



## تعیین فرکانس اسلاگ در کانال افقی طویل به روش تجربی

پویان ادیبی<sup>۱</sup>، محمدرضا انصاری<sup>۲\*</sup>، بابک حبیبپور<sup>۱</sup>، ابراهیم سلیمی<sup>۳</sup>

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

۲- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

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

\*تهران، صندوق پستی ۱۴۳-۱۴۱۱۵، پست الکترونیکی mra\_1330@modares.ac.ir

### چکیده

### اطلاعات مقاله

در این مقاله اثرات سرعت ظاهری گاز و مایع ورودی و نیز فاصله از بالادست کانال بر فرکانس اسلاگ در جریان دوفازی آب و هوا به صورت تجربی بررسی و روابط تجربی برای محاسبه فرکانس اسلاگ نیز ارائه شده است. محل انجام آزمایشها، آزمایشگاه جریان چندفازی دانشگاه تربیت مدرس بوده است. آزمایشها در کسر حجمی مایع ۰/۷۵ در یک کانال افقی با مقطع مستطیلی به ابعاد  $5 \times 10 \text{ cm}^2$  (قطر معادل هیدرولیکی  $6/67 \text{ cm}$ ) و به طول  $36 \text{ m}$  از جنس پلکسی گلاس انجام شده است. محدوده سرعت ظاهری آب  $0/11-0/56 \text{ m/s}$  و سرعت ظاهری هوا  $1/88-13 \text{ m/s}$  است. اندازه گیری فرکانس اسلاگ در سه محل از ورودی کانال انجام شده است. نتایج آزمایشها نشان می دهد که در تمامی حالت های آزمایش، کمینه فرکانس در کمترین سرعت ظاهری مایع و بیشینه آن در بیشترین سرعت ظاهری مایع رخ می دهد. با افزایش ضریب لغزش، فرکانس اسلاگ کاهش می یابد. فرکانس اسلاگ تابع قوی از سرعت ظاهری مایع است. در سرعت های بالای آب، فرکانس اسلاگ در کانال افزایش می یابد. تاثیر سرعت ظاهری گاز بر فرکانس اسلاگ در هر سرعت ظاهری مایع، کاهش است. با حرکت در جهت پایین دست کانال، فرکانس اسلاگ کاهش می یابد. حرکت اسلاگ در پایین دست کانال، سریع تر و با شتاب بالاتری انجام می گیرد.

مقاله پژوهشی کامل  
دریافت: ۱۲ تیر ۱۳۹۲  
پذیرش: ۰۳ مهر ۱۳۹۲  
ارائه در سایت: ۳۱ فروردین ۱۳۹۳  
کلید واژگان:  
فرکانس اسلاگ  
سرعت ظاهری ورودی  
کانال افقی طویل  
روش تجربی

## Slug frequency evaluation in long horizontal channel by experimental method

Pouyan Adibi<sup>1</sup>, Mohammad Reza Ansari<sup>1\*</sup>, Babak Habibpour<sup>1</sup>, Ebrahim Salimi<sup>1</sup>

1- Faculty of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

\*P.O.B. 14115- 143 Tehran, mra\_1330@modares.ac.ir

### ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper  
Received 03 July 2013  
Accepted 25 September 2013  
Available Online 20 April 2014

#### Keywords:

Slug frequency  
Inlet superficial velocity  
Long horizontal channel  
Experimental method

### ABSTRACT

In this paper, the effect of gas and liquid inlet superficial velocities and distance from upstream on slug frequency is studied experimentally. Empirical correlations are also presented based on the obtained results. The tests are conducted for liquid holdup  $\alpha_l = 0.75$  and three distances from inlet in a long horizontal channel made of Plexiglas with dimensions of  $5 \times 10 \text{ cm}^2$  and  $36 \text{ m}$  length in Multiphase Flow Lab. of Tarbiat Modares University. The superficial liquid and air velocities rated as  $0.11-0.56 \text{ m/s}$  and  $1.88-13 \text{ m/s}$ , respectively. The obtained results show that slug frequency is dependent to superficial liquid velocity directly. Slug frequency decreases with slip ratio increase. Slug frequency has strong dependency on superficial liquid velocity and increases monotonically with it. However, superficial gas velocity has damping effect on slug frequency. As slug moves towards downstream, slug frequency will be decreased but slug velocity will be increased.

### ۱- مقدمه

که به سقف کانال برسد (به اصطلاح سقف کانال را خیس کند) موج اسلاگ را تشکیل می دهد. دوم امواجی که به سقف کانال نمی رسد و روی خود باز می گردد (مانند امواج بلند اقیانوسی) امواج غلتان<sup>۲</sup> را تشکیل می دهد. محققین مختلفی نظیر هانراتی و هرشمان [۴] و کدروی و همکاران [۵] نیز به بررسی این امواج پرداخته اند.

جریان اسلاگ در صنایع تولید انرژی که شامل دوفاز هستند، مانند خطوط لوله انتقال بخار، نفت و گاز، هیدروکربن ها، اواپراتورها و کندانسورهای نیروگاه های تولید توان و غیره اتفاق می افتد. جریان اسلاگ دارای طبیعتی ناپایدار و گذرا است. در صورتی که طول کانال به حد کافی طویل باشد حباب

درک خوب از رفتار فیزیکی سیستم های دوفازی و تغییر مشخصه های جریان با زمان، نظیر حجم یا سرعت فاز، برای طراحی مناسب خط لوله، عمل آوری سیال، بهینه سازی عملکرد، ایمنی حداکثر، کنترل بهره برداری از فرآیندها و نیز طراحی تجهیزات مرتبط بسیار مهم است [۱]. در زمان طراحی خط لوله و مخازن، پیش بینی رژیم جریان اسلاگ<sup>۱</sup> مهم است [۲]. جریان اسلاگ یکی از شایع ترین الگوهای جریان دوفازی است که در آن سیال مایع به تنهایی سطح مقطع لوله را پر می کند (شکل ۱- الف و ب). ناپایداری سطح مشترک خود را به دو صورت نشان می دهد، اول امواجی

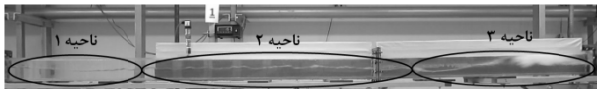
2- Roll waves

1- Slug

### Please cite this article using:

P. Adibi, M.R. Ansari, B. Habibpour, E. Salimi, Slug frequency evaluation in long horizontal channel by experimental method, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 2, pp. 141-149, 2014 (In Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:



شکل ۲- ب سه ناحیه اصلی اسلاگ،  $U_{sl}=0.22\text{m/s}$  و  $U_{sg}=5.09\text{m/s}$ ، آزمایشگاه جریان چندفازی دانشگاه تربیت مدرس [



شکل ۳ دو اسلاگ متوالی، آزمایش ۲،  $U_{sl}=0.22\text{m/s}$  و  $U_{sg}=3.20\text{m/s}$ ، آزمایشگاه جریان چندفازی دانشگاه تربیت مدرس [

### ۳- فرکانس اسلاگ

یک موضوع پراهمیت در توسعه مدل‌های جریان اسلاگ، پیش‌بینی فرکانس اسلاگ است که امروزه به‌طور کامل حل نشده است [۱۰]. مطالعات نویسندگان این تحقیق نیز نشان می‌دهد این موضوع همچنان به‌عنوان یک مسئله اساسی در جریان‌های دوفازی درون لوله و کانال مطرح است.

فرکانس اسلاگ تعداد اسلاگ‌های عبوری از یک مکان ویژه در راستای خط لوله در یک دوره زمانی مشخص است. از میان مشخصه‌های جریان اسلاگ، فرکانس اسلاگ موردی بحرانی است که به مشکلات عملکردی جدی مانند سیلابی شدن<sup>۴</sup> تاسیسات پایین دست، خوردگی شدید لوله، ناپایداری سازه‌های خط لوله و نوسانات فشار سر چاه منجر می‌شود. تجارب نشان می‌دهد که خوردگی لوله به‌طور عمده‌ای از فرکانس بالای اسلاگ متأثر است [۱۱]. رفتار آشوبناک<sup>۵</sup> جریان در پیشانی اسلاگ موجب شکست پوشش‌های حفاظتی می‌شود، دیواره لوله در معرض عناصر خوردنده موجود درون مسیر جریان قرار می‌گیرد و از این‌رو نرخ خوردگی به‌طور مستقیم با تعداد اسلاگ‌های در حال حرکت در طول لوله متناسب خواهد بود. بنابراین، دانستن فرکانس اسلاگ برای پیش‌بینی دقیق نرخ‌های خوردگی و توسعه یک برنامه بازدارنده خوردگی، مناسب و ضروری است [۱۲].

پیش‌بینی فرکانس اسلاگ در طراحی خطوط لوله انتقال و تجهیزات دریافت کننده گاز-مایع مهم است. افت فشار در طی اسلاگی شدن نسبت به حالت جریان همگن و لایه‌ای بالاتر است. افت فشار به‌طور مستقیم با فرکانس اسلاگ متناسب است. بنابراین پیش‌بینی درست فرکانس اسلاگ مهم است [۱۳]. در شکل ۳ تصویری از دو اسلاگ متوالی دیده می‌شود.

### ۴- روند تحقیقات گذشته در خصوص فرکانس اسلاگ

از آنجایی که عوامل موثر بر فرکانس اسلاگ زیاد است، محققانی چون کوردیبان و رائوف [۱۴] چو [۱۵] ورمولن و رایان [۱۶] و داکلر و هوپارد [۱۷] یاد کرده‌اند که استفاده از نتایج آن‌ها مخصوص شرایط آزمایش است. فرکانس اسلاگ ارائه شده توسط اغلب آن‌ها تابعی ساده از نرخ‌های جریان گاز و مایع در قطر ثابت لوله و خواص سیال است.

مطالعات تئوری و تجربی فراوانی بر خطوط لوله افقی انجام شده است. اولین تحقیقات کامل تجربی فرکانس اسلاگ منسوب به هوپارد [۱۸] است. وی جریان هوا و آب در یک لوله افقی با قطر داخلی ۳/۵۱ cm را بررسی کرد. گریگوری و اسکات [۱۹] داده‌هایی را در مورد فرکانس اسلاگ و سرعت انتقالی در یک لوله به قطر ۱/۹ cm ارائه کردند. سیال‌های عامل آب و دی-اکسیدکربن بوده است. ایشان با استفاده از داده‌های تجربی خود رابطه (۱) را برای محاسبه فرکانس اسلاگ ارائه کردند.

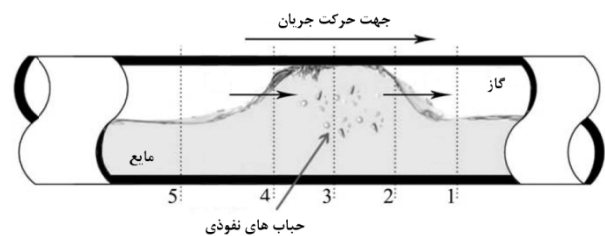
گاز بزرگ و اسلاگ به‌صورت نوبتی در لوله جریان می‌یابد. این خصوصیت جریان اسلاگ سبب ایجاد نیروهای دینامیکی در لوله‌ها، ایجاد بار اضافی دینامیکی در اجزا دریافت کننده<sup>۱</sup> و افت فشار در مسیر جریان می‌شود. با توجه به پیامدهای مضر تشکیل اسلاگ، مطالعه سازوکار تشکیل، نقطه آغاز و رشد اسلاگ و تعداد آن‌ها در واحد زمان از اهمیت بالایی برخوردار است [۶].

### ۲- فیزیک پدیده اسلاگ

زمانی که گاز با سرعت زیاد بر سطح مایع موجی جریان یابد، نیروی برای آبرودینامیکی<sup>۲</sup> ناشی از تغییر فشار بر موج به‌عنوان عامل ناپایدار کننده، برای غلبه بر نیروهای هیدرواستاتیکی به‌عنوان عامل پایدار کننده کافی است. این موضوع به‌عنوان ناپایداری کلین-هلمهولتز<sup>۳</sup> شناخته می‌شود. به‌علاوه اثر برنولی نیز به عامل ناپایداری کمک خواهد کرد [۷].

انصاری [۸] بیان کرد که وقتی گاز بر سطح مایع صاف 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 به‌طور تجربی در کانال مستطیلی به طول ۱۰ m و سطح مقطع  $5 \times 10 \text{ cm}^2$  بررسی کرد. ایشان نتیجه گرفت که یک واحد موج اسلاگ از سه ناحیه اصلی تشکیل شده است (شکل ۲- الف و ب).

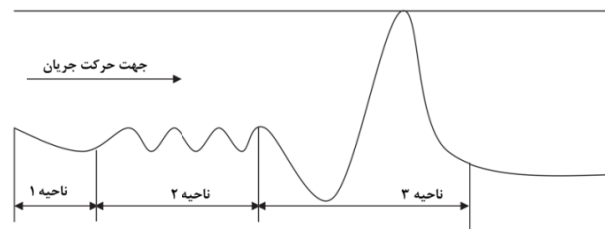
در ناحیه اول، سطح مشترک جریان دوفازی به‌دلیل جریان گاز، اندکی فشرده می‌شود. در ناحیه دوم تعدادی امواج با طول موج کوتاه تشکیل می‌شود. یکی از این موج‌ها با طول موج کوتاه در ناحیه سوم رشد کرده که در نهایت اسلاگ خواهد شد. همچنین ایشان نتیجه گرفت که دلیل تشکیل اسلاگ (که یک موج بلند است) امواج کوتاهی است که پیش از ایجاد اسلاگ در ناحیه دوم ظاهر می‌شوند. ساز و کار رشد امواج کوتاه برپایه ناپایداری کلین-هلمهولتز است.



شکل ۱- الف طرح‌واره جریان اسلاگ [۳]



شکل ۱- ب جریان اسلاگ،  $U_{sl}=0.59\text{m/s}$  و  $U_{sg}=5.09\text{m/s}$ ، آزمایشگاه جریان چندفازی دانشگاه تربیت مدرس [



شکل ۲- الف طرح‌واره سه ناحیه اصلی در جریان اسلاگ [۹]

1- Receiving devices  
2- Aerodynamic lifting force  
3- Kelvin- helmholtz

4- Flooding  
5- Chaotic

محاسبه فرکانس اسلاگ ارائه کرد. تأثیر زاویه شیب در روابط پیشین دیده نشده بود.

$$F_s = 0.0226 \left[ \frac{U_{sl}}{gD} \left( \frac{212.6}{U_m} + U_m \right) \right]^{1.2} \times [0.836 + 2.75 \sin^{0.25}(\theta)] \quad (2)$$

در این تحقیق برای درک اثر سرعت ظاهری گاز و مایع ورودی و نیز تأثیر فاصله از بالادست کانال در تشکیل، تجمع و استهلاک اسلاگ‌ها در سه محل از کانال، یعنی فاصله  $60D$  از ورودی کانال (محدوده ابتدایی کانال و آغاز تشکیل اسلاگ) فاصله  $279D$  از ورودی کانال (محدوده میانی کانال و شرایط پایتاز جریان اسلاگ نسبت به ناحیه ورودی کانال) و فاصله  $450D$  از ورودی کانال (محدوده انتهایی کانال و خروج اسلاگ) آزمایش‌های مختلفی انجام شده‌است. بررسی پدیده اسلاگ در کانال طویل افقی و وابستگی رشد و استهلاک آن به موقعیت آن در کانال از نوآوری‌های تحقیق حاضر است.

### ۵- سیستم آزمایشگاهی

طرح‌واره سیستم آزمایشگاهی مورد استفاده در این پژوهش در شکل ۴ نشان داده شده است. به‌طور معمول به‌دلیل دسترسی آسان، غیرقابل اشتعال و غیرسمی بودن از هوا به‌عنوان سیال گاز و از آب به‌عنوان سیال مایع در بررسی جریان دوفازی استفاده می‌شود.

آزمایش‌ها در کانال افقی با مقطع مستطیلی به ابعاد  $5 \times 10 \text{ cm}^2$  (قطر معادل هیدرولیکی  $6/67 \text{ cm}$ ) و به طول  $36 \text{ m}$  (طول معادل  $540D$ ) از جنس پلکسی گلاس<sup>۴</sup> انجام شده‌است. دیواره شفاف کانال اجازه بررسی دیداری از وضعیت جریان داخل کانال را به ناظر بیرونی می‌دهد. کانال بر تعدادی تکیه‌گاه فلزی قرار دارد. هر تکیه‌گاه به‌طور مجزا قابلیت تنظیم شیب  $0-89^\circ$  درجه نسبت به افق را دارد.

برای تأمین هوا از دمنده و برای تأمین آب از پمپ گریز از مرکز استفاده شده است. هوا و آب بعد از رسیدن به قسمت مخلوط‌کننده به صورت هم‌سو وارد کانال و سپس با عبور از کانال، در انتها وارد مخزن روباز می‌شوند که در آن هوا و آب از هم جدا می‌شود.

### ۵-۱- خط تأمین هوا

برای ایجاد جریان هوا با دبی مناسب از یک دمنده استفاده شده است. هوای مکیده شده از محیط آزمایشگاه پس از عبور از فیلتر هوا وارد دمنده و به داخل مخزن هوا فرستاده می‌شود. هوای درون مخزن که در دما و فشار بالا قرار دارد برای کاهش دما و هم‌دما شدن با آب از یک سیستم خنک‌کاری عبور می‌کند. این کار به‌دلیل شرط تعادل دمایی بین دوفاز مایع و گاز در ورودی کانال انجام می‌گیرد. هوا پس از عبور از سیستم خنک‌کاری به سمت دبی‌سنج‌های هوا جریان یافته و پس از اندازه‌گیری دمای هوا در ورودی مخلوط‌کننده، به‌وسیله 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 اینورتر<sup>۵</sup> برای کنترل دور موتور استفاده شده‌است. به کمک اینورتر می‌توان دبی را در هر مقدار مشخص و دلخواه تأمین و تنظیم کرد.

### ۵-۲- خط تأمین آب

برای تأمین آب از دو پمپ و دو مخزن استفاده شده است. پمپ شماره ۱، سانتریفیوژ با بیشینه دبی  $40 \text{ m}^3/\text{hr}$  و هد  $20 \text{ m}$  و الکتروموتور تک‌فاز است.

$$F_s = 0.0226 \left[ \frac{U_{sl}}{gD} \left( \frac{19.75}{U_m} + U_m \right) \right]^{1.2} \quad (1)$$

نیکلسون و همکاران [۲۰] مدل داکلر و هوبارد [۱۷] را توسعه و آزمایش‌هایی در لوله‌های به قطر  $2/58 \text{ cm}$  و  $5/12 \text{ cm}$  انجام دادند که منجر به داده‌های تغییرات فشار، فرکانس اسلاگ، پرشدگی مایع و سرعت انتقالی اسلاگ شد. هوبارد [۱۸] گریگوری و اسکات [۱۹] و هیوود و ریچاردسون [۲۱] اثر نرخ‌های جریان مایع و گاز بر فرکانس اسلاگ را آزمایش کردند. تمام این محققین، کمینه فرکانس را در حدود سرعت ظاهری گاز  $4 \text{ m/s}$  در محدوده شرایط مطالعه خود گزارش کردند. این نتیجه با مشاهدات جریان هوا-آب در یک لوله  $9/53 \text{ cm}$  در فشار اتمسفر توسط لین و هانراتی [۲۲-۲۳]، آندریتسوس و همکاران [۲۴] و فن و همکاران [۲۵-۲۶] مبنی بر متفاوت بودن الگوهای موج و ساز و کار تشکیل اسلاگ در سرعت‌های زیاد و کم گاز، در توافق است. ایشان دریافتند که در سرعت بالای  $4 \text{ m/s}$  امواج نامنظم در جریان لایه‌ای آشکار می‌شوند. اگر لایه مایع به اندازه کافی ضخیم باشد، امواج می‌توانند به یکدیگر پیوندند و یک اسلاگ را تشکیل دهند.

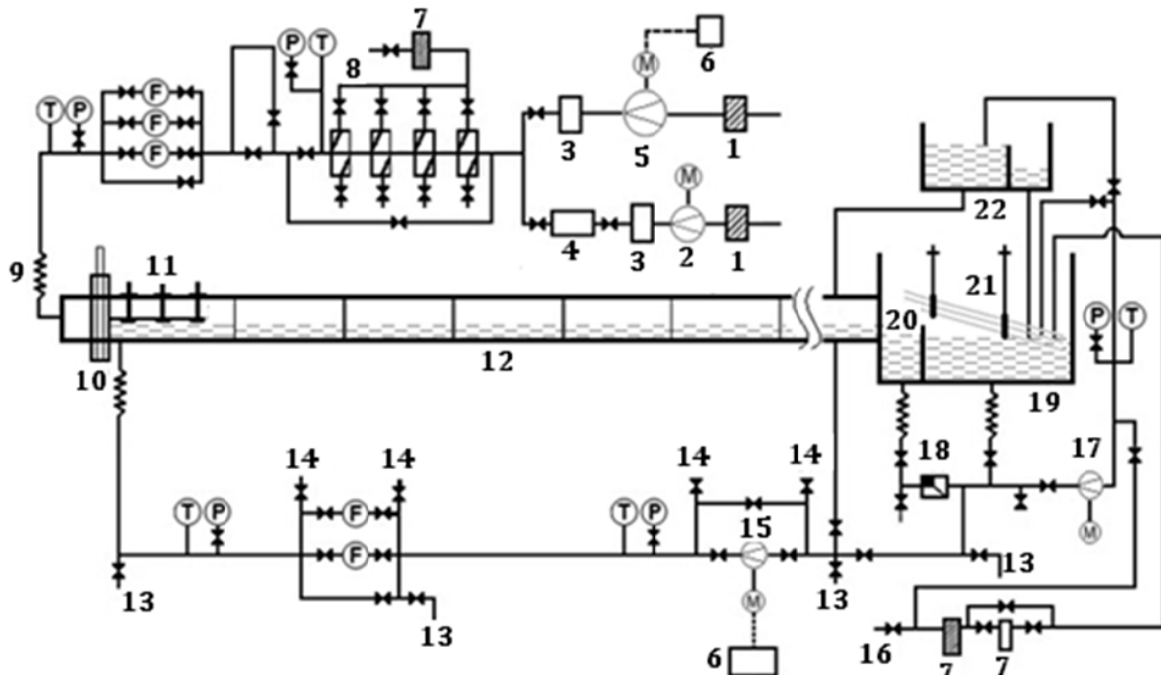
وودز و همکاران [۲۷] تولید اسلاگ در جریان هوا-آب در لوله‌های افقی به قطرهای  $7/63 \text{ cm}$  و  $9/5 \text{ cm}$  با تأکید بر نرخ‌های بالای مایع ( $U_{sl} \geq 0.5 \text{ m/s}$ ) که در آن، اسلاگ‌ها نزدیک به ورودی تشکیل می‌شوند و فواصل زمانی بین اسلاگ‌ها اتفاقی هستند؛ مطالعه و همچنین ایشان یک رابطه تجربی برای محاسبه فرکانس اسلاگ ارائه کردند. ایشان نتیجه گرفتند که در لوله به قطر  $7/63 \text{ cm}$  در سرعت‌های ظاهری گاز کمتر از  $3 \text{ m/s}$  اسلاگ‌های آغازین از تماس امواج سطح مشترک با بالای لوله و بسیار نزدیک به ورودی تشکیل می‌شوند. در  $3-4 \text{ m/s}$  اسلاگ‌ها از تجمع امواج و در پایین دست‌تر تشکیل می‌شوند.

تکامل اسلاگ در طول لوله برای شیب‌ها و قطرهای مختلف لوله به‌طور تجربی مورد مطالعه قرار گرفته است. وانگ و همکاران [۲۸] جریان اسلاگ را به‌طور تجربی در یک مدار آزمایشگاهی<sup>۱</sup> افقی به طول  $133 \text{ m}$  متر مطالعه کردند. گرنیر و همکاران [۲۹] به‌صورت تجربی اسلاگ را در چهار محل محوری در قطر داخلی  $5/3 \text{ cm}$  و طول افقی  $900 \text{ cm}$  در  $U_{sg} < 2.0 \text{ m/s}$  ارزیابی کردند. ون هوت و همکاران [۳۰-۳۱] تکامل پارامترهای هیدرودینامیکی و آماری جریان اسلاگ در چهار نقطه در طول لوله با استفاده از پروب‌های<sup>۲</sup> فیبر نوری در زوایای مختلف شیب از افقی تا عمودی به‌ازای  $U_{sl} < 0.25 \text{ m/s}$  و  $U_{sg} < 0.7 \text{ m/s}$  به‌دلیل برخی محدودیت‌ها، این محققین تکامل پارامترهای آماری جریان اسلاگ گاز-مایع در چندین موقعیت محوری در طول لوله به‌ازای سرعت‌های ظاهری کم گاز را اندازه گرفتند.

زاباراس [۳۲] مدل تایتل و داکلر [۳۳] را با مجموعه کوچکی از داده‌های آزمایشگاهی افقی و شیب‌دار معتبر ساخت و پیش‌بینی‌های رضایت‌بخشی را نشان داد. در مدل تایتل و داکلر [۳۳] فرکانس اسلاگ از حل عددی معادلات بقای جرم و مومنتوم جریان به‌دست می‌آید. زاباراس [۳۲] ادعا کرد که اشکال عمده مدل تایتل و داکلر [۳۳] نه تنها دشواری توسعه الگوریتم حل عددی است، بلکه در زمان مورد نیاز برای محاسبه فرکانس اسلاگ از محدوده چند دقیقه تا چندین ساعت زمان پردازش کامپیوتری<sup>۳</sup> نیز است. زاباراس نیز با استفاده از داده‌های تجربی خود، رابطه گریگوری و اسکات را با تأثیر زاویه شیب لوله، بهبود بخشید و رابطه (۲) را در سیستم احاد انگلیسی برای

1- Test Loop  
2- Probes  
3- CPU time

4- Plexiglas  
5- Inverter



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 مکمل؛ ۱۷: پمپ؛ ۱۸: شیر یکطرفه؛ ۱۹: مخزن؛ ۲۰: صفحه کنترل کننده سطح آب؛ ۲۱: دمپر اسلاگ؛ ۲۲: مخزن؛ F: دی سنچ؛ M: موتور برقی؛ P: فشارسنج؛ T: دماسنج

شکل ۴ طرحواره بستر آزمون آزمایشگاه جریان چندفازی دانشگاه تربیت مدرس

بودن ابعاد کانال، سرعت ظاهری هریک از فازها در ورودی کانال به دست می آید. بیشترین مقدار عدم قطعیت های اندازه گیری براساس استاندارد ANSI/ASME [۳۴] برای دی سنچ آب و هوا به ترتیب  $\pm 1/2\%$  و  $\pm 5\%$  است. میزان فشار موضعی جریان در طول کانال توسط ۱۳ مبدل فشار پیزوالکتریک<sup>۴</sup> اندازه گیری می شود (جدول ۱ و شکل ۵). محدوده اندازه گیری مبدل های فشار Gauge  $0-250 \text{ mbar}$  با خطای کمتر از ۱٪ است.

جدول ۱ مکان مبدل های فشار در طول کانال

ردیف	مکان (m)	مکان بی بعد 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	۳۳/۸	۵۰۶/۷۵



شکل ۵ طرحواره قرارگیری مبدل های فشار در طول کانال آزمایشگاه جریان چندفازی دانشگاه تربیت مدرس

پمپ شماره ۲، سانتیفیوژ با بیشینه دی  $100 \text{ m}^3/\text{hr}$  و هد  $30 \text{ m}$  و الکتروموتور سه فاز است. آب ورودی به مخزن شماره ۲ به وسیله پمپ شماره ۲ وارد مخزن شماره ۱ می شود که در ارتفاع حدود ۶ متری از کف قرار دارد. مخزن شماره ۱ نسبت به مخزن شماره ۲ کوچک تر و دارای یک تیغه جداکننده است که سطح مایع را کنترل می کند. ابعاد این قسمت از مخزن طوری طراحی شده است که قسمت اول آن که هد<sup>۱</sup> 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. این امر سبب می شود که دی بی آب در طی آزمایش به دلیل ثابت ماندن هد پمپ شماره ۱ ثابت بماند.

دی بی مورد نظر برای آزمایش توسط خط کنارگذر<sup>۲</sup> و شیرهای موجود پس از پمپ شماره ۱ و همچنین یک اینورتر که به پمپ شماره ۱ مرتبط است، کنترل می شود. آب پس از عبور از پمپ شماره ۱ و شیرهای پس از آن به سمت دی بی سنچ آب رانده می شود. پس از اندازه گیری دما و فشار به وسیله یک لوله قابل انعطاف و از پایین، وارد مخلوط کننده می شود.

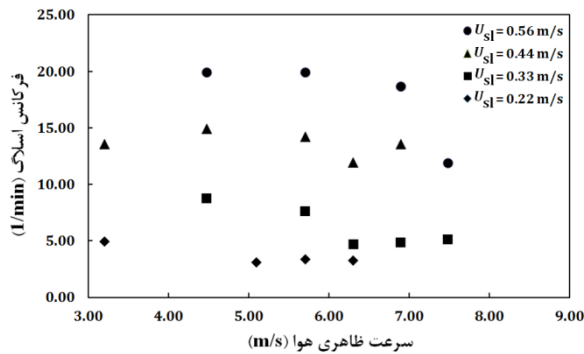
با توجه به آن چه که یاد شد، آب موجود در سیستم دو چرخه مجزا را طی می کند. یکی از این چرخه ها شامل چرخه اصلی است که دی بی آب مورد نیاز برای آزمایش را فراهم می کند و چرخه دوم، آب مازاد موجود در مخزن را برای ثابت نگه داشتن هد پمپ شماره ۱ به گردش درمی آورد.

### ۵-۳- سیستم های اندازه گیری

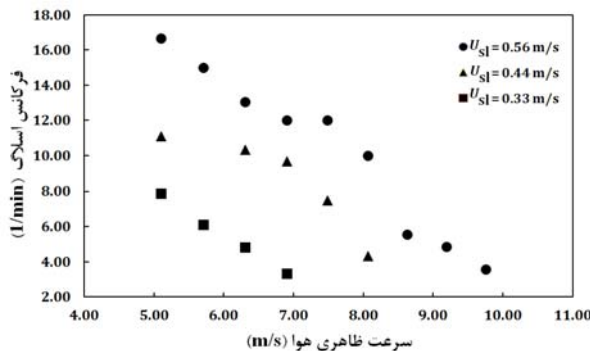
دی بی سنچ هوا از نوع گردابه ای<sup>۳</sup> با دقت  $0.1 \text{ m}^3/\text{hr}$  است. دی بی سنچ آب از نوع الکترومغناطیسی با دقت  $0.1 \text{ m}^3/\text{hr}$  است که در مسیر آب پیش از ورود به مخلوط کننده قرار دارد. با اندازه گیری دی بی هوا و آب و همچنین مشخص

1- Head  
2- Bypass  
3- Vortex

4- Piezoelectric pressure transducer



شکل ۶ فرکانس اسلاگ (۱/min) در سرعت‌های ظاهری مختلف آب و هوا در محل ۶۰ برابر قطر هیدرولیکی کانال



شکل ۷ فرکانس اسلاگ (۱/min) در سرعت‌های ظاهری مختلف آب و هوا در محل ۲۷۹ برابر قطر هیدرولیکی کانال

جدول ۲ بیشینه و کمینه کلی فرکانس اسلاگ در ۶۰D

توضیحات	سرعت		ضریب فرکانس اسلاگ (۱/min)	توضیحات
	ظاهر مایع (m/s)	ظاهر گاز (m/s)		
کمینه کلی	۰/۲۲	۵/۰۹	۳/۱۶	کمینه کلی
بیشینه کلی	۰/۵۶	۴/۴۷	۲۰	بیشینه کلی
بیشینه کلی	۰/۵۶	۵/۷۰	۱۰/۲۶	بیشینه کلی

جدول ۳ بیشینه و کمینه کلی فرکانس اسلاگ در ۲۷۹D

توضیحات	سرعت		ضریب فرکانس اسلاگ (۱/min)	توضیحات
	ظاهر مایع (m/s)	ظاهر گاز (m/s)		
کمینه کلی	۰/۳۳	۶/۸۹	۳/۳۳	کمینه کلی
بیشینه کلی	۰/۵۶	۵/۰۹	۱۶/۶۷	بیشینه کلی

### ۲-۶- فاصله از ورودی کانال برابر ۲۷۹D

طبق شکل ۷ مشخص می‌شود که با افزایش سرعت ظاهری مایع، فرکانس اسلاگ افزایش می‌یابد. در هر سرعت ظاهری ثابت مایع، با افزایش سرعت ظاهری گاز، فرکانس اسلاگ کاهش می‌یابد.

در شکل ۷ در سرعت ظاهری مایع ۰/۲۲m/s عمده اسلاگ‌ها یا به موج غلطان تبدیل شده‌اند و یا اینکه مضمحل شده‌اند. لذا فرکانس آن‌ها ثبت نشده‌است.

طبق جدول ۳ مشخص می‌شود که کمینه فرکانس در کمترین سرعت ظاهری مایع و بیشینه آن در بیشترین سرعت ظاهری مایع رخ می‌دهد.

### ۳-۶- فاصله از ورودی کانال برابر ۴۵۰D

طبق شکل ۸ با افزایش سرعت ظاهری مایع، فرکانس اسلاگ افزایش می‌یابد. افزایش سرعت ظاهری مایع برخلاف افزایش سرعت ظاهری گاز سبب افزایش

با توجه به ثبت داده‌های فشار موضعی توسط برنامه رایانه‌ای در هر آزمایش و فراوانی آن‌ها، در ادامه نمودارهای فشار مبدل‌های شماره ۲ (محل ۶۰D) شماره ۸ (محل ۲۷۹D) و شماره ۱۲ (محل ۴۵۰D) در یک آزمایش از هر کسر حجمی مایع به‌عنوان نمونه آورده می‌شود.

جهت ثبت تصاویر متوالی و فیلم از جریان در آزمایش‌های مختلف از دوربین فیلم‌برداری کانن<sup>۱</sup> با کیفیت مطلوب HD<sup>۲</sup> با مشخصات ۳۰، ۱۲۰ و ۲۴۰ فریم در ثانیه استفاده شده است.

### ۴-۵- روند انجام آزمایش

برای تعیین فرکانس اسلاگ، ابتدا مسیر آب باز و آب وارد کانال می‌شود تا کسر حجمی اولیه ۰/۷۵ در ابتدای آزمایش فراهم شود و جریان آب به حالت پایدار برسد. پس از تثبیت دبی آب در یک مقدار مشخص، سرعت دورانی کمپرسور توسط اینورتر در حداقل میزان لازم برای هوادهی جهت ایجاد جریان اسلاگ قرار داده می‌شود. پس از رسیدن به حالت پایا در حدود ۱ دقیقه فیلم‌برداری و داده برداری از سه محل انجام می‌شود. برای بررسی سرعت‌های ظاهری بالاتر هوا، در حالی که دبی آب ثابت است، سرعت دورانی موتور با گام ۰/۵Hz<sup>۳</sup> افزایش داده و در هر گام پس از رسیدن به حالت پایدار، فیلم‌برداری و داده برداری انجام می‌شود. این مراحل برای دبی‌های بالاتر آب تا جایی که رژیم اسلاگ ایجاد شود، تکرار می‌شود. نتایج حاصل از اندازه‌گیری‌ها و مشاهدات انجام شده در بخش نتایج آزمایش‌ها آورده شده است. محدوده دبی حجمی آب ۲-۱۰m<sup>۳</sup>/hr (معادل سرعت ظاهری ۰/۵۶m/s - ۰/۱۱) و محدوده دبی حجمی هوا ۳۳/۸۴-۲۳۴m<sup>۳</sup>/hr (معادل سرعت ظاهری ۱/۸۸-۱۳m/s) است. اندازه‌گیری فرکانس اسلاگ در سه محل انجام شده است.

در مجموع، ۴۳ آزمایش مختلف در آزمایشگاه جریان‌های چندفازی دانشگاه تربیت‌مدرس انجام و نتایج ارائه شده در این مقاله از نتایج این مجموعه آزمایش‌ها انتخاب شده است.

### ۶- فرکانس اسلاگ در آزمایش‌های انجام شده

در این قسمت نمودارهای فرکانس اسلاگ در سه محل برحسب سرعت‌های ظاهری مختلف مایع و گاز به همراه تحلیل آن‌ها آمده است. فرکانس اسلاگ برحسب ۱/min گزارش شده است.

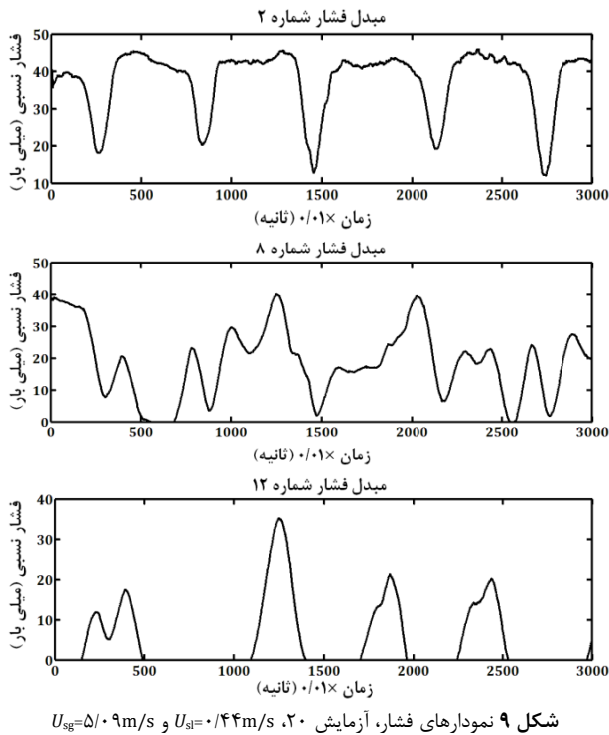
### ۶-۱- فاصله از ورودی کانال برابر ۶۰D

از شکل ۶ مشخص است که فرکانس اسلاگ در هر سرعت ظاهری مایع با افزایش سرعت ظاهری گاز، کاهش می‌یابد. دلیل این است که با افزایش سرعت ظاهری گاز اختلاف سرعت آن با سرعت ظاهری مایع افزایش می‌یابد. طبق معیار ناپایداری کلونین-هلمهولتز، این اختلاف موجب ناپایداری شدید سطح مشترک خواهد شد. در سرعت‌های گاز بالا بیشتر امواج غلطان تشکیل می‌شود و از این‌رو فرکانس اسلاگ کاهش می‌یابد.

با افزایش سرعت ظاهری مایع فرکانس اسلاگ نیز افزایش می‌یابد. دلیل این است که افزایش سرعت ظاهری مایع سبب افزایش مومنتوم مایع خواهد شد. افزایش مومنتوم مایع تأثیر ناپایدارکننده بر جریان خواهد داشت (شکل ۶). براساس جدول ۲ مشخص می‌شود که کمینه فرکانس در کمترین سرعت ظاهری مایع و بیشینه آن در بیشترین سرعت ظاهری مایع رخ می‌دهد.

1- CANON IXY 32S  
2- High definition  
3- Step





با تشکیل نخستین اسلاگ، فشار پشت بدنه مایع اسلاگ، آن را به پایین دست می‌راند. با عبور اسلاگ، بیشینه فشار ثبت شده توسط میدل‌های فشار ۸ و ۱۲ دارای مقداری کمتر از فشار میدل فشار ۱ است. فشار در نمودار میدل‌های فشار ۸ و ۱۲، در برخی زمان‌ها گسسته و دارای مقادیر کمینه نسبی است. این کمینه‌ها نشان‌دهنده عبور اسلاگ مایع از میدل فشار است. به بیان دیگر با رسیدن پیشانی اسلاگ به میدل 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 فاصله  $279D$  حداقل ۱۰ ثانیه و در فاصله  $450D$  در حدود ۳ ثانیه است. مدت زمان برقراری فشار ثبت شده صفر در کانال به معنی عدم وجود اسلاگ در کانال است. این زمان برای میدل فشار شماره ۸ کمتر از یک ثانیه و میدل فشار شماره ۱۲ بسته به نوع اسلاگ تشکیل شده، بین ۳ و ۶ ثانیه است.

در  $60D$  اسلاگ‌ها با فرکانس بیشتری تشکیل شده است. در سرعت‌های کم مایع، مومنتوم مایع کم است، بنابراین مومنتوم انتقالی به گاز کاهش می‌یابد ولی در سرعت‌های بالای مایع، با از دست دادن مومنتوم شرایط جدیدی برای تشکیل اسلاگ ایجاد می‌شود. به بیان دیگر در سرعت ظاهری مایع کم با تغییر سرعت فاز گاز، فرکانس تقریباً ثابت می‌ماند اما در سرعت‌های بالاتر روندی کاهشی دارد. سیالات در ورودی، مومنتوم بالاتری دارند. انتقال مومنتوم نیز بیشتر خواهد بود. از این رو نوسانات فرکانس اسلاگ نیز بیشتر خواهد بود.

در میانه کانال برخی از اسلاگ‌ها به موج غلتان تبدیل شده و یا مستهلک شده‌اند. امواج غلتان تولید فشارهای متنوعی خواهد کرد که موجب نوسانی شدن نمودار فشار در میانه کانال ( $279D$ ) شده است.

همان‌طور که از نمودارهای فشار مشخص است، زمان عبور اسلاگ از میدل‌های فشار با حرکت اسلاگ به طرف پایین دست، کاهش می‌یابد. می‌توان نتیجه گرفت که با حرکت اسلاگ به پایین دست کانال، اسلاگ سریع‌تر و با شتاب بیشتری حرکت می‌کند.

فرکانس اسلاگ می‌شود، زیرا افزایش سرعت ظاهری مایع، افزایش مومنتوم مایع را در پی خواهد داشت که این خود سبب ناپایداری سریع‌تر جریان دو-فازی می‌شود.

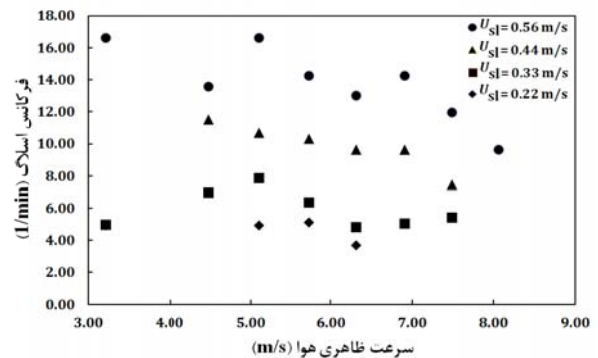
طبق جدول ۴ مشخص می‌شود که کمینه فرکانس در کمترین سرعت ظاهری مایع و بیشینه آن در بیشترین سرعت ظاهری مایع رخ می‌دهد که نشان‌دهنده وابستگی مستقیم فرکانس اسلاگ با سرعت ظاهری فاز مایع است.

از نمودارهای فرکانس اسلاگ مشخص است که فرکانس اسلاگ در هر سرعت ظاهری مایع با افزایش سرعت ظاهری گاز، کاهش می‌یابد. دلیل این است که با افزایش سرعت ظاهری گاز اختلاف سرعت آن با سرعت ظاهری مایع افزایش می‌یابد. در سرعت‌های گاز بالا بیشتر امواج غلتان و کف‌آلود تشکیل می‌شود و از این‌رو فرکانس اسلاگ کاهش می‌یابد.

خلاصه نتایج کمی فرکانس اسلاگ در مکان‌های مختلف در جدول ۵ مشاهده می‌شود.

نمودارهای فشار در آزمایش شماره ۲۰ از کسر حجمی مایع  $0/75$  با سرعت‌های ظاهری آب و هوا به ترتیب  $0/44\text{m/s}$  و  $5/09\text{m/s}$  در مدت زمان  $30\text{s}$  در شکل ۹ آمده است. در هر ثانیه، ۱۰۰ داده فشار توسط برنامه رایانه‌ای متلب<sup>۱</sup> ثبت می‌شود. بنابراین محور افقی نمودارهای فشار برحسب  $100$  برابر ثانیه است.

همان‌گونه که دیده می‌شود، فشار در ابتدای کانال بیشینه است. نمودار توزیع فشار در ابتدای کانال طیف پیوسته‌ای دارد. پیوستگی توزیع فشار حاکی از فشار بالای جریان دوفازی در ابتدای کانال، پیش و حین تشکیل اسلاگ است.



شکل ۸ فرکانس اسلاگ ( $1/\text{min}$ ) در سرعت‌های ظاهری مختلف آب و هوا در محل  $450D$  برابر قطر هیدرولیکی کانال

جدول ۴ بیشینه و کمینه کلی فرکانس اسلاگ در  $450D$

توضیحات	فرکانس اسلاگ ( $1/\text{min}$ )	ضریب لغزش	سرعت ظاهری گاز ( $\text{m/s}$ )	سرعت مایع ( $\text{m/s}$ )
کمینه کلی	۳/۷۵	۲۸/۳۴	۶/۳۰	۰/۲۲
بیشینه کلی	۱۶/۶۷	۵/۷۶	۳/۲۰	۰/۵۶
بیشینه کلی	۱۶/۶۷	۹/۱۶	۵/۰۹	۰/۵۶

جدول ۵ بیشینه، کمینه و متوسط فرکانس اسلاگ در مکان‌های مختلف

فرکانس اسلاگ ( $1/\text{min}$ )	محل ۱ ( $60D$ )	محل ۲ ( $279D$ )	محل ۳ ( $450D$ )
بیشینه	۲۰/۰۰	۱۶/۶۷	۱۶/۶۷
کمینه	۳/۱۶	۳/۳۳	۳/۷۵
متوسط	۱۰/۲۷	۸/۱۴	۹/۱۱

## ۷- روابط تجربی

براساس داده‌های حاصل از آزمایش‌های انجام شده، با استفاده از روش آماری کمینه مربعات و کمیت فیزیکی بی‌بعد رینولدز ظاهری دوفاز (رابطه ۳) رابطه فرکانس اسلاگ با میانگین خطای نسبی بین نتایج تجربی و مقادیر حاصل از رابطه ارائه شده کمتر از ۰.۵٪ به دست آمده است (جدول ۶). این خطا معیاری از نزدیکی رابطه تجربی معرفی شده با نتایج تجربی براساس روش آماری کمینه مربعات است.

$$U_{sg} = \alpha_g U_g, U_{sl} = \alpha_l U_l$$

$$D_{hg} = \frac{4A_g}{S_g + S_l}, D_{hl} = \frac{4A_l}{S_l}$$

$$Re_{sg} = \frac{\rho_g D_{hg} |U_{sg}|}{\mu_g}, Re_{sl} = \frac{\rho_l D_{hl} |U_{sl}|}{\mu_l} \quad (3)$$

جدول ۶ رابطه فرکانس اسلاگ در مکان‌های مختلف در محدوده نتایج به دست آمده

مکان	فرکانس اسلاگ	میزان خطا
۶۰D	$S.F. = 2 \times 10^{-5} Re_{sl}^{1.64} Re_{sg}^{-0.38} - 1.2$	۳/۷۴٪
۲۷۹D	$S.F. = 2209 Re_{sl}^{0.0074} Re_{sg}^{-0.0083} - 2179.09$	۳/۱۵٪
۴۵۰D	$S.F. = 6 \times 10^{-5} Re_{sl}^{1.44} Re_{sg}^{-0.32} - 0.79$	۳/۷۱٪

برای ارزیابی کارایی روابط ارائه شده، فرکانس اسلاگ اندازه‌گیری شده تجربی با مقادیر پیش‌بینی شده از روابط جدول ۶ و نیز رابطه‌های (۱) و (۲) به صورت نمونه در تعدادی از آزمایش‌ها مقایسه می‌شود (جدول‌های ۷ تا ۹). مقدار خطا در هر ردیف، عبارت از خطای نسبی مقدار پیش‌بینی شده فرکانس اسلاگ توسط هر رابطه با مقدار تجربی آن است.

براساس جدول‌های ۷-۹ مشخص می‌شود که مقادیر فرکانس اسلاگ حاصل از رابطه‌های جدول ۶ بهترین تطبیق را با داده‌های تجربی دارد. اگرچه رابطه‌های زاباراس و گریگوری و اسکات در پیش‌بینی فرکانس اسلاگ ضعیف است، ولی در سرعت‌های ظاهری کم گاز و مایع پیش‌بینی خوبی دارد. لازم به یادآوری است رابطه‌های زاباراس و گریگوری و اسکات، فرکانس اسلاگ را در یک کانال بدون توجه به مکان ارائه می‌دهد؛ در حالی که رابطه‌های جدول ۶ در سه فاصله ۶۰D از ورودی

کانال (محدوده ابتدایی کانال و آغاز تشکیل اسلاگ) فاصله ۲۷۹D از ورودی کانال (محدوده میانی کانال و شرایط پایتر جریان اسلاگ نسبت به ناحیه ورودی کانال) و فاصله ۴۵۰D از ورودی کانال (محدوده انتهایی کانال و خروج اسلاگ) است.

## ۸- بحث و نتیجه‌گیری

در این مقاله اثرات سرعت ظاهری گاز و مایع ورودی و نیز فاصله از بالادست کانال بر فرکانس اسلاگ در جریان دوفازی آب و هوا به صورت تجربی بررسی و روابط تجربی برای محاسبه فرکانس اسلاگ نیز ارائه شده است. محل انجام آزمایش‌ها، آزمایشگاه جریان چندفازی دانشگاه تربیت مدرس بوده است. آزمایش‌ها در کسر حجمی مایع ۰/۷۵ در یک کانال افقی با مقطع مستطیلی به ابعاد  $5 \times 10 \text{ cm}^2$  (قطر معادل هیدرولیکی  $6/67 \text{ cm}$ ) و به طول  $36 \text{ m}$  (طول معادل  $540 \text{ D}$ ) از جنس پلکسی گلاس انجام شده است. نتایج به دست آمده از آزمایش‌ها به شرح زیر هستند:

- بیشترین تعداد تست‌ها مربوط به بیشینه سرعت ظاهری مایع است. به دلیل بالا بودن مومنتوم مایع، محدوده سرعت‌های ظاهری گاز که ناپایداری اسلاگ تشکیل می‌شود، افزایش خواهد یافت. در سرعت‌های ظاهری پایین مایع، با افزایش سرعت ظاهری گاز امواج غلتان و کف‌آلود تشکیل می‌شود.
- در هر سرعت ظاهری مایع با افزایش سرعت ظاهری گاز، فرکانس اسلاگ کاهش می‌یابد.
- با افزایش سرعت ظاهری مایع فرکانس اسلاگ نیز افزایش می‌یابد. دلیل این است که افزایش سرعت ظاهری مایع سبب افزایش مومنتوم مایع خواهد شد. افزایش مومنتوم مایع تأثیر ناپایدار کننده بر جریان خواهد داشت.
- در تمامی آزمایش‌ها کمینه فرکانس در کمترین سرعت ظاهری مایع و بیشینه آن در بیشترین سرعت ظاهری مایع رخ می‌دهد.
- با افزایش ضریب لغزش، فرکانس اسلاگ کاهش می‌یابد.
- فرکانس اسلاگ تابع قوی از سرعت ظاهری مایع است. در سرعت‌های بالاتر آب، فرکانس اسلاگ در لوله نیز بیشتر خواهد بود. تأثیر سرعت ظاهری گاز بر فرکانس اسلاگ، کاهشی است.

جدول ۷ مقایسه مقدار فرکانس اسلاگ (۱/min) ثبت شده تجربی با روابط مختلف در محل ۶۰D

شماره آزمایش	$U_{sl}$ (m/s)	$U_{sg}$ (m/s)	تجربی	رابطه حاضر	خطا (%)	رابطه گریگوری و اسکات	خطا (%)	رابطه زاباراس	خطا (%)
۲	۰/۲۲	۳/۲۰	۵	۴/۲۳	۱۵/۴	۵/۳۲	۶/۴	۴/۴۵	۱۱
۶	۰/۲۲	۵/۰۹	۳/۱۶	۳/۳۴	۵/۷	۵/۲۰	۶۴/۵۶	۴/۳۵	۳۷/۶۶
۱۱	۰/۳۳	۴/۴۷	۸/۸۲	۸/۰۸	۸/۴	۸/۳۴	۵/۴۴	۶/۹۷	۲۰/۹۷
۲۸	۰/۵۶	۴/۴۷	۲۰	۲۰/۲۳	۱/۱۵	۱۵/۴۷	۲۲/۶۵	۱۲/۹۴	۳۵/۳

جدول ۸ مقایسه مقدار فرکانس اسلاگ (۱/min) ثبت شده تجربی با روابط مختلف در محل ۲۷۹D

شماره آزمایش	$U_{sl}$ (m/s)	$U_{sg}$ (m/s)	تجربی	رابطه حاضر	خطا (%)	رابطه گریگوری و اسکات	خطا (%)	رابطه زاباراس	خطا (%)
۱۲	۰/۳۳	۵/۰۹	۷/۸۹	۸/۵۵	۸/۳۶	۸/۵۰	۷/۷۳	۷/۱۱	۹/۸۸
۱۳	۰/۳۳	۵/۷۰	۶/۱۲	۶/۴۹	۶/۰۵	۸/۷۸	۴۳/۴۶	۷/۳۴	۱۹/۹۳
۲۴	۰/۴۴	۷/۴۷	۷/۵۰	۶/۲۷	۱۶/۴	۱۴/۱۸	۸۹/۰۷	۱۱/۸۶	۵۸/۱۳
۲۹	۰/۵۶	۵/۰۹	۱۶/۶۷	۱۶/۹۶	۱/۷۴	۱۵/۸۶	۴/۸۶	۱۳/۲۷	۲۰/۴۰

جدول ۹ مقایسه مقدار فرکانس اسلاگ (۱/min) ثبت شده تجربی با روابط مختلف در محل ۴۵۰D

شماره آزمایش	$U_{sl}$ (m/s)	$U_{sg}$ (m/s)	تجربی	رابطه حاضر	خطا (%)	رابطه گریگوری و اسکات	خطا (%)	رابطه زاباراس	خطا (%)
۲	۰/۲۲	۳/۲۰	۵	۳/۹۰	۲۲	۵/۳۲	۶/۴	۴/۴۵	۱۱
۱۱	۰/۳۳	۴/۴۷	۶/۹۸	۶/۷۸	۲/۸۶	۸/۳۴	۱۹/۴۸	۶/۹۷	۰/۱
۱۹	۰/۴۴	۴/۴۷	۱۱/۵۴	۱۰/۶۸	۷/۴۵	۱۱/۸۰	۲/۲۵	۹/۸۷	۱۴/۴۷
۲۷	۰/۵۶	۳/۲۰	۱۶/۶۷	۱۶/۸۴	۱	۱۵/۵۹	۶/۴۸	۱۳/۰۴	۲۱/۷۸

- [2] S. M. Keyla, A. L. Marcelo, E. G. Gonçalves, S. R. Geraldo, A. F. Fernando, S. R. Eugênio, Horizontal Slug Flow in a Large-Size Pipeline Experimentation and Modeling, Journal of Brazilian Society of Mechanical Science, vol. 23 No. 4, Rio de Janeiro, pp. 481-490, 2001
- [3] U. Kadri, R.F. Mudde, R.V.A. Oliemans, Influence of the operation pressure on slug length in near horizontal gas-liquid pipe flow, International Journal of Multiphase Flow vol. 36, pp 423-431, 2010
- [4] T.J. Hanratty, A. Hershman, Initiation of roll waves. AIChE Journal vol. 7, pp 488-497, 1961
- [5] U. Kadri, R.F. Mudde, R.V.A. Oliemans, M. Bonizzi, P. Andreussi, Prediction of the transition from stratified to slug flow or roll-waves in gas-liquid horizontal pipes, International Journal of Multiphase Flow vol. 35, pp 1001-1010, 2009
- [6] Ch. Omgba-Essama, Numerical Modeling of Transient Gas-Liquid Flows (Application to Stratified & Slug Flow Regimes), PhD thesis, Cranfield University, Cranfield, 2004
- [7] M.R. Ansari, Numerical analysis for slugging of steam-water stratified two-phase flow in horizontal duct, Fluid Dynamics Research vol. 22, pp 329-344, 1998
- [8] M.R. Ansari, Dynamical behavior of slug initiation generated by short waves in two-phase air-water stratified flow, ASME HTD vol. 361, pp 289-295, 1998
- [9] 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, In Press. (In Persian)
- [10] J. Fabre, A. Line, "Modeling of two-phase slug flow", Annular Revision Fluid Mechanics vol. 24 No. 1, pp. 21-26, 1992
- [11] T. Hill, C. Fairhurst, C. Nelson, H. Becerra, R. Bailey, Multiphase production through hilly-terrain pipelines in Cusiana oilfield, Colombia, SPE 36606, Presented at SPE ATCE, Denver, CO., 1996
- [12] J. Sun, P. Jepsen, Slug flow characteristics and their effect on corrosion rates in horizontal oil and gas pipelines, SPE 24787, Presented at SPE ATCE, Washington, DC., 1992
- [13] 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
- [14] E. S. Kordyban, T. Ranov, Experimental study of the mechanism of two-phase flow in horizontal tubes, Multiphase Flow Symposium, ASME, 1963
- [15] K. J. Chu, An analysis of slug frequency in two phase horizontal slug flow, MSc Thesis, University of Houston, Texas, 1968
- [16] L. Vermeulen, J. Ryan, Two-phase slug flow in horizontal and inclined pipes, The Canadian Journal of Chemical Engineering vol. 49, pp. 195-201, 1971
- [17] A.E. Dukler, M.G. Hubbard, A model for gas-liquid slug flow in horizontal and near horizontal tubes, Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals vol. 14, pp. 337-347, 1975
- [18] M. Hubbard, An analysis of horizontal gas-liquid slug flow, PhD thesis, University of Houston, Texas, 1965
- [19] G.A. Gregory, D.S. Scott, Correlation of liquid slug velocity and frequency in horizontal co current gas-liquid slug flow, AIChE Journal vol. 15, pp. 935-993, 1969
- [20] M.K. Nicholson, K. Aziz, G.A. Gregory, Intermittent two-phase flow in horizontal pipes: predictive models, The Canadian Journal of Chemical Engineering vol. 56, pp. 653-663, 1978
- [21] N. Heywood, J. Richardson, Slug flow of air-water mixtures in a horizontal pipe: determination of liquid holdup by gamma-ray absorption, Journal of Chemical Engineering Science vol. 34, pp. 17-30, 1979
- [22] P.Y. Lin, T.J. Hanratty, Prediction of the initiation of slugs with linear stability theory, International Journal of Multiphase Flow vol. 12, pp. 79-98, 1986a
- [23] P.Y. Lin, T.J. Hanratty, Detection of slug flow from pressure measurements, International Journal of Multiphase Flow vol. 13, pp. 13-21, 1986b
- [24] N. Andritsos, L. Williams, T.J. Hanratty, Effect of liquid viscosity on the stratified-slug transition in horizontal pipe flow, International Journal of Multiphase Flow vol. 15, pp. 877-892, 1989
- [25] Z. Fan, F. Lusseyran, T.J. Hanratty, Initiation of slugs in horizontal gas-liquid flows, AIChE Journal vol. 39 No. 11, pp. 1741-1753, 1993a
- [26] Z. Fan, Z. Ruder, T.J. Hanratty, Pressure profiles for slugs in horizontal pipelines, International Journal of Multiphase Flow vol. 19, pp. 421-437, 1993b
- [27] B.D. Woods, Z. Fan, T. J. Hanratty, Frequency and development of slugs in a horizontal pipe at large liquid flows, International Journal of Multiphase Flow vol. 32, pp. 902-925, 2006

در سرعت‌های کم مایع، مومنتوم مایع کم است، بنابراین مومنتوم انتقالی به گاز کاهش می‌یابد ولی در سرعت‌های بالای مایع، با از دست دادن مومنتوم شرایط جدیدی برای تشکیل اسلاگ ایجاد می‌شود. به بیان دیگر در سرعت ظاهری مایع کم با تغییر سرعت فاز گاز، فرکانس تقریباً ثابت می‌ماند ولی در سرعت‌های بالاتر روندی کاهشی دارد. سیالات در ورودی، مومنتوم بالاتری دارند. انتقال مومنتوم نیز بیشتر خواهد بود. از این رو نوسانات فرکانس اسلاگ در ابتدای کانال نیز بیشتر خواهد بود.

با توجه به نتایج به‌دست آمده، مقدار فرکانس اسلاگ با فاصله از بالادست کاهش می‌یابد. این مطلب حاکی از آن است که با حرکت اسلاگ‌ها به سمت پایین دست، تعدادی از آن‌ها مستهلک می‌شوند.

زمان عبور اسلاگ از مبدل‌های فشار با حرکت به طرف پایین دست، کاهش می‌یابد. به بیان دیگر با حرکت اسلاگ به پایین دست کانال، اسلاگ سریع‌تر و با شتاب بیشتری حرکت می‌کند.

از مقایسه مقادیر فرکانس اسلاگ حاصل از رابطه‌های معرفی شده و رابطه‌های زاباراس و گریگوری و اسکات، می‌توان گفت رابطه‌های جدول ۶ به-ویژه در سرعت‌های بالای گاز و مایع، پیش‌بینی بهتری دارد.

رابطه‌های جدول ۶، برحسب فاصله از بالادست ارائه شده‌اند که آن‌ها را از روابط محققان پیشین متمایز می‌کند.

#### ۹- فهرست علائم

$A$	سطح مقطع ( $m^2$ )
$D$	قطر معادل هیدرولیکی کانال (m)
$F_s$	فرکانس اسلاگ ( $s^{-1}$ )
$g$	شتاب جاذبه ( $ms^{-2}$ )
$S$	طول تماس (m)
$U$	سرعت ( $ms^{-1}$ )
$U_m$	مجموع سرعت‌های ظاهری فاز مایع و گاز ( $ms^{-1}$ )

#### علائم یونانی

$\alpha$	کسر حجمی
$\theta$	شیب کانال (rad)
$\mu$	ویسکوزیته ( $kgm^{-1}s^{-1}$ )
$\rho$	چگالی ( $kgm^{-3}$ )

#### زیرنویس‌ها

$g$	فاز گاز
$h$	هیدرولیکی
$i$	سطح مشترک
$l$	فاز مایع
$s$	ظاهری

#### ۱۰- تقدیر و تشکر

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

#### ۱۱- مراجع

- [1] I. Toumi, A. Kumbaro, H. Paillere, Approximate Riemann solvers and flux vector splitting schemes for two-phase flow, Technical Report, France, 1999



- [31] R. Van Hout, L. Shemer, D. Barnea, Evolution of hydrodynamic and statistical parameters of gas-liquid slug flow along inclined pipes, *Chemical Engineering Science* vol. 58 No. 1, pp. 115-133, 2003
- [32] G. Zabararas, Prediction of slug frequency for gas-liquid flow, *SPE Journal* vol. 5, pp 252-258, 2000
- [33] Y. Taitel, A.E. Dukler, A model for slug frequency during gas-liquid flow in horizontal and near horizontal pipes, *International Journal of Multiphase Flow* vol. 3, pp 585-596, 1977
- [34] ANSI/ASME, Measurement Uncertainty, PTC 19, Part 1, 1986
- [28] 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
- [29] P. Grenier, J. Fabre, J.R. Fagundes Netto, Slug flow in pipelines: recent advances and future developments, *Proceeding Eighth International Conference on Multiphase Production*, Cannes, France, Cranfield BHRG, June 18-20, 1997
- [30] R. Van Hout, D. Barnea, L. Shemer, Evolution of statistical parameters of gas-liquid slug flow along vertical pipes, *International Journal of Multiphase Flow* vol. 27 No. 9, pp. 1579-1602, 2001