



مطالعه تجربی تأثیر کانال‌های تپه‌ای و دره‌ای شکل بر جریان گاز-مایع

محمدرضا انصاری^{۱*}، محمدسعید احمدی قیری^۲، بهزاد صادقی حاجی‌پیرلو^۳

۱- دانشیار مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

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

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

* تهران، صندوق پستی ۱۴۳-۴۱۱۵، mra_1330@modares.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: ۱۶ تیر ۱۳۹۲

پذیرش: ۰۴ شهریور ۱۳۹۲

ارائه در سایت: ۲۵ مرداد ۱۳۹۳

کلید واژگان:

جریان دوفازی

الگوی جریان

جریان اسلاگ

مسیر تپه‌ای و دره‌ای

در این مطالعه، جریان دوفازی آب و هوا در کانال‌هایی به شکل تپه و دره، به صورت آزمایشگاهی بررسی شده است. مطالعات برای یک تپه و یک دره متشکل از قسمت‌های شیب‌دار $\pm 7/50^\circ$ و قسمت‌های افقی به عنوان بالادست و پایین‌دست تپه و دره انجام شده است. مطالعات پیشین، تنها محدوده جریان اسلاگ را در قسمت‌های تپه و دره بررسی کرده‌اند. در این مطالعه، نقشه کامل جریان دوفازی و منحنی رفتار فشار برای تپه و دره و همچنین محدوده اسلاگ بالادست و پایین‌دست تپه و دره برای بررسی اثر تپه و دره بر بالادست و پایین‌دست به دست آمده است. چهار رفتار متفاوت از اسلاگ در عبور از دره و دو رفتار طی عبور از تپه مشاهده شد. تمام دسته‌بندی‌ها، بر محدوده اسلاگ قسمت بالادست و پایین‌دست، به منظور مشاهده ارتباط کیفی بین آن‌ها نشان داده شده است. در سرعت‌های پایین گاز، الگوهای جریان و رفتار فشار مسیر تپه و دره با یکدیگر تفاوت دارند. با افزایش سرعت گاز، این تفاوت‌ها کمتر می‌شود. به عبارتی، در سرعت‌های بالای گاز، تپه و دره اثر مشابهی بر جریان دارند.

Experimental investigation of the effect of hilly-terrain duct on gas-liquid flow

Mohammad Reza Ansari^{1*}, Mohammad Saeed Ahmadi Ghiri², Behzad Sadeghi Hajipirloo³

Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

* P.O.B. 14115-143 Tehran, Iran, mra_1330@modares.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 07 July 2013
Accepted 26 August 2013
Available Online 16 August 2014

Keywords:
Two-Phase Flow
Flow Pattern
Slug Flow
Hill and Valley Configuration

ABSTRACT

This study is an experimental investigation of two-phase water-air flow in hilly-terrain duct. The inclination angles for hill and valley configuration is $\pm 7.5^\circ$. Review of the related literature shows their results are limited to slug regime only. In the present study, flow regime map and pressure traces are investigated. This study reveals that the possible slug flow behavior categories exist along a valley and hill configuration are four and two, respectively. In an attempt to relate the qualitative flow behavior at a valley and hill to the flow pattern maps of upstream and downstream, this qualitative classification is superimposed on flow pattern maps where obtained independently for the upstream and downstream sections. The results show, flow has different behavior in hill in compare to valley at relatively low gas flow rates. However, at higher gas velocity, difference between hill and valley behavior decreases. It can be concluded, that the effect of hill and valley behavior are similar on flow regime at relatively high gas flow rates.

۱- مقدمه

جهت‌گیری‌های متفاوت جریان، سبب کم و زیاد شدن اثر نیروهای گرانش و اینرسی بر فازها (عوامل مهم توزیع دو فاز) می‌شوند. جریان دوفازی به طور جداگانه در هر یک از مسیرهای افقی، عمودی، شیب‌دار رو به بالا و رو به پایین به صورت گسترده‌ای مطالعه شده‌اند. جریان دوفازی در مسیرهای دره‌ای و تپه‌ای شکل، به صورت محدود مطالعه شده‌اند. مسیرهای دره‌ای و تپه‌ای به مسیرهای شامل قسمت افقی، شیب‌دار رو به بالا و رو به پایین اطلاق می‌شود. طبیعت گذرای الگوی اسلاگ و همچنین وجود فصل مشترک تغییر شکل‌پذیر بین دو فاز مدل‌سازی این نوع جریان را پیچیده کرده است [۱]. جریان اسلاگ که به صورت متناوب در درون لوله شکل می‌گیرد، باعث وارد شدن باری متغیر به جدار لوله‌های انتقال می‌شود [۲].

کاربرد گسترده جریان دوفازی گاز و مایع در مسائل گوناگون مهندسی و رفتار متفاوت و پیچیده‌تر آن نسبت به جریان تک‌فازی، بیان‌گر اهمیت مطالعه چنین جریان‌هایی است. مطالعه جریان دوفازی درون کانال و لوله، نقطه شروعی برای بررسی علمی جریان‌های گاز و مایع به شمار می‌رود. به علاوه، وجود گسترده جریان گاز و مایع در خطوط انتقال، به ویژه میادین نفت و گاز، اهمیت دو چندان به مطالعه چنین جریان‌هایی می‌دهد. پیش‌بینی توزیع‌های متفاوت دو فاز نسبت به هم (به اصطلاح، الگوهای جریان دوفازی) و رفتار فشار جریان، دو جنبه بسیار مهم برای طراحی سیستم‌های جریان دوفازی هستند. یکی از عوامل مهم مؤثر بر الگوهای جریان دوفازی، جهت‌گیری مسیر جریان است.

Please cite this article using:

M.R. Ansari, M.S. Ahmadi Ghiri, B. Sadeghi Hajipirloo, Experimental investigation of the effect of hilly-terrain duct on gas-liquid flow, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 7, pp. 94-102, 2014 (In Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

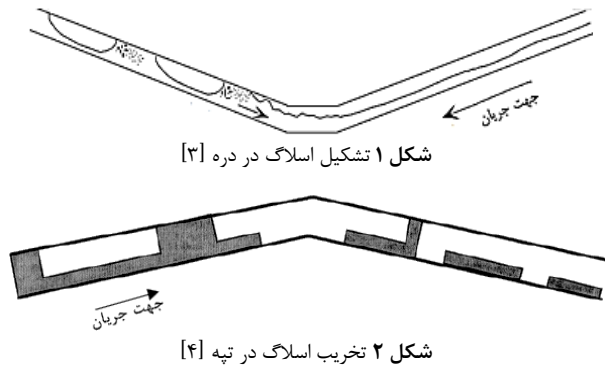
بررسی شده و رفتار فشار کمتر گزارش شده است.

در پژوهش حاضر، محدوده اسلاگ در هر چهار قسمت (بالارونده، پایین-رونده، افقی بالادست و پایین‌دست) تپه و دره بررسی شده است. با این کار، علاوه بر به دست آوردن تغییر رفتار اسلاگ در قسمت‌های مختلف مسیر، اثر تپه و دره بر بالادست و پایین‌دست بررسی شده است. برخلاف کارهای پیشین که فقط محدوده جریان اسلاگ قسمت بالارونده را گزارش کرده‌اند، در این پژوهش، نقشه کاملی از تمامی الگوهای مشاهده شده در بالارونده گزارش شده است. با ثبت فشار در طول مسیر و تحلیل آن در حوزه فرکانس، رفتار فشار تحت الگوهای جریان دوفازی بررسی شده است.

۲- روش آزمایش

۲-۱- سیستم آزمایشگاه

پژوهش حاضر در آزمایشگاه جریان دوفازی آب-هوا انجام شده است. طرح‌واره‌ای از سیستم کلی آزمایشگاه در شکل ۳ و شکل ۴ نشان داده شده است. این سیستم، شامل خط تغذیه هوا و آب و کانال شفاف است. برای تأمین آب، آب با عبور از دو فیلتر متفاوت به مخزن شماره ۲ می‌ریزد. زمانی که سطح آب در این مخزن به ارتفاع معینی برسد، پمپ شماره ۲، آب این مخزن را به مخزن شماره ۱ می‌برد. مخزن شماره ۱، در ارتفاع ۶ متری از زمین قرار دارد و دارای دو قسمت است. این دو قسمت توسط یک تیغه از هم جدا شده‌اند و ارتفاع آب در قسمت اول آن ثابت می‌ماند. اگر این ارتفاع بیش-تر شود، آب به قسمت دوم آن می‌ریزد. قسمت اول، هد پمپ مسیر اصلی را تأمین می‌کند. از این رو ارتفاع آب آن باید به میزانی باشد تا این هد را تأمین کند. آب قسمت دوم از طریق یک لوله وارد قسمت دوم مخزن شماره ۲ می‌شود. آبی که وارد کانال می‌شود از طریق پمپ شماره ۲ که توسط مخزن شماره ۱ تغذیه می‌شود، فراهم می‌شود. از این رو، تا زمانی که ارتفاع آب مخزن شماره ۱ ثابت باشد، دبی آب مسیر ثابت است. آب خروجی از مخزن شماره ۱، پس از اندازه‌گیری دبی، دما و فشار آن وارد کانال می‌شود. هوای جریان دوفازی، از هوای آزمایشگاه توسط یک دمنده، تأمین می‌شود. هوای مکیده شده پس از عبور از یک فیلتر وارد کمپرسور (۴۵ کیلووات) می‌شود. زمانی که از هوای فشرده شده کمپرسور استفاده می‌شود، هوا از یک تنظیم-کننده فشار، برای کاهش فشار تا فشار اتمسفر، عبور می‌کند. زمانی که از مکند استفاده می‌کند، هوا برای خنک‌کاری از سیستم خنک‌کننده هوا عبور می‌کند. پس از آن، با اندازه‌گیری دبی، دما و فشار هوا قبل از ورودی خط جریان، هوا وارد کانال می‌شود. هوا و آب، قبل از ورود به خط جریان با استفاده از یک ورودی T شکل با هم ترکیب می‌شوند. همان‌طور که در شکل ۵ نشان داده شده، آب از پایین و هوا به صورت افقی وارد می‌شوند. یک تیغه فلزی برای جدا نمودن هوا و آب در ورودی قرار داده شده است. این تیغه سبب جلوگیری از تشکیل امواج در ورودی می‌شود. استفاده از این نوع ورودی سبب توسعه‌یافتگی سریع‌تر می‌شود. وارد کردن آب از قسمت پایین و ورود هوا از بالا، سبب می‌شود این دو با هم تداخل زیاد نداشته باشند. سطح مقطع خط جریان، کانال مستطیلی شکل با ابعاد 5×10 cm می‌باشد. این کانال از جنس پلکسی‌گلاس شفاف به ضخامت ۱۰ mm است. دبی آب و هوا پیش از ورود به کانال به ترتیب با دبی‌سنج الکترومغناطیسی با دقت $0.1 \text{ m}^3/\text{h}$ و دبی‌سنج ورتکسی با دقت $0.1 \text{ m}^3/\text{h}$ اندازه‌گیری می‌شود. برای اندازه‌گیری فشار جریان در کانال از سنسورهای فشار پیزوالکتریک 250 mbar با دقت ۱٪ و نرخ داده‌برداری 100 Hz (۱۰۰ داده در هر ثانیه) استفاده شد.



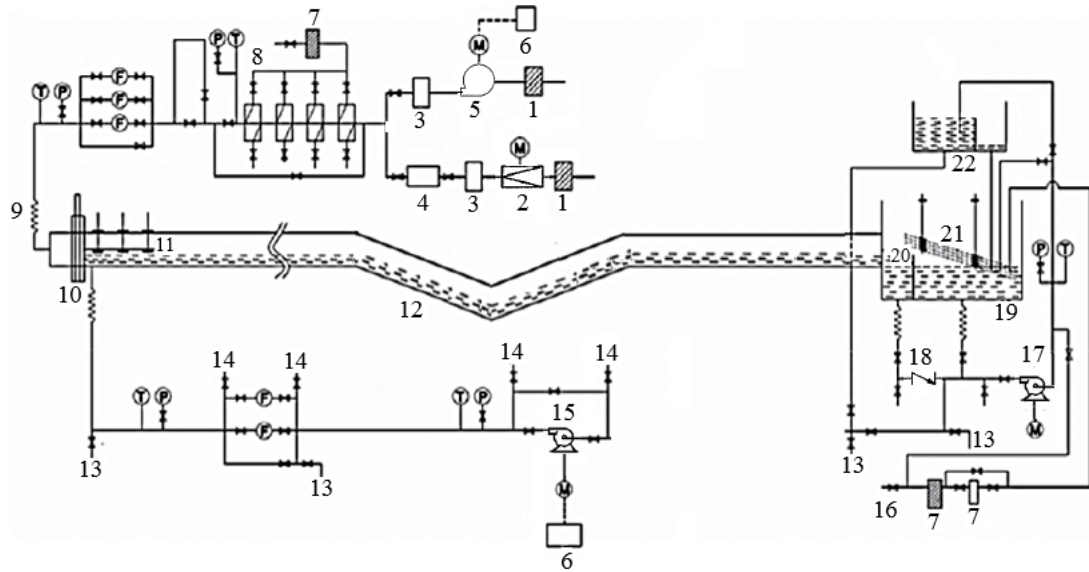
شکل ۲ تخریب اسلاگ در تپه [۴]

در مقابل، به واسطه محبوس شدن گاز در بالای تپه، ناحیه‌ای خشک در آن ایجاد می‌شود. به دنبال آن، اسلاگ‌ها با عبور از این ناحیه از بین می‌روند (شکل ۲) [۲].

جمع شدن مایع در نقطه پایین دره و محبوس شدن گاز در نقطه بالای تپه، سبب تقویت، تضعیف، شروع و یا از بین رفتن اسلاگ^۱ در مسیر می‌شود. با جمع شدن مایع در دره و عبور گاز بر روی آن، مایع برداشته می‌شود (شکل ۱). این امر سبب ایجاد اسلاگ با دو مکانیزم رشد موج^۲ و تجمع موج^۳ می‌شود [۳].

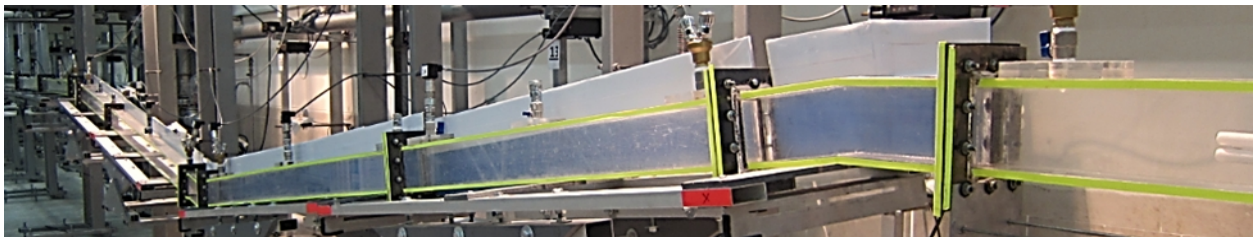
وجود الگوهای متفاوت و تغییر رفتار اسلاگ در قسمت‌های مختلف دره و تپه، پیش‌بینی جریان دوفازی در چنین مسیرهای را مشکل می‌سازد. از مطالعات نخستین در زمینه مسیرهای تپه‌ای و دره‌ای شکل، مطالعات رُس و کرول [۵] است. ایشان، تپه و دره با شیب 15° و 20° را مطالعه کردند و در مطالعات خود، وجود اسلاگ در قسمت سرایشی تپه و دره را گزارش نمودند. هر چند نتایج آن‌ها جالب بود، ولی برای محدوده کوچکی از سرعت‌های گاز و مایع انجام شده بود و به صورتی قوی قابل نتیجه‌گیری نبود. ژنگ و همکاران [۶] تپه و دره‌هایی با شیب قسمت اول 1° تا 5° بررسی کردند. ایشان، طول و فرکانس اسلاگ را در این مسیرها بررسی نمودند. ایشان تغییر طول و فرکانس اسلاگ را با عبور از قسمت‌های مختلف مسیر گزارش نمود. هنیو و رایسی [۷]، مطالعه تجربی و عددی روی دو دره متوالی انجام دادند. مطالعه آن‌ها در محدوده شیب‌های متوسط 15° و 25° انجام گرفت. ایشان با بررسی رفتار فشار جریان اسلاگ در دره، دو نوع رفتار را گزارش کردند. اسلاگ‌هایی که فشار آن‌ها برای مدت زمانی مقدار ثابتی دارند و اسلاگ‌هایی که چنین ویژگی را ندارند. الصفران و همکاران [۸]، مطالعه بر دره با شیب‌های جزئی $0.9/15^\circ$ و $1.9/3^\circ$ را به صورت آزمایشگاهی و مدل‌سازی انجام دادند. مطالعات ایشان نیز بر روی جریان اسلاگ متمرکز شده و تغییر رفتار اسلاگ طی عبور اسلاگ از دره گزارش شده است. به علاوه، فرکانس و طول اسلاگ‌ها در دبی-های متفاوت گزارش شده است. ماندال و همکاران [۹]، جریان در یک تپه با شیب 4° درجه را مطالعه نمودند. ایشان، سه رفتار متفاوت از اسلاگ در قسمت پایین‌رونده تپه گزارش نمودند. این رفتارها شامل اسلاگ بدون تخریب، با تخریب جزئی و کامل بودند. علاوه بر این مطالعات آزمایشگاهی، مطالعات دیگری به صورت تئوری نیز صورت گرفته است. محدودیت‌های اصلی این مطالعات را به صورت زیر می‌توان شمرد. در این مطالعات، فقط قسمت تپه و دره در نظر گرفته شده است. قسمت‌های افقی بالادست و پایین‌دست، کمتر مطالعه شده‌اند. فقط الگوی جریان اسلاگ و محدوده این الگو، مطالعه شده است. اغلب، پارامترهایی از قبیل طول و فرکانس اسلاگ

1- Slug
2- Wave Growth
3- Wave Coalescence



۱- فیلتر هوا، ۲- کمپرسور، ۳- مخزن هوا، ۴- تنظیم کننده فشار، ۵- دمنده، ۶- سیستم کنترل، ۷- فیلتر آب، ۸- قسمت خنک کننده هوا، ۹- لوله انعطاف پذیر، ۱۰- دریچه متحرک، ۱۱- ورق نازک فلزی، ۱۲- قسمت تست، ۱۳- جمع کننده آب، ۱۴- منفذ هوا، ۱۵- پمپ ۱، ۱۶- ورودی آب، ۱۷- پمپ ۲، ۱۸- شیر یک طرفه، ۱۹- مخزن ۲، ۲۰- صفحه کنترل سطح، ۲۱- ضربه گیر، ۲۲- مخزن ۱، F1: دی سنس، M: موتور الکتریکی، P: فشارسنج، T: دما

شکل ۳ طرحواره کلی سیستم آزمایشگاه

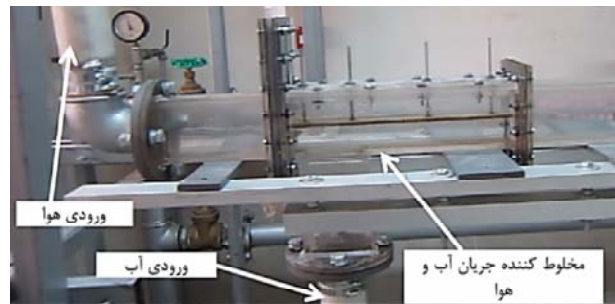


شکل ۴ نمایی از سیستم آزمایشگاه

ارتفاع کانال است. آزمایش‌ها برای سرعت ظاهری آب (U_{sl}) از 0.55 m/s تا 0.75 m/s و سرعت ظاهری هوا از 0.1 m/s تا 2.0 m/s انجام شده است. خواص فیزیکی هوا و آب بر مبنای خواص ذکر شده آن‌ها در [۱۱]، در دمای 27°C (دمای متوسط آزمایشگاه) در نظر گرفته شده است.

۲-۳- تشخیص الگوهای جریان

در این مطالعه، به منظور تشخیص الگوهای جریان از روش مشاهده و عکس برداری استفاده شده است. مسیر جریان، کانالی از جنس پلکسی گلاس است. بنابراین امکان مشاهده رفتار جریان در تمام مسیر وجود داشت. سرعت‌های بالا و همچنین قسمت سربالایی به واسطه برگشت مایع، تشخیص الگوها با مشاهده مشکل است. از این رو، با گرفتن فیلم و مشاهده چند باره آن‌ها الگوها تشخیص داده شدند. برای فیلم برداری، از دوربین کانن IXY 32s استفاده شد. از نقاط مختلف کانال، فیلم‌هایی با سرعت ۶۰ و ۱۲۰ و ۲۴۰ fps گرفته شد. به علاوه، از روش پردازش داده تبدیل فوریه سریع^۱ برای فهم بهتر الگوی جریان استفاده شد. روش تبدیل فوریه سریع مقادیر فشار در حوزه زمان را به حوزه فرکانس می‌برد. همباز و داکتر [۱۲] وجود یک بیشینه در منحنی‌های تبدیل فوریه سریع را دلیل بر الگوی اسلاگ می‌دانند. با ثبت فشار جریان در نقاط مختلف و به دست آوردن منحنی‌های تبدیل فوریه سریع آن‌ها، برای تشخیص الگوی جریان استفاده شد. بدین صورت که وجود یک بیشینه در منحنی تبدیل فوریه سریع بیان گر جریان اسلاگ است.



شکل ۵ سیستم مخلوط کننده آب و هوا

میزان عدم قطعیت اندازه‌گیری بر اساس [۱۰]، تخمین زده شد. بیشترین عدم قطعیت برای دی سنس آب، دی سنس هوا و سنسور فشار به ترتیب برابر بودند با 0.78% ، 1.1% و 1.9% . هر یک از مسیرهای تپه و دره متشکل از دو قسمت شیب دار رو به بالا و رو به پایین به طول $3/4 \text{ m}$ متر، قسمت افقی بالادست به طول $16/2 \text{ m}$ و قسمت افقی پایین دست به طول $12/1 \text{ m}$ است.

۲-۲- تقلیل داده‌ها

در مطالعه حاضر، نقشه‌های جریان دوفازی بر اساس سرعت‌های ظاهری گاز و مایع رسم شده‌اند. سرعت ظاهری عبارتست از تقسیم دی حجمی هر فاز بر سطح مقطع کل کانال که در رابطه (۱) نشان داده شده است.

$$U_{sl} = \frac{Q_l}{A}, U_{sg} = \frac{Q_g}{A} \quad (1)$$

A مساحت سطح کانال است که برابر است با $A = W \times H$ ؛ W عرض کانال و H

1- Fast Fourier Transform

به عبارتی، جریان‌هایی با اثر قابل ملاحظه گرانش (جریان داشتن گاز در بالای مایع) و سطح مشترک موجی بین گاز و مایع، به عنوان الگوی جریان موجی تشخیص داده شده است (شکل ۶-ب). جریان مه‌آلود: این جریان به صورت پخش شدن (پودر شدن) مایع در گاز مشاهده شد. مایع البته در برخی از موارد، بسته‌های حلقوی مایع به صورت ناپیوسته، با فاصله زمانی در جریان مه‌آلود دیده شد (شکل ۶-ت).

در شکل ۷ منحنی‌های فشار پایین سراسیمی تپه به همراه منحنیتبدیل فوریه سریع آن‌ها آمده است. همان‌طور که اشاره شد از این منحنی‌ها برای تشخیص الگوهای جریان استفاده شده است. به ویژه در سرعت‌های بالا که تشخیص جریان، تنها با مشاهده، مشکل است.

در شکل ۷-الف مشاهده می‌شود که تبدیل فوریه سریع منحنی فشار متناظر با جریان اسلاگ، مقدار بیشینه مشخصی دارد. با افزایش سرعت گاز و گذار به سمت جریان موجی و پس از آن جریان مه‌آلود، مقادیر منحنی تبدیل فوریه سریع پخش می‌شوند.

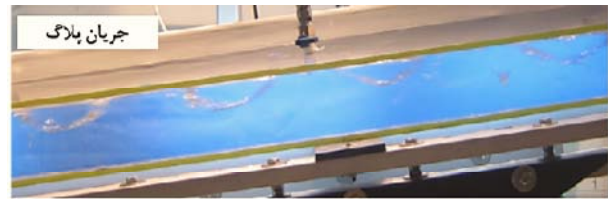
برای این جریان‌ها، تشخیص بیشینه مشکل است. در شکل ۸ نقشه الگوی جریان قسمت بالارونده دره $7/5^\circ$ رسم شده است. این نقشه، بر حسب سرعت ظاهری گاز و مایع رسم شده است. در شکل ۹ نقشه قسمت بالارونده دره و تپه $7/5^\circ$ ، با هم رسم شده است. با توجه به نقشه‌های شکل‌های ۸ و ۹، نکات زیر را می‌توان بیان نمود.

الگوی جریان کامل مایع برای تمامی دبی‌های مایع، هم برای تپه و هم دره، تا سرعت ظاهری تقریباً برابر 5 m/s مشاهده می‌شود. به عبارتی جریان گاز با سرعت کمتر از آن قادر به حرکت دادن مایع و غلبه بر قید سربالایی نیست. با رسیدن سرعت گاز به حدود 5 m/s ، جریان مایع با سرعت کمتر از 27 m/s به صورت ناگهانی به جریان در آمده و مسیر از مایع خالی می‌شود. در این محدوده از سرعت مایع، جریان از الگوی کامل مایع به صورت مستقیم به جریان اسلاگ گذار می‌کند.

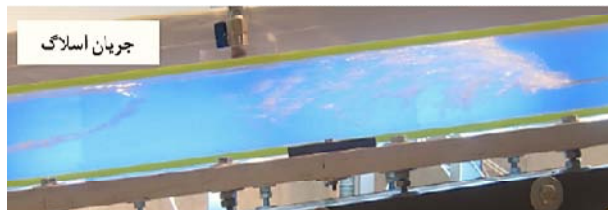
برای مایع با سرعت بیش‌تر از 27 m/s ابتدا گاز برای محدوده کوچکی از سرعت در جریان مایع نفوذ کرده و به صورت قالب‌هایی چسبیده به سقف کانال مشاهده می‌شود. به عبارتی در سرعت‌های بالاتر از 27 m/s مایع، الگوی جریان پلاگ وجود دارد. این امر از آن‌جا ناشی می‌شود که در سرعت‌های کمتر، مایع قادر به غلبه بر سربالایی نیست. با افزایش سرعت مایع، مایع در سربالایی به جریان در می‌آید و مقاومت کمتری در برابر جریان گاز می‌کند. از این رو در این سرعت‌های مایع، الگوی جریان کامل مایع ابتدا به جریان پلاگ‌گذار کرده و پس از آن جریان اسلاگ مشاهده می‌شود. از مقایسه نقشه جریان بالارونده تپه و دره مشاهده می‌شود که جابجایی مرزهای گذار بین الگوها در دره نسبت به تپه، کمی به سمت راست جابجا شده‌اند. دلیل این امر این است که در دره، جریان دوفازی قبل از ورود به سربالایی از سرپایینی می‌گذرد. در سرپایینی، به واسطه گرانش شدید، دو فاز از هم جدا می‌شوند. این جدایش سبب می‌شود تا اختلاط دو فاز در بالارونده دره نسبت به تپه به تأخیر افتد.

۳-۲- رفتار جریان اسلاگ در دره

اسلاگ‌ها با ورود به مسیر شیب‌دار رو به پایین، نسبت به دیگر مسیرها، بیشتر تخریب می‌شوند. افزایش تخریب در این قسمت، به دلیل ضخامت کم مایع جلوی اسلاگ و قوی‌تر شدن اثر گرانش است. در ادامه، اسلاگ تخریب شده با رسیدن به زانویی پایین دره، به واسطه تجمع مایع در آن، تقویت می‌شود. در مجموع، چهار رفتار برای اسلاگ در عبور از دره مشاهده شد.



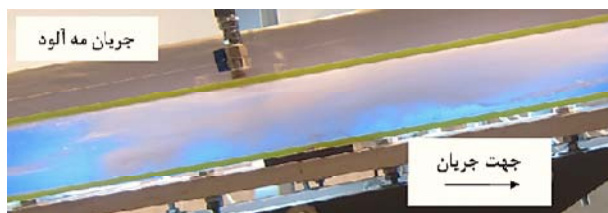
(الف)



(ب)



(پ)



(ت)

شکل ۶ الگوهای جریان بالارونده

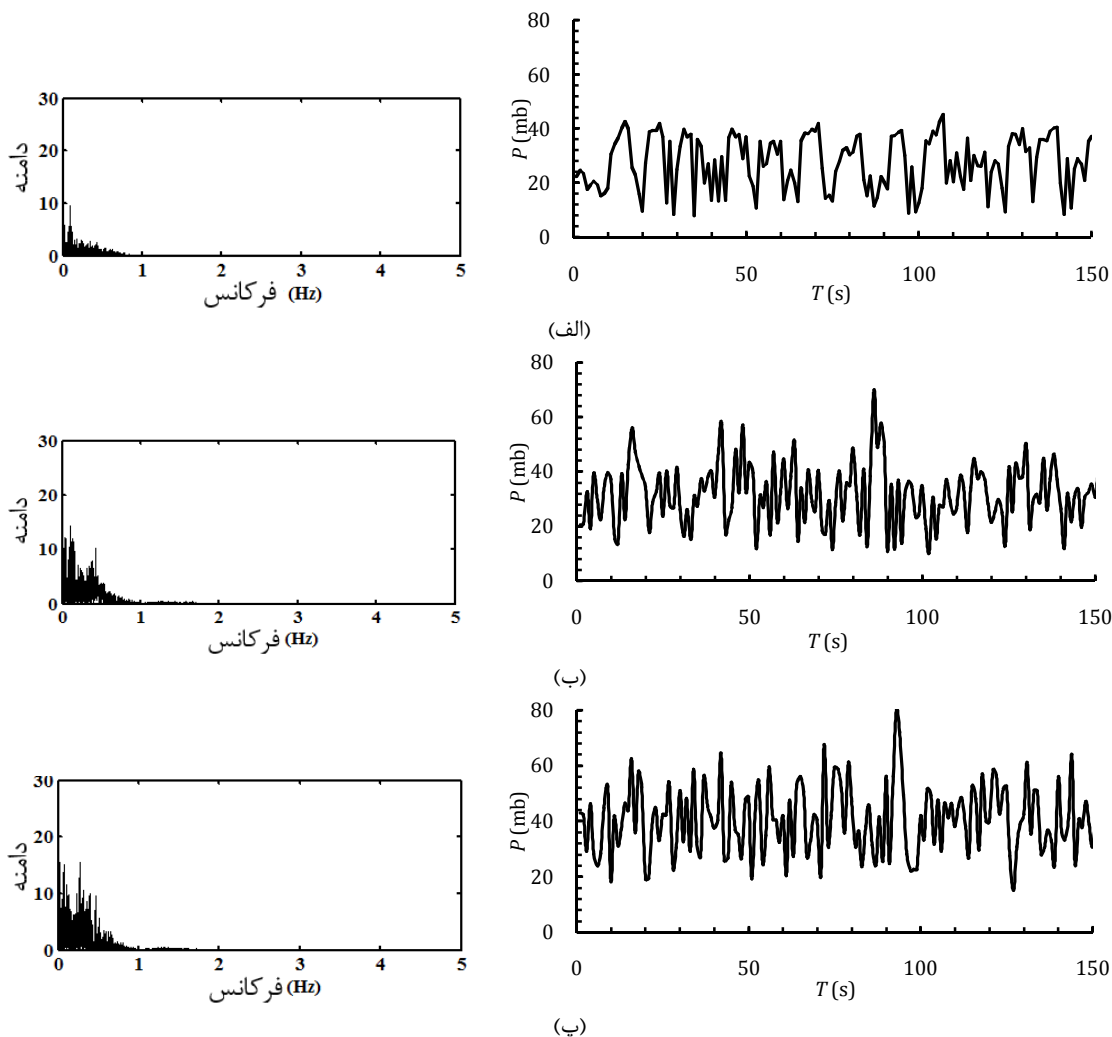
۳- نتایج و بحث

۳-۱- الگوهای جریان دوفازی مشاهده شده در بالارونده

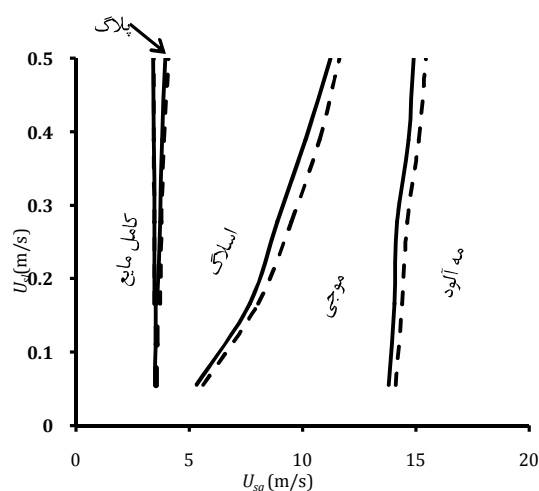
در مجموع، پنج الگو در قسمت بالارونده کانال مشاهده شد. این پنج الگو عبارتند از: کامل مایع^۱، پلاگ^۲، اسلاگ، موجی و مه‌آلود^۳. این الگوها در شکل ۶ ارائه شده‌اند.

جریان کامل مایع: وجود تپه و دره در مسیر سبب می‌شود تا مقاومتی در برابر عبور مایع ایجاد شود. به عبارتی، مایع در قسمت بالارونده برمی‌گردد و سطح کانال را مسدود می‌کند. در دبی‌های پایین گاز، جریان گاز قادر به غلبه بر این قید نیست. از این رو در این مقادیر از دبی‌های گاز، کانال پر شده از مایع مشاهده می‌شود. این الگو در نقشه‌ها با نام کامل مایع مشخص شده است. این رفتار، مشابه با رفتار گزارش شده توسط بندیکسن [۱۳] است. جریان پلاگ: این الگو به صورت قالب‌هایی از هوا، چسبیده به سقف کانال در جریان مایع مشاهده شد (شکل ۶-الف). جریان اسلاگ: در این الگوی جریان، لخته‌هایی از مایع وجود دارند که با فشار گاز پشت سرشان حرکت می‌کنند. جریان اسلاگ با اشکال مختلفی مشاهده شد. نقطه مشترک همه آن‌ها مسدود کردن سطح مقطع کانال با حجمی از مایع است. تفاوت آن‌ها در میزان گاز موجود در حجم مایع است (شکل ۶-ب). جریان موجی: جریان‌های موجی در این پژوهش بر مبنای تعریف کلمن [۱۴] تشخیص داده شده است.

1- Liquid Filled
2- Plug
3- Mist

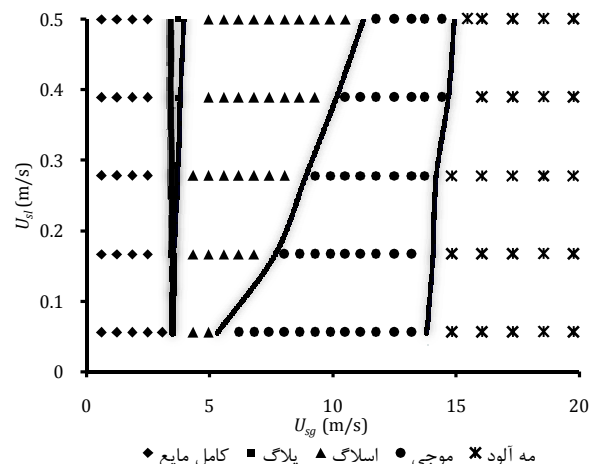


شکل ۷ منحنی فشار همراه با منحنی تبدیل فوری سریع آن‌ها برای آب با سرعت 0.27 m/s و هوا با سرعت: الف) 4.94 m/s ، ب) 8 m/s ، پ) 13 m/s



شکل ۹ نقشه جریان سربالایی تپه و دره

اسلاگ‌های این محدوده در بالادست، آهسته حرکت می‌کنند و نیروی اینرسی لازم برای غلبه بر نیروی گرانش را ندارند. در سرعت ثابت مایع، با افزایش سرعت گاز (افزایش نیروی اینرسی)، میزان تخریب کمتر می‌شود. از طرفی دیگر، مایع برگشتی از سربالایی در زانویی جمع شده و با عبور گاز بر آن، اسلاگ تولید می‌شود (شکل ۱۰-الف).



شکل ۸ نقشه جریان سربالایی دره

۳-۲-۱- اسلاگ نوع اول: تخریب کامل اسلاگ در سرایشی همراه با شروع اسلاگ در زانویی

این رفتار در سرعت‌های پایین گاز، برای تمام سرعت‌های مایع دیده می‌شود. بروز تخریب کامل اسلاگ در سرایشی، بیان‌گر غالب بودن نیروی گرانش در این محدوده از سرعت‌ها است.

سربالایی، سبب ایجاد اسلاگ در این قسمت در محدوده‌ای که در قسمت‌های دیگر اسلاگ وجود ندارد می‌شود. نکته دیگر، وسیع‌تر بودن محدوده اسلاگ پایین‌دست دره نسبت به بالادست است. با اتمام محدوده اسلاگ بالادست اسلاگ‌هایی با فرکانس زیاد در سربالایی تشکیل می‌شوند. این اسلاگ‌ها با ورود به پایین‌دست، در فاصله نزدیک به دره از بین می‌روند. برخی از این اسلاگ‌ها پس از مسافتی بر هم سوار شده و تشکیل اسلاگ می‌دهند (مکانیزم تجمع موج).

۳-۳- رفتار جریان اسلاگ در سراسیبه تپه

زمانی که اسلاگ از زانویی بالای تپه عبور می‌کند قسمتی از مایع در سربالایی از پشت اسلاگ جدا می‌شود. همچنین، قسمت جلوی اسلاگ با ورود به سراسیبه، به واسطه گرانش و ضخامت کم مایع، تخریب می‌شود. برای اسلاگ‌هایی که وارد سراسیبه می‌شوند، دو رفتار تخریب کامل و تخریب جزئی مشاهده شد.

۳-۳-۱- تخریب کامل اسلاگ

قسمت عمده‌ای از اسلاگ‌های سربالایی تپه با عبور از زانویی، در سراسیبه تخریب می‌شوند. تخریب کامل در تمام سرعت‌های مایع مشاهده شد. اگر محدوده سرعت گازی که اسلاگ در بالارونده وجود دارد، به سه قسمت کم، متوسط و زیاد تقسیم شود؛ تخریب کامل اسلاگ در سرعت‌های کم و زیاد گاز رخ می‌دهد. در سرعت‌های کم، قسمت زیادی از مایع در سربالایی چون توان غلبه بر گرانش را نداشته، بر می‌گردد و در سرپایینی نیز از جلوی اسلاگ فرو می‌ریزد (شکل ۱۲- الف). در سرعت‌های زیاد، اغلب اسلاگ‌ها در بالارونده تشکیل می‌شوند. این اسلاگ‌ها کف‌آلودند و در عبور از زانویی بالای تپه از بین می‌روند. در واقع، تخریب کامل در سرعت‌های پایین گاز به دلیل اینرسی کم اسلاگ‌ها و در سرعت‌های بالا به دلیل حجم کم مایع اسلاگ‌ها است.

۳-۳-۲- تخریب جزئی اسلاگ

در سرعت‌های متوسط گاز در محدوده‌ای که اسلاگ در بالارونده وجود دارد، اسلاگ‌ها اینرسی بیشتری نسبت به اسلاگ‌های با سرعت کم و حجم مایع بیشتری نسبت به اسلاگ‌های با سرعت زیاد دارند.

۳-۲- اسلاگ نوع دوم: تخریب جزئی اسلاگ در سراسیبه همراه با شروع و رشد اسلاگ در زانویی

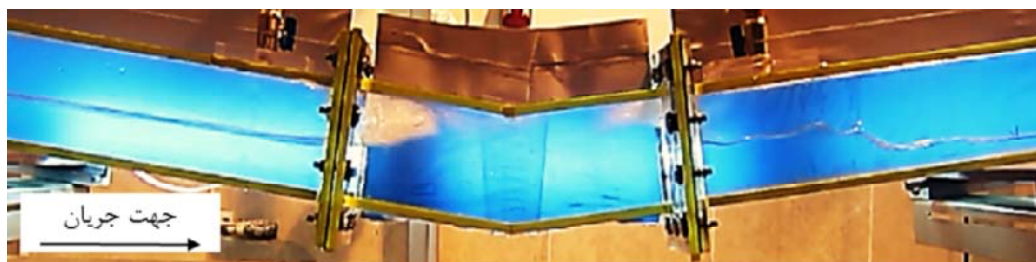
چنین رفتاری در سرعت‌های بالای مایع دیده می‌شود. محدوده سرعت گاز نسبت به حالت قبل کمی بیشتر است. با افزایش سرعت گاز، اسلاگ‌های بالادست زمانی که وارد سراسیبه می‌شوند با سرعت بالاتری عبور می‌کنند. سرعت بیشتر اسلاگ، سبب غلبه نیروی اینرسی بر گرانش می‌شود. لذا اسلاگ‌ها تخریب کمتری متحمل می‌شوند. این اسلاگ‌ها با رسیدن به زانویی پایین دره، مایع جمع شده در آن را بر می‌دارند و تقویت می‌شوند (شکل ۱۰- ب). از طرف دیگر، در فاصله زمانی بین این اسلاگ‌ها، تجمع مایع در زانویی سبب شروع اسلاگ‌های جدیدی در دره می‌شود.

۳-۲-۳- اسلاگ نوع سوم: تخریب جزئی اسلاگ در سراسیبه همراه با رشد و شروع اسلاگ در بالارونده

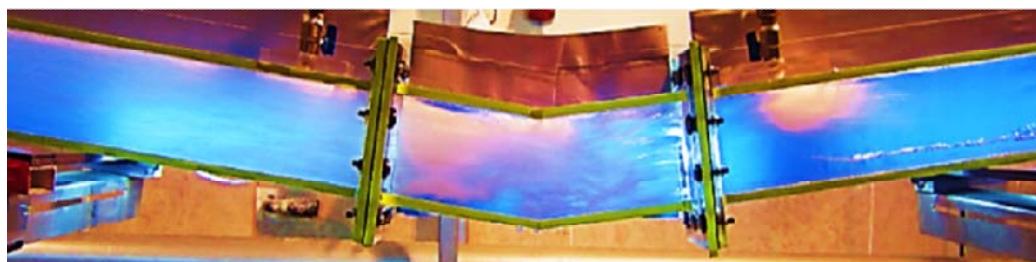
با افزایش سرعت گاز، هنوز تخریب جزئی اسلاگ بر سراسیبه حاکم است. چون سرعت گاز نسبت به حالت قبل بیشتر شده است، به مایع اجازه تجمع در زانویی داده نمی‌شود. در این حالت، شروع و رشد اسلاگ در ناحیه پایین-دست زانویی (بالارونده) رخ می‌دهد.

۴-۲-۳- اسلاگ نوع چهارم: شروع اسلاگ در بالارونده

با افزایش سرعت گاز، در قسمت افقی بالادست دره، اسلاگ تشکیل نمی‌شود. از این رو در سراسیبه، اسلاگ وجود ندارد. در بالارونده، به واسطه برگشت مایع، هنوز اسلاگ تشکیل می‌شود. ساز و کار تشکیل این اسلاگ‌ها، تجمع موج است. در بالارونده، امواجی تشکیل می‌شوند که به سقف کانال نمی‌رسند. این امواج، با سوار شدن بر امواج جلوی خود، رشد کرده و به سقف کانال می‌رسند. این اسلاگ‌ها بسیار کف‌آلود هستند و اغلب، پیش از خروج از دره از بین می‌روند. شکل ۱۱ نشان می‌دهد که محدودترین و وسیع‌ترین ناحیه اسلاگ به ترتیب مربوط به قسمت سراسیبه و بالارونده است. نیروی گرانش در سراسیبه سبب ریزش مایع از جلوی اسلاگ می‌شود. در سرعت‌های کم‌گاز، اسلاگ‌ها اینرسی لازم برای غلبه بر گرانش را ندارند. از این رو در این محدوده از سرعت‌ها، اسلاگ‌ها در طول سراسیبه به طور کامل تخریب می‌شوند. در سربالایی، برگشت مایع به واسطه گرانش و تجمع آن در طول



(الف)



(ب)

شکل ۱۰ رفتار جریان اسلاگ در دره؛ (الف) اسلاگ نوع اول، (ب) اسلاگ نوع دوم

از هریک از مسیرهای تپه و دره اندازه‌گیری شد. موقعیت این نقاط در شکل ۱۴ نشان داده شده است. شکل‌های ۱۵ و ۱۶ رفتار فشار نقاط ذکر شده را نشان می‌دهند. فشارها برای آب با سرعت 0.27 m/s به ازای سرعت‌های متفاوت هوا رسم شده‌اند. با توجه به این شکل‌ها، نکات زیر را می‌توان بیان نمود:

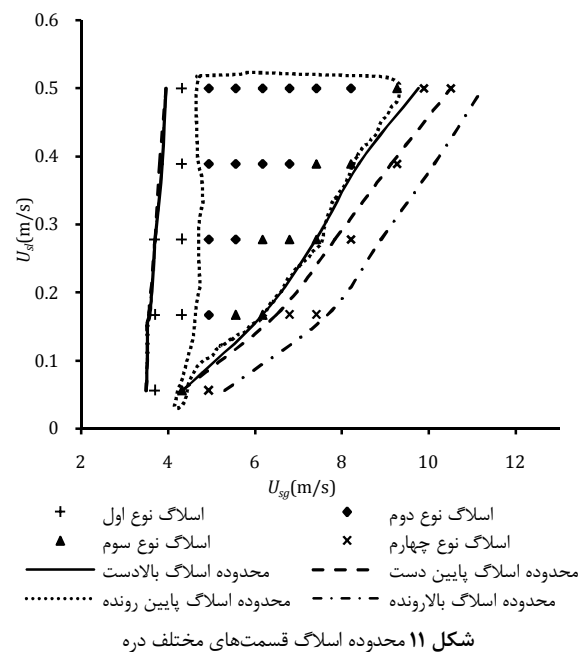
۱- در ناحیه اسلاگ، فرکانس نوسانات فشار نسبت به الگوهای دیگر کمتر است (شکل ۱۵-الف). فشار بین یک مقدار بیشینه و کمینه نوسان می‌کند. ثابت ماندن فشار بر مقدار بیشینه، دلیل بر وجود اسلاگ در مسیر است. وجود اسلاگ، سبب مسدود شدن کانال و فشردگی هوا می‌شود. فشردگی هوای پشت اسلاگ سبب افزایش هوا و ثابت ماندن آن تا تخریب اسلاگ در کانال می‌شود.

۲- مقدار کمینه فشار نقطه P3، تقریباً معادل صفر است. به عبارتی، فشار P3 در دوره‌هایی، بسیار ناچیز و در دوره‌های دیگری از زمان زیاد است (شکل ۱۵-الف). از این رفتار نتیجه می‌شود، دبی جریان در پایین‌دست نوسان شدیدی دارد. از آن‌جا که اغلب تجهیزات بر مبنای فشار و دبی ثابت طراحی می‌شوند، این رفتار سبب آسیب تجهیزات پایین‌دست تپه و دره می‌شود.

۳- با افزایش سرعت گاز و حاکم شدن الگوی موجی و مه‌آلود، فرکانس نوسانات زیاد می‌شود. این نوسانات، تقریباً حول یک مقدار ثابت صورت می‌گیرد (شکل ۱۵-پ). در این الگوها جریان، حالتی پایا تر نسبت به جریان اسلاگ دارد.

۴- فشارهای P1 و P2 تپه نسبت به دره، تحت الگوی جریان اسلاگ، مدت زمان بیشتری بر مقدار ثابت بیشینه می‌مانند. این امر بیان‌گر تخریب سریع‌تر اسلاگ در تپه نسبت به دره است.

۵- در سرعت‌های بالاتر گاز، جریان راحت‌تر از سربالایی عبور می‌کند. عدم برگشت جریان، سبب یکنواخت‌تر شدن فشار و دبی در طول کانال می‌شود. با افزایش سرعت گاز (حاکم شدن جریان موجی و مه‌آلود)، تغییرات فشار در نقاط مختلف از مسیر تپه و دره، مشابهت بیشتری به هم پیدا می‌کنند (شکل ۱۵-پ). بنابراین در سرعت‌های بالای گاز، اثر تپه و دره بر جریان یکسان است.

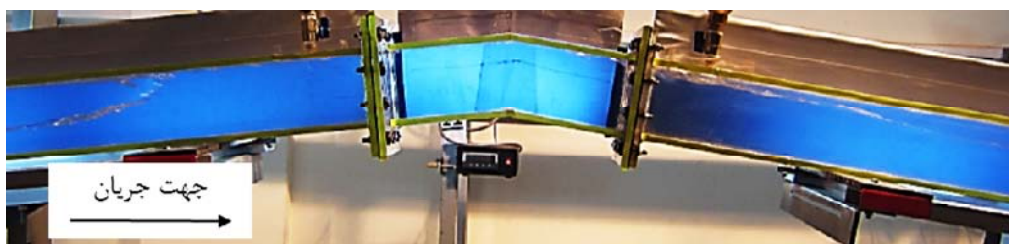


بنابراین در سراسی به واسطه اینرسی کافی بر گرانش غلبه کرده و به دلیل حجم کافی مایع، هویت اسلاگ بودن خود را حفظ می‌کنند (شکل ۱۲-ب). این رفتار در سرعت‌های بالای مایع، به واسطه مومنتم بیشتری که دارند، مشهودتر است. شکل ۱۳ نشان می‌دهد مشابه دره، محدودترین و وسیع‌ترین محدوده اسلاگ به ترتیب مربوط به قسمت سراسی و سربالایی است.

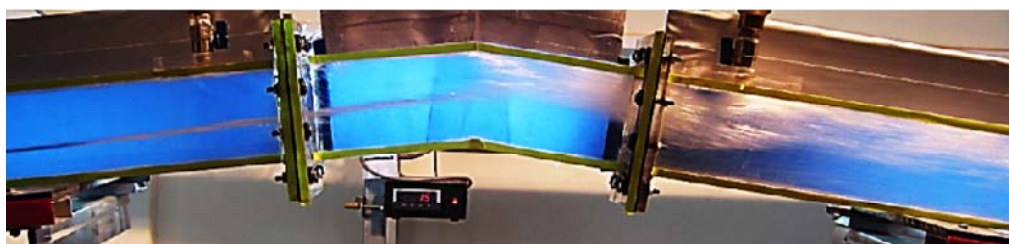
دلیل این امر همانند آنچه که برای دره بیان شد، است. برخلاف دره برای تپه، ناحیه اسلاگ پایین‌دست نسبت به بالادست کوچک‌تر است. اسلاگ‌ها قبل از وارد شدن به پایین‌دست از سراسی عبور می‌کنند و این سبب تخریب آن‌ها می‌شود. در حالی که در دره قبل از پایین‌دست از سربالایی عبور می‌کنند و تقویت می‌شوند.

۳-۴- بررسی فشار جریان

فشار جریان در طول کانال، تحت تأثیر جهت‌گیری جریان، رفتار متفاوتی خواهد داشت. برای مشاهده اثر تپه و دره بر رفتار فشار، فشار در سه نقطه

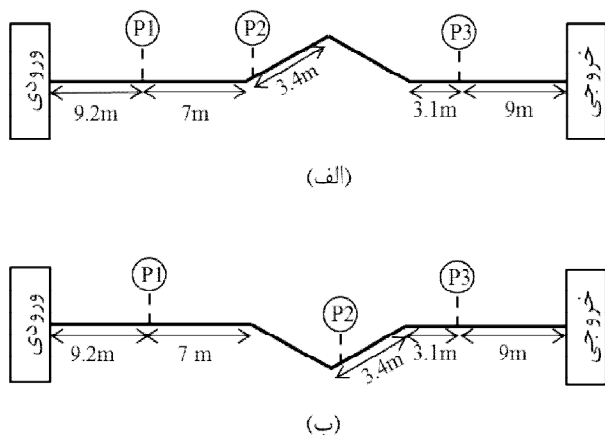


(الف)



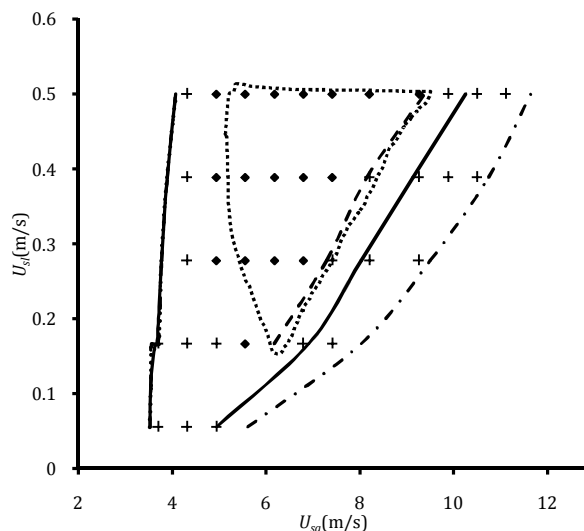
(ب)

شکل ۱۲ رفتار اسلاگ در تپه؛ (الف) تخریب کلی اسلاگ، (ب) تخریب جزئی اسلاگ



شکل ۱۴ موقعیت نقاطی که در آن‌ها فشار ثبت شده است؛ (الف) تپه، (ب) دره

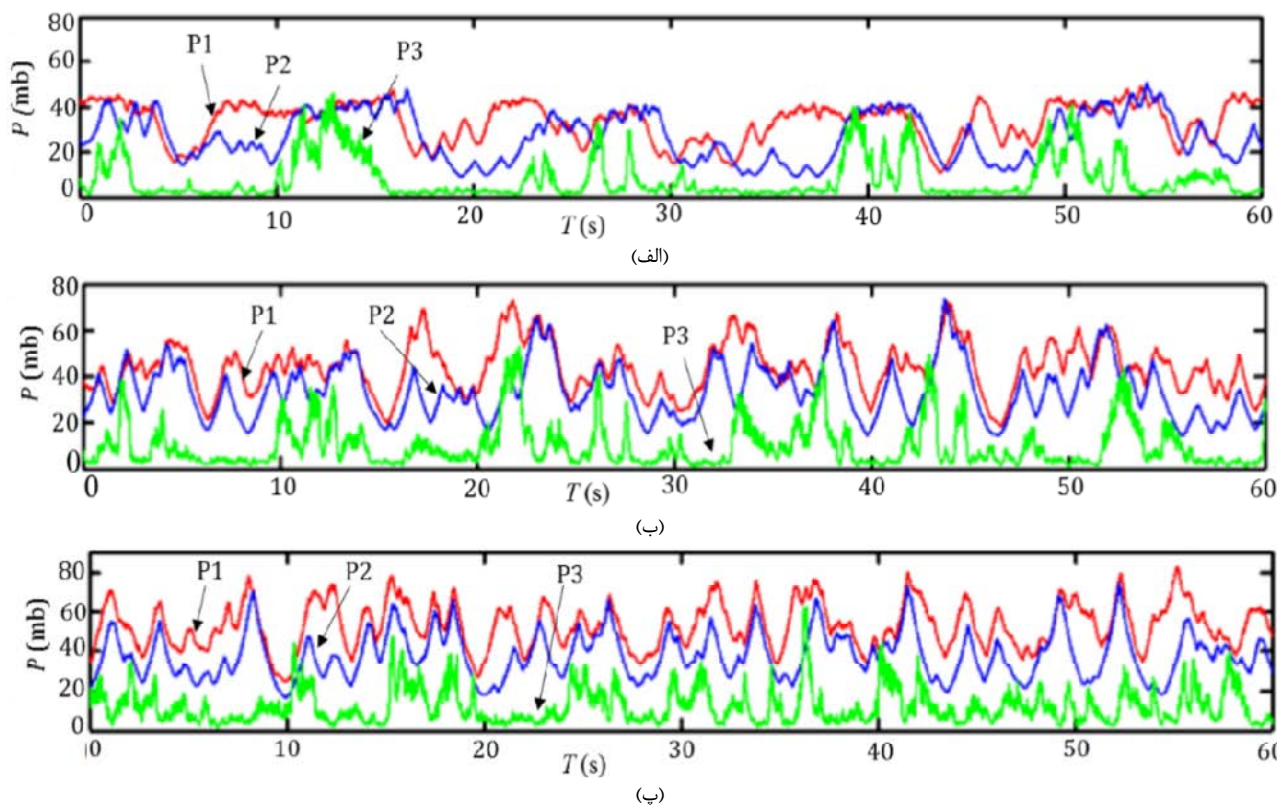
در مسیرهایی فاقد چنین قیدهایی، این الگو گزارش نشده است. وجود تپه و دره سبب می‌شود در یک دبی ورودی معین گاز و هوا، در قسمت‌های متفاوت مسیر، الگوهای متفاوت وجود داشته باشد. به علاوه، نوسانات شدید فشار را در کانال به دنبال دارد. این دو سبب مشکل شدن طراحی چنین مسیرهایی می‌شود. برای جریان اسلاگ در عبور از مسیر دره‌ای، چهار رفتار متفاوت مشاهده شد. این رفتارها عبارتند از: تخریب کامل اسلاگ در سرایشی همراه با شروع آن در زانویی، تخریب جزئی اسلاگ در سرایشی همراه با شروع و رشد آن در زانویی، تخریب جزئی همراه با رشد آن در زانویی و شروع اسلاگ در سربالایی دره. الگوهای جریان و رفتار فشار در سرعت‌های نسبتاً کم گاز، در تپه و دره با یکدیگر تفاوت دارد. با افزایش سرعت گاز، این تفاوت‌ها کمتر می‌شود. به عبارتی، در سرعت‌های بالاتر، تپه و دره تأثیر یکسانی بر جریان دارند.



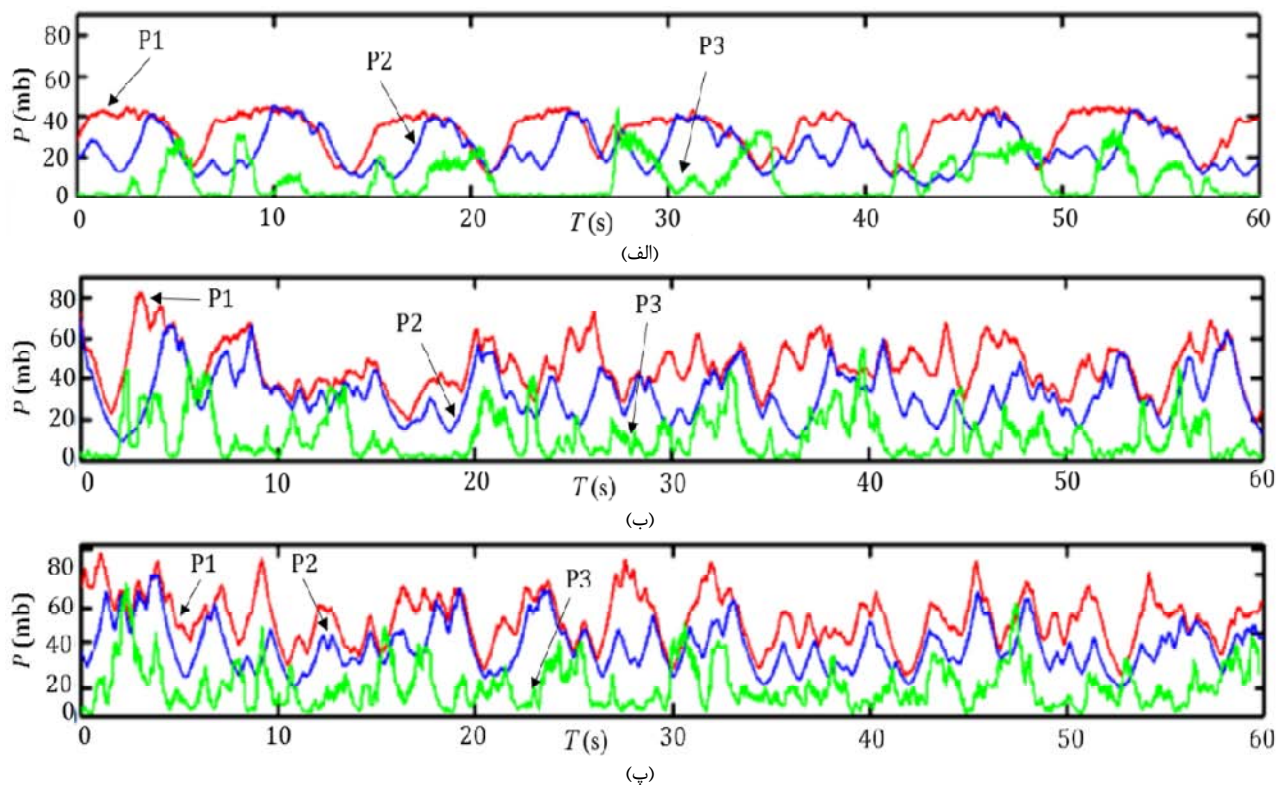
شکل ۱۳ محدوده اسلاگ در قسمت‌های مختلف تپه
 + تخریب کلی در سرایشی
 x تخریب جزئی در سرایشی
 o تخریب کامل در سرایشی
 — محدوده اسلاگ بالادست
 محدوده اسلاگ سربالایی
 - - - محدوده اسلاگ پایین دست
 - . - محدوده اسلاگ سربالایی

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، جریان دوفازی آب و هوا در کانال تپه‌ای و دره‌ای شکل به صورت آزمایشگاهی بررسی شد. حاصل بررسی نقشه‌های جریان دوفازی و رفتار فشار برای قسمت‌های مختلف تپه و دره، نتایج زیر است. پنج الگوی کامل مایع، پلاگ، اسلاگ، موجی و مه‌آلود مشاهده شد. جریان کامل مایع ناشی از وجود قید دره و تپه است.



شکل ۱۵ رفتار فشار در مسیر دره؛ برای آب با سرعت ۰/۲۷ m/s و هوا با سرعت ۴/۹۴ m/s (الف)، ۸/۷ m/s (ب)، ۱۳/۷ m/s (پ)



شکل ۱۶ رفتار فشار در مسیر تپه؛ برای آب با سرعت ۲/۷m/s و هوا با سرعت: الف) ۴/۹۴m/s، ب) ۸/۷m/s، پ) ۱۳/۷m/s

۵- مراجع

- [8] E. Al-Safran, E. Sarica, H. Zheng, J. Brill, Investigation of slug flow characteristics in the valley, *International Journal Multiphase Flow*, Vol. 31, pp. 337-357, 2005.
- [9] T. K. Mandal, M. K. Bhuyan, G. Das, P. K. Das, Effect of undulation on gas-liquid two-phase flow through a horizontal pipeline, *chemical engineering research and design*, Vol. 86, pp. 269-278, 2008.
- [10] SANSI/ASME, Measurement uncertainty, *PTC 19*, Part I, 1986.
- [11] F. Incropera and P. Dewitt, *Introduction to Heat Transfer*, third ed. John Wiley& Sons Inc, 1996.
- [12] M. G. Hubbard, A. E. Dukler, The characterization of flow regimes for horizontal two-phase flow, *Heat Transfer Fluid Mechanics Institute Stanford University Press*, 1966.
- [13] K. H. Bendiksen, D. Malnes, Experimental data on inlet and outlet effects on the transition from stratified to slug flow in horizontal tubes, *International Journal Multiphase flow*, Vol. 13, pp. 131-135, 1986.
- [14] J. W. Coleman, S. Garimella, Two-phase flow regimes in round, square and rectangular tubes during condensation of refrigerant R134a, *International Journal of Refrigeration*, Vol. 26, pp. 117-128, 2003.
- [1] M. R. Ansari, A. Daramizadeh, Numerical modeling of two-phase slug flow in horizontal and inclined channels using hyperbolic two fluid model, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 12, No. 4, pp. 34-47, 2011. (In Persian)
- [2] B. Faramarzi, M.R. Ansari, Hydrodynamic instability criterion of two-phase flow using PFM model, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 11, No. 2, pp. 107-118, 2011. (In Persian)
- [3] E. Al-Safran, Investigation and prediction of slug frequency in gas/liquid horizontal pipe flow, *Journal of Petroleum Science and Engineering*, Vol. 69, pp. 143-155, 2009.
- [4] Y. Taitel, C. Sarica, J. P. Brill, Slug flow modelling for downward inclined pipe flow: theoretical consideration, *Int. J. Multiphase Flow*, Vol. 26, pp. 833-844, 2000.
- [5] P. Crowley, C. Roth, Insignificant terrain effects in multiphase pipelines, *AGA Catalog L15526*, 1986.
- [6] G. Brill, J. P. Taitel, Y. Zheng, Slug flow behavior in a hilly terrain pipeline, *International Journal Multiphase Flow*, Vol. 20, pp. 63-79, 1993.
- [7] V. Raithby, G. Henau, A study of terrain induced slugging in two-phase flow pipelines, *Int. J. Multiphase Flow*, Vol. 21, pp. 365-379, 1995.