مجله مهندسی مکانیک مدرس، آبان 1395، دوره 16، شماره 8، ص‌ص 315-325

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

ارزیابی نحوه عملکرد و تعیین بهترین مدل اغتشاشی در مدل‌سازی جریان اسلاگ

محمدرضا انصاری[1*]، مصطفی زین‌العابدینی[2]

1- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت‌مدرس، تهران
2- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت‌مدرس، تهران
*تهران، صندوق‌پستی 14115-143، mra_1330@modares.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 19 خرداد 1395
پذیرش: 09 تیر 1395
ارائه در سایت: 07 شهریور 1395

کلید واژگان:
اسلاگ
اغتشاشات
گردابه
شبیه‌سازی
مدل دو فازی حجم سیال

چکیده

تاکنون مدل‌سازی‌های بسیاری بر جریان اسلاگ انجام شده، ولی در اغلب آن‌ها از مدل جریان آرام که تقریباً فرض غیرفیزیکی است، برای حل جریان اسلاگ استفاده شده است. در معدود بررسی‌های انجام شده با مدل‌های جریان مغشوش نیز، به میزان تناسب مدل اغتشاشی انتخابی و رژیم جریان اسلاگ اشاره‌ای نشده است. رژیم اسلاگ جریانی برشی است که جریان در قسمت‌هایی از آن دچار چرخش و کرنش زیاد می‌شود. در این تحقیق ابتدا وجه تمایز مدل‌های اغتشاشی، فرضیات اولیه جهت استخراج مدل، مزایا، معایب و سایر مشخصات مهم مدل‌های اغتشاشی رایج بررسی شده و سپس میزان تطابق آن‌ها با جریان اسلاگ تحلیل شده است. در مرحله بعد پس از انجام شبیه‌سازی‌های گوناگون با استفاده از نرم‌افزار فلوئنت و مقایسه نتایج مدل‌های مختلف با یکدیگر و همچنین مقایسه آن‌ها با نتایج آزمایشگاهی بهترین و سازگارترین مدل اغتشاشی با رژیم جریان اسلاگ معرفی شده است. در این رابطه مدل اغتشاشی RNG k-ε به‌عنوان سازگارترین مدل اغتشاشی که می‌تواند برای مدل‌سازی اغتشاشات در جریان اسلاگ در کنار تمام مدل‌های جریان دوفازی به کار برده شود تعیین شد. در انتها مشخصات مختلف جریان اسلاگ مانند توزیع فشار در زمان وقوع اسلاگ، سرعت مخلوط اسلاگ، زمان و مکان وقوع اسلاگ با مدل اغتشاشی RNG محاسبه و ارائه شد.

Evaluation and selection of the most consistent turbulent model with the slug flow behavior

Mohammad Reza Ansari*, Mostafa Zeynalabedini

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 08 June 2016
Accepted 29 June 2016
Available Online 28 August 2016

Keywords:
Slu
Turbulence
Vortex
Simulation
VOF

ABSTRACT

Many models have been applied to slug flow using laminar flow condition. The results obtained from these models are not consistent with the physical behavior of slug flow. Furthermore, discussion on the turbulent models is very rare or not related to such flow regime. The slug regime is a complicated regime with shear flow and high strain in addition to some vorticity at some sections of the flow.

In the present attempt, in the first stage, the turbulent models differences, the initial assumptions to drive, privilages and shortcomings have been considered with details. Then, its consistency with the physics of slug flow was analysed with high accuracy. In the second stage, simulations using different turbulent models were conducted. The obtained results were compared to each other and with the experimental results of other investigators. Finally, the most consistent model with the physics of the slug flow was selected. The turbulent model of RNG k-ε showed more reliabilitycompared to other turbulent models. Thus, it was selected and used to obtain slug flow behavior with higher accuracy. The parameters as pressure distribution during slugging, slug mixture velocity, slug initiation time and position from the duct inlet with RNG model were conducted and presented with detailed explanations.

1- مقدمه

جریان اسلاگ از مهم‌ترین جریان‌های ایجادشده به سبب ناپایداری‌های هیدرودینامیکی در خطوط انتقال جریان‌های دوفازی است که به صورت گسترده در خطوط انتقال نفت و گاز، سیستم‌های انتقال آب و نیروگاه‌های حرارتی و هسته‌ای، 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.

جریان اسلاگ در اثر رشد طبیعی ناپایداری‌های هیدرودینامیکی تولید می‌شود. این رژیم جریان در اثر ایجاد یک اغتشاش کوچک تصادفی با طول موج کوتاه به وجود می‌آید. این اغتشاش کم‌کم رشد کرده تا جایی که در نهایت مقطع کانال را پل زده و اسلاگ با طول موج بلند را تشکیل می‌دهد. انصاری [1] به بررسی تجربی جریان اسلاگ در داخل یک کانال مستطیلی با سطح مقطع 10×5 سانتی‌متر و طول 8 متر پرداخت. او نتیجه گرفت که یک

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:
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)

Archive of SID
www.SID.ir

واحد اسلاگ از سه ناحیه مختلف تشکیل شده است. در ناحیه نخست سطح مشترک دو فاز به دلیل جریان پرسرعت گاز به میزان ناچیزی به سمت پایین منحرف می‌شود. در ناحیه دوم ناپایداری‌هایی با طول موج کوتاه شکل می‌گیرند. سپس یکی از این امواج کوچک در ناحیه سوم رشد کرده و سرانجام با رسیدن مایع به دیواره بالایی کانال، مقطع کانال پل زده شده و اسلاگ تشکیل می‌شود.

در این لحظه سرعت فاز گاز به میزان اندکی کاهش می‌یابد، ولی پس از اندک زمانی که فشار در پشت ستون مایع به دلیل کاهش سرعت فاز گاز افزایش یافت، مجموع نیروهای فشاری و مومنتم سیال گازی، به اندازه‌ای می‌رسد که ستون مایع اسلاگ را به شدت و با سرعتی بین سرعت دو فاز به جلو می‌راند.

از بین نواحی مختلف جریان اسلاگ، مشخصات هیدرودینامیکی ناحیه پیشانی از همه پیچیده‌تر است. رژیم اسلاگ همواره با یک ناحیه اختلاطی شدید در ابتدای خود همراه است. در ناحیه اختلاطی، پیشانی اسلاگ با سرعت بالا به فیلم مایع با سرعت پایین حمله‌ور شده و با شتاب دادن به آن، با خود همراه می‌کند. این فرآیند سبب ایجاد یک گردابه در ورودی اسلاگ می‌شود. به این ناحیه، ناحیه اختلاطی یا هوازایی می‌گویند. در شکل 1 شماتیکی از مناطق مختلف یک اسلاگ نشان داده شده است. طول ناحیه اختلاطی در پیشانی اسلاگ با پیشروی اسلاگ افزایش می‌یابد. در ناحیه اختلاطی نوسانات شدید و نامتقارنی در پارامترهای میدان جریان مانند فشار و تنش برشی وجود دارد [2].

شپر و همکاران [3] با استفاده از نرم‌افزار فلوئنت، رژیم‌های مختلف جریان دو فازی در کانال افقی را به صورت سه‌بعدی و با فرض جریان آرام به روش حجم سیال شبیه‌سازی کردند و رژیم‌های مختلف دوفازی را به‌دست آوردند. نتایج آن‌ها دقت قابل قبولی برای رژیم اسلاگ نداشت. فرض اولیه آن‌ها یعنی جریان آرام، برای جریان‌هایی چون اسلاگ فرض درستی نبود.

هوهن [4] با مطالعه تجربی جریان اسلاگ در کانالی مستطیلی به طول 8 متر و سطح مقطع $3\times10\ cm^2$ زمان و مکان آغاز اسلاگ را به‌دست آورد. او با استفاده از نرم‌افزار انسیس سی‌اف‌ایکس[1]، جریان اسلاگ را به کمک مدل دو فازی اولری-اولری[2] و مدل اغتشاشی دو معادله‌ای k-ω به همراه روابط میراکننده اغتشاشات در سطح مشترک به‌صورت عددی شبیه‌سازی کرد. مقیاس طولی شبکه مورد استفاده توسط هوهن 1 میلی‌متر بوده، که برای استفاده از مدل k-ω در نزدیکی دیواره مقدار زیادی است. در نتایج کار او حدود 1 متر بین مکان وقوع اسلاگ در آزمایش و شبیه‌سازی عددی اختلاف مشاهده می‌شد. اختلاف سرعتی که او برای دو فاز برگزیده بود حتی شرط ناپایداری کلوین- هلمهولتز را نیز برای وقوع اسلاگ ارضا نمی‌کند. فواصل زمانی مورد استفاده در شبیه‌سازی او سبب ایجاد عدد کورانتی بیش از عدد کورانت مجاز در حل سه‌بعدی (0.125) می‌شود.

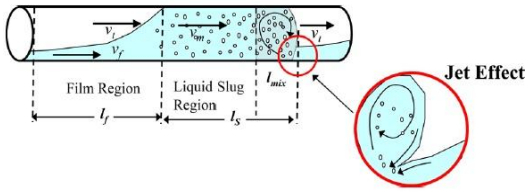

Fig. 1 Mixing regin initiation at slug front [2]

شکل 1 تشکیل ناحیه اختلاطی در پیشانی اسلاگ [2]

[1] ANSYS CFX
[2] Eulerian-Eulerian

ولی و همکاران [5] 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. طول کانال مورد بررسی در حل عددی آن‌ها 4 متر بود. آن‌ها نیز مانند هوهن از مدل دو فازی اولری-اولری، و برای مدل‌سازی اغتشاشات جریان از مدل اغتشاشی SST k-ω[3] استفاده کردند. مقیاس طولی شبکه محاسباتی مورد استفاده آن‌ها در حدود 4 میلی‌متر بود که این مقدار نیز برای استفاده از مدل اغتشاشی SST k-ω در نزدیکی دیواره عدد بسیار بزرگی است. آن‌ها تنها از مدل k-ε موجود در مدل SST k-ω استفاده کرده‌اند، همچنین ایرادات وارده به کار هوهن به کار ولی و همکارانش نیز وارد است.

ما و همکارانش [6] با کدنویسی یک مدل ترکیبی از مدل اولری-اولری و مدل سطح معیار[4] برای جریان حبابی و یک زیرمدل برای تخمین نفوذ ذرات حباب به داخل مایع، جریان پرش هیدرولیکی[5] را به صورت سه‌بعدی با دو مدل اغتشاشی RANS[6] و DES[7] حل کردندو دریافتند که نتایج حاصل از حل جریان با مدل DES به دلیل توانایی این مدل در حل ساختارهای اغتشاشی قوی بر سطح آزاد که سبب نفوذ حباب‌ها به داخل مایع می‌شود، دقیق‌تر از مدل RANS و نتایج مدل RANS هموارتر است (بسیاری از ساختارهای اغتشاشی را متوسط‌گیری کرده و به صورت هموار نشان می‌دهد).

لاخال [7] با استفاده از دیدگاه LEIS[8] و روش حجم سیال[9] 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، ولی اندازه سلول‌های شبکه محاسباتی در کار او بسیار بزرگ (مقیاس طولی سلول‌ها بیش از 5 میلی‌متر) بود. به طوری که این ابعاد برای حل جریان اسلاگ با روش حجم سیال و شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ[10] و آن هم در سه بعد کافی نبوده است.

انصاری و همکارانش [8] نیز جریان اسلاگ در یک کانال افقی با سطح مقطع مستطیلی را با استفاده از روش حجم سیال به همراه مدل اغتشاشی SST k-ω به صورت سه‌بعدی در نرم‌افزار اپن‌فوم[11] شبیه‌سازی کردند. نتایج کار آن‌ها با نتایج آزمایشگاهی تطابق داشت و طول اسلاگ را به درستی تخمین می‌زد، ولی در محاسبه مکان اسلاگ 22% خطا داشت. ایشان در بررسی خود اندازه شبکه مورد نیاز برای استخراج حل مستقل از شبکه را به دست آوردند، ولی ابعاد شبکه آن‌ها نیز برای استفاده از تمام امکانات مدل SST k-ω بسیار بزرگ بود؛ بنابراین آن‌ها نیز تنها از مدل k-ε موجود در مدل SST k-ω استفاده می‌کردند. آن‌ها حداقل عدد کورانت مورد نیاز برای حل جریان سه‌بعدی را 1/4 در نظر گرفتند و فواصل زمانی خود را براساس آن تنظیم کردند. در حالی که حداکثر عدد کورانت مورد نظر برای جریان‌های سه‌بعدی 1/8 است [9].

گاوو و همکارانش [10] به صورت تجربی به بررسی جریان لایه‌ای افقی درون لوله پرداختند. آن‌ها از مدل دوفازی حجم سیال و مدل اغتشاشی RNG k-ε[12] استفاده و میزان افت فشار، سرعت لغزشی، کسر تهی هر یک از

[3] Shear Stress Transport k-ω
[4] Level-Set
[5] جریان پرش هیدرولیکی تا حد زیادی مشابه جریان اسلاگ است.
[6] Reynolds-averaged Navier-Stockes
[7] Detached Eddy Simulation
[8] Large Eddy Interface Simulation
[9] Volume Of Fluid (VOF)
[10] Large Eddy Simulation
[11] Open foam
[12] ReNormalization Group k-ε

www.SID.ir
Archive of SID

دو فاز و سرعت محوری را به‌عنوان نتایج خروجی خود ارائه کردند. نتایج کار تطابق خوبی با نتایج آزمایشگاهی داشت.

رضوی و نمین [11] نیز به صورت عددی به بررسی جریان اسلاگ درون کانال افقی به صورت دوبعدی پرداختند. آن‌ها در مدل‌سازی خود از مدل k-ε تحقق‌پذیر[1] استفاده کردند و نتایج کار خود را با نتایج تجربی و عددی هوهن [4] مطابقت دادند.

تاکنون مطالعات بسیاری در زمینه‌های تجربی، سینماتیکی و مدل‌سازی‌های دینامیکی جریان اسلاگ انجام شده، ولی همچنان جنبه‌های بسیاری از این پدیده ناشناخته باقی است. یکی از این جنبه‌ها تحلیل فرآیند اغتشاشات در این رژیم جریان است، که به شدت بر الگوی جریان و همچنین مشخصات آن تأثیر می‌گذارد. در اغلب بررسی‌های انجام‌شده بر جریان اسلاگ از مدل جریان آرام و در اندک بررسی‌هایی که در آن‌ها از مدل‌های اغتشاشی استفاده شده است، هیچ توضیحی درباره دلیل انتخاب مدل اغتشاشی و تناسب یا عدم تناسب آن با ماهیت جریان اسلاگ ارائه نشده است. در برخی موارد از مدل‌های اغتشاشی استفاده شده است که ماهیت آن‌ها با رژیم اسلاگ کاملاً ناسازگار است (مانند مدل k-ω)؛ بنابراین در این مقاله سعی بر آن است تا نحوه کارکرد مدل‌های اغتشاشی، میزان تطابق فرضیات مورد نیاز برای استخراج آن مدل‌های اغتشاشی با فرضیات مدل جریان دوفازی حجم سیال و همچنین ماهیت جریان اسلاگ به طور جامع بررسی شده و با انجام شبیه‌سازی‌های مختلف با مدل‌های اغتشاشی منتخب به کمک نرم‌افزار فلوئنت[2]، بهترین و سازگارترین مدل اغتشاشی برای این رژیم جریان انتخاب شود.

2- مشخصات هندسی و عددی مساله

2-1- مشخصات هندسی و فیزیکی

- طول کانال: 6 متر
- ارتفاع کانال: 10 سانتی‌متر
- ابعاد صفحه جداکننده فازها در ورودی: مستطیلی به طول 50 سانتی‌متر و عرض 2 میلی‌متر
- 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 (از آن‌جایی که کسر حجمی هر یک از دو فاز در ورودی 0.5 است، سرعت واقعی دو برابر مقادیر بیان شده است).

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 اعمال‌شده بر دیواره‌ها نیز شرط عدم لغزش است. در تمام مدل‌های اغتشاشی از توابع دیواره (تابع دیواره استاندارد) برای حل جریان در نواحی نزدیک دیواره استفاده می‌شود.

[1] Realizable
[2] FLUENT

- با توجه به سرعت هر یک از دو فاز و مشخصات هندسی کانال مورد نظر عدد رینولدز هر یک از دو فاز به صورت روابط (2,1) محاسبه می‌شود.

$$\mathrm{Re}_{\mathrm{water}} = \frac{\rho u D_h}{\mu} = \frac{998.2 \times 1 \times 0.1}{0.001003} = 99521.436 \quad (1)$$

$$\mathrm{Re}_{\mathrm{air}} = \frac{\rho u D_h}{\mu} = \frac{1.225 \times 13 \times 0.1}{0.000017894} = 88996.312 \quad (2)$$

در روابط بالا D_h قطر هیدرولیکی کانال بوده که در یک کانال دو بعدی به صورت رابطه (3) به‌دست می‌آید.

$$D_h = \lim_{b\to\infty}\left(\frac{4A}{P}\right) = \lim_{b\to\infty}\left(\frac{4(b+H)}{2(b+H)}\right) = 2H = 2 \times 0.05 = 0.1\ (m) \quad (3)$$

در رابطه (3) ترم P محیط و A مساحت تر شده توسط سیال است.

- شدت اغتشاشات ورودی در ورودی با توجه به عدد رینولدز و به کمک رابطه (4) محاسبه می‌شود که این مقدار 4% در نظر گرفته می‌شود [13].

$$I = 0.16\mathrm{Re}^{-\frac{1}{8}} \quad (4)$$

در شکل 2 شماتیکی از مساله مورد نظر نشان داده شده است.

2-3- مشخصات حلگر

- الگوریتم مورد استفاده برای حل معادلات گسسته‌شده پیوستگی جرم و مومنتم: فاز کوپل SIMPLE[3]
- مدل دوفازی مورد استفاده: حجم سیال
- روش گسسته‌سازی زمانی: ضمنی درجه یک[4]
- گسسته‌سازی و کوپلینگ معادله مومنتم و فشار: PRESTO![5]
- فواصل زمانی: به صورت متغیر (تطبیق‌پذیر[6]) به نحوی که همواره عدد کورانت در تمام جریان کمتر از عدد کورانت مجاز جریان دوبعدی یعنی 0.25 باشد.
- روش گسسته‌سازی مومنتم: درجه دو پیش‌رو[7]
- روش گسسته‌سازی کسر حجمی: بازسازی هندسی[8]

فواصل زمانی در این مساله به صورت متغییر براساس حفظ عدد کورانت عمومی در کل دامنه حل به مقدار کمتر از 0.24 (حداکثر عدد کورانت در حل دو بعدی 0.25 است) بین مقادیر 10^{-6} تا 10^{-3} انتخاب شده است. مدت زمان حل مساله برای 2 ثانیه با پردازش موازی بر رایانه 8 هسته‌ایی به سرعت 3GHz، به مدت 20 ساعت است.

2-4- تعیین ابعاد شبکه محاسباتی

در ابتدا استقلال حل از شبکه محاسباتی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. در این

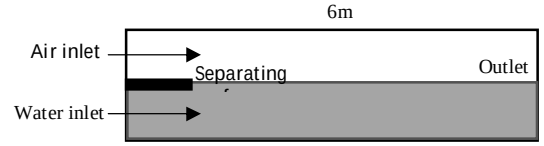

Fig. 2 channel schematic for slug modeling

شکل 2 شماتیک کانال مورد نظر برای تولید جریان اسلاگ

[3] Phase Coupled Semi Implicit Method for Pressure Linked Equations
[4] First Order Implicit
[5] Pressure Staggered Option
[6] Adaptive
[7] Second order upwind
[8] GeoConstruct

Archive of SID

www.SID.ir

خصوص 4 شبکه محاسباتی با تعداد 50480، 74520، 94560 و 122600 سلول به نحوی ساخته شد، که ابعاد سلول‌های آن برحسب میلی‌متر به ترتیب $\Delta x\times\Delta y$=5×2.5، $\Delta x\times\Delta y$=4×2، $\Delta x\times\Delta y$=3×1.5 و $\Delta x\times\Delta y$=2×1 باشد. در این تقسیم‌بندی نسبت منظری[1] 2 برای تمام شبکه‌ها در نظر گرفته شده است. در این تقسیم‌بندی Δx طول سلول در راستای طول کانال و Δy ارتفاع سلول در راستای ارتفاع کانال است. در شکل 3 پروفیل جریان در زمان تشکیل اسلاگ در این 4 شبکه نشان شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، شبکه‌ای که ابعاد سلول‌های آن $\Delta x\times\Delta y$=3×1.5 میلی‌متر است نتایج مستقلی ارائه می‌کند.

همان‌طور که مشخص است جریان اسلاگ در این حالت و با استفاده از مدل جریان آرام در فاصله 2 متر از ابتدای کانال و در زمان 0.5 ثانیه اتفاق می‌افتد. در شکل 4 نیز سرعت مخلوط اسلاگ در زمان وقوع آن در هر 4 شبکه با یکدیگر مقایسه شده است.

در شکل 5 نتایج آزمایش هوهن بر جریان اسلاگ آورده شده است.

Fig. 3 Mesh independency of slug regime in channel flow with k-ε RNG turbulent model

شکل 3 بررسی استقلال حل از شبکه در جریان اسلاگ درون کانال با استفاده از مدل اغتشاشی k-ε RNG

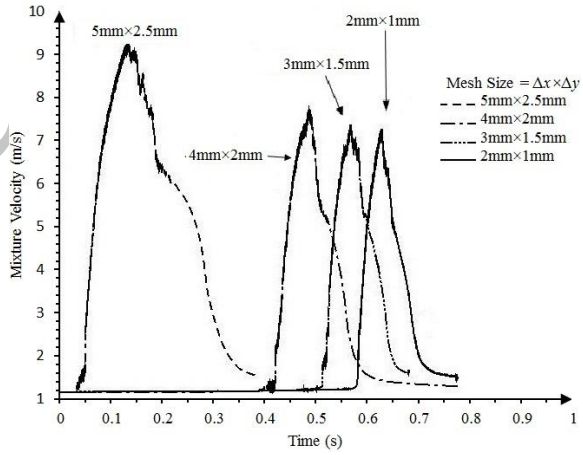

Fig. 4 Slug mixture velocity comparison at different mesh

شکل 4 مقایسه سرعت مخلوط اسلاگ در 4 شبکه محاسباتی مختلف

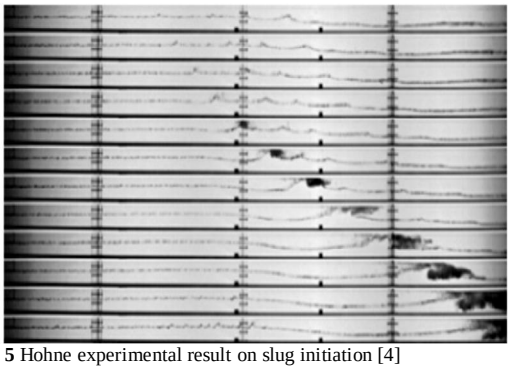

Fig. 5 Hohne experimental result on slug initiation [4]

شکل 5 نتایج بررسی آزمایشگاهی هوهن بر جریان اسلاگ [4]

همان‌طور که مشاهده می‌شود پروفیل جریان در زمان پل‌زدن کانال (وقوع اسلاگ) که از نتایج حل عددی جهت تعیین شبکه مناسب برای استخراج حل مستقل از شبکه به‌دست آمده است، هماهنگی خوبی با پروفیل جریان اسلاگ در نتایج آزمایشگاهی هوهن دارد. در آزمایش هوهن اسلاگ در مکان 2 متری از ورودی کانال اتفاق افتاده است [4] و در حل عددی حاضر برای استخراج حل مستقل از شبکه، اسلاگ در حدود 2-2.5 متر از ورودی کانال اتفاق می‌افتد که این موضوع می‌تواند دلیلی بر هماهنگی حل حاضر جهت تعیین شبکه مناسب و آزمایش هوهن باشد.

3- معادلات جریان

3-1- معادلات مدل جریان دو فازی حجم سیال

معادلات مورد استفاده برای مدل‌سازی دو بعدی جریان اسلاگ هم‌دما با مدل حجم سیال به صورت روابط (5-7) بیان می شود [12].

$$\frac{\partial \rho_m}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_m \cdot V_m) = 0 \quad (5)$$

$$\frac{\partial (\rho_m \cdot V_m)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_m \cdot V_m \cdot V_m) = -\nabla \cdot P_m + \nabla \cdot \tau_m + \rho_m \cdot g \quad (6)$$

$$\frac{\partial \mathrm{f}}{\partial \mathrm{t}} + \nabla \cdot (f \cdot V_m) = 0 \quad (7)$$

روابط بالا به ترتیب قانون پیوستگی جرم، مومنتم و معادله انتقال سطح مشترک است. این روش برای سیال‌های تراکم‌ناپذیر فرمول‌بندی شده و باید این فرض با مشخصات مساله سازگار باشد تا بتوان به درستی از این روش استفاده کرد. 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 (9,8) محاسبه می‌شوند.

$$\rho_m = f\rho_1 + (1-f)\rho_2 \quad (8)$$

$$\mu_m = f\mu_1 + (1-f)\mu_2 \quad (9)$$

3-2- مدل‌سازی اغتشاشات جریان

همان‌طور که از اعداد رینولدز مشخص است جریان هر دو فاز کاملاً مغشوش بوده و نتایج مربوط به حل جریان با مدل جریان آرام قابل قبول نخواهد بود. جریان اسلاگ در اثر رشد یک ناپایداری کوچک (اغتشاش) ایجاد می‌شود و برای مدل‌سازی دقیق جریان اسلاگ باید از یک مدل اغتشاشی در کنار مدل‌های دوفازی استفاده کرد.

به صورت کلی جریان اسلاگ زمانی اتفاق می‌افتد که نیروی ناشی از تغییرات مومنتم سیال[2] بتواند بر مجموع نیروهای ناشی از وزن، لزجت و فشار موجود بر سیال غلبه کند. 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. نیروهای مقاوم، در مقابل عامل ایجادکننده اسلاگ یعنی تغییرات مومنتم، در جریان‌های مغشوش افزایش می‌یابد. در نتیجه در صورت استفاده از مدل‌های اغتشاشی برای مدل‌سازی اسلاگ، اسلاگ در زمان دیرتر و مکان دورتری نسبت به مدل‌سازی جریان اسلاگ با مدل جریان آرام اتفاق می‌افتد.

انتخاب مدل اغتشاشی مناسب در این جریان می‌تواند تأثیر به سزایی بر دقت نتایج حل داشته باشد. از مهم‌ترین و پرکاربردترین مدل‌های اغتشاشی که می‌توان از آن‌ها در کنار مدل‌های مهم جریان دوفازی مانند حجم سیال،

[1] Aspect ratio

[2] Momentum change

Archive of SID
www.SID.ir

مخلوطی[1] و اولری- اولری استفاده کرد، می‌توان به مدل‌های زیر اشاره کرد.

- مدل‌های خانواده k-ε (استاندارد، RNG و تحقق پذیر)
- مدل‌های خانواده k-ω (استاندارد، BSL[2]، SST)
- مدل‌های تنش رینولدزی با مدل‌سازی خطی و درجه دو ترم کرنش فشاری

از معروف‌ترین مدل‌های جریان اغتشاشی در مسائل دینامیک سیالات محاسباتی که به‌عنوان یک مدل استاندارد، کم هزینه و پرکاربرد در صنعت شناخته شده است، مدل‌های خانواده k-ε است. این مدل‌ها، مدل‌هایی دو معادله‌ای هستند که از دقت و پایداری خوبی برای اهداف مدل‌سازی‌های عمومی برخوردارند. در این مدل‌ها فرض بر آن است که جریان به شدت مغشوش بوده و اثر لزجت گردابه‌ای به لزجت مولکولی غالب است.

از مزایای این مدل‌ها می‌توان به سادگی، پایداری، همگرایی راحت، حساسیت کم آن نسبت به مشخصات جریان آزاد مانند شدت اغتشاشات، هزینه محاسباتی پایین و نتایج قابل قبول برای گستره وسیعی از جریان‌ها اشاره کرد.

از مهم‌ترین نقاط ضعف مدل‌های k-ε در نحوه مدل‌کردن معادله نرخ تلفات اغتشاشی است. ترم‌های چشمه در معادله نرخ تلفات اغتشاشی به لحاظ عددی پیچیده[3] است. این مدل میزان تنش‌های رینولدزی را برابر یکدیگر محاسبه می‌کند که معمولاً درست نیست. سختی حل و دقیق نبودن معادله انتقال ترم تلفات اغتشاشی (ε) و افزایش آن در نزدیکی مرزهای جامد از دیگر مشکلات این مدل است. مقدار انرژی جنبشی اغتشاشی[4] (k) در نزدیکی دیواره به سمت صفر میل می‌کند که شبیه‌سازی در نزدیکی دیواره به وسیله شبکه موجود ممکن نخواهد شد و برای غلبه بر آن باید از توابع دیواره و یا توابع میراکننده استفاده کرد [13].

استفاده از این مدل‌ها در جریان‌هایی که شامل جدایش لایه مرزی هستند، جریان روی سطوح انحنادار، غیرتعادلی، با گرادیان فشار زیاد و یا چرخشی و دورانی توصیه نمی‌شود. اغلب مدل‌های k-ε ماهیت پخشی[5] دارند. از مدل k-ε می‌توان در جریان‌هایی که از پیش به شدت مغشوش است مانند جریان لایه برشی آزاد[6]، لایه مرزی، لایه اختلاطی، جریان جت استفاده کرد.

جریان اسلاگ یک جریان لایه برشی است و شامل هیچ یک از مواردی که به‌عنوان نقاط ضعف این خانواده از مدل‌های اغتشاشی در بالا به آنها اشاره شد نیست (اثرات آن‌ها در رژیم اسلاگ کم است)؛ بنابراین این مدل‌های اغتشاشی برای مدل‌سازی جریان اسلاگ مناسب هستند.

مدل‌های خانواده k-ω برای جریان‌های با اعداد رینولدز پایین طراحی شده‌اند، در حالی که در جریان اسلاگ، جریان در بیشتر دامنه محاسباتی دارای اعداد رینولدز بالایی است. ضخامت لایه مرزی با توجه به نوع دیواره‌ها و عدد رینولدز بسیار کم بوده و تأثیر لایه مرزی دیواره بر جریان اسلاگ بسیار ناچیز است. مدل‌های ترکیبی در مقابل ارائه نتایجی مشابه نتایج مدل‌های k-ε، هزینه محاسباتی را 20% افزایش می‌دهند [13].

اگر محدوده لایه مرزی دیواره توسط سلول‌های محاسباتی پوشش داده نشود، استفاده از مدل‌هایی که در نزدیکی دیوار جامد از مدل k-ω استاندارد استفاده می‌کنند (مانند مدل‌های SST و BSL که در نزدیکی دیواره از مدل k-ω و در نواحی خارج از لایه مرزی از مدل k-ε استفاده می‌کنند)، نه تنها سبب افزایش دقت نمی‌شود، بلکه با محاسبه نادرست مقادیر اغتشاشی در نزدیکی دیواره باعث ایجاد خطا نیز می‌شوند. البته این موضوع دلیلی برای ریزتر کردن شبکه محاسباتی نیست، زیرا در آن صورت هزینه محاسباتی به شدت افزایش می‌یابد.

جهت استفاده از مدل‌های k-ω (یا مدل‌های ترکیبی SST و BSL) برای حل جریان اسلاگ باید مقدار y^+ هر دو دیواره حدود 1 باشد. جهت تعیین ارتفاع نخستین سلول محاسباتی در مجاورت دیواره برای ایجاد y^+=1 در جریان داخل کانال می‌توان از روابط تقریبی (11,10) استفاده کرد [13].

$$C_f \approx 0.078 \mathrm{Re}_n^{-\frac{1}{4}} \tag{10}$$

$$u^* = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}} = U_\infty \sqrt{\frac{C_f}{2}} \rightarrow y^+ = \frac{y_{\mathrm{node}} \cdot u^*}{\upsilon} \rightarrow y_{\mathrm{node}} = \frac{y^+ \cdot \upsilon}{u^*}$$

$$y_{\mathrm{node}} = 5.06 d_h \cdot y^+ \cdot \mathrm{Re}^{-\frac{7}{8}} \tag{11}$$

رابطه (10) ضریب اصطکاک درون یک کانال را محاسبه کرده و رابطه (11) نیز روابط بی‌بعدکننده ارتفاع از سطح جامد و سرعت درون زیرلایه لزج هستند. به کمک روابط بالا ارتفاع نخستین سلول محاسباتی در مجاورت دیواره بالایی 0.0246 میلی‌متر و در مجاورت دیواره پایینی 0.0214 میلی‌متر به‌دست می‌آید. برای کارکرد مناسب مدل‌های اغتشاشی اعداد رینولدز پایین باید حداقل 15 نقطه در داخل لایه مرزی در راستای عمود بر دیواره وجود داشته باشد. استفاده از این مقادیر به‌عنوان ارتفاع سلول‌های نزدیک دیواره هر چند که با ضریب رشدی منطقی در حدود 1.1-1.2 همراه شود، باز هم تعداد بسیار زیادی سلول ایجاد خواهد کرد، که حل را با مشکل جدی هزینه محاسباتی مواجه می‌کند؛ بنابراین استفاده از مدل‌های اعداد رینولدز پایین و مدل‌های ترکیبی در این جریان به هیچ وجه توجیه‌پذیر نیست.

مشخصه مدل تنش رینولدزی نیز وسعت کاربرد و جریمه این انعطاف‌پذیری، پیچیدگی ساختار محاسبات ریاضی روابط آن است. این مدل به دلیل وابستگی شدید معادلات به یکدیگر به لحاظ عددی بسیار پیچیده بوده و مانند مدل k-ε از مشکلات مربوط به نواحی نزدیک به دیواره رنج می‌برد. افزایش تعداد معادلات انتقال سبب کاهش پایداری عددی[7]، همگرایی سخت‌تر (علاوه‌بر مشکلات در همگرایی، نیاز به فواصل زمانی کوچک‌تری نسبت به سایر مدل‌ها دارند)، سخت کوپل‌شدن معادله پیوستگی با معادلات اغتشاشی و افزایش هزینه محاسباتی شده (هم به لحاظ قدرت پردازش و هم حافظه جانبی[8]) و کاربرد این مدل را در جریان‌های پیچیده تا حدودی محدود می‌کند [13].

این مدل برای جریان‌های پیچیده سه بعدی با انحنای زیاد در خطوط جریان، جریان‌های شامل چرخش و دوران، با تغییرات شدید و ناگهانی در متوسط نرخ کرنش، ثانویه، تحت تأثیر نیروهای گرانشی، با اغتشاشات ناهمسان و به صورت کلی جریان‌های با شدت اغتشاشات بسیار بالا مناسب است. با توجه به مشخصات جریان اسلاگ که شامل هیچ یک از موارد بالا نیست نیاز به استفاده از این مدل نبوده و امکان دارد استفاده از آن سبب افزایش چند برابری هزینه محاسباتی و مشکلات مربوط به همگرایی شود.

مدل‌های خانواده k-ε، که برای جریان‌های با اعداد رینولدز بالا طراحی شده‌اند، سازگارترین مدل اغتشاشی با جریان اسلاگ، برای مدل‌سازی آن می‌باشند.

[1] Mixture
[2] Baseline k-ω
[3] Stiff
[4] Turbulence Kinematic Energy
[5] Diffusive
[6] Free shear layer
[7] Numerical Robustness
[8] CPU Time and RAM

Archive of SID

www.SID.ir

مدل‌های خانواده k-ε شامل سه مدل اصلی است. در هر سه مدل دو معادله انتقال برای انرژی جنبشی اغتشاشی (k) که معیاری از نوسانات سرعت و ε که معرف نرخ اتلاف نوسانات سرعت است نوشته می‌شود. تفاوت اصلی این سه مدل با یکدیگر در روش محاسبه لزجت گردابه‌ای، عدد پرانتل اغتشاشی که میزان پخش[1] k و ε را کنترل می‌کنند و ترم‌های تولید و اتلاف در معادله انتقال ε است.

برای محاسبه مقدار y^+ شبکه مورد استفاده جهت تعیین تابع دیواره مناسب می‌توان از روابط (10) و (11) استفاده کرد.

مقدار $y+$ نخستین سلول محاسباتی در مجاورت دیواره در این شبکه در حدود 90 است که نشان می‌دهد نخستین سلول محاسباتی در نزدیکی دیواره حتماً بیرون از زیرلایه لزج و بافر قرار دارد. می‌توان با اطمینان از تابع دیواره استاندارد برای مدل‌سازی جریان در کنار دیواره در مدل‌های برپایه معادله ε استفاده کرد.

3-2-1- مدل **k-ε** استاندارد

معادلات انتقال k و ε در این مدل، با فرض تراکم‌ناپذیری و ثابت‌بودن دما به صورت روابط (13,12) آورده شده‌اند [12].

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t}+\frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i}\varepsilon = \frac{\partial}{\partial x_i}\left[(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_k})\frac{\partial k}{\partial x_i}\right]+G_k-\rho\varepsilon \quad (12)$$

$$\frac{\partial(\rho\varepsilon)}{\partial t}+\frac{\partial(\rho\varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i}\left[\left(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}\right)\frac{\partial\varepsilon}{\partial x_i}\right]+C_{1\varepsilon}\frac{\varepsilon}{k}G_k-\rho C_{2\varepsilon}\frac{\varepsilon^2}{k}$$
$$G_{1\varepsilon}=1.44,\qquad G_{2\varepsilon}=1.92 \quad (13)$$

درجه تأثیرپذیری ε از نیروهای شناوری با کمیت $C_{3\varepsilon}$ کنترل می‌شود که از رابطه (14) محاسبه می‌شود.

$$C_{3\epsilon}=\tanh\left|\frac{v}{u}\right| \quad (14)$$

مقدار $C_{3\varepsilon}$ در لایه‌های برشی تحت نیروی گرانشی، که در آن جریان اصلی و بردار گرانش هم‌جهت هستند 1 و در صورت عمود بودن جریان اصلی بر بردار گرانش صفر است. این ترم در مواقعی که فرآیندهای جهتی در جریان اهمیت پیدا می‌کنند، تأثیرگذار خواهد بود.

ترم G_k که معرف تولید k به دلیل وجود نیروهای لزجی است، در هر سه مدل k-ε به صورت $G_k=-\rho\overline{\acute{u}_i\acute{u}_j}\frac{\partial u_j}{\partial x_i}$ تعریف می‌شود و با استفاده از تئوری بوزینسک به صورت رابطه (15) محاسبه می‌شود.

$$G_k=-\rho\overline{\acute{u}_i\acute{u}_j}\frac{\partial u_j}{\partial x_i}= \left(\mu_t\left[\frac{\partial u_i}{\partial x_j}+\frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right]-\frac{2}{3}\delta_{ij}\left[3\mu_t\frac{\partial u_k}{\partial x_k}+\rho k\right]\right)\frac{\partial u_j}{\partial x_i}$$
$$\rightarrow G_k=\mu_t\left[\frac{\partial u_i}{\partial x_j}+\frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right]\frac{\partial u_i}{\partial x_j}-\frac{2}{3}\frac{\partial u_k}{\partial x_k}\left[3\mu_t\frac{\partial u_k}{\partial x_k}+\rho k\right]$$
$$=\mu_t\left[\frac{\partial u_i}{\partial x_j}+\frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right]\frac{\partial u_i}{\partial x_j} \quad (15)$$

در رابطه (15) برای جریان‌های تراکم‌ناپذیر مانند مساله حاضر عبارت $\frac{\partial u_k}{\partial x_k}$ صفر شده و ترم دوم حذف می‌شود.

لزجت گردابه‌ای μ_t نیز از ترکیب k و ε به صورت $v_t=C_\mu\frac{k^2}{\varepsilon}$ محاسبه می‌شود که در آن C_μ=0.09 است.

3-2-2- مدل **RNG k-ε**

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 ε است تا دقت آن در جریان‌هایی که به شدت تحت کرنش (کشیدگی) قرار دارند افزایش یابد.

معادلات انتقال متغییرهای اغتشاشی در مدل RNG به صورت روابط (17,16) است [12].

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t}+\frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i}=\frac{\partial}{\partial x_i}\left[\alpha_K\mu_{\text{eff}}\frac{\partial k}{\partial x_i}\right]+G_k-\rho\varepsilon \quad (16)$$

$$\frac{\partial(\rho\varepsilon)}{\partial t}+\frac{\partial(\rho\varepsilon u_i)}{\partial x_i}= \frac{\partial}{\partial x_i}\left[\alpha_\varepsilon\mu_{\text{eff}}\frac{\partial\varepsilon}{\partial x_i}\right]+C_{1\varepsilon}\frac{\varepsilon}{k}G_k-\rho C_{2\varepsilon}\frac{\varepsilon^2}{k}-R_\varepsilon \quad (17)$$

در روابط این مدل α_k و α_ε معکوس اعداد پرانتل مؤثر برای k و ε است که توسط روابط (19,18) محاسبه می‌شوند.

$$\left|\frac{\alpha-1.3929}{\alpha_0-1.3929}\right|^{0.6321}\left|\frac{\alpha+2.3929}{\alpha_0+2.3929}\right|^{0.3679}=\frac{\mu_{\text{mol}}}{\mu_{\text{eff}}} \quad (18)$$

$$\alpha_0=\frac{1}{\text{Pr}} \quad (19)$$

در جریان‌های با عدد رینولدز بالا، مانند همین مساله که در آن نسبت لزجت مولکولی به لزجت گردابه‌ای بسیار کم است ($\frac{\mu_{\text{mol}}}{\mu_{\text{eff}}}\ll 1$)، هر دو مقدار α_k و α_ε با هم برابر می‌شوند. برای مدل‌سازی لزجت مؤثر در این مدل از معادله دیفرانسیلی رابطه (20) استفاده می‌شود.

$$d\left(\frac{\rho^2 k}{\sqrt{\varepsilon\mu}}\right)=1.72\frac{\tilde{v}}{\sqrt{\tilde{v}^3-1+C_v}}d\tilde{v}$$
$$\tilde{v}=\frac{\mu_{\text{eff}}}{\mu}\qquad C_v\approx 100 \quad (20)$$

تفاوت اصلی بین مدل RNG و مدل استاندارد، در ترم اضافی در معادله انتقال ε در مدل RNG است که به صورت رابطه (21) محاسبه می‌شود.

$$R_\varepsilon=\frac{C_\mu\rho\eta^3\left(1-\frac{\eta}{\eta_0}\right)}{1+\beta\eta^3}\frac{\varepsilon^2}{k},\qquad \eta=\frac{Sk}{\varepsilon},\qquad \beta=0.012 \quad (21)$$

این پارامتر در جایی که جریان تحت کرنش کم یا ملایم قرار دارد ($\eta<\eta_0$)، تغییرات چندانی بین مدل RNG و مدل استاندارد 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 ε سبب افزایش ε و کاهش k و به تبع آن کاهش لزجت مؤثر می‌شود. این موضوع سبب افزایش دقت مدل RNG نسبت به مدل استاندارد می‌شود. این مدل برای شرایطی که جریان به شدت تحت کرنش (کشیدگی) قرار دارد و یا انحنای خطوط جریان شدید است نتایج بهتری نسبت به مدل k-ε استاندارد ارائه می‌کند. با توجه به این‌که در جریان اسلاگ، جریان در سطح مشترک تحت کرنش زیاد قرار دارد؛ بنابراین انتظار می‌رود این مدل با توجه به ترم اضافی موجود در معادله ε که مربوط به کشیدگی جریان می‌شود، نتایج بهتری ارائه کند.

3-2-3- مدل **k-ε** تحقق پذیر

این مدل در دو زمینه مهم با مدل استاندراد تفاوت دارد:

- رابطه مورد استفاده برای تعیین لزجت گردابه‌ای در این مدل متفاوت است.
- معادله انتقال اصلاح‌شده نرخ تلفات در این مدل، از یک رابطه دقیق

[1] Diffusion

Archive of SID

www.SID.ir

برای انتقال متوسط مجذور نوسانات ورتیسیتی[1] به‌دست می‌آید.

در این مدل C_μ به صورت زیر تابعی از متوسط اعوجاجات سیال (k و ε) است [12].

$$C_\mu = \frac{1}{A_0 + A_\varepsilon \frac{kU^*}{\varepsilon}}, \qquad U^* = \sqrt{S_{ij}S_{ij} + \Omega_{ij}\Omega_{ij}}$$
$$A_0 = 4.04, \qquad A_s = \sqrt{6}\cos\varphi$$
$$\varphi = \frac{1}{3}\cos^{-1}\left(\sqrt{6}W\right), \qquad W = \frac{S_{ij}S_{jk}S_{ki}}{\tilde{s}^3}$$
$$\Omega_{ij} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right), \qquad S_{ij} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right)$$
$$|\Omega_{ij}| = \sqrt{2\Omega_{ij}\Omega_{ij}}, \qquad |S_{ij}| = \sqrt{2S_{ij}S_{ij}}$$
$$\tilde{s} = \sqrt{S_{ij}S_{ij}} \qquad (22)$$

C_μ تابعی از متوسط کرنش، نرخ چرخش و مشخصات میدان اغتشاشی (k و ε) است. ترم $\overline{\Omega}_{ij}$ متوسط تانسور نرخ چرخش است.

معادله انتقال k در این مدل مانند مدل استاندارد بوده، ولی ضرایب آن متفاوت است. معادله انتقال ε نیز که در آن C_1 یک ضریب است، به صورت رابطه (23) است.

$$\frac{\partial(\rho\varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho\varepsilon u_i)}{\partial x_i} =$$
$$\frac{\partial}{\partial x_i}\left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}\right)\frac{\partial\varepsilon}{\partial x_i}\right] + \rho C_1 S\varepsilon - \rho C_{2\varepsilon}\frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\upsilon\varepsilon}}$$
$$C_1 = \max\left[0.43, \frac{\eta}{\eta + 5}\right]$$
$$\eta = S\frac{k}{\varepsilon} \qquad (23)$$

یکی از تفاوت‌های رابطه (23) با رابطه متناظر در حالت استاندارد رابطه (13)، عدم وجود نقطه تکین در سومین ترم چشمه است. در این مدل حتی اگر k صفر شود مخرج کسر ترم چشمه سوم در معادله ε صفر نخواهد شد.

برای مقایسه نحوه عملکرد این مدل‌های اغتشاشی بر جریان اسلاگ، جریان اسلاگ با مدل جریان دوفازی حجم سیال به همراه تک‌تک این مدل‌ها در نرم‌افزار فلوئنت حل می‌شود. نتایج حاصل از حل عددی جریان اسلاگ با استفاده از مدل‌های اغتشاشی مختلف، با نتایج آزمایشگاهی ادیبی و انصاری [14] بر اسلاگ مقایسه شد. آن‌ها به مطالعه جریان اسلاگ درون کانالی به ابعاد 3600×10×5 سانتی‌متر پرداختند. در کار آن‌ها سرعت‌های ظاهری فاز آب 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 شکل 6 تصاویر پروفیل جریان در هنگام وقوع رژیم اسلاگ در کار آزمایشگاهی آن‌ها نشان داده شده است.

در آزمایش آن‌ها جریان اسلاگ با مشخصات یادشده در فاصله 2 متر از ورودی کانال و در زمان 0.4 تا 1 ثانیه (فاصله زمانی بین تشکیل دو اسلاگ متوالی) اتفاق افتاد.

4- نتایج

نتایج حاصل از حل جریان اسلاگ با استفاده از مدل اغتشاشی k-ε استاندارد در شکل 7 آورده شده است:

با استفاده از مدل اغتشاشی k-ε استاندارد جریان اسلاگ به هیچ وجه اتفاق نمی‌افتد. این موضوع به این دلیل است که با استفاده از این مدل مقدار تنش رینولدزی بیشتر از مقدار واقعی آن محاسبه شده و سبب می‌شود که نیروهای مومنتم نتوانند بر نیروی حجمی (وزن سیال) غلبه کنند و اسلاگ

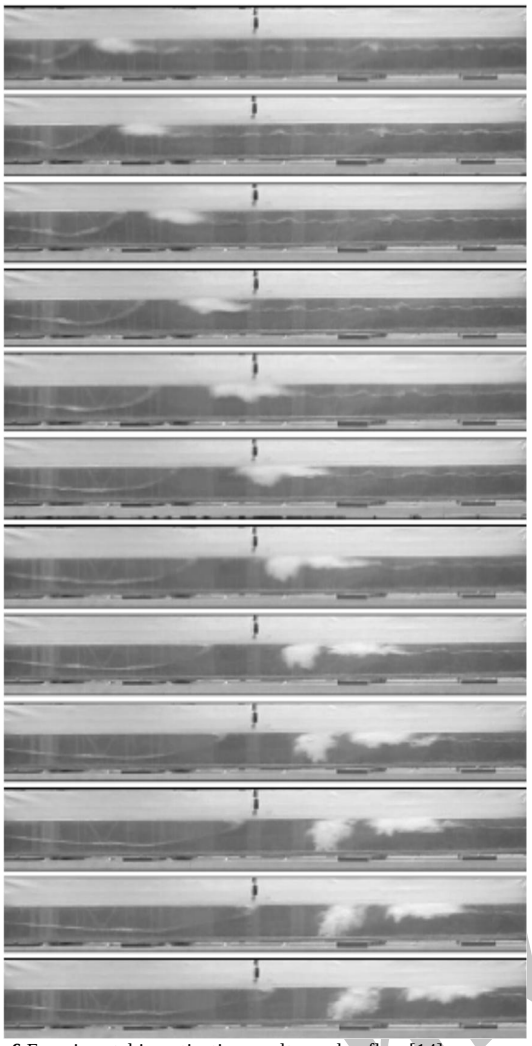

Fig. 6 Experimental investigation results on slug flow [14]

شکل 6 نتایج آزمایشگاهی بررسی جریان اسلاگ [14]

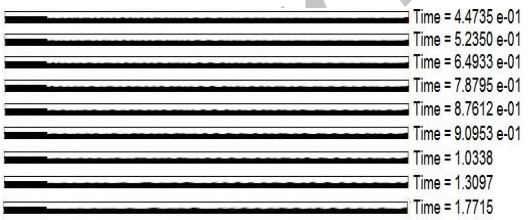

Fig. 7 slug modeling with Standard k-ε turbulent model at 12 m/s velocity difference

شکل 7 شبیه‌سازی وقوع پدیده اسلاگ با مدل k-ε استاندارد در اختلاف سرعت 12m/s

اتفاق نیفتد. مقدار زیادی از نیروهای مومنتم صرف غلبه بر نیروهای اغتشاشی می‌شود.

نتایج حل جریان اسلاگ با استفاده از مدل اغتشاشی RNG k-ε در شکل 8 آورده شده است.

بر خلاف مدل مدل k-ε استاندارد در این مدل جریان اسلاگ اتفاق می‌افتد. دلیل این امر وجود همان ترم اضافی در معادله ε است، که در جریان‌های برشی سبب کاهش ترم تلفات در معادله ε، افزایش نرخ ε و

[1] Mean-square vorticity fluctuation

Archive of SID
www.SID.ir

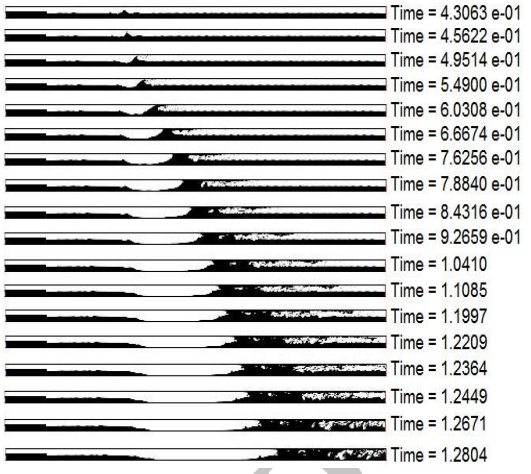

Fig. 8 slug modeling with RNG k-ε turbulent model at 12 m/s velocity difference

شکل 8 شبیه‌سازی وقوع پدیده اسلاگ با مدل RNG k-ε در اختلاف سرعت 12m/s

کاهش انرژی جنبشی اغتشاشی و به تبع آن کاهش لزجت اغتشاشی می‌شود. با کاهش لزجت اغتشاشی لزجت مؤثر نیز کاهش می‌یابد. در این صورت انرژی حاصل از تغییرات مومنتم بیشتر صرف غلبه بر نیروهای گرانشی (وزن) شده و اسلاگ زودتر اتفاق می‌افتد. پروفیل کیفی این مدل تا حد زیادی مشابه پروفیل کیفی کسر حجمی در آزمایشات (شکل 6) است. در مدل اغتشاشی RNG k-ε، اسلاگ در زمان 0.55 ثانیه و مکان تقریبی 2 متر از ابتدای کانال اتفاق می‌افتد. با مقایسه نتایج حل جریان اسلاگ با مدل RNG و نتایج حل جریان اسلاگ با مدل جریان آرام در قسمت تعیین شبکه مستقل مشاهده می‌شود که در مدل‌سازی جریان اسلاگ با مدل اغتشاشی، اسلاگ در زمان و مکان دیرتری نسبت به مدل‌سازی جریان اسلاگ با جریان آرام اتفاق می‌افتد.

در شکل 9 نتایج حاصل از حل جریان اسلاگ با استفاده از مدل Realizable k-ε نشان داده شده است.

همان‌طور که مشاهده می‌شود پروفیل توزیع کسر حجمی این حل جریان با مدل تحقق پذیر در مکان طولانی‌تری از ورودی کانال نسبت به

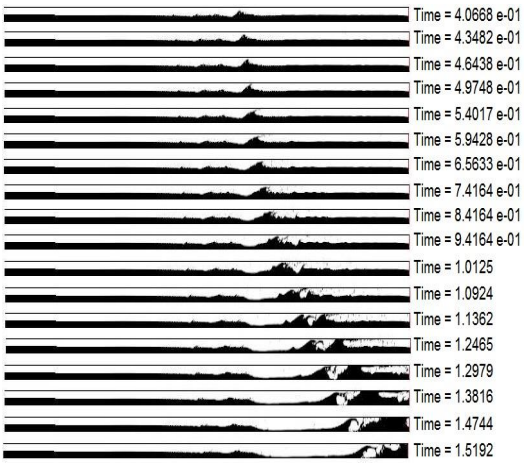

Fig. 9 slug modeling with Realizable k-ε turbulent model at 12 m/s velocity difference

شکل 9 شبیه‌سازی وقوع پدیده اسلاگ با مدل Realizable k-ε در اختلاف سرعت 12m/s

نتایج آزمایشگاهی اتفاق می‌افتد. در این مدل تدابیر خاصی برای جریان‌های برشی نسبت به مدل استاندارد لحاظ نشده است و همان‌طور که انتظار می‌رفت مشابه مدل استاندارد مقدار لزجت گردابه‌ای در این مدل زیادتر از مقدار واقعی آن محاسبه می‌شود. در مدل اغتشاشی k-ε تحقق پذیر اسلاگ در زمان تقریبی 0.6 ثانیه و مکان تقریبی 3.5 متر از ورودی کانال رخ می‌دهد. از آن‌جایی که در این مدل نیز مقدار لزجت مؤثر بیش از مقدار واقعی آن محاسبه می‌شود، غلبه نیروهای حاصل از تغییرات مومنتم بر نیروهای وزن و اغتشاشات به سختی روی می‌دهد و در این مدل اسلاگ در مکان و زمان دیرتری نسبت به مدل RNG اتفاق می‌افتد.

براساس نتایج آزمایشگاهی جریان اسلاگ با مشخصات یادشده در مکانی در حدود 2 متر از ابتدای کانال و زمانی بین 0.4 - 1 ثانیه اتفاق می‌افتد و می‌توان اعلام کرد که مدل RNG k-ε نتایج بهتری نسبت به سایر مدل‌ها ارائه می‌کند.

در شکل 10 نتایج حل عددی انصاری بر روی جریان اسلاگ آورده شده است. نتایج کار حاضر با مدل اغتشاشی RNG k-ε، تطابق خوبی با نتایج حل عددی انصاری [8]، رضوی [11] و نتایج آزمایشگاهی ولی [5] و ادیبی [14] دارد.

در شکل 11 سرعت مخلوط اسلاگ در حل جریان اسلاگ به کمک سه مدل اغتشاشی k-ε استاندارد/RNG/ تحقق‌پذیر نشان داده شده است. سرعت مخلوط اسلاگ هنگام وقوع اسلاگ می‌تواند تا 8m/s نیز افزایش یابد. این سرعت زیاد برای جریان سیال مایع درون کانال می‌تواند نیروی مومنتم زیادی ایجاد کند که اگر در مسیر کانال با هر تجهیزی از جمله شیر یا زانویی و ... برخورد کند می‌تواند منجر به تخریب آن شود.

در شکل 11 جریان اسلاگ برای هر دو مدل تحقق‌پذیر و RNG به یک مقدار سرعت بیشینه رسیده و در یک زمان مشخص افت پیدا می‌کند. یکی از این دو جریان اسلاگ و دیگری اسلاگ میراست. کوتاه بودن کانال مورد بررسی دلیل این شباهت ظاهری است. اگر کانال مورد نظر بزرگ‌تر از 6 متر باشد، سرعت اسلاگ در مدل RNG در مقدار بیشینه خود تا مقدار بیشتری ادامه پیدا می‌کرد، زیرا با استفاده از این مدل اغتشاشی اسلاگ پیشرونده (اسلاگی که با گذشت زمان رشد می‌کند) تشکیل شده است. سرعت مخلوط

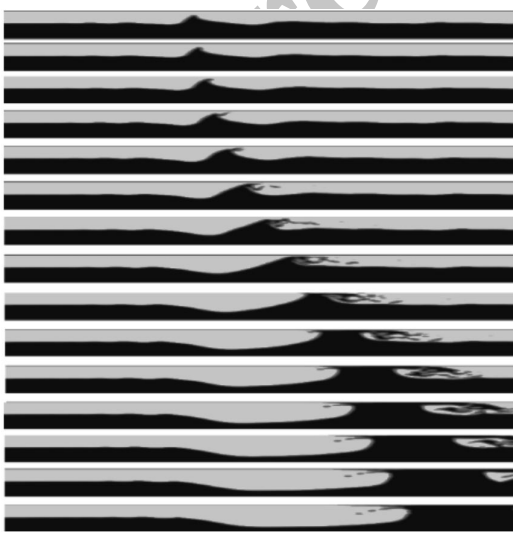

Fig. 10 Ansari Numerical result on slug initiation [8]

شکل 10 نتایج حل عددی انصاری بر جریان اسلاگ [8]

www.SID.ir
Archive of SID

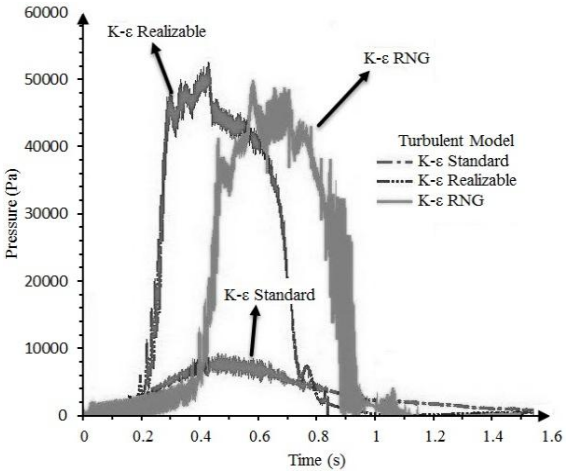

Fig. 13 pressure drop across slug in numerical modeling with three turbulent models

شکل 13 افت فشار دو سر اسلاگ در مدل‌سازی عددی با استفاده از سه مدل اغتشاشی مختلف

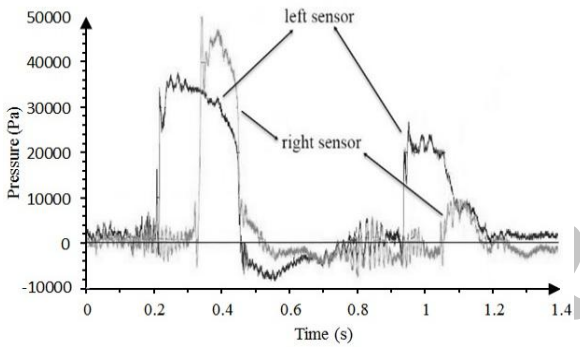

Fig. 14 pressure on two side of channel of numerical and experimental investigation by Vallee et al. [5]

شکل 14 فشار دو سر کانال براساس نتایج عددی و آزمایشگاهی ولی و همکارانش [5]

شده است. ایجاد گردابه در پیشانی جریان اسلاگ در این شکل کاملاً مشهود است. این موضوع دلیلی روشن بر مغشوش بودن جریان و لزوم استفاده از مدل‌های اغتشاشی است.

5- جمع‌بندی

با توجه به مشکلات اصلی ناشی از وقوع جریان اسلاگ و کاربرد وسیع جریان‌های دوفازی در صنایع، بررسی این رژیم جریان برای تحلیل ایمنی سیستم از اهمیت زیادی برخوردار است.

در این رابطه برای درک بهتر پدیده اسلاگ و با توجه به گوناگونی مدل‌های اغتشاشی مورد استفاده در حل این جریان، به بررسی عملکرد و سازگاری مدل‌های اغتشاشی مختلف با این رژیم جریان پرداخته شد.

در ابتدا با بررسی مشخصات انواع مدل‌های اغتشاشی، فرضیات اولیه، معادلات آن‌ها و ملزومات هریک برای کارکرد مناسب، تعدادی از مدل‌های نامناسب برای مدل‌سازی این رژیم مانند مدل‌های خانواده k-ω و RSM[1] حذف شد. با بررسی مجدد مدل‌های باقی‌مانده که همان مدل‌های خانواده k-ε هستند و انجام مدل‌سازی‌های مختلف با آن‌ها، مدل RNG به‌عنوان بهترین و سازگارترین مدل اغتشاشی برای مدل‌سازی رفتار پدیده اسلاگ

[1] Reynolds Stress Models

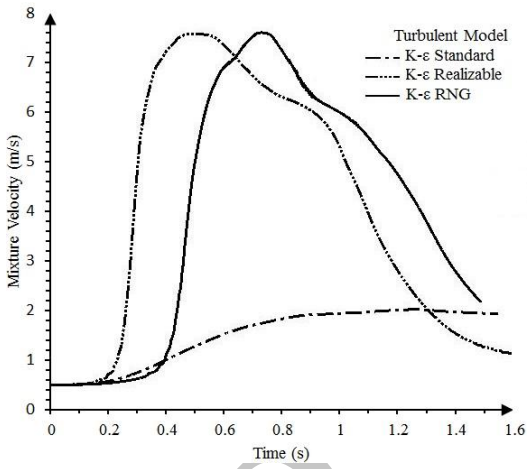

Fig. 11 numerical modeling of slug mixture velocity with different turbulent models

شکل 11 سرعت مخلوط اسلاگ در مدل‌سازی عددی با استفاده از سه مدل اغتشاشی مختلف

جریان در جریان اسلاگ با مدل تحقق‌پذیر که اسلاگی میرا تشکیل داده است، پس از اندک زمانی کاهش پیدا می‌کرد.

در شکل 12 موقعیت مرکز و انتهای اسلاگ در زمان وقوع آن براساس نتایج آزمایشگاهی لاخال آورده شده است. در این نمودار شیب خط برابر سرعت اسلاگ است. سرعت مخلوط اسلاگ در حدود 8m/s است که با نتایج کار حاضر تطابق خوبی دارد [7].

در شکل 13 نیز اختلاف فشار دو سر اسلاگ در طول زمان وقوع اسلاگ در کار حاضر با استفاده از این سه مدل اغتشاشی نشان داده شده است.

در شکل 14 اختلاف فشار دو سر اسلاگ در بررسی تجربی و عددی ولی و همکارانش براساس قرائت فشار در دو سر کانال آورده شده است. بیشترین فشار ایجادشده در دو سر اسلاگ در کار حاضر تطابق خوبی با نتایج کار آن‌ها دارد [5].

در شکل 15 نمودار تغییرات فشار در فاصله 2 میلی‌متر از دیوار بالایی کانال در طول زمان وقوع اسلاگ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در زمان وقوع اسلاگ فشار دو سر اسلاگ تا 450mbar نیز افزایش می‌یابد.

در شکل 16 بردارهای سرعت در زمان وقوع اسلاگ اسلاگ نشان داده

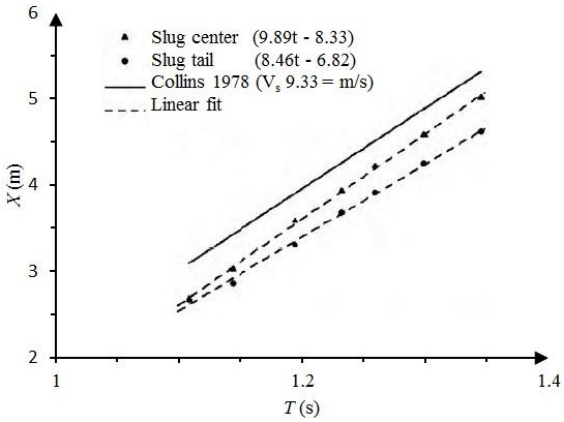

Fig. 12 slug position vs. time based on Lakehal experiment [7]

شکل 12 موقعیت اسلاگ در طول زمان بر اساس نتایج آزمایشگاهی لاخال [7]

Archive of SID

www.SID.ir

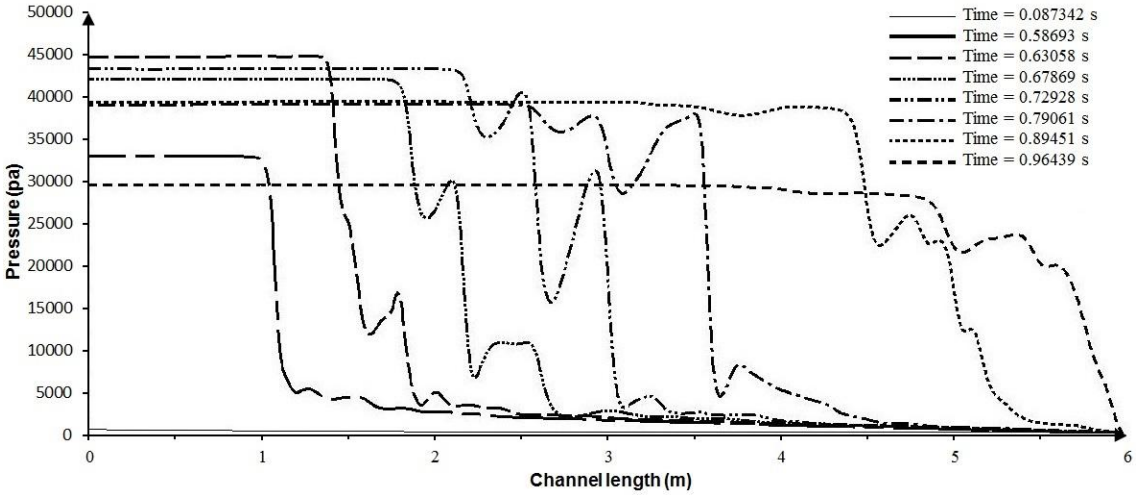

Fig. 15 Pressure profile on 2mm lower than upper wall vs. time at slug initiation

شکل 15 توزیع فشار در فاصله 2mm از بالای کانال در زمان وقوع اسلاگ

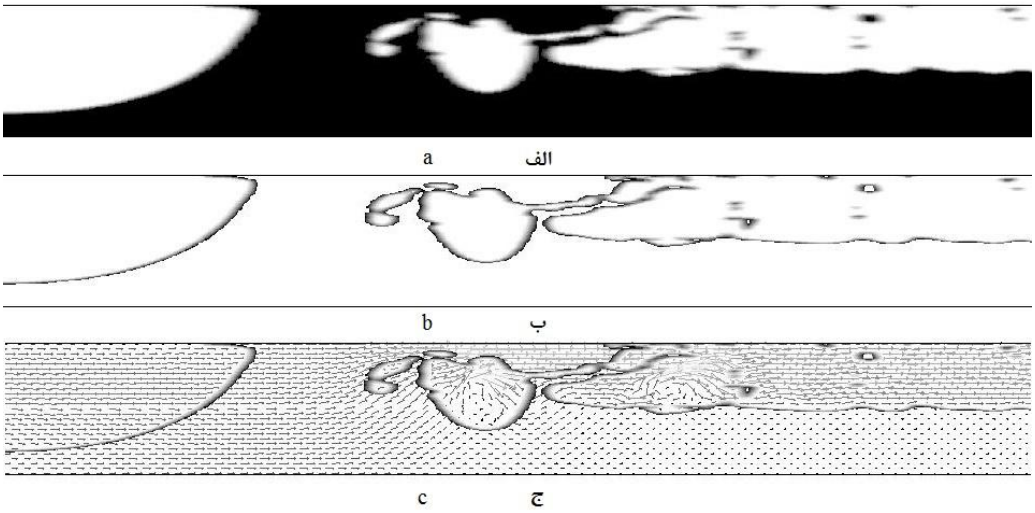

Fig. 16 Vortex initiation at front of slug (a: slug profile, b: slug interface profile, c: slug interface profile with velocity vector)

شکل 16 ایجاد گردابه در پیشانی اسلاگ (الف- پروفیل جریان اسلاگ، ب- پروفیل سطح مشترک، ج- پروفیل سطح مشترک به همراه بردارهای سرعت،

معرفی شد. در انتها سایر مشخصات جریان مانند توزیع فشار و سرعت مخلوط اسلاگ به کمک این مدل بررسی شد. مقایسه نتایج حاصل از شبیه‌سازی با نتایج تجربی از تطابقت خوبی برخوردار است.

6- فهرست علائم

A	سطح مقطع کانال (m^2)
b	عمق کانال (m)
C_f	ضریب اصطکاک جریان سیال با دیواره کانال
D	قطر (m)
f	کسر تهی یکی از فازها
g	شتاب جاذبه (m/s^2)
G_k	ترم تولید انرژی جنبشی اغتشاشی (m^2/s^3)
H	ارتفاع (m)
I	شدت اغتشاشات جریان
k	انرژی جنبشی اغتشاشی (m^2/s^2)
P	فشار (Pa)
Pr	عدد پرانتل مولکولی
Re	عدد بی‌بعد رینولدز
S	اندازه نرخ کرنش (1/s)
t	زمان (s)
u	سرعت افقی یا به صورت کلی سرعت (m/s)
u^*	سرعت بی‌بعد شده
v	سرعت عمودی در راستای نیروی گرانش (m/s)
y	ارتفاع اولین سلول محاسباتی از دیواره (m)
y^+	ارتفاع بی‌بعد اولین سلول محاسباتی در مجاورت دیواره

علائم یونانی

α	معکوس عدد پرانتل مؤثر
ε	نرخ تلفات انرژی جنبشی اغتشاشی (m^2/s^3)
μ	ویسکوزیته دینامیکی (kg/m·s)
υ	لزجت سینماتیکی (m^2/s)

www.SID.ir

ρ	چگالی (kg/m^3)
σ	عدد پرانتل اغتشاشی
τ	تنش برشی (Pa)
ω	فرکانس اغتشاشات ($1/s$)
Ω	نرخ چرخش ($1/s$)

زیرنویس‌ها

Air	هوا
eff	مؤثر (مجموع پارامتر مولکولی و پارامتر اغتشاشی)
g	گاز
h	هیدرولیکی (قطر هیدرولیکی)
i, j, k	اندیس
k	انرژی جنبشی اغتشاشی
l	مایع
m	مخلوط دو فاز
mol	مولکولی
node	نقطه محاسباتی در شبکه
t	اغتشاشی
w	دیوار
Water	آب
ε	نرخ اتلاف انرژی جنبشی اغتشاشی
μ	لزجت مولکولی

7- مراجع

[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, *Energy Resources Technology*, Vol. 134, No. 2, pp. 023001, 2012.

[3] S. C. K. De Schepper, G. J. Heynderickx, G. B. Marin, CFD modeling of all gas–liquid and vapor–liquid flow regimes predicted by the Baker chart, *Chemical Engineering*, Vol. 138, No, 1-3, pp. 349–357, 2008.

[4] 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.

[5] C. Vallee, T. Hohne, H. M. Prasser, T. Suhnel, Experimental investigation and CFD simulation of horizontal stratified two-phase flow phenomena, Nuclear Engineering and Design, Vol. 238, No. 3, pp. 637–646, 2008.

[6] J. Ma, A. A. Oberai, R. T. Lahey Jr., D. A. Drew, Modeling Air Entrainment and Transport in a Hydraulic Jump using Two-Fluid RANS and DES Turbulence Models, *Heat Mass Transfer*, Vol. 47, No. 8, pp. 911-919, 2011.

[7] 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.

[8] 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)

[9] S. V. Patankar, Numerical Heat Transfer and Fluid Flow, First Edittion, New York, McGraw-Hill, 1980.

[10] H. Gao, H. Y. Gu, L. J. Guo, Numerical study of stratified oil–water two-phase turbulent flow in a horizontal tube, *Heat and Mass Transfer*, Vol. 46, pp. 749–754, 2003.

[11] 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 and Civil Engineering*, Bangalore, India. September 14-15, 2011.

[12] ANSYS, Incorporation Products 15.0.7, ANSYS(R) FLUENT(R) Help, Accessed on 23 January 2009; http://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/html/th/node297.

[13] E. Saadati, M. Zeynalabedini, Fundamental and *advanced* CFD *simulation* with FLUENT and CFX, *Pardad Petrodanesh firm (PETEC)*, First Edittion, Tehran, Pardad Petro Danesh, 2015. (in Persian فارسی)

[14] 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)

Archive of SID

www.SID.ir