



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

*پویان ادیبی^۱، محمد رضا انصاری^۲

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

۲- دانشیار مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

mra_1330@modares.ac.ir *تهران، صندوق پستی ۱۴۱۵-۱۴۳

اطلاعات مقاوله
مقاله پژوهشی کامل
دریافت: ۱۳۹۲ اردیبهشت
پذیرش: ۱۳۹۲ تیر
راهه در سایت: ۲۱ اردیبهشت ۱۳۹۳
کلید واژگان:
محل آغاز اسلاگ
سرعت حجمی
سرعت ورودی
کanal افقی بلند
جریان دو سیالی

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 بین ارائه شده است. محل ایجاد آزمایش‌ها، آزمایشگاه جریان چندفازی دانشگاه تربیت مدرس بوده است. آزمایش‌ها در سه کسر حجمی مایع $0/25$ ، $0/50$ و $0/75$ در یک کanal افقی با مقطعه مستطیلی به ابعاد $5 \times 10 \text{ cm}^2$ از جنس پلکسی گلاس انجام شده است. محدوده سرعت ظاهری آب $0/11-0/56 \text{ m/s}$ و سرعت ظاهری هوا $0/18-0/13 \text{ m/s}$ می‌باشد. نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد، در کسر حجمی مایع $0/50$ ، وابستگی محل آغاز به تغییرات سرعت ظاهری گاز و مایع یکنواخت صعودی است. در کسر حجمی مایع $0/25$ ، محل آغاز اسلاگ با تغییرات سرعت ظاهری گاز و مایع نسبت مسنتیم دارد اما تغییرات آن نسبت به کسر حجمی مایع $0/75$ کمتر و ملایم‌تر است. در کسر حجمی مایع $0/75$ ، وابستگی محل آغاز به تغییرات سرعت ظاهری گاز و مایع بصورت یکنواخت نزولی است. زمانی که کسر حجمی دو فاز در کanal 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 $5 \times 10 \text{ cm}^2$ and 36m length in Multiphase Flow Lab of Tarbiat Modares University. The superficial liquid and air velocities rated as to $0.11-0.56 \text{ m/s}$ and $1.88-13 \text{ m/s}$, respectively. The obtained results show that as $\alpha=0.25$, slug initiation position is increasing monotonically with U_{sl} and U_{sg} . During $\alpha=0.50$, slug initiation position is increasing with U_{sl} and U_{sg} but the slope is smoother than $\alpha=0.25$. For $\alpha=0.75$, 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.

حرارتی و هیدرولیکی است. برای خطوط لوله انتقال نفت و گاز بخصوص با قطر بزرگ، پیش‌بینی اثرات شبیه و چگالی گاز لازم است [۳]. حضور اسلاگ افت فشار را افزایش می‌دهد که منجر به کاهش تولید خواهد شد [۴]. افت فشار را افزایش می‌دهد که منجر به کاهش تولید خواهد شد [۴]. جریان اسلاگ در بسیاری از کاربردهای مهندسی نظری انتقال هیدرولوکرین‌ها در خطوط لوله نفت و گاز، جریان آب- بخار در بیشتر تجهیزات صنایع نفتی، نیروگاه‌های حرارتی و هسته‌ای نظیر بویلر، اوایلرتور 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.

۱- مقدمه وقتی گاز و مایع بطور همزمان در یک لوله حرکت کنند، الگوهای مختلف جریان تشکیل می‌شود. جریان نوبتی یا اسلاگ رخداد سیار 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

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)

ساز و کار رشد امواج کوتاه، ناپایداری کلوین- هلمهولتز^۳ می باشد.

۲- 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 کردند:

$$U_g - U_l \geq \sqrt{\frac{(\rho_l - \rho_g)gh_g}{\rho_g}} \quad (1)$$

رابطه (۱) سرعت گاز را برای تشکیل جریان اسلامگ با ضریب دو فرآینش بینی^۴ می کند.

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

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

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

والیس و دایبیز [۱۶] رابطه (۳) را با استفاده از داده های تجربی برای تشکیل اسلامگ پیشنهاد دادند:

$$U_g - U_l \geq 0.5 \sqrt{\frac{(\rho_l - \rho_g)gh_g}{\rho_g}} \quad (3)$$

تاپلت و داکلر [۱۷] یک مدل تئوری پیش بینی گذار رژیم جریان دوفازی افقی با ملاحظه اختلاف فشار بر روی سطح معتبر است. در این مدل موج کوتاه رشد نموده و اسلامگی با طول موج بلند را ایجاد می کند. انصاری جریان اسلامگ را بطور تجربی در کanal مستطیلی به طول 10 m و سطح مقطع $5 \times 10\text{ cm}^2$ بررسی نمود. وی نتیجه گرفت که یک واحد موج اسلامگ از سه ناحیه اصلی تشکیل شده است (شکل های ۱ و ۲).

در ناحیه اول، کسر حجمی مایع بدليل جریان گاز، اندکی نسبت به شرایط اولیه کاهش می یابد. در ناحیه دوم تعدادی امواج با طول موج کوتاه تشکیل می شود. یکی از این موج های کوتاه در ناحیه سوم رشد می کند که در نهایت منجر به تشکیل اسلامگ خواهد شد.

انصاری نتیجه گرفت که دليل تشکیل اسلامگ (که یک موج با طول موج بلند

بررسی کردند. ایشان نتیجه گرفتند که منشا تشکیل اسلامگ به سرعت ظاهری^۱ گاز و نیز ارتفاع محلی مایع در کanal بستگی دارد.

داویز [۷] و هیل [۸] فرایند آغاز را با استفاده از یک لوله افقی پرسپکس^۲ شفاف به طول 10 m و قطر داخلی 0.074 m متر مطالعه نمودند. جریان لایه ای مایع و گاز در ورودی با استفاده از یک صفحه تقسیم کننده افقی ایجاد شد.

پرسپیلا و همکاران [۹] اثر فشار و سرعت های ظاهری گاز و مایع را بر آغاز اسلامگ و نیز اسلامگ های هیدرودینامیکی تشکیل شده در پایین دست لوله را مورد بررسی تجربی قرار دادند. ایشان نتیجه گرفتند که بیشترین تعداد اسلامگ ها در 3 m ابتدایی لوله رخ می دهد. همچنین فرکانس تشکیل اسلامگ بطور ضعیفی تابع فشار بالاتر، آغاز اسلامگ را به تأخیر می اندازد.

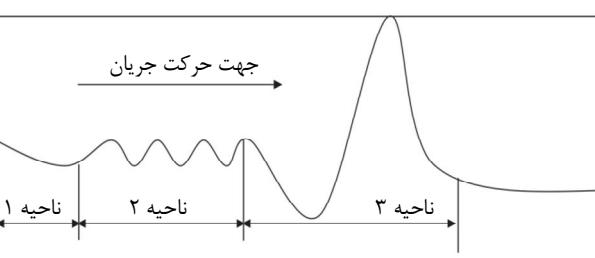
از این رو در این تحقیق اثرات کسر حجمی مایع ورودی، سرعت ظاهری گاز و مایع ورودی بر محل آغاز اسلامگ در کanal افقی با طول کافی حتی برای تشکیل چندین اسلامگ بصورت تجربی بررسی شده است. لازم به ذکر است که تأثیر کسر حجمی مایع بر آغاز اسلامگ برای نخستین بار در این تحقیق لحاظ و بررسی شده است.

۲- فیزیک پدیده اسلامگ

انصاری [۱۰] بیان نمود که وقتی سیال گاز بر روی سیال مایع جریان یابد، تعدادی امواج با طول موج کوتاه در سطح مشترک ایجاد می شود. یکی از این امواج با طول موج کوتاه رشد نموده و اسلامگی با طول موج بلند را ایجاد می کند. انصاری جریان اسلامگ را بطور تجربی در کanal مستطیلی به طول 10 m و سطح مقطع $5 \times 10\text{ cm}^2$ بررسی نمود. وی نتیجه گرفت که یک واحد موج اسلامگ از سه ناحیه اصلی تشکیل شده است (شکل های ۱ و ۲).

در ناحیه اول، کسر حجمی مایع بدليل جریان گاز، اندکی نسبت به شرایط اولیه کاهش می یابد. در ناحیه دوم تعدادی امواج با طول موج کوتاه تشکیل می شود. یکی از این موج های کوتاه در ناحیه سوم رشد می کند که در نهایت منجر به تشکیل اسلامگ خواهد شد.

انصاری نتیجه گرفت که دليل تشکیل اسلامگ (که یک موج با طول موج بلند است) امواج کوتاهی است که پیش از ایجاد اسلامگ در ناحیه دوم ظاهر می شود.



شکل ۱ طرح واره سه ناحیه اصلی در جریان اسلامگ [۱۰]

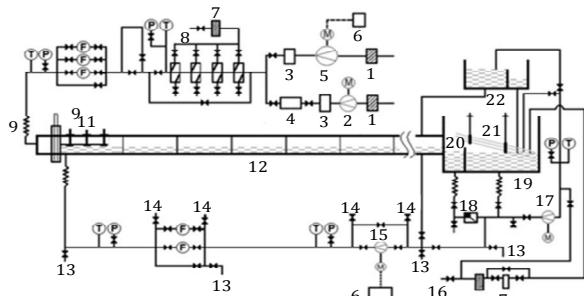


شکل ۲ سه ناحیه اصلی در جریان اسلامگ، $U_{sg}=0.9\text{ m/s}$ و $U_{sl}=0.22\text{ m/s}$ و $\alpha=0.75$ ، (آزمایشگاه جریان چندفازی دانشگاه تربیت مدرس)

3- Kelvin-Helmholtz

4- Over Predict

5- Lift



شکل ۴ طرح واره 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: پمپ ۱۶: آب ۱۷: پمپ ۱۸: شیر یکطرفه ۱۹: مخزن ۲۰: صفحه کنترل کننده سطح آب ۲۱: دمپر اسلامگ ۲۲: مخزن ۱: دبی سنج M: موتور برقی P: فشارسنج T: دماسنجد

۳- سیستم آزمایشگاهی

طرح واره 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 کanal افقی با مقطع مستطیلی به ابعاد $5 \times 10 \text{ cm}^2$ (قطر معادل هیدرولیکی $6/67 \text{ cm}$) و به طول 36 m (طول معادل 540 D) از جنس پلکسی گلاس^۱ انجام شده است. دیواره شفاف کanal امکان بررسی دیداری از وضعیت جریان داخل کanal را به ناظر بیرونی ارائه می‌دهد. کanal بر روی تعدادی تکیه‌گاه فلزی قرار دارد. هر تکیه‌گاه بطور مجزا قابلیت تنظیم شبیه -89° 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 کanal و سپس با عبور از قسمت کanal آزمایش وارد مخزن روبرو باشند. در این مخزن، هوا و آب از هم جدا می‌شوند.

۳-۱- خط تأمین هوا

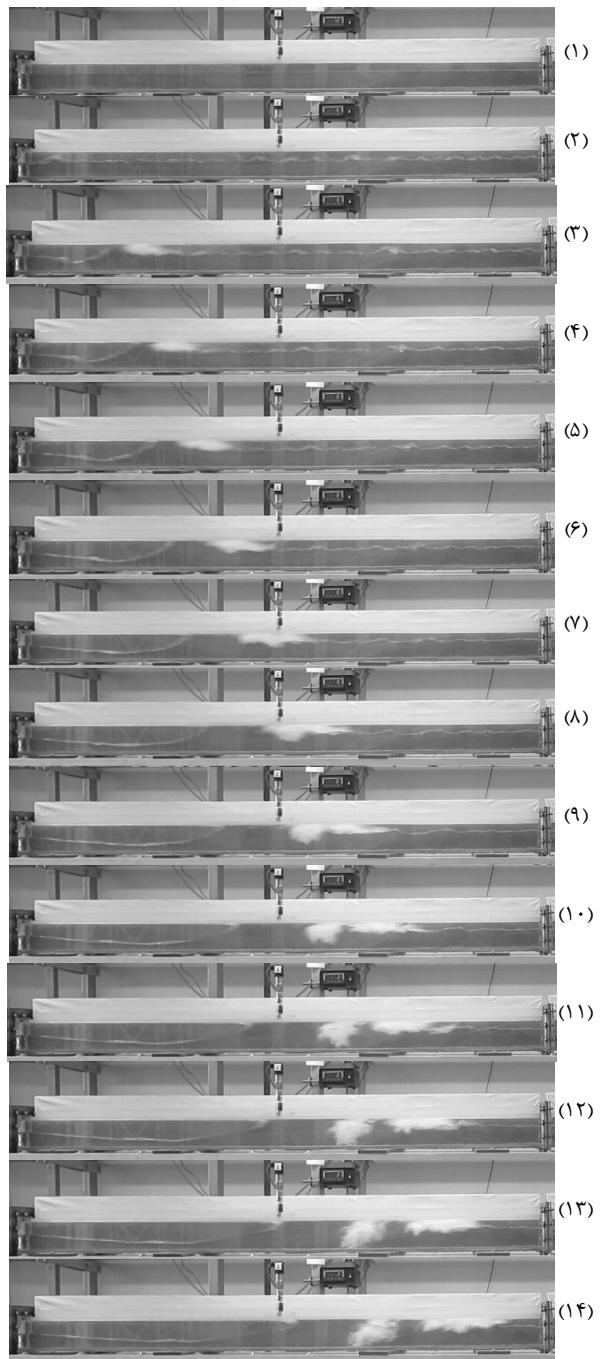
برای ایجاد جریان هوا با دبی مناسب از یک کمپرسور با توان 45 kW استفاده شده است. هوای مکیده شده از محیط آزمایشگاه بعد از عبور از فیلتر هوا وارد کمپرسور و به داخل مخزن هوا فرستاده می‌شود (شکل ۵). هوای درون مخزن که در دما و فشار بالا قرار دارد به منظور کاهش دما و هم‌دمای شدن با آب از یک سیستم خنک کاری عبور می‌کند (شکل ۶). این کار به دلیل شرط تعادل دمایی بین دوفاز مایع و گاز در ورودی کanal انجام می‌گیرد. هوا بعد از عبور از سیستم خنک کاری به سمت دبی سنج های هوا جریان یافته و بعد از اندازه‌گیری دمای هوا در ورودی مخلوط کننده، به وسیله لوله قابل انعطاف از بالا وارد قسمت مخلوط کننده می‌شود.

با توجه به این که آزمایش‌ها باید در سرعت‌های ظاهری مختلف هوا انجام شود و همچنین به منظور کنترل پذیری بیشتر سیستم خط تأمین هوا، از یک برگرداننده^۲ برای کنترل دور موتور استفاده شده است. به کمک برگرداننده می‌توان دبی را در هر مقدار مشخص تأمین و تنظیم کرد.

$$K_1, K_2 = 1 - \frac{h_l}{D} \quad (7)$$

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

جهت حرکت جریان

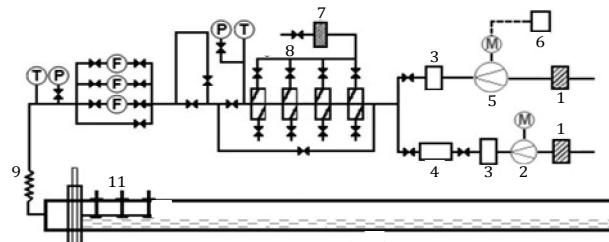


شکل ۳ سطح مشترک صاف آب و هوا (۱)، آغاز ناپایداری سطح مشترک (۲)، تشکیل اسلامگ (۳) و رشد اسلامگ (۴-۱۴) در ابتدای کanal، $U_{sl}=0/22 \text{ m/s}$, $\alpha_l=0/50^\circ$, $U_{sg}=3/20 \text{ m/s}$, (آزمایشگاه جریان چندفازی دانشگاه تربیت مدرس)

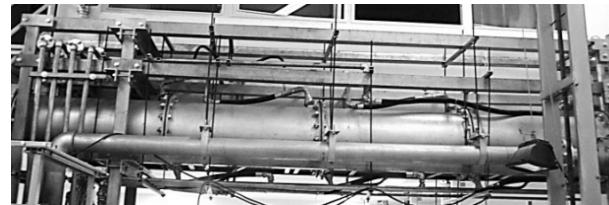
1- Plexiglas
2- Inverter

جدول ۱ مکان مبدل های فشار در طول کanal

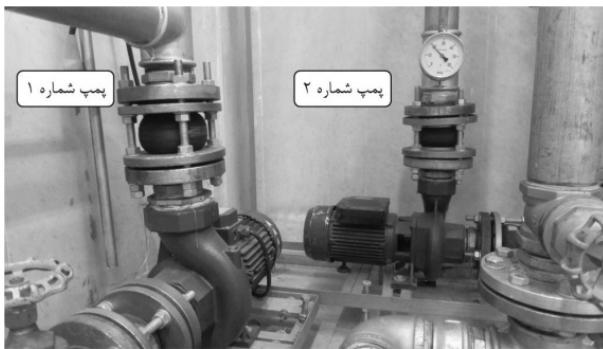
ردیف	مکان (m)	مکان بی بعد شده با قطر هیدرولیکی کanal
۱	۱/۰۰	۱۴/۹۹
۲	۳/۸۰	۵۶/۹۷
۳	۵/۴۰	۸۰/۹۶
۴	۹/۴۰	۱۴۰/۹۳
۵	۱۲/۴۰	۱۸۵/۹۱
۶	۱۴/۶۰	۲۱۸/۸۹
۷	۱۶/۶۰	۲۴۸/۸۸
۸	۱۸/۶۰	۲۷۸/۸۶
۹	۲۰/۶۰	۳۰۸/۸۵
۱۰	۲۳/۸۰	۳۵۶/۸۲
۱۱	۲۵/۸۰	۳۸۶/۸۱
۱۲	۲۹/۸۰	۴۴۶/۷۸
۱۳	۳۳/۸۰	۵۰۶/۷۵



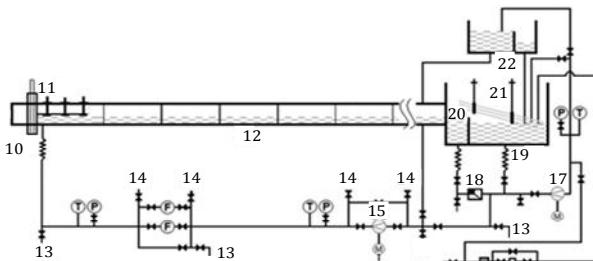
شکل ۵ طرحواره خط تامین هوا آزمایشگاه جریان چندفازی دانشگاه تربیت مدرس



شکل ۶ مدار خنک کاری هوا آزمایشگاه جریان چندفازی دانشگاه تربیت مدرس



شکل ۷ پمپ های شماره ۱ و ۲ آزمایشگاه جریان چندفازی دانشگاه تربیت مدرس



شکل ۸ چرخه تامین آب آزمایشگاه جریان چندفازی دانشگاه تربیت مدرس



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

۲-۳- خط تامین آب

برای تأمین آب از دو پمپ و دو مخزن استفاده شده است (شکل های ۷ تا ۹). آب ورودی به مخزن شماره ۲ توسط پمپ شماره ۲ وارد مخزن شماره ۱ می شود 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 جداگانه است که سطح مایع را کنترل می کند. ابعاد این قسمت از مخزن طوری طراحی شده است که قسمت اول آن که هد^۱ پمپ شماره ۱ را تأمین می کند همواره پر باشد. آب مازاد بعد از ریختن به قسمت دوم مخزن شماره ۱ از طریق یک لوله وارد قسمت دوم مخزن شماره ۲ می شود. آب لازم برای آزمایش از طریق پمپ شماره ۱ و از مخزن شماره ۱ به داخل سیستم رانده می شود و این امر باعث می شود که دبی آب در طی آزمایش بدليل ثابت ماندن هد پمپ شماره ۱، ثابت بماند.

دبي مورد نظر برای آزمایش توسط خط کنارگذر^۲ و شیرهای موجود بعد از پمپ شماره ۱ و همچنین یک برگرداننده که به پمپ شماره ۱ مرتبط است، کنترل می شود.

آب بعد از عبور از پمپ شماره ۱ و شیرهای بعد از آن به سمت دبی سنج آب رانده می شود. بعد از اندازه گیری دما و فشار به وسیله یک لوله قابل انعطاف و از پایین، آب وارد مخلوط کننده ورودی می شود.

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

۳- سیستم های اندازه گیری

دبی سنج هوا از نوع گردابهای^۳ با دقت $0.01 \text{ m}^3/\text{hr}$ می باشد. دبی سنج آب از نوع الکترومغناطیسی با دقت $0.01 \text{ m}^3/\text{hr}$ است که در مسیر آب قبل از ورود به مخلوط کننده قرار دارد. با اندازه گیری دبی هوا و آب و همچنین مشخص بودن ابعاد کanal، سرعت ظاهری هریک از فازها در ورودی بدست می آید.

میزان فشار موضعی جریان در طول کanal توسط ۱۳ مبدل فشار پیزوالکتریک^۴ اندازه گیری می شود (جدول ۱). محدوده اندازه گیری مبدل های فشار -250 mbar - 5 bar ^۵ با خطای $\pm 1\%$ می باشد.

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

۰/۷۵ در ابتدای آزمایش فراهم شود و جریان آب به حالت پایدار برسد. بعد از تشییت دبی آب در یک مقدار مشخص، سرعت دورانی کمپرسور توسط برگرداننده در حداقل میزان لازم برای هوداگی جهت ایجاد جریان اسلامگ قرار داده می شود. بعد از رسیدن به حالت پایا در حدود ۱ دقیقه فیلمبرداری از ابتدای کanal انجام می شود. برای بررسی سرعت های ظاهری بالاتر هوا، در حالی که دبی آب ثابت است، سرعت دورانی موتور با گام 0.5Hz افزایش داده و در هر گام بعد از رسیدن به حالت پایدار، فیلمبرداری و داده برداری انجام می شود. این مراحل برای دبی های بالاتر آب تا جایی که رژیم اسلامگ ایجاد شود، تکرار می شوند. نتایج حاصل از اندازه گیری ها و مشاهدات انجام شده در بخش نتایج آزمایش ها آمده است. محدوده دبی حجمی آب $2-10\text{ m}^3/\text{hr}$ (معادل سرعت ظاهری 0.056m/s) و محدوده دبی حجمی هوا $23-44\text{ m}^3/\text{hr}$ (معادل سرعت ظاهری $0.188-0.22\text{m/s}$) می باشد. محدوده های فوق با نقشه رژیم جریان انصاری و ارزندی [۱۸] همخوانی دارد.

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

۴- محل آغاز اسلامگ در آزمایش ها

در این قسمت نمودارهای محل آغاز اسلامگ در سه کسر حجمی مایع $0/25$ ، $0/50$ و $0/75$ بر حسب سرعت های ظاهری مختلف مایع و گاز به همراه تحلیل آنها آمده است. محل آغاز اسلامگ با قطر هیدرولیکی کanal می بعد شده است.

۴-۱- کسر حجمی مایع = $0/25$

با افزایش سرعت ظاهری مایع، محل آغاز اسلامگ به پایین دست منتقل می شود (شکل ۱۱). محل آغاز اسلامگ به پایین دست منتقل می شود (شکل ۱۱).

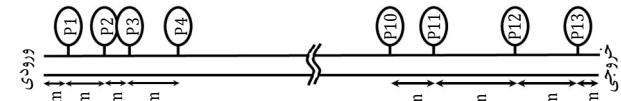
در آزمایش های کسر حجمی مایع $0/25$ ، سطح مایع پس از عبور از تیغه جدا کننده افزایش می یابد. این افزایش سطح ناشی از کم بودن فشار گاز بر روی سطح مایع می باشد (نسبت به حالت های کسر حجمی مایع $0/50$ و $0/75$). افزایش سطح مایع تا جایی که نیروی برآ با فشار گاز متعادل شود، ادامه می یابد. همچنین یک پرش هیدرولیکی 3 در پایین دست و قبل از تشکیل اسلامگ مشاهده می شود (شکل ۱۲).

با افزایش سرعت ظاهری مایع، مومنت مایع افزایش می یابد. افزایش مومنت مایع باعث تأخیر در ایجاد پرش هیدرولیکی می شود. از آنجا که در کسر حجمی مایع $0/25$ اسلامگ بعد از پرش هیدرولیکی ایجاد می شود، لذا محل آغاز اسلامگ به پایین دست منتقل می شود.

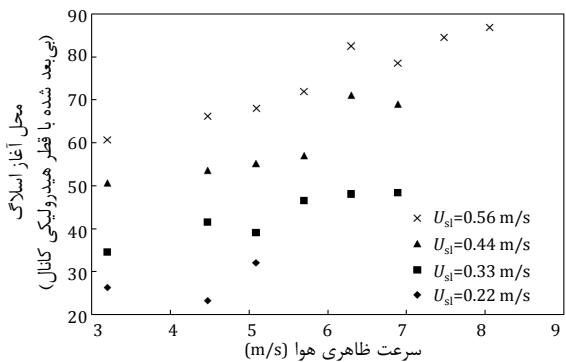
با افزایش سرعت ظاهری گاز، به علت افزایش فشار وارد بر سطح مایع، محل پرش هیدرولیکی و نیز محل تشکیل اسلامگ به پایین دست منتقل می شود. این پدیده تنها در کسر حجمی مایع $0/25$ مشاهده می شود. می توان گفت که در کسر حجمی ورودی مایع پایین، ابتدا سطح مایع تا کسر حجمی حدود $0/50$ بالا می آید؛ پس از آن تا پایداری اسلامگ شکل می گیرد (شکل ۱۳). در کسر حجمی مایع $0/25$ ، متوسط مکان می شود. این پدیده تنها در کسر حجمی مایع $0/25$ اسلامگ اول (کمترین سرعت های ظاهری مایع و گاز) و بیشینه کلی مکان می شود. در آزمایش آخر (بیشترین سرعت های ظاهری مایع و گاز) است که نشان دهنده وابستگی مستقیم مکان آغاز اسلامگ با سرعت های ظاهری دو فاز می باشد.

2-Step
3- Hydraulic Jump

از بین این ۱۳ مدل فشار، ۳ مدل نخست به دلیل اندازه گیری فشار در محدوده تشکیل اسلامگ، اهمیت بیشتری دارند. نحوه چیدمان مدل های فشار در شکل ۱۰ نشان داده شده است.



شکل ۱۰ طرحواره قرار گیری مدل های فشار در طول کanal آزمایشگاه جریان چندفازی دانشگاه تربیت مدرس



شکل ۱۱ محل آغاز بی بعد اسلامگ در سرعت های ظاهری مختلف آب و هوا در کسر حجمی مایع $0/25$



شکل ۱۲ پرش هیدرولیکی در $\alpha=0/25$ به همراه افزایش سطح مایع، $U_{sl}=0.56\text{m/s}$ و $U_{sg}=3/20\text{ m/s}$ (آزمایشگاه جریان چندفازی دانشگاه تربیت مدرس)



شکل ۱۳ اسلامگ تشکیل شده بعد از پرش هیدرولیکی در $\alpha=0/25$ و $U_{sl}=0.56\text{m/s}$ ، $U_{sg}=3/20\text{ m/s}$ (آزمایشگاه جریان چندفازی دانشگاه تربیت مدرس)

جدول ۲ بیشینه و کمینه کلی مکان آغاز اسلامگ ($\alpha=0/25$)

آزمایش	سرعت ظاهری سرعت ظاهری ضرب مکان بی بعد توپیخات	لغزش آغاز اسلامگ (m/s)	مایع (m/s)	گاز (m/s)	کمینه کلی	بیشینه کلی
۱	$22/25$	$20/32$	$4/47$	$0/22$		
۲۸	87	$14/37$	$8/05$	$0/56$		

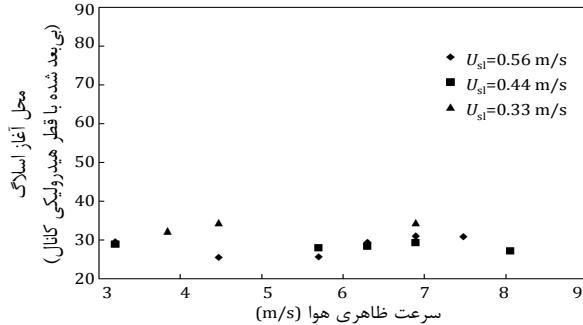
با توجه به ثبت داده های فشار موضعی توسط برنامه رایانه ای در هر آزمایش و فرآواني آنها، در ادامه نمودارهای فشار ۳ مدل نخست در یک آزمایش از هر کسر حجمی مایع بعنوان نمونه آورده می شود. جهت ثبت تصاویر متوالی و فیلم از جریان در آزمایش های مختلف از دوربین فیلمبرداری کانن^۱ استفاده شده است.

۴-۳- روند انجام آزمایش
ابتدا مسیر آب باز و آب وارد کanal می شود تا کسر حجمی اولیه ($0/50$ و $0/25$)

1- CANON IXY 32S

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 بی بعد آغاز اسلاگ ۲۷/۰۸ می باشد.



شکل ۱۵ محل آغاز بی بعد اسلاگ در سرعت های ظاهری مختلف آب و هوا در کسر حجمی مایع ۰/۵۰

جدول ۳ بیشینه و کمینه کلی مکان آغاز اسلاگ ($\alpha_t=0/50$)

توضیحات	شماره آزمایش	سرعت ظاهری (m/s)	سرعت ظاهری ضریب مکان بی بعد (m/s)	لغزش آغاز اسلاگ (m/s)	گاز (m/s)	مایع (m/s)	کمینه کلی	بیشینه کلی	بیشینه کلی
	۲۱	۲۵/۰	۸/۰۵	۴/۴۷	۰/۵۶	۰/۵۰	۲۱	۲۱	۲۱
	۸	۳۴/۵۰	۱۳/۴۱	۴/۴۷	۰/۳۳	۰/۳۰	۸	۳۴/۵۰	۱۳/۴۱
	۱۰	۳۴/۵۰	۲۰/۶۷	۶/۸۹	۰/۳۳	۰/۳۰	۱۰	۳۴/۵۰	۲۰/۶۷

طبق جدول ۳ کمینه کلی مکان بی بعد آغاز اسلاگ در آزمایش ۲۱ و بیشینه کلی مکان بی بعد آغاز اسلاگ در آزمایش های ۸ و ۱۰ است. نقاط بیشینه و کمینه نمودار در مقادیر میانی سرعت های ظاهری گاز و مایع می باشند. می توان 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 سرعت های ظاهری آب و هوا به ترتیب $۰/۳۳\text{m/s}$ و $۰/۴۷\text{m/s}$ در مدت زمان ۳۰s در شکل ۱۶ آمده است.

در این آزمایش متوسط محل تشکیل اسلاگ $۲/۳۰\text{m}$ از ابتدای کanal (طول معادل $۳۴/۵۰\text{D}$) می باشد. طبق جدول ۱ محل تشکیل اسلاگ حد فاصل مبدل های فشار ۱ و ۲ می باشد.

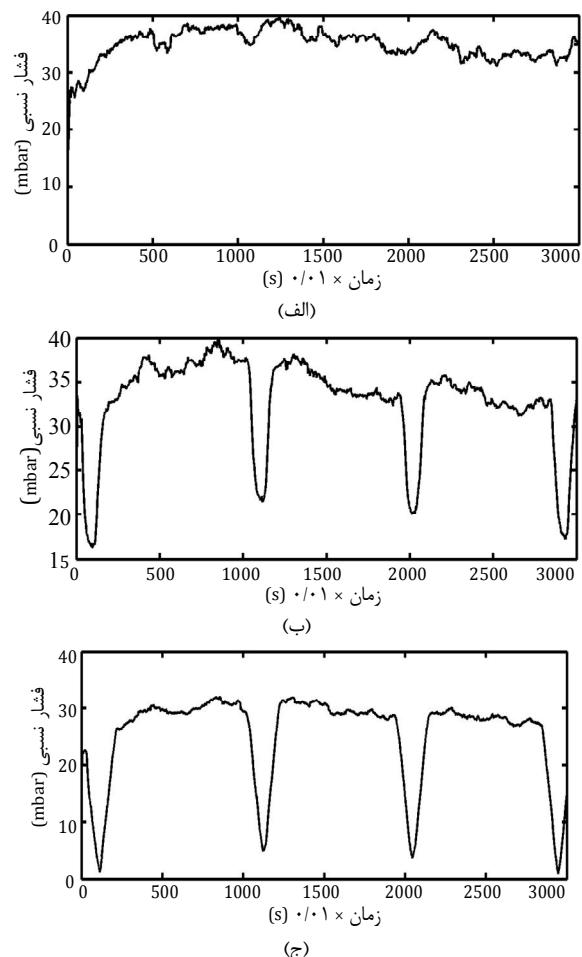
به مانند حالت کسر حجمی مایع $۰/۲۵$ مکان تشکیل اولین اسلاگ در کanal، بعد از مبدل فشار ۱ می باشد. همان گونه که دیده می شود، شرایط جریان مشابه حالت قبل می باشد. تفاوت با حالت قبل در میزان بیشینه فشار ثبت شده است. البته کمینه فشار نیز در این حالت به حدود صفر می رسد. بیشینه فشار ثبت شده در کسر حجمی مایع $۰/۵۰$ کمتر از کسر حجمی مایع $۰/۲۵$ می باشد. از نمودارها مشخص است که دو نوع اسلاگ تشکیل می شود. یک اسلاگ در حدود ۶ ثانیه و دیگری ۱۱ ثانیه در کanal 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 می شود. در این کسر حجمی مایع، سرعت ظاهری مایع و محل آغاز اسلاگ روندی عکس دارند. می توان روند کلی افزایش سرعت ظاهری گاز را به این صورت بیان کرد که با افزایش آن محل آغاز اسلاگ به

نمودارهای فشار نسبی در آزمایش شماره ۹ با سرعت های ظاهری آب و هوا به ترتیب $۰/۳۳\text{m/s}$ و $۵/۰۹\text{m/s}$ در مدت زمان ۳۰s در شکل ۱۴ آمده است. در هر ثانیه، ۱۰۰ داده فشار توسط برنامه رایانه ای در محیط نرم افزار متلب^۱ ثبت می شود. بنابراین محور افقی نمودارهای فشار نسبی بر حسب ۱۰۰ برابر ثانیه می باشد. در این آزمایش متوسط محل تشکیل اسلاگ $۲/۶۰\text{m}$ از ابتدای کanal (طول معادل ۳۹D) می باشد. طبق جدول ۱

محل تشکیل اسلاگ حد فاصل مبدل های فشار ۱ و ۲ می باشد. مبدل فشار شماره ۱ در فاصله ۱ متری از ورودی کanal قرار دارد. مکان تشکیل اولین اسلاگ در کanal، بعد از این مبدل می باشد. همان گونه که دیده می شود، فشار در ابتدای کanal بیشینه است. با تشکیل نخستین اسلاگ، فشار پشت بدنه مایع اسلاگ، آن را به پایین دست می راند. با عبور اسلاگ از مبدل های فشار ۲ و ۳، میزان فشار ثبت شده توسط آن ها دارای بیشینه مقداری در حدود فشار مبدل فشار ۱ می باشد. با این تفاوت که نمودار مبدل های فشار ۲ و ۳ دارای مقادیر کمینه نسبی است. این کمینه ها نشان دهنده عبور اسلاگ مایع از مبدل فشار است. به بیان دیگر با رسیدن بیشینه اسلاگ به مبدل فشار، مقدار فشار زیاد می شود. این مقدار فشار بیشینه تا خروج کامل اسلاگ از کanal باقی می ماند. مدت زمان برقراری فشار بیشینه در کanal حاضر با مشخصات بیان شده در حدود ۹ ثانیه می باشد.



شکل ۱۶ نمودارهای فشار نسبی در $\alpha_t=0/75$ ، الف- مبدل فشار ۱، ب- مبدل فشار ۲ و ج- مبدل فشار ۳، آزمایش شماره ۹، $U_{sg}=۵/۰۹\text{m/s}$ و $U_{sl}=۰/۳۳\text{m/s}$

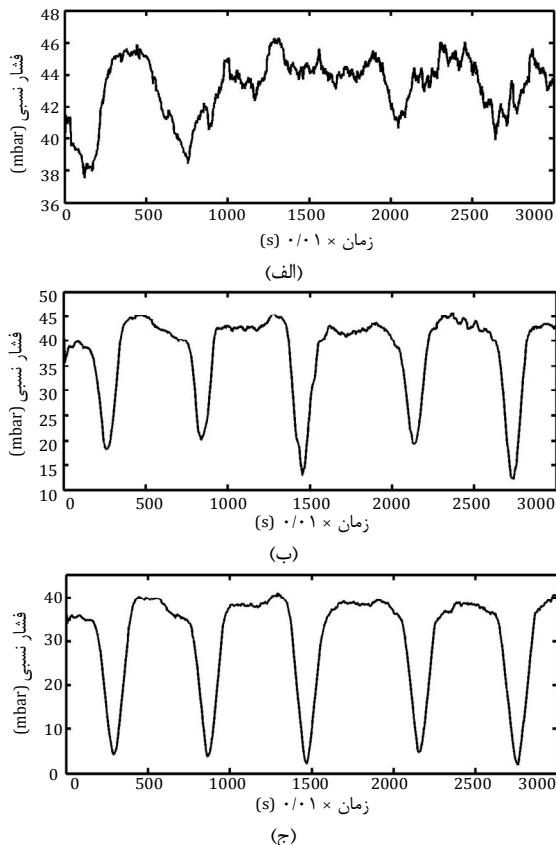
جدول ۴ بیشینه و کمینه کلی مکان آغاز اسلامگ ($\alpha_L=0/75$)

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

از جدول ۴ مشخص است که کمینه مکان آغاز اسلامگ 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 ($U_{sl}=0/56\text{m/s}$) با افزایش سرعت گاز، مکان بی بعد آغاز اسلامگ از مقدار $7/50$ کمتر نخواهد شد.

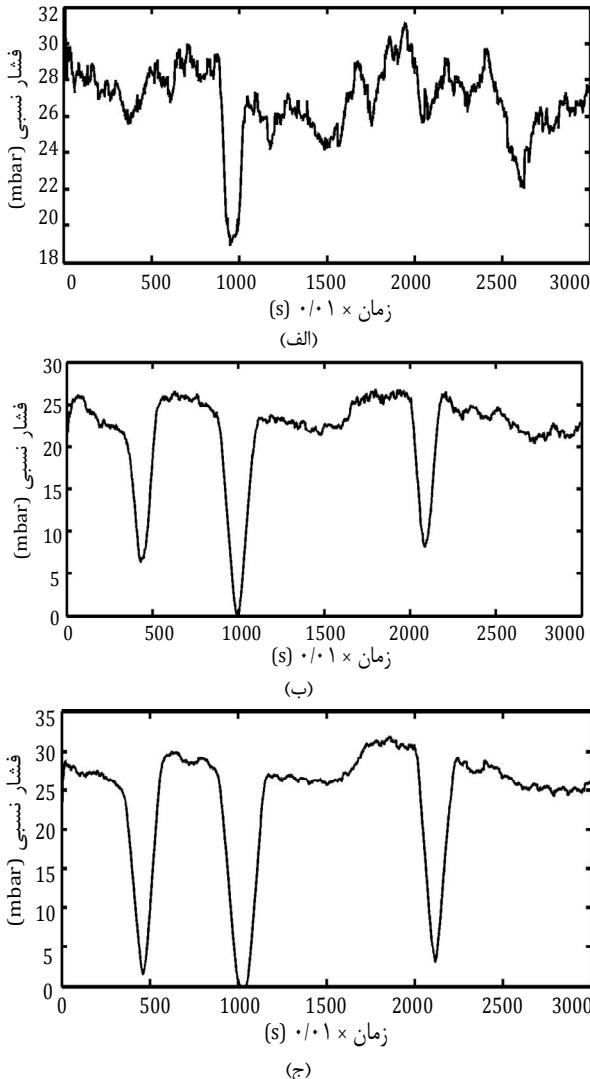
در کسر حجمی مایع $0/75$ ، متوسط مکان بی بعد آغاز اسلامگ $21/65$ می‌باشد. طبق جدول ۴ کمینه کلی مکان بی بعد آغاز اسلامگ در آزمایش‌های آخر (بیشترین سرعت‌های ظاهری مایع و گاز) و بیشینه کلی مکان بی بعد آغاز اسلامگ در آزمایش اول (کمترین سرعت‌های ظاهری مایع و گاز) است که نشان‌دهنده وابستگی معکوس مکان آغاز اسلامگ با سرعت‌های ظاهری دو فار می‌باشد.

نمودارهای فشار نسبی در آزمایش شماره ۲۰ با سرعت‌های ظاهری آب و هوا به ترتیب $U_{sl}=0/44\text{m/s}$ و $U_{sg}=5/09\text{m/s}$ در مدت زمان 300s در شکل ۱۸ آمده است. در این آزمایش متوسط محل تشکیل اسلامگ $1/75\text{m}$ از ابتدای کanal (طول معادل $26/25\text{D}$) می‌باشد. طبق جدول ۱، محل تشکیل اسلامگ حد

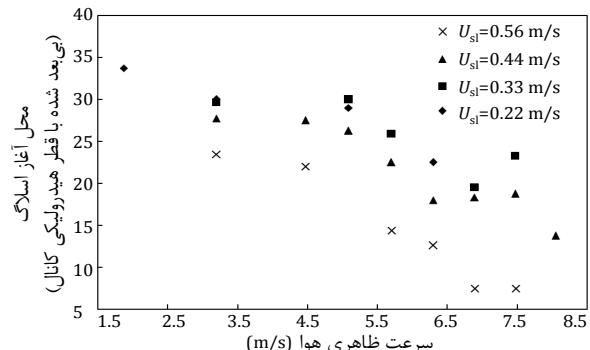


شکل ۱۸ نمودارهای فشار نسبی در $\alpha_L=0/75$ ، آزمایش شماره ۲۰، الف-مبدل فشار ۱، ب-مبدل فشار ۲ و ج-مبدل فشار ۳، سرعت ظاهری مایع $U_{sl}=0/44\text{m/s}$ و $U_{sg}=5/09\text{m/s}$

بالادست منتقل می‌شود. یعنی با افزایش سرعت ظاهری مایع و گاز آغاز اسلامگ در فاصله نزدیکتری به ورودی کanal رخ خواهد داد (شکل ۱۷). با افزایش سرعت ظاهری مایع و گاز مونتم این دو فاز نیز افزایش می‌یابد. افزایش مونتم باعث افزایش ناپایداری بین دو فاز می‌شود. با افزایش ناپایداری سطح مشترک موسوم به ناپایداری کلوین- هلmholtz، اسلامگ سریع‌تر تشکیل خواهد شد.



شکل ۱۶ نمودارهای فشار نسبی در $\alpha_L=0/50$ ، آزمایش شماره ۱، ب-مبدل فشار ۱، و ج-مبدل فشار ۳، سرعت ظاهری هوا $U_{sl}=4/47\text{m/s}$ و $U_{sg}=4/47\text{m/s}$



شکل ۱۷ محل آغاز بی بعد اسلامگ در سرعت‌های ظاهری مختلف آب و هوا در کسر حجمی مایع $0/75$

آن می‌باشد. طبق معیار ناپایداری کلوبن- هلمهولتز، رشد امواج سطح مشترک تسريع و تشکیل اسلامگ محتمل‌تر می‌شود (شکل ۱۳).
- در کسر حجمی مایع ۰/۲۵ کمینه، بیشینه و متوسط محل آغاز اسلامگ به ترتیب ۰/۲۵، ۰/۲۷ و ۰/۲۶ برابر قطر هیدرولیکی کanal می‌باشد. یعنی بطور متوسط اسلامگ‌ها در فواصل طولانی از ورودی (بیشتر از ۴۰ برابر قطر هیدرولیکی کanal) تشکیل می‌شوند. در سرعت ظاهری گاز ثابت و با افزایش سرعت ظاهری مایع، محل آغاز اسلامگ به فاصله دورتری از ورودی انتقال می‌باشد. در سرعت ظاهری مایع ثابت نیز با افزایش سرعت ظاهری گاز، محل آغاز اسلامگ به فاصله دورتری از ورودی انتقال می‌باشد. وابستگی محل آغاز به تغییرات سرعت ظاهری گاز و مایع بصورت یکنواخت صعودی است.
- در کسر حجمی مایع ۰/۵۰ کمینه، بیشینه و متوسط محل آغاز اسلامگ به ترتیب ۰/۵۰، ۰/۴۵ و ۰/۴۷ برابر قطر هیدرولیکی کanal می‌باشد. یعنی بطور متوسط اسلامگ‌ها در فواصل کوتاهی از ورودی (کمتر از ۴۰ برابر قطر هیدرولیکی کanal) تشکیل می‌شوند. در سرعت ظاهری گاز ثابت و با افزایش سرعت ظاهری مایع، محل آغاز اسلامگ به فاصله دورتری از ورودی انتقال می‌باشد. در سرعت ظاهری مایع ثابت نیز با افزایش سرعت ظاهری گاز، محل آغاز اسلامگ به فاصله دورتری از ورودی انتقال می‌باشد. اما تغییرات محل آغاز اسلامگ بعدها کمتر و ملایم‌تر است.
- در کسر حجمی مایع ۰/۷۵ کمینه، بیشینه و متوسط محل آغاز اسلامگ به ترتیب ۰/۷۵، ۰/۶۵ و ۰/۶۱ برابر قطر هیدرولیکی کanal می‌باشد. یعنی بطور متوسط اسلامگ‌ها در فواصل کوتاهی از ورودی (کمتر از ۴۰ برابر قطر هیدرولیکی کanal) تشکیل می‌شوند. در سرعت ظاهری گاز ثابت و با افزایش سرعت ظاهری مایع، محل آغاز اسلامگ به فاصله نزدیک‌تری به ورودی انتقال می‌باشد. در سرعت ظاهری مایع ثابت نیز با افزایش سرعت ظاهری گاز، محل آغاز اسلامگ به فاصله نزدیک‌تری به ورودی انتقال می‌باشد. وابستگی محل آغاز به تغییرات سرعت ظاهری گاز و مایع بصورت یکنواخت نزولی است.
- می‌توان گفت که با افزایش کسر حجمی مایع، وابستگی مکانی بعد آغاز اسلامگ با سرعت‌های ظاهری دو فاز از یکنواخت صعودی به یکنواخت نزولی تعییر می‌کند.
- در کسرهای حجمی مایع ۰/۲۵ و ۰/۷۵، اسلامگ‌های قوی‌تری تشکیل می‌شوند. قدرت یک اسلامگ 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 کanal برابر باشد، اسلامگ‌های با فشار کمتر (ضعیفتر) و زمانی که کسر حجمی یک فاز بیش از دیگری باشد، اسلامگ‌های با فشار بیشتر (قوی‌تر) تشکیل خواهد شد.

۶- فهرست علایم

A	سطح مقاطع (m ²)
D	قطر (m)
g	شتاب جاذبه (ms ⁻²)
h	ارتفاع (m)
k	عدد موج (m ⁻¹)
S	طول تماس با دیواره کanal (m)
U	سرعت (ms ⁻¹)
α	کسر حجمی
θ	شیب کanal (rad)

فاصل مبدل‌های فشار ۱ و ۲ می‌باشد. به مانند دو حالت کسر حجمی مایع ۰/۲۵ و ۰/۵۰، مکان تشکیل اولین اسلامگ در کanal، 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، اسلامگ‌های قوی‌تری تشکیل می‌شوند. قدرت یک اسلامگ می‌تواند اثر تخریبی بیشتری بر سازه خط لوله داشته باشد. طبق شکل ۱۸، مدت زمان برقراری فشار بیشینه در کanal در حدود ۷ ثانیه می‌باشد.

جدول ۵ رابطه مکانی بعده آغاز اسلامگ در کسر حجمی‌های مایع مختلف در

محدوده نتایج بدست آمده

مکان بعده آغاز اسلامگ	کسر حجمی	میزان خطا
$S.P. = 2.82 \times 10^{-5} Re_{sl}^{1.01} Re_{sg}^{0.44}$	۰/۲۵	٪۳/۲۷
$S.P. = 0.79 Re_{sl}^{-0.98} Re_{sg}^{-0.91} + 27.18$	۰/۵۰	٪۳/۴۲
$S.P. = 2706.2 Re_{sl}^{-0.007} Re_{sg}^{-0.006} - 2351.6$	۰/۷۵	٪۴/۴۳

۴- روابط تجربی

طبق داده‌های حاصل از آزمایش‌های انجام شده، با استفاده از روش آماری حداقل مربعات^۱ و کمیت فیزیکی بعده رینولدز ظاهری دو فاز (رابطه ۸)، رابطه مکانی بعده آغاز اسلامگ با خطای کمتر از ۵٪ بدست آمده است (جدول ۵).

$$\begin{aligned} U_{sg} &= \alpha_5 U_g U_{sl} = \alpha_5 U_l \\ D_{hg} &= \frac{4A_g}{S_g + S_i} D_{hl} = \frac{4A_l}{S_l} \\ Re_{sg} &= \frac{\rho_g D_{hg} |U_{sg}|}{\mu_g} Re_{sl} = \frac{\rho_l D_{hl} |U_{sl}|}{\mu_l} \end{aligned} \quad (8)$$

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 اسلامگ 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 و ۰/۵۰ و ۰/۷۵، در یک کanal افقی با مقطع مستطیلی به ابعاد ۵×۱۰ cm² (قطر معادل هیدرولیکی ۶/۶۷ cm) و به طول ۳۶ m (طول معادل ۵۴۰ D) از جنس پلاکسی 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 کanal افقی، ممکن است به بالای لوله رسیده و یک اسلامگ را تشکیل دهد، یا به امواج غلتان^۲ تبدیل شود.

- در کسر حجمی مایع ۰/۲۵، فرایند تشکیل اسلامگ 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 ۰/۸۵-۰/۵۰) بالا می‌آید. این پدیده موجب تنگ شدن مقطع عبور گاز می‌شود (شکل ۱۲). به دلیل ثابت بودن دبی هوای ورودی به کanal، 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

1- Least Square Method
2- Roll Waves

- [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

μ	ویسکوزیته ($\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-1}$)
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

نویسنده‌گان 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