

# بررسی تجربی اثر فاصله عمودی و زاویه شیب کانال S شکل بر الگوی جریان دوفازی

محمد رضا انصاری<sup>۱</sup>؛ محسن آزادی<sup>۲\*</sup>؛ رضا قیصری<sup>۳</sup>

## چکیده

در این مقاله نتایج حاصل از آزمایش‌های انجام شده برای بررسی اثر زاویه شیب و فاصله عمودی در کانال با هندسه S شکل ارائه و تحلیل شده است. نقشه‌های الگوی جریان با دو معیار متفاوت، ثابت بودن زاویه شیب و تغییر طول قسمت میانی و ثابت بودن طول قسمت میانی و تغییر در زاویه شیب مقایسه شده‌اند. نتایج نشان دادند که با افزایش طول، گذار به الگوی جریان قالبی گردابه‌ای در سرعت‌های بالاتری از مایع رخ می‌دهد و ناحیه با الگوی جریان حلقوی تکه‌ای مه‌آلود کوچکتر شده و به سمت دبی‌های بالاتر فاز گاز می‌رود. همچنین افزایش طول، منجر به بزرگتر شدن ناحیه با الگوی جریان چرن شده و در ازای آن ناحیه با الگوی جریان لخته‌ای گردابه‌ای کوچکتر می‌شود. با افزایش شیب نیز، گذار به الگوی جریان قالبی گردابه‌ای در سرعت‌های ظاهری بالاتر هوا صورت می‌گیرد و اندازه این ناحیه کاهش می‌یابد و همچنین اندازه ناحیه با الگوی جریان چرن بزرگتر شده و در ازای آن گستره ناحیه با الگوی جریان لخته‌ای کوچکتر می‌شود.

کلمات کلیدی: جریان دوفازی، الگوی جریان، نقشه جریان، هندسه S شکل، گذار

## *An Experimental Investigation on the Effect of Vertical Distance and Inclination Angle of S-Shaped Channel on Two-Phase Flow Patterns*

M.R. Ansari, M. Azadi and R. Gheisari

### ABSTRACT

An experimental investigation is conducted to study the effect of vertical distance and inclination angle of a S-shaped channel on two-phase flow patterns. Five flow patterns of vortex plug, vortex slug, vortex wavy-annular, churn and mist packet annular were observed. Flow pattern maps were obtained for each case and then compared based on the different vertical distance and inclination angle to perform a parametric study. Increasing mid-section length and inclination angle cause the transition to vortex plug flow pattern to occur at higher liquid velocities as well as a greater area of churn flow pattern at the expense of smaller vortex slug flow pattern area. However, increasing mid-section length and decreasing inclination angle, ends in smaller area of mist packet annular area. It is revealed that for higher mid-section lengths, effect of increasing inclination on shifting transition lines between flow patterns is more determining.

**KEYWORDS:** Two-phase flow, Flow pattern, Flow pattern map, S-shaped channel, Transition line

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۰/۱۲/۶

تاریخ اصلاحات مقاله: ۱۳۹۱/۴/۴

<sup>۱</sup> دانشیار، دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده فنی و مهندسی؛ mra\_1330@modares.ac.ir

<sup>۲\*</sup> نویسنده مسئول و کارشناس ارشد، دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده فنی و مهندسی؛ msn.azadi@gmail.com

<sup>۳</sup> کارشناس ارشد، دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده فنی و مهندسی؛ gheisari.reza@gmail.com



یکی از اشکال پرکاربرد در خطوط انتقال نفت و گاز با توجه به محدودیت‌های جغرافیایی، شکل است. در کاربردهای عملی وجود موانع طبیعی موجود در مسیر انتقال، محدودیت‌های هندسی موجود در سامانه‌های لوله‌کشی صنعتی، مسیرهای لوله‌کشی در تجهیزات نیروگاهی از قبیل بویلرها و غیره باعث می‌شود که این شکل به عنوان یکی از پرکاربردترین جهت‌گیری‌های مجاری انتقال مخلوط دوفازی شناخته شود. با این وجود، هیچ مطالعه‌ای در پیشینه پژوهش، به مطالعه الگوی جریان دوفازی در جهت‌گیری که شکل نپرداخته است.

در این مطالعه، به بررسی آزمایشگاهی اثر شیب و فاصله عمودی بر الگوی جریان دوفازی آب-هوا در قسمت میانی کانال که شکل پرداخته شده است. با ثابت نگه داشتن دبی حجمی فاز مایع، الگوی جریان دوفازی برای دبی‌های حجمی متفاوت فاز گاز دیده شدند. سپس دبی فاز مایع تغییر داده می‌شد و این فرایند دوباره تکرار شد. نقشه جریان برای زوایا و طول قسمت میانی مختلف بدست آمد و مطالعه‌ای بر چگونگی گذار الگوهای مختلف دیده شده، صورت گرفت.

## ۲- طرح آزمایشگاهی

برای ایجاد یک سامانه آزمایشی برای مطالعه جریان دوفازی گاز-مایع پنج بخش اصلی وجود دارد که شامل خط تأمین آب، تأمین هوا، قسمت مخلوط کننده هوا و آب، کانال حاوی جریان دوفازی همراه با مخزن و سامانه اندازه‌گیری است.

نمایی از سامانه آزمایشگاهی مورد استفاده در این پژوهش نیز در شکل (۱) نشان داده شده است. به طور معمول به دلیل دسترسی آسان از هوا، به عنوان گاز و از آب، به عنوان مایع در بررسی جریان دوفازی استفاده می‌شود.

برای تأمین هوا، از کمپرسور و برای تأمین آب نیز از پمپ استفاده شده است. هوا و آب بعد از رسیدن به قسمت مخلوط-کننده، وارد کانال می‌شوند و با عبور از قسمت آزمایش، وارد مخزنی می‌شوند که هوا و آب را از هم جدا می‌نماید.

## ۲-۱- خط تأمین آب

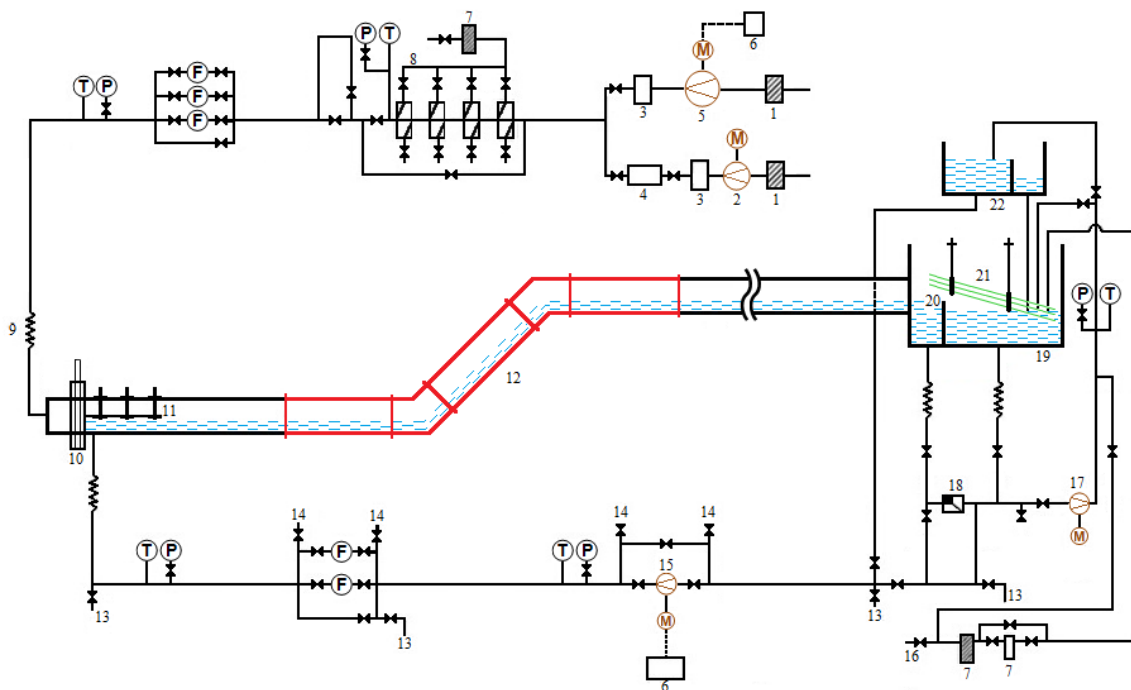
برای تأمین آب از دو پمپ استفاده شد. همان طور که در شکل (۱) دیده می‌شود برای بستن حلقه جریان آب، از دو مخزن استفاده شده است. برای جلوگیری از تغییر دبی حجمی آب در حلقه و پایداری آن، به دلیل نوسان ایجاد شده در سطح آب درون مخزن (۲) که از ورود اسلاگ‌ها و پلاگ‌های مایع ناشی می‌شود، از دو مخزن، همراه با دو پمپ، استفاده شد.

شناسایی دقیق الگوی جریان به دلیل کاربرد مهم و اساسی در مطالعه جریان‌های درونی دوفازی، بسیار اهمیت دارد. استفاده دقیق بسیاری از روابط تجربی مربوط به افت فشار، انتقال حرارت و کسر فضای خالی، وابسته به تعیین الگوی جریان است. بنابراین، تعیین الگوی جریان دوفازی، جزئی از هر تحقیق جریان‌های دوفازی خواهد بود. از طرفی، شناسایی الگوی جریان به صورت ذاتی اثرپذیر از انجام‌دهنده آزمایش بوده و تا حدودی به تعبیر شخصی محقق وابسته است. الگوهای جریان دیده شده، به جهت‌گیری مجرا وابسته هستند. البته بعضی از الگوهای جریان در هر شیبی از مجرا مشترک هستند.

با وجود اینکه مطالعات گسترده‌ای در این زمینه انجام شده است، اما بیشتر این مطالعات بر جریان‌های افقی یا عمودی متمرکز بوده‌اند و در مقایسه با حالت افقی و عمودی، تحقیقات کمتری در زمینه بررسی اثر شیب بر الگوی جریان دوفازی درون لوله انجام شده است. بارنی و همکاران [۱]، داده‌هایی برای گذار الگوی جریان در لوله‌های شیب‌دار گاز-مایع گزارش دادند. جریان آب و هوا درون لوله‌های با قطر ۱/۹۵ و ۲/۵۵ سانتی‌متر و تا زاویه  $10^\circ$  مطالعه شده‌اند. طرح تطبیلی ارائه شده توسط تایتل و داکلر [۲] در لوله‌های افقی با داده‌های آزمایشگاهی امتحان شد. برای زاویه شیب بالاتر از  $10^\circ$  رژیم لایه‌ای دیده نشد. رژیم لایه‌ای صاف برای شیب‌های رو به بالا به جز برای شیب‌های بسیار کوچک (کوچکتر از  $0/25^\circ$ ) دیده نشد. نتایج آزمایشگاهی آن‌ها نشان داد که برای شیب‌های رو به بالا، بازه دبی‌هایی که برای آن جریان نوبتی وجود داشت، در ازای ناحیه اشغال شده توسط جریان لایه‌ای، گسترده‌تر می‌شود.

در یکی از مطالعات اخیر در لوله‌های شیب‌دار با قطر کوچک توسط تیشووا و همکاران [۳]، جریان هوا-آب در شیب‌های مختلف رو به بالا مطالعه شد. آن‌ها متوجه شدند که جریان می‌تواند بر اساس شیب و شرایط جریان، متقارن و نامتقارن باشد.

در آزمایشی دیگر برای لوله‌های شیب‌دار با قطر بالا، اُدی و همکاران [۴] مطالعه‌ای آزمایشگاهی روی لوله‌ای با قطر ۱۵ cm و طول ۱۱ m و با تغییر شیب بین  $0^\circ$  تا  $92^\circ$  انجام دادند. جریان‌های حبابی، لخته‌ای، لایه‌ای و لایه‌ای-موجی در این آزمایش دیده شدند. در این کار نتایج به دست آمده برای پس‌ماند به عنوان تابعی از دبی، رژیم جریان و شیب لوله،



۱: تصفیه‌کننده هوا ۲: کمپرسور ۳: مخزن هوا ۴: تنظیم‌کننده فشار ۵: بلوئر ۶: سامانه کنترل ۷: تصفیه‌کننده آب ۸: سامانه خنک‌کننده هوا ۹: لوله انعطاف‌پذیر ۱۰: دروازه لغزان ۱۱: صفحه نازک فلزی ۱۲: بخش مورد آزمایش ۱۳: تخلیه ۱۴: شیر ۱۵: پمپ (۱) ۱۶: تأمین آب ۱۷: پمپ (۲) ۱۸: شیر یک‌طرفه ۱۹: مخزن (۲) ۲۰: صفحه کنترل سطح ۲۱: میراکننده لخته‌های مایع ۲۲: مخزن (۱) ۲۳: دی‌سنج M: موتور الکتریکی P: گیج فشار T: گیج دما

شکل (۱): نمودار سامانه آزمایشگاهی حاضر

با توجه به آنچه که گفته شد، آب موجود در سامانه دو مسیر مجزا را طی می‌نماید. یکی از این مسیرها شامل مسیر اصلی است که دبی مورد نیاز برای آزمایش را فراهم می‌نماید و مسیر دوم، آب مازاد موجود در مخزن بالایی را برای ثابت نگه داشتن هد پمپ مسیر اصلی به گردش در می‌آورد.

## ۲-۲- خط تأمین هوا

برای ایجاد جریان هوا با دبی مناسب هوا، از یک کمپرسور با توان ۴۵ کیلووات استفاده شده است. همان‌طور که در شکل (۱) نشان داده شده است، هوای مکیده شده از محیط آزمایشگاه بعد از عبور از تصفیه‌کننده هوا (۱)، وارد کمپرسور (۲) شده و به داخل مخزن هوا (۳) فرستاده می‌شود. هوای درون مخزن که در دما و فشار بالا قرار دارد برای کاهش دما و رسیدن به دمای آب از سامانه خنک کاری (۸)، عبور می‌نماید. این کار به این دلیل انجام می‌شود که شرط تعادل دمایی بین دو فاز مایع و گاز در ورودی کانال برقرار باشد. هوا بعد از عبور از سامانه خنک‌کاری به سمت دی‌سنج‌های هوا رانده می‌شود و از آنجا نیز بعد از اندازه‌گیری دما در ورودی قسمت مخلوط‌کننده به وسیله شلنگ قابل انعطاف و از بالا وارد قسمت مخلوط‌کننده می‌شود.

در این حالت آب ورودی به مخزن (۱۹)، به وسیله پمپ (۱۷)، وارد مخزن دیگر (۲۲) می‌شود که در ارتفاع ۶ متری از زمین قرار دارد. مخزن بالایی، از مخزن پایینی کوچکتر است و دارای یک تیغه جداکننده است که سطح مایع را کنترل می‌نماید. ابعاد این قسمت از مخزن طوری طراحی شده است که قسمت اول آن که هد پمپ مسیر اصلی (۱۵) را تأمین می‌نماید، همواره پر باشد و آب مازاد بعد از ریختن به قسمت دوم مخزن از راه یک لوله وارد قسمت دوم مخزن پایینی شود. با توجه به آنچه که بیان شد آب لازم برای آزمایش از طریق پمپ مسیر اصلی (۱۵) و از مخزن بالایی به داخل سامانه رانده می‌شود و این امر باعث می‌شود که دبی آب در حین آزمایش بدلیل ثابت ماندن هد پمپ، همواره ثابت بماند. دبی مورد نظر برای آزمایش نیز توسط خط میان‌بر و شیرهای موجود بعد از پمپ مسیر اصلی و همچنین یک معکوس‌کننده که به آن مرتبط است، کنترل می‌شود.

آب بعد از عبور از پمپ شماره ۱ و شیرهای گفته شده به سمت دی‌سنج‌های آب رانده شده و بعد از اندازه‌گیری دما و فشار آب در ورودی مخلوط‌کننده به وسیله یک شلنگ قابل انعطاف و از پایین متصل است.

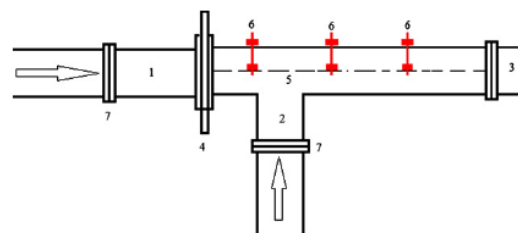
با توجه به این که آزمایش‌ها باید در سرعت‌های مختلف هوا انجام شود و همچنین برای کنترل‌پذیری بیشتر سامانه خط تأمین هوا، از یک معکوس‌کننده برای کنترل دور موتور استفاده شده است که به کمک آن می‌توان دبی را در هر مقدار مشخص تأمین و تنظیم نمود.

### ۲-۳- مخلوط‌کننده

در مطالعات جریان دوفازی، یکی از پرکاربردترین هندسه‌های مورد استفاده برای مخلوط کردن دوفاز در ابتدای خطوط لوله، ورودی T شکل است، همان‌طور که محققین بسیاری از این نوع مخلوط‌کننده استفاده نموده‌اند [۱،۵،۶].

قسمت ورودی کانال یا همان مخلوط‌کننده به شکل یک سه راهی بوده و از جنس پلکسی‌گلاس ساخته شده است و با فلنج‌هایی از همان جنس به کانال متصل می‌شود. در این قسمت از سامانه آزمایشگاهی آب، از قسمت زیر و هوا، از سمت چپ وارد می‌شود. مسیر هوا و آب به وسیله یک تیغه فلزی نازک از هم جدا شده‌اند.

این تیغه به وسیله مجموعه‌ای از پیچ‌ها به دیواره بالایی متصل است و در نتیجه ارتفاع آن قابل تنظیم است و به کمک آن می‌توان کسر حجمی و سرعت‌های مختلف هوا و آب را در ورودی کانال کنترل نمود. علاوه بر وجود تیغه فلزی، یک شاخص به صورت یک دروازه لغزان نیز در مسیر جریان هوا به ورودی تعبیه شده است که علاوه بر ممانعت از ورود آب به مسیر هوا به کمک آن نیز می‌توان کسر حجمی و سرعت ورودی هوا را کنترل نمود. برای اتصال مسیر هوا و آب به قسمت ورودی کانال، از لوله‌های قابل انعطاف استفاده شده است. نمایی از مخلوط‌کننده مورد استفاده، در شکل (۲) نشان داده شده است.



۱: ورودی هوا ۲: ورودی آب ۳: کانال ۴: دروازه لغزان ۵: صفحه فلزی نازک ۶: پیچ‌های تنظیم‌کننده برای بخش شماره (۵) ۷: فلنج

شکل (۲): نمایی از مخلوط‌کننده آب و هوا

### ۲-۴- خط انتقال مخلوط دوفازی

کانال مورد استفاده در این مطالعه از جنس پلکسی‌گلاس شفاف به ضخامت ۱۰ میلی‌متر ساخته شده است و دارای سطح مقطع مستطیلی شکل با ابعاد ۵×۱۰ سانتی‌متری و نسبت

منظری ۰/۵ است. طول کلی کانال ۳۵ متر است که از ۱۶ تکه دو متری و سه تکه یک متری تشکیل شده است. این تکه‌ها به وسیله فلنج‌هایی از جنس پلکسی‌گلاس به هم متصل شده‌اند.

هر یک از این کانال‌ها بر روی سکوهایی قرار گرفته‌اند که این امکان را فراهم می‌نماید که علاوه بر ایجاد شیب کانال، بتواند در سه جهت  $x, y, z$  نیز حرکت داشته باشد. در نتیجه وجود سکوها و همچنین به دلیل این که کانال‌ها به صورت تکه‌های مجزا ساخته شده‌اند، امکان ایجاد اشکال مختلف در طول مسیر کانال وجود دارد.

کانال‌های حاوی جریان دوفازی در انتهای خود به وسیله فلنج به مخزن شماره (۲) متصل می‌شوند. این مخزن به عنوان جداکننده مخلوط دوفازی عمل می‌نماید و دارای یک تیغه جدا کننده است که آن را به دو قسمت تقسیم می‌نماید.

### ۲-۵- سامانه اندازه‌گیری و داده‌برداری

سامانه اندازه‌گیری مورد استفاده در این مطالعه، اندازه‌گیری دبی هوا و آب را در بر می‌گیرد. دبی حجمی آب و هوا به وسیله فلومترهایی که در خط تأمین هوا و آب قرار داده شده است، به طور جداگانه اندازه‌گیری می‌شود. با اندازه‌گیری دبی حجمی هوا و آب و همچنین مشخص بودن ابعاد کانال، سرعت ظاهری هر یک از فازها طبق رابطه زیر بدست می‌آید:

$$J = \frac{Q}{A} \quad (۱)$$

که در این رابطه،  $Q$  دبی حجمی هر یک از دو فاز و  $A$  مساحت سطح مقطع کانال است.

فلومتر هوا از نوع ورتکسی با دقت  $0.1 \text{ m}^3 / \text{hr}$  و فلومتر آب از نوع الکترومغناطیس با دقت  $0.2 \text{ m}^3 / \text{hr}$  است که در مسیر آب، قبل از ورود به مخلوط‌کننده قرار داده شده است.

میزان عدم قطعیت اندازه‌گیری‌ها بر اساس استانداردهای ANSI/ASME [۷] انجام شد. محاسبات انجام شده نشان داد که بیش‌ترین مقدار عدم قطعیت برای دبی حجمی آب و هوا به ترتیب برابر  $\pm 1/25\%$  و  $\pm 5\%$  است.

### ۳- چگونگی انجام تحقیق

برای تعیین نقشه جریان دوفازی، ابتدا مسیر آب باز شده و آب وارد کانال می‌شود تا کسر حجمی اولیه ۰/۵ در ابتدای آزمایش فراهم شود و جریان آب به حالت پایدار برسد. بعد از پایداری دبی آب در یک مقدار مشخص، سرعت دورانی کمپرسور توسط معکوس‌کننده در حداقل میزان لازم برای هوادهی قرار داده شد. بعد از رسیدن به حالت پایا، رژیم جریان تعیین خواهد شد. برای بررسی سرعت‌های بالاتر هوا، درحالی



شکل (۴): بررسی اثر فاصله عمودی قسمت میانی کانال S شکل

#### ۴- بحث و نتایج

دبی‌های مورد بررسی در این کار بر اساس شرایط مجاز کارکرد آزمایشگاه و همچنین بر اساس شرایط مورد مطالعه در پیشینه پژوهش و مطالعات قبلی انتخاب شد. بر همین اساس، دبی آب در بازه  $11-1/5 \text{ m}^3/\text{hr}$  ( $0/6 < j_f < 0/8$ ) تغییر داده شد. همچنین دبی هوا نیز در بازه  $350-15 \text{ m}^3/\text{hr}$  ( $19/5 < j_g < 0/8$ ) انتخاب شد. خواص فیزیکی آب و هوا در دمای  $27^\circ \text{C}$ ، دمای متوسط محیط آزمایشگاه و از جداول مربوطه [۸] بدست آمد.

پنج رژیم دیده شده، قالبی گردابه‌ای، لخته‌ای گردابه‌ای، موجی-حلقوی گردابه‌ای، چرن و حلقوی تکه‌ای مه آلود نامیده شده‌اند. پسوند گردابه‌ای مورد استفاده در الگوهای جریان قالبی، لخته‌ای و موجی-حلقوی، برای ایجاد تمایز بین الگوهای قالبی، لخته‌ای و موجی-حلقوی توصیف شده در پیشینه پژوهش و الگوهای دیده شده با حالت گردابه‌ای در تحقیق حاضر است. چون جریان سیال در این مطالعه رو به بالا است همواره بخشی از مایع وارد شده به قسمت میانی کانال S شکل تحت اثر نیروی گرانش، موفق به عبور کردن با ممنوم اولیه نیست و در نتیجه به پایین باز می‌گردد. با وارد شدن مایع با انرژی جنبشی بالاتر از قسمت زانویی اول و مواجه شدن با جریان برگشتی که در بیشتر حالات در زیر لایه کف کانال دیده می‌شود، گردابه‌هایی در قسمت میانی، شکل می‌گیرد. از این رو الگوهای جریان قالبی و لخته‌ای دیده شده در این تحقیق گردابه‌ای هستند. الگوی جریان حلقوی تکه‌ای مه‌آلود به دلیل حالت نوبتی عبور جبهه‌ای، از ذرات بسیار ریز مایع از قسمت میانی و مشابه پیشنهادی که کولمن و گاریملا [۹] ارائه نموده‌اند، انتخاب شده است.

تصاویر گرفته شده از الگوهای جریان گفته شده، با استفاده از دوربین پر سرعت با قابلیت فیلم‌برداری با سرعت ۵۰۰ فریم بر ثانیه، در شکل (۵) نشان داده شده است.

که دبی آب ثابت است، سرعت دورانی موتور با گام ۱ هرتز افزایش داده شده و در هر گام بعد از رسیدن به حالت پایا، تعیین الگوی جریان انجام شد. این مراحل برای دبی‌های بالاتر آب نیز تکرار شد.

#### ۳-۱- اثر شیب کانال S شکل

برای تغییر شیب قسمت میانی S شکل، از سکوهایی که کانال‌ها بر روی آن قرار داده شده است، استفاده شد. برای شیب‌دهی، ۳-۴ متر از طول ابتدایی کانال بعد از ورودی انتخاب می‌شد و بعد از این فاصله از اتصالات مناسب استفاده گردید. زانویی‌ها، با شیب  $22/5^\circ$ ،  $45^\circ$ ،  $67/5^\circ$  و  $90^\circ$  درجه هستند و به کمک فلنج به کانال متصل می‌شوند. زانویی‌ها نیز مانند کانال از جنس پلکسی‌گلاس شفاف هستند و برای ساخت آن‌ها بعد از محاسبه مقدار طول و زاویه اضلاع و تهیه نقشه به وسیله برش لیزر، برش‌کاری شد و در پایان، این صفحات به وسیله کلروفرم به هم چسبانده شدند. بعد از انجام آزمایش نشستی به صورت هیدرواستاتیک زانویی مناسب برای هر شیب در جای خود قرار داده شد. این زانویی‌ها در شکل (۳) نشان داده شده‌اند.

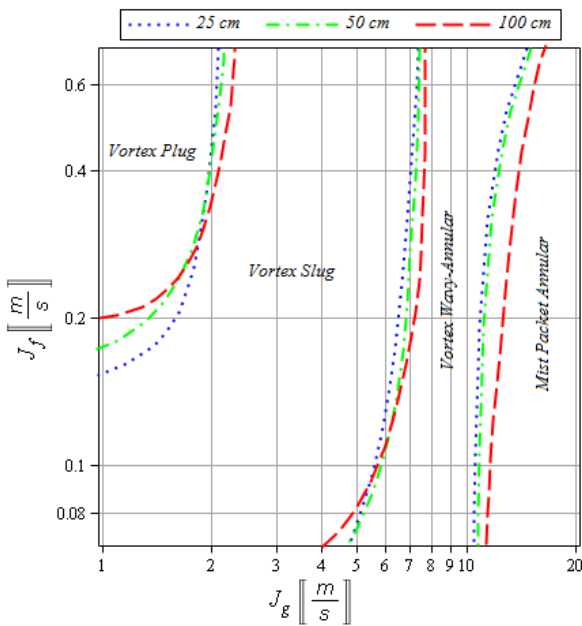


شکل (۳): زانویی‌های مورد استفاده برای ایجاد هندسه

شکل S

#### ۳-۲- اثر فاصله عمودی قسمت میانی کانال S شکل

برای بررسی اثر فاصله عمودی در یک کانال S شکل با شیب ثابت، از سه کانال مختلف با طول‌های ۰،۲۵، ۰،۵ و ۱ متری در قسمت میانی و بین دو زانویی استفاده شد. کانال قسمت میانی به وسیله فلنج به زانویی‌ها متصل شد. شکل (۴) سه حالت از هندسه S شکل با طول قسمت میانی متفاوت و شیب ثابت  $45^\circ$ ، برای بررسی اثر فاصله عمودی قسمت میانی در این مطالعه را نشان می‌دهد.

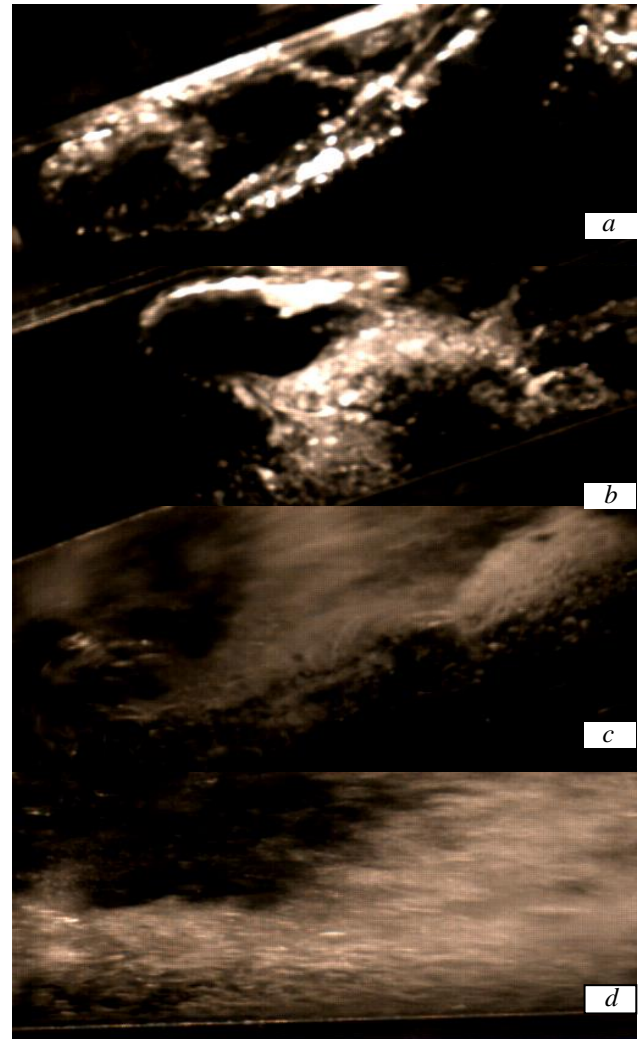


شکل (۶): نقشه الگوی جریان در شیب  $22/5^\circ$  و طول‌های قسمت میانی متفاوت.

همان‌طور که دیده می‌شود، با افزایش طول، گذار به الگوی جریان قالبی گردابه‌ای از سرعت ظاهری آب  $0.15 \text{ m/s}$  تا  $0.2$  تغییر نموده و در دبی بالاتری از آب با این الگوی جریان روبرو می‌شویم. افت ممنتوم بیشتر با افزایش طول باعث می‌شود فاز مایع نیاز به سرعت ظاهری بالاتری برای عبور از قسمت میانی در دبی‌های پایین هوا (متناظر با الگوی جریان قالبی گردابه‌ای) داشته باشد. همچنین اگر به مرز بالایی گذار قالبی-لخته‌ای دقت شود، دیده می‌شود که با افزایش طول تا دبی‌های بالاتری از فاز گاز جریان قالبی گردابه‌ای وجود دارد. این مسئله، افزایش طول قالب‌های هوا با افزایش طول، را توجیه می‌نماید. در این شیب تغییر چندانی در گذار لخته‌ای گردابه‌ای به موجی-حلقوی دیده نمی‌شود. اما برای الگوی جریان حلقوی، با افزایش طول، ناحیه با الگوی جریان حلقوی-تکه‌ای مه‌آلود کوچکتر شده و به سمت دبی‌های بالاتر فاز گاز می‌رود. این رفتار به دلیل افزایش اثر نیروی گرانش و غلبه آن بر نیروی برشی فاز گاز، با زیاد شدن فاصله عمودی است.

۴-۱-۲- شیب  $45^\circ$

نقشه الگوی جریان دوفازی برای شیب  $45^\circ$  و طول‌های میانی مختلف در شکل (۷) نشان داده شده است.



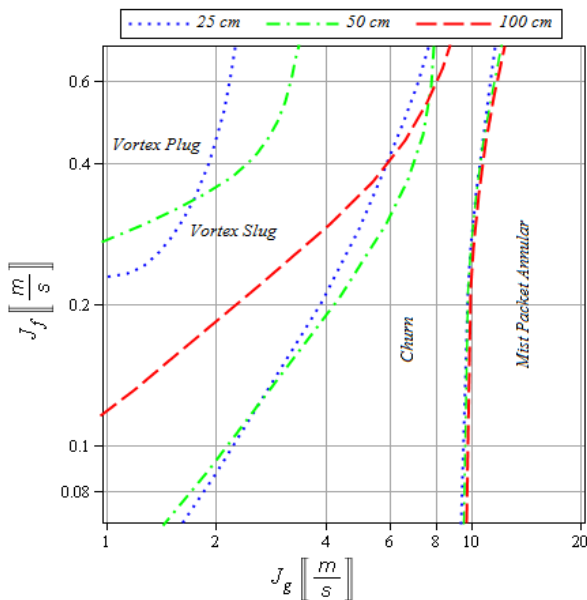
شکل (۷): الگوی جریان دیده شده. (a) قالبی گردابه‌ای، (b) لخته‌ای گردابه‌ای، (c) موجی-حلقوی گردابه‌ای، (d) حلقوی تکه‌ای مه‌آلود.

#### ۴-۱- اثر تغییر طول قسمت میانی بر نقشه الگوی جریان

در این قسمت به مطالعه اثر تغییر طول قسمت میانی بر نقشه الگوی جریان دوفازی پرداخته می‌شود. تغییر طول در شیب ثابت همچنین متناظر با تغییر فاصله عمودی کانال S شکل است.

۴-۱-۱- شیب  $22/5^\circ$

مقایسه نقشه‌های بدست آمده برای طول‌های مختلف در شیب  $22/5^\circ$  در شکل (۶) ارائه شده است.

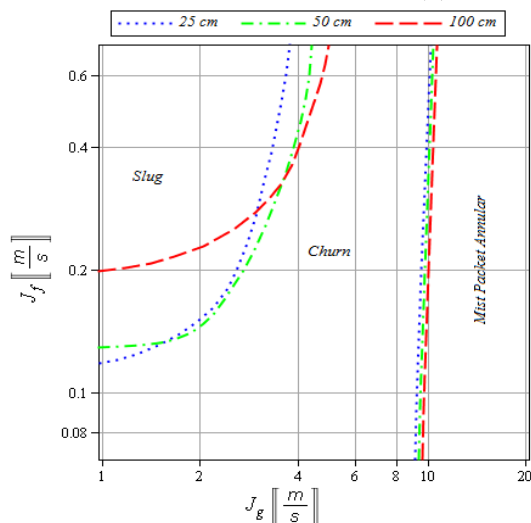


شکل (۸): نقشه الگوی جریان در شیب  $67/5^\circ$  و طول‌های قسمت میانی متفاوت.

در این شیب نیز همانند شیب  $45^\circ$ ، رفتاری مشابه آنچه در مورد گذار الگوهای جریان قالبی گردابه‌ای و حلقوی گفته شد، دیده می‌شود. خط گذار بین دو الگوی جریان لخته‌ای گردابه‌ای و چرن با افزایش طول به گونه‌ای جابجا می‌شود که ناحیه با الگوی جریان چرن بزرگتر و الگوی جریان لخته‌ای گردابه‌ای کوچکتر می‌شود. جهش ناگهانی این مرز گذار از طول  $50\text{ cm}$  به  $100\text{ cm}$  به دلیل تغییر زیاد فاصله عمودی در شیب‌های بالا با تغییر طول قسمت میانی است.

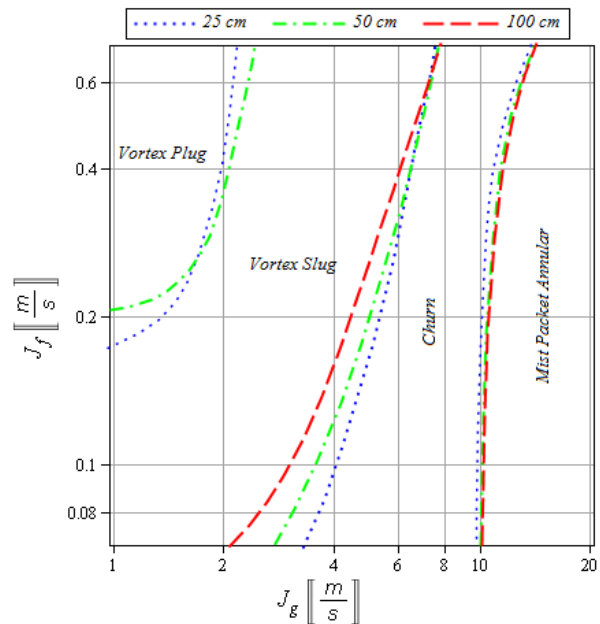
۴-۱-۴- شیب  $90^\circ$

مقایسه نقشه‌های الگوی جریان در شیب  $90^\circ$  و طول‌های مختلف در شکل (۹) نشان داده شده است.



شکل (۹): نقشه الگوی جریان در شیب  $90^\circ$  و طول‌های قسمت میانی متفاوت.

در این شیب نیز دیده می‌شود که با افزایش طول از  $50\text{ cm}$



شکل (۷): نقشه الگوی جریان در شیب  $45^\circ$  و طول‌های قسمت میانی متفاوت.

در این حالت نیز با افزایش طول، گذار به الگوی جریان قالبی گردابه‌ای در سرعت‌های ظاهری بالاتر هوا رخ می‌دهد. تنها تفاوت شیب  $45^\circ$  با  $22/5^\circ$  در این است که برای شیب فعلی، با افزایش طول به  $100\text{ cm}$ ، الگوی جریان قالبی گردابه‌ای دیگر به وجود نمی‌آید. با افزایش فاصله عمودی بیشتر از حد معینی و در بازه دبی‌های آب مورد مطالعه، انرژی جنبشی فاز مایع به اندازه‌ای نیست که بتواند بر نیروی گرانشی وارده غلبه نماید و در سرعت‌های ظاهری پایین، هوا از قسمت میانی عبور نماید. این مسئله باعث می‌شود تا آب در زانویی اول جمع شود و با افزایش فشار هوای پشت سد آب، الگوی جریان قالبی گردابه‌ای جای خود را به الگوی جریان لخته‌ای گردابه‌ای (به صورت جهشی و ضربه‌ای) بدهد. همچنین دیده می‌شود که با افزایش طول در این شیب و در سرعت‌های ظاهری پایین آب، مرز گذار لخته‌ای چرن به سمت چپ جابجا می‌شود. با افزایش طول، جریان برگشتی نیز بیشتر شده و در نتیجه گستره الگوی جریان آشفته چرن نیز بزرگتر می‌شود. در این شیب، افزایش طول اثر چندانی بر مرز چرن-حلقوی نمی‌گذارد که از مقایسه این حالت با شیب  $22/5^\circ$  می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش زاویه زانویی، ترکیب دو فاز بهتر انجام می‌شود و در نتیجه تغییر طول اثر چندانی بر الگوی جریان حلقوی تکه‌ای مه‌آلود نمی‌گذارد.

۴-۱-۳- شیب  $67/5^\circ$

اثر طول بر نقشه الگوی جریان در شیب  $67/5^\circ$  در شکل (۸)

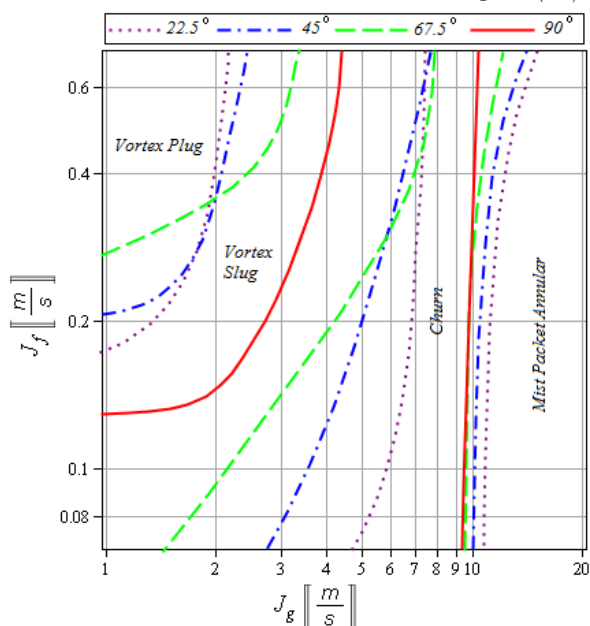
مورد بررسی قرار گرفت.

جریان چرن می‌شود. افزایش شیب منجر به افزایش جریان بازگشتی و همچنین افزایش ترکیب دو فاز می‌شود که این شرایط امکان پیدایش الگوی جریان آشفته چرن را سریع‌تر مهیا می‌نماید.

همچنین برای خطوط گذار چرن-حلقوی نیز با افزایش شیب، جابجایی به گونه‌ای صورت می‌گیرد که این ناحیه بزرگتر می‌شود. این رفتار کاملاً متأثر از زاویه درگیر شدن دو فاز مایع و گاز در زانویی اول است. با افزایش این زاویه، امکان کنار زده شدن مایع توسط نیروی برشی گاز راحت‌تر فراهم شده و در نتیجه الگوی جریان حلقوی تکه‌ای مه‌آلود سریع‌تر ایجاد می‌شود.

#### ۴-۲-۲-۴ طول ۵۰ cm

مقایسه شیب‌های قسمت میانی مختلف در طول ۵۰ cm در شکل (۱۱) نشان داده شده است.



شکل (۱۱): نقشه الگوی جریان در طول قسمت میانی ۵۰ cm و شیب‌های متفاوت.

نقشه بدست آمده در این مقایسه مشابه طول ۲۵ cm است. تنها تفاوت این نقشه با حالت قبل، رخداد الگو جریان قالبی در سرعت‌های ظاهری بالاتر هوا با افزایش شیب است. در شیب‌های پایین با افزایش دبی هوا، حجم بیشتری از مایع از قسمت میانی عبور داده می‌شود و در نتیجه با هر پر و خالی شدن مقطع قسمت میانی، الگوی جریان لخته‌ای ایجاد می‌شود. اما در شیب‌های بالاتر با افزایش سرعت ظاهری هوا تا حد بیشتری، همچنان به دلیل اثر بیشتر نیروی گرانش، حجم زیادی از مایع در قسمت میانی موجود است.

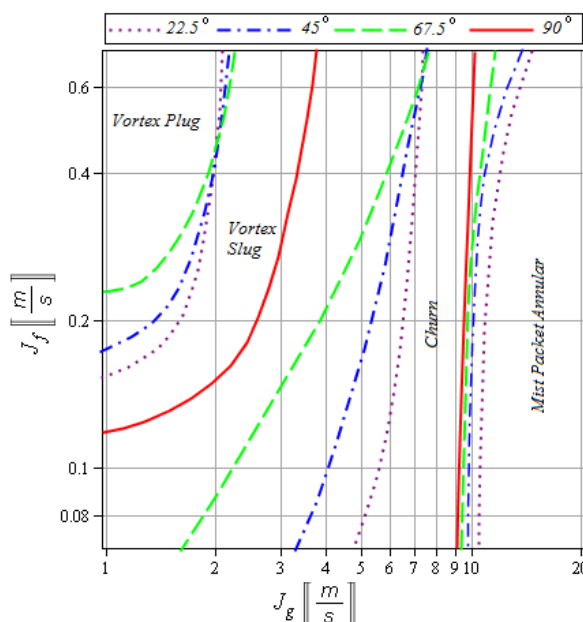
به ۱۰۰ cm، کاهش ناگهانی در اندازه ناحیه با الگوی جریان لخته‌ای به وجود می‌آید. این پدیده به علت افزایش جریان برگشتی و در نتیجه آن ترکیب بیشتر و تغییر شکل حباب‌های تیلور موجود در جریان لخته‌ای و گذار به الگوی جریان چرن ایجاد می‌شود.

#### ۴-۲-۴-۲ اثر تغییر شیب قسمت میانی بر نقشه الگوی جریان

برای بررسی اثر شیب کانال S شکل بر گذار بین الگوهای جریان، نقشه‌های جریان به دست آمده برای هندسه‌های با طول قسمت میانی ثابت و شیب متغیر در ادامه ارائه شده است. گفتنی است که در این نقشه‌ها و برای شیب ۲۲/۵°، ناحیه نشان داده شده با الگوی جریان چرن نشان‌دهنده همان الگوی جریان موجی-حلقوی توصیف شده در این شیب است.

#### ۴-۲-۴-۱ طول ۲۵ cm

اثر تغییر شیب در طول ۲۵ cm و شیب‌های میانی مختلف در شکل (۱۰) مورد مطالعه قرار گرفته است. با افزایش شیب، گذار به الگوی جریان قالبی گردابه‌ای به سرعت‌های ظاهری بالاتر هوا صورت می‌گیرد و اندازه این ناحیه کاهش می‌یابد تا جایی که در شیب ۹۰°، این الگو جریان به وجود نمی‌آید. با افزایش فاصله عمودی و افت ممنوم، نیاز به انرژی جنبشی بیشتری برای عبور از قسمت میانی لازم است که به همین دلیل گذار به این الگو در دبی‌های بالاتر آب رخ می‌دهد.



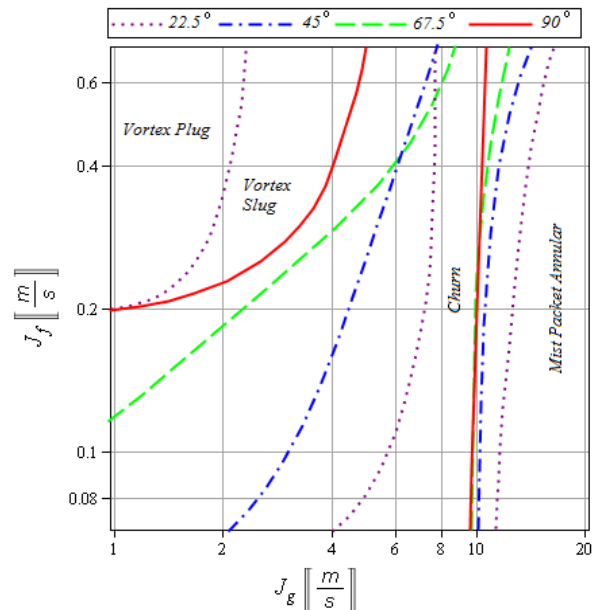
شکل (۱۰): نقشه الگوی جریان در طول قسمت میانی ۲۵ cm و شیب‌های متفاوت.

با دنبال نمودن خطوط گذار لخته‌ای-چرن، مشخص است که افزایش شیب باعث افزایش شدید اندازه ناحیه با الگوی



#### ۳-۲-۴- طول ۱۰۰ cm

نقشه الگوی جریان در طول قسمت میانی ۱۰۰ cm و شیب‌های مختلف در شکل (۱۲) نشان داده شده است.



شکل (۱۲): نقشه الگوی جریان در طول قسمت میانی ۱۰۰ cm و شیب‌های متفاوت.

همان‌طور که دیده می‌شود در این طول، فقط در شیب ۲۲/۵ شاهد شکل‌گیری الگوی جریان قالبی گردابه‌ای هستیم. رفتار دیده شده در این حالت از نظر چگونگی جابجایی مرزهای گذار همانند دو طول قبلی است با این تفاوت که تغییرات بسیار شدیدتر شده‌اند. این مسئله به دلیل تغییر زیاد فاصله عمودی از طول ۵۰ cm به طول ۱۰۰ cm است. به صورت کلی و با مقایسه نقشه‌های ارائه شده در بررسی اثر شیب، می‌توان گفت که با افزایش طول قسمت میانی، اثرات تغییر شیب بر جابجایی مرزهای گذار بین الگوهای جریان شدیدتر و تعیین‌کننده‌تر می‌شود.

#### ۵- نتیجه‌گیری

نتایج بدست آمده برای هندسه‌های مختلف کانال S شکل به دو دسته کلی جمع‌بندی اثر طول قسمت میانی (فاصله عمودی) و شیب کانال تقسیم‌بندی شده‌اند. در بررسی اثر طول قسمت میانی، نتایج زیر حاصل شد:

#### ۶- مراجع

[۳] M. Tshuva, D.Barnea, Y. Taitel, "Two-phase flow in inclined parallel pipes", Int. J. Multiphase Flow 25, 1491- 1503, 1999.  
[۴] G. Oddie, H. Shi, L.J. Durlofsky, K. Aziz, B. Pfeffer, J.A. Holmes, "Experimental study of two and three phase flows in large diameter inclined pipes", Int. J. Multiphase Flow (29) 527-558, 2003.

[۱] D. Barnea, O. Shoham, Y. Taitel, & A.E. Dukler, "Flow pattern transition for gas liquid flow in horizontal and inclined pipes", Int. J. Multiphase Flow 6, 217-225, 1980.  
[۲] Y. Taitel, A.E. Dukler, "A Model for Predicting Flow Regime Transitions in Horizontal and Near Horizontal Gas-liquid Flow", AIChE Journal, Vol. 22, No. 1 47-55, 1976.

- با افزایش طول، گذار به الگوی جریان قالبی گردابه‌ای در سرعت‌های ظاهری بالاتری از مایع رخ می‌دهد.
- با افزایش طول قسمت میانی، طول قالب‌ها و لخته‌های مایع درون کانال افزایش می‌یابد.
- با افزایش طول، ناحیه با الگوی جریان حلقوی تکه‌ای مه‌آلود کوچکتر شده و به سمت دبی‌های بالاتر فاز گاز می‌رود.
- با افزایش طول به ۱۰۰ cm در شیب‌های ۴۵° و ۶۷/۵°، الگوی جریان قالبی گردابه‌ای ایجاد نمی‌شود.
- با افزایش طول، ناحیه با الگوی جریان چرن بزرگتر شده و در ازای آن ناحیه با الگوی جریان لخته‌ای گردابه‌ای کوچکتر می‌شود.
- در شیب‌های ۶۷/۵° و ۹۰° با افزایش طول از ۵۰ cm به ۱۰۰ cm، تغییری ناگهانی در مرز گذار چرن-لخته‌ای ایجاد می‌شود.

و در بررسی اثر شیب نتایجی که در ادامه آورد شده است، حاصل شد:

- با افزایش شیب، گذار به الگوی جریان قالبی گردابه‌ای در سرعت‌های ظاهری بالاتر هوا صورت می‌گیرد و اندازه این ناحیه کاهش می‌یابد.
- با افزایش شیب به ۹۰°، الگوی جریان قالبی گردابه‌ای دیگر ایجاد نمی‌شود.
- افزایش شیب باعث افزایش اندازه ناحیه با الگوی جریان چرن و در ازای آن کاهش گستره ناحیه با الگوی جریان لخته‌ای می‌شود.
- افزایش شیب منجر به افزایش اندازه ناحیه با الگوی جریان حلقوی تکه‌ای مه‌آلود می‌شود.
- با افزایش طول قسمت میانی، اثرات تغییر شیب بر جابجایی مرزهای گذار بین الگوهای جریان شدیدتر و تعیین‌کننده‌تر می‌گردد.

Incropera, F., Dewitt, P.D., 1996. Introduction to Heat Transfer, third ed. John Wiley & Sons Inc.

J.W. Coleman, S. Garimella, "Two-phase flow regimes in round, square and rectangular tubes during condensation of refrigerant R134a", International Journal of Refrigeration, (26) 117-128, 2003.

[۸]

[۹]

J.Weisman, D. Duncan, J.Gibson, & T. Crawford, "Effects of fluid properties and pipe diameter on two phase flow patterns in horizontal lines", Int. J. Multiphase Flow 5, 437-462, 1979.

B.D. Woods, E.T. Hurlburt, T. J. Hanratty, "Mechanism of slug formation in downwardly inclined pipes", International Journal of Multiphase Flow, (26) 977-998, 2000.

ANSI/ASME, 1986, Measurement uncertainty, PTC 19, 1-1985, Part I.

[۵]

[۶]

[۷]

## ۷- فهرست علائم

$A$	مساحت سطح مقطع کانال، $m^2$
$J$	سرعت ظاهری، $m/s$
	زیرنویس
$f$	سیال
$g$	گاز

