

مطالعه عددی اثرات فشار و شیب بر شروع ناپایداری هیدرودینامیکی اسلاگ در کانال

محمد رضا انصاری دانشیار مهندسی مکانیک، گروه تبدیل انرژی، دانشگاه تربیت مدرس
 عبدالحسین دارمی زاده دانشجوی دکتری مهندسی مکانیک، گروه تبدیل انرژی، دانشگاه تربیت مدرس

چکیده

در این مقاله تأثیرات فشار و شیب خط انتقال جریان دوفازی، بر شروع و توسعه ناپایداری هیدرودینامیکی اسلاگ مطالعه می شود. در حالت عملی فشار و شیب های خط انتقال تأثیر زیادی بر شروع و توسعه اسلاگ و در نتیجه نرخ جریان عبوری از خطوط لوله انتقال دارد که شناخت بهتر تأثیرات این دو عامل می تواند به طراحان در انتخاب اندازه مناسب خط لوله کمک نماید. مبنای کار حاضر بر اساس روش جدید حل عددی معادلات مدل دو سیالی بوسیله یک نوع از روش های عددی تسخیر ضربه مرتبه بالا می باشد. نتایج مربوط به مدلسازی جریان اسلاگ در کانال، با دو سری نتایج تجربی آزمایشگاهی مقایسه گردید و مطالعه همگرایی شبکه هم صورت پذیرفت. نتایج حاصله از مدلسازی اسلاگ، بیانگر دقت بالا و کفایت و قابلیت مدل در پیش بینی، تسخیر و ردگیری اسلاگ در جریان دوفازی است. مشاهده شد اگر فشار کانال پایین باشد، رشد موج سریعتر و بیشتر از حالت فشار بالا است. به عبارت دیگر، فشار بالاتر اثرات میرایی یا پایدار کننده بر ناپایداری کلونین - هلمهلتز دارد. پارامترهای دیگر از قبیل موقعیت شروع اسلاگ و تأثیرات شیب بررسی شد.

کلمات کلیدی: مدل هیپربولیکی، ناپایداری هیدرولیکی، جریان اسلاگ، روش عددی AUSM، جریان دو فازی

Numerical Study of Pressure and Inclination Effect on Initiation of Slug Hydrodynamic Instability in Channel

M. R. Ansari Associate Professor, Tarbiat Modares University, Department of Mechanical Engineering
 A. Daramizadeh PhD Student, Tarbiat Modares University, Department of Mechanical Engineering

Abstract

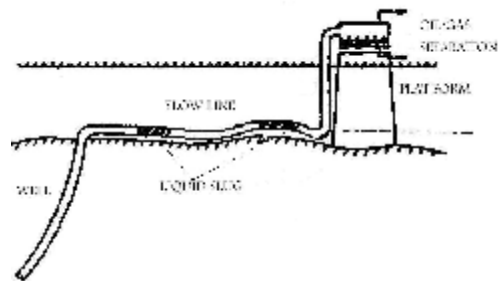
In this paper the pressure and positive/negative inclination of transport line effect on initiation and development of hydrodynamic slug instability is studied. In practical case pressure and inclination of the line have a major effect on initiation and development of slug as well as the flow rate of the line. Better understanding of these parameters will help the designers to select a proper size of the line. The base of this methodology is on numerical solution of hyperbolic two fluid model equations by means of a class of high resolution shock capturing methods. The results obtained for slug flow modeling in horizontal duct were compared with two sets of experimental results. The good agreement of the present modeling results with the experimental results of own and other investigators and also grid independency study show the model is capable of slug tracking and slug capturing and the numerical method which is used here can predict with high enough accuracy. It was shown that in low pressures the growth rate of the wave is faster than high pressure condition and higher pressure has damping effect on Kelvin Helmholtz instability. Other parameters such as the position of slug initiation and inclination effect were investigated.

Keywords: Hyperbolic condition, Hydro dynamical instability, Slug flow, AUSMDV, Two phase flow.

۱- مقدمه

جریان اسلاگ در بسیاری از کاربردهای مهندسی که شامل دو فاز هستند نظیر خطوط لوله انتقال نفت و گاز، هیدروکربن ها، جریان بخار در نیروگاه های حرارتی و هسته ای اتفاق می افتد. طبیعت گذرای رژیم اسلاگ (که در اثر گذار از رژیم لایه ای به موجی اتفاق می افتد) و همچنین وجود فصل مشترک تغییر شکل پذیر بین دو فاز مدل سازی این رژیم را سخت کرده است.

در صنایع بالادستی نفت، تولید گاز و نفت در گرو استخراج و انتقال سیالات مختلط چند فاز از مخزن به واحدهای فرایندی جهت جداسازی گاز و مایع است. این فازها شامل گاز طبیعی، هیدروکربن های مایع (نفت خام)، آب و ذرات جامد معلق (شن و ماسه) است. امروزه عملیات تولید و استخراج فراساحلی شکل ۱ در حال توسعه به آب های فراساحلی عمیق تر و دورتر هستند.



شکل ۱- نمایی شماتیک از خط انتقال نفت و گاز از مخزن

از جمله رژیم های مهم دوفازی، می توان به رژیم اسلاگ اشاره نمود. این موضوع به دلیل پیچیدگی فراوان، طبیعت نوسانی و تناوبی و حالت های بی قاعده اسلاگ، پس از گذشت سه دهه هنوز به عنوان موضوع تحقیقاتی مورد علاقه محققین و طراحان و بهره برداران است. نخستین مشکل مرتبط با رژیم اسلاگ، تغییرات زیاد در نرخ جریان گاز و نفت ورودی به جداکننده ها و تسخیر کننده های اسلاگ است. اگر اسلاگ های بلند وارد یک جداکننده شوند، سطح مایع زودتر از آنکه جداکننده مایع را خارج نموده و پرچ کند، بالا آمده و ممکن است که مایع وارد قسمت جداکننده گاز شود. به همین جهت اغلب طراحان این سیستم ها را بزرگتر از حد نیاز می سازند. مشکل دوم امکان آسیب مکانیکی به خطوط لوله انتقال نفت و گاز است. موج های اسلاگ با سرعت بالا در خط لوله حرکت می کنند و به همین جهت اسلاگ های بزرگ حاوی اندازه حرکت قابل توجهی هستند. در خم های لوله و تجهیزات بین

راهی انتقال مومنتم و ضربه وارده احتمال وارد کردن آسیب به سیستم را دارد.

گذار از رژیم لایه ای به اسلاگ در لوله های افقی و کمی شیب دار در اثر دو مکانیزم اتفاق می افتد: (الف) رشد ناپایداری های هیدرودینامیکی، (ب) انباشته شدن مایع در مسیر لوله در اثر ناهموار بودن (شیب) لوله. در مورد (الف) امواج تصادفی کوچک و با طول موج کوتاه رشد کرده و در نهایت تبدیل به موج اسلاگ که یک موج بزرگ با طول موج بلند است، می شود [۱]. انصاری با بررسی آزمایشگاهی جریان اسلاگ در یک کانال به طول ۱۰ متر و سطح مقطع مربعی به ضلع 5×10 سانتیمتر مربع به این نتیجه رسید که یک واحد اسلاگ دارای سه ناحیه اصلی می باشد.

در ناحیه اول، در اثر دمیده شدن فاز گاز به داخل کانال، فصل مشترک دو فاز مقداری از حالت تعادل به سمت پائین می آید. در ناحیه دوم امواجی کوچک با طول موج کوتاه شکل می گیرند که در نهایت منجر به موج اسلاگ می شوند (ناحیه سه). انصاری به این نتیجه رسید که عامل به وجود آمدن موج بزرگ اسلاگ با طول موج بلند امواج کوچک قبل از اسلاگ می باشند.

مکانیزمی که سبب رشد این امواج کوچک می شوند، ناپایداری کلاسیک کلین- هلمهولتز می باشد [۱-۳]. این ناپایداری سبب می شود که موج های فصل مشترک رشد کرده و نهایتاً مقطع لوله را پل زده و اسلاگ تشکیل شود.

بدنه اسلاگ مایع (ناحیه سه)، هم می تواند به طور خالص فقط شامل مایع باشد و یا در سرعت های بالاتر ذرات گاز در داخل اسلاگ مایع پخش شوند که اصطلاحاً در این حالت به اسلاگ "هوا داده شده" گفته می شود [۴ و ۵]. در مقاله حاضر اثرات ورود گاز به داخل بدنه اسلاگ مایع بررسی نمی شود. این فرایند توسط بونیزی و همکاران مدل شده است [۶].

در حالت (ب)، اسلاگ در اثر شیب لوله اتفاق می افتد. زمانی که شیب لوله در مسیر عوض شود، مثلاً لوله در معرض یک شیب مثبت قرار گیرد در اثر انباشته شدن مایع در مقطع لوله، مقطع از مایع پر شده و اسلاگ تشکیل می شود [۷].

در تحقیق حاضر تشکیل اسلاگ علاوه بر آنکه در اثر ناپایداری های هیدرودینامیکی (حالت افقی) مورد بررسی قرار می گیرد بلکه تشکیل اسلاگ در حالت های شیب دار مثبت و منفی نیز بررسی خواهد شد.

اگرچه مدل ردگیری اسلاگ نسبت به مدل حالت پایا دارای این مزیت است که با استفاده از این مدل می‌توان رفتار گذرای جریان اسلاگ (رشد و از بین رفتن) را پیش‌بینی کرد ولی چون در روش های ردگیری اسلاگ برای هر اسلاگ معادلات بقاء باید به طور جداگانه حل شوند بنابراین اگر تعداد اسلاگ ها در داخل لوله زیاد شوند زمان محاسبات بسیار افزایش می‌یابد. همچنین در این مدل برای محاسبه پارامترهای اسلاگ نظیر سرعت انتقالی^۷، بلند شدگی بدنه اسلاگ^۸، فرکانس اسلاگ^۹ و طول اسلاگ^{۱۰} نیاز به روابط تجربی می‌باشد.

روشی که در این مقاله برای مدل سازی اسلاگ مورد استفاده قرار گرفته است، روش تسخیر اسلاگ با استفاده از مدل دو سیالی هیپربولیک دوفشاری می‌باشد [۱۶]. در این روش جریان اسلاگ به صورت اتوماتیک و از رشد ناپایداری ها بدست می‌آید [۱۷]. انتقال از رژیم لایه‌ای^{۱۱} به رژیم موجی و سپس اسلاگ توسط حل معادلات حاکم مدل دوسیالی گذرا بدست می‌آید و دیگر نیازی به استفاده از روابط تجربی برای محاسبه پارامترهای جریان اسلاگ نمی‌باشد. در این روش کسر حجمی فاز مایع می‌تواند رشد کند و نهایتاً کسر حجمی به عدد یک برسد و این نقطه، نقطه آغاز اسلاگ می‌باشد و این پدیده به صورت خروجی از حل عددی مدل دو سیالی بدست می‌آید. رشد، توسعه، یکی شدن اسلاگ ها و از بین رفتن آنها فقط با استفاده از حل معادلات انتقال جرم و مومنوم و انرژی برای هر فاز تعیین می‌شوند. تنها روابط تجربی لازم در این مدل، روابط مربوط به تنش هر فاز با دیواره و تنش دو فاز در فصل مشترک می‌باشد [۱۸]. در حال حاضر کاربرد روش های عددی دقت بالای تسخیر شاک در مدلسازی مسائل دینامیک گاز معمول شده است. لیکن تا کنون در بحث مدلسازی جریان های لایه‌ای و اسلاگ با این روش ها کاری گزارش نشده است. در این تحقیق از روش عددی AUSMDV که روشی آسان، سریع و با دقت بالا به حساب می‌آید و مدل دوسیالی استفاده به عمل آمد. از مزایای روش AUSM^{۱۲} [۲۰-۲۲] می‌توان به :

- عدم نیاز به تحلیل مشخصه ای یا جداسازی ناحیه به ناحیه
- توانایی خوب تسخیر عدم پیوستگی های میدان جریان

طبق بررسی‌های صورت گرفته سه روش برای مدل سازی اسلاگ در مقالات پیشنهاد شده است:

- مدل های حالت پایا^۱
- مدل ردگیری اسلاگ^۲
- مدل تسخیر اسلاگ با استفاده از مدل دو سیالی^۳

مدل حالت پایا ساده‌ترین و در عین حال عمومی‌ترین روش برای مدل سازی اسلاگ می‌باشد. در این مدل خاصیت نوبتی^۴ جریان اسلاگ به خاصیت تناوبی^۵ تقلیل می‌یابد. جریان به صورت کاملاً توسعه یافته در نظر گرفته می‌شود. بنابراین ساختار پیچیده جریان اسلاگ به یک "واحد سلولی معادل"^۶ تبدیل می‌شود که شامل یک اسلاگ مایع و یک حباب تیلور می‌باشد [۸]. در مدل حالت پایا مختصات مرجع با سرعت سلول حرکت می‌کند و آنالیز حالت پایا بر پایه موازنه جرم و مومنوم برای این حجم معیار متحرک صورت می‌گیرد [۹].

اسلاگ در خلال حرکتش در طول لوله می‌تواند رشد کند، کوچک شود، تولید شود و یا از بین برود. مدل کردن این رفتارهای گذرا توسط مدل حالت پایا امکان پذیر نمی‌باشد.

در مدل ردگیری اسلاگ، حرکت، رشد و از بین رفتن هر اسلاگ با استفاده از ردگیری تک تک اسلاگ ها بدست می‌آید. مکان هر اسلاگ با مانیتور کردن نوک و دنباله هر اسلاگ در طول لوله و با استفاده از مختصات لاگرانژی نسبت به زمان به دست می‌آید. سپس این اطلاعات به معادلات پیوستگی و مومنوم در نوک و انتهای اسلاگ وارد می‌شود [۱۰ و ۱۱]. مدل ردگیری اسلاگ برای محاسبه برخی از خواص اسلاگ نیازمند به وارد کردن روابط تجربی می‌باشد. یک مثال از کاربرد این مدل در یک کد تجاری، کد جریان دو فازي OLGA می‌باشد [۱۲]. ژنک و همکارانش یک تکنیک از روش ردگیری اسلاگ برای پیش‌بینی تولید، رشد و پخش هر اسلاگ ارائه کردند [۱۳]. بارنی و تایتل نیز روشی مشابه برای آنالیز توزیع طول اسلاگ پیشنهاد کردند [۱۴]. همچنین تایتل و بارنی یک مدل دیگر از مدل های ردگیری اسلاگ برای مدل سازی مکانیزم های پایه‌ای جریان اسلاگ مثل تولید، رشد و پخش اسلاگ در داخل لوله ارائه کردند که در مدل آنها تاثیرات تراکم پذیری فاز گاز لحاظ شده بود [۱۵].

⁷ Translational Velocity

⁸ Slug Body Holdup

⁹ Slug Frequency

¹⁰ Slug Length

¹¹ Stratified

¹² Advection Upstream Splitting Method

¹ Steady State Model

² Slug-Tracking Model

³ Slug-Capturing using Two-Fluid Model

⁴ Intermittency

⁵ Periodically

⁶ Equivalent Cell Unit

$$a_l = 1000 \frac{m}{s}, P_{l,0} = 1 \text{ bar}, \rho_{l,0} = 1000 \frac{kg}{m^3}$$

$$a_g = 1000 \left(\frac{m}{s}\right), \rho_{g,0} = 0, P_{g,0} = 0$$

۲-۱- مدل سازی فشار فصل مشترک

جمله تصحیح فشار $(P_k - P_k^i)$ بیانگر اثرات هیدرواستاتیکی و تنش سطحی است. لحاظ کردن این جمله در معادله مومنتم تأثیر بسیار زیادی در هیپربولیک شدن مدل دارد. در کار حاضر از مدل پیشنهادی بسشن [۲۴] برای مدل سازی فشار فصل مشترک استفاده شد. در رابطه (۷) مقدار δ بایستی عددی بزرگتر از ۱ انتخاب شود.

$$\Delta P = P_k - P_i = \delta \frac{\alpha_g \alpha_l \rho_g \rho_l}{\rho_g \alpha_l + \rho_l \alpha_g} (v_g - v_l)^2 \quad (7)$$

۳- روش عددی AUSM¹

در روش AUSM جمله شار پایستار جرم و مومنتم به صورت زیر نوشته می شود:

$$(\psi v)_{j+\frac{1}{2}} = V_j^+ \psi_j + V_{j+1}^- \psi_{j+1} \quad (8)$$

که ضریب وزنی سرعت به صورت زیر تعریف می شود:

$$V^\pm = \begin{cases} \pm \frac{1}{4c} (v \pm c)^2 & \text{if } |v| \leq c \\ \frac{1}{2} (v \pm |v|) & \text{otherwise} \end{cases} \quad (9)$$

در این روش عددی شار عددی F ترکیبی از جملات بالا-دست و پایین دست است و به صورت رابطه (۱۰) نوشته می شود:

$$F = F^+(U_L) + F^-(U_R) \quad (10)$$

در این نحوه جداسازی شارهای جابجایی، شار جابجایی بر حسب سرعت موج صوتی که از طریق ریشه های معادله مشخصه تعریف می شود بیان می گردد [۲۵]. بنابر این سرعت به صورت زیر اصلاح می شود:

$$V = V^+(v, c) + V^-(v, c) \quad (11)$$

که C سرعت صوت در مخلوط دو فازی است و در اینجا با

- زمان کمتر محاسبه نسبت به روش های گودونوف
- سادگی کاربرد آن

اشاره کرد. در بخش ۲ این مقاله معادلات حاکم بر مدل دو سیالی و معادلات حالت مورد نیاز ارائه خواهد شد. روش جداسازی شار عددی بر اساس روش AUSM و جداسازی جدید پیشنهادی برای جملات ناپایستار در بخش ۳ خواهد آمد. مسائل مختلف و معروف دو فازی و مدل سازی جریان اسلاگ به همراه مقایسه با نتایج آزمایشگاهی در بخش ۴ و بحث و بررسی نتایج در بخش ۵ خواهد آمد.

۲- معادلات حاکم در مدل دو سیالی

این مدل دو فازی دو سیالی، شامل دو معادله بقای جرم و دو معادله بقای مومنتم است و هر فاز به صورت جداگانه مدل سازی شده و تأثیر متقابل دو فاز توسط جملات چشمه که در نظر گرفته شده اند، لحاظ می شود. این مدل را می توان به صورت زیر نوشت.

معادلات بقای جرم:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_g \alpha_g) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho_g \alpha_g v_g) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_l \alpha_l) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho_l \alpha_l v_l) = 0 \quad (2)$$

معادلات بقای مومنتم:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_g \alpha_g v_g) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho_g \alpha_g v_g^2 + (P_g - P_i) \alpha_g) \quad (3)$$

$$+ \alpha_g \frac{\partial P_i}{\partial x} = Q_g$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_l \alpha_l v_l) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho_l \alpha_l v_l^2 + (P_l - P_i) \alpha_l) \quad (4)$$

$$+ \alpha_l \frac{\partial P_i}{\partial x} = Q_l$$

برای بستن مدل از رابطه مجموع کسر های حجمی مایع و گاز استفاده می شود:

$$\alpha_g + \alpha_l = 1 \quad (5)$$

برای محاسبه چگالی فاز k از رابطه ساده خطی ترمودینامیکی زیر استفاده می شود:

$$\rho_k = \rho_{k,0} + \frac{P_k - P_{k,0}}{a_k} \quad (6)$$

در این محاسبات از مقادیر اولیه زیر استفاده شده است:

سرعت، برای فشار هم ضریب وزنی $P^\pm(v, c)$ تعریف می شود به نحوی که:

$$P^+(v, c) + P^-(v, c) = 1 \quad (16)$$

مقدار ضریب وزنی فشار به صورت

$$P^\pm(v, c) = V^\pm(v, c) \cdot \begin{cases} \frac{1}{c} (\pm 2 - \frac{v}{c}) & \text{if } |v| \leq c \\ \frac{1}{v} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (17)$$

محاسبه می شود [۲۵]. با استفاده از این عامل، ضریب وزنی جمله باقیی فشار $(\alpha \Delta p)_{j+\frac{1}{2}}$ به صورت رابطه (۱۸)

$$\begin{aligned} & \text{بدست می آید [۲۵]:} \\ & (\alpha \cdot p)_{j+\frac{1}{2}} = P^+(v_j, c_{j+\frac{1}{2}})(\alpha \cdot p)_j + \\ & P^-(v_{j+1}, c_{j+\frac{1}{2}})(\alpha \cdot p)_{j+1} \end{aligned} \quad (18)$$

بر این اساس جداسازی جمله ناپایستار به صورت رابطه (۱۹) خواهد بود [۲۵]:

$$\begin{aligned} (P_i \frac{\partial \alpha}{\partial x})_j = & \frac{P_{i,j}}{\Delta x} ([\alpha_L \cdot P^+(U_L) + \alpha_R \cdot P^-(U_R)]_{j+\frac{1}{2}} \\ & - [\alpha_L \cdot P^+(U_L) + \alpha_R \cdot P^-(U_R)]_{j-\frac{1}{2}}) \end{aligned} \quad (19)$$

۴- صحت سنجی و مدل سازی عددی

۴-۱- حل جریان لایه ای در کانال

در این مرحله جریان لایه ای در یک کانال افقی مدل سازی شد (شکل ۲). روابط ساختاری که در مدل دوسیالی جهت بسته شدن معادلات مورد نیازند، تنش فاز گاز با دیوار، تنش فاز مایع با دیوار و تنش در فصل مشترک دو فاز می باشند که به ترتیب از روابط معروف زیر برای محاسبه تنش فاز گاز با دیوار، تنش فاز مایع با دیوار و تنش فصل مشترکی استفاده می شود:

$$\tau_g = \frac{1}{2} f_g \rho_g V_g |V_g| \quad (20)$$

$$\tau_l = \frac{1}{2} f_l \rho_l V_l |V_l| \quad (21)$$

$$\tau_I = \frac{1}{2} f_I \rho_g (V_g - V_l) |V_g - V_l| \quad (22)$$

تعریف یک رابطه بر اساس نسبت $(\frac{\alpha}{\rho})$ یک رابطه جدید تعریف می شود:

$$\left(\frac{\alpha_l}{\rho_l}\right) \frac{1}{c_l^2} + \left(\frac{\alpha_g}{\rho_g}\right) \frac{1}{c_g^2} = \left(\frac{\alpha_l}{\rho_l} + \frac{\alpha_g}{\rho_g}\right) \frac{1}{c^2} \quad (12)$$

بعد از مقداری عملیات ریاضی، می توان این رابطه را به صورت (۱۳) بازنویسی نمود:

$$c = \sqrt{\frac{\left(\frac{\alpha_l}{\rho_l}\right) + \left(\frac{\alpha_g}{\rho_g}\right)}{\left(\frac{\alpha_l}{\rho_l}\right) \frac{1}{c_l^2} + \left(\frac{\alpha_g}{\rho_g}\right) \frac{1}{c_g^2}}} \quad (13)$$

برای ادامه کار و جداسازی معادلات، معادله مومنتم به صورت زیر نوشته می شود:

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial F_C}{\partial x} + \frac{\partial F_P}{\partial x} + H \frac{\partial P_i}{\partial x} = Q \quad (14)$$

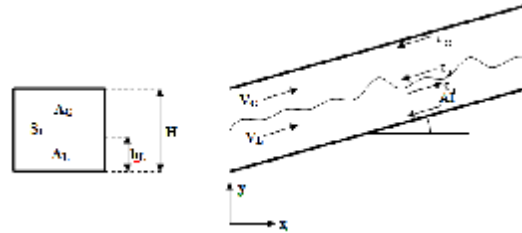
$$\begin{aligned} U = \begin{bmatrix} u_\gamma \\ u_\tau \\ u_\nu \\ u_\epsilon \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \rho_g \alpha_g \\ \rho_l \alpha_l \\ \rho_g \alpha_g v_g \\ \rho_l \alpha_l v_l \end{bmatrix}, F_C = \begin{bmatrix} \rho_g \alpha_g v_g \\ \rho_l \alpha_l v_l \\ \rho_g \alpha_g v_g^2 \\ \rho_l \alpha_l v_l^2 \end{bmatrix}, \\ F_P = \begin{bmatrix} \cdot \\ \cdot \\ \alpha_g \Delta P \\ \alpha_l \Delta P \end{bmatrix}, H = \begin{bmatrix} \cdot \\ \cdot \\ \alpha_g \\ \alpha_l \end{bmatrix}, Q = \begin{bmatrix} \cdot \\ \cdot \\ Q_g \\ Q_l \end{bmatrix} \end{aligned}$$

معادله (۱۴) را می توان به صورت زیر جداسازی نمود:

$$\begin{aligned} \frac{U_j^{n+1} - U_j^n}{\Delta t} + \frac{[F_C]_{j+\frac{1}{2}}^n - [F_C]_{j-\frac{1}{2}}^n}{\Delta x} + \\ \frac{[F_P]_{j+\frac{1}{2}}^n - [F_P]_{j-\frac{1}{2}}^n}{\Delta x} + \left[H \frac{\partial P_i}{\partial x} \right]_j = Q_j^n \end{aligned} \quad (15)$$

جزئیات گسسته سازی جمله های شار پایستار مومنتم و جرم در [۲۵] آمده است. در ادامه روش گسسته سازی شار عددی فشار $[F_P]_{j+\frac{1}{2}}$ ارائه شده است. شبیه جداسازی قبلی برای

است که بین $\Delta x = 12.5 \text{ mm}$ و $\Delta x = 6.25 \text{ mm}$ اختلاف چندانی به چشم نمی خورد. بنابراین برای ادامه محاسبات $\Delta x = 12.5 \text{ mm}$ = لحاظ شد.



شکل ۲- شکل شماتیک جریان لایه ای در کانال

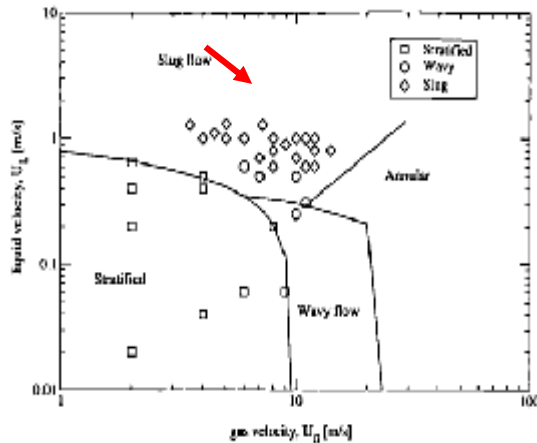
با توجه به روابط (۲۰)، (۲۱) و (۲۲) ملاحظه می شود که برای محاسبه تنش ها باید ضرایب اصطکاکی فانینگ یعنی f_l و f_g محاسبه شوند.

برای محاسبه ضرایب اصطکاکی فازهای گاز و مایع معمولاً از روابطی که برای جریان های تک فاز وجود دارد استفاده می شود که در آن روابط به جای قطر داخلی از قطر هیدرولیکی مناسبی برای هر سیال استفاده می شود. همچنین برای محاسبه عدد رینولدز از همان قطر هیدرولیکی استفاده می شود:

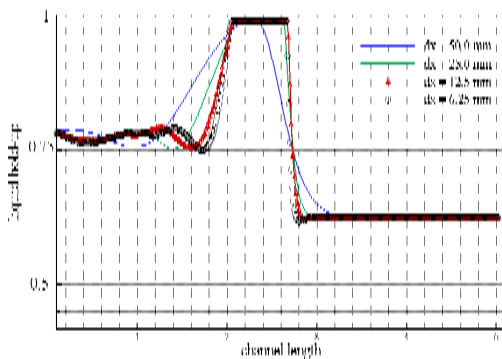
$$D_{hG} = \frac{4A_G}{S_G + S_L} \quad D_{hL} = \frac{4A_L}{S_L} \quad (23)$$

$$Re_G = \frac{\rho_G D_{hG} |V_G|}{\mu_G} \quad Re_L = \frac{\rho_L D_{hL} |V_L|}{\mu_L} \quad (24)$$

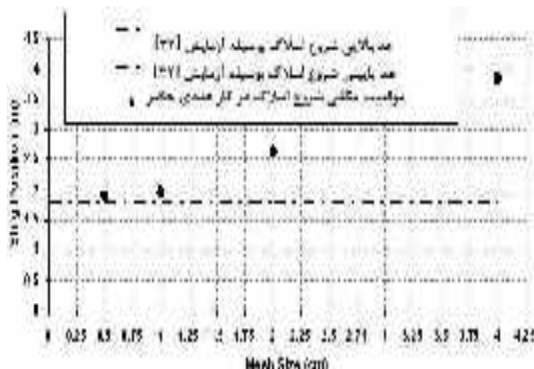
در این پژوهش برای محاسبه ضرایب اصطکاکی فازهای گاز و مایع طبق [۲] عمل شده است.



شکل ۳- نقشه جریان دوفازی مانولیس [۳۰]



شکل ۴- مطالعه همگرایی جواب ها برای یک مسئله ناپایداری هیدرودینامیکی اسلاگ



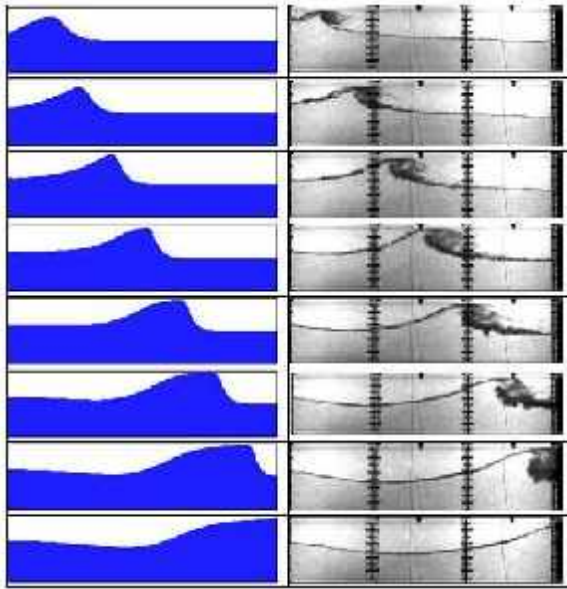
شکل ۵- مقایسه نقطه آغاز اسلاگ با نتایج آزمایشگاهی

در شکل ۵ نقطه شروع اسلاگ به ازای اندازه های مختلف شبکه با نتایج آزمایشگاهی انصاری [۱] مقایسه شده است.

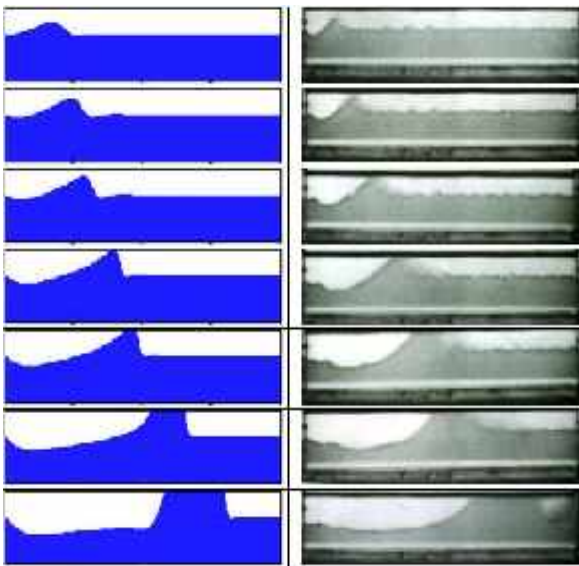
۴-۱-۱- شرایط اولیه و مرزی

در زمان صفر سطح آب صاف فرض شده و در شرایط صاف در نظر گرفته شده است. هوا و آب ورودی به صورت یک تابع پله در ورودی کانال معرفی شده است. شرایط ورودی ثابت در نظر گرفته شده است و متأثر از تغییرات داخل کانال نیست. فشار مرز خروجی معادل فشار جو لحاظ گردید. فرضیات مربوط به سرعت گاز و مایع بایستی به دقت از نقشه جریان مانولیس [۳۰] شکل ۳ استخراج شود تا ایجاد اسلاگ تضمین گردد. محورهای این نمودار به صورت لگاریتمی است و بایستی مقادیر سرعت گاز و سرعت مایع به نحوی انتخاب شوند که در ناحیه بالای نمودار که شامل ناحیه اسلاگ است، واقع شود. برای مثال همانطور که مشاهده می شود برای سرعت مایع بیشتر از ۰/۸ متر بر ثانیه احتمال وقوع اسلاگ بسیار زیاد است. در محاسبات حاضر در شرایط اتمسفری چگالی مایع و گاز به ترتیب ۱۰۰۰ و ۱ در نظر گرفته شد. دمای محیط هم ۲۵ درجه سانتیگراد است. شکل عمومی کانال در شکل ۲ آمده است. همگرایی جواب ها در شکل ۴ نشان داده شده است. نتایج همگرایی بیانگر آن

شده است. در شکل های ۸ و ۹ فقط ناحیه ۳ از اسلاگ که در اول این قسمت توضیح داده شد، مورد تاکید واقع شده است.



شکل ۸- مقایسه بین نتایج عددی و تجربی مرجع [۳۱]
حرکت اسلاگ و ارزیابی زمانی با فواصل ۰/۰۵ ثانیه از ناپایداری
هیدرودینامیکی اسلاگ، سمت چپ: نتایج عددی و سمت
راست: نتایج تجربی ($V_{gs} = 2.2 \text{ m/s}$, $V_{ls} = 0.69 \text{ m/s}$)

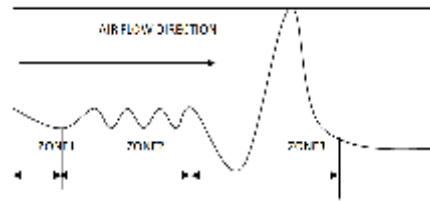


شکل ۹- مقایسه بین نتایج عددی و تجربی مرجع [۳۲]
حرکت اسلاگ و ارزیابی زمانی با فواصل ۰/۰۵ ثانیه از ناپایداری
هیدرودینامیکی اسلاگ، سمت چپ: نتایج عددی و سمت
راست: نتایج تجربی ($V_{gs} = 6 \text{ m/s}$, $V_{ls} = 0.02 \text{ m/s}$)

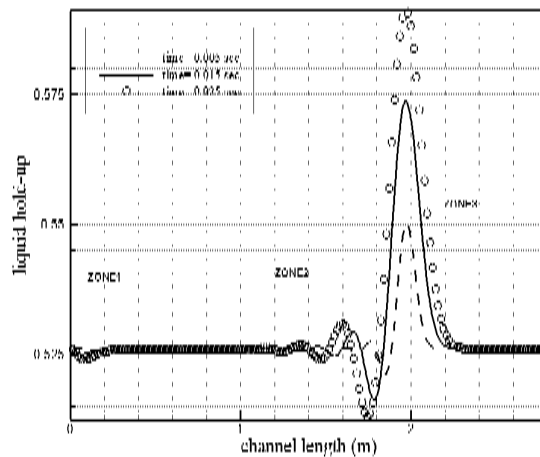
ملاحظه می‌شود به ازای اندازه‌های شبکه ۰/۰۱ متر و ۰/۰۰۵ متر جواب‌ها با نتایج آزمایشگاهی مطابقت می‌کنند و ثانیا محل تشکیل اسلاگ چندان تفاوت ندارد بنابراین انتخاب شبکه به اندازه ۰/۰۱۲ متر درست بوده است.

۴-۱-۲- شروع و توسعه اسلاگ

در شکل ۶ به صورت طرحواره و در شکل ۷ نتیجه شبیه‌سازی عددی شروع اسلاگ و رشد آن در زمان‌های ابتدایی نمایش داده شده است. در زمان شروع و توسعه اسلاگ، سه ناحیه مختلف در کانال قابل تشخیص است. در ناحیه ۱، سطح مشترک کمی به سمت پایین کشیده می‌شود که این پدیده به دلیل افزایش جزئی فشار در ورودی در لحظات اولیه است. در ناحیه دوم، تعدادی امواج کوتاه در فصل مشترک ایجاد می‌شود و در نهایت یک موج بلند در ناحیه سوم شکل می‌گیرد. در شکل ۸ مقایسه‌ای بین تاریخچه زمانی حرکت اسلاگ و یک سری نتایج آزمایشگاهی برگرفته از مرجع [۳۱] نشان داده شده است.

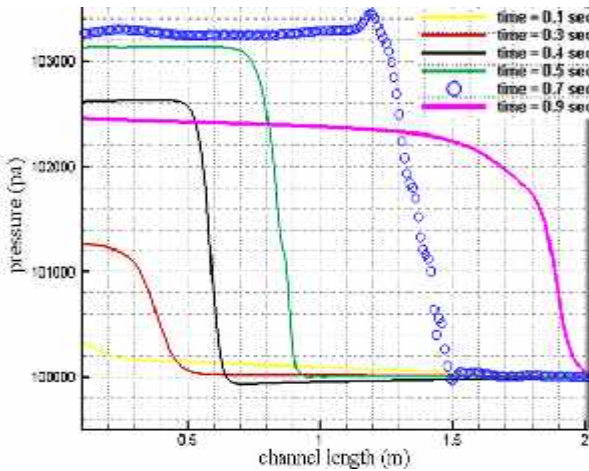


شکل ۶- نمایی از سه ناحیه مختلف در زمان شروع اسلاگ طبق نظریه ارائه شده در [۳۲و۱]

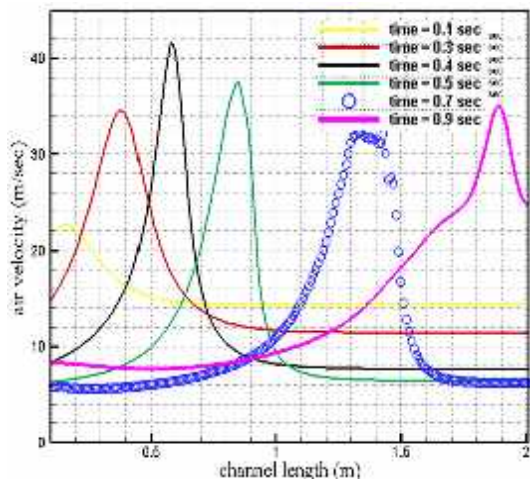


شکل ۷- نتایج عددی زمان اولیه شروع رشد اسلاگ
($V_g = 14 \text{ m/s}$, $V_l = 1 \text{ m/s}$)

در شکل ۹ مقایسه‌ای بین تاریخچه زمانی حرکت اسلاگ و یک سری نتایج آزمایشگاهی برگرفته از مرجع [۳۲] نشان داده

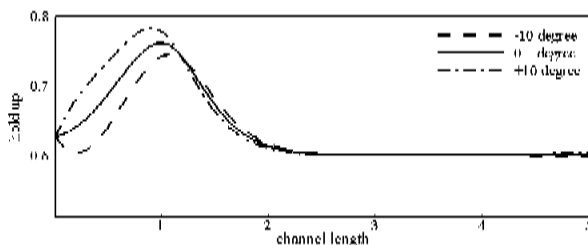


(الف)



(ب)

شکل ۱۰ - ارزیابی زمانی ناپایداری هیدرودینامیکی اسلاگ در یک کانال از لحظه شروع تا توسعه کامل، الف: فشار، ب: سرعت هوا ج: سرعت مایع
 $(V_g = 18 \text{ m/s}, V_l = 0.2 \text{ m/s}, \alpha_g = 0.22)$.



شکل ۱۱ - تأثیر شیب مثبت و منفی بر ناپایداری جریان در
 $(V_g = 19 \text{ m/sec}, V_l = 0.6 \text{ m/s}, \text{time} = 0.5 \text{ s})$.

در شکل های ۱۲ و ۱۳ تأثیرات فشار بر اسلاگ در دو سرعت متفاوت مطالعه شد. به این منظور، چهار مقدار

که این امر به دلیل محدودیت تجهیزات آزمایشگاهی است. توالی زمانی و تغییرات مشاهده شده در پلات های نتایج عددی و مقایسه آنها با عکس های تجربی بیانگر همخوانی خوب کیفی نتایج است. در شکل ۱۰ تغییرات زمانی سرعت هوا و فشار به صورت عددی و مربوط به ناحیه ۳ نمایش داده شده است. طبق این نتایج موارد ذیل استخراج می شود:

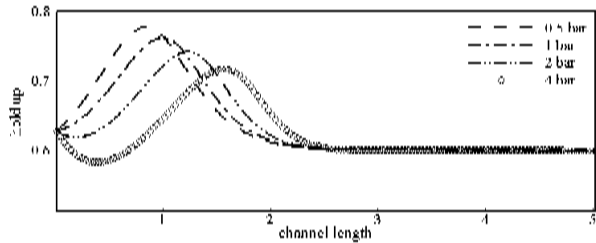
مقادیر فشار در شکل ۱۰ در فواصل زمانی یکسانی چاپ شده است. نتایج بیانگر آنست که در زمان های اولیه شروع اسلاگ بازیافت فشار به کندی صورت می گیرد.

(هوا بالای سطح آب حرکت می کند و مسیر گذر آن هنوز باز است)، کمی بعد، بازیافت فشار به سرعت افزایش می یابد تا اینکه مسیر کانال توسط مایع پل زده می شود و مسیر گذر هوا بسته می شود. اختلاف فشار بین بالا دست و پایین دست اسلاگ سرعت حرکت اسلاگ را تحت تاثیر خود قرار می دهد. سرعت مایع (اسلاگ) در مدت زمان کوتاهی افزایش می یابد که می تواند نیروی ضربه ای زیادی را تولید نماید. این نوع از اسلاگ و نحوه شتاب گیری آن می تواند خطرناک باشد و سبب آسیب رساندن تدریجی یا آنی به تجهیزات پایین دست کانال شود. در خلال شکل گیری پدیده اسلاگ، موج مایع ابتدا با سقف کانال تماس پیدا می کند. این موقعیت تحت عنوان موقعیت مکانی اسلاگ نامیده می شود. فشار در این موقعیت کمترین مقدار در طول کانال است. این کمترین فشار (در مقایسه با دیگر نقاط) به بلند شدن موج کمک بیشتری می نماید. این اثر، حالتی مشابه تأثیرات برنولی در مقابله با اثرات جاذبه است.

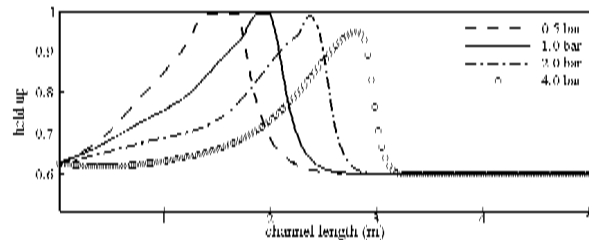
بعد از شروع اسلاگ سرعت مایع افزایش می یابد، در این حالت اسلاگ شتاب سریعی را تجربه می کند که به واسطه اختلاف بین فشارها و نیروهای مومنتم بالا دست و پایین دست هوا است.

شکل ۱۱ تأثیرات زاویه کانال را بر روی ناپایداری هیدرودینامیکی نمایش می دهد. می توان مشاهده کرد که برای زوایای مثبت شیب کانال (شیب به سمت بالا)، وقوع و شکل گیری اسلاگ بیشتر محتمل و کسر حجمی مایع از حالت افقی بیشتر است. زوایای منفی شیب (شیب به سمت پایین) سبب پایداری بیشتر جریان و تاخیر شکل گیری اسلاگ می شود.

فشار مختلف ۰.۵، ۲ و ۴ بار بررسی شد.



شکل ۱۲- تأثیر فشار بر ناپایداری جریان در زمان ۰/۵ ثانیه
($V_g = 19 \text{ m/sec}$, $V_1 = 0.6 \text{ m/s}$, $\text{time} = 0.5 \text{ s}$).



شکل ۱۳- تأثیر فشار بر ناپایداری توسعه یافته اسلاگ در
($V_g = 19 \text{ m/sec}$, $V_1 = 1.45 \text{ m/s}$, $\text{time} = 0.5 \text{ s}$).

که نکات زیر قابل استحصال است:

- اگر فشار کانال پایین باشد، رشد موج سریعتر و بیشتر از حالت فشار بالا است. به عبارت دیگر، فشار بالاتر اثرات میرایی یا پایدار کننده بر ناپایداری کلون - هلمهولتز دارد.
- سرعت اسلاگ با فشار در کانال رابطه مستقیم دارد یعنی در فشارهای بالاتر سرعت واحد اسلاگ بیشتر است.
- طول مایع در قله واحد اسلاگ (طول تماس اسلاگ با دیواره بالایی کانال) برای فشارهای پایین تر بیشتر از حالت فشارهای بالا است. شکل ۱۳ این تأثیرات را نشان می دهد.

۵- جمع بندی و نتیجه گیری

- در این مقاله از مدل دو سیالی دو فازی برای مدلسازی و تحلیل ناپایداری هیدرودینامیکی اسلاگ در کانال افقی استفاده شد. مدل دو سیالی با روش عددی AUSMDV حل گردید. روش بکار برده شده در این مقاله آسان و کم هزینه بوده و مشکلات روش های عددی قبلی را ندارد- نتایج عددی برای مدلسازی ناپایداری هیدرودینامیکی اسلاگ با دو سری نتایج تجربی و آزمایشگاهی مقایسه گردید و مشاهده شد که نتایج

عددی با نتایج آزمایشگاهی همخوانی خوبی دارد. و نتایج زیر از مدلسازی بدست آمد:

الف- از دیدگاه عددی:

فیزیک مسائل تست مختلف و رژیم پیچیده جریان اسلاگ با دقت بالا پیش بینی شد.

- زمان CPU محاسباتی صرف شده از چندین ساعت (توسط تعدادی از محققین برای مدلسازی اسلاگ با روش های قدیمی گزارش شده است) به چند دقیقه کاهش یافته است.

- میدان جریان در کار حاضر از حل مستقیم معادلات حاکم بدست آمده در حالیکه در کارهای قدیمی مانند واحد سلول و ردگیری اسلاگ از روابط تجربی بدین منظور استفاده می شود.

ب- از دیدگاه فیزیکی برای رژیم اسلاگ:

- اختلاف فشار بالا دست و پایین دست اسلاگ سرعت اسلاگ را تحت تأثیر قرار می دهد و این اختلاف فشار عامل اصلی حرکت اسلاگ است.

- بازیافت فشار در لحظات اولیه به کندی صورت می-گیرد ولی با گذر زمان و رشد موج با شتاب سریعتری انجام می شود (به محض بسته شدن مسیر کانال).

- فشار در موقعیت مکانی اسلاگ کمترین مقدار در طول کانال را دارد (حتی این مقدار ممکن است کمتر از فشار جو شود)، که سبب کمک به بلند شدن راحتتر موج آب می شود.

- بعد از شروع اسلاگ، سرعت مایع افزایش می یابد و اسلاگ شتاب می گیرد که این شتابگیری به دلیل اختلاف فشار بالا دست و پایین دست و نیروهای ممنتم بوسیله هوا است.

- برای زوایای شیب مثبت (شیب به سمت بالا) ، رژیم اسلاگ احتمال وقوع بیشتری می یابد و کسر حجمی آب از حالت افقی بیشتر است. اگر چه مقادیر منفی شیب کانال (شیب به سمت پایین) سبب پایداری بیشتر و تاخیر زمانی وقوع اسلاگ می شود.

- تحت شرایط فشار پایین، رشد دامنه موج بیشتر از حالت فشار بالا است. بنابراین فشارهای بالا دارای خاصیت افزایش پایداری و کاهش تأثیرات ناپایداری کلون هلمهولتز است.

- تحت شرایط فشار بالا، سرعت اسلاگ دارای مقدار بیشتری به نسبت فشارهای پایین است.

[6] Bonizzi M., Issa R.I., "A Model for Simulating Gas Bubble Entrainment in Two-Phase Horizontal Slug Flow", *Int. J. of Multi-Phase Flow*, No. 29, pp.1685–1717, 2003.

[7] Jansen, F.E., Shoham, O., Taitel, Y., The elimination of severe slugging. *Int. J. Multi-phase Flow* 22, 1055–1072, 1996.

[8] Wallis, G.B., "One-dimensional Two-phase Flow", McGraw-Hill, New York, 1969.

[9] Taitel, Y., Barnea, D., "Two-Phase Slug Flow", *Adv. Heat Transfer*, Vol. 20, PP. 83–132, 1990.

[10] Leebeeck . A. De, Nydal. O.J., Simulation of large amplitude waves in a slug tracking scheme compared to roll wave experiments at high pressure, *International Journal of Multi-phase Flow*, Volume 36, Issue 1, PP. 40-50, January 2010.

[11] Bendiksen, K.H., Malnes, D., Straume, T., Hedne, "A Non-Diffusive Numerical Model for Transient Simulation of Oil-Gas Transportation Systems", In: *Euro Sim. Multiconf.*, Nuremberg, .10–13 June, pp. 508-515, 1990.

[12] Bendiksen, K.H., Malnes, D., Moe, R., Nuland, S., The dynamic two-fluid model OLGA: theory and application. *SPE Prod. Eng.* Vol. 6, pp. 171–180, 1991.

[13] Zheng, G., Brill, J.P., Taitel, Y., "Slug Flow Behavior in a Hilly Terrain Pipeline", *Int. J. Multiphase Flow*, Vol. 20, PP. 63–79, 1994.

[14] Barnea, D., Taitel, Y., "A Model for Slug Length Distribution in Gas-Liquid Slug Flow", *Int. J. Multiphase Flow*, Vol. 19, PP. 829–838, 1993.

[15] Taitel, Y., Barnea, D., Effect of gas compressibility on a slug tracking model. *Chem. Eng. Sci.* 53, 2089–2097, 1998.

[16] Issa, R. I, Kempf, M. H. W., "Simulation of Slug Flow in Horizontal and Nearly Horizontal Pipes with the Two- Fluid Model", *Int. J. of Multi-Phase Flow*, Vol. 29, PP. 69-95, 2003.

[17] Woodburn P.J., Issa R.J., "Well-Posedness of One-Dimensional Transient, Two Fluid Models of Two-Phase Flows". In: *3rd International Symposium on Multiphase Flow*, ASME Fluids Engineering Division Summer Meeting, FEDSM98-5023, Washington, USA, 1998.

[18] Ishii, M., Mishima, K., "Two-fluid model and hydrodynamic constitutive relations", *Nucl. Eng.*, pp. 107–126, 1984.

[19] Black, P.S., Daniels, L.C., Hoyle, N.C., Jepson, W.P., Studying transient multiphase flow using the pipeline analysis code (PLAC). *J. Energy Resour. Technol.* 112, 25–29, 1990.

[20] Liou, M.S., Steffen, C.J., A new flux splitting scheme. *J. Comp. Phys.* 107, 23–29, 1993.

[21] Liou, MS., Edwards JR. AUSM schemes and extensions for low mach and multiphase flow.

- طول تماس مایع در قله اسلاگ با دیواره بالایی اسلاگ در شرایط فشار پایین بیشتر از فشارهای بالا است.

نمادها

K	اندیس، بیانگر نوع فاز گاز (g) یا مایع (l)
ρ	چگالی، بر حسب kg/m^3
P	فشار، بر حسب pa
V	سرعت بر حسب m/sec
α	کسر حجمی
Q	جمله چشمه در معادلات مومنتم
$P_{K,0}$	فشار جو، بر حسب pa
$\rho_{K,0}$	چگالی در فشار جو، بر حسب kg/m^3
δ	ثابت عددی
c	سرعت صوت مخلوط دوفازی، بر حسب m/sec
c_k	سرعت صوت فاز k، بر حسب m/sec
P^\pm	ضریب بی بعد وزنی فشاری
V^\pm	ضریب وزنی سرعتی، بر حسب m/sec
F^\pm	شار عددی یا بالادست یا پایین دست
F_C	ماتریس شار جابجایی
F_P	ماتریس شار فشاری
f_k	فاکتورهای ضریب اصطکاک
A_k	سطح مقطع مربوط به یک فاز، بر حسب m^2
$D_{h,k}$	قطر هیدرولیکی فاز k
μ	ضریب لزجت

مراجع

[1] Ansari, M.R., "Dynamical Behavior of Slug Initiation Generated by Short Waves in Two-Phase Air-Water Stratified Flow", *ASME HTD*, Vol. 361, PP. 289–295, 1998.

[2] Ansari, M.R., Shokri, V. Numerical modeling of slug flow initiation in a horizontal channels using a two-fluid model. *Int. J. Heat Fluid Flow*, Vol. 32, pp. 145-155, 2011.

[3] Fan, Z., Ruder, Z., Hanratty, T.J., "Pressure Profiles for Slugs in Horizontal Pipes", *Int. J. Multiphase Flow*, Vol. 19, PP. 421–437, 1993b.

[4] Andreussi, P., Bendiksen, K., Nydal, O.J., Void distribution in slug flow. *Int. J. Multiphase Flow* 19, 817–828, 1993.

[5] Bendiksen, K.H., Malnes, D., Nydal, O.J., On the modelling of slug flow. *Chem. Eng. Commun.* 141–142, 71–102, 1996.

- In: VKI LS 1999-03, Computational Fluid Dynamics. 1999.
- [22] Niu, Y.Y., Simple conservative flux splitting for multi-component flow calculations, Num. Heat Trans. 38, 203–222, 2000.
- [23] Saurel R, Abgrall R.” A multiphase Godunov method for compressible multifluid and multiphase flows” .J comp.physics; PP.425-67, 1999
- [24] Bestion, D., The physical closure laws in the cathare code, Nucl. Eng. Vol. 124, pp. 229–245, 1990.
- [25] Evje, S., Flatten, T. "Hybrid flux-splitting schemes for a common two-fluid model". J. Comp. Phys. 192,175-210 , 2003.
- [26] Issa, R. I, Bonizzi, M., Barbeau, S., Improved closure models for gas entrainment and interfacial shear for slug flow modeling in horizontal pipes, Int. J. Of Multi-Phase Flow, No. 32, pp. 1287-1293, 2006.
- [27] Andritsos, N., Hanratty, T.J., Influence of interfacial waves in stratified gas–liquid flows. AIChE J. 33, 444–454, 1987.
- [28] Spedding, P.L., Hand, N.P., Prediction in stratified gas–liquid co-current flow in horizontal pipelines. Int. J. Heat Mass Transfer 40, 1923–1935, 1997.
- [29] Kowalski, J. E., Wall and Interfacial Shear Stress in Stratified Flow in a Horizontal Pipe. AIChE Journal, 33 (2), 274-281, 1987.
- [30] Manolis, I.G., Mendes-tatsis, M.A., Hewitt, G.F., The effect of pressure on flow pattern transition and pressure gradient in two-phase horizontal slug. In: IChemE Research Event, Edinburgh, UK, pp. 847-849, 1995.
- [31] Vall’ee, C., Hohne, T., Prasser, H.M., Suhnel, T., Experimental investigation and CFD simulation of horizontal stratified two-phase flow phenomena, Nuclear Engineering and Design 238, 637–646, 2008
- [32] Ansari, M.R., Slug mechanism in horizontal duct and simulation based on one dimensional two-fluid dynamics, Ph.D. Thesis, Tsukuba University, Japan, 1990.