ماهنامه علمى پژوهشى

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

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

مصطفى زين العايديني 1، محمد رضا انصبارى 2\*

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

چکیدہ	اطلاعات مقاله
رژیم جریان اسلاگ یکی از پیچیده ترین رژیمهای دو فازی است که در فرآیندهای صنعتی و به ازای محدوده وسیعی از جریآنها دیده می ش	مقاله پژوهشی کامل
البته همواره بین نتایج حاصل از آزمایشات و حل عددی بر روی این رژیم جریان، اختلافات زیادی دیده می شود. پیرو بررسی پیشین در رابطه	دريافت: 17 اسفند 1395
م با میں ایک ایک ایک ایک ایک میں میں میں میں ایک ایک میں ایک ایک ایک ایک میں میں میں ایک ایک ایک ایک میں ایک ای ایک ایک ایک ایک ایک ایک ایک ایک ایک ایک	پذيرش: 14 فروردين 1396
تغیین بهترین مدل اعتساسی برای مدل ساری عددی دقیق در جرین اسلاف، در این تحقیق سعی شده است و و انجام یک حل عددی دو بعد	ارائه در سایت: 03 اردیبهشت 1396
دقیق با استفاده از نرمافزار فلوئنت، مشخصات مختلف جریان اسلاک استخراج گردد. در این مدل سازی از مدل جریان دو فازی حجم سیال	کلید واژگان:
مدل اغتشاشی RNG استفاده شده و تفاوت حل جریان اسلاگ با مدل جریان آرام و مدل جریان مغشوش نشان داده شده است. در این راب	اسلاگ
یک کد کامپیوتری جدید نوشته شده است تا بتواند بدون افزایش زمان حل، پارامترهای مهم جریان اسلاگ مانند سرعت بدنه اسلاگ ما	شبیهساز ی
سرعت فیلم جریان پیشروی اسلاک، سرعت پیشانی و دم اسلاک، موقعیت مکانی پیشانی، دم و مرکز اسلاک، طول اسلاک و سرعت مخل	مدل دو فازی حجم سیال
دو فاز را به صورت كاملا دقیق از نتایج حل نرمافزار فلوئنت استخراج كند. در ادامه ارائه نتایج حل هر كمیت سعی شد تا پس از احراز صح	ناحيه اختلاطي
نتايج استخراجی، نتايج بدست آمده مورد تحليل و بررسی قرار گيرد.	اغتشاشات

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

Mostafa Zeynalabedini, Mohammad Reza Ansari<sup>\*</sup>

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

Kevwords: Slug Simulation VOF mixing zone Turbulence

ABSTRACT

Slug flow is one 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. Followingthe previousattempt on the selection of the best turbulent model for numerical simulation, the slug flow is solved two-dimensionaly with implicit VOF method and k- $\epsilon$ 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 parametrs 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

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

این رژیم جریان در اثر ایجاد یک اغتشاش کوچک تصادفی با طول موج كوتاه به وجود مى آيد. اين اغتشاش مى تواند رشد كند و تمام ارتفاع كانال را یل بزند. در این حالت اسلاگ با طول موج بلند تشکیل می شود [1].

رژیم اسلاگ همواره با یک ناحیه اختلاطی شدید در ابتدای خود همراه است. در ناحیه اختلاطی، پیشانی اسلاک با سرعت بالا به سمت فیلم مایع حرکت کرده و با شتاب دادن به آن، آنرا با خود همراه می کند. این فرآیند سبب ایجاد یک گردابه در ورودی اسلاک می شود. به این ناحیه، ناحیه اختلاطی یا هوازایی می گویند. در ناحیه اختلاطی نوسانات شدید و نامتقارنی در پارامترهای میدان جریان مانند فشار و تنش برشی وجود دارد

به صورت کلی جریان اسلاگ زمانی اتفاق میافتد که نیروی ناشی از تغییرات

Please cite this article using:

Persian)

Please cite this article using: 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 (m. U

،د.

ى

٥ŀ ۍ ط ت

مومنتم سیال ۲ بتواند بر مجموع نیروهای ناشی از وزن، لزجت، اغتشاشات و فشار موجود بر روی سیال غلبه کند.

هوهن [3] با مطالعه تجربی جریان اسلاک در کانال مستطیلی به طول 8 متر و سطح مقطع 10 cm<sup>2</sup> زمان و مکان آغاز اسلاگ را بهدست آورد. او همچنین با استفاده از نرمافزار انسیس سیافایکس<sup>2</sup>، جریان اسلاگ را به کمک مدل دو فازی اولری-اولری $^{7}$ و مدل اغتشاشی دو معادلهای  $\mathrm{k} ext{-}\omega$  به همراه روابط میراکننده اغتشاشات در سطح مشترک بهصورت 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 اسلاک 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 -SST k استفاده نمودند. مقیاس طولی شبکه محاسباتی مورد استفاده آنها در  ${\mathfrak a}^4$ حدود 4mm بوده است، که این مقدار نیز برای استفاده از مدل اغتشاشی SST k-۵ در نزدیکی دیواره عدد بسیار بزرگی است. در حقیقت آنها از مدل k- $\epsilon$  موجود در مدل  $SST \ k$ - $\omega$  استفاده کردهاند. آن ها علاوه بر تطابق کیفی پروفیل اسلاک در حل عددی و نتایج آزمایشگاهی، فشار و طول اسلاک را نیز صحتسنجی نمودند که نشان از قابل قبول بودن نتایج کار آنها داشت.

انصاری و همکارانش [5] جریان اسلاک در یک کانال افقی با سطح مقطع مستطیلی را با استفاده از روش حجم سیال به همراه مدل اغتشاشی بهصورت دوبعدی در نرمافزار اینفوم  $^{\circ}$  شبیهسازی کردند. ابعاد SST k- $\omega$ كانال مورد مطالعه آن ها با ابعاد كانال بررسى 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 اسلاک را به درستی تخمين ميزد، ولي در محاسبه مكان اسلاك %22 خطا داشت.

ادیبی و انصاری [6] به مطالعه آزمایشگاهی جریان اسلاگ درون کانالی به ابعاد 3600×10×5 سانتیمتر پرداختند. در کار آنها سرعتهای ظاهری فاز آب و هوا به ترتیب 0.5m/s و سرعت ظاهری فاز هوا m/s و کسر تهی هر دو فاز در ورود به کانال 0.5 بوده است. در آزمایش آن ها 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  $^{\prime}$ به صورت دوبعدی پرداختند. آنها در مدلسازی خود از مدل  $\mathrm{k} ext{-}arepsilon$  تحقق پذیر استفاده كردند و نتايج كار خود را با نتايج تجربي و عددي هوهن [3] مطابقت دادند. نتايج آنها با نتايج بررسي هوهن تطابق خوبي داشت. البته تنها تفاوت این دو بررسی نیز استفاده از مدل اغتشاشی k-E تحقق پذیر 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 بهدست آوردند. آنها به این نتیجه رسیدند که در لوله های کوتاه یا سرعت گازهای ورودی بالا اسلاگ در حال توسعه در کانال تشکیل می گردد. در زمان حرکت این اسلاگ در طول کانال حبابهای

كمترى به داخل اين اسلاك نفوذ مىكنند. آنها نتيجه گرفتند كه 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. بهعلاوه 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 نيروى بويانسى ارائه كردند. مدل آنها شامل معادلات دوسیالی برای فاز هوا و فاز مخلوط آب و حبابهای نفوذ کرده به داخل اسلاک و یک معادله پیوستگی برای ذرات حباب بود. آنها فرض کردند توزیع حبابها درون اسلاک 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 اسلاک دقت بالاتری نسبت به سایر کارهای انجام شده پیشین داشت.

آندروسی و همکارانش [10] با بررسی اسلاک، 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 بهدست 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 جریان ها بوده و در حدود 15 الی 22 برابر قطر لوله می باشد.

لاخال [11] با استفاده از دیدگاه  ${
m LEIS}^7$  و روش حجم سیال  $^{\wedge}$  به بررسی جریآنهای 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 مدلسازی های 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 کد محاسباتی نیز برای استخراج دقیق پارامترهای جریان اسلاک از نتایج شبيهسازى عددى نرمافزار فلوئنت"، نوشته شده است، تا بتواند بدون افزايش زمان محاسبات نتایج کیفی جریان اسلاک 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 می باشند. 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** 

Momentum change ANSYS CFX

Eulerian-Eulerian

Shear Stress Transport k-w

Open foam Realizable

Large Eddy Interface Simulation

Volume Of Fluid (VOF) 9 ANSYS FLUENT 17

1-2- مشخصات هندسی و فیزیکی

- ابعاد كانال: 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 می شود.
  - سرعت ظاهری آب و هوا: به ترتیب 0.5m/s و 6.5m/s

## 2-2- شرايط مرزى

• در ورودی میدان حل از شرط سرعت ورودی ثابت برای هر دو فاز استفاده مىشود.

• خروجی این کانال به یک مخزن تخلیه می شود که در فشار اتمسفر است؛ بنابراین می توان از شرط مرزی فشار خروجی ثابت در مرز انتهایی استفاده کرد.

• شرط اعمال شده بر دیواره ها نیز شرط عدم لغزش است و از تابع دیواره استاندارد برای حل جریان در نواحی نزدیک دیواره استفاده می شود.

 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 می شود [12].

در "شکل 1" شماتیکی از مسئله موردنظر نشان داده شده است

## 3-2-مشخصات حلگر

- الگوریتم مورد استفاده برای حل معادلات گ مومنتم: سيمپل<sup>1</sup>
  - مدل دوفازی مورد استفاده: حجم سیال
    - روش گسستهسازی زمانی: ضمنی<sup>1</sup>
  - گسستهسازی و کوپلینگ معادله مومنتم و فشار: استگرد<sup>3</sup>
- فواصل زمانی: به صورت متغیر (تطبیق پذیر<sup>†</sup>) به نحوی که همواره عدد كورانت در تمام جريان كمتر از 0.25 باشد.
  - روش گسستهسازی مومنتم: درجه دو پیشرو<sup>۵</sup>
  - روش گسستهسازی کسر حجمی: بازسازی هندسی<sup>2</sup>

فواصل زمانی در این مسئله به صورت متغییر بین مقادیر <sup>6-1</sup>0 تا <sup>3-1</sup>0 انتخاب شده است. مدت زمان حل مسئله برای 2 ثانیه با پردازش موازی بر رایانه 8 هستهایی 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.



شکل 1 شماتیک کانال موردنظر برای تولید جریان اسلاگ

Adaptive Second order upwind

6 GeoConstruct

لذا استقلال حل از شبکه در هر دو جهت مختصاتی به صورت جداگانه بررسی می شود. برای تعیین استقلال حل از شبکه نسبت به تعداد سلول های در راستای ارتفاع کانال 4 شبکه محاسباتی با تعداد 16000، 32000، 64000 و 128000 سلول به نحوى ساخته شد، كه تعداد تقسيمات آنها در راستای طول 4 متری کانال 800 و تعداد تقسیمات آنها در راستای ارتفاع 10 سانتىمترى كانال به ترتيب 20، 40، 80 و 160 باشد. بنابراين 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 می باشد. در "شکل 2" سرعت مخلوط اسلاگ در هر 4 شبکه با یکدیگر مقایسه شده است. همان طور که مشاهده می شود، شبکه ای که تعداد تقسیمات آن در راستای ارتفاع 80 و ارتفاع سلول.های آن 1.25mm است نتایج مستقلی ارائه می کند.

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 اين شبكهها ارتفاع سلول ها مقدار ثابت 1.25mm (الع در راستای ارتفاع کانال) و طول سلولها در راستای طول کانال به ترتیب 20، 10، 5 و 2.5mm (تعداد تقسيمات در راستاي طول كانال به ترتيب 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 می کند.

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 اسلاک به صورت مستقل از شبکه، با ابعاد بهدست آمده در کار انصاری و همكارانش [5] نيز تطابق دارد.

## 3-معادلات جريان

## 1-3- معادلات مدل جريان دو فازى حجم سيال

معادلات مورد استفاده برای مدلسازی دو بعدی جریان اسلاگ همدما با مدل حجم سيال به صورت روابط (1-3) بيان مي شود [13].

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



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

شكل 2 مقايسه سرعت مخلوط اسلاك در شبكههايي با تعداد 20، 40، 80 و 160 سلول در راستای ارتفاع کانال

Semi Implicit Method for Pressure Linked Equations

Implicit Pressure Staggered Option



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

مصطفى زينالعابديني و محمدرضا انصاري

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

در روابط این مدل k و  $\alpha_s$  معکوس اعداد پرانتل 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 ( $\mu_{
m mol}/\mu_{
m eff} \ll 1$ )، هر دو مقدار  $\alpha_k$  و  $\alpha_s$  با هم برابر می شوند.

مزیت مهم مدل RNG نسبت به سایر مدلهای همخانواده خود، وجود یک ترم اضافی در معادله انتقال arepsilon است که بهصورت رابطه (8) محاسبه مىشود.

$$R_{\varepsilon} = \frac{c_{\mu}\rho\eta^{3}\left(1-\frac{\eta}{\eta_{0}}\right)}{1+\beta\eta^{3}}\frac{\varepsilon^{2}}{k}, \qquad \eta = \frac{Sk}{\varepsilon}, \qquad \beta = 0.012$$
(8)

این پارامتر در جایی که جریان تحت کرنش کم یا ملایم قرار دارد (η<η<sub>0</sub>)، تغییرات چندانی بین مدل RNG و سایر مدل ها ایجاد نمی کند، ولی در نواحی که جریان به شدت تحت کرنش قرار دارد ( $\eta_0 < \eta$ ) با محاسبه kمقادیر کمتری برای ترم تلفات در معادله انتقال  $\varepsilon$  سبب افزایش  $\varepsilon$  و کاهش و به تبع آن كاهش لزجت مؤثر مى شود. اين موضوع سبب افزايش دقت مدل RNG نسبت به سایر مدل های می شود. این مدل برای شرایطی که جریان به شدت تحت کرنش (کشیدگی) قرار دارد و یا انحنای 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 می کند.

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

سرعت بدنه اسلاک مایع، سرعت فیلم جریان پیشروی اسلاک، سرعت پیشانی و دم اسلاک، موقعیت مکانی و طول اسلاک، از جمله پارامترهای مهم جریان اسلاگ هستند، که به تنهایی نمی توان 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 می تواند با نرم افزار فلوئنت 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 قبلا به آنها اشاره شد) در اختیار قرار دهد. از آنجایی که این برنامه می باید در هر فاصله زمانی ٔ حل شود، لذا باید به نحوى بهينه گردد كه حداقل زمان لازم براى اجراى آن نياز 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 می کند. 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 آن ها تقسیم می شود. حال هر سطح مقطعی که در آن متوسط کسر حجمی فاز اولیه بالاتر از 0.95 باشد، بهعنوان بدنه اسلاک مايع انتخاب مي گردد. با اين کار مي توان



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

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

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

روابط بالا به ترتیب قوانین پیوستگی جرم، مومنتم و معادله 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 ميآيد. خواص فيزيكي تركيبي از روابط (5,4) محاسبه ميشوند [13].

$$\rho_m = f \rho_1 + (1 - f) \rho_2 \tag{4}$$

$$\mu_m = f\mu_1 + (1 - f)\mu_2 \tag{5}$$

## 2-3- مدلسازی اغتشاشات جریان

جریان اسلاگ در اثر رشد یک ناپایداری کوچک (اغتشاش) ایجاد می شود و برای مدلسازی دقیق جریان اسلاگ باید از یک مدل اغتشاشی در کنار مدل های دوفازی استفاده کرد. در مدلسازی جریآنهای اغتشاشی به جای لزجت مولكولى در معادله مومنتم سيال از لزجت مؤثر كه حاصل جمع لزجت مولكولى و لزجت اغتشاشى است استفاده مى شود. اين موضوع باعث ايجاد 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 می تواند تأثیر به سزایی بر دقت نتایج حل داشته باشد. با توجه به نتایج بررسی انجام شده توسط انصاری و زینالعابدینی [14] مدل k-ɛ RNG به عنوان بهترین مدل برای مدلسازی جريان اسلاك انتخاب شده است.

### 3-3- مدل RNG k-E

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 گردابه های بزرگ محاسبه شوند.

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

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

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Time step

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 میشود یک داده ذخیره میکند. بنابراین میتوان زمان و مکان اسلاگ را به درستی و با دقت بسیار بالا از حل عددی استخراج نمود. لازم به ذکر است که در تمامی بررسیهای انجام شده پیشین زمان و مکان وقوع اسلاگ از روی تصاویر حاصل از حل عددی و به صورت چشمی توسط محققین استخراج میشده است. لذا روش مورد استفاده در این مقاله باعث افزایش دقت در گزارش مشخصات مهم جریان اسلاگ میگردد. از طرف دیگر، میتوان 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 میآید و میتوان از این مقدار به عنوان معیاری مایع پر شده است بدنه اسلاگ مایع استفاده نمود.

#### 4- نتايج

برای تعیین مشخصات جریان اسلاک، این رژیم جریان با مدل جریان دوفازی حجم سیال و مدل اغتشاشی k-ɛ RNG در نرمافزار فلوئنت حل و نتایج آن

با نتایج آزمایشگاهی سایر محققین بر اسلاک مقایسه شد. پروفیل حاصل از حل عددی جریان اسلاک در حالت دو بعدی در "شکل 4" آورده شده است. در حل عددی حاضر، اسلاک در مکان 2.196m از ابتدای کانال و در زمان 0.556s اتفاق میافتد. براساس نتایج آزمایشگاهی نیز، جریان اسلاک با مشخصات یادشده در فاصله حدود 2 متر از ابتدای کانال اتفاق میافتد [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 اسلاک



**Fig. 4** slug modeling at 12 m/s velocity difference شکل 4 شبیه سازی وقوع پدیده اسلاک در اختلاف سرعت 12m/s



c) Hohne (2009)



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 [6,5,3]

آورده شده است. در همه نتایج یاد شده اسلاک در مکان 2 متری از ورودی کانال اتفاق افتاده است [5,3]. با توجه به مکان وقوع اسلاک در نتایج آزمایشگاهی و مقایسه کیفی پروفیل جریان اسلاک 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.

همان طور که قبلا 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 می توانند بر نیروهای سمت راست معادله مومنتم غلبه کنند و اسلاگ در زمان و مکان زودتری اتفاق خواهد افتاد. اما در حالت استفاده از مدل های 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.

همان طور که مشاهده می شود، میانگین سرعت در پیشانی و دم اسلاک با یکدیگر برابر است. در این صورت این سوال ایجاد می شود که طول اسلاک چگونه افزایش می ابد؟ آیا باید سرعت پیشانی اسلاک از دم اسلاک بیشتر باشد باشد یا برعکس؟ اگر سرعت پیشانی اسلاک از سرعت دم اسلاک بیشتر باشد پیوستگی اسلاک از بین رفته و اسلاک از هم می باشد. اگر سرعت دم اسلاک نیز از سرعت پیشانی آن بیشتر باشد دم اسلاک از پیشانی عبور کرده و اسلاک از بین می رود. پاسخ این سوال این است که سرعت فاز مایع در مناطق مختلف پیشانی اسلاک با سرعت فاز مایع در دم اسلاک با یکدیگر متفاوت بوده و تمام بدنه اسلاک مایع با یک سرعت حرکت نمی کند. همین امر دلیل افزایش طول اسلاک است. البته نکته جالب این است که این اختلاف سرعت همواره به نحوی خواهد بود که سرعت متوسط بدنه اسلاک برابر است. توزیع سرعت در پیشانی و دم اسلاک نیز با یکدیگر شده است. همان طور که مشخص است، توزیع سرعت در پیشانی اسلاک شده است. همان طور که مشخص است، توزیع سرعت در پیشانی اسلاک

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 می شود. ولی در دم اسلاگ، فاز مایع با سرعت کمتری به سمت جلو حرکت می کند. شرط قانون بقای جرم و یکپارچگی اسلاگ ایجاب می کند 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



Fig. 7 Slug front and tail velocity

**شکل 7** سرعت پیشانی و دم اسلاگ



شکل 8 توزیع سرعت در پیشانی و دم اسلاک

(9)

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

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

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

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 8.4m/s بهدست میآید. متوسط سرعت پیشانی اسلاگ در حل حاضر مطابق "شکل 7" مقدار 7.8m/s بهدست میآید. مقایسه نتایج کار حاضر با نتایج حاصل از رابطه (9) نشان میدهد که سرعت بدنه اسلاگ مایع در این مدل سازی به درستی محاسبه شده است.



Fig. 9 Slug front and tail mass balance

**شکل 9** بالانس جرمی بین پیشانی و دم اسلاگ

در "شکل 10" سرعت بدنه اسلاک مایع در هنگام وقوع جریان اسلاک و سرعت فیلم مایع پیشروی اسلاک 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 اسلاک پس از وقوع اسلاک 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 پیشروی اسلاگ که به آن فیلم مایع می گویند، کم میشود. بنابراین سرعت این مقدار از مایع راحت تر افزایش مییابد و با نیرویی که از سمت اسلاگ به آن وارد می گردد شتاب می گیرد.

قبل از وقوع جریان اسلاک 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 اسلاک 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 میشود. اما در فلال این حرکت همواره موجهای تشکیل شده بر روی سطح آب از قبل از وقوع اسلاک نیز در حال حرکت به سمت انتهای کانال میباشند و با پیشروی اسلاک به تدریج مقداری از آنها وارد اسلاک شده و یا مقداری از آنها قبل ار این که اسلاک نیز در حال حرکت به سمت انتهای کانال میباشند و با پیشروی در منحنیهای سرعت و در ادامه در منحنی فشار به دلیل وجود همین امواج در منحنیهای سرعت و در ادامه در منحنی فشار به دلیل وجود همین امواج میباشند که بر روی متغیرهای جریان اسلاک تاثیر می گذارند. این تاثیر به دو صورت مستقیم و غیرمستقیم میباشد. ترکیب این امواج با ستون اسلاک مستقیما بر روی پارامترهای جریان اسلاک تاثیر گذاشته و آنها را دچار نوسان می کند و خروج آنها از انتهای کانال باعث تغییر غیرمستقیم در پارامترهای اسلاک می گردد.

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



Fig. 10 slug liquid body velocity, film velocity and mixture velocity شکل 10 سرعت بدنه اسلاگ مایع، فیلم مایع پیشروی اسلاگ و مخلوط هر دو فاز

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 مییابد. این موضوع به این دلیل است که با خروج پیشانی اسلاگ از انتهای کانال سرعت حرکت اسلاگ اندکی کاهش مییابد. زیرا قبل از خروج پیشانی اسلاگ از انتهای کانال فشار موجود در روبهروی پیشانی اسلاگ منفی میباشد 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 میشود. بنابراین اختلاف فشار دو سر اسلاگ کمتر شده و سرعت حرکت اسلاگ کاهش مییابد. نکته جالب توجه در این شکل این است که شیب برابر سرعت حرکت اسلاگ ثابت است. میشتو این نمودار نشان میدهد که سرعت حرکت اسلاگ ثابت و تغییرات موقعیت مکانی نشان میدهد که سرعت حرکت اسلاگ ثابت و تغییرات موقعیت مکانی اسلاگ خطی است. این موضوع در بررسی بسیاری از محققین دیگر نیز به

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



ig. 12 Slug length

شكل 12 طول اسلاگ

در "شکل 13" نیز موقعیت مرکز اسلاک در زمان وقوع آن بر اساس نتایج آزمایشگاهی و حل عددی ولی و همکارانش آورده شده است [4]. در نتایج آنها نیز تغییرات موقعیت اسلاک با زمان خطی میباشد. این موضوع با نتایج بهدست آمده از "شکلهای 7 و 9" نیز تطابق دارد زیرا شیب تغییرات موقعیت مناطق مختلف اسلاک همان سرعت این مناطق میباشد که طبق "شکلهای 7 و 9" تقریبا 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 به صورت تجربی در یک 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]. همان طور



Fig. 13 Slug length while slug propates [4] شکل 13 طول اسلاگ در زمان وقوع اسلاگ [4]



**شکل 14** فشار ورودی کانال در زمان وقوع اسلاگ

که مشاهده می شود، حداکثر فشاری که در پشت ستون اسلاک ایجاد می گردد در هر دو بررسی با تقریب خوبی با یکدیگر تطابق دارند. در بررسی حاضر فشار پشت اسلاک می توان تا 60mbar و در بررسی انصاری و همکارانش تا 70mbar افزایش یابد. البته در بررسی حاضر فشار بعد از اسلاک در زمان وقوع آن مقداری منفی گزارش شده است اما در بررسی انصاری و همکارانش این مقدار نهایتا به صفر می رسد. البته منفی شدن فشار در جلوی اسلاک 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 بهصورت 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 می گردد. اما مقدار این تنش کم بوده و همواره به صورت تقریباً یکسان به دیوارهها وارد می گردد. البته از آنجایی که مقدار ویسکوزیته دینامیکی هوا از آب در حدود 3 مرتبه کمتر است، لذا علی رغم 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 می شود. با توجه به این که ویسکوزیته آب بهمراتب بالاتر از هوا میباشد، در زمان وقوع جریان اسلاگ مقدار تنش برشی



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



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. 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

می تواند باعث خرابی زودهنگام 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 می تواند 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 ور برخورد با دیواره بالایی کانال در طول کانال حرکت می کند، سرعت بالاتری 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

#### 5- جمع بندی

در این مقاله جریان اسلاگ در داخل یک داکت افقی با استفاده از مدل دوفازی حجم سیال و مدل اغتشاشی k-ɛ RNG در نرمافزار فلوئنت به صورت دو بعدی حل شد.

برای تعیین موقعیت نواحی مختلف اسلاک، سرعت و سایر پارامترهای مهم اسلاک یک برنامه کامپیوتری نوشته شد که در خلال حل جریان توسط نرمافزار فلوئنت پارامترهای مهم اسلاک را محاسبه و آنها را در غالب نمودارهایی از زمان و76قوع اسلاک ترسیم مینماید. در انتها پارامترهای مهم جریان اسلاک از جمله موقعیت مکانی و سرعت پیشانی، دم، مرکز ثقل و مخلوط اسلاک، طول اسلاک، توزیع فشار درون کانال در زمان وقوع اسلاک 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 اسلاک میتوان به

موارد زیر اشاره نمود:

- سرعت اسلاگ (اسلاگ پایدار) از زمان وقوع تا زمان خروج آن از انتهای
   کانال تقریبا ثابت میماند.
  - متوسط سرعت جریان در پیشانی و دم اسلاگ تقریبا 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 می باشد.

 طول اسلاگ به صورت خطی افزایش می یابد. این موضوع به نحوی سرعت ثابت جریان اسلاگ را تأیید می کند.

 شمقدار تنش برشی دیواره بالایی کانال قبل از وقوع اسلاک کمتر از دیواره پایینی بوده، اما در زمان وقوع اسلاک به دلیل افزایش ناگهانی سرعت آب و حرکت آن در تماس با دیواره بالایی، تنش برشی دیواره بالایی بیشتر از دیواره پایینی می گردد. این موضوع با خروج اسلاک از کانال دوباره به حالت قبل باز می گردد.

 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 می تواند 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 می گردد.

 افت فشار دو سر اسلاک در کانالی با ابعاد یاد شده و شرایط مسئله حاضر می تواند تا 60mbar افزایش یابد.

#### 6- فهرست علائم

#### کسر تھی یکی از فازھا

- (m/s²) شتاب جاذبه g
- $(m^2/s^3)$  ترم تولید انرژی جنبشی اغتشاشی  $G_k$ 
  - (m²/s²) انرژی جنبشی اغتشاشی (k
    - P فشار (Pa)
    - Re عدد بیبعد رینولدز
    - S اندازه نرخ کرنش (1/s)
      - t زمان (s)
- u سرعت افقی یا به صورت کلی سرعت (m/s)

#### علائم يونانى

- a معکوس عدد پرانتل مؤثر 🛛
- $(m^2/s^3)$  نرخ تلفات انرژی جنبشی اغتشاشی (m²/s³)
  - μ ویسکوزیته دینامیکی (kg/m·s)
    - ρ چگالی (kg/m<sup>3</sup>)
    - *τ* تنش برشی (Pa)

#### زيرنويسها

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

357

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 نفارسی)
- [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.

- 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 twophase 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 فارسي)
- [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*