مجله مهندسی مکانیک مدرس، خرداد ۱۳۹۳، دوره ۱۴، شماره ۳، ص‌ص ۲۷-۳۵

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

بررسی تجربی وابستگی محل آغاز اسلاگ به شرایط بالادست دو فاز در کانال افقی طویل در جریان دو سیالی

پویان ادیبی[۱]، محمدرضا انصاری[۲*]

۱- دانشجوی دکتری مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

۲- دانشیار مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

* تهران، صندوق پستی ۱۴۳- ۱۴۱۱۵، mra_1330@modares.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: ۲۵ اردیبهشت ۱۳۹۲

پذیرش: ۰۲ تیر ۱۳۹۲

ارائه در سایت: ۲۱ اردیبهشت ۱۳۹۳

کلید واژگان:

محل آغاز اسلاگ

کسر حجمی

سرعت ورودی

کانال افقی بلند

جریان دو سیالی

چکیده

در این مقاله اثر سرعت‌های ظاهری گاز و مایع ورودی و برای نخستین بار اثر کسر حجمی مایع بر محل آغاز اسلاگ در جریان دوفازی آب و هوا به صورت تجربی بررسی و روابط تجربی برای محاسبه محل آغاز اسلاگ نیز ارائه شده است. محل انجام آزمایش‌ها، آزمایشگاه جریان چندفازی دانشگاه تربیت مدرس بوده است. آزمایش‌ها در سه کسر حجمی مایع ۰/۲۵، ۰/۵۰ و ۰/۷۵، در یک کانال افقی با مقطع مستطیلی به ابعاد $5\times10\,cm^2$ و طول ۳۶m از جنس پلکسی گلاس انجام شده است. محدوده سرعت ظاهری آب ۰/۱۱-۰/۵۶m/s و سرعت ظاهری هوا ۱/۸۸-۱۳m/s می‌باشد. نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد، در کسر حجمی مایع ۰/۲۵، وابستگی محل آغاز به تغییرات سرعت ظاهری گاز و مایع یکنوای صعودی است. در کسر حجمی مایع ۰/۵۰، محل آغاز اسلاگ با تغییرات سرعت ظاهری گاز و مایع نسبت مستقیم دارد اما تغییرات آن نسبت به کسر حجمی مایع ۰/۲۵ کمتر و ملایم‌تر است. در کسر حجمی مایع ۰/۷۵، وابستگی محل آغاز به تغییرات سرعت ظاهری گاز و مایع بصورت یکنوای نزولی است. زمانی که کسر حجمی دو فاز در کانال برابر باشد، اسلاگ‌های با فشار کمتر (ضعیف‌تر) و زمانی که کسر حجمی یک فاز بیش از دیگری باشد، اسلاگ‌های با فشار بیشتر (قوی‌تر) تشکیل خواهد شد.

Experimental Investigation of Slug Initiation to Upstream Conditions of Two Phases in Long Horizontal Channels in Two Fluids

Pouyan Adibi, Mohammad Reza Ansari*

Faculty 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 15 May 2013
Accepted 24 June 2013
Available Online 11 May 2014

Keywords:
Slug Initiation Position
Holdup
Inlet Velocity
Long Horizontal Channel
Two-Fluid Flow.

ABSTRACT

In this paper, the effect of gas and liquid inlet velocities and for the first time the effect of liquid hold up on slug initiation position are studied experimentally. Empirical correlations are also presented based on the obtained results. The tests are conducted for three liquid hold ups (0.25, 0.50 and 0.75) in a long horizontal channel made of Plexiglas with dimensions of $5\times10\,cm^2$ and 36m length in Multiphase Flow Lab. of Tarbiat Modares University. The superficial liquid and air velocities rated as to 0.11-0.56 m/s and 1.88-13 m/s, respectively. The obtained results show that as α_l=0.25, slug initiation position is increasing monotonically with U_{sl} and U_{sg}. During α_l=0.50, slug initiation position is increasing with U_{sl} and U_{sg} but the slope is smoother than α_l=0.25. For α_l=0.75, slug initiation position is decreasing monotonically with U_{sl} and U_{sg}. In the case of equal void fraction of phases, slugs are generated weakly (low pressure). However, for the unequal void fraction of phases strong slugs (high pressure) are formed.

۱- مقدمه

وقتی گاز و مایع بطور همزمان در یک لوله حرکت کنند، الگوهای مختلف جریان تشکیل می‌شود. جریان نوبتی یا اسلاگ رخداد بسیار شایعی در جریان دوفازی گاز- مایع درون لوله است [۱]. معمولاً، اسلاگ یک الگوی جریان نامطلوب ناشی از طبیعت ناپایدار آن، نوبتی بودن و افت فشار بالا است که باعث اختلال در انتقال جریان گاز- مایع می‌شود [۲].

به‌دلیل اهمیت انتقال گاز و مایع در خطوط لوله طولانی بهره‌برداری از مخازن زیر دریا، تحقیق بر روی جریان اسلاگ در طی دهه‌های گذشته تشدید شده است. آگاهی از رژیم جریان، یک پیش شرط لازم در محاسبات حرارتی و هیدرولیکی است. برای خطوط لوله انتقال نفت و گاز بخصوص با قطر بزرگ، پیش‌بینی اثرات شیب و چگالی گاز لازم است [۳]. حضور اسلاگ افت فشار را افزایش می‌دهد که منجر به کاهش تولید خواهد شد [۴].

جریان اسلاگ در بسیاری از کاربردهای مهندسی نظیر انتقال هیدروکربن‌ها در خطوط لوله نفت و گاز، جریان آب- بخار در بیشتر تجهیزات صنایع نفتی، نیروگاه‌های حرارتی و هسته‌ای نظیر بویلر، اواپراتور و کندانسور اتفاق می‌افتد.

وانگ و همکاران [۵] گزارش نمودند که به‌دلیل محدودیت‌های فضای عملیاتی اغلب تحقیقات تجربی جریان اسلاگ در لوله‌های کوتاه و در محدوده پایین نرخ‌های جریان گاز و مایع انجام شده است.

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

P. Adibi, M.R. Ansari, Experimental Investigation of Slug Initiation to Upstream Conditions of Two Phases in Long Horizontal Channels in Two Fluids, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 3, pp. 27-35, 2014 (In Persian)

آغاز اسلاگ را در جریان دوفازی آب و هوا در لوله افقی با قطر ۰/۰۹۵m بررسی کردند. ایشان نتیجه گرفتند که منشا تشکیل اسلاگ به سرعت ظاهری[1] گاز و نیز ارتفاع محلی مایع در کانال بستگی دارد.

داویز [۷] و هیل [۸] فرایند آغاز را با استفاده از یک لوله افقی پرسپکس[2] شفاف به طول ۱۰ متر و قطر داخلی ۰/۰۷۴ متر مطالعه نمودند. جریان لایه‌ای مایع و گاز در ورودی با استفاده از یک صفحه تقسیم کننده افقی ایجاد شد.

پریسیلا و همکاران [۹] اثر فشار و سرعت‌های ظاهری گاز و مایع را بر آغاز اسلاگ و نیز اسلاگ‌های هیدرودینامیکی تشکیل شده در پایین دست لوله را مورد بررسی تجربی قرار دادند. ایشان نتیجه گرفتند که بیشترین تعداد اسلاگ‌ها در ۳ متر ابتدایی لوله رخ می‌دهد. همچنین فرکانس تشکیل اسلاگ بطور ضعیفی تابع فشار است. اگرچه فشار بالاتر، آغاز اسلاگ را به تأخیر می‌اندازد.

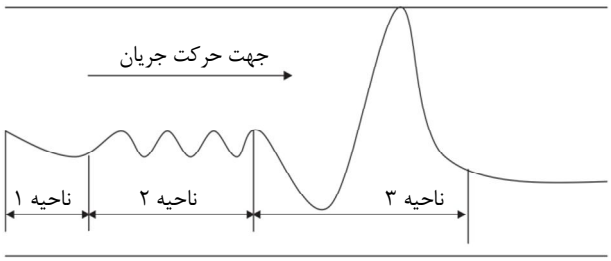
از این‌رو در این تحقیق اثرات کسر حجمی مایع ورودی، سرعت ظاهری گاز و مایع ورودی بر محل آغاز اسلاگ در کانال افقی با طول کافی حتی برای تشکیل چندین اسلاگ بصورت تجربی بررسی شده است. لازم به‌ذکر است که تأثیر کسر حجمی مایع بر آغاز اسلاگ برای نخستین بار در این تحقیق لحاظ و بررسی شده است.

۲- فیزیک پدیده اسلاگ

انصاری [۱۰] بیان نمود که وقتی سیال گاز بر روی سیال مایع جریان یابد، تعدادی امواج با طول موج کوتاه در سطح مشترک ایجاد می‌شود. یکی از این امواج با طول موج کوتاه رشد نموده و اسلاگی با طول موج بلند را ایجاد می‌کند. انصاری جریان اسلاگ را بطور تجربی در کانال مستطیلی به طول ۱۰m و سطح مقطع ۵×۱۰cm² بررسی نمود. وی نتیجه گرفت که یک واحد موج اسلاگ از سه ناحیه اصلی تشکیل شده است (شکل‌های ۱ و ۲).

در ناحیه اول، کسر حجمی مایع بدلیل جریان گاز، اندکی نسبت به شرایط اولیه کاهش می‌یابد. در ناحیه دوم تعدادی امواج با طول موج کوتاه تشکیل می‌شود. یکی از این موج‌های کوتاه در ناحیه سوم رشد می‌کند که در نهایت منجر به تشکیل اسلاگ خواهدشد.

انصاری نتیجه گرفت که دلیل تشکیل اسلاگ (که یک موج با طول موج بلند است) امواج کوتاهی است که پیش از ایجاد اسلاگ در ناحیه دوم ظاهر می‌شود.



شکل ۱ طرح‌واره سه ناحیه اصلی در جریان اسلاگ [۱۰]

شکل ۲ سه ناحیه اصلی در جریان اسلاگ، α_l=۰/۷۵، U_{sl}=۰/۲۲m/s و U_{sg}=۵/۰۹m/s، (آزمایشگاه جریان چندفازی دانشگاه تربیت مدرس)

1- Superficial
2- Perspex

ساز و کار رشد امواج کوتاه، ناپایداری کلوین- هلمهولتز[3] می‌باشد.

۲-۱- معیار ناپایداری

در امواج بلند با دامنه کوتاه، معیار ناپایداری کلوین- هلمهولتز کلاسیک بصورت تئوری به فرم (۱) داده شده است. محققان زیادی از جمله هلمهولتز [۱۱]، کلوین [۱۲]، لمب [۱۳] و مایلن- تامسون [۱۴] به این معیار اشاره کرده‌اند:

$$U_g - U_l \geq \sqrt{\frac{(\rho_l - \rho_g) g h_g}{\rho_g}} \quad (۱)$$

رابطه (۱) سرعت گاز را برای تشکیل جریان اسلاگ با ضریب دو فراپیش‌بینی[4] می‌کند.

کوردیبان و رانوف [۱۵] بیان نمودند که در حالت جریان دوفازی در یک کانال بسته، تاثیر ناپایداری کلوین- هلمهولتز بطور موثری با کم شدن کسر حجمی گاز زیاد می‌شود. ایشان امواج با دامنه محدود را ملاحظه کردند و به یک معیار تقریبی تشکیل اسلاگ رسیدند (رابطه ۲).

$$(U_g - U_l)^2 \geq \frac{\rho_l g}{\rho_g k} \times \frac{1}{\coth(k h_g - 0.9) + 0.45 \coth^2(k h_g - 0.9)} \quad (۲)$$

ایشان رابطه تجربی بین دامنه و طول موج را جهت بدست آوردن این رابطه بکار بردند. ارتفاع سیال هوا و طول موج نیز به‌منظور استفاده از این رابطه نیاز است.

والیس و دابینز [۱۶] رابطه (۳) را با استفاده از داده‌های تجربی برای تشکیل اسلاگ پیشنهاد دادند:

$$U_g - U_l \geq 0.5 \sqrt{\frac{(\rho_l - \rho_g) g h_g}{\rho_g}} \quad (۳)$$

تایتل و داکلر [۱۷] یک مدل تئوری پیش‌بینی گذار رژیم جریان دوفازی افقی با ملاحظه اختلاف فشار بر روی سطح موجی به واسطه اثر برنولی پیشنهاد دادند. وقتی اختلاف فشار به اندازه کافی بزرگ باشد که نیروی برا[5] بر نیروی جاذبه وارده بر موج غلبه کند موج بلند شده و اسلاگ تشکیل می‌شود. رابطه (۴) مقدار سرعت گاز لازم برای شرایط آغاز ناپایداری هیدرولیکی را ارائه می‌دهد.

$$U_g \geq K_1 \sqrt{\frac{(\rho_l - \rho_g) g h_g}{\rho_g}} \quad (۴)$$

که مقدار K_1 عبارت است از:

$$K_1 = \sqrt{\frac{2}{\frac{h_g}{h_c}\left(\frac{h_g}{h_c} + 1\right)}} \quad (۵)$$

رابطه (۴) در حالت تشکیل اسلاگ بین صفحات موازی افقی معتبر است. در حالت تشکیل اسلاگ در لوله افقی و نزدیک به افقی از رابطه (۶) استفاده می‌شود.

$$U_g \geq K_2 \sqrt{\frac{(\rho_l - \rho_g) g \cos\theta \, A_g}{\rho_g \frac{dA_l}{dh_l}}} \quad (۶)$$

که $K_2 = \frac{A_g}{A_g}$ می‌باشد.

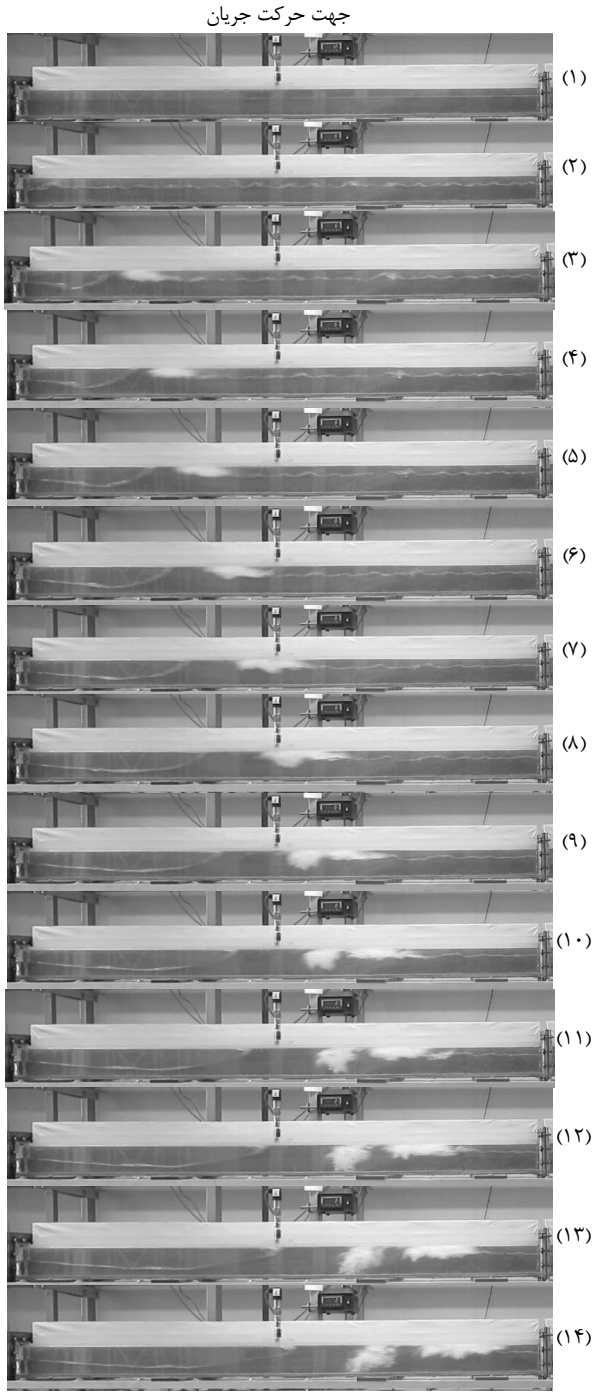
ایشان با استفاده از بحث‌های کیفی K_1 و K_2 را طبق رابطه (۷) تخمین زدند.

که با نتیجه والیس و دابینز [۱۶] زمانی‌که $\frac{h_l}{D} = 0.5$ سازگار است.

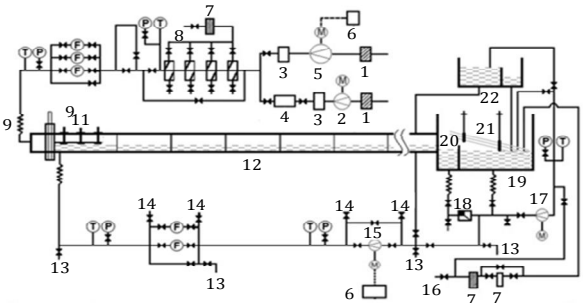
3- Kelvin- Helmholtz
4- Over Predict
5- Lift

$$K_1, K_2 = 1 - \frac{h_l}{D} \quad (۷)$$

شکل ۳ روند آغاز ناپایداری سطح مشترک صاف آب و هوا، تشکیل امواج با طول موج کوتاه، رشد یکی از امواج، تشکیل اسلاگ و رشد اسلاگ و حرکت آن به پایین دست را نشان می‌دهد.



شکل ۳ سطح مشترک صاف آب و هوا (۱)، آغاز ناپایداری سطح مشترک (۲)، تشکیل اسلاگ (۳) و رشد اسلاگ (۴-۱۴) در ابتدای کانال، α=۰/۵۰ ، U_{sl}=۰/۲۲m/s و U_{sg}=۳/۲۰m/s، (آزمایشگاه جریان چندفازی دانشگاه تربیت مدرس)



شکل ۴ طرحواره آزمایشگاه جریان چندفازی دانشگاه تربیت مدرس

۱: فیلتر هوا ۲: کمپرسور ۳: مخزن هوا ۴: تنظیم کننده فشار ۵: دمنده ۶: سیستم کنترل ۷: فیلتر آب ۸: مدار خنک کاری هوا ۹: لوله انعطاف پذیر ۱۰: دریچه لغزشی ۱۱: صفحه فلزی نازک ۱۲: بخش آزمایش ۱۳: تخلیه ۱۴: ونت ۱۵: پمپ۱ ۱۶: آب مکمل ۱۷: پمپ۲ ۱۸: شیر یکطرفه ۱۹: مخزن۲ ۲۰: صفحه کنترل کننده سطح آب ۲۱: دمپر اسلاگ ۲۲: مخزن۱ F: دبی‌سنج M: موتور برقی P: فشارسنج T: دماسنج

۳- سیستم آزمایشگاهی

طرحواره سیستم آزمایشگاهی مورد استفاده در این پژوهش در شکل ۴ نشان داده شده است.

بطور معمول به دلیل دسترسی آسان، غیر قابل اشتعال و غیر سمی بودن از هوا به عنوان گاز و از آب به عنوان مایع در بررسی جریان دوفازی استفاده می‌شود.

آزمایش‌ها در کانال افقی با مقطع مستطیلی به ابعاد ۵×۱۰cm² (قطر معادل هیدرولیکی ۶/۶۷cm) و به طول ۳۶m (طول معادل ۵۴۰D) از جنس پلکسی گلاس[1] انجام شده است. دیواره شفاف کانال امکان بررسی دیداری از وضعیت جریان داخل کانال را به ناظر بیرونی ارائه می‌دهد. کانال بر روی تعدادی تکیه‌گاه فلزی قرار دارد. هر تکیه‌گاه بطور مجزا قابلیت تنظیم شیب ۸۹-۰ درجه نسبت به افق را دارد.

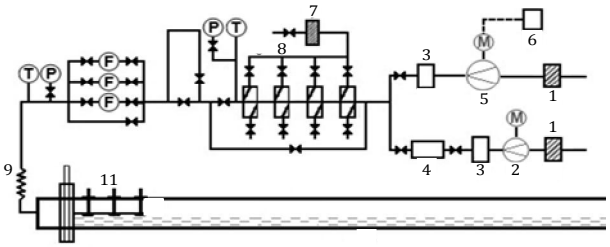
برای تأمین هوا از کمپرسور و دمنده و برای تأمین آب از پمپ گریز از مرکز استفاده شده است. هوا و آب بعد از رسیدن به قسمت مخلوط کننده به صورت همسو وارد کانال و سپس با عبور از قسمت کانال آزمایش وارد مخزن روباز می‌شود. در این مخزن، هوا و آب از هم جدا می‌شود.

۳-۱- خط تأمین هوا

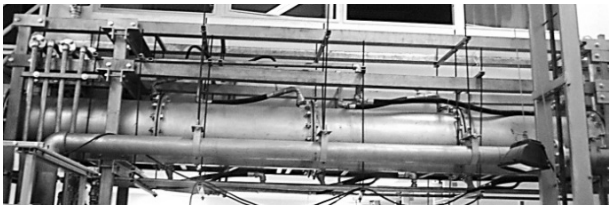
برای ایجاد جریان هوا با دبی مناسب از یک کمپرسور با توان ۴۵kW استفاده شده است. هوای مکیده شده از محیط آزمایشگاه بعد از عبور از فیلتر هوا وارد کمپرسور و به داخل مخزن هوا فرستاده می‌شود (شکل ۵). هوای درون مخزن که در دما و فشار بالا قرار دارد به منظور کاهش دما و هم‌دما شدن با آب از یک سیستم خنک‌کاری عبور می‌کند (شکل ۶). این‌کار به دلیل شرط تعادل دمایی بین دوفاز مایع و گاز در ورودی کانال انجام می‌گیرد. هوا بعد از عبور از سیستم خنک‌کاری به سمت دبی‌سنج‌های هوا جریان یافته و بعد از اندازه‌گیری دمای هوا در ورودی مخلوط کننده، به وسیله لوله قابل انعطاف از بالا وارد قسمت مخلوط‌کننده می‌شود.

با توجه به این‌که آزمایش‌ها باید در سرعت‌های ظاهری مختلف هوا انجام شود و همچنین به منظور کنترل‌پذیری بیشتر سیستم خط تأمین هوا، از یک برگرداننده[2] برای کنترل دور موتور استفاده شده است. به کمک برگرداننده می‌توان دبی را در هر مقدار مشخص تأمین و تنظیم کرد.

1- Plexiglas
2- Inverter



شکل ۵ طرحواره خط تامین هوا آزمایشگاه جریان چندفازی دانشگاه تربیت مدرس



شکل ۶ مدار خنک‌کاری هوا آزمایشگاه جریان چندفازی دانشگاه تربیت مدرس

۳-۲- خط تأمین آب

برای تأمین آب از دو پمپ و دو مخزن استفاده شده است (شکل‌های ۷ تا ۹). آب ورودی به مخزن شماره ۲ توسط پمپ شماره ۲ وارد مخزن شماره ۱ می‌شود که در ارتفاع حدود ۶ متری از زمین قرار دارد. مخزن شماره ۱ نسبت به مخزن شماره ۲ کوچک‌تر است و دارای یک تیغه عمودی جداکننده است که سطح مایع را کنترل می‌کند. ابعاد این قسمت از مخزن طوری طراحی شده است که قسمت اول آن که هد[1] پمپ شماره ۱ را تأمین می‌کند همواره پر باشد. آب مازاد بعد از ریختن به قسمت دوم مخزن شماره ۱ از طریق یک لوله وارد قسمت دوم مخزن شماره ۲ می‌شود. آب لازم برای آزمایش ازطریق پمپ شماره ۱ و از مخزن شماره ۱ به داخل سیستم رانده می‌شود و این امر باعث می‌شود که دبی آب در طی آزمایش بدلیل ثابت ماندن هد پمپ شماره ۱، ثابت بماند.

دبی مورد نظر برای آزمایش توسط خط کنارگذر[2] و شیرهای موجود بعد از پمپ شماره ۱ و همچنین یک برگرداننده که به پمپ شماره ۱ مرتبط است، کنترل می‌شود.

آب بعد از عبور از پمپ شماره ۱ و شیرهای بعد از آن به سمت دبی‌سنج آب رانده می‌شود. بعد از اندازه‌گیری دما و فشار به وسیله یک لوله قابل انعطاف و از پایین، آب وارد مخلوط‌کننده ورودی می‌شود.

باتوجه به آنچه که ذکر شد، آب موجود در سیستم دو چرخه مجزا را طی می‌کند. یکی از این چرخه‌ها شامل چرخه اصلی است که دبی آب مورد نیاز برای آزمایش را فراهم می‌کند و چرخه دوم، آب مازاد موجود درمخزن را برای ثابت نگه داشتن هد پمپ شماره ۱ به گردش در می‌آورد.

۳-۳- سیستم‌های اندازه‌گیری

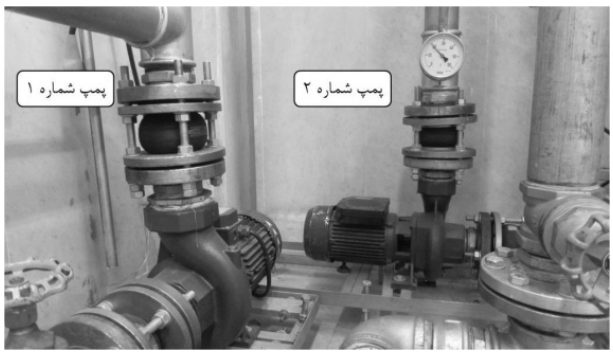
دبی‌سنج هوا از نوع گردابه‌ای[3] با دقت $۰/۰۱m^3/hr$ می‌باشد. دبی‌سنج آب از نوع الکترومغناطیسی با دقت $۰/۰۱m^3/hr$ است که در مسیر آب قبل از ورود به مخلوط‌کننده قرار دارد. با اندازه‌گیری دبی هوا و آب و همچنین مشخص بودن ابعاد کانال، سرعت ظاهری هریک از فازها در ورودی بدست می‌آید.

میزان فشار موضعی جریان در طول کانال توسط ۱۳ مبدل فشار پیزوالکتریک[4] اندازه‌گیری می‌شود (جدول ۱). محدوده اندازه‌گیری مبدل‌های فشار ۲۵۰mbar-۰ گیج[5] با خطای ۱٪ می‌باشد.

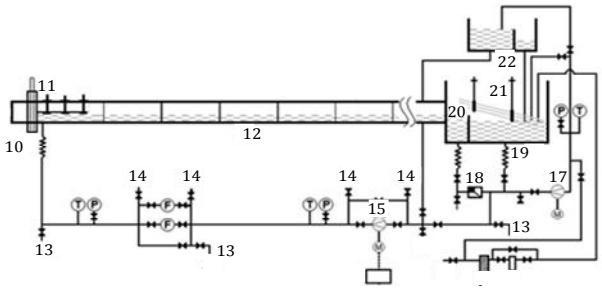
1- Head
2- Bypass
3- Vortex
4- Piezoelectric Pressure Transducer
5- Gauge

جدول ۱ مکان مبدل‌های فشار در طول کانال

ردیف	مکان (m)	مکان بی‌بعد شده با قطر هیدرولیکی کانال
۱	۱/۰۰	۱۴/۹۹
۲	۳/۸۰	۵۶/۹۷
۳	۵/۴۰	۸۰/۹۶
۴	۹/۴۰	۱۴۰/۹۳
۵	۱۲/۴۰	۱۸۵/۹۱
۶	۱۴/۶۰	۲۱۸/۸۹
۷	۱۶/۶۰	۲۴۸/۸۸
۸	۱۸/۶۰	۲۷۸/۸۶
۹	۲۰/۶۰	۳۰۸/۸۵
۱۰	۲۳/۸۰	۳۵۶/۸۲
۱۱	۲۵/۸۰	۳۸۶/۸۱
۱۲	۲۹/۸۰	۴۴۶/۷۸
۱۳	۳۳/۸۰	۵۰۶/۷۵



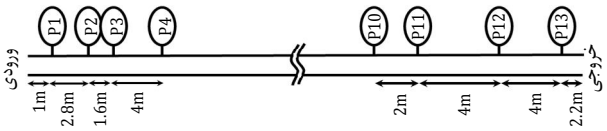
شکل ۷ پمپ های شماره ۱ و۲ آزمایشگاه جریان چندفازی دانشگاه تربیت مدرس



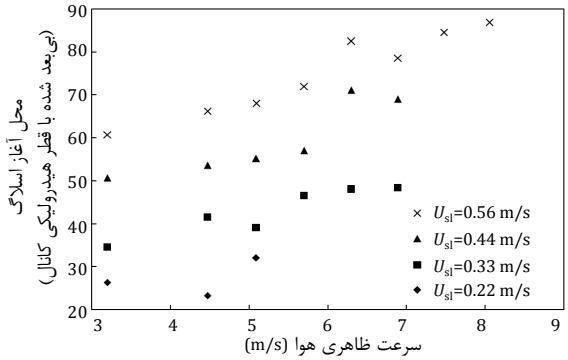
شکل ۸ چرخه تأمین آب آزمایشگاه جریان چندفازی دانشگاه تربیت مدرس

شکل ۹ مخازن شماره ۱ و ۲ چرخه تامین آب آزمایشگاه جریان چندفازی دانشگاه تربیت مدرس

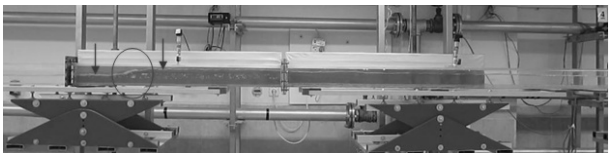
از بین این ۱۳ مبدل فشار، ۳ مبدل نخست به دلیل اندازه‌گیری فشار در محدوده تشکیل اسلاگ، اهمیت بیشتری دارند. نحوه چیدمان مبدل‌های فشار در شکل ۱۰ نشان داده شده است.



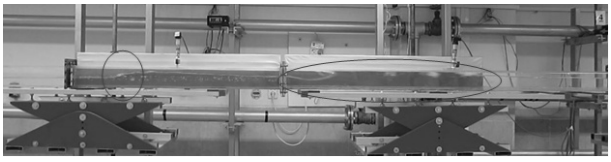
شکل ۱۰ طرحواره قرارگیری مبدل‌های فشار در طول کانال آزمایشگاه جریان چندفازی دانشگاه تربیت مدرس



شکل ۱۱ محل آغاز بی‌بعد اسلاگ در سرعت‌های ظاهری مختلف آب و هوا در کسر حجمی مایع ۰/۲۵



شکل ۱۲ پرش هیدرولیکی در α_l=۰/۲۵ به همراه افزایش سطح مایع، U_{sl}=۰/۵۶m/s و U_{sg}=۳/۲۰m/s، (آزمایشگاه جریان چندفازی دانشگاه تربیت مدرس)



شکل ۱۳ اسلاگ تشکیل شده بعد از پرش هیدرولیکی در α_l=۰/۲۵، U_{sl}=۰/۵۶m/s و U_{sg}=۳/۲۰m/s، (آزمایشگاه جریان چندفازی دانشگاه تربیت مدرس)

جدول ۲ بیشینه و کمینه کلی مکان آغاز اسلاگ (α_l=۰/۲۵)

شماره آزمایش	سرعت ظاهری مایع (m/s)	سرعت ظاهری گاز (m/s)	ضریب لغزش	مکان بی‌بعد آغاز اسلاگ	توضیحات
۱	۰/۲۲	۴/۴۷	۲۰/۳۲	۲۳/۲۵	کمینه کلی
۲۸	۰/۵۶	۸/۰۵	۱۴/۳۷	۸۷	بیشینه کلی

با توجه به ثبت داده‌های فشار موضعی توسط برنامه رایانه‌ای در هر آزمایش و فراوانی آنها، در ادامه نمودارهای فشار ۳ مبدل نخست در یک آزمایش از هر کسر حجمی مایع بعنوان نمونه آورده می‌شود.

جهت ثبت تصاویر متوالی و فیلم از جریان در آزمایش‌های مختلف از دوربین فیلم‌برداری کانن[1] استفاده شده است.

۴-۳- روند انجام آزمایش

ابتدا مسیر آب باز و آب وارد کانال می‌شود تا کسرحجمی اولیه (۰/۲۵، ۰/۵۰ و ۰/۷۵) در ابتدای آزمایش فراهم شود و جریان آب به حالت پایدار برسد. بعد از تثبیت دبی آب در یک مقدار مشخص، سرعت دورانی کمپرسور توسط برگرداننده درحداقل میزان لازم برای هوادهی جهت ایجاد جریان اسلاگ قرار داده می‌شود. بعد از رسیدن به حالت پایا در حدود ۱ دقیقه فیلم‌برداری از ابتدای کانال انجام می‌شود. برای بررسی سرعت‌های ظاهری بالاتر هوا، در حالی‌که دبی آب ثابت است، سرعت دورانی موتور با گام[2] ۰/۵Hz افزایش داده و در هر گام بعد از رسیدن به حالت پایدار، فیلم‌برداری و داده‌برداری انجام می‌شود. این مراحل برای دبی‌های بالاتر آب تا جایی‌که رژیم اسلاگ ایجاد شود، تکرار می‌شود. نتایج حاصل از اندازه‌گیری‌ها و مشاهدات انجام شده در بخش نتایج آزمایش‌ها آمده است. محدوده دبی حجمی آب ۲-۱۰m³/hr (معادل سرعت ظاهری ۰/۱۱-۰/۵۶m/s) و محدوده دبی حجمی هوا ۳۳/۸۴-۲۳۴m³/hr (معادل سرعت ظاهری ۱/۸۸-۱۳m/s) می‌باشد. محدوده‌های فوق با نقشه رژیم جریان انصاری و ارزندی [۱۸] همخوانی دارد.

در مجموع، ۱۰۰ آزمایش مختلف در آزمایشگاه جریان‌های چندفازی دانشگاه تربیت مدرس انجام و نتایج ارائه شده در این مقاله از نتایج این مجموعه آزمایش‌ها انتخاب شده است.

۴- محل آغاز اسلاگ در آزمایش‌ها

در این قسمت نمودارهای محل آغاز اسلاگ در سه کسر حجمی مایع ۰/۲۵، ۰/۵۰ و ۰/۷۵ برحسب سرعت‌های ظاهری مختلف مایع و گاز به همراه تحلیل آنها آمده‌است. محل آغاز اسلاگ با قطر هیدرولیکی کانال بی‌بعد شده است.

۴-۱- کسر حجمی مایع= ۰/۲۵

با افزایش سرعت ظاهری مایع، محل آغاز اسلاگ به پایین دست منتقل می‌شود. در هر سرعت ظاهری ثابت مایع، با افزایش سرعت ظاهری گاز نیز محل آغاز اسلاگ به پایین دست منتقل می‌شود (شکل ۱۱).

در آزمایش‌های کسر حجمی مایع ۰/۲۵، سطح مایع پس از عبور از تیغه جداکننده افزایش می‌یابد. این افزایش سطح ناشی از کم بودن فشار گاز بر روی سطح مایع می‌باشد (نسبت به حالت‌های کسر حجمی مایع ۰/۵۰ و ۰/۷۵). افزایش سطح مایع تا جایی که نیروی برا با فشار گاز متعادل شود، ادامه می‌یابد. همچنین یک پرش هیدرولیکی[3] در پایین‌دست و قبل از تشکیل اسلاگ مشاهده می‌شود (شکل ۱۲).

با افزایش سرعت ظاهری مایع، مومنتم مایع افزایش می‌یابد. افزایش مومنتم مایع باعث تأخیر در ایجاد پرش هیدرولیکی می‌شود. از آنجا که در کسر حجمی مایع ۰/۲۵، اسلاگ بعد از پرش هیدرولیکی ایجاد می‌شود، لذا محل آغاز اسلاگ به پایین دست منتقل می‌شود.

با افزایش سرعت ظاهری گاز، به علت افزایش فشار وارد بر سطح مایع، محل پرش هیدرولیکی و نیز محل تشکیل اسلاگ به پایین دست منتقل می‌شود. این پدیده تنها در کسر حجمی مایع ۰/۲۵ مشاهده می‌شود. می‌توان گفت که در کسر حجمی ورودی مایع پایین، ابتدا سطح مایع تا کسر حجمی حدود ۰/۵۰ بالا می‌آید؛ پس از آن ناپایداری اسلاگ شکل می‌گیرد (شکل ۱۳).

در کسر حجمی مایع ۰/۲۵، متوسط مکان بی‌بعد آغاز اسلاگ ۵۴/۲۷ می‌باشد. طبق جدول ۲ کمینه کلی مکان بی‌بعد آغاز اسلاگ در آزمایش اول (کمترین سرعت‌های ظاهری مایع و گاز) و بیشینه کلی مکان بی‌بعد آغاز اسلاگ در آزمایش آخر (بیشترین سرعت‌های ظاهری مایع و گاز) است که نشان‌دهنده وابستگی مستقیم مکان آغاز اسلاگ با سرعت‌های ظاهری دو فاز می‌باشد.

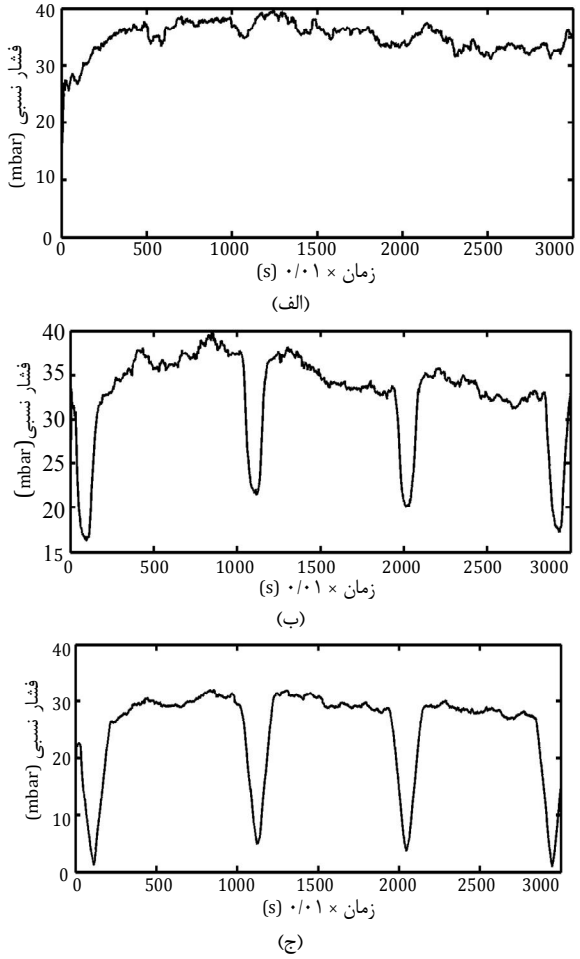
1- CANON IXY 32S

2- Step

3- Hydraulic Jump

نمودارهای فشار نسبی در آزمایش شماره ۹ با سرعت‌های ظاهری آب و هوا به ترتیب ۰/۳۳m/s و ۵/۰۹m/s در مدت زمان ۳۰s در شکل ۱۴ آمده‌است. در هر ثانیه، ۱۰۰ داده فشار توسط برنامه رایانه‌ای در محیط نرم‌افزار متلب[1] ثبت می‌شود. بنابراین محور افقی نمودارهای فشار نسبی برحسب ۱۰۰ برابر ثانیه می‌باشد. در این آزمایش متوسط محل تشکیل اسلاگ ۲/۶۰m از ابتدای کانال (طول معادل ۳۹D) می‌باشد. طبق جدول ۱ محل تشکیل اسلاگ حد فاصل مبدل‌های فشار ۱ و ۲ می‌باشد.

مبدل فشار شماره ۱ در فاصله ۱ متری از ورودی کانال قرار دارد. مکان تشکیل اولین اسلاگ در کانال، بعد از این مبدل می‌باشد. همان‌گونه که دیده می‌شود، فشار در ابتدای کانال بیشینه است. با تشکیل نخستین اسلاگ، فشار پشت بدنه مایع اسلاگ، آن را به پایین‌دست می‌راند. با عبور اسلاگ از مبدل‌های فشار ۲ و ۳، میزان فشار ثبت شده توسط آن‌ها دارای بیشینه مقداری در حدود فشار مبدل فشار ۱ می‌باشد. با این تفاوت که نمودار مبدل‌های فشار ۲ و ۳ دارای مقادیر کمینه نسبی است. این کمینه‌ها نشان‌دهنده عبور اسلاگ مایع از مبدل فشار است. به بیان دیگر با رسیدن پیشانی اسلاگ به مبدل فشار، مقدار فشار زیاد می‌شود. این مقدار فشار بیشینه تا خروج کامل اسلاگ از کانال باقی می‌ماند. مدت زمان برقراری فشار بیشینه در کانال حاضر با مشخصات بیان شده در حدود ۹ ثانیه می‌باشد.



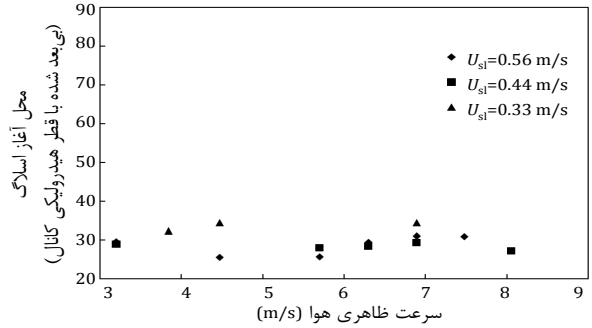
شکل ۱۴ نمودارهای فشار نسبی در α_L=۰/۲۵، الف- مبدل فشار ۱، ب- مبدل فشار ۲ و ج- مبدل فشار ۳، آزمایش شماره ۹، U_{sl}=۰/۳۳m/s و U_{sg}=۵/۰۹m/s

1- MATLAB DAQ

۴-۲- کسر حجمی مایع = ۰/۵۰

در کسر حجمی مایع ۰/۵۰ با افزایش سرعت ظاهری گاز در هر سرعت ظاهری مایع، محل آغاز اسلاگ تغییر چندانی ندارد (شکل ۱۵).

در کسر حجمی مایع ۰/۵۰ متوسط مکان بی‌بعد آغاز اسلاگ ۲۷/۰۸ می‌باشد.



شکل ۱۵ محل آغاز بی‌بعد اسلاگ در سرعت‌های ظاهری مختلف آب و هوا در کسر حجمی مایع ۰/۵۰

جدول ۳ بیشینه و کمینه کلی مکان آغاز اسلاگ (α_l=۰/۵۰)

شماره آزمایش	سرعت ظاهری مایع (m/s)	سرعت ظاهری گاز (m/s)	ضریب لغزش	مکان بی‌بعد آغاز اسلاگ	توضیحات
۲۱	۰/۵۶	۴/۴۷	۸/۰۵	۲۵/۵۰	کمینه کلی
۸	۰/۳۳	۴/۴۷	۱۳/۴۱	۳۴/۵۰	بیشینه کلی
۱۰	۰/۳۳	۶/۸۹	۲۰/۶۷	۳۴/۵۰	بیشینه کلی

طبق جدول ۳ کمینه کلی مکان بی‌بعد آغاز اسلاگ در آزمایش ۲۱ و بیشینه کلی مکان بی‌بعد آغاز اسلاگ در آزمایش‌های ۸ و ۱۰ است. نقاط بیشینه و کمینه نمودار در مقادیر میانی سرعت‌های ظاهری گاز و مایع می‌باشند. می‌توان گفت که در یک سرعت ظاهری ثابت مایع روند افزایشی یا کاهشی در این کسر حجمی مایع حاکم نیست.

نمودارهای فشار نسبی در آزمایش شماره ۸ با سرعت‌های ظاهری آب و هوا به ترتیب ۰/۳۳m/s و ۴/۴۷m/s در مدت زمان ۳۰s در شکل ۱۶ آمده است.

در این آزمایش متوسط محل تشکیل اسلاگ ۲/۳۰m از ابتدای کانال (طول معادل ۳۴/۵۰D) می‌باشد. طبق جدول ۱ محل تشکیل اسلاگ حد فاصل مبدل‌های فشار ۱ و ۲ می‌باشد.

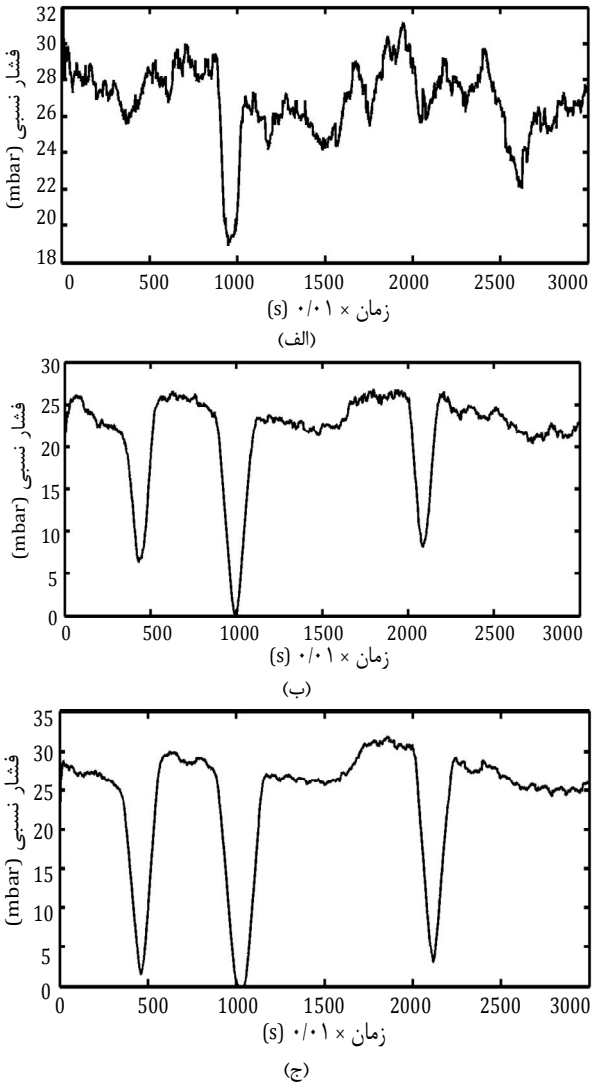
به مانند حالت کسر حجمی مایع ۰/۲۵ مکان تشکیل اولین اسلاگ در کانال، بعد از مبدل فشار ۱ می‌باشد. همان‌گونه که دیده می‌شود، شرایط جریان مشابه حالت قبل می‌باشد. تفاوت با حالت قبل در میزان بیشینه فشار ثبت شده است. البته کمینه فشار نیز در این حالت به حدود صفر می‌رسد. بیشینه فشار ثبت شده در کسر حجمی مایع ۰/۵۰ کمتر از کسر حجمی مایع ۰/۲۵ می‌باشد. از نمودارها مشخص است که دو نوع اسلاگ تشکیل می‌شود. یک اسلاگ در حدود ۶ ثانیه و دیگری ۱۱ ثانیه در کانال جریان دارد.

۴-۳- کسر حجمی مایع = ۰/۷۵

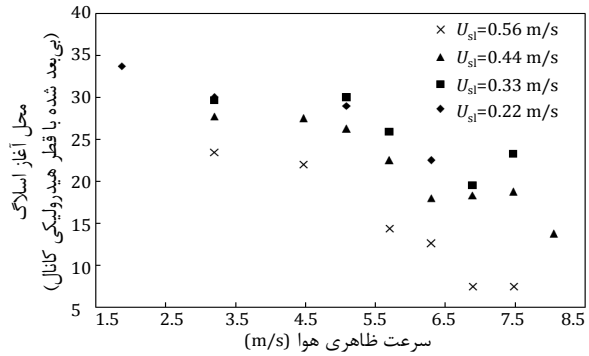
در کسر حجمی مایع ۰/۷۵ با افزایش سرعت ظاهری مایع محل آغاز اسلاگ به بالادست منتقل می‌شود. در این کسر حجمی مایع، سرعت ظاهری مایع و محل آغاز اسلاگ روندی عکس دارند. می‌توان روند کلی افزایش سرعت ظاهری گاز را به این صورت بیان کرد که با افزایش آن محل آغاز اسلاگ به

بالادست منتقل می‌شود. یعنی با افزایش سرعت ظاهری مایع و گاز آغاز اسلاگ در فاصله نزدیکتری به ورودی کانال رخ خواهد داد (شکل ۱۷).

با افزایش سرعت ظاهری مایع و گاز مومنتم این دو فاز نیز افزایش می‌یابد. افزایش مومنتم باعث افزایش ناپایداری بین دوفاز می‌شود. با افزایش ناپایداری سطح مشترک موسوم به ناپایداری کلوین- هلمهولتز، اسلاگ سریع‌تر تشکیل خواهد شد.



شکل ۱۶ نمودارهای فشار نسبی در α_L=۰/۵۰، الف- مبدل فشار ۱، ب- مبدل فشار ۲ و ج- مبدل فشار ۳، آزمایش شماره ۸، U_{sl}=۰/۳۳m/s و U_{sg}=۴/۴۷m/s



شکل ۱۷ محل آغاز بی‌بعد اسلاگ در سرعت‌های ظاهری مختلف آب و هوا در کسر حجمی مایع ۰/۷۵

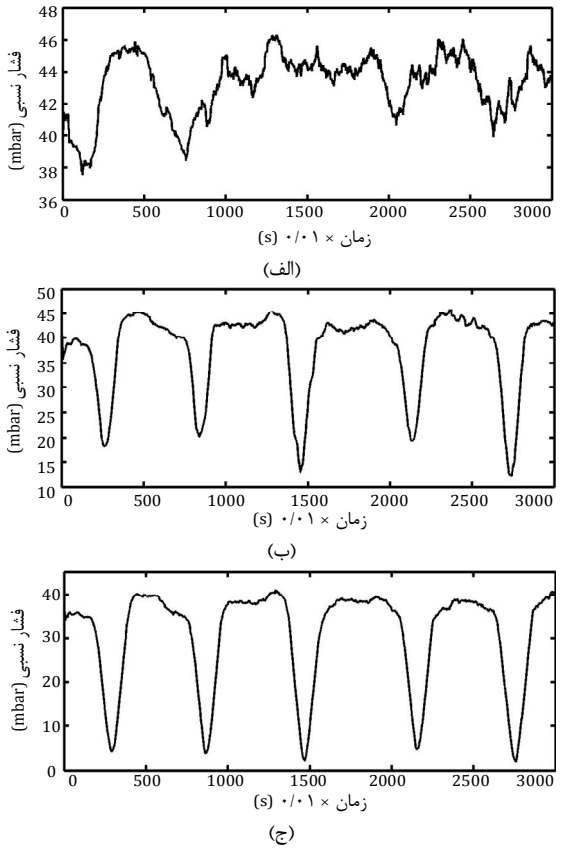
جدول ۴ بیشینه و کمینه کلی مکان آغاز اسلاگ (α_l=۰/۷۵)

شماره آزمایش	سرعت ظاهری مایع (m/s)	سرعت ظاهری گاز (m/s)	ضریب لغزش	مکان بی‌بعد آغاز اسلاگ	توضیحات
۳۲	۰/۵۶	۶/۸۹	۱۲/۳۰	۷/۵۰	کمینه کلی
۳۳	۰/۵۶	۷/۴۷	۱۳/۳۴	۷/۵۰	کمینه کلی
۱	۰/۲۲	۱/۸۸	۸/۵۴	۳۳/۷۵	بیشینه کلی

از جدول ۴ مشخص است که کمینه مکان آغاز اسلاگ در سرعت ظاهری مایع بیشینه است. چراکه در سرعت‌های بالای مایع و گاز، جریان مستعد ناپایداری سریع است. می‌توان گفت که در بیشینه سرعت ظاهری مایع (۰/۵۶m/s) با افزایش سرعت گاز، مکان بی‌بعد آغاز اسلاگ از مقدار ۷/۵۰ کمتر نخواهد شد.

در کسر حجمی مایع ۰/۷۵، متوسط مکان بی‌بعد آغاز اسلاگ ۲۱/۶۵ می‌باشد. طبق جدول ۴ کمینه کلی مکان بی‌بعد آغاز اسلاگ در آزمایش‌های آخر (بیشترین سرعت‌های ظاهری مایع و گاز) و بیشینه کلی مکان بی‌بعد آغاز اسلاگ در آزمایش اول (کمترین سرعت‌های ظاهری مایع و گاز) است که نشان‌دهنده وابستگی معکوس مکان آغاز اسلاگ با سرعت‌های ظاهری دو فاز می‌باشد.

نمودارهای فشار نسبی در آزمایش شماره ۲۰ با سرعت‌های ظاهری آب و هوا به ترتیب ۰/۴۴m/s و ۵/۰۹m/s در مدت زمان ۳۰s در شکل ۱۸ آمده است. در این آزمایش متوسط محل تشکیل اسلاگ ۱/۷۵m از ابتدای کانال (طول معادل ۲۶/۲۵D) می‌باشد. طبق جدول ۱، محل تشکیل اسلاگ حد



شکل ۱۸ نمودارهای فشار نسبی در α_L=۰/۷۵، الف- مبدل فشار ۱، ب- مبدل فشار ۲ و ج- مبدل فشار ۳، آزمایش شماره ۲۰، U_{sl}=۰/۴۴m/s و U_{sg}=۵/۰۹m/s

فاصل مبدل‌های فشار ۱ و ۲ می‌باشد. به مانند دو حالت کسر حجمی مایع ۰/۲۵ و ۰/۵۰، مکان تشکیل اولین اسلاگ در کانال، بعد از مبدل فشار ۱ می‌باشد. همان‌گونه که دیده می‌شود، شرایط جریان مشابه حالت‌های قبل می‌باشد. تفاوت با حالت‌های قبل در میزان بیشینه فشار ثبت شده است. در کسر حجمی مایع ۰/۷۵، این بیشینه فشار مقداری بالاتر دارد. می‌توان گفت که در این کسر حجمی، اسلاگ‌های قوی‌تری تشکیل می‌شوند. قدرت یک اسلاگ می‌تواند اثر تخریبی بیشتری بر سازه خط لوله داشته باشد. طبق شکل ۱۸، مدت زمان برقراری فشار بیشینه در کانال در حدود ۷ ثانیه می‌باشد.

جدول ۵ رابطه مکان بی‌بعد آغاز اسلاگ در کسر حجمی‌های مایع مختلف در محدوده نتایج بدست آمده

کسر حجمی	مکان بی‌بعد آغاز اسلاگ	میزان خطا
۰/۲۵	$S.P. = 2.82\times10^{-5}\mathrm{Re}_{sl}^{1.01}\mathrm{Re}_{sg}^{0.44} - 0.14$	٪۳/۲۷
۰/۵۰	$S.P. = 0.79\mathrm{Re}_{sl}^{-0.98}\mathrm{Re}_{sg}^{-0.91} + 27.18$	٪۳/۴۲
۰/۷۵	$S.P. = 2706.2\mathrm{Re}_{sl}^{-0.007}\mathrm{Re}_{sg}^{-0.006} - 2351.6$	٪۴/۴۳

۴- روابط تجربی

طبق داده‌های حاصل از آزمایش‌های انجام شده، با استفاده از روش آماری حداقل مربعات[1] و کمیت فیزیکی بی‌بعد رینولدز ظاهری دو فاز (رابطه ۸)، رابطه مکان بی‌بعد آغاز اسلاگ با خطای کمتر از ٪۵ بدست آمده‌است (جدول ۵).

$$U_{sg} = \alpha_g U_g \; U_{sl} = \alpha_l U_l$$
$$D_{hg} = \frac{4A_g}{S_g + S_i} \; D_{hl} = \frac{4A_l}{S_l}$$
$$\mathrm{Re}_{sg} = \frac{\rho_g D_{hg}|U_{sg}|}{\mu_g} \; \mathrm{Re}_{sl} = \frac{\rho_l D_{hl}|U_{sl}|}{\mu_l} \qquad (۸)$$

۵- بحث و نتیجه‌گیری

در این مقاله اثر سرعت ظاهری گاز و مایع ورودی و برای نخستین بار اثر کسر حجمی مایع بر محل آغاز اسلاگ در جریان دوفازی آب و هوا به صورت تجربی بررسی شده است. محل انجام آزمایش‌ها، آزمایشگاه جریان چندفازی دانشگاه تربیت مدرس بوده است. آزمایش‌ها در سه کسر حجمی مایع ۰/۲۵، ۰/۵۰ و ۰/۷۵، در یک کانال افقی با مقطع مستطیلی به ابعاد $5\times10\,cm^2$ (قطر معادل هیدرولیکی ۶/۶۷cm) و به طول ۳۶m (طول معادل ۵۴۰D) از جنس پلکسی گلاس انجام شده است. نتایج بدست آمده از آزمایش‌ها به شرح زیر هستند:

- رشد امواج با طول موج بلند در جریان گاز- مایع لایه‌ای در کانال افقی، ممکن است به بالای لوله رسیده و یک اسلاگ را تشکیل دهد، یا به امواج غلتان[2] تبدیل شود.

- در کسر حجمی مایع ۰/۲۵، فرایند تشکیل اسلاگ با دو کسر حجمی مایع دیگر متفاوت است. در این حالت، ابتدا در مکانی دور از ورودی یک پرش هیدرولیکی تشکیل می‌شود. سطح مایع بعد از پرش بسته به شرایط ورودی دوفاز تا حد زیادی (معادل کسر حجمی مایع ۰/۵۰-۰/۸۵) بالا می‌آید. این پدیده موجب تنگ شدن مقطع عبور گاز می‌شود (شکل ۱۲). به دلیل ثابت بودن دبی هوای ورودی به کانال، با کمتر شدن مقطع هوای عبوری، سرعت هوا افزایش می‌یابد. از طرفی سطح مقطع آب پس از پرش هیدرولیکی افزایش می‌یابد که به دلیل ثابت بودن دبی آب ورودی، سرعت آن کاهش می‌یابد. لذا بطور همزمان سرعت هوا افزایش و سرعت آب کاهش می‌یابد. این به آن معناست که اختلاف سرعت دوفاز بعد از پرش هیدرولیکی بسیار بیشتر از قبل آن می‌باشد. طبق معیار ناپایداری کلوین- هلمهولتز، رشد امواج سطح مشترک تسریع و تشکیل اسلاگ محتمل‌تر می‌شود (شکل ۱۳).

- در کسر حجمی مایع ۰/۲۵ کمینه، بیشینه و متوسط محل آغاز اسلاگ به ترتیب ۲۳/۲۵، ۸۷ و ۵۶/۳۴ برابر قطر هیدرولیکی کانال می‌باشد. یعنی بطور متوسط اسلاگ‌ها در فواصل طولانی از ورودی (بیشتر از ۴۰ برابر قطر هیدرولیکی کانال) تشکیل می‌شوند. در سرعت ظاهری گاز ثابت و با افزایش سرعت ظاهری مایع، محل آغاز اسلاگ به فاصله دورتری از ورودی انتقال می‌یابد. در سرعت ظاهری مایع ثابت نیز با افزایش سرعت ظاهری گاز، محل آغاز اسلاگ به فاصله دورتری از ورودی انتقال می‌یابد. وابستگی محل آغاز به تغییرات سرعت ظاهری گاز و مایع بصورت یکنوای صعودی است.

- در کسر حجمی مایع ۰/۵۰ کمینه، بیشینه و متوسط محل آغاز اسلاگ به ترتیب ۲۵/۵۰، ۳۴/۵۰ و ۲۷/۰۸ برابر قطر هیدرولیکی کانال می‌باشد. یعنی بطور متوسط اسلاگ‌ها در فواصل کوتاهی از ورودی (کمتر از ۴۰ برابر قطر هیدرولیکی کانال) تشکیل می‌شوند. در سرعت ظاهری گاز ثابت و با افزایش سرعت ظاهری مایع، محل آغاز اسلاگ به فاصله دورتری از ورودی انتقال می‌یابد. در سرعت ظاهری مایع ثابت نیز با افزایش سرعت ظاهری گاز، محل آغاز اسلاگ به فاصله دورتری از ورودی انتقال می‌یابد. اما تغییرات محل آغاز اسلاگ نسبت به کسر حجمی مایع ۰/۲۵ کمتر و ملایم‌تر است.

- در کسر حجمی مایع ۰/۷۵ کمینه، بیشینه و متوسط محل آغاز اسلاگ به ترتیب ۷/۵۰، ۳۳/۷۵ و ۲۱/۶۵ برابر قطر هیدرولیکی کانال می‌باشد. یعنی بطور متوسط اسلاگ‌ها در فواصل کوتاهی از ورودی (کمتر از ۴۰ برابر قطر هیدرولیکی کانال) تشکیل می‌شوند. در سرعت ظاهری گاز ثابت و با افزایش سرعت ظاهری مایع، محل آغاز اسلاگ به فاصله نزدیک‌تری به ورودی انتقال می‌یابد. در سرعت ظاهری مایع ثابت نیز با افزایش سرعت ظاهری گاز، محل آغاز اسلاگ به فاصله نزدیک‌تری به ورودی انتقال می‌یابد. وابستگی محل آغاز به تغییرات سرعت ظاهری گاز و مایع بصورت یکنوای نزولی است.

- می‌توان گفت که با افزایش کسر حجمی مایع، وابستگی مکان بی‌بعد آغاز اسلاگ با سرعت‌های ظاهری دو فاز از یکنوای صعودی به یکنوای نزولی تغییر می‌کند.

- در کسرهای حجمی مایع ۰/۲۵ و ۰/۷۵، اسلاگ‌های قوی‌تری تشکیل می‌شوند. قدرت یک اسلاگ می‌تواند اثر تخریبی بیشتری بر سازه خط لوله داشته باشد. کمینه فشار در حالت کسر حجمی مایع ۰/۵۰ ملاحظه می‌گردد. زمانی که کسر حجمی دو فاز در کانال برابر باشد، اسلاگ‌های با فشار کمتر (ضعیف‌تر) و زمانی که کسر حجمی یک فاز بیش از دیگری باشد، اسلاگ‌های با فشار بیشتر (قوی‌تر) تشکیل خواهد شد.

۶- فهرست علایم

A	سطح مقطع (m^2)
D	قطر (m)
g	شتاب جاذبه (ms^{-2})
h	ارتفاع (m)
k	عدد موج (m^{-1})
S	طول تماس با دیواره کانال (m)
U	سرعت (ms^{-1})

علایم یونانی

α	کسر حجمی
θ	شیب کانال (rad)

1- Least Square Method
2- Roll Waves

μ ویسکوزیته ($kgm^{-1}s^{-1}$)

ρ چگالی (kgm^{-3})

زیرنویس‌ها

c قله موج

g فاز گاز

h هیدرولیکی

i سطح مشترک

l فاز مایع

s ظاهری

۷- تشکر و قدردانی

نویسندگان این مقاله لازم می‌دانند از آقایان سعید احمدی و بهزاد صادقی که طی انجام آزمایش‌ها، همکاری صمیمانه و مؤثری داشته‌اند، تشکر نمایند.

۸- مراجع

[1] Y. Taitel, C. Sarica, J.P. Brill, Slug flow modelling for downward inclined pipe flow: theoretical considerations, *International Journal of Multiphase Flow*, Vol. 26, pp. 833–844, 2000

[2] D. Barnea, Y. Taitel, A model for slug length distribution in gas-liquid slug flow, *International Journal of Multiphase Flow*, Vol. 19, pp. 829-838, 1993

[3] C.J. Crowley, G.B. Wallis, J.J. Barry, Validation of a one-dimensional wave model for the stratified-to-slug flow regime transition, with consequences for wave growth and slug frequency, *International Journal of Multiphase Flow*, Vol. 18, pp. 249–271, 1992

[4] A. Sanchis, G. W. Johnson, A. Jensen, The formation of hydrodynamic slugs by the interaction of waves in gas–liquid two-phase pipe flow, *International Journal of Multiphase Flow*, Vol. 37, pp. 358–368, 2011

[5] X. Wang, G. Liejin, X. Zhang, An experimental study of the statistical parameters of gas–liquid two-phase slug flow in horizontal pipeline, (Technical Note), *International Journal of Heat and Mass Transfer,* Vol. 50, pp. 2439–2443, 2007

[6] Z. Fan, F. Lusseyran, T.J. Hanratty, Initiation of slugs in horizontal gas–liquid flows, *AIChE Journal*, Vol. 39, No. 11, pp. 1741-1753, 1993

[7] S.R. Davies, *Studies of Two-phase Intermittent Flow in Pipelines*, Ph.D. Thesis, University of London., 1992

[8] C.P. Hale, *Slug Formation, Growth and Collapse*, Ph.D. Thesis, University of London., 2000

[9] P. M. Ujang, Ch. J. Lawrence, C. P. Hale, G. F. Hewitt, Slug initiation and evolution in two-phase horizontal flow, *International Journal of Multiphase Flow*, Vol. 32, pp. 527–552, 2006

[10] M.R. Ansari, Dynamical behavior of slug initiation generated by short waves in two-phase air–water stratified flow, *ASME International mechanical Engineering Congress & Exposition-IMECE 98,* Anaheim, CA, November 15~20, 1998.

[11] H. V. Helmholtz. "Über discontinuierliche Flüssigkeits-Bewegungen [On the discontinuous movements of fluids]". *Monatsberichte der Königlichen Preussische Akademie der Wissenschaften zu Berlin [Monthly Reports of the Royal Prussian Academy of Philosophy in Berlin]*, Vol. 23, pp. 215–228, 1868

[12] W.T. Kelvin, "Hydrokinetic solutions, observations", *Philosophical Magazine*, Vol. 42, pp 362–377, 1871

[13] H. Lamb, *Hydrodynamics*, Dover, New York, 1945 (Originally published in 1879)

[14] L. M. Milne- Thomson, *Theoretical Hydrodynamics*, MacMillan, New York, 1963.

[15] E. Kordyban, T. Ranov, Mechanism of slug formation in horizontal two-phase flow, *ASME Journal of Basic Engineering,* Vol. 92, pp. 857–864, 1970

[16] G.B. Wallis, J.E. Dobbins, The onset of slugging in horizontal stratified air– water flow, *International Journal of Multiphase Flow*, Vol. 1, pp. 173–193, 1973

[17] 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, pp. 47–55, 1976

[18] M.R. Ansari, B. Arzandi, Two-phase gas–liquid flow regimes for smooth and ribbed rectangular ducts, *International Journal of Multiphase Flow*, Vol. 38, pp. 118-125, 2012