

Numerical Analysis of Hydraulic Jump in Offshore and Onshore Pipelines with Multi-Phase Flows


Mohammad Sadegh Narges¹, Zahra Ghadampour^{2*}, Tooraj Sabzevari³

1- Department of Civil Engineering, Lecturer, Estahban Branch, Islamic Azad University, Estahban, Iran.

2- Department of Civil Engineering, Estahban Branch, Islamic Azad University, Estahban, Iran.

3- Department of Civil Engineering, Estahban Branch, Islamic Azad University, Estahban, Iran.

* Zahra_ghadampour@yahoo.com

Received: 11 April 2021, Accepted: 22 August 2021  J. Hydraul. Homepage: www.jhyd.iha.ir

Abstract

Introduction: One of the phenomena in hydraulic engineering is hydraulic jump that has been studied both theoretically and experimentally. Hydraulic jump causes the flow to lose a considerable amount of energy due to the change in its regime from supercritical to subcritical flow. Since the fluid flows in a conduit may be either of a free type (open-channels hydraulic) or of an under-pressure type (under pressure conduits hydraulic), the hydraulic jump can occur in both situations regarding the type and function of the system. Therefore, it can be said that hydraulic jump can occur in open channels as well as stilling basin. Hydraulic jump can also occur in downward inclined pipes that contain a large air package. Additionally, since the present paper deals with pipelines, the following general statements can be mentioned about them. Pipelines are used to transfer fluids such as water, oil, gas, and wastewater offshore or onshore, either in the form of two-phase or multi-phase flows. In this regard, the importance and function of the flows inside the pipeline must be studied. Export pipelines transfer fluids from platforms or Floating Production, Storage, and Offloading (FPSO) to the beach and they usually contain gas-condensate or oil with a little water. Infield pipelines transfer flows from the wells or manifolds to the platform or FPSO [Guo et al (2014)]. Offshore pipeline design includes structural, geometrical, and hydraulic designs. In structural design such matters as buckling and collapse during the pipeline operation are considered, and several studies have been carried out regarding these matters. In geometrical design, diameter determination parameters (based on the flow capacity and precise analysis of the flow assurance in the offshore pipelines), and wall thickness (according to the standards) are considered, each of which is somehow related to the flow hydraulics. Therefore, hydraulic design of the pipeline is of utmost importance and problems related to this area must be examined precisely. However, it needs to be considered that most of the studies about hydraulic jump are carried out on channels, open conduits and stilling basin. Flows in open channels can shift from supercritical to subcritical. Such shifts happen very suddenly and appear due to hydraulic jump [Akan (2006), Lauchlan (2005) and Vasconcelos and Wright, (2009)]. Most of the studies about the hydraulic of pipelines that contain multi-phase liquid and gas flows concentrate on the function of flow regimes, pressure and sever slug. Therefore, it can be claimed that there is a lack in studying hydraulic jump in under pressure pipelines with multi-phase liquid-gas flows, because most of the studies are carried out on wastewater transfer lines and open conduits. The present paper, therefore, deals with the numerical analysis of hydraulic jump in the pipelines with two phase water-air flows. To this aim, some experimental information has

been taken from Pothof (2011) to verify the accuracy of findings and numerical modeling. It must be noted that Pothof has worked on wastewater pipelines that function gravitationally, while this study deals with under pressure pipelines in offshore conditions.

Methodology: Regarding Pothof's experimental work (2011) which analyzes the occurrence of hydraulic jump, and using its data, the hydraulic jump is then numerically analyzed.

In order to analyze the hydraulic jump numerically, roughness values, geometrical properties of the pipeline, and the angles are specified. General characteristics of the submerged pipe are also presented. Some other properties include: diameter=8in, water flowrate=128160kg/hr, air flowrate=32040kg/hr.

Pressure loss in the pipelines with multi-phase flows, includes frictional and hydrostatic pressure loss, is calculated based on mixture density and velocity. In hydrostatic pressure loss, it must be noted that since in the horizontal pipelines $\Delta Z=0$, the pressure loss is therefore zero, too. In upward inclined pipelines this value is positive (in line with increasing the total loss) and in downward inclined pipelines it is negative (in line with decreasing the total loss).

In order to determine flow regimes semi-theoretically, Taitel and Dukler (1976) modeled a stratified flow in a pipe as a first step, presupposing that the flow has been stable. Then, they determined how the flow regime was transferred from stratified to other flow regimes. The results of their analyses that are presented in a map for two-phase gas-liquid flow is used in this paper to determine flow regimes in two phase flow.

Results and Discussion: Hydraulic jump occurs in open water transfer structures and channels and its behavior and occurrence in such situations is studied precisely. Similarly, it is important to study it in pipelines, because it affects the behavior of the fluid inside the pipeline. When there is a pipeline containing a two-phase water-air flow, it can be assumed that the fluid inside the pipeline might face a hydraulic jump. Predicting such a phenomenon and its effects on pipeline during its working lifetime is a too important issue in the industries that deal with pipelines which transfer multi-phase fluids. Therefore, the present paper studies the occurrence of hydraulic jump in pipelines with two-phase water-air flows.

Conclusion: It can be concluded that based on the hydraulic gradient and the resulted losses, that hydraulic jump occurs when there is some air in the pipeline; and as the experimental researches showed, as the angle increases, the jump height increases, too. In all of the above mentioned analyses except for the mode in which the angle is 30 degrees, flow regimes, according to Taitel and Dukler are annular mist for A-B, annular mist for B-C, and annular mist for B-D. Regarding what has been said, it can be stated that when total pressure loss in the negative direction (i.e., when the hydrostatic loss overcomes frictional loss) approaches zero, the flow regime might change.

Keywords: Flow pattern, multi-phase flow, hydraulic jump, flow regime, Taitel and Dukler.



© 2021 Iranian Hydraulic Association, Tehran, Iran.
This is an open access article distributed under the terms and conditions of the
Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0 license)

(<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

بررسی عددی رخداد پرش هیدرولیکی در خطوط لوله تحت جریان دو فازی

محمد صادق نرگس^۱، زهرا قدم پور^{۲*}، تورج سبزواری^۳

۱- کارشناسی ارشد عمران- سازه‌های هیدرولیکی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد استهبان.

۲- عضو هیئت علمی دانشگاه آزاد اسلامی واحد استهبان.

۳- عضو هیئت علمی دانشگاه آزاد اسلامی واحد استهبان.

* Zahra_ghadampour@yahoo.com

دریافت: ۱۴۰۰/۰۱/۲۲، پذیرش: ۱۴۰۰/۰۵/۳۱ و ب‌گاه نشریه هیدرولیک: www.jhyd.iha.ir

چکیده: همان طور که پرش هیدرولیکی در آبراهه(ها) و سازه‌های انتقال آب روباز رخ می‌دهد و بررسی رخداد و رفتار آن در این سازه‌ها مهم و مورد توجه است، این پدیده در خطوط لوله چند فازی و به طور خاص خطوط لوله‌های فراساحلی که موادی مانند نفت و گاز همزمان جریان دارند رخ می‌دهند. افزون بر آن، جریان آب و هوا در بسیاری از سامانه‌های انتقال آب و فاضلاب نیز ممکن است بر شرایطی هیدرولیکی جریان تأثیر گذار باشند. از این رو هنگامی که خطوط لوله تحت جریان دو فازی آب و هوا قرار داشته باشد می‌توان این فرضیه را در نظر داشت که ممکن است سیال درون خط لوله با پدیده پرش هیدرولیکی رو به رو شود، که پیش بینی این پدیده در طول عمر کاری خط لوله و تأثیر گذاری آن بر روی خط لوله می‌تواند یکی از مسئله‌های مهم در صنایع انتقال سیال‌های چند فازی توسط خطوط لوله به شمار آید. در این مقاله در آغاز روند تحقیق آزمایشگاهی پوتوف بر روی خط لوله‌ای حاوی جریان دو فازی آب و هوا در شرایط معین در نرم افزار PIPESYS شبیه سازی و صحت سنجی شده و با استناد به اینکه نتایج عددی به دست آمده از نرم افزار با نتایج آزمایشگاهی ارائه شده سازگاری مناسب داشته، به بررسی شرایط ساختار الگوهای جریان، پیش بینی و اثرگذاری‌های آن‌ها در خطوط لوله و به تبع آن بررسی موقعیت پرش هیدرولیکی با توجه به زوایای مختلف خطوط لوله تحت جریان دو فازی آب و هوا پرداخته شده است. نتایج حاصل حاکی از آن است که الگوهای جریانی در زاویه‌های مختلف یکسان بوده و تنها استثنا، در زاویه ۳۰ درجه بوده که این امر به علت نزدیک بودن میزان‌های افت‌های اصطکاک و افت‌های هیدرواستاتیکی است. همچنین بررسی‌ها گویای آن است که سرعت متوسط لازم برای متعادل نگه داشتن بسته‌های هوا در زاویه‌های مختلف یکسان نیست و پرش هیدرولیکی برای شکست حباب‌های بزرگتر گاز (هوا) به حباب‌های کوچکتر که قابل حمل توسط جریان دوفازی باشد رخ می‌دهد.

کلید واژگان: الگوی جریان، جریان چند فازی، پرش هیدرولیکی، رژیم‌های جریانی، تایتل و داکلر.

۱- مقدمه

آزاد (هیدرولیک آبراهه‌های باز) و تحت فشار (هیدرولیک مجاری تحت فشار) باشد پدیده پرش هیدرولیکی در هر دو نوع مجرا با توجه به نوع و کار سامانه می‌تواند رخ دهد. خطوط لوله به منظور انتقال آب، نفت، گاز، فاضلاب و یا جریان‌های دو یا چند فازی به صورت درون ساحلی^۱ و فراساحلی استفاده می‌شوند. خطوط لوله فراساحلی متشکل از خطوط لوله درون میدانی و خطوط لوله صادر کننده می‌باشند. خطوط لوله

یکی از پدیده‌هایی که هم به صورت نظری و هم عملی در مهندسی هیدرولیک تحقیقات زیادی در رابطه با آن صورت پذیرفته پدیده پرش هیدرولیکی است (Akan, 2006). این پدیده باعث می‌شود که جریان میزان انرژی شایانی را طی تغییر وضعیت از حالت فرا بحرانی به زیر بحرانی از دست دهد. با توجه به اینکه جریان سیال در یک مجرا می‌تواند به دو صورت جریان

¹ Onshore

خطوط لوله رو به پایین و انتقال آن توسط پرش هیدرولیکی (Lubbers and Clemens, 2007) انجام شده است. همچنین با توجه به تحقیقات گذشتگان می توان به نکات مهم و شایان توجه زیر در زمینه پرش هیدرولیکی اشاره کرد. پرش های هیدرولیکی گاهی وقت ها در لوله هایی که دارای شیب نزولی هستند و حاوی یک بسته ی هوایی عظیم می باشند تشکیل می شوند. بررسی ها حاکی از این است که میزان خارج سازی هوا از طریق عمل پمپاژ در پرش هیدرولیکی که در لوله شکل می گیرد با نیروی پسای وارد بر بسته های هوایی مرتبط است (Lauchlan et al., 2005). از این رو عمل پرش تنها به منظور شکستن حباب های بزرگ هوایی به حباب های کوچکتر که دبی جریان قادر به حمل آن ها باشند انجام می شود. با توجه به تحقیقات گذشته اگر دبی جریان در این شرایط هم قادر به حمل حباب های کوچک نباشد آنگاه عمل کره ای شدن پرش تأثیری بر میزان هوای خارج شده توسط سامانه ندارد (Narges and Ghadampour, 2018; Ghadampour and Narges, 2020). حداکثر میزان پمپاژ هنگامی حاصل می شود که عمق جریان در زیر بسته ی هوا به عمق نرمال برای تخلیه و شیب مورد نظر برسد. بررسی ها نشان می دهد که سرعت متوسط لازم برای متعادل نگه داشتن بسته های هوا در زاویه های مختلف یکسان نیست و زاویه ی سطح آب در انتهای بسته ی هوایی بر کارایی نیروهای بیرون کننده تأثیر گذار است (Ghadampour and Narges, 2020). با توجه به موارد عنوان شده، تحقیقات بسیار کمی در رابطه با پرش هیدرولیکی در مجاری تحت فشار تحت تأثیر جریان های چند فازی انجام شده که از آن جمله می توان به تحقیق آزمایشگاهی پوتوف (Pothof, 2011) بر روی اثرگذاری های نسبت طول به قطر خط لوله شیبدار با زاویه ۱۰ درجه حاوی جریان دو فاز آب-هوا و اثرگذاری های آن بر روی کیفیت آب در خط لوله اشاره کرد. در این تحقیق به بررسی عددی رخداد پدیده پرش هیدرولیکی، شکل و اثرگذاری های رژیم های جریان با توجه به افت های

صادر کننده^۱ سیال ها را از سکوی های نفتی یا FPSO^۲ (تولید، ذخیره، تخلیه) به ساحل منتقل کرده و جریان درون آنها اغلب جریان گاز-کاندنسیت^۳ و با جریان نفت به همراه میزان کمی آب است. خطوط لوله درون میدانی جریان چاه را از چاه ها یا چندراهه ها^۴ به سکو یا FPSO می رساند (Guo et al., 2014; Ghadampour and Narges, 2020). طراحی خطوط لوله های فراساحلی^۵ که سیال هایی مانند نفت و گاز را به خشکی منتقل می کنند شامل طرح سازه ای، هندسی و هیدرولیکی است. در زمینه طراحی سازه ای مسائلی همچون کمانش، گسیختگی و طول دهانه ها در زمان اجرای خطوط لوله در طرح سازه ای بررسی می شوند که در این زمینه تحقیقات مختلفی صورت پذیرفته است (Peek et al., 2021; Zhang et al., 2020). در طرح هندسی خطوط لوله، فراسنجه های تعیین قطر (بنا به ظرفیت جریان و تحلیل دقیق ایمنی جریان برای خطوط لوله فراساحلی) و ضخامت بدنه (استفاده از استانداردها) مد نظر بوده که اینها خود به نوعی به هیدرولیک جریان وابسته می باشند (Guo et al., 2014). بنابراین طراحی هیدرولیکی خطوط لوله اهمیت بسیار زیادی دارا بوده و مسئله های مطرح در این زمینه بایستی به دقت بررسی شوند. اما باید توجه داشت که غالب تحقیقات صورت گرفته در مورد رخداد پرش هیدرولیکی در آبراهه ها، مجاری روباز غیر تحت فشار و حوضچه های آرامش است. جریان در آبراهه های باز می تواند از حالت فرا بحرانی به حالت زیر بحرانی تغییر کند. تغییرات از حالت فرا بحرانی به زیر بحرانی به طور ناگهانی بوده و به واسطه پرش هیدرولیکی نمایان می شود. در هیدرولیک خطوط لوله تحت جریان های چند فاز مایع و گاز، غالب تحقیقات بر روی کار رژیم های جریانی^۶، فشار و لختگی شدید^۷ است (Narges and Ghadampour, 2018; Ghadampour and Narges, 2020). افزون بر آن تحقیقاتی در مورد به دام افتادگی هوا در تونل های طوفانی^۸ (Vasconcelos and Wright, 2009) و تونل های برق آبی^۹ (Wickenhäuser and Kriewitz, 2009)، بررسی بسته های هوا در تونل های برق آبی و فاضلاب (Capart et al., 1997) و انباشت بسته های هوا در

⁶ Flow patterns operation

⁷ Severe slugging

⁸ Storm water tunnels

⁹ Hydropower tunnels

¹ Export pipelines

² Floating Production, Storage, and Offloading

³ Gas-condensate

⁴ Manifolds

⁵ Offshore pipelines

انباشت حجمی مایع، حجمی از خط لوله که توسط مایع اشغال شده، حجم کل همان بخش از خط لوله، چگالی ترکیبی گاز-مایع، چگالی مایع، چگالی گاز، سرعت ترکیبی گاز-مایع و طول خط لوله می‌باشند.

نکته شایان توجه در رابطه با افت فشار هیدرواستاتیکی این است که در خطوط لوله افقی به دلیل اینکه $\Delta Z=0$ میزان این افت نیز صفر است، در شیب رو به بالا مقدار آن مثبت (در جهت افزایش افت کل) و در شیب‌های رو به پایین مقدار آن منفی (در جهت کاهش افت کل) است. در ضمن افت فشار هیدرواستاتیک تابعی از چگالی سیال‌های درون خط لوله است. در صورتی که افت اصطکاک به ویژگی‌های سیال و شرایط جریان درون خط لوله بستگی دارد.

با توجه به معادله‌های بالا افت فشار کل برابر است با:

$$\Delta_{total} = \Delta_{Hydrostatic} + \Delta_{Frictional} \quad (8)$$

که $\Delta P_{Frictional}$ و $\Delta P_{Hydrostatic}$ به ترتیب افت فشار ناشی از اصطکاک و افت فشار هیدرواستاتیکی هستند.

۲-۲- معرفی نرم افزار HYSYS و PIPESYS و روش

عددی مورد استفاده برای حل معادله‌ها

PIPESYS یک نرم افزار انحصاری است که به طور مشترک توسط شرکت (Neotechnology Consultants) که پیشتر به Neotec معروف بود) و Hyprotech طراحی شده است.

PIPESYS Extension یک بسته‌ی نرم افزاری هیدرولیکی خط لوله است که برای شبیه سازی سامانه‌های خط لوله در چارچوب HYSYS استفاده می‌شود. PIPESYS کاملاً با بسته‌های سیال گاز، مایع و گاز/مایع در HYSYS سازگار است.

حل همزمان معادله‌های پیوستگی، مومنتم و انرژی، روند تغییرپذیری‌های فشار در جریان‌های چند فاز را مشخص می‌سازد. با نوشتن معادله‌های مومنتم یا انرژی برای یک حجم کنترل از جریان دو فاز، تغییر پذیری‌های فشار همانند جریان تک فاز در شکل کلی به صورت معادله (۱) بیان می‌شود.

باتوجه به آنکه معادله‌های حاکم بر جریان به صورت پویا و از نوع معادله‌های دیفرانسیل معمولی و غیر خطی می‌باشند حل این معادله‌ها در نرم افزار با استفاده از روش اویلر غیر ضمنی می‌باشد. افزون بر آن، با توجه به آنکه سرعت تغییر پذیری‌های حجم، انرژی و ترکیب درصد اجزا، با زمان برابر نیست به همین دلیل

اصطکاک و هیدرواستاتیکی در خطوط لوله تحت جریان دوفازی آب- هوا در زاویه‌های مختلف پرداخته می‌شود. شایان یادآوری است که برای تعیین رژیم‌های جریانی از روش نیمه نظری تایتل و داکلر به علت پاسخ‌های منطقی‌تر و نزدیکتر به واقعیت استفاده گردیده است که این روش در کارهای آزمایشگاهی و تحقیقاتی (Thome (2014) و Lauchlan et al. (2005) استفاده شده است.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- روابط محاسبه افت فشار در جریان چند فاز

رکن نظری معادله‌های جریان سیال معادله عمومی انرژی بوده که بیانگر تعادل یا حفظ انرژی بین دو نقطه در یک سامانه است. معادله انرژی را با استفاده از اصول ترمودینامیک می‌توان تغییر داده و همان طور که در معادله زیر نشان داده شده است معادله‌ای برای گردان فشار به وجود آورد. این معادله تغییرپذیری‌های فشار در لوله‌ای با شیب α نسبت به افق را نشان می‌دهد (Takacs, (2005)

$$\frac{dP}{dL} = \left(\frac{dP}{dL}\right)_{elevation} + \left(\frac{dP}{dL}\right)_{friction} + \left(\frac{dP}{dL}\right)_{acceleration} \quad (1)$$

$$\frac{dP}{dL} = \frac{g}{g_c} \rho \sin \alpha + \frac{f \rho v^2}{2g_c d} + \frac{\rho v}{g_c} \frac{dv}{dL} \quad (2)$$

که g_c ، ρ ، v ، d ، f و α به ترتیب ضریب تبدیل 32.2، سرعت، چگالی، قطر لوله، ضریب اصطکاک و زاویه خط لوله نسبت به افق هستند.

افت فشار در خطوط لوله تحت جریان چند فاز شامل: معادله افت فشار اصطکاک و افت فشار هیدرواستاتیکی در حالت چند فاز است که به صورت‌های زیر محاسبه می‌شوند (Simsci, (2001; Takacs, 2005):

$$\Delta P_f = \frac{2f \rho_m v_m^2 L}{g_c d} \quad (3)$$

$$\Delta P_{Hydro} = \frac{g}{g_c} \rho_m \Delta Z \quad (4)$$

سرعت و چگالی ترکیبی نیز از رابطه‌های زیر به دست می‌آیند:

$$v_m = \frac{Q_l + Q_g}{A} \quad (5)$$

$$\rho_m = \rho_l H_l + \rho_g (1 - H_l) \quad (6)$$

$$H_l = \frac{V_l}{V} \quad (7)$$

که Q_l ، Q_g ، A ، H_l ، V_l ، V ، ρ_m ، ρ_g ، ρ_l ، v_m ، L به ترتیب دبی حجمی مایع، دبی حجمی گاز، سطح مقطع عرضی خط لوله،

الگوهای جریان جریان همزمان گاز و مایع در یک لوله افقی در شکل (۲) نشان داده شده است و به صورت زیر دسته بندی می شود جریان روان لایه‌ای، جریان موجی لایه‌ای، جریان لخته‌ای، جریان حلقوی و جریان حبابی پراکنده می باشد. اگر خط لوله به صورت شیب دار باشد، شکل گیری الگوهای جریانی تابع شیب می باشند. در جریان شیب دار روبه بالا الگوی جریانی تا حدودی همیشه لخته‌ای یا حلقوی می باشد. در جریان شیب دار روبه پایین الگوی جریانی اغلب لایه‌ای (به علت تاثیر جاذبه بر مایع و کاهش انباشت حجمی مایع) یا حلقوی (در صورت افزایش شدید دبی جریان فاز گازی) می باشد (Dukler and Taitel, 1977). روش های پیش بینی الگوهای جریانی به طور کلی به دو دسته روش های آزمایشگاهی (Beggs and Brill, 1973; Hoogendoorn, 1959) و تحلیلی (Barnea et al., 1976; Taitel and Dukler, 1980) طبقه بندی می شوند. در این تحقیق برای تعیین الگوهای جریانی از روش نیمه نظری تایتل و داکلر برای لوله های افقی و شیب دار استفاده شده است (Thome, 2014).

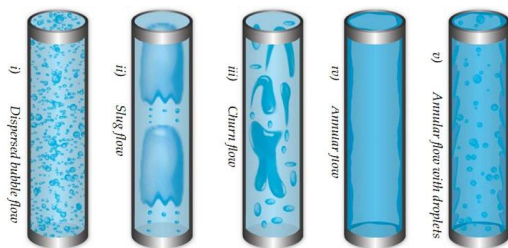


Fig. 1 Gas-liquid flow regimes in upward vertical pipeline, Guo et al. (2014).

شکل ۱ رژیم جریان گاز - مایع عمودی (Guo et al. (2014).

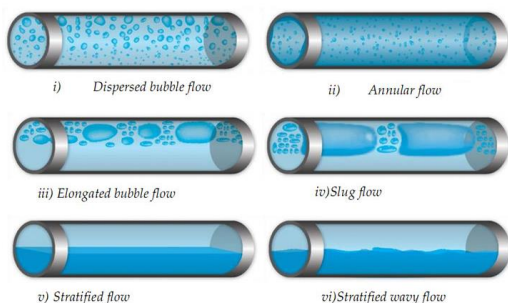


Fig. 2 Gas-liquid flow regimes in horizontal and near horizontal pipeline, Guo et al. (2014).

شکل ۲ رژیم جریان گاز - مایع افقی و نزدیک به افقی

(Guo et al. (2014).

این کمیت‌ها به طور همزمان در هر گام زمانی حل نمی شوند. معادله های حجم در هر گام زمانی و معادله های انرژی در هر دو گام زمانی و موازنه های مربوط به ترکیب اجزا هر دو گام زمانی یکبار محاسبه می شوند.

۲-۳- رژیم های جریانی

در خطوط لوله‌ای فراساحلی جریان چند فازی ممکن است به علت تغییر پذیری ارتفاع خطوط لوله رژیم های جریانی از لحاظ مکانی تغییر کنند. همچنین به علت تغییر پذیری های دبی آب، نفت و گاز در طول کل عمر میدان رژیم جریان نیز ممکن است با گذشت زمان تغییر کند. با کاهش دبی ها در طول زمان این امکان وجود دارد که جریان از حالت پایدار به حالت ناپایدار تبدیل شود (Guo et al., 2014). چگونگی پیش بینی حالت گذار رژیم جریانی یکی از مهم ترین موضوع های مورد بررسی در جریان چند فازی است.

از این رو تفاوت های ویژگی های فیزیکی (به طور عمده چگالی) بین مایع و گاز، هنگامی که گاز و مایع به طور همزمان در خط لوله در جریان باشند، می توانند باعث شکل گیری رژیم ها یا الگوهای جریانی متفاوتی شوند. رژیم های جریانی از لحاظ سطح های مشترک گاز-مایع و ساز و کار جرم، مومنتوم، و انتقال انرژی بین فازها با هم متفاوت هستند. از گذشته تا کنون تحقیقات زیادی در رابطه با تقسیم بندی رژیم های جریانی صورت پذیرفته است. با این وجود، دسته بندی رژیم های جریان به طور کلی قراردادی بوده و به طور عمده به مشاهده های فردی بستگی دارد و در یک موقعیت جریانی مشخص، افراد مختلف ممکن است تعریف های متفاوتی از رژیم جریان داشته باشند به همین دلیل می توان دسته بندی های متفاوتی را در تحقیقات مختلف مشاهده کرد. در جریان همزمان گاز - مایع عمودی، الگوهای جریان به اختصار شامل جریان حبابی، جریان لخته‌ای^۱، جریان کره‌ای^۲، جریان حلقوی^۳ و جریان قطره‌ای^۴ می باشند، که در شکل (۱) نشان داده شده اند (Guo et al., 2014). الگوهای جریان دو فازی در لوله های افقی همانند جریان های عمودی است اما پخشیدگی مایع تحت تاثیر گرانش است که برای طبقه بندی مایع در پایین لوله و گاز در قسمت بالا عمل می کند.

³ Annular flow

⁴ Mist flow

¹ Slug flow

² Churn flow

جریان مایع تک فازی، چگالی گاز، چگالی مایع، گرانشی یا لزجت سینماتیک مایع، سرعت سطحی گاز، سرعت سطحی مایع و زاویه شیب خط لوله هستند.

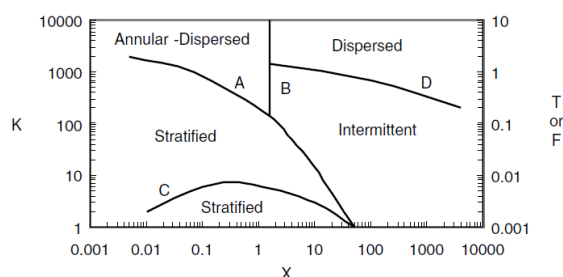


Fig. 3 Taitel-Dukler flow regime map for horizontal flow (Taitel and Dukler, 1976)

شکل ۳ نقشه‌ی رژیم جریان تایتل-داکالر برای جریان افقی (Taitel and Dukler, 1976)

۳- نتایج حاصل از مدل سازی

با توجه به کار آزمایشگاهی پوتوف (Pothof, 2011) که به بررسی پرفش هیدرولیکی بر روی خط لوله‌ای تحت جریان دوفازی آب و هوا با توجه به نیمرخ شکل شماره ۴، صورت گرفته، انجام شده است. بدین منظور خط لوله‌ای شامل زبری مطلق خط لوله فولادی^۱ 0.045mm، زاویه 10 درجه نسبت به افق، نسبت طول خط لوله به قطر آن 209 (L/D=209) که انتقال دهنده آب و هوا به طور همزمان هستند مدل سازی شد (دیگر ویژگی های خط لوله در جداول یک تا سه بیان شده است). نتایج بدست آمده از مدلسازی به شرح زیر می باشد.

جدول ۱ ویژگی های طول خط لوله.

Table 1 pipeline length properties.	
Characteristics	Length(M)
A-B	40
B-C	40
C-D	40

جدول ۲ ویژگی‌های کلی لوله مستغرق.

Table 2 General specifications of submerged pipeline	
Default Conductivities	Default Steel
Pipe Conductivity	28 Btu/hr-ft-F
Water Density	10 API
Water Viscosity	1 cP
Water Conductivity	0.299 Btu/hr-ft-F
Water Velocity	0.447 m/s
Water Heat Capacity	4.1813 J/g-K

۲-۳-۱- تعیین رژیم‌های جریان در خطوط لوله افقی

و شیب‌دار با استفاده از روش تایتل و داکالر

پیش‌بینی نوع الگوی جریان در خطوط لوله یکی از مسئله‌های با اهمیت در طول عمر سودمند آن است. در نتیجه تقسیم بندی‌های مختلفی برای رژیم‌های جریان حاکم انجام بر مبنای مشاهده های عینی رخدادها درون خط لوله در دسترس می‌باشد. همچنین در موارد مهندسی، مشاهده های عینی همیشه در دسترس نیست و باید روش‌های ساده ای برای پیش بینی رژیم‌های جریان درون خط لوله در اختیار باشد. از این رو نقشه‌های رژیم جریان برای تعیین حالت گذار رژیم جریان بر مبنای داده‌های تجربی و مدل های ساز و کاری و راهبردی توسعه داده شده‌اند.

Taitel and Dukler (1976) برای تعیین رژیم‌های جریان به صورت نیمه نظری، در آغاز جریان لایه‌ای را در یک لوله با فرض جریان پایا مدلسازی کردند و سپس شرایط چگونگی انتقال از رژیم جریان لایه‌ای به دیگر رژیم‌های جریان را تعیین کردند. نتایج تجزیه های انجام شده به صورت یک نقشه برای جریان‌های دوفازی گاز-مایع ارائه شده که در شکل (۳) نشان داده شده است. در نقشه ارائه شده، رژیم‌های جریانی توسط منحنی‌های گذار تعریف می‌شوند. منحنی‌های A و B توسط مختصات X و F، منحنی C توسط مختصات X و K و منحنی D توسط مختصات X و T تعریف می‌شوند. فراسنجه های X، K، F و T به صورت زیر و توسط رابطه‌های ۹-۱۲ محاسبه و تعریف می‌شوند (Guo et al., 2014).

$$X = \left[\frac{\left(\frac{dP}{dx} \right)_l^s}{\left(\frac{dP}{dx} \right)_g^s} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (9)$$

$$F = \frac{\rho_g}{(\rho_l - \rho_g)} \frac{U_{sg}}{\sqrt{Dg \cos \theta_p}} \quad (10)$$

$$T = \left[\frac{\left| \left(\frac{dP}{dx} \right)_l^g \right|}{(\rho_l - \rho_g)g \cos \theta_p} \right]^{1/2} \quad (11)$$

$$K = \left[\frac{\rho_l U_{sg}^2 U_{sl}}{(\rho_l - \rho_g)g v_l \cos \theta_p} \right]^{1/2} \quad (12)$$

که $(dp/dx)^g$ ، $(dp/dx)^l$ ، ρ_l ، ρ_g ، v_l ، U_{sg} و θ_p به ترتیب گرادیان فشار برای جریان تک فازی، گرادیان فشار برای

¹ Absolute pipe roughness

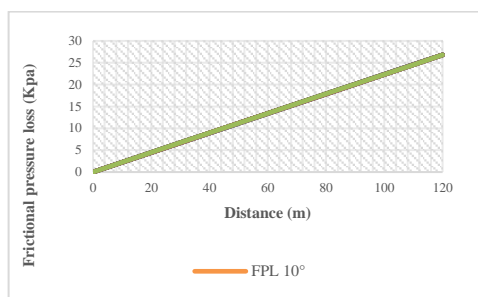


Fig. 6 Frictional pressure loss values for $\alpha (10^\circ)$

شکل ۶ میزان های افت اصطکاکی برای زاویه $\alpha (10^\circ)$ در طول مسیر (و قابل استفاده برای زاویه های دیگر)

زاویه ۱۰ درجه و سازگاری مناسب نتایج ارائه شده با مدل عددی در ادامه، به تجزیه و شبیه سازی حالت های دیگر تحت زاویه های مختلف و تحلیل و بررسی آن ها، پیش بینی رژیم های جریان، اثرگذاری های افت فشار اصطکاکی و هیدرواستاتیکی بر تغییرپذیری های رژیم های جریان حاکم بر خط لوله و رخداد پرش هیدرولیکی و ارتفاع آن تحت زاویه های مختلف برای لوله های مشخص تحت فشار 100.2 bar پرداخته شده است. به منظور بررسی های بیشتر عددی پرش هیدرولیکی به ذکر میزان ها و فراسنجه های موثر دیگر در روند شبیه سازی می پردازیم. ویژگی های هندسی این خط لوله در جدول ۱، ویژگی های کلی لوله مستغرق در آب دریا در جدول ۲ و ویژگی های درجه زاویه های مورد بررسی در جدول ۳ ذکر شده است. دیگر مشخصات همچون قطر برابر 8 in، زبری مطلق خط لوله فولادی 0.04572mm، دبی آب برابر با 128160 kg/hr، دبی هوا برابر با 32040 kg/hr و تحت فشار 100.2 bar می باشد.

جدول ۳ مقدار زوایای مورد بررسی برای شکل ۴

Table 3 Angles that have been analyzed for Fig. 4

Conditions	α (degree)
Condition 1	10
Condition 2	20
Condition 3	30
Condition 4	40
Condition 5	50

در این قسمت با استفاده از شبیه سازی های انجام شده توسط نرم افزارهای HYSYS/PIPESYE ابتدا با توجه به زاویه های مختلف خط لوله به بررسی موقعیت پرش هیدرولیکی (با توجه به موقعیت خط گرادیان هیدرولیکی)، تغییرپذیری های افت

با توجه به نقطه C در شکل ۴ و میزان های افت فشارهای اصطکاکی ($\Delta Frictional$) در نمودار شکل ۶ (که به علت اثرگذاری های جزئی و قابل چشم پوشی تغییر زاویه ها بر فراسنجه افت فشار ناشی از اصطکاک ($\Delta Frictional$) که در حد 0.001 می باشد، نمودار شکل ۶ تنها برای زاویه 10° که قابل استفاده برای دیگر زاویه های موجود در این تحقیق می باشد رسم و نشان داده شده است) و هیدرواستاتیکی ($\Delta Hydrostatic$) در شکل ۷ برای زاویه خط لوله 10° در این نقطه افت فشار کل حدود 9.5 Kpa + 0.95 بر مبنای واحد متر ستون آب می باشد در صورتی که گرادیان هیدرولیکی (با توجه به شکل ۵) در این نقطه 1.4 متر می باشد. این امر بیانگر رخداد پرش هیدرولیکی در این نقطه می باشد.

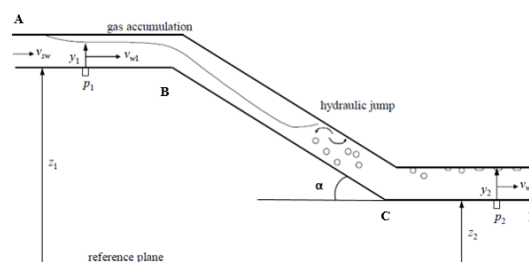


Fig. 4 Geometrical profile of the pipeline Pothof (2011)

شکل ۴ نیمرخ هندسی خط لوله (Pothof (2011)

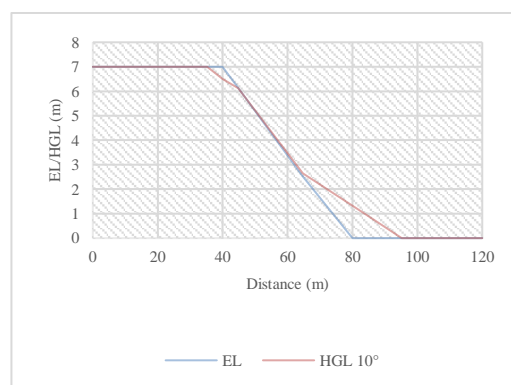


Fig. 5 Hydraulic grade line and elevation of pipeline for $\alpha=10^\circ-50^\circ$

شکل ۵ گرادیان هیدرولیکی و تراز خط لوله برای $\alpha=10^\circ-50^\circ$

با توجه به نتایج به دست آمده از نرم افزار و شکل ۵ نتایج منطبق با پاسخ آزمایشگاهی بوده و پرش هیدرولیکی در منطقه C در شکل ۴ رخ می دهد. در ضمن با توجه به کار آزمایشگاهی پوتوف بر روی اثرگذاری های نسبت طول به قطر خط لوله شیبدار با

فشار هیدرواستاتیکی، اصطکاکی و اثرگذاری های آن بر روی رژیم‌های جریانی و افت فشار کل ($\Delta_{total} = \Delta_{Hydrostatic} + \Delta_{Frictional}$) در سرتاسر خط لوله پرداخته شده است. با توجه به تجزیه های انجام شده برای زاویه ۱۰ درجه و نتایج بیان شده در جدول ۴ (حالت اولیه که در بخش صحت سنجی نرم افزار بررسی شد) استنباط می‌شود که رژیم‌های جریانی در طول کل مسیر خط لوله ثابت بوده و از نوع حلقوی قطره‌ای می‌باشد. با توجه به نقطه C در شکل ۴ و میزان های افت فشارهای اصطکاکی و هیدرواستاتیکی در شکل‌های ۶ و ۸ در این نقطه افت فشار کل ($\Delta_{total} = \Delta_{Hydrostatic} + \Delta_{Frictional}$) حدود

۱+۱.۸۶ Kpa + ۰.۱۸۶ بر مبنای واحد متر ستون آب) برای حالت $\alpha=20^\circ$ می‌باشد در صورتی که گرادیان هیدرولیکی (با توجه به شکل ۷) در این نقطه ۳ متر می‌باشد. یعنی دو فراسنجه افت فشار کل در جهت تغییر وضیت جریان و گرادیان هیدرولیکی در جهت رخداد پرش هیدرولیکی عمل می‌کنند که با منفی شدن افت فشار کل جریان آشفته تری رخ خواهد داد. این امر بیانگر رخداد پرش هیدرولیکی در این نقطه می‌باشد. در این حالت میزان افت اصطکاکی هنوز غالب می‌باشد. با توجه به جدول ۴ زاویه ۲۰ درجه استنباط می‌شود که مانند حالت پیش رژیم‌های جریانی در طول کل مسیر خط لوله ثابت بوده و از نوع حلقوی قطره‌ای می‌باشد.

جدول ۴ الگوهای جریانی حاکم در طول مسیر خط لوله شکل ۴ برای $\alpha=10^0-50^0$

Table 4 Flow patterns through the pipeline in figure 4 for $\alpha=10^0-50^0$

LENGTH (m)	FLOW PATTERN	FLOW PATTERN	FLOW PATTERN	FLOW PATTERN	FLOW PATTERN
	10°	20°	30°	40°	50°
0	Annular	Annular	Annular	Annular	Annular
	Mist	Mist	Mist	Mist	Mist
40	Annular	Annular	Annular	Annular	Annular
	Mist	Mist	Mist	Mist	Mist
49.52	Annular	Annular	Wave	Annular	Annular
	Mist	Mist		Mist	Mist
80	Annular	Annular	Wave	Annular	Annular
	Mist	Mist		Mist	Mist
110.5	Annular	Annular	Annular	Annular	Annular
	Mist	Mist	Mist	Mist	Mist
120	Annular	Annular	Annular	Annular	Annular
	Mist	Mist	Mist	Mist	Mist

فشار کل (Δ_{total}) حدود ۴.۱۲ Kpa- ($\alpha=30^\circ$ در این نقطه افت فشار کل (Δ_{total}) حدود ۴.۱۲ Kpa- بر مبنای واحد متر ستون آب) می‌باشد در صورتی که گرادیان هیدرولیکی (با توجه به شکل ۷ برای زاویه ۳۰ درجه) در این نقطه ۵.۱ متر می‌باشد. این امر بیانگر رخداد پرش هیدرولیکی در این نقطه می‌باشد. با توجه به میزان منفی به دست آمده مشخص می‌شود که میزان افت هیدرو استاتیکی بر افت اصطکاکی چیرگی کرده و در جهت عکس افت اصطکاکی (که باعث کاهش افت کل می‌شود) عمل می‌کند. با توجه به جدول ۴ زاویه ۳۰ درجه نتیجه گیری می‌شود که با رسیدن زاویه به ۳۰ درجه نوع رژیم جریانی در بخش شیبدار دستخوش تغییر شده و به حالت موجی تغییر یافته است. علت اصلی این رویداد را می‌توان با توجه به شکل‌های ۶ و ۸ به دلیل چیرگی افت هیدرواستاتیکی بر افت اصطکاکی با میزان های اندک در

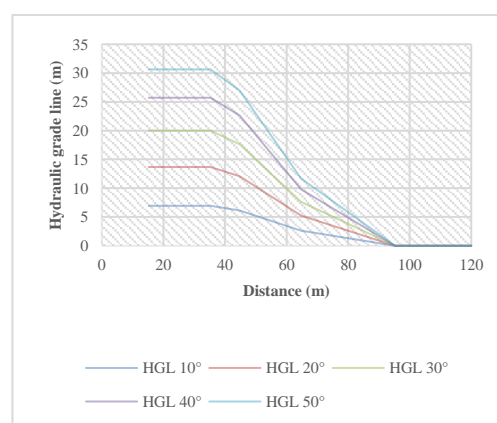


Fig. 7 Hydraulic grade line for $\alpha (10^\circ - 50^\circ)$

شکل ۷ گرادیان هیدرولیکی در طول مسیر برای زاویه های $\alpha (10^0 - 50^0)$

با توجه به نقطه C در شکل ۴ و میزان های افت فشارهای اصطکاکی و هیدرواستاتیکی در شکل‌های ۶ و ۸ برای زاویه

با توجه به نقطه C در شکل ۴ و میزان های افت فشارهای اصطکاکی و هیدرواستاتیکی در شکل های ۶ و ۸ برای زاویه ۵۰ درجه در این نقطه افت فشار کل حدود 9 Kp (-0.9) بر مبنای واحد متر ستون آب) می باشد در صورتی که گرادیان هیدرولیکی (با توجه به شکل ۷ برای زاویه ۵۰ درجه) در این نقطه 7.7 متر می باشد. این امر بیانگر رخداد پرش هیدرولیکی در این نقطه می باشد. با توجه به مقدار منفی به دست آمده مشخص می شود که میزان افت هیدرواستاتیکی بر افت اصطکاکی چیرگی کرده و در جهت کاهش افت کل می باشد. در این سه حالت آخر تاثیر ترم افت اصطکاکی توسط ترم هیدرواستاتیکی به کل از بین رفته است و در جهت عکس افت اصطکاکی عمل می کند. با توجه به جدول ۴ و گفته های پیشین جریان در طول کل خط لوله یکسان و از نوع حلقوی قطره ای می باشد.

۴- نتیجه گیری

در این بررسی مسئله هایی مانند پیش بینی و تاثیر سرعت متوسط لازم، اثرگذاری های رخداد پرش هیدرولیکی در زاویه های مختلف و تاثیر آن بر رژیم های جریان در خطوط لوله با حالت دوفازی آب- هوا ارزیابی و تبیین شده است.

با توجه به گرادیان های هیدرولیکی و افت های حاصله می توان نتیجه گرفت که پرش هیدرولیکی در حضور فاز هوا در خط لوله رخ داده و با افزایش درجه زاویه ارتفاع پرش نیز بیشتر شده که با توجه به تحقیقات آزمایشگاهی صحت این امر تأیید شد. در همه تجزیه های بالا به جز در حالت زاویه ۳۰ درجه رژیم های جریان برای طول A-B=Annular و داکلر برای طول B-Mist، برای طول B-C= Annular Mist و برای طول D=Annular Mist است. برای زاویه ۳۰ درجه نکته شایان توجه آن است که این حالت در زاویه هایی رخ می دهد که میزان افت هیدرواستاتیکی به افت اصطکاکی بسیار نزدیک بوده، در حالی که میزان افت هیدرواستاتیکی بر افت اصطکاکی غالب باشد یعنی میزان افت فشار کل Δ_{total} در حالت منفی به صفر نزدیک باشد.

با توجه به موارد یاد شده می توان بیان داشت هنگامی که میزان افت فشار کل Δ_{total} عددی منفی و در جهت عدد صفر (-) باشد یعنی افت هیدرواستاتیکی بر افت اصطکاکی غالب باشد می توان شاهد تغییر رژیم جریانی بود. پیش بینی این

جهت افت هیدرواستاتیکی دانست. این حالت (تغییر ناگهانی رژیم های جریانی) در زاویه هایی رخ می دهد که میزان افت هیدرواستاتیکی به افت اصطکاکی بسیار نزدیک بوده، در حالی که میزان افت هیدرواستاتیکی بر افت اصطکاکی غالب باشد یعنی میزان افت فشار کل عددی منفی باشد و تا حدودی به مقدار صفر نزدیک باشد (برای این مسئله چیزی حدود زوایای 28-37 درجه که میزان افت کل آن (-0.25to-0.70) می باشد). به عبارت دیگر یعنی لحظه چیرگی افت فشار هیدرواستاتیکی بر افت فشار اصطکاکی (حالت گذار) و برعکس می توان شاهد تغییر پذیری های رژیم های جریانی بود.

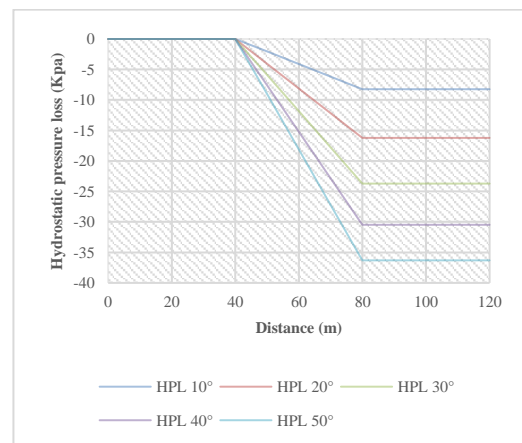


Fig. 8 Hydrostatic pressure loss values for α (10° - 50°)

شکل ۸ میزان افت فشار هیدرواستاتیکی برای زاویه

α (10° - 50°) در طول مسیر

با توجه به نقطه C در شکل ۴ و مقادیر افت فشارهای اصطکاکی و هیدرواستاتیکی در شکل های ۶ و ۸ برای زاویه ۴۰ درجه در این نقطه افت فشار کل حدود 7.4 Kpa (-0.74) بر مبنای واحد متر ستون آب) می باشد در صورتی که گرادیان هیدرولیکی (با توجه به شکل ۷ برای زاویه ۴۰ درجه) در این نقطه ۷/۷ متر می باشد. این امر بیانگر رخداد پرش هیدرولیکی در این نقطه می باشد. با توجه به میزان منفی به دست آمده مشخص می شود که مقدار افت هیدرواستاتیکی بر افت اصطکاکی غلبه کرده و در جهت عکس افت اصطکاکی (که باعث کاهش افت کل می شود) عمل می کند. همچنین مشاهده می کنیم که میزان افت هیدرواستاتیکی به مقدار به نسبت زیادی می باشد و به عدد منفی یک متر ستون آب نزدیک می شود بنابراین با توجه به گفته های پیش (جدول ۴) الگوی جریان در طول کل خط لوله یکسان و از نوع حلقوی قطره ای می باشد.

Beggs, H.D. and Brill, J.P. (1973). A Study of Two-Phase Flow in Inclined Pipes. *J. Pet. Tech.*, 25(5), 607-617.

Brill, J.P., and Beggs, H.D., (1991). Two-Phase Flow in Pipes, Tulsa University Press, 640 p.

Capart, H., Sillen, X. and Zech, Y. (1997). Numerical and experimental water transients in sewer pipes. *J. Hydr. Res.* 35(5), 659-672.

Dukler, A.E. and Taitel, Y. (1977). Flow regime transitions for vertical upward gas liquid flow: A preliminary approach through physical modelling, Progress Report No. 1, University of Houston, NUREG-0162.

Ghadampour, Z. and Narges, M.S. (2020). The effects of flow regimes on maximum pressure in offshore pipelines, *J. Water Res. Eng.*, 12, 77-92. (In Persian)

Guo, B., Song, S., Ghalambor, A. and Lin, T.R. (2014). Offshore Pipelines: Design, Installation, and Maintenance, 2nd Ed., Elsevier Inc., 400 p.

Hoogendoorn, C.J. (1959). Gas-Liquid Flow in Horizontal Pipes. *Chem. Eng. Sci.*, 9(4), 205-217.

Lubbers, C.L. and Clemens, F.H.L.R. (2007). Scale effects on gas transport by hydraulic jumps in inclined pipes; comparison based on head loss and breakdown rate, 6th Int. Conference on Multiphase Flow (ICMF), Leipzig.

Narges, M.S. and Ghadampour, Z. (2014). A Study of Pressure Loss and Recovery in Offshore Pipelines, The 11th International Conference on Coasts, Ports and Marine Structures (ICOPMAS 2014), Tehran, Iran, 24-26 Nov.

Narges, M.S. and Ghadampour, Z. (2018). Studying pressure and severe slugging in pipelines, 2nd National Conference on Civil Engineering and Sustainable Developmen, Estahban, Iran, 1 Mar. (In Persian)

Peek, R., Witz., M. and Vedeld, K. (2021). Dynamics of a Pipeline on an Elastic Seabed, *Applied Ocean Research*, 111, <https://doi.org/10.1016/j.apor.2020.102407>

Pothof, I.W.M. (2011). Co-current air-water flow in downward sloping pipes: Transport of capacity reducing gas pockets in wastewater mains, PhD Thesis, The University of Delf, Switzerland.i

Simsci (2001). Introduction to Pipephase, Simulation Sciences Inc.

تغییرپذیری‌ها و حالت‌های گذار یکی از مسئله‌های پیچیده و مهم در طراحی خطوط لوله تحت جریان‌های چند فازی می‌باشد. زیرا رخداد برخی از رژیم‌های جریانی مانند جریان کره‌ای و رخداد لختگی شدید در خطوط لوله می‌تواند باعث کاهش شدید عمر سودمند خط لوله و همچنین کارکرد بهینه و اقتصادی آن شود.

۵- فهرست نشانه‌ها

A	سطح مقطع عرضی جریان خط لوله (in, m)
D	قطر درونی لوله (in)
F	ضریب اصطکاک Fanning
G	شتاب گرانش (m/s^2)
g_c	ضریب تبدیل (32.2)
H_l	انباشت حجمی مایع
L	طول لوله (m)
ΔP_f	افت فشار ناشی از اصطکاک (kpa)
ΔP_{Hydro}	افت فشار هیدرواستاتیکی (kpa)
Q_l و Q_g	به ترتیب دبی حجمی مایع و گاز (m^3/hr)
V	حجم کل همان قسمت از خط لوله (m^3)
v_m	سرعت ترکیبی (m/s)
v_g	حجمی که گاز در قسمت مشخصی از خط لوله اشغال می‌کند (m^3)
ΔZ	تغییر تراز عمودی (m)
ρ_m	چگالی ترکیبی (kg/m^3)
α	زاویه ($^\circ$)
$(\frac{dP}{dx})_g^s$	گرادیان فشار برای جریان گازی تک فازی (pa/m)
$(\frac{dP}{dx})_l^s$	گرادیان فشار برای جریان مایع تک فازی (pa/m)
θ_p	زاویه شیب خط لوله ($^\circ$)
v_l	لزوجت سینماتیک مایع (cp)

۶- منبع

Akan, A.O. (2006). Open channel hydraulics. Elsevier, Canada.

AspenTech (2003). PIPESYS, User Guide, Hyprotech, Aspen Technology, Inc.

Barnea, D., Shoham, O. and Taitel, Y. (1980). Flow pattern transition for gas-liquid flow in horizontal and inclined pipes. *International Journal of Multiphase Flow*, Pergamon Press, 6, 217-225.

Takacs, G. (2005). Gas Lift Manual, PennWell Corp.

Taitel, Y. and Dukler, A.E. (1976). A model for predicting flow regime transition in horizontal and near horizontal liquid flow, AIChE Journal, 22(1), 47-55.

Thome, J.R. (2014). Two-Phase Flow Patterns and Flow Pattern Maps, Laboratory of Heat and Mass Transfer, Faculty of Engineering Science, Swiss Federal Institute of Technology, Lausanne CH-1015 Lausanne, Switzerland.

Vasconcelos, J.G. and Wright, S.J. (2009). Investigation of rapid filling of poorly ventilated stormwater storage tunnels. Journal of Hydraulic Research, 47(5), 547 - 558.

Wickenhäuser, M. and Kriewitz, C.R. (2009). Air-Water Flow in Downward Inclined Large Pipes, 33rd IAHR Congress: Water Engineering for a Sustainable Environment. IAHR, Vancouver.

Zhang-Feng, H., Yuan, W., Shu-Lin, L. (2020). Analysis of Safe Span Length and Fatigue Life of Submarine Pipelines, China Ocean Engineering, 34(1): 119-130. doi: 10.1007/s13344-020-0012-x.