



## بررسی مشخصات جریان اسلاگ در یک کانال افقی به صورت دوبعدی

مصطفی زین العابدینی<sup>1</sup>، محمدرضا انصاری<sup>2\*</sup>

1- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران  
2- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران  
\* صندوق پستی 14115-143، mra\_1330@modares.ac.ir

### اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل  
دریافت: 17 اسفند 1395  
پذیرش: 14 فروردین 1396  
ارائه در سایت: 03 اردیبهشت 1396  
کلید واژگان:  
اسلاگ  
شبیه‌سازی  
مدل دو فازی حجم سیال  
ناحیه اختلاطی  
اغتتاشات

### چکیده

رژیم جریان اسلاگ یکی از پیچیده ترین رژیم‌های دو فازی است که در فرآیندهای صنعتی و به ازای محدوده وسیعی از جریان‌ها دیده می‌شود. البته همواره بین نتایج حاصل از آزمایشات و حل عددی بر روی این رژیم جریان، اختلافات زیادی دیده می‌شود. پیرو بررسی پیشین در رابطه با تعیین بهترین مدل اغتشاشی برای مدل‌سازی عددی دقیق‌تر جریان اسلاگ، در این تحقیق سعی شده است تا با انجام یک حل عددی دو بعدی دقیق با استفاده از نرم‌افزار فلونت، مشخصات مختلف جریان اسلاگ استخراج گردد. در این مدل‌سازی از مدل جریان دو فازی حجم سیال و مدل اغتشاشی RNG استفاده شده و تفاوت حل جریان اسلاگ با مدل جریان آرام و مدل جریان مغشوش نشان داده شده است. در این رابطه یک کد کامپیوتری جدید نوشته شده است تا بتواند بدون افزایش زمان حل، پارامترهای مهم جریان اسلاگ مانند سرعت بدنه اسلاگ مایع، سرعت فیلم جریان پیش‌روی اسلاگ، سرعت پیشانی و دم اسلاگ، موقعیت مکانی پیشانی، دم و مرکز اسلاگ، طول اسلاگ و سرعت مخلوط دو فاز را به صورت کاملاً دقیق از نتایج حل نرم‌افزار فلونت استخراج کند. در ادامه ارائه نتایج حل هر کمیت سعی شد تا پس از احراز صحت نتایج استخراجی، نتایج بدست آمده مورد تحلیل و بررسی قرار گیرد.

## Evaluation of the slug flow parameters in a horizontal two-dimensional duct

Mostafa Zeynalabedini, Mohammad Reza Ansari\*

Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran  
\*P.O.B. 14115-143, Tehran, Iran, mra\_1330@modares.ac.ir

### ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper  
Received 05 February 2017  
Accepted 03 April 2017  
Available Online 23 April 2017

### Keywords:

Slug  
Simulation  
VOF  
mixing zone  
Turbulence

### ABSTRACT

Slug flow is one of the most complicated flow regimes in industrial processes that is seen for a wide range of fluid flow. However, there are always a lot of differences between experimental and numerical studies on slug flow. Following the previous attempt on the selection of the best turbulent model for numerical simulation, the slug flow is solved two-dimensionally with implicit VOF method and k-ε RNG turbulent model using FLUENT solver to extract the slug flow parameters behavior accurately. The differences of numerical simulation of slug flow with and without turbulent model are also presented. To overcome this procedure, a new user defined function code is developed. This UDF computes and predicts slug parameters from FLUENT solver result without increasing the computational cost. The important slug parameters are presented which are: liquid slug body velocity, liquid film velocity, slug front and tail velocity, slug center position and length, slug front and tail positions, pressure difference across slug, wall shear stress, slug mixture velocity, slug initiation time and position from the duct inlet. These parameters are discussed in detail, then validated.

### 1- مقدمه

این رژیم جریان در اثر ایجاد یک اغتشاش کوچک تصادفی با طول موج کوتاه به وجود می‌آید. این اغتشاش می‌تواند رشد کند و تمام ارتفاع کانال را پل بزند. در این حالت اسلاگ با طول موج بلند تشکیل می‌شود [1]. رژیم اسلاگ همواره با یک ناحیه اختلاطی شدید در ابتدای خود همراه است. در ناحیه اختلاطی، پیشانی اسلاگ با سرعت بالا به سمت فیلم مایع حرکت کرده و با شتاب دادن به آن، آن را با خود همراه می‌کند. این فرآیند سبب ایجاد یک گردابه در ورودی اسلاگ می‌شود. به این ناحیه، ناحیه اختلاطی یا هوازایی می‌گویند. در ناحیه اختلاطی نوسانات شدید و نامنتقارنی در پارامترهای میدان جریان مانند فشار و تنش برشی وجود دارد [2]. به صورت کلی جریان اسلاگ زمانی اتفاق می‌افتد که نیروی ناشی از تغییرات

جریان اسلاگ از مهم‌ترین جریان‌های ایجاد شده به سبب ناپایداری‌های هیدرودینامیکی در خطوط انتقال جریان‌های دو فازی است. این جریان به صورت گسترده در خطوط انتقال نفت و گاز، سیستم‌های انتقال آب و نیروگاه‌های حرارتی و هسته‌ای دیده می‌شود. رژیم اسلاگ در تمام محدوده‌های شیب کانال و به ازای محدوده وسیعی از دبی جریان هر یک از فازها مشاهده می‌شود. وقوع این رژیم سبب ایجاد ارتعاش، ناپایداری و اعمال بار دینامیکی متغیر به جداره کانال‌های انتقال شده و سبب تشدید فرآیند خوردگی و سایش می‌شود. بنابراین مطالعه و تحلیل اثرات این جریان جهت مقابله با عوارض آن از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

Please cite this article using:

M. Zeynalabedini, M. R. Ansari, Evaluation of the slug flow parameters in a horizontal two-dimensional duct, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 4, pp. 349-358, 2017 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

M. Zeynalabedini, M. R. Ansari, Evaluation of the slug flow parameters in a horizontal two-dimensional duct, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 4, pp. 349-358, 2017 (in Persian)

کمتری به داخل این اسلاگ نفوذ می‌کنند. آن‌ها نتیجه گرفتند که طول اسلاگ با افزایش سرعت فاز گاز و کاهش سرعت فاز مایع افزایش می‌یابد. همچنین تاثیر قطر بر میزان کسر تهی درون اسلاگ کم است. به علاوه میزان هوازایی در اسلاگ با فاز مایع روغن بیشتر از آب است.

بونیزی و عیسی [9] یک مدل دوسیالی یک بعدی دینامیکی برای شروع و توسعه اسلاگ افقی با در نظر گرفتن نفوذ ذرات حباب، توزیع همگن و سرعت ثابت حباب‌ها، بدون لحاظ نمودن نیروی بویانسی ارائه کردند. مدل آن‌ها شامل معادلات دوسیالی برای فاز هوا و فاز مخلوط آب و حباب‌های نفوذ کرده به داخل اسلاگ و یک معادله پیوستگی برای ذرات حباب بود. آن‌ها فرض کردند توزیع حباب‌ها درون اسلاگ یکنواخت و سرعت آن‌ها ثابت است. آن‌ها از ترم تبدیل جرم برای بیان میزان نفوذ ذرات حباب در معادلات استفاده کردند. نتایج آن‌ها در رابطه با پیش‌بینی نسبت حجم مایع به گاز در ستون اسلاگ دقت بالاتری نسبت به سایر کارهای انجام شده پیشین داشت.

آندروسی و همکارانش [10] با بررسی اسلاگ، پارامترهایی مثل توزیع کسر تهی در مقاطع عرضی جریان اسلاگ، اندازه ذرات حباب داخل اسلاگ، میزان هوازایی در داخل فیلم زیر جریان اسلاگ، طول و فرکانس اسلاگ و همچنین طول ناحیه اختلاطی هوازایی در جلوی اسلاگ را به کمک روش های آزمایشگاهی به دست آوردند و در نهایت براساس نتایج آزمایشگاهی خود و تحلیل استاتیکی اسلاگ، یک مدل یک بعدی برای اسلاگ ارائه نمودند. آن‌ها پس از انجام آزمایشات خود به این نتیجه رسیدند که طول اسلاگ مستقل از نرخ جریان‌ها بوده و در حدود 15 الی 22 برابر قطر لوله می‌باشد.

لاخال [11] با استفاده از دیدگاه LEIS<sup>7</sup> و روش حجم سیال<sup>8</sup> به بررسی جریان‌های مختلف دوفازی که دارای سطح مشترک اغتشاشی است از جمله جریان اسلاگ پرداخت. او برای صحت‌سنجی حل تنها سرعت انتهای اسلاگ را با نتایج آزمایشگاهی خود مطابقت داد، که آن هم تطابق نسبی از خود نشان می‌داد.

تاکنون مطالعات بسیاری در زمینه‌های تجربی، سینماتیکی و مدل‌سازی‌های دینامیکی جریان اسلاگ انجام شده است، ولی همچنان جنبه‌های بسیاری از این پدیده ناشناخته باقی است. در این مقاله سعی بر آن است، تا با استفاده از مدل جریان دوفازی حجم سیال و مدل اغتشاشی RNG ماهیت جریان اسلاگ به طور جامع بررسی شود. علاوه بر استفاده از یک مدل اغتشاشی کاملا سازگار با جریان اسلاگ در این مقاله، یک مدل محاسباتی نیز برای استخراج دقیق پارامترهای جریان اسلاگ از نتایج شبیه‌سازی عددی نرم‌افزار فلوئنت<sup>9</sup>، نوشته شده است، تا بتواند بدون افزایش زمان محاسبات نتایج کیفی جریان اسلاگ را به نتایج کمی و قابل ارزیابی تبدیل نماید. پارامترهای مهم جریان اسلاگ که در این مقاله مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند، سرعت بدنه اسلاگ مایع، سرعت فیلم جریان پیش‌روی اسلاگ، سرعت پیشانی و دم اسلاگ، موقعیت مکانی پیشانی، دم و مرکز اسلاگ، طول اسلاگ، اختلاف فشار دو سر اسلاگ، تنش برشی دیواره و سرعت مخلوط دو فاز می‌باشند. در انتها سعی شده است که نتایج این پارامترها مورد تحلیل و ارزیابی قرار گیرد و مطالب مهم آن‌ها بیان شود.

## 2- مشخصات هندسی و عددی مسئله

مومنتم سیال<sup>1</sup> بتواند بر مجموع نیروهای ناشی از وزن، لزجت، اغتشاشات و فشار موجود بر روی سیال غلبه کند.

هوهن [3] با مطالعه تجربی جریان اسلاگ در کانال مستطیلی به طول 8 متر و سطح مقطع  $3 \times 10 \text{ cm}^2$  زمان و مکان آغاز اسلاگ را به دست آورد. او همچنین با استفاده از نرم‌افزار انسیس سی‌اف‌ایکس<sup>2</sup>، جریان اسلاگ را به کمک مدل دو فازی اولری-اولری<sup>3</sup> و مدل اغتشاشی دو معادله‌ای  $k-\omega$  به همراه روابط میراکننده اغتشاشات در سطح مشترک به صورت عددی شبیه‌سازی کرد. مدل اغتشاشی مورد استفاده او تطابق خوبی با جریان اسلاگ نداشت. نتایج کار ایشان نشان می‌دهد که حدود 1 متر بین مکان وقوع اسلاگ در آزمایش و شبیه‌سازی عددی اختلاف وجود دارد.

ولی و همکاران [4] نیز رژیم اسلاگ را در کانالی با همان ابعاد کانال آزمایش هوهن به صورت تجربی و عددی با استفاده از نرم‌افزار انسیس سی‌اف‌ایکس بررسی کردند. البته طول کانال مورد بررسی در حل عددی آن‌ها 4 متر بود. اما برای مدل‌سازی اغتشاشات جریان از مدل اغتشاشی  $k-\omega$  SST استفاده نمودند. مقیاس طولی شبکه محاسباتی مورد استفاده آن‌ها در حدود 4mm بوده است، که این مقدار نیز برای استفاده از مدل اغتشاشی  $k-\omega$  SST در نزدیکی دیواره عدد بسیار بزرگی است. در حقیقت آن‌ها تنها از مدل  $k-\epsilon$  موجود در مدل  $k-\omega$  SST استفاده کرده‌اند. آن‌ها علاوه بر تطابق کیفی پروفیل اسلاگ در حل عددی و نتایج آزمایشگاهی، فشار و طول اسلاگ را نیز صحت‌سنجی نمودند که نشان از قابل قبول بودن نتایج کار آن‌ها داشت. انصاری و همکارانش [5] جریان اسلاگ در یک کانال افقی با سطح مقطع مستطیلی را با استفاده از روش حجم سیال به همراه مدل اغتشاشی  $k-\omega$  SST به صورت دوبعدی در نرم‌افزار این‌فوم<sup>5</sup> شبیه‌سازی کردند. ابعاد کانال مورد مطالعه آن‌ها با ابعاد کانال بررسی حاضر تطابق دارد. اما سرعت‌های ورودی آن‌ها برای فاز آب 0.5 و برای فاز هوا 5m/s می‌باشد. نتایج کار آن‌ها با نتایج آزمایشگاهی تطابق داشت و طول اسلاگ را به درستی تخمین می‌زد، ولی در محاسبه مکان اسلاگ 22% خطا داشت.

ادیبی و انصاری [6] به مطالعه آزمایشگاهی جریان اسلاگ درون کانالی به ابعاد  $5 \times 10 \times 3600$  سانتی‌متر پرداختند. در کار آن‌ها سرعت‌های ظاهری فاز آب و هوا به ترتیب 0.5m/s و سرعت ظاهری فاز هوا 6 m/s و کسر تهی هر دو فاز در ورود به کانال 0.5 بوده است. در آزمایش آن‌ها جریان اسلاگ با مشخصات ذکر شده در فاصله 2m از ورودی کانال و در زمان 0.4s تا 1s (فاصله زمانی بین تشکیل دو اسلاگ متوالی) اتفاق افتاد.

رضوی و نمین [7] نیز به صورت عددی به بررسی اسلاگ درون کانال افقی به صورت دوبعدی پرداختند. آن‌ها در مدل‌سازی خود از مدل  $k-\epsilon$  تحقق‌پذیر<sup>6</sup> استفاده کردند و نتایج کار خود را با نتایج تجربی و عددی هوهن [3] مطابقت دادند. نتایج آن‌ها با نتایج بررسی هوهن تطابق خوبی داشت. البته تنها تفاوت این دو بررسی نیز استفاده از مدل اغتشاشی  $k-\epsilon$  تحقق‌پذیر بود.

نایدال و همکارانش [8] به صورت تجربی توزیع آماری سرعت، متوسط کسر تهی و طول اسلاگ را در لوله‌های با شیب و قطر مختلف و سیالات با مشخصات فیزیکی متفاوت به دست آوردند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که در لوله‌های کوتاه یا سرعت گازهای ورودی بالا اسلاگ در حال توسعه در کانال تشکیل می‌گردد. در زمان حرکت این اسلاگ در طول کانال حباب‌های

<sup>1</sup> Momentum change

<sup>2</sup> ANSYS CFX

<sup>3</sup> Eulerian-Eulerian

<sup>4</sup> Shear Stress Transport k- $\omega$

<sup>5</sup> Open foam

<sup>6</sup> Realizable

<sup>7</sup> Large Eddy Interface Simulation

<sup>8</sup> Volume Of Fluid (VOF)

<sup>9</sup> ANSYS FLUENT 17

1-1- مشخصات هندسی و فیزیکی

- ابعاد کانال: 4000×100 mm
- فازها: آب و هوا (هر دو تراکم‌ناپذیر)
- کسر حجمی هر یک از دو فاز در ورودی 0.5 است.
- هوا از نیمه بالایی کانال و آب از نیمه پایینی کانال وارد می‌شود.
- سرعت ظاهری آب و هوا: به ترتیب 0.5m/s و 6.5m/s

2-2- شرایط مرزی

- در ورودی میدان حل از شرط سرعت ورودی ثابت برای هر دو فاز استفاده می‌شود.
- خروجی این کانال به یک مخزن تخلیه می‌شود که در فشار اتمسفر است؛ بنابراین می‌توان از شرط مرزی فشار خروجی ثابت در مرز انتهایی استفاده کرد.
- شرط اعمال شده بر دیواره‌ها نیز شرط عدم لغزش است و از تابع دیواره استاندارد برای حل جریان در نواحی نزدیک دیواره استفاده می‌شود.
- با توجه به سرعت هر یک از دو فاز و مشخصات هندسی کانال مورد نظر جریان هر دو فاز مغشوش است. شدت اغتشاشات در ورودی 4% در نظر گرفته می‌شود [12].
- در "شکل 1" شماتیکی از مسئله موردنظر نشان داده شده است.

3-3- مشخصات حلگر

- الگوریتم مورد استفاده برای حل معادلات گسسته شده پیوستگی جرم و مومنتم: سیمپل<sup>1</sup>
- مدل دوفازی مورد استفاده: حجم سیال
- روش گسسته‌سازی زمانی: ضمنی<sup>2</sup>
- گسسته‌سازی و کوپلینگ معادله مومنتم و فشار: استگرد<sup>3</sup>
- فواصل زمانی: به صورت متغیر (تطبیق‌پذیر<sup>4</sup>) به نحوی که همواره عدد کورانت در تمام جریان کمتر از 0.25 باشد.
- روش گسسته‌سازی مومنتم: درجه دو پیش‌رو<sup>5</sup>
- روش گسسته‌سازی کسر حجمی: بازسازی هندسی<sup>6</sup>
- فواصل زمانی در این مسئله به صورت متغیر بین مقادیر 10<sup>-6</sup> تا 10<sup>-3</sup> انتخاب شده است. مدت زمان حل مسئله برای 2 ثانیه با پردازش موازی بر رایانه 8 هسته‌ای به سرعت 3GHz، به مدت زمان 8 ساعت است.

4-2- تعیین ابعاد شبکه محاسباتی

استخراج حل مستقل از شبکه در پدیده اسلاگ فرآیند بسیار دشواری است.

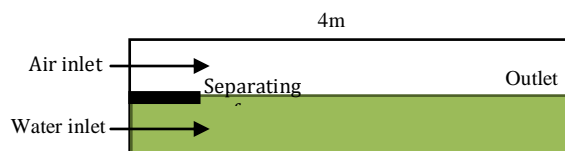


Fig. 1 channel schematic for slug modeling

شکل 1 شماتیک کانال موردنظر برای تولید جریان اسلاگ

لذا استقلال حل از شبکه در هر دو جهت مختصاتی به صورت جداگانه بررسی می‌شود. برای تعیین استقلال حل از شبکه نسبت به تعداد سلول‌های در راستای ارتفاع کانال 4 شبکه محاسباتی با تعداد 16000، 32000، 64000 و 128000 سلول به نحوی ساخته شد، که تعداد تقسیمات آن‌ها در راستای طول 4 متری کانال 800 و تعداد تقسیمات آن‌ها در راستای ارتفاع 10 سانتی‌متری کانال به ترتیب 20، 40، 80 و 160 باشد. بنابراین طول همه سلول‌ها در همه شبکه‌ها در راستای طول کانال 5mm و ارتفاع سلول‌ها در شبکه‌های مختلف به ترتیب 5، 2.5، 1.25 و 0.625mm می‌باشد. در "شکل 2" سرعت مخلوط اسلاگ در هر 4 شبکه با یکدیگر مقایسه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، شبکه‌ای که تعداد تقسیمات آن در راستای ارتفاع 80 و ارتفاع سلول‌های آن 1.25mm است نتایج مستقلی ارائه می‌کند. در مرحله بعد استقلال حل نسبت به تعداد سلول‌ها در راستای طول کانال بررسی گردید. در این رابطه از 4 شبکه محاسباتی با تعداد 16000، 32000، 64000 و 128000 سلول استفاده شد. در همه این شبکه‌ها ارتفاع سلول‌ها مقدار ثابت 1.25mm (80 سلول در راستای ارتفاع کانال) و طول سلول‌ها در راستای طول کانال به ترتیب 20، 10، 5 و 2.5mm (تعداد تقسیمات در راستای طول کانال به ترتیب 200، 400، 800 و 1600 می‌باشد) می‌باشد. در "شکل 3" سرعت مخلوط اسلاگ در هر 4 شبکه با یکدیگر مقایسه شده است. نتایج این بررسی نیز نشان می‌دهد، که شبکه‌ای با سلول‌های به طول 5mm نتایج مستقلی ارائه می‌کند.

بنابراین شبکه‌ای که در آن فاصله طولی سلول‌ها 5mm و فاصله عرضی آن‌ها از یکدیگر 1.25mm است حلی مستقل از شبکه را ایجاد خواهد کرد. نتایج به‌دست آمده برای ابعاد شبکه مناسب، جهت استخراج نتایج حل جریان اسلاگ به صورت مستقل از شبکه، با ابعاد به‌دست آمده در کار انصاری و همکارانش [5] نیز تطابق دارد.

3- معادلات جریان

1-3- معادلات مدل جریان دو فازی حجم سیال

معادلات مورد استفاده برای مدل‌سازی دو بعدی جریان اسلاگ هم‌دما با مدل حجم سیال به صورت روابط (3-1) بیان می‌شود [13].

$$\frac{\partial \rho_m}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_m \cdot V_m) = 0 \quad (1)$$

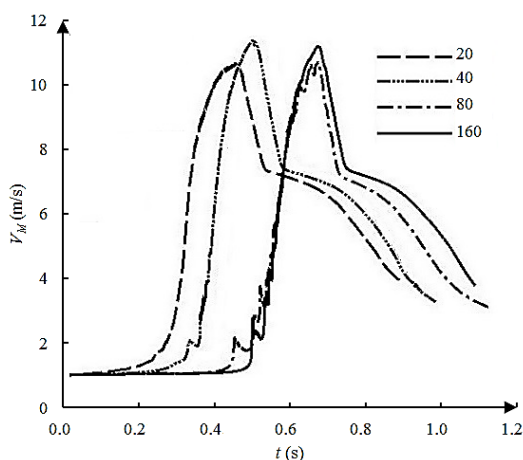


Fig. 2 Slug mixture velocity comparison at different mesh with 20, 40, 80 and 160 cells in channel height direction

شکل 2 مقایسه سرعت مخلوط اسلاگ در شبکه‌هایی با تعداد 20، 40، 80 و 160 سلول در راستای ارتفاع کانال

<sup>1</sup> Semi Implicit Method for Pressure Linked Equations

<sup>2</sup> Implicit

<sup>3</sup> Pressure Staggered Option

<sup>4</sup> Adaptive

<sup>5</sup> Second order upwind

<sup>6</sup> GeoConstruct

است [13].

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \alpha_k \mu_{\text{eff}} \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + G_k - \rho \varepsilon \quad (6)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \alpha_\varepsilon \mu_{\text{eff}} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} G_k - \rho C_{2\varepsilon} \frac{\varepsilon^2}{k} - R_\varepsilon \quad (7)$$

در روابط این مدل  $\alpha_k$  و  $\alpha_\varepsilon$  معکوس اعداد پراکتل مؤثر برای  $k$  و  $\varepsilon$  هستند. در جریان‌های با عدد رینولدز بالا، مانند جریان اسلاگ که در آن نسبت لزجت مولکولی به لزجت گردابه‌ای بسیار کم است ( $\mu_{\text{mol}}/\mu_{\text{eff}} \ll 1$ )، هر دو مقدار  $\alpha_k$  و  $\alpha_\varepsilon$  با هم برابر می‌شوند.

مزیت مهم مدل RNG نسبت به سایر مدل‌های هم‌خانواده خود، وجود یک ترم اضافی در معادله انتقال  $\varepsilon$  است که به صورت رابطه (8) محاسبه می‌شود.

$$R_\varepsilon = \frac{C_\mu \rho \eta^3 (1 - \frac{\eta}{\eta_0}) \varepsilon^2}{1 + \beta \eta^2} \frac{1}{k}, \quad \eta = \frac{Sk}{\varepsilon}, \quad \beta = 0.012 \quad (8)$$

این پارامتر در جایی که جریان تحت کرنش کم یا ملایم قرار دارد ( $\eta < \eta_0$ )، تغییرات چندانی بین مدل RNG و سایر مدل‌ها ایجاد نمی‌کند، ولی در نواحی که جریان به شدت تحت کرنش قرار دارد ( $\eta_0 < \eta$ ) با محاسبه مقادیر کمتری برای ترم تلفات در معادله انتقال  $\varepsilon$  سبب افزایش  $\varepsilon$  و کاهش  $k$  و به تبع آن کاهش لزجت مؤثر می‌شود. این موضوع سبب افزایش دقت مدل RNG نسبت به سایر مدل‌های می‌شود. این مدل برای شرایطی که جریان به شدت تحت کرنش (کشیدگی) قرار دارد و یا انحای خطوط جریان شدید است مانند جریان اسلاگ، که در آن جریان در سطح مشترک تحت کرنش زیاد قرار دارد، نتایج بهتری نسبت به سایر مدل‌های ارائه می‌کند.

### 3-4- کد کامپیوتری برای تعیین مشخصات اسلاگ

سرعت بدنه اسلاگ مایع، سرعت فیلم جریان پیش‌روی اسلاگ، سرعت پیشانی و دم اسلاگ، موقعیت مکانی و طول اسلاگ، از جمله پارامترهای مهم جریان اسلاگ هستند، که به تنهایی نمی‌توان آن‌ها را از نتایج حاصل از حل عددی استخراج نمود. برای تعیین این پارامترها و ترسیم آن‌ها در واحد زمان و یا طول کانال یک کد کامپیوتری جداگانه نوشته شد. این کد می‌تواند با نرم افزار فلونتت کوپل شده و بدون اینکه زمان محاسبات را افزایش دهد با داده‌های خروجی نرم‌افزار به عنوان ورودی کار کرده و نتایج مورد نظر را در غالب پارامترهای مهم اسلاگ (که قبلاً به آن‌ها اشاره شد) در اختیار قرار دهد. از آنجایی که این برنامه می‌باید در هر فاصله زمانی<sup>1</sup> حل شود، لذا باید به نحوی بهینه گردد که حداقل زمان لازم برای اجرای آن نیاز باشد.

مفهوم کلی که این برنامه بر پایه آن نوشته شده است این است که در تمام سطح مقطع‌های موجود (به تعداد سلول‌های موجود در طول کانال) میزان کسر حجمی متوسط فاز پیوسته را محاسبه می‌کند و هر کجا که این کسر تهی از مقدار مشخصی (به عنوان مثال 0.95) بیشتر شد، آنجا را به‌عنوان قسمتی از ستون اسلاگ مشخص می‌کند. بنابراین کسر حجمی فاز اولیه (آب) در تمام سلول‌هایی که در یک سطح مقطع قرار دارند (دارای مختصه  $x$  یکسان هستند) با یکدیگر جمع شده و به تعداد آن‌ها تقسیم می‌شود. حال هر سطح مقطعی که در آن متوسط کسر حجمی فاز اولیه بالاتر از 0.95 باشد، به‌عنوان بدنه اسلاگ مایع انتخاب می‌گردد. با این کار می‌توان

<sup>1</sup> Time step

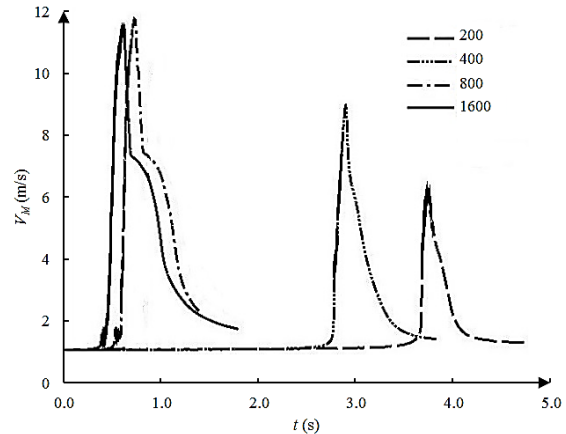


Fig. 3 Slug mixture velocity comparison at different mesh with 200, 400, 800 and 1600 cells in channel length direction

شکل 3 مقایسه سرعت مخلوط اسلاگ در شبکه‌هایی با تعداد 200، 400، 800 و 1600 سلول در راستای طول کانال

$$\frac{\partial(\rho_m \cdot V_m)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_m \cdot V_m \cdot V_m) = -\nabla \cdot P_m + \nabla \cdot \tau_m + \rho_m \cdot g \quad (2)$$

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \nabla \cdot (f \cdot V_m) = 0 \quad (3)$$

روابط بالا به ترتیب قوانین پیوستگی جرم، مومنتم و معادله انتقال سطح مشترک می‌باشند. در این مدل خواص فیزیکی به صورت ترکیبی خطی از خواص فیزیکی هر دو فاز به نسبت کسر تهی آن‌ها در هر سلول به‌دست می‌آید. خواص فیزیکی ترکیبی از روابط (5,4) محاسبه می‌شوند [13].

$$\rho_m = f \rho_1 + (1 - f) \rho_2 \quad (4)$$

$$\mu_m = f \mu_1 + (1 - f) \mu_2 \quad (5)$$

### 3-2- مدل‌سازی اغتشاشات جریان

جریان اسلاگ در اثر رشد یک ناپایداری کوچک (اغتشاش) ایجاد می‌شود و برای مدل‌سازی دقیق جریان اسلاگ باید از یک مدل اغتشاشی در کنار مدل های دوفازی استفاده کرد. در مدل‌سازی جریان‌های اغتشاشی به جای لزجت مولکولی در معادله مومنتم سیال از لزجت مؤثر که حاصل جمع لزجت مولکولی و لزجت اغتشاشی است استفاده می‌شود. این موضوع باعث ایجاد تغییرات در نیروهای موجود در سمت راست معادله مومنتم شده و می‌تواند شروع جریان اسلاگ را تحت تاثیر قرار دهد.

انتخاب مدل اغتشاشی مناسب در این جریان می‌تواند تأثیر به‌سزایی بر دقت نتایج حل داشته باشد. با توجه به نتایج بررسی انجام شده توسط انصاری و زین العابدینی [14] مدل k-ε RNG به عنوان بهترین مدل برای مدل‌سازی جریان اسلاگ انتخاب شده است.

### 3-3- مدل k-ε RNG

در این مدل، میدان سرعت با استفاده از تبدیل فوریه زمانی و با تکرارهای متوالی، به گونه‌ای تجزیه می‌شود، که مقیاس‌های کوچک، ولی پرسرعت حذف شده و ضرایب لازم در معادلات انتقال با استفاده از ویژگی‌های گردابه‌های بزرگ محاسبه شوند.

این مدل شامل یک ترم اضافی در معادله انتقال  $\varepsilon$  است تا دقت آن در جریان‌هایی که به شدت تحت کرنش (کشیدگی) قرار دارند افزایش یابد.

معادلات انتقال متغیرهای اغتشاشی در مدل RNG به صورت روابط (7,6)

با نتایج آزمایشگاهی سایر محققین بر اسلاگ مقایسه شد. پروفیل حاصل از حل عددی جریان اسلاگ در حالت دو بعدی در "شکل 4" آورده شده است. در حل عددی حاضر، اسلاگ در مکان 2.196m از ابتدای کانال و در زمان 0.556s اتفاق می افتد. براساس نتایج آزمایشگاهی نیز، جریان اسلاگ با مشخصات یادشده در فاصله حدود 2 متر از ابتدای کانال اتفاق می افتد [6]. در "شکل 5" به ترتیب نتایج حاصل از حل عددی انصاری و همکارانش، نتایج آزمایشگاهی ادیبی و انصاری و نتایج آزمایشگاهی هوهن بر جریان اسلاگ

محدوده‌ای از کانال که توسط مایع پل زده شده است، یا همان محدوده اسلاگ را شناسایی نمود. از دیگر مزایای این برنامه این است که در اولین مرحله‌ای که ارتفاع کانال پل زده می شود یک داده ذخیره می کند. بنابراین می توان زمان و مکان اسلاگ را به درستی و با دقت بسیار بالا از حل عددی استخراج نمود. لازم به ذکر است که در تمامی بررسی های انجام شده پیشین زمان و مکان وقوع اسلاگ از روی تصاویر حاصل از حل عددی و به صورت چشمی توسط محققین استخراج می شده است. لذا روش مورد استفاده در این مقاله باعث افزایش دقت در گزارش مشخصات مهم جریان اسلاگ می گردد. از طرف دیگر، می توان براساس سرعت و کسر تهی هر سلول واقع در این محدوده یک متوسط وزنی به دست آورد. بدین ترتیب سرعت متوسط فاز مایع در قسمتی از جریان که در آن بیش از 95 درصد ارتفاع کانال با فاز مایع پر شده است به دست می آید و می توان از این مقدار به عنوان معیاری برای سرعت بدنه اسلاگ مایع استفاده نمود.

**4- نتایج**

برای تعیین مشخصات جریان اسلاگ، این رژیم جریان با مدل جریان دوفازی حجم سیال و مدل اغتشاشی k-ε RNG در نرم افزار فلوئنت حل و نتایج آن

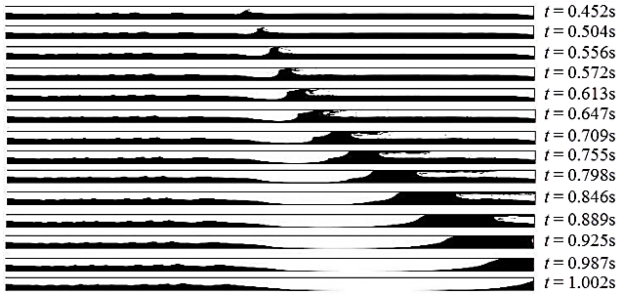


Fig. 4 slug modeling at 12 m/s velocity difference

شکل 4 شبیه سازی وقوع پدیده اسلاگ در اختلاف سرعت 12m/s

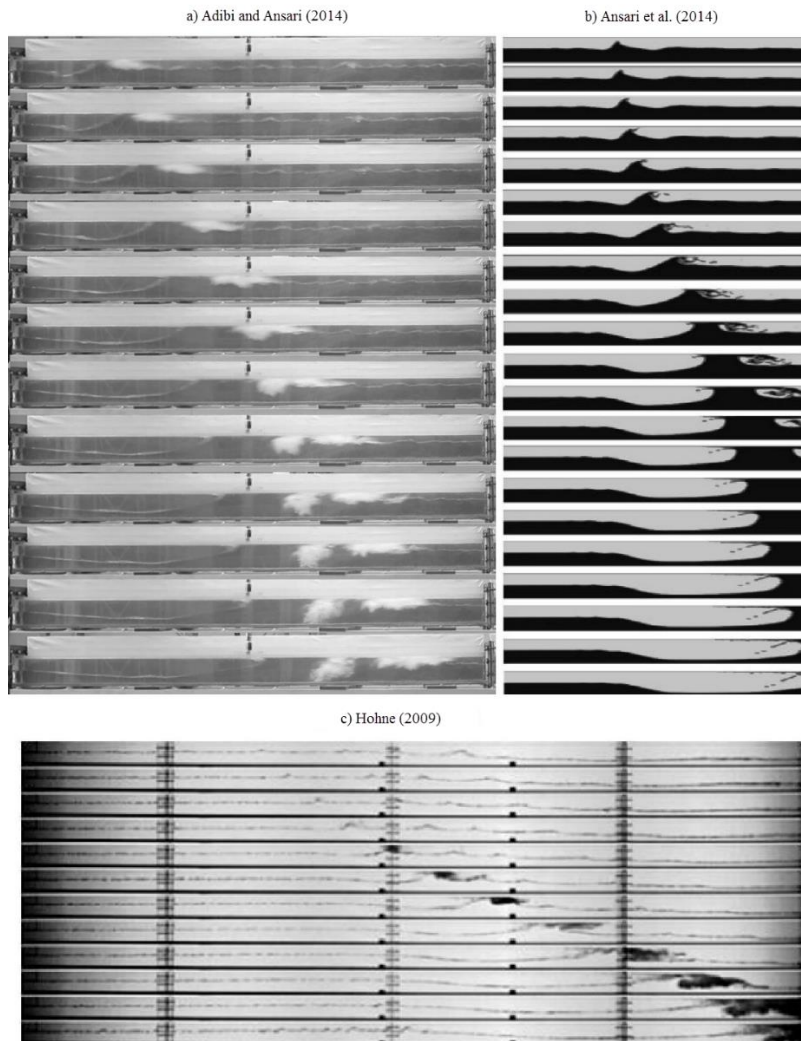


Fig. 5 a) Ansari et al. numerical result, b) Adibi and Ansari experimental result and c) Hohne experimental result on slug initiation [3,5,6]

شکل 5 (a) نتایج حل عددی انصاری و همکارانش، (b) بررسی آزمایشگاهی ادیبی و انصاری و (c) نتایج آزمایشگاهی هوهن بر جریان اسلاگ [3,5,6]

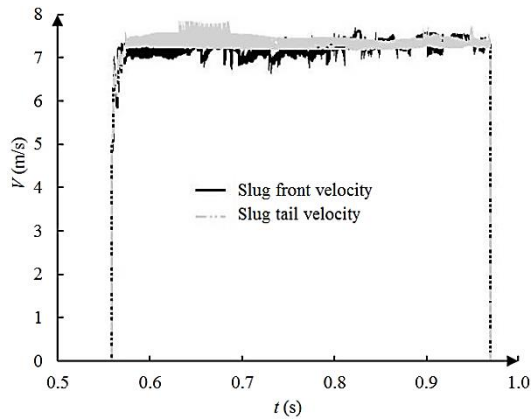


Fig. 7 Slug front and tail velocity

شکل 7 سرعت پیشانی و دم اسلاگ

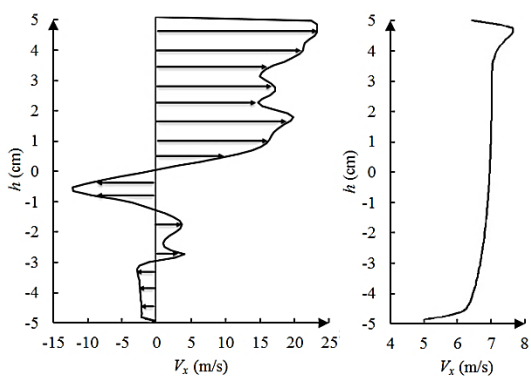


Fig. 8 Slug front and tail velocity distribution

شکل 8 توزیع سرعت در پیشانی و دم اسلاگ

می‌گردد. از طرفی سرعت ورود مایع به درون بدنه اسلاگ مایع به نحوی است، که میانگین سرعت پیشانی و دم اسلاگ همواره با یکدیگر برابر باشد. این حرکت همواره با ایجاد یک گردابه در ورودی اسلاگ همراه بوده و باعث نفوذ ذرات حباب به داخل بدنه اسلاگ مایع می‌گردد.

براساس نتایج کار بندیکسون و سایر محققین میزان سرعت پیشانی اسلاگ با سرعت مخلوط اسلاگ در ورودی متناسب بوده و از رابطه (9) محاسبه می‌شود [8-11,15]:

$$U_{front} = C(fU_1 + (1-f)U_2) \quad (9)$$

در رابطه (9) ضریب  $C$  بین مقادیر 1.05 و 1.2 متغیر است. بنابراین طبق رابطه (9) و مشخصات مسئله حاضر سرعت پیشانی اسلاگ در حدود 7.35 تا 8.4 m/s به دست می‌آید. متوسط سرعت پیشانی اسلاگ در حل حاضر مطابق "شکل 7" مقدار 7.8 m/s به دست می‌آید. مقایسه نتایج کار حاضر با نتایج حاصل از رابطه (9) نشان می‌دهد که سرعت بدنه اسلاگ مایع در این مدل‌سازی به درستی محاسبه شده است.

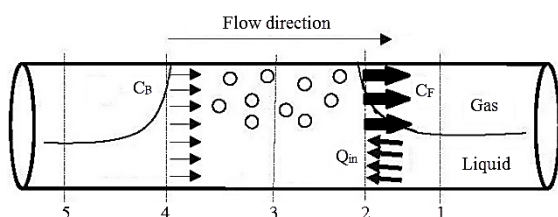


Fig. 9 Slug front and tail mass balance

شکل 9 بالانس جرمی بین پیشانی و دم اسلاگ

آورده شده است. در همه نتایج یاد شده اسلاگ در مکان 2 متری از ورودی کانال اتفاق افتاده است [3,5]. با توجه به مکان وقوع اسلاگ در نتایج آزمایشگاهی و مقایسه کیفی پروفیل جریان اسلاگ در حل حاضر با نتایج آزمایشگاهی و عددی پیشین، می‌توان صحت نتایج حل عددی حاضر را اعلام نمود.

در "شکل 6" جهت تعیین تاثیر استفاده از مدل اغتشاشی در حل جریان اسلاگ، کانتور جریان اسلاگ با هر دو مدل جریان آرام و مغشوش در زمان وقوع جریان اسلاگ آورده شده است.

همان‌طور که قبلاً نیز به آن اشاره شد در صورتی که از مدل اغتشاشی استفاده نشود، نیروهای محاسبه شده در سمت راست معادله مومنتم کمتر خواهند شد. در این صورت نیروهای ناشی از تغییرات مومنتم به راحتی می‌توانند بر نیروهای سمت راست معادله مومنتم غلبه کنند و اسلاگ در زمان مکان زودتری اتفاق خواهد افتاد. اما در حالت استفاده از مدل‌های اغتشاشی اسلاگ دیرتر اتفاق می‌افتد. زیرا نیروهای سمت راست معادله مومنتم افزایش یافته و غلبه بر آن‌ها نیاز به زمان بیشتر و یا نیروی بیشتری دارد.

براساس مطالب ارائه شده در تاریخچه بحث جریان اسلاگ، با وقوع و پیشروی جریان اسلاگ، طول آن رفته رفته افزایش می‌یابد. در "شکل 7" سرعت پیشانی و دم اسلاگ نشان داده شده است.

همان‌طور که مشاهده می‌شود، میانگین سرعت در پیشانی و دم اسلاگ با یکدیگر برابر است. در این صورت این سوال ایجاد می‌شود که طول اسلاگ چگونه افزایش می‌یابد؟ آیا باید سرعت پیشانی اسلاگ از دم اسلاگ بیشتر باشد یا برعکس؟ اگر سرعت پیشانی اسلاگ از سرعت دم اسلاگ بیشتر باشد پیوستگی اسلاگ از بین رفته و اسلاگ از هم می‌پاشد. اگر سرعت دم اسلاگ نیز از سرعت پیشانی آن بیشتر باشد دم اسلاگ از پیشانی عبور کرده و اسلاگ از بین می‌رود. پاسخ این سوال این است که سرعت فاز مایع در مناطق مختلف پیشانی اسلاگ با سرعت فاز مایع در دم اسلاگ با یکدیگر متفاوت بوده و تمام بدنه اسلاگ مایع با یک سرعت حرکت نمی‌کند. همین امر دلیل افزایش طول اسلاگ است. البته نکته جالب این است که این اختلاف سرعت همواره به نحوی خواهد بود که سرعت متوسط بدنه اسلاگ مایع ثابت می‌ماند و میانگین سرعت در پیشانی و دم اسلاگ نیز با یکدیگر برابر است. توزیع سرعت در پیشانی و دم اسلاگ در "شکل 8" نشان داده شده است. همان‌طور که مشخص است، توزیع سرعت در پیشانی اسلاگ برخلاف توزیع سرعت در دم اسلاگ به شدت نامتقارن می‌باشد.

اگر مطابق "شکل 9" یک حجم کنترل بر روی ستون مایع اسلاگ بین خطوط 2 و 4 ایجاد گردد، در قسمت فوقانی پیشانی اسلاگ، همواره مقداری فاز مایع با سرعتی بالاتر از سرعت دم اسلاگ به سمت جلو پرتاب می‌شود. ولی در دم اسلاگ، فاز مایع با سرعت کمتری به سمت جلو حرکت می‌کند. شرط قانون بقای جرم و یکپارچگی اسلاگ ایجاب می‌کند که همواره در زمان جریان داشتن اسلاگ، مقداری مایع از فیلم مایع پیشروی اسلاگ به سمت داخل بدنه اسلاگ مایع حرکت کند. همین امر باعث افزایش طول اسلاگ

a) Laminar flow  $t = 0.356s$

b) Turbulent flow  $t = 0.556s$

Fig. 6 a) Laminar and b) turbulent modeling of slug

شکل 6 نتایج حل جریان اسلاگ با مدل (a) آرام و (b) جریان مغشوش

در این نمودار در زمان قبل از وقوع اسلاگ صفر است. از طرفی پس از خروج پیشانی اسلاگ از انتهای کانال موقعیت مکانی پیشانی اسلاگ ثابت می شود و شیب تغییرات موقعیت مکانی مرکز و دم اسلاگ اندکی کاهش می یابد. این موضوع به این دلیل است که با خروج پیشانی اسلاگ از انتهای کانال سرعت حرکت اسلاگ اندکی کاهش می یابد. زیرا قبل از خروج پیشانی اسلاگ از انتهای کانال فشار موجود در روبه روی پیشانی اسلاگ منفی می باشد و اختلاف فشار دو سر اسلاگ بیشتر است. اما با خروج پیشانی اسلاگ از انتهای کانال فشار بعد از اسلاگ فشار اتمسفریک موجود در شرط مرزی خروجی می شود. بنابراین اختلاف فشار دو سر اسلاگ کمتر شده و سرعت حرکت اسلاگ کاهش می یابد. نکته جالب توجه در این شکل این است که شیب تغییرات موقعیت مکانی نقاط مختلف اسلاگ ثابت است. مشتق این نمودار برابر سرعت حرکت اسلاگ در مناطق مختلف است. بنابراین این شکل نیز نشان می دهد که سرعت حرکت اسلاگ ثابت و تغییرات موقعیت مکانی اسلاگ خطی است. این موضوع در بررسی بسیاری از محققین دیگر نیز به صورت آزمایشگاهی اثبات شده است [3,4,8,10,15].

در "شکل 12" طول بدنه مایع اسلاگ نشان داده شده است. همان طور که مشخص است با پیشرفت اسلاگ و با توجه به وجود اختلاف سرعت بین نواحی مختلف پیشانی و دم اسلاگ، طول اسلاگ افزایش می یابد. البته این طول بعد از این که پیشانی اسلاگ به انتهای کانال رسید، شروع به کاهش خواهد کرد.

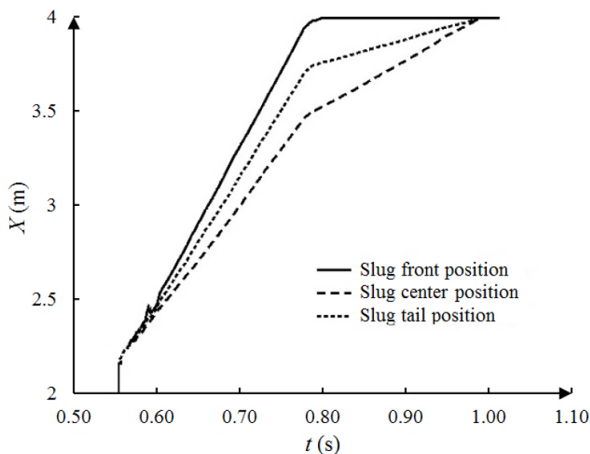


Fig. 11 Slug front, tail and center of gravity position

شکل 11 موقعیت مکانی پیشانی، دم و مرکز جرم

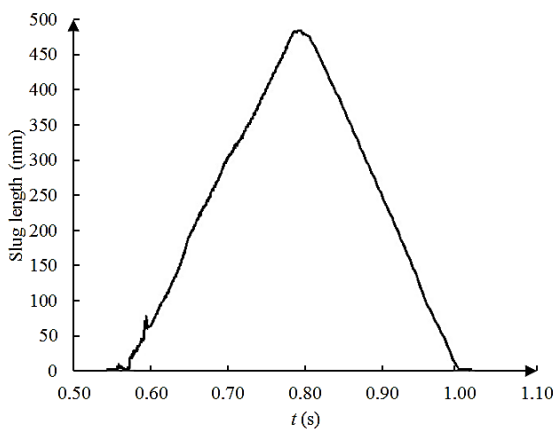


Fig. 12 Slug length

شکل 12 طول اسلاگ

در "شکل 10" سرعت بدنه اسلاگ مایع در هنگام وقوع جریان اسلاگ و سرعت فیلم مایع پیش روی اسلاگ نشان داده شده است. برای رسم این دو نمودار از کد کامپیوتری ذکر شده در بخش 3-3 استفاده شده است. همان طور که از این شکل مشخص است سرعت جریان اسلاگ پس از وقوع اسلاگ در یک مقدار مشخص ثابت خواهد شد. این سرعت تابعی از سرعت و کسر حجمی فازها در ورودی می باشد.

با پیشروی اسلاگ رفته رفته مقداری از فیلم مایع وارد اسلاگ شده و از طرفی مقداری از آن نیز از انتهای کانال خارج می گردد. لذا جرم مایع موجود در پیش روی اسلاگ که به آن فیلم مایع می گویند، کم می شود. بنابراین سرعت این مقدار از مایع راحت تر افزایش می یابد و با نیرویی که از سمت اسلاگ به آن وارد می گردد شتاب می گیرد.

قبل از وقوع جریان اسلاگ با حرکت هوا با سرعت زیاد بر روی جریان آب، امواجی بر روی سطح آب ایجاد می گردد. این امواج رفته رفته رشد کرده و عرض کانال را مسدود می کند. در این حالت اسلاگ اتفاق افتاده است. بعد از این که عرض کانال مسدود شد مقداری از آب که این انسداد را به وجود آورده به سمت جلو حرکت کرد و به تدریج مقدار آن بیشتر می شود. اما در خلال این حرکت همواره موج های تشکیل شده بر روی سطح آب از قبل از وقوع اسلاگ نیز در حال حرکت به سمت انتهای کانال می باشند و با پیشروی اسلاگ به تدریج مقداری از آن ها وارد اسلاگ شده و یا مقداری از آن ها قبل از این که اسلاگ به آن ها برسد از کانال خارج می شوند. نوسانات به وجود آمده در منحنی های سرعت و در ادامه در منحنی فشار به دلیل وجود همین امواج می باشند که بر روی متغیرهای جریان اسلاگ تاثیر می گذارند. این تاثیر به دو صورت مستقیم و غیرمستقیم می باشد. ترکیب این امواج با ستون اسلاگ مستقیماً بر روی پارامترهای جریان اسلاگ تاثیر گذاشته و آن ها را دچار نوسان می کند و خروج آن ها از انتهای کانال باعث تغییر غیرمستقیم در پارامترهای اسلاگ می گردد.

در "شکل 11" موقعیت پیشانی، دم و مرکز ثقل بدنه اسلاگ مایع نشان داده شده است. همان طور که از "شکل 11" مشخص است، جریان اسلاگ در مکان 2.196m از ورودی کانال اتفاق می افتد. این موضوع با نتایج بررسی تجربی انصاری و همکارانش [5] و سایر محققین [3,4,6,7] که بیان نموده بودند اسلاگ در فاصله حدود 2 متری از ورودی کانال اتفاق می افتد تطابق دارد. همان طور که در "شکل 11" مشاهده می شود موقعیت مکانی پیشانی اسلاگ همواره بالاتر از مرکز و دم اسلاگ است. توجه داشته باشید که نمودار موقعیت مکانی اسلاگ، با شروع اسلاگ دارای مقدار می شود. بنابراین مقدار

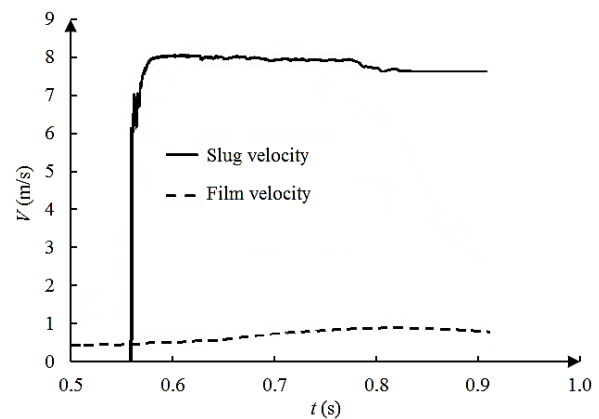


Fig. 10 slug liquid body velocity, film velocity and mixture velocity

شکل 10 سرعت بدنه اسلاگ مایع، فیلم مایع پیش روی اسلاگ و مخلوط هر دو فاز

که مشاهده می‌شود، حداکثر فشاری که در پشت ستون اسلاگ ایجاد می‌گردد در هر دو بررسی با تقریب خوبی با یکدیگر تطابق دارند. در بررسی حاضر فشار پشت اسلاگ می‌توان تا 60mbar و در بررسی انصاری و همکارانش تا 70mbar افزایش یابد. البته در بررسی حاضر فشار بعد از اسلاگ در زمان وقوع آن مقداری منفی گزارش شده است اما در بررسی انصاری و همکارانش این مقدار نهایتاً به صفر می‌رسد. البته منفی شدن فشار در جلوی اسلاگ در بسیاری از نتایج آزمایشگاهی از جمله نتایج ادیبی و انصاری نیز به اثبات رسیده است [6].

در "شکل 17" تنش برشی بر روی دیواره بالا و پایین به تفکیک و به صورت مجموع در زمان وقوع اسلاگ نشان داده شده است. قبل از شروع اسلاگ جریان آب با سرعت کم و ویسکوزیته بالا با دیوار پایینی و جریان هوا با سرعت بالا و ویسکوزیته کم با دیواره بالایی در تماس است. حرکت این دو سیال باعث ایجاد تنش برشی بر روی دیواره می‌گردد. اما مقدار این تنش کم بوده و همواره به صورت تقریباً یکسان به دیواره‌ها وارد می‌گردد. البته از آنجایی که مقدار ویسکوزیته دینامیکی هوا از آب در حدود 3 مرتبه کمتر است، لذا علی‌رغم بالاتر بودن سرعت هوا نسبت به آب، تنش برشی دیواره پایینی بیشتر از دیواره بالایی می‌باشد. پس از وقوع جریان اسلاگ، جریان آب با سرعت بالا درون کانال جاری می‌شود. با توجه به این‌که ویسکوزیته آب به مراتب بالاتر از هوا می‌باشد، در زمان وقوع جریان اسلاگ مقدار تنش برشی به سرعت افزایش پیدا می‌کند. این مقدار تنش برشی در لوله‌های انتقال

در "شکل 13" نیز موقعیت مرکز اسلاگ در زمان وقوع آن بر اساس نتایج آزمایشگاهی و حل عددی ولی و همکارانش آورده شده است [4]. در نتایج آن‌ها نیز تغییرات موقعیت اسلاگ با زمان خطی می‌باشد. این موضوع با نتایج به دست آمده از "شکل‌های 7 و 9" نیز تطابق دارد زیرا شیب تغییرات موقعیت مناطق مختلف اسلاگ همان سرعت این مناطق می‌باشد که طبق "شکل‌های 7 و 9" تقریباً ثابت هستند [16,11]. البته شیب تغییرات موقعیت مکانی در نتایج بررسی حاضر با بررسی ولی و همکارانش تا حدودی متفاوت است. دلیل این امر تفاوت در سرعت‌های ورودی جریان‌های دو فاز در بررسی حاضر با بررسی ولی و همکارانش است. به علاوه بررسی حاضر به صورت دوبعدی انجام شده است اما بررسی ولی و همکارانش به صورت تجربی در یک لوله انجام شده است.

در "شکل 14" توزیع فشار در زمان وقوع جریان اسلاگ در ورودی کانال نشان داده شده است. از آنجایی که انتهای کانال به یک مخزن اتمسفریک متصل است، لذا می‌توان نمودار زیر را همان افت فشار دو سر اسلاگ در نظر گرفت.

همان‌طور که مشاهده می‌شود فشار در ورودی کانال در بدترین حالت به صورت ضربه‌ای به 60mbar می‌رسد.

در "شکل 15" نمودار تغییرات فشار نسبی در فاصله 2mm از دیوار بالایی کانال در طول زمان وقوع اسلاگ نشان داده شده است. در "شکل 16" فشار نسبی درون کانال براساس نتایج کار انصاری و همکارانش در زمان وقوع اسلاگ در فاصله 1cm از دیواره بالایی نشان داده شده است [5]. همان‌طور

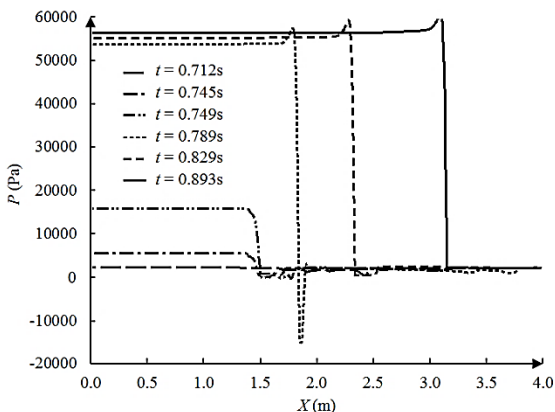


Fig. 15 pressure distribution on channel length of numerical simulation by present work

شکل 15 توزیع فشار در طول کانال براساس نتایج عددی حاضر

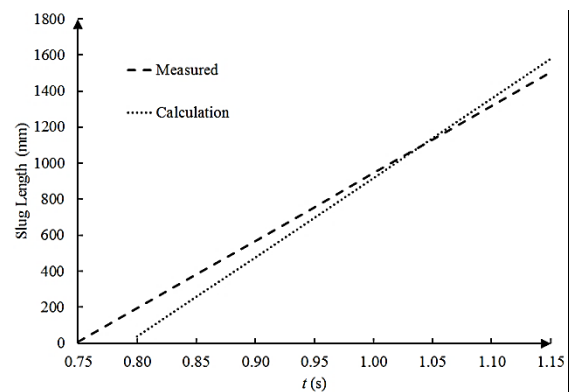


Fig. 13 Slug length while slug propagates [4]

شکل 13 طول اسلاگ در زمان وقوع اسلاگ [4]

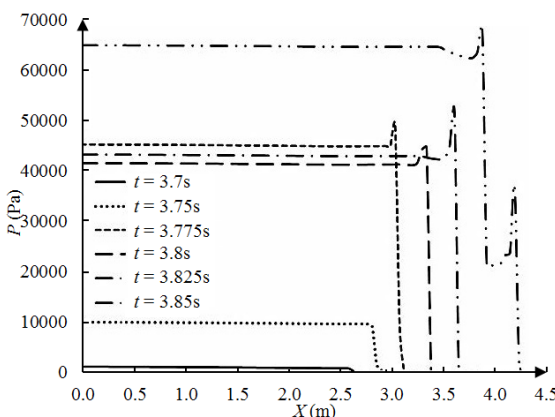


Fig. 16 pressure distribution on channel length of numerical simulation by Ansari et al. [5]

شکل 16 توزیع فشار در طول کانال براساس نتایج عددی انصاری و همکارانش [5]

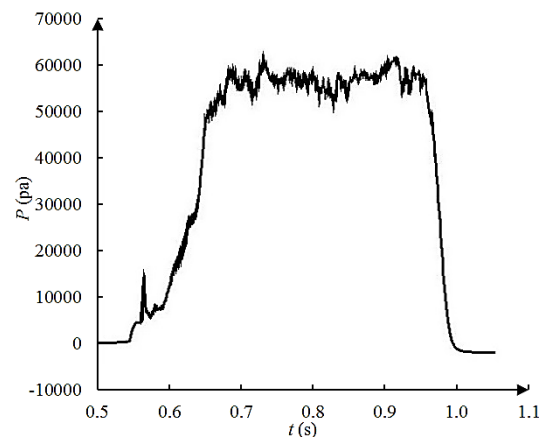


Fig. 14 channel inlet pressure while slug is happening

شکل 14 فشار ورودی کانال در زمان وقوع اسلاگ



موارد زیر اشاره نمود:

- سرعت اسلاگ (اسلاگ پایدار) از زمان وقوع تا زمان خروج آن از انتهای کانال تقریباً ثابت می‌ماند.
- متوسط سرعت جریان در پیشانی و دم اسلاگ تقریباً برابر می‌باشد.
- افزایش طول اسلاگ به این دلیل است که سرعت جریان در مناطق مختلف پیشانی اسلاگ متفاوت است و در قسمت زیرین (ناحیه فیلمی) جهت سرعت به سمت خود اسلاگ می‌باشد.
- طول اسلاگ به صورت خطی افزایش می‌یابد. این موضوع به نحوی سرعت ثابت جریان اسلاگ را تأیید می‌کند.
- شمشقدار تنش برشی دیواره بالایی کانال قبل از وقوع اسلاگ کمتر از دیواره پایینی بوده، اما در زمان وقوع اسلاگ به دلیل افزایش ناگهانی سرعت آب و حرکت آن در تماس با دیواره بالایی، تنش برشی دیواره بالایی بیشتر از دیواره پایینی می‌گردد. این موضوع با خروج اسلاگ از کانال دوباره به حالت قبل باز می‌گردد.
- اختلاف سرعت در نواحی مختلف پیشانی اسلاگ نشان از وجود یک گردابه در پیشانی اسلاگ دارد.
- افت فشار دو سر اسلاگ در کانالی با ابعاد یادشده و شرایط مسئله حاضر می‌تواند تا 6% فشار ورودی کانال افزایش یابد.
- فشار در جلوی اسلاگ در زمان وقوع و حرکت آن مقداری منفی خواهد داشت. همین امر باعث افزایش سرعت جریان اسلاگ می‌گردد.
- افت فشار دو سر اسلاگ در کانالی با ابعاد یاد شده و شرایط مسئله حاضر می‌تواند تا 60mbar افزایش یابد.

#### 6- فهرست علائم

$f$	کسر تهی یکی از فازها
$g$	شتاب جاذبه ( $m/s^2$ )
$G_k$	ترم تولید انرژی جنبشی اغتشاشی ( $m^2/s^3$ )
$k$	انرژی جنبشی اغتشاشی ( $m^2/s^3$ )
$P$	فشار (Pa)
Re	عدد بی بعد رینولدز
$S$	اندازه نرخ کرنش ( $1/s$ )
$t$	زمان (s)
$u$	سرعت افقی یا به صورت کلی سرعت (m/s)

#### علائم یونانی

$\alpha$	معکوس عدد پراتل مؤثر
$\varepsilon$	نرخ تلفات انرژی جنبشی اغتشاشی ( $m^2/s^3$ )
$\mu$	ویسکوزیته دینامیکی ( $kg/m \cdot s$ )
$\rho$	چگالی ( $kg/m^3$ )
$\tau$	تنش برشی (Pa)

#### زیرنویس‌ها

eff	مؤثر (مجموع پارامتر مولکولی و پارامتر اغتشاشی)
i, j, k	اندیس
m	مخلوط دو فاز
mol	مولکولی
t	اغتشاشی

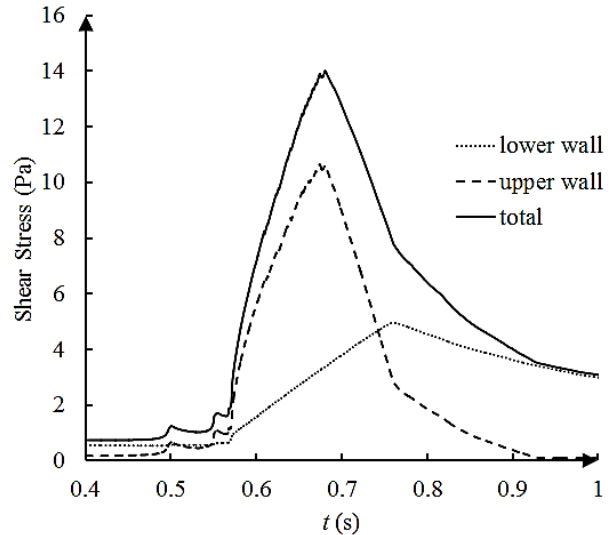


Fig. 17 Averaged shear stress on both upper and lower duct wall meanwhile the slug propagation

شکل 17 تنش برشی متوسط بر روی هر دو دیواره بالا و پایین کانال در زمان وقوع اسلاگ

می‌تواند باعث خرابی زود هنگام لوله‌ها شود. از طرف دیگر اگر محدوده دبی‌های هر یک از دو فاز ورودی به درون لوله به نحوی باشد که سیستم برای مدت زمان زیادی در محدوده جریان دوفازی اسلاگ کار کند، وقوع اسلاگ‌های متوالی می‌تواند باعث اعمال بارهای متناوب و خستگی لوله و نهایتاً تخریب آن گردد. نکته قابل توجه این است که تنش برشی دیواره بالایی کانال در زمان وقوع جریان اسلاگ و حرکت اسلاگ درون کانال از مقدار تنش برشی دیواره پایینی بیشتر خواهد شد. آبی که درون بدنه اسلاگ مایع در برخورد با دیواره بالایی نسبت به آب موجود در بدنه اسلاگ مایع در برخورد با دیواره پایینی کانال دارد. لذا تنش برشی ناشی از آن به مراتب بالاتر است. پس از خروج جریان اسلاگ از انتهای کانال مجدداً تنش برشی دیواره بالایی کمتر از دیواره پایینی خواهد شد. این نتایج تطابق خوبی با نتایج حل عددی مارون و همکارانش دارد. آن‌ها اعلام کرده بودند که تنش دیواره بالایی در جریان اسلاگ بیشتر از دیواره پایینی می‌باشد [16].

#### 5- جمع بندی

در این مقاله جریان اسلاگ در داخل یک داکت افقی با استفاده از مدل دوفازی حجم سیال و مدل اغتشاشی k-ε RNG در نرم‌افزار فلونت به صورت دوبعدی حل شد.

برای تعیین موقعیت نواحی مختلف اسلاگ، سرعت و سایر پارامترهای مهم اسلاگ یک برنامه کامپیوتری نوشته شد که در خلال حل جریان توسط نرم‌افزار فلونت پارامترهای مهم اسلاگ را محاسبه و آن‌ها را در غالب نمودارهایی از زمان وقوع اسلاگ ترسیم می‌نماید. در انتها پارامترهای مهم جریان اسلاگ از جمله موقعیت مکانی و سرعت پیشانی، دم، مرکز ثقل و مخلوط اسلاگ، طول اسلاگ، توزیع فشار درون کانال در زمان وقوع اسلاگ و تنش برشی دیواره‌ها ارائه گردید. برای هر یک از نتایج ارائه شده تحلیل‌هایی ارائه شد و این نتایج با نتایج تجربی و عددی سایر محققین به صورت کیفی صحت‌سنجی شد.

در رابطه با نتایج مهم اخذ شده از حل عددی جریان اسلاگ می‌توان به

## 7- مراجع

- and *Civil Engineering*, Bangalore, India. September 14-15, 2011.
- [8] O. J. Nydal, S. Pintus, P. Andreussi, Statistical characterization of slug flow in horizontal pipes, *International Journal of Multiphase Flow*, Vol. 18, No. 3, pp. 439-453, 1992.
- [9] M. Bonizzi, R. I. Issa, A model for simulating gas bubble entrainment in two-phase horizontal slug flow, *International Journal of Multiphase Flow*, Vol. 29, No. 11, pp. 1685-1717, 2003.
- [10] P. Andreussi, K. Bendiksen, O. J. Nydal, Void distribution in slug flow, *International Journal of Multiphase Flow*, Vol. 19, No. 5, pp. 817-828, 1993.
- [11] D. Lakehal, LEIS for the prediction of turbulent multifluid flows applied to thermal-hydraulics applications, *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 240, No. 9, pp. 2096-2106, 2010.
- [12] E. Saadati, M. Zeynalabedini, *Fundamental and advanced CFD simulation with FLUENT and CFX*, pp. 390-666, Tehran, Iran, Pardad Petrodanesh firm (PETEC), 2015. (in Persian فارسی)
- [13] ANSYS Products, 2015. FLUENT User Manual.
- [14] M. R. Ansari, M. Zeynalabedini, Evaluation and selection of the most consistent turbulent model with the slug flow behavior, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 8, pp. 315-325, 2016. (in Persian فارسی)
- [15] K. H. Bendiksen, An experimental investigation of the motion of long bubbles in inclined tubes, *International Journal of Multiphase Flow*, Vol. 10, No. 4, pp. 467-483, 1984.
- [16] D. Moalem Maron, N. Yacoub, N. Brauner, D. Naot, Hydrodynamic mechanisms in the horizontal Slug pattern, *International Journal of Multiphase Flow*, Vol. 17, pp. 227-245, 1991.
- [1] M. R. Ansari, *Slug mechanism in horizontal duct and simulation based on one-dimensional two-fluid dynamics*, Ph.D. Thesis, Tsukuba University, Japan, 1989.
- [2] E. Pereyra, R. Arismendi, L. E. Gomez, R. S. Mohan, O. Shoham, G. E. Kouba, State of the art of experimental studies and predictive methods for slug liquid holdup, *Journal of Energy Resources Technology*, Vol. 134, No. 2, pp. 023001, 2012.
- [3] T. Hohne, Experiments and numerical simulations of horizontal twophase flow regimes, *Seventh International Conference on CFD in the Minerals and Process Industries*, Melbourne, Australia, December 9-11, 2009.
- [4] C. Vallee, T. Hohne, H. M. Prasser, T. Suhnel, Experimental investigation and CFD simulation of horizontal stratified two-phase flow phenomena, *International Journal of Nuclear Engineering and Design*, Vol. 238, No. 3, pp. 637-646, 2008.
- [5] M. Ansari, E. Salimi, B. HabibPour, P. Adibi, Three dimensional simulation of slug two-phase flow regime in a horizontal channel using VOF method, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 7, pp. 182-176, 2014. (in Persian فارسی)
- [6] P. Adibi, M. 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 فارسی)
- [7] S. Y. Razavi, M. M. Namin, Numerical model of slug development on horizontal two-phase flow, *Proceedings of The International Conference on Recent Trends in Transportation, Environmental*