

# مطالعه‌ی تجربی فرکانس حباب‌های تیلور در جریان دوفازی گاز-مایع در داخل یک زانویی بزرگ

محمدرضا انصاری\* (دانسیار)

بابک حبیب‌پور (دانشجوی کارشناسی ارشد)

ابراهیم سلیمی (دانشجوی کارشناسی ارشد)

دانشکده‌ی مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس

پویان ادیبی (استادیار)

دانشکده‌ی فنی و مهندسی، گروه مکانیک، دانشگاه هرمزگان

مهندسی مکانیک شریف، (پاییز ۱۳۹۴)  
دربی ۳ - ۳۱، شماره‌ی ۲، ص. ۷۹-۸۸

در تحقیق حاضر، الگوی جریان حباب‌های تیلور و فرکانس تشکیل آن‌ها در یک زانویی بزرگ متشکل از سه شیب متوالی بررسی شده است. بدین منظور، ابتدا نمودارهای جریان برای مقاطع مختلف مسیر ترسیم، و ضمن بیان روند تشکیل حباب‌ها، تأثیر دبی جریان فازها بر فرکانس آن‌ها مطالعه شده است. نتایج حاصله نشان می‌دهد که با توجه به عدم وقوع پدیده‌ی ادغام حباب‌ها، تغییرات شیب کانال در امتداد زانویی، تأثیری بر فرکانس حباب‌ها ندارد. در جریان‌هایی با  $Re_{sl} < 22000$  مقدار فرکانس حباب‌ها در طول زانویی و فرکانس اسلاگ در بالادست زانویی نزدیک بوده و افزایش دبی جریان مایع سبب کاهش فرکانس حباب‌ها می‌شود. این در حالی است که در جریان‌هایی با  $Re_{sl} > 22000$ ، عکس این موارد رخ می‌دهد. همچنین با توجه به نتایج، در هر دو ناحیه‌ی مذکور افزایش دبی جریان گاز، سبب کاهش فرکانس حباب‌ها می‌شود. در انتها نیز روابطی برای تعیین فرکانس حباب‌ها براساس اعداد رینولدز ظاهری فازها پیشنهاد شده است.

واژگان کلیدی: جریان دوفازی، فرکانس حباب، رژیم پلاگ، حباب‌های تیلور، کانال شیب‌دار.

## ۱. مقدمه

پروفیل فشار داخل کانال ایجاد کرده<sup>[۱]</sup> و سبب تشدید فرایندهای خوردگی و خستگی می‌شوند. همچنین چون این حباب‌ها مقدار قابل توجهی از سطح مقطع کانال را اشغال می‌کنند، پمپاژ و انتقال جریان حباب‌های تیلور همواره با مشکلاتی روبه‌رو است. لذا با توجه به اهمیت موضوع و کاربرد فراوان، تحقیقات زیادی در مورد نحوه‌ی رفتار حباب‌های تیلور تحت شرایط مختلف، انجام شده است. اما عمده مطالعات انجام شده تاکنون، مربوط به شکل و سرعت پیشروی حباب‌های تیلور بوده و فرکانس این حباب‌ها -- به‌عنوان یکی از پارامترهای بسیار مهم جریان پلاگ، به‌ویژه در کانال‌های شیب‌دار -- کم‌تر مورد توجه بوده است. مطالعه‌ی فرکانس حباب‌های تیلور در یک لوله‌ی افقی با قطر ۵۰ mm نشان داد (۲۰۰۷) که فرکانس حباب‌ها با افزایش سرعت ظاهری مایع به‌وضوح افزایش می‌یابد در حالی که این مورد وابستگی ضعیفی به سرعت ظاهری گاز دارد.<sup>[۵]</sup> بررسی فرکانس حباب‌های تیلور در داخل یک ریزکانال (۲۰۱۰) نشان داد که افزایش دبی فاز گاز سبب کاهش فرکانس حباب‌ها می‌شود.<sup>[۶]</sup> در همین راستا، روابطی براساس نسبت دبی‌های حجمی فازها، کسر تهی<sup>۴</sup> و عدد موئینگی<sup>۵</sup>، برای پیش‌بینی فرکانس حباب‌ها پیشنهاد شد.<sup>[۶]</sup> بررسی فرکانس حباب‌های هوا و اسلاگ در داخل کانال‌های افقی و نزدیک به افق، تا ۱۱ درجه، به ارائه‌ی یک رابطه‌ی تجربی با دقت ۶۰ درصد، براساس مدل فیزیکی

جریان هم‌زمان گاز و مایع در داخل کانال، بسته به شکل هندسی سطح مشترک دو فاز، در غالب الگوهای مختلف صورت می‌گیرد. در این میان یکی از محتمل‌ترین الگوها، که به‌ازای محدوده‌ی وسیعی از دبی جریان مایع مشاهده می‌شود، رژیم جریان پلاگ است. این رژیم به‌دلیل ماهیت متناوب و ناپایا، یکی از پیچیده‌ترین الگوهای جریان دوفازی است.<sup>[۱]</sup> و مشخصه‌ی بارز آن، حرکت حباب‌های بزرگ و کشیده‌ی از فاز گاز در میان محیط پیوسته‌ی از فاز مایع است. این رژیم که به رژیم حباب‌های تیلور<sup>۱</sup> نیز معروف است، در بسیاری از صنایع و کاربردهای مهندسی مانند استخراج و انتقال هیدروکربن‌ها، نیروگاه‌های زمین‌گرمایی، بویلرها و خنک‌کاری اضطراری راکتورهای هسته‌ی و شیمیایی مشاهده می‌شود.<sup>[۳][۲]</sup> در فرایندهای همراه با انتقال حرارت، حضور حباب‌های تیلور سبب بروز تغییرات قابل توجه در ضریب انتقال حرارت داخل کانال شده و باعث ایجاد شوک‌های حرارتی به دیواره‌ی لوله می‌شود. این مورد به‌عنوان یکی از عوامل اصلی سوختن<sup>۲</sup> لوله‌های بویلر در نیروگاه‌ها مطرح است. علاوه بر این، گردابه‌هایی<sup>۳</sup> که به‌واسطه‌ی جریان فیلم مایع از اطراف حباب‌های تیلور و در قسمت دنباله‌ی حباب شکل می‌گیرند، نوسانات شدیدی در

\* نویسنده مسئول

تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۹/۴، اصلاحیه ۱۳۹۳/۶/۱۰، پذیرش ۱۳۹۳/۶/۲۹

جریان آب با عبور از فیلترهای در نظر گرفته شده، تانک ۲ را تا ارتفاع معینی پر می‌کند. سپس پمپ ۲ آب این تانک را به تانک ۱ که در ارتفاع ۴ متری قرار دارد، پمپ می‌کند. ارتفاع آب در این تانک ثابت است؛ این مورد با سرریز آب اضافی به قسمت دوم تعبیه شده در این تانک، قبل از تخلیه به تانک شماره ۲ صورت می‌گیرد. تانک شماره ۱ هد مورد نیاز برای جریان آب داخل کانال را تأمین می‌کند. علاوه بر این، در صورت نیاز به هد بالاتر، پمپ ۱ مستقیماً وارد مدار می‌شود. مقدار دبی آب مورد نیاز نیز توسط شیر ۲۳ تنظیم شده و سپس دبی، فشار و دمای آب خروجی از تانک ۱ قبل از ورود به کانال اندازه‌گیری می‌شود.

هوای مورد نیاز برای جریان در داخل کانال، نیز توسط یک کمپرسور با توان ۴۵ کیلووات تأمین می‌شود. با مکش کمپرسور هوا از محیط آزمایشگاه با عبور از فیلتر هوا وارد مخزن هوا می‌شود. فشار هوای فشرده‌ی داخل مخزن، با خروج از مخزن توسط یک سیستم تنظیم‌کننده‌ی فشار، تا فشار اتمسفر کاهش می‌یابد. دمای هوا نیز در صورت لزوم قبل از ورود به کانال حاوی جریان دوفازی، توسط یک سیستم خنک‌کننده‌ی هوا به دمای محیط کاهش می‌یابد تا شرط تعادل دمایی بین دوفاز در طول 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. سیستم تأمین آب، فشار، دما و دبی جریان هوا در مسیر تانک هوا تا ورودی کانال جریان دوفازی، در نقاط مختلفی اندازه‌گیری می‌شود.

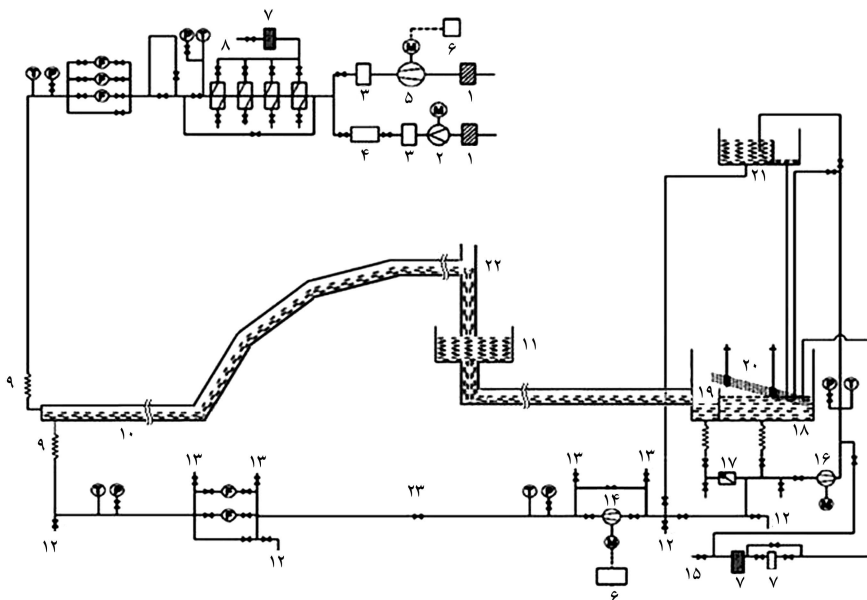
کانال حاوی جریان دوفازی آب - هوا از جنس پلکسی‌گلس شفاف با مقطع مستطیلی به ابعاد داخلی  $100 \times 50$  میلی‌متر مربع و به ضخامت ۱۰ میلی‌متر ساخته شده و امکان مشاهده‌ی بصری و ثبت جریان توسط دوربین را مهیا می‌سازد. طول این کانال در قسمت افقی قبل از مقاطع شیب‌دار ۱۵٫۲ متر و در قسمت افقی بعد از مقاطع شیب‌دار در حدود ۴٫۵ متر است. همچنین طول کانال در هریک از مقاطع شیب‌دار مورد مطالعه برابر ۱٫۳ متر در نظر گرفته شده است.

پیشنهادی تایتل و داکلر (۱۹۷۶) منتهی شد. [۷] مطالعه‌ی فرکانس‌های تیلور در لوله‌ی با قطر ۵۴ mm و تحت زوایای مختلف لوله (۲۰° تا ۶۰° درجه نسبت به افق) بیشینه می‌شود. [۱] بررسی جریان رو به بالای حباب‌های تیلور در لوله قائم (۱۹۹۷) نشان داد که در پیش‌بینی فرکانس حباب‌ها استفاده از رابطه‌ی پیشنهادی هیوود و ریچاردسون (۱۹۷۹) برای کانال افقی به نتایج مناسبی منجر می‌شود. [۱] از سوی دیگر مطالعه‌ی فرکانس حباب‌های تیلور در لوله‌های قائم و با قطر کم (۱۹۹۹) به این نتیجه انجامید که فرکانس حباب‌ها به صورت خطی با رینولدز مخلوط دوفازی تغییر می‌کند. [۱]

در تحقیق حاضر به مطالعه تجربی فرکانس حباب‌های تیلور در یک زانویی بزرگ متشکل از شیب‌های متوالی -- یکی از اشکال متداول در سیستم‌های لوله‌کشی صنعتی، مانند نیروگاه‌ها، بویلرهای بزرگ و همچنین خطوط انتقال نفت و گاز -- خواهیم پرداخت. بدین منظور، ابتدا نمودار جریان برای این زانویی و قسمت افقی بالادست آن توسعه می‌یابد تا محدوده‌ی مربوط به رژیم جریان حباب‌های تیلور مشخص شود، سپس با مطالعه‌ی تأثیر جریان بالادست و دبی هرکدام از فازها بر فرکانس حباب‌های تیلور، روابطی تجربی برای پیش‌بینی فرکانس این حباب‌ها، براساس اعداد رینولدز ظاهری  $Re_{app}$  جریان‌های مایع و گاز، پیشنهاد می‌شود.

## ۲. سیستم آزمایشگاهی

در شکل ۱ طرح‌واره‌ی سیستم آزمایشگاهی مورد استفاده نشان داده شده است. این سیستم شامل خط تأمین هوا، خط تأمین آب، کانال حاوی جریان دوفازی، مخلوط‌کننده یا ورودی آب و هوا و تجهیزات اندازه‌گیری است.



- ۱- فیلتر هوا ۲- کمپرسور ۳- تانک هوا ۴- تنظیم کننده فشار ۵- دمنده ۶- سیستم کنترل دمنده ۷- فیلتر آب ۸- سیستم خنک کاری هوا
- ۹- لوله‌های انعطاف پذیر ۱۰- خط کانال شفاف ۱۱- تانک ۱۲- درین ۱۳- ونت هواگیری ۱۴- پمپ ۱۵- آب شهری ۱۶- پمپ ۲
- ۱۷- شیر یکطرفه ۱۸- تانک ۱۹- صفحه کنترل سطح آب ۲۰- گیرنده اسلاگ ۲۱- تانک ۱ ۲۲- جداکننده آب و هوا
- ۲۳- جداکننده آب و هوا ۲۳- شیر تنظیم دبی آب P: فشار سنج T: ترمومتر F: فلومتر M: موتور الکتریکی

شکل ۱. طرح‌واره‌ی سیستم آزمایشگاهی.

### ۳. روش انجام آزمایش

در مطالعه‌ی 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 در فشار اتمسفریک و در دمای متوسط آزمایشگاه ۲۷ درجه سانتی‌گراد، انجام شده است. در تعیین نمودار جریان، ابتدا جریان آب با دبی معین در کانال برقرار شد و سپس، بعد از پر شدن کامل خط کانال و پایداری جریان آب، جریان هوا در کانال در گام‌های کوچکی تا مقدار بیشینه‌ی مورد نظر افزایش یافته و رژیم‌های مختلف ایجاد شده پس از رسیدن به حالت پایدار، از طریق مشاهده تعیین و توسط دوربین فیلم برداری ثبت شده است. در مرحله‌ی بعدی برای بررسی فرکانس حباب‌های تیور، مطالعات بر محدوده‌ی این رژیم جریان متمرکز شده و برای تعیین فرکانس، تعداد حباب‌های تیور که در مدت ۱۲۰ ثانیه از هریک از مقاطع شیب‌دار عبور کرده، در سه نوبت ثبت شده و نهایتاً متوسط این سه مقدار گزارش شده است. در مجموع حدود ۳۰۰ آزمایش برای تعیین نمودار جریان و ۱۸۰ آزمایش برای تعیین فرکانس حباب‌های تیور صورت گرفته است.

### ۴. نتایج و بحث

#### ۱.۴. نمودارهای جریان

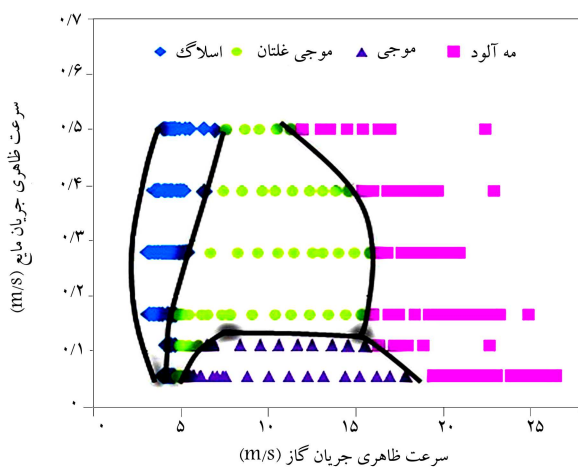
برای تهیه‌ی نمودارهای جریان دوفازی سیستم مورد نظر، رژیم‌های مشاهده شده روی مختصات دوعبده با محورهای مربوط به سرعت‌های ظاهری جریان‌های مایع و گاز طبقه‌بندی شده‌اند. خطوط رسم شده در این نمودارها نشان‌دهنده‌ی مرزهای گذر بین رژیم‌های مختلف است. شایان ذکر است که گذر از این خطوط به معنای تغییر سریع بین رژیم‌ها نیست بلکه تغییر در الگوها به تدریج اتفاق می‌افتد. شکل ۳ نمودار جریان مربوط به قسمت افقی بالادست مقاطع شیب‌دار را نشان می‌دهد.

با توجه به نمودار جریان، چهار نوع رژیم جریان در این قسمت از کانال مورد بررسی مشاهده شده است. در رژیم جریان موجی که تنها در سرعت‌های پایین جریان مایع مشاهده می‌شود، تنش وارده از جریان گاز بر سطح مایع سبب ایجاد ناپایداری‌هایی موجی‌شکل در سطح مشترک دو فاز می‌شود که ارتفاع این

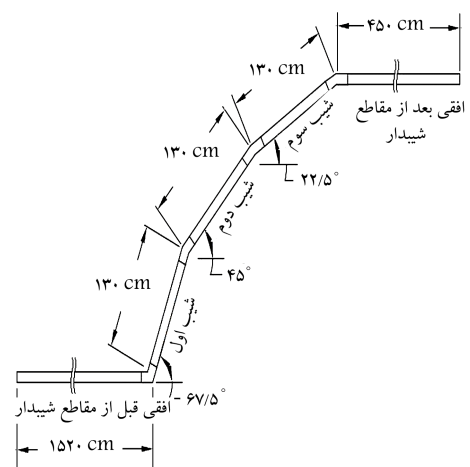
آب با گذر از کانال حاوی جریان دوفاز، وارد جداکننده شده، هوا به اتمسفر و آب به داخل تانک ۳ و از آنجا به تانک ۱ تخلیه می‌شود. یادآور می‌شود تانک ۳ با هدف آزادی عمل بیشتر در اجرای خط کانال در نظر گرفته شده است. شیب کانال اول با افق برابر  $67/5^\circ$ ، شیب کانال دوم  $45^\circ$  و شیب کانال سوم  $22/5^\circ$  است. در شکل ۲ نمای شماتیک کانال مورد بررسی نشان داده شده است. برای ایجاد شیب‌های مورد نظر از زانویی‌هایی با جنس پلکسی‌گلس استفاده شده است.

هوا و آب از طریق ورودی T شکل وارد خط کانال می‌شود، طوری که آب از پایین و هوا به صورت افقی وارد این قسمت می‌شوند. یک صفحه‌ی فلزی نازک نیز در ورودی قرار داده شده است. حضور این صفحه سبب ورود منظم‌تر جریان آب و هوا به خط کانال می‌شود و از اغتشاشات و ناپایداری‌هایی که بر 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 جریان کمک می‌کند. بررسی‌ها (۱۹۸۵) نشان داده که این نوع ورودی در مقایسه با انواع دیگر، پایداری بیشتری ایجاد می‌کند. [۱۲]

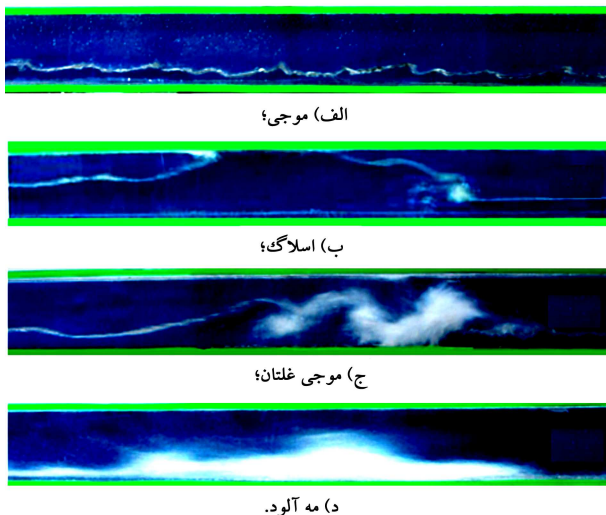
برای اندازه‌گیری دبی حجمی جریان آب از جریان‌سنج مغناطیسی با دقت  $\pm 0/1 \text{ m}^3/\text{hr}$  و برای جریان هوا از جریان‌سنج ورنکسی با دقت  $\pm 0/1 \text{ m}^3/\text{hr}$  استفاده شده است. بیشترین مقدار عدم قطعیت‌های اندازه‌گیری طبق استاندارد [۱۳] ANSI/ASME برای جریان‌سنجی آب و هوا به ترتیب  $\pm 5\%$  و  $\pm 7/251\%$  است. برای اندازه‌گیری دمای جریان آب و هوا، قبل از ورود به کانال حاوی جریان دوفازی از دماسنج‌هایی با دقت  $0/1^\circ$  مطابق با کاتالوگ شرکت سازنده -- و عدم قطعیت  $3\%$  استفاده شده است. همچنین فشارسنج‌های مورد استفاده در آزمایشگاه از نوع پیزوالکتریک با دقت  $1 \text{ mbar}$  و با بیشترین مقدار عدم قطعیت  $1/38\%$  است. برای ثبت تصاویر و فیلم‌برداری از رژیم‌های مختلف، از دوربین Canon، مدل PowerShot SX۲۲۰ HS و سرعت شاتر  $1/320^\circ \text{ s}$  استفاده شده که قابلیت فیلم‌برداری تا سرعت  $240 \text{ fps}$  و ثبت تصاویر با کیفیت  $12/1 \text{ Mp}$  را دارد. گفته می‌شود که ثبت جریان به وسیله‌ی دوربین در چهار محل متفاوت در طول مسیر صورت گرفته است: ناحیه‌ی بی به طول  $20 \text{ cm}$  در قسمت افقی قبل از مقاطع شیب‌دار و در فاصله‌ی  $32 \text{ cm}$  از پای شیب اول و همچنین در فاصله‌ی بین دو زانویی متوالی برای هریک از مقاطع شیب‌دار که ناحیه‌ی بی در حدود  $100 \text{ cm}$  است.



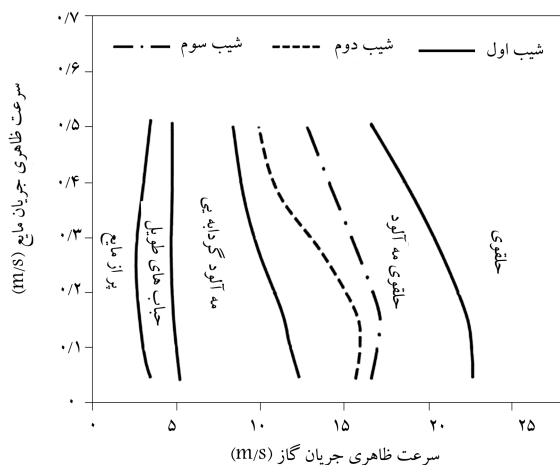
شکل ۳. نمودار جریان قسمت افقی بالادست.



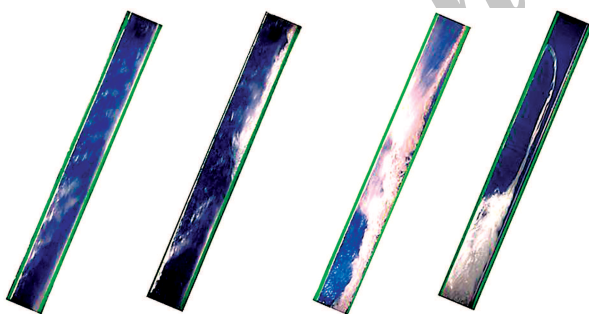
شکل ۲. قسمت‌های مختلف خط کانال مورد آزمایش.



شکل ۴. رژیم‌های جریان قسمت افقی بالادست.



شکل ۵. نمودار جریان مربوط به مقاطع شیب‌دار.



الف) حباب‌های تیلور؛ ب) مه‌آلود گردابه‌ی؛ ج) حلقوی مه‌آلود؛ د) حلقوی.

شکل ۶. رژیم‌های جریان مربوط به مقاطع شیب‌دار.

حلقوی تنها برای شیب اول مشاهده می‌شود. مورد قابل توجه دیگر، ناحیه‌ی مربوط به رژیم جریان حباب‌های تیور است. چنان‌که مشاهده می‌شود، محدوده‌ی مربوط به این ناحیه بدون تأثیر از تغییرات شیب کانال، برای هر سه مقطع شیب‌دار کاملاً بر هم منطبق است. در واقع می‌توان گفت که در تمام دبی‌های مورد مطالعه، حباب تیوری که در شیب اول تشکیل می‌شود، از هر دو شیب بعدی عبور می‌کند و رژیم

ناپایداری‌ها به دیواره‌ی بالایی کانال نمی‌رسد. در رژیم جریان اسلاگ<sup>۷</sup> که ماهیتاً متناوب است یکی از ناپایداری‌های سطح مشترک دوفاز رشد کرده و به دیواره‌ی بالایی کانال می‌رسد و مسیر عبور گاز را مسدود می‌کند، افزایش فشار گاز در پشت اسلاگ ایجاد شده سبب حرکت سریع این لخته‌ی مایع در راستای جریان می‌شود. رژیم جریان موجی غلتان<sup>۸</sup> نیز همانند جریان اسلاگ ماهیتاً متناوب است و به واسطه‌ی رشد ناپایداری‌های فصل مشترک ایجاد می‌شود. با این تفاوت که به دلیل فشار بالاتر خط کانال، ناشی از بالا بودن سرعت جریان گاز، ناپایداری‌ها توان رشد زیاد و بستن کامل سطح مقطع کانال را نداشته و به صورت توده‌های غلتان در راستای جریان حرکت می‌کنند. در سرعت‌های بسیار بالای جریان گاز، فاز مایع به صورت توده‌های مه‌آلودی در کف کانال جریان داشته و قطرات زیادی از سطح این توده جدا شده و به داخل محیط پیوسته‌ی فاز گاز اسپری می‌شود؛ این نوع جریان با عنوان رژیم مه‌آلود<sup>۹</sup> در نمودار مشخص شده است. در شکل ۴ تصاویر مربوط به رژیم‌های جریان قسمت افقی بالادست مقاطع شیب‌دار نشان داده شده است.

در مقاطع شیب‌دار، همواره برگشت قسمتی از فاز مایع به واسطه‌ی تأثیر نیروی گرانش سبب تداخل و برهمکنش بیشتر دوفاز با یکدیگر شده و موجب تغییر نوع الگوهای جریان نسبت به قسمت افقی کانال می‌شود. در شکل ۵ نمودارهای جریان مربوط به شیب‌های اول، دوم و سوم با یکدیگر مقایسه شده‌اند.

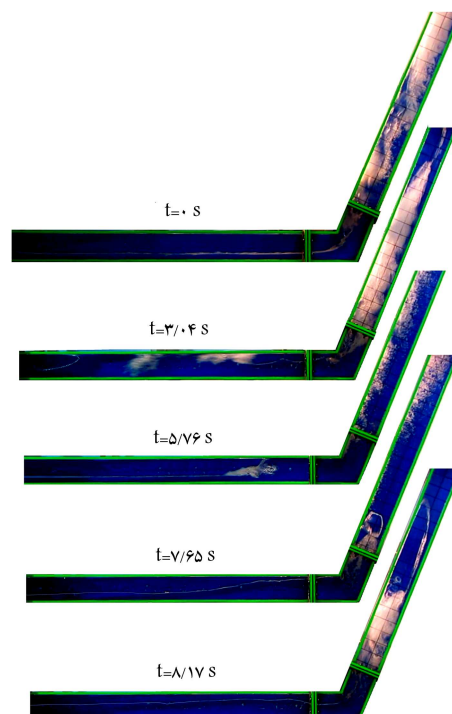
چنان‌که مشاهده می‌شود، جریان دوفازی در مقاطع شیب‌دار در غالب چهار الگوی جریان صورت می‌گیرد. در رژیم جریان حباب‌های تیور که در سرعت‌های پایین جریان گاز مشاهده می‌شود، فاز گاز به صورت متناوب در قالب حباب‌های بزرگ گلوله‌ی شکل با قطری تقریباً برابر با عرض کانال و در میان محیط پیوسته‌ی مایع صعود می‌کنند. این حباب‌ها در مقاطع شیب‌دار در تماس با دیواره‌ی بالایی کانال حرکت کرده و توسط فیلمی از مایع از دیواره‌ی پایینی کانال جدا می‌شوند. در رژیم جریان مه‌آلود گردابه‌ی<sup>۱۰</sup> مقداری از مایع به دلیل اندازه حرکت پایین و تأثیر نیروی گرانش، به سمت پایین برگشته و در برخورد با جریان گاز گردابه‌هایی تشکیل می‌دهد که عمدتاً حاوی حباب‌های ریزی در بدنه خود هستند 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 دبی‌های بسیار بالای جریان گاز، فاز مایع به صورت فیلمی روی دیواره‌ی لوله و فاز گاز مرکز کانال جریان می‌یابد و بدین ترتیب رژیم جریان حلقوی<sup>۱۱</sup> تشکیل می‌شود. به دلیل اختلاف سرعت بالای دو فاز قطراتی از مایع ممکن است وارد هسته‌ی گازی شوند. در رژیم جریان حلقوی مه‌آلود<sup>۱۲</sup> که در دبی‌های پایین‌تر جریان گاز نسبت به جریان حلقوی ایجاد می‌شود، فاز مایع به صورت توده‌ی 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. در شکل ۶ رژیم‌های جریان دوفازی مربوط به مقاطع شیب‌دار را نشان می‌دهد.

مطابق نمودار جریان شکل ۵، مرزگذار از رژیم جریان مه‌آلود گردابه‌ی به جریان حلقوی مه‌آلود، در طول مسیر و با کاهش شیب کانال به سمت سرعت‌های بالاتر جریان گاز جابه‌جا می‌شود. در واقع افت بیشتر اندازه حرکت 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 به واسطه‌ی نیروی گرانش تمایل به برگشت به سوی پایین دارد، سبب گسترش ناحیه‌ی مربوط به رژیم جریان مه‌آلود گردابه‌ی نسبت به شیب قبلی می‌شود. همچنین به دلیل مشابه، در محدوده‌ی جریان مورد مطالعه، انتقال از رژیم جریان حلقوی مه‌آلود به جریان

حبابی تیلور بر آن‌ها نیز حاکم است. جزئیات بیشتر مربوط به الگوها و نمودارهای جریان سیستم مورد مطالعه در پژوهش‌های انجام شده ارائه شده است.<sup>[۱۴]</sup>

## ۲.۴. سازوکار 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 می‌شود، نوع رژیم جریان در قسمت افقی بالادست است. با توجه به نمودار شکل‌های ۳ و ۵ 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 بزرگ (لخته‌هایی از مایع با طول تقریبی بیش از ۲ متر) به پای شیب اول، مقطع کانال در قسمت‌های شیب‌دار و محل ورودی آن به‌طور کامل از آب پر شده و جریان گاز مسدود می‌شود. با تجمع گاز در پشت سد مایع و افزایش فشار، فاز گاز با ایجاد حباب بزرگ گلوله‌یی شکلی از میان مایع جریان می‌یابد. با هر بار عبور یک حباب تیلور، جریان کف‌آلود و معشوشی به‌واسطه‌ی گردابه‌های ایجاد شده در پشت حباب برقرار می‌شود تا این که شیب‌ها دوباره توسط اسلاگ جدیدی پر از مایع شده و حباب جدیدی تشکیل شود. با افزایش دبی جریان گاز و کوچک شدن اسلاگ‌ها در قسمت افقی، یا تبدیل آن‌ها به موج‌های غلتان، حجم مایع رسیده به پای شیب اول کم خواهد بود. لذا فرصت لازم برای پر شدن کامل مقطع کانال وجود نداشته و این حجم مایع به‌صورت توده‌های کف‌آلودی به سمت پایین دست زانویی منتقل می‌شود. به همین دلیل ناحیه‌ی مربوط به رژیم جریان حباب‌های تیلور به دبی‌های بالای جریان گاز گسترش نمی‌یابد. شکل ۷ روند تشکیل حباب‌های تیلور را در شیب اول از کانال مورد بررسی نشان می‌دهد. گفتنی است طبق بررسی‌های انجام شده تاکنون، چنین روند تشکیلی برای حباب‌های تیلور، در پیشینه پژوهش مورد توجه قرار نگرفته است.



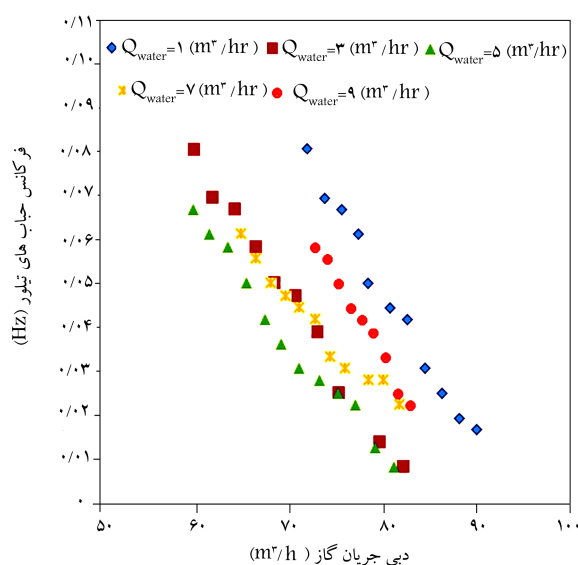
شکل ۷. روند شکل‌گیری حباب‌های تیلور در شیب اول (زمان صفر مربوط به لحظه‌ی تشکیل اسلاگ نزدیک مقطع ورودی است).

## ۵. فرکانس حباب‌های تیلور

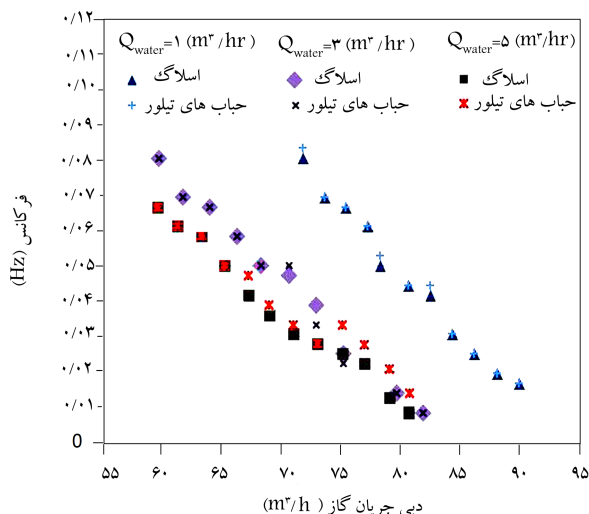
فرکانس حباب‌های تیلور در هر مقطع خاص، عبارت است از تعداد حباب‌هایی که در یک دوره‌ی زمانی معین، از مقطع مورد نظر در امتداد کانال عبور می‌کنند.<sup>[۱۵]</sup> در شکل ۸ نحوه‌ی تغییرات فرکانس حباب‌های تیلور در سیستم مورد آزمایش و به‌ازای دبی‌های مختلف جریان‌های مایع و گاز نشان داده شده است. گفتنی است طبق مشاهدات صورت گرفته در تحقیق حاضر، تمامی حباب‌های تیلور شکل‌گرفته در شیب اول، بدون ازهم پاشیدن از دو شیب بعدی نیز عبور می‌کنند. علاوه بر این، در مقاطع شیب‌دار و به‌ازای تمام دبی‌های مورد مطالعه، پدیده‌ی ادغام<sup>۱۳</sup> حباب‌های تیلور با یکدیگر رخ نمی‌دهد. لذا می‌توان گفت که تغییرات شیب کانال در طول مسیر، تأثیری بر فرکانس حباب‌های تیلور نداشته و مقادیر ارائه شده در شکل ۸ مربوط به کل طول زانویی مورد نظر است.

با توجه به شکل ۸ مشاهده می‌شود که فرکانس حباب‌های تیلور، به‌ازای تمام دبی‌های مایع مورد آزمایش، با افزایش دبی جریان گاز، کاهش می‌یابد. در واقع در دبی‌های بالای جریان گاز، عمده‌ی ناپایداری‌های شکل‌گرفته در قسمت افقی بالادست و در سطح مشترک دوفاز، 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 دبی جریان گاز فرکانس حباب‌های تیلور کاهش می‌یابد.

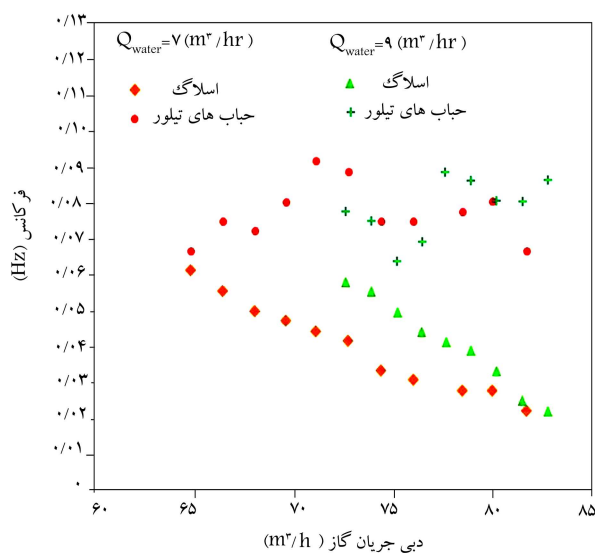
مورد بعدی از نمودار شکل ۸، تغییرات فرکانس حباب‌های تیلور با دبی جریان مایع است. همانطوری که مشاهده می‌شود روند این تغییرات به‌صورت یک‌نواخت نبوده و در جریان‌هایی با عدد رینولدز ظاهری مایع<sup>۱۴</sup> کم‌تر از ۲۲۰۰۰ (جریان‌هایی با دبی مایع کم‌تر از ۵ مترمکعب بر ساعت)، افزایش دبی جریان مایع سبب کاهش فرکانس حباب‌های تیلور می‌شود، در حالی که در جریان‌هایی که عدد رینولدز ظاهری مایع بیشتر از ۲۲۰۰۰ است، با افزایش دبی جریان مایع، فرکانس حباب‌ها نیز افزایش می‌یابد. شایان ذکر است که برای محاسبه‌ی عدد رینولدز ظاهری مایع از روابط ۱ تا ۳ استفاده شده است.



شکل ۸. تغییرات فرکانس حباب‌های تیلور با دبی فازها.



شکل ۱۰. مقایسه‌ی فرکانس اسلاگ در بالادست زانویی با فرکانس حباب‌های تیور در محل زانویی به‌ازای  $Re_{sl} < 22000$ .



شکل ۱۱. مقایسه‌ی فرکانس اسلاگ در بالادست زانویی با فرکانس حباب‌های تیور در محل زانویی به‌ازای  $Re_{sl} > 22000$ .

در انتهای قسمت افقی می‌شود. این اسلاگ‌ها با توجه به محل تشکیل‌شان، حجم کمی از مایع را به سمت زانویی منتقل می‌کنند و لذا، توان پرکردن کامل مقطع کانال و تشکیل حباب‌های تیور را ندارند. به‌همین دلیل تنها تعداد معدودی از اسلاگ‌های رسیده به قسمت‌های شیب‌دار، که عمدتاً در نزدیک محل ورودی کانال و پس از پرش هیدرولیکی مذکور شکل گرفته‌اند، منجر به تشکیل حباب‌های تیور می‌شوند. علاوه بر این در دبی‌های بالای جریان گاز به‌واسطه‌ی ایجاد فشار بزرگ‌تر پشت لخته‌ی مایع، اندازه‌حرکت اسلاگ‌های حمل‌شده توسط جریان گاز بالاست؛ به‌همین دلیل تعداد زیادی از این اسلاگ‌ها با رسیدن به مقاطع شیب‌دار، به‌راحتی از این شیب‌ها به‌صورت توده‌های کف‌آلودی عبور می‌کنند و فرصت لازم برای پرشدن مقطع کانال و تشکیل حباب‌های تیور فراهم نمی‌شود؛ لذا با افزایش دبی جریان گاز تفاوت زیادی در فرکانس اسلاگ‌ها و حباب‌های تیور مشاهده می‌شود.

$$u_{sl} = \alpha_l u_l \quad (1)$$

$$D_{hl} = \frac{4A_l}{S_l} \quad (2)$$

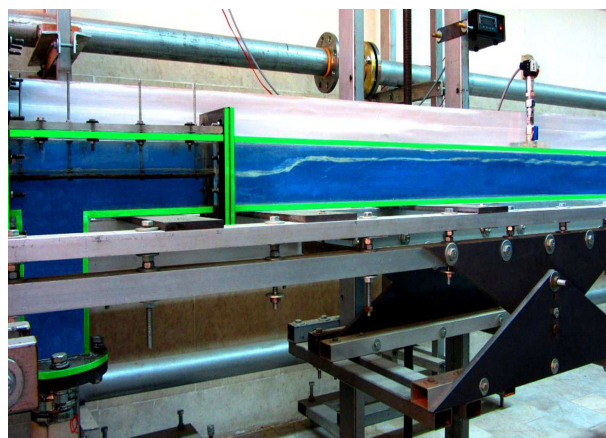
$$Re_{sl} = \frac{\rho_l D_{hl} |u_{sl}|}{\mu_l} \quad (3)$$

چنان‌که پیش‌تر نیز مطرح شد، تشکیل حباب‌های تیور در مقاطع شیب‌دار وابسته به اسلاگ‌هایی است که در قسمت افقی بالادست ایجاد می‌شود. از آنجا که سازوکار تشکیل این اسلاگ‌ها عمدتاً از معیار ناپایداری کولین - هلمهولتز<sup>۱۵</sup> پیروی می‌کند،<sup>[۱۶]</sup> با افزایش دبی جریان مایع اختلاف سرعت بین دوفاز کم‌تر شده و طبق معیار ناپایداری کولین - هلمهولتز، امکان تشکیل اسلاگ کم‌تر می‌شود. لذا با کاهش فرکانس اسلاگ، فرکانس حباب‌های تیور نیز کاهش می‌یابد.

افزایش سرعت جریان آب ورودی با بیشتر شدن دبی جریان مایع، سبب ایجاد پرش هیدرولیکی<sup>۱۶</sup> در محل ورودی آب به کانال حاوی جریان دوفاز می‌شود. تصویر مربوط به این پرش هیدرولیکی در شکل ۹ ارائه شده است.

وقوع این پرش هیدرولیکی در محل ورود مایع به داخل کانال از یک سو سبب افزایش کسر حجمی مایع در طول 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 می‌دهند؛ لذا فرکانس اسلاگ و به تبع آن فرکانس حباب‌های تیور افزایش می‌یابد. در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ مقایسه‌ی بین فرکانس اسلاگ در قسمت افقی بالادست مقاطع شیب‌دار و فرکانس بلاگ در محل زانویی، به‌ترتیب برای  $Re_{sl} > 22000$  و  $Re_{sl} < 22000$  ارائه شده است.

چنان‌که در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود، برای جریان‌هایی با  $Re_{sl} < 22000$ ، تناظر بسیار نزدیکی بین فرکانس اسلاگ‌های قسمت افقی بالادست زانویی و فرکانس حباب‌های تیور در محل زانویی است. به عبارت دیگر می‌توان گفت که درصد بسیار بالایی از اسلاگ‌های رسیده به پای شیب اول مقطع کانال را در طول زانویی پرکرده و به‌واسطه‌ی آن حباب‌های تیور تشکیل شود. با این حال برای جریان‌هایی با  $Re_{sl} > 22000$  (شکل ۱۱)، تفاوت قابل ملاحظه‌ی بین فرکانس اسلاگ و حباب‌های تیور، به‌خصوص در دبی‌های بالای جریان گاز مشاهده می‌شود. در واقع با افزایش دبی جریان مایع همواره مقدار مایعی که در اثر نیروی گرانش در امتداد زانویی به سمت پایین برمی‌گردد، افزایش می‌یابد. این مورد سبب ایجاد ناهماری‌هایی در سطح مشترک دوفاز شده و منشاء ایجاد اسلاگ در پای زانویی مورد مطالعه

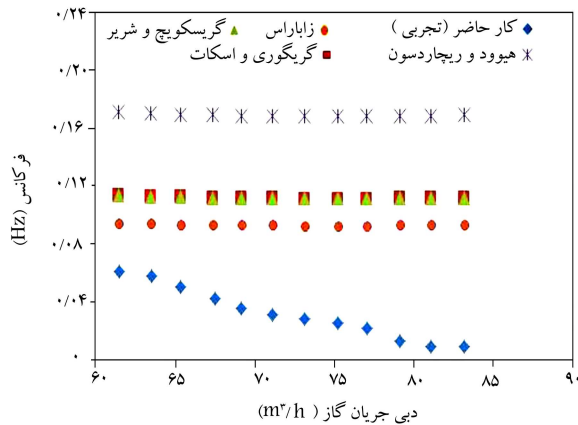


شکل ۹. وقوع پرش هیدرولیکی در محل ورودی کانال.

## ۶. پیش‌بینی فرکانس حباب‌های تیلور

در مطالعه‌ی حاضر برای پیش‌بینی فرکانس حباب‌های تیلور در محدوده‌ی  $Re_{sl} < 22000$ ، با توجه به سازوکار تشکیل این حباب‌ها و تناظر نزدیک بین فرکانس حباب‌ها در محل زانویی و فرکانس اسلاگ در قسمت افقی بالادست، روابط موجود در پیشینه‌ی پژوهش برای پیش‌بینی فرکانس اسلاگ در کانال‌های افقی مورد استفاده قرار گرفته است. بدین منظور نتایج حاصل از روابط تجربی ارائه شده توسط محققین [۱۸، ۱۷، ۱۶] و نیز نتایج تجربی مطالعه‌ی حاضر در شکل‌های ۱۲ تا ۱۴ نمودارها برای دبی‌های جریان مایع ۱، ۳ و ۵ متر مکعب بر ساعت، مقایسه شده است.

با توجه به نمودارهای شکل‌های ۱۲ تا ۱۴ مشاهده می‌شود که مقدار فرکانس محاسبه شده از روابط تجربی ارائه شده در پیشینه‌ی پژوهش حساسیت بسیار پایینی به تغییرات دبی جریان گاز نشان می‌دهد در حالی که این مقدار مشخصاً وابسته به دبی جریان مایع بوده و افزایش دبی جریان مایع سبب افزایش فرکانس اسلاگ در کانال افقی شده است. این موارد در پژوهشی دیگر (۲۰۰۷) نیز مورد تحقیق و تأیید قرار گرفت. [۵] با این وجود مطابق نتایج حاصل از تحقیق حاضر، فرکانس اسلاگ در قسمت افقی و به تبع آن فرکانس حباب‌های تیلور در محل زانویی شدیداً وابسته



شکل ۱۱. مقایسه‌ی فرکانس حباب‌های تیلور در مطالعه‌ی حاضر با روابط دیگران برای  $Q_w = 5 \text{ m}^3/\text{hr}$ .

به دبی جریان گاز بوده و شیب تغییرات فرکانس با دبی گاز زیاد است؛ همچنین در محدوده‌ی مطالعه‌ی  $Re_{sl} < 22000$ ، تغییرات فرکانس حباب‌های تیلور با دبی جریان مایع نسبت عکس دارد، به طوری که افزایش دبی جریان مایع سبب کاهش فرکانس اسلاگ و حباب‌های تیلور شده است. این تفاوت‌ها بین نتایج مطالعه‌ی حاضر و نتایج پیشین می‌تواند ناشی از شکل هندسی متفاوت خط کانال در محل پایین دست قسمت افقی، به واسطه‌ی حضور زانویی در تحقیق حاضر باشد. وجود این زانویی در امتداد مسیر افقی و رژیم جریان حاکم بر آن سبب تغییرات متناوب پروفیل فشار داخل کانال -- عامل بسیار تأثیرگذار در شکل‌گیری رژیم اسلاگ [۱۹] -- در قسمت افقی شده در حالی که در تحقیقات انجام شده در مورد کانال‌های سرتاسر افقی، عمدتاً فازهای جاری در انتهای مسیر افقی به محیطی با فشار ثابت و اتمسفریک تخلیه می‌شود.

با توجه به این که روابط موجود در پیشینه‌ی مطالعه قابلیت تعیین مناسب مقدار فرکانس اسلاگ یا حباب‌های تیلور را در سیستم مورد مطالعه‌ی حاضر ندارند، در این تحقیق روابط تجربی برای محاسبه‌ی این مورد ارائه می‌شود. برای این منظور، طبق داده‌های حاصل از آزمایش و مشابه مطالعات محققین [۲۰] با استفاده از کمیت فیزیکی بی‌بعد رینولدز ظاهری فازها و بهره‌گیری از روش آماری حداقل مربعات روابط ۴ و ۵ به ترتیب برای محدوده‌های جریان مورد مطالعه‌ی  $Re_{sl} < 22000$  و  $Re_{sl} > 22000$  و برای پیش‌بینی مقدار فرکانس حباب‌های تیلور در محل زانویی پیشنهاد می‌شود. در این روابط، برای بی‌بعدسازی مقدار فرکانس، از عدد اشتروال  $St$ ، بر مبنای سرعت رانشی حباب‌های تیلور ( $u_d$ ) در میانه‌ی زانویی (شیب دوم)، و قطر هیدرولیکی کانال ( $D_h$ ) استفاده شده است:

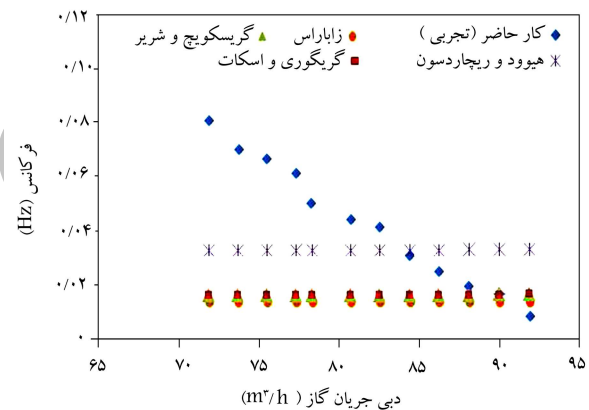
$$Re_{sl} < 22000 : St = \frac{f \cdot D_h}{u_d} = 2.1 \times 10^{-25} Re_{sg}^{-0.88} Re_{sl}^{-1.04} \quad (4)$$

$$Re_{sl} > 22000 : St = \frac{f \cdot D_h}{u_d} = 6.9 \times 10^{-4} Re_{sg}^{-2.19} Re_{sl}^{1.19} \quad (5)$$

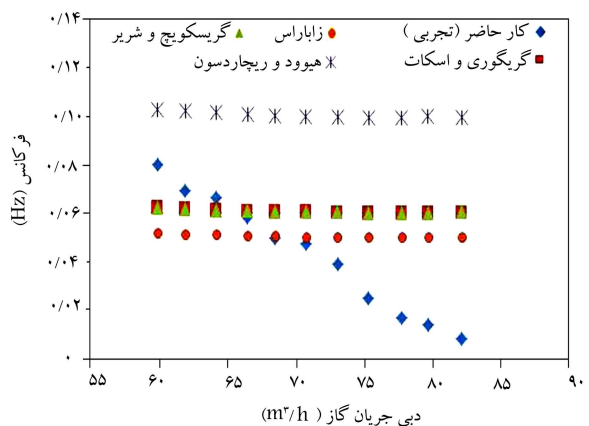
و در آن سرعت رانشی حباب‌های تیلور ( $u_d$ ) از برون‌یابی مقدار داده‌های سرعت حباب تیلور حاصل از آزمایش، در شیب دوم (شکل ۱۵) و با استفاده از مدل پرکاربرد فلاکس رانشی [۱۸] (رابطه‌ی ۶) به دست آمده است:

$$u_{Tb} = cu_m + u_d \quad (6)$$

$$u_m = u_{sl} + u_{sg} \quad (7)$$



شکل ۱۲. مقایسه‌ی فرکانس حباب‌های تیلور در مطالعه‌ی حاضر با روابط دیگران برای  $Q_w = 1 \text{ m}^3/\text{hr}$ .



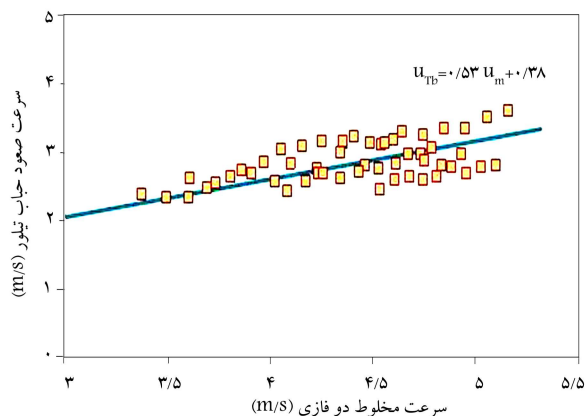
شکل ۱۳. مقایسه‌ی فرکانس حباب‌های تیلور در مطالعه‌ی حاضر با روابط دیگران برای  $Q_w = 3 \text{ m}^3/\text{hr}$ .

فرکانس حباب‌های تی‌لور به دبی جریان گاز مستقیماً لحاظ می‌شود. در حالی که تأثیر دبی جریان گاز در روابطی که پیش‌تر مورد مقایسه قرار گرفت در قالب سرعت متوسط دوفازی (مجموع سرعت‌های ظاهری دوفازی) لحاظ شده بودند و مطابق شکل‌های ۱۲ تا ۱۴، این مورد تغییرات اندک مقدار فرکانس حباب‌های تی‌لور را با دبی جریان گاز نتیجه می‌دهد.

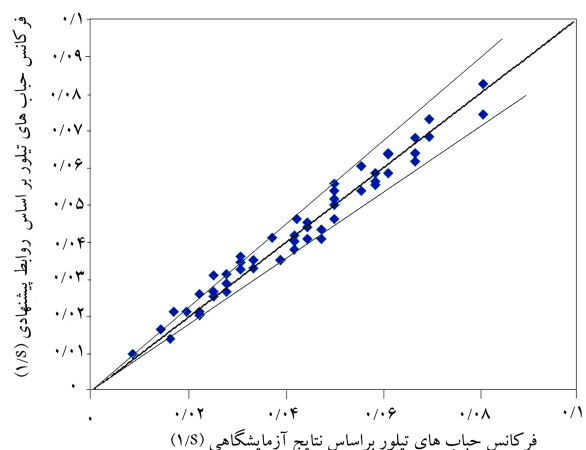
## ۷. نتیجه‌گیری

در نوشتار حاضر، فرکانس حباب‌های تی‌لور در یک زانویی بزرگ بطور تجربی مطالعه شد. برای این منظور ابتدا نمودار جریان براساس دبی حجمی فازها برای زانویی و مقطع افقی بالادست آن ترسیم شد تا ناحیه‌ی مربوط به این رژیم جریان و سازوکار تشکیل حباب‌ها توسط نوع رژیم جریان بالادست زانویی تعیین شود. سپس تأثیر دبی جریان‌های مایع و گاز و همچنین فرکانس اسلاگ در قسمت افقی بالادست بر روی فرکانس حباب‌های تی‌لور در محل زانویی مورد مطالعه قرار گرفت و در نهایت با بررسی روابط تجربی موجود در پیشینه‌ی پژوهش، روابط تجربی برای محاسبه‌ی فرکانس حباب‌های تی‌لور براساس اعداد رینولدز ظاهری فازها پیشنهاد شد. عمده نتایج به دست آمده از آزمایش به شرح زیر است:

- ناحیه‌ی مربوط به رژیم جریان حبابی طولی بدون تأثیر از تغییرات شیب کانال، برای هر سه مقطع شیب دار کاملاً بر هم منطبق است.
- ناحیه‌ی مربوط به رژیم جریان حباب‌های تی‌لور در سرعت‌های ظاهری گاز کم‌تر از ۵ متر بر ثانیه و هم‌زمان با رژیم اسلاگ در قسمت افقی بالادست زانویی رخ می‌دهد؛ در واقع سازوکار تشکیل حباب‌های تی‌لور بر پایه‌ی اسلاگ‌های رسیده به پای زانویی است.
- با توجه به عدم مشاهده‌ی پدیده‌ی ادغام حباب‌ها با یکدیگر و همچنین از هم پاشیدن حباب‌ها در طول زانویی، تغییرات شیب کانال تأثیری بر فرکانس حباب‌های تی‌لور ندارد و حباب تشکیل شده در شیب اول از هر سه شیب بعدی عبور می‌کند.
- در تمام محدوده‌ی دبی‌های مایع مورد آزمایش (۱ تا ۹ متر مکعب بر ساعت)، افزایش دبی جریان گاز سبب کاهش فرکانس حباب‌های تی‌لور می‌شود.
- روند تغییرات فرکانس حباب‌های تی‌لور با دبی جریان مایع یکسان نیست و در جریان‌هایی با  $Re_{sl} < 22000$ ، افزایش دبی (در محدوده‌ی ۱ تا ۵ متر مکعب بر ساعت) سبب کاهش فرکانس حباب‌های تی‌لور می‌شود در حالی که جریان‌هایی با  $Re_{sl} > 22000$ ، فرکانس حباب‌ها با افزایش دبی جریان مایع (در محدوده‌ی جریان ۵ تا ۹ متر مکعب بر ساعت)، افزایش می‌یابد.
- برای جریان‌هایی با  $Re_{sl} < 22000$ ، تناظر نزدیکی بین فرکانس حباب‌ها در محل زانویی و فرکانس اسلاگ در مقطع افقی بالادست وجود دارد در حالی که در جریان‌هایی رینولدز ظاهری مایع بزرگ‌تر از مقدار بحرانی  $22000$ ، تفاوت قابل توجهی بین فرکانس حباب‌های تی‌لور و اسلاگ مشاهده می‌شود.



شکل ۱۵. سرعت صعود حباب‌های تی‌لور با مدل فلاکس رانشی در شیب دوم.



شکل ۱۶. مقایسه‌ی فرکانس حباب‌های تی‌لور با نتایج تجربی و روابط پیشنهادی با شیب خطی ۰٫۹۱.

که در آن  $u_m$  سرعت مخلوط دوفازی و  $c$  ضریب ثابت است که مقدار آن با توجه به نتایج تجربی مطالعه‌ی حاضر  $0.38$  است.

همچنین در روابط پیشنهادی برای محاسبه‌ی عدد رینولدز ظاهری فاز مایع از رابطه‌ی ۳ و برای فاز گاز از رابطه‌ی ۱۰ استفاده شده است.

$$u_{sg} = \alpha_g u_g \quad (8)$$

$$D_{hg} = \frac{4A_g}{S_g + S_i} \quad (9)$$

$$Re_{sg} = \frac{\rho_g D_{hg} |u_{sg}|}{\mu_g} \quad (10)$$

گفتنی است برای اندازه‌گیری سرعت صعود حباب در هر نقطه از آزمایش، مدت زمان جابه‌جایی نوک حباب تی‌لور بین ابتدا و انتهای شیب دوم در  $10^\circ$  نوبت متوالی و با استفاده از فیلم‌های گرفته شده، ثبت و مقدار میانگین گزارش شده است.

برای ارزیابی روابط ارائه شده، مقدار فرکانس پیش‌بینی شده توسط این رابطه به‌همراه داده‌های تجربی حاصل از آزمایش در شکل ۱۶ ارائه شده است.

چنان‌که مشاهده می‌شود روابط پیشنهادی مقدار فرکانس حباب‌های تی‌لور را با دقت نسبتاً مناسبی در هر دو محدوده‌ی مورد مطالعه پیش‌بینی می‌کند. در این روابط با در نظر گرفتن کمیت مستقل رینولدز ظاهری فاز گاز، حساسیت بالای مقدار



$u_{Tb}$ : سرعت صعود حباب (m/s).

### علائم یونانی

$\mu$ : ویسکوزیته دینامیکی (kg/m.s)؛

$\rho$ : چگالی (kg/m<sup>3</sup>)؛

$\alpha_g$ : کسر حجمی گاز (کسر تهی)؛

$\alpha_l$ : کسر حجمی مایع.

### زیرنویس

$g$ : گاز؛

$l$ : مایع؛

$i$ : سطح مشترک.

### فهرست علائم

$A$ : سطح مقطع (m<sup>2</sup>)؛

$D_h$ : قطر هیدرولیکی (m)؛

$f$ : فرکانس (1/s)؛

$Q$ : دبی حجمی جریان (m<sup>3</sup>/s)؛

$Re_s$ : عدد رینولدز ظاهری؛

$S$ : طول تماس (m)؛

$u$ : سرعت واقعی (m/s)؛

$u_s$ : سرعت ظاهری (m/s)؛

$u_d$ : سرعت رانشی حباب تیلور (m/s)؛

$u_m$ : سرعت مخلوط دوفازی (m/s)؛

### پانویسها

1. Taylor bubbles
2. burn out
3. wakes
4. void Fraction
5. capillary number
6. superficial Reynolds number
7. Slug
8. rollwave
9. misty
10. vortex misty
11. annular
12. misty annular
13. merging
14. liquid superficial Reynolds number
15. Kelvin-Helmholtz
16. hydraulic jump
17. Strouhal number
18. drift Flux method

### منابع (References)

1. van Hout, R., Shemer, L. and Barnea, D. "Evolution of hydrodynamic and statistical parameters of gas-liquid slug along inclined pipes", *Chemical Engineering Science*, **58**, pp. 115-133 (2008).
2. Taha, T. and Cui, Z.F. "CFD modeling of slug flow in vertical tubes", *Chemical Engineering Science*, **61**, pp. 676-687 (2006).
3. Mayor, T.S., Pinto, A.M.F.R. and Campos, J.B.L.M. "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*, **63**, pp. 3614-3631 (2008).
4. Liu, Y.P., Yang, P., Jing Wang, W. and Du, Z. "Investigation of Taylor bubble wake structure in liquid nitrogen by PIV Technique", *Cryogenics*, **56**, pp. 20-29 (2013).
5. Wang, X., Guo, L. and Zhang, X. "An experimental study of the statistical parameters of gas-liquid two-phase slug flow in horizontal pipeline", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **50**, pp. 2439-2443 (2007).
6. Quan, X., Chen, G. and Cheng, P. "Periodic generation and transport of micro air bubble in co-flowing of water in microchannels", *International Communications in Heat and Mass Transfer*, **37**, pp. 992-997 (2010)
7. Zabararas, G.J. "Prediction of slug frequency for gas/ liquid flows", *SPE Journal*, **5**, pp. 252-258 (2000)
8. Taitel, Y., Bornea, D. and Dukler, A.E. "Modelling flow pattern transitions for steady upward gas-liquid flow in vertical tubes", *AIChE J.*, **26**, pp. 345-354 (1980)
9. Legius, H.J.W.M., van den Akker, H.E.A. and Narumo, T. "Measurements on wave propagation and bubble and slug velocities in cocurrent upward two-phase flow", *Exp. Thermal Fluid Sci.*, **15**, pp. 267-278 (1997)
10. Heywood, N.I. and Richardson, J.F. "Slug flow of air-water mixtures in a horizontal pipe: Determination of liquid holdup by gamma-ray absorption", *Chem. Eng. Sci.*, **34**, pp. 17-30 (1979)
11. Laborie, S., Cabassud, C., Durand-Bourlier, L. and Laine, J.M. "Characterisation of gas-liquid two-phase flow inside capillaries", Laboratoire d'Ingénierie des Procédés de l'Environnement, Département G.P.I - 31077 Toulouse Cédex, Institut National des Sciences Appliquées, France Chemical Engineering Science, **54**(23), pp. 5723-5735 (1999).
12. Barnea, D., Shoham, O. and Taitel, Y. "Gas-liquid flow upward in inclined Tubes; Flow pattern transition for upward flow", *Chemical Engineering Science*, **40**, pp. 131-136 (1985)

13. ANSI/ASME, *Measurement Uncertainty*, PTC, 19, Part I (1986)

14. Ansari, M.R., Habibpour, B., Salimi, E. and Adibi, P. "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).

15. Al Safran, E. "Investigation and prediction of slug frequency in gas/liquid horizontal pipe flow", *Journal of Petroleum Science and Engineering*, **69**, pp. 143-155 (2009)

16. Ansari, M.R. "Dynamical behavior of slug initiation generated by short waves in two-phase air-water stratified flow", *ASME HTD*, **361**, pp. 289-295 (1998)

17. Gregory, G.A. and scott, D.S. "Correlation of liquid slug velocity and frequency in horizontal cocurrent gas-liquid slug flow", *AIChE Journal*, **15**, pp. 933-935 (1969)

18. Grescovich, E.J. and Shrier, A.L. "Slug frequency in horizontal gas-liquid slug flow", *Ind. Eng. Chem. Process*, **11**, pp. 317-318 (1972)

19. Ujang, P.M., Lawrence, C.J., Hale, C.P. and Hewitt, G.F. "Slug initiation and evolution in two-phase horizontal flow", *International Journal of Multiphase Flow*, **32**, pp. 527-552 (2006)

20. Adibi, P., Ansari, M.R., Habibpour, B. and Salimi, E. "Slug frequency evolution in long horizontal channel by experimental method", *Modares Mechanical Engineering*, **2**, pp. 141-149 (2014).

Archive of SID