21} - Re_{sg}^{0.18} Re_{sl}^{-0.18} \quad (10)$$

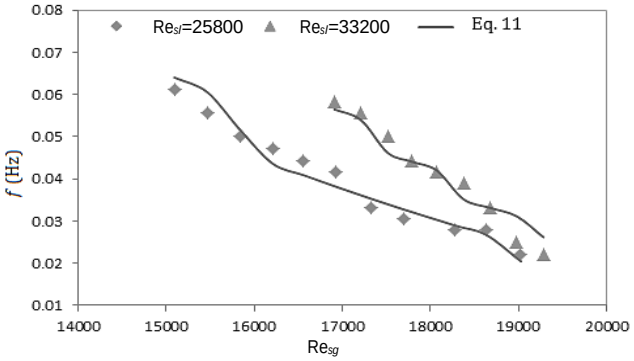
$Re_{sl} > 22000$:

$$f = 1.72\, Re_{sg}^{-0.45} Re_{sl}^{-0.4} - Re_{sg}^{-0.37} Re_{sl}^{0.37} \quad (11)$$

برای ارزیابی روابط ارائه شده، مقدار فرکانس پیش‌بینی شده توسط این روابط به همراه داده‌های تجربی حاصل از آزمایش در شکل‌های 22 و 23 آورده شده است.



شکل 22 تعیین فرکانس حباب‌ها با استفاده از رابطه (10) در محدوده جریان $Re_{Sl}<22000$



شکل 23 تعیین فرکانس حباب‌ها با استفاده از رابطه (11) در محدوده جریان $Re_{Sl}>22000$

همانطوری که مشاهده می‌شود روابط تجربی پیشنهاد شده، مقدار فرکانس حباب‌های تیلور را با دقت نسبتاً مناسبی در هر دو محدوده مورد مطالعه، پیش‌بینی می‌کند.

در مجموع، با توجه به آنچه که در رابطه با ماهیت رفتار مشخصه‌های حباب‌های تیلور مورد توجه قرار گرفت، می‌توان گفت که حصول به محدوده ایمن طراحی و امن کاربردی در سیستم‌های مختلف مهندسی، نیازمند نظارت و کنترل سرعت‌های ظاهری فازهای جاری است. به عنوان مثال در اکثر کاربردهای مهندسی که با انتقال حرارت همراه است، مانند بویلرهای موجود در نیروگاه‌ها، با توجه به ملاحظات حرارتی خطوط انتقال جریان‌های دوفازی، مطلوبست که طول حباب‌های تیلور کم و سرعت پیشروی آن‌ها بالا باشد، زیرا همانطوری که پیشتر اشاره شد، حضور این حباب‌ها و بخصوص تماس آن‌ها با دیواره کانال، سبب تغییرات قابل توجهی در ضریب انتقال حرارت داخل کانال شده و هرچه طول سطح تماس حباب با دیواره و همچنین مدت زمان تماس آن در یک مقطع مشخص، بیشتر باشد، احتمال سوختن دیواره کانال، در اثر شار حرارتی وارده به آن افزایش می‌یابد.

همچنین از آنجایی که همواره حضور این حباب‌ها در خطوط انتقال، با شوک‌های حرارتی و مکانیکی همراه است، برای به تأخیر انداختن پدیده‌های خوردگی و خستگی خطوط، لازم است که تعداد این حباب‌ها در طی دوره‌های زمانی معین، که با کمیت فرکانس حباب‌ها مشخص می‌شود، کمتر باشد. با توجه به نتایج حاصل از تحقیق حاضر در مورد نوع رفتار مشخصه‌های حباب‌های تیلور، در تعیین دبی یا سرعت ظاهری مناسب برای جریان مایع، باید توجه داشت که افزایش دبی جریان مایع همواره باعث کاهش طول متوسط حباب‌ها می‌شود، با این وجود مقدار فرکانس حباب‌ها با افزایش دبی جریان مایع، ابتدا کاهش و سپس افزایش می‌یابد، لذا با توجه به اهمیت فوق‌العاده بالای پارامتر فرکانس حباب‌ها، لازم است که دبی جریان مایع همواره در محدوده متناظر با کمینه مقدار فرکانس حباب‌ها تنظیم شود. همچنین افزایش جریان گاز از یک سو سبب کاهش فرکانس حباب‌های تیلور و نیز افزایش سرعت پیشروی آنها می‌شود و از سوی دیگر سبب افزایش طول حباب‌ها می شود؛ بنابراین، در تعیین محدوده مناسب برای جریان گاز همواره می‌بایست نوعی بهینه‌سازی بین موارد فوق صورت گیرد. باید توجه کرد که دامنه انتخاب نهایی به مقدار زیادی تحت تأثیر خصوصیات متالوژیکی، خطوط انتقال می‌باشد.

6- نتیجه‌گیری

در مقاله حاضر به مطالعه تجربی مشخصه‌های حباب‌های تیلور در یک زانویی بزرگ متشکل از سه شیب متوالی پرداخته شده است. برای این منظور ابتدا نمودار جریان برای زانویی و مقطع افقی بالادست آن ترسیم شد تا ناحیه مربوط به این رژیم جریان و مکانیزم تشکیل حباب‌ها توسط نوع رژیم جریان بالادست زانویی تعیین شود. سپس تأثیر سرعت‌های ظاهری جریان‌های مایع و گاز و همچنین شیب کانال بر روی مشخصه‌های سرعت، طول و فرکانس حباب‌های تیلور، در امتداد زانویی مورد مطالعه قرار گرفت و روابطی بر اساس شکل کلی معادلات موجود در پیشینه تحقیق برای طول و سرعت حباب‌های تیلور بدست آمد. برای فرکانس حباب‌های تیلور با توجه به روند تغییرات متفاوت و همچنین کمبود روابط در پیشینه پژوهش، معادلاتی بر اساس اعداد رینولدز ظاهری فازها پیشنهاد شد. عمده نتایج بدست آمده از آزمایش به شرح زیر است.

- ناحیه مربوط به رژیم جریان حبابی طویل بدون تأثیر از تغییرات شیب کانال، برای هر سه مقطع شیب‌دار کاملاً بر هم منطبق است.
- رژیم جریان حباب‌های تیلور همزمان با رژیم اسلاگ در قسمت افقی بالادست زانویی رخ می‌دهد و در واقع مکانیزم تشکیل حباب‌های تیلور بر پایه اسلاگ‌های رسیده به پای زانویی است.
- مقدار طول حباب‌های تیلور با افزایش سرعت ظاهری جریان گاز افزایش می‌یابد. در حالی که افزایش سرعت جریان مایع سبب کاهش طول حباب‌ها می‌شود.
- با کمتر شدن شیب کانال در امتداد زانویی، بواسطه باریکتر شدن حباب‌ها و ورود هوا از میان و یک دنباله حباب بداخل آن، طول حباب‌ها افزایش می‌یابد.
- مقدار سرعت حباب‌های تیلور عمدتاً تحت تأثیر نیروی بویانسی بوده بطوریکه مقدار سرعت حباب‌های بزرگتر، بیشتر است؛ علاوه بر این با کاهش شیب در امتداد کانال، بواسطه کمتر شدن نیروی پسا در مقابل حرکت حباب، سرعت حباب‌ها افزایش

می‌یابد.

- با توجه به عدم مشاهده پدیده ادغام حباب‌ها با یکدیگر و همچنین از هم پاشیدن حباب‌ها در طول زانویی، تغییرات شیب کانال تأثیری بر فرکانس حباب‌های تیلور نمی‌گذارد و حباب تشکیل شده در شیب اول از هر سه شیب بعدی عبور می‌کند.
- در تمام محدوده دبی‌های مایع مورد آزمایش، افزایش دبی جریان گاز سبب کاهش فرکانس حباب‌های تیلور می‌شود.
- روند تغییرات فرکانس حباب‌ها بادبی جریان مایع یکنواخت نبوده، بطوری که با افزایش دبی جریان مایع، مقدار فرکانس حباب‌ها ابتدا کاهش و سپس افزایش می‌یابد.
- برای تعیین محدوده ایمن کاری، دبی جریان مایع با توجه به مقدار کمینه فرکانس حباب‌های تیلور انتخاب می‌شود. در حالی که برای انتخاب مقدار مناسب دبی جریان گاز، همواره می‌بایست نوعی بهینه‌سازی بین کاهش فرکانس و افزایش سرعت با کاهش طول حباب‌ها صورت گیرد.

7- فهرست علایم

A	سطح مقطع کانال m^2
c	کمیت توزیع سرعت
D	قطر کانال
F	سرعت فیلم‌برداری (fps)
f	فرکانس حباب‌های تیلور (Hz)
Fr	عدد بی‌بعد فرود
g	شتاب گرانشی (ms^{-2})
u_{sl} , u_{sg}	سرعت‌های ظاهری فازهای گاز و مایع (ms^{-1})
u^*_{sl} , u^*_{sg}	سرعت‌های ظاهریبی‌بعد فازهای گاز و مایع
u_t	سرعت پیشروی حباب تیلور (ms^{-1})
u_d	سرعت رانشی حباب تیلور (ms^{-1})
u_m	سرعت مخلوط دوفازی (ms^{-1})
L_{Tb}	طول حباب تیلور (cm)
s	ارتفاع مقطع کانال (m)
w	عرض مقطع کانال (m)

علایم یونانی

θ	زاویه کانال نسبت به افق

8- مراجع

[1] R.V. Hout, L. Shemer, D. Barnea, Evaluation of hydrodynamic and statistical parameters of gas–liquid slug along inclined pipes, *Chemical Engineering Science,* Vol. 58, No. 4, pp. 115-133, 2008.

[2] T. Taha, Z.F. Cui, CFD modeling of slug flow in vertical tubes, *Chemical Engineering Science*.Vol. 61, No. 1, pp. 676-687, 2006.

[3] T.S. Mayor, A.M. Pinto, J.B. Campos, Vertical slug flow in laminar regime in the liquid and turbulent regime in the bubble wake Comparison with fully turbulent and fully laminar regimes, *Chemical Engineering Science,* Vol. 63, No. 1, pp. 3614-3631, 2008.

[4] Y.P. Liu, P. Yang, W.J. Wang , Z. Du, Investigation of Taylor bubble wake structure in liquid nitrogen by PIV Technique, *Cryogenics,* Vol. 56, No. 2, pp. 20-29, 2013.

[5] T.W. Cheng ,T.L. Lin, Characteristics of gas–liquid two-phase flow in small diameter inclined tubes, *Chemical Engineering Science,* Vol. 56, No. 3, pp. 6393–6398, 2001.

[6] C. Yan, C. Yan, L. Sun, Y. Wang, X. Zhang,Slug behavior and pressure drop of adiabatic slug flow in a narrow rectangular duct under inclined conditions, *Annals of Nuclear Energy,* Vol. 64, No. 1, pp. 21-23, 2013.

[7] Y. Wang, C. Yan, L. Sun, C. Yan, Characteristics of slug flow in a vertical narrow rectangular channel, *Experimental Thermal and Fluid Science,* 2013. in press article, doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2013.10.003

[8] R. Kaji, B.J. Azzopardi, D. Lucas, Investigation of flow development of co-current gas–liquid vertical slug flow, *Multiphase Flow,* Vol. 35, No. 4, pp. 335–348, 2009.

[9] D.J. Nicklin, J.O. Wilkes, J.F. Davidson, Two-phase flow in vertical tubes, *Transactions of the Institution of Chemical Engineers,* Vol. 40, No. 1, pp. 61-68, 1970.

[10] X. Wang, L. Guo, X. Zhang, An experimental study of the statistical parameters of gas–liquid two-phase slug flow in horizontal pipeline, *Heat and Mass Transfer*, Vol. 50, No. 1, pp. 2439–2443, 2007.

[11] M. cook, M. behnia, Bubble motion during inclined intermittent flow, *heat and fluid flow,* Vol. 22, No. 1, pp. 543-551, 2001.

[12] C. Clanet, P. Heraud, G. Searby, On motion of bubbles in vertical tubes of arbitrary cross section: some complements to Dumitrescu-Taylor problem, *Fluid Mechnic*. Vol. 519, No. 7, pp. 359-376, 2004.

[13] A. Hasan, C. Kabir, Two-phase flow in vertical and inclined annuli, *Multiphase Flow,* Vol. 18, No. 2, pp. 279–293, 1992.

[14] M. Sadatomi, Y. Sato, S. Saruwatari, Two-phase flow in vertical noncircular channels, *Multiphase Flow,* Vol. 8, No. 6, pp. 641-655, 1982.

[15] E.A.Safran,Investigation and prediction of slug frequency in gas/liquid horizontal pipe flow, *Petroleum Science and Engineering,* Vol. 69 ,No. 1, pp.143-155, 2009.

[16] S. Laborie, C. Cabassud, L.D. Bourlier, J.M. Laine, Characterisation of gas-liquid two-phase flow inside capillaries, *Chemical Engineering Science,* Vol 54, No. 4, pp. 5723-5735, 1990.

[17] D.H. Zheng, D.F. Che,.Experimental study on hydrodynamic characteristics of upward gas-liquid slug flow, Mutiphase Flow, Vol. 32, No. 3, pp. 1191–1218, 2006.

[18] M.R. Ansari, Dynamical behavior of slug initiation generated by short waves in two-phase air–water stratified flow, *ASME HTD,* Vol. 361, No. 2, pp.289–295, 1998.

[19] P. Hanafizadeh, S. Ghanbarzadeh, M.H. Saidi, Visual technique for detection of gas–liquid two-phase flow regime in the airlift pump, *Petroleum Science and Engineering,* Vol. 75, No. 3, pp. 327–335, 2011.

[20] M.R. Ansari, B. Habibpour, E. Salimi, P. Adibi], Experimental study of gas-liquid two-phase flow in the consecutive inclinations of a large bend, *Modares Mechanical Engineering, in press article,* 2013. (In Persian).