

اثرات الگوهای جریانی بر حداکثر فشار در خطوط لوله فراساحلی

محمدصادق نرگس^۱، زهرا قدم پور^{۲*}

چکیده

حفظ میزان فشار در محدوده ی معین در خطوط لوله ی فراساحلی و اطلاع از عملکرد فشار در طول مسیر یکی از مهمترین عوامل در هیدرولیک خطوط لوله و محافظت در برابر خسارات محتمل وقوع است. عملکرد فشار و میزان فشار با توجه به نوع فاز سیال (تک فازی یا چند فازی) با هم متفاوت بوده و هنگامی که فاز گاز (هوا) به درون خط لوله راه می یابد بر نوع الگوی جریان (در جریان همزمان گاز- مایع الگوهای جریانی نظیر جریان روان لایه ای، لخته ای و ... هستند) و فشار اعمال شونده به خط لوله تاثیر می گذارد. در این مقاله به بررسی الگوهای جریانی و اثرات فازهای جریان بر حداکثر فشار در جریان دو فازی آب - هوا به صورت شبیه سازی عددی پرداخته و به منظور ایجاد درکی بهتر از عملکرد فشار در خطوط لوله، با جریان تک فازی آب مقایسه گردیده است. نتایج حاصل نشان می دهد که هندسه و میزان غلظت هوای ورودی از کمیت های تاثیر گذار بر رژیم جریانی و به تبع آن فشار ایجاد شده در خط لوله بوده و هوا بسته به نحوه ی استقرار در خط لوله می تواند باعث ایجاد فشارهایی بیشتر یا کمتر نسبت به جریان تک فازی گردد. فشار در حالت تک فازی در جریان قائم رو به بالا بیشترین اختلاف را نسبت به جریان دو فازی با غلظت های مختلف هوا دارا است (۲۶ درصد اختلاف فشار بیشتر) و جریان دو فازی در هندسه های ارائه شده در بیشترین حالت دارای افزایش ۲۳ درصدی فشار در جریان دو فازی نسبت به حالت تک فازی است.

واژه های کلیدی: حداکثر فشار، جریان دو فازی، خطوط لوله ی فراساحلی، الگوی جریان

^۱ کارشناس ارشد سازه های هیدرولیکی، مدرس، گروه عمران، واحد استهبان، دانشگاه آزاد اسلامی، استهبان، ایران.

^۲ استادیار، گروه عمران، واحد استهبان، دانشگاه آزاد اسلامی، استهبان، ایران

*نویسنده مسئول مقاله: zahra_ghadampour@yahoo.com, 09177005440

۱- مقدمه

که جبران آن گاهی غیر ممکن است. در سالهای اخیر تحقیقات مختلفی در زمینه هیدرولیک جریان های چند فازی صورت پذیرفته است که از آن جمله می توان به اثر فازهای مختلف بر الگوهای جریانی در خطوط لوله به صورت آزمایشگاهی و تحلیلی و شبیه سازی عددی الگوهای جریانی برای جریان دو فاز آب و هوا در خطوط لوله افقی اشاره نمود (بارنه و همکاران، ۱۹۸۰ و فرانک، ۲۰۰۵)، بررسی پدیده ی لختگی در شرایط جریان دو فاز (زین العابدینی و انصاری، ۲۰۱۷) و شبیه سازی عددی جریان رو به بالای دوفازی در خطوط لوله ی عمودی (عدل جو و همکاران، ۲۰۱۷) اشاره نمود. از دیدگاه هیدرولیکی، الگوهای مختلف جریانی باعث تغییرات فشار در خطوط لوله گردیده که در این زمینه مطالعات اندکی صورت پذیرفته که عمده ی آنها در مسائل ضربه قوچ متمرکز است (گو و همکاران، ۲۰۱۴؛ لی و همکاران، ۲۰۰۰). همچنین می توان به تحقیقات و مقایسه های صورت گرفته در زمینه ی اتلاف و احیای فشار در خطوط لوله تک فاز و دو فاز آب و هوا (نرگس و قدم پور، ۲۰۱۴) که دارای اختلافات چشمگیری هستند، اشاره داشت. علاوه بر آن، تام (۲۰۱۴) تحقیقات آزمایشگاهی وسیعی را در رابطه با انواع الگوهای جریانی در خطوط لوله منظور داشته اند. با توجه به تحقیقات صورت گرفته در گذشته، در این تحقیق سعی بر آن است که اثر گذاری فاز اضافی هوا بر حداکثر فشارهای موجود در خطوط لوله با زوایای مختلف مورد بررسی قرار گرفته شده و نتایج با حالت تک فاز مقایسه گردد. علاوه بر آن الگوهای جریانی در حالت دو فاز بر اساس الگوهای تایتل و داکلر با استفاده از نرم افزار PIPESYS مطالعه شده است. در قسمت بعد معادلات حاکمه بیان شده و سپس الگوهای مختلف جریانی و صحت سنجی نرم افزار تفسیر و بیان می گردند. بیان مسئله و نتایج حاصل از شبیه سازی جریان در بخش ۳ عنوان گردیده و در نهایت نتیجه گیری و پیشنهادها برای تحقیقات بعدی در قسمت ۴ مطرح خواهند شد.

خطوط لوله به منظور انتقال آب، نفت، گاز و فاضلاب و یا جریان های دو یا چند فاز به صورت درون ساحلی و فراساحلی مورد استفاده قرار می گیرند. خطوط لوله فراساحلی متشکل از خطوط لوله درون میدانی و خطوط لوله ی صادر کننده هستند. خطوط لوله ی صادر کننده، سیالات را از سکو یا FPSO^۱ (تولید، ذخیره، تخلیه) به ساحل منتقل نموده که جریان درون آنها معمولاً جریان گاز- میعان یا جریان نفت به همراه مقدار کمی آب است. خطوط لوله ی درون میدانی جریان چاه را از چاه ها یا چندراهه ها به سکو یا FPSO می رساند (گو و همکاران، ۲۰۱۴). طراحی خطوط لوله های فراساحلی شامل طرح سازه ای، هندسی و هیدرولیکی هستند. باید مسائلی همچون کمناش و گسیختگی در زمان اجرای خطوط لوله در طرح سازه ای بررسی می گردد که در این زمینه تحقیقات مختلفی صورت پذیرفته است (کایریاکیدز و کورونا، ۲۰۰۷). در طرح هندسی خطوط لوله، پارامترهای تعیین قطر (بنا به ظرفیت جریان و تحلیل دقیق Flow assurance برای خطوط لوله فراساحلی) و ضخامت بدنه (استفاده از استانداردها) مد نظر بوده که این ها خود به نوعی به هیدرولیک جریان وابسته هستند. بنابراین طراحی هیدرولیکی خطوط لوله از اهمیت بسیار زیادی برخوردار بوده و مسائل مطرح در این زمینه بایستی به دقت بررسی گردند. از دیدگاه هیدرولیکی، جریان درون خطوط لوله فراساحلی در میدان های نفتی معمولاً جریان چندفازی گاز - نفت - آب و در میدان های گازی جریان گاز- میعان-آب است. علاوه بر آن حتی در خطوط لوله درون ساحلی نیز جریان تقریباً به صورت دو فاز بوده و وجود هوا همراه با آب در این لوله ها بنابر دلایلی، از جمله خروج هوای محلول درون آب بر اثر کاهش فشار، پرش هیدرولیکی، انتقال هوا در هنگام پر کردن یا خالی کردن سامانه، تشکیل گاز در اثر فعالیت های بیولوژیکی، در هنگام بهره برداری امری تقریباً اجتناب ناپذیر است (لاچلان و همکاران، ۲۰۰۵). عدم دقت به وجود جریان دو یا چند فاز در خطوط لوله و تأثیر آن بر عملکرد هیدرولیکی از جمله رژیم های جریانی و میزان فشار درون خطوط لوله (و به طور غیر مستقیم بر ضخامت خط لوله) می تواند منجر به خسارات سنگینی به خطوط لوله شده

۲- مواد و روش ها

۲-۱- روابط حاکم بر جریان تک فازی و الگو

های جریانی آن

رکن نظری معادلات جریان سیال معادله ی عمومی انرژی بوده که بیانگر تعادل یا حفظ انرژی بین دو نقطه در یک سامانه است. معادله انرژی را با استفاده از اصول ترمودینامیک می توان تغییر داده و همان طور که در معادله ی زیر نشان داده شده است معادله ای برای گردایان فشار به وجود آورد. این معادله تغییرات فشار را در لوله ای با شیب θ نسبت به افق نشان می دهد:

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

(۱)

$$\frac{dP}{dL} = \frac{g}{g_c} \rho \sin \theta + \frac{f \rho v^2}{2 g_c d} + \frac{\rho v}{g_c} \frac{dv}{dL}$$

که در آن ρ = چگالی جریان (کیلوگرم بر متر مکعب) و θ = زاویه خط لوله نسبت به افق، d = قطر خط لوله (متر) ، g_c = ضریب تبدیل ، g = شتاب گرانش (متر بر مجذور ثانیه) ، f = ضریب اصطکاک و v = سرعت جریان (متر بر ثانیه) است (سیمیسکی، ۲۰۰۱ و تاکاز، ۲۰۰۵).

انواع الگو های جریانی در حالت تک فازی شامل الگو های جریانی آرام (لایه ای)، انتقالی و آشفته هستند. که وقتی عدد رینولدز (نسبت بین نیروهای اینرسی و نیروهای لزجت: $Re = \frac{\rho v d}{\mu}$) کوچک باشد ($Re < 3000$) نیروهای لزجت غالب بوده و جریان در ناحیه آرام قرار می گیرد و اعداد رینولدز بالاتر از مقدار فوق بیانگر جریان آشفته هستند.

۲-۲- روابط حاکم بر جریان چند فازی و الگو

های جریانی آن

حل همزمان معادلات پیوستگی، مومنتم و انرژی، روند تغییرات فشار را در جریان های چند فازی مشخص می سازد. با نوشتن معادلات مومنتم یا انرژی برای یک حجم کنترل از جریان دو فازی، تغییرات فشار همانند جریان تک فازی در ترکیب کلی به صورت معادله (۱) بیان که پیشتر ذکر گردید هستند.

همان طور که از معادله مشخص است، افت فشار از مجموع سه کمیت افت ناشی از اثر ارتفاع، اصطکاک و شتاب درون خطوط لوله برای فازهای مختلف تشکیل شده است. عبارت ابتدایی ارتباط تغییرات فشار با ارتفاع را مشخص می کند که مقدار آن در جریان های چند فازی در خطوط لوله شیب دار حائز اهمیت است. عبارت دوم بیانگر اثر اصطکاک بر افت فشار بوده که در خطوط لوله افقی مهمترین عامل در تغییرات فشار است. عبارت آخر، افت فشار ناشی از شتاب بوده و به علت تغییرات سرعت درون خطوط لوله رخ می دهد. این عبارت، تنها زمانی قابل اهمیت است که سیال تراکم پذیر بوده و از سرعت پایینی برخوردار باشد. با جایگذاری کمیت های معادل در معادله ی بالا، تغییرات فشار در یک جریان دو فازی به صورت زیر بیان می گردد.

$$\frac{dP}{dL} = \frac{g}{g_c} \rho_m \sin \theta + \frac{f_m \rho_m v_m^2}{2 g_c d} + \frac{\rho_m v_m}{g_c} \frac{dv_m}{dL} \quad (2)$$

که شاخص m بیانگر این است که پارامترهای دارای این اندیس به شرایط جریان وابسته اند (تاکاز، ۲۰۰۵؛ بریل و بیگز، ۱۹۹۱). با توجه به آنکه معادلات حاکم بر جریان به صورت معادلات دیفرانسیل معمولی هستند، در حل آن ها از روش اویلر غیر ضمنی و با مشتقات مکانی به صورت پس رو در نرم افزار، استفاده گردیده است. به منظور شبیه سازی عددی در این نرم افزار دامنه ی محاسباتی به قطعاتی با طول h تقسیم شده و با در نظر گرفتن شرایط مرزی، مشخصات جریان دو فازی در هر گره محاسباتی با استفاده از خصوصیات نقاط قبلی و بر اساس روش کلی زیر که مبنای روش عددی اویلر است محاسبه می گردد:

$$\frac{dy}{dx} = f(x, y)$$

$$y_{i+1} = y_i + f(x_i, y_i)h$$

علاوه بر آن، با توجه به آنکه سرعت تغییرات حجم (فشار، جریان)، انرژی و ترکیب درصد اجزا، با زمان برابر نیست به همین دلیل این کمیت ها به طور همزمان در هر گام زمانی حل نمی شوند. معادلات حجم در هر گام زمانی و معادلات انرژی در هر دو گام زمانی و موازنه های مربوط به ترکیب اجزا هر ده گام زمانی یکبار، در صورت در نظر گرفتن جریان به صورت غیر ماندگار، محاسبه می شوند.

$$S = \frac{\ln(y)}{\{-0.0523 + 3.182\ln(y) - 0.8725[\ln(y)]^2 + 0.01853[\ln(y)]^4\}}$$

۲-۴-۲- روابط شتاب

که در این رابطه λ_L به صورت زیر تعریف می گردد:

$$y = \frac{\lambda_L}{\left(H_{L(\theta)}\right)^2} \quad (14)$$

که در آن $H_{L(\theta)}$ انباشت حجمی مایعی که در همان شرایط در یک خط لوله افقی است.

شیب فشار کل را می توان با رابطه ی زیر محاسبه کرد:

$$\frac{dP}{dL} = \frac{\left(\frac{dP}{dL}\right)_{el} + \left(\frac{dP}{dL}\right)_f}{1 - E_K} \quad (15)$$

که در آن مقدار E_K از رابطه ی زیر به دست می آید:

$$E_K = \frac{\rho_m V_m V_{sg}}{g_c P} \quad (16)$$

با توجه به آنکه محاسبه افت فشار ناشی از اصطکاک به الگوی جریانی وابسته است، بنابراین در قسمت بعد انواع الگو های جریانی و نحوه ی تعیین آنها شرح داده شده است.

۲-۵- الگو های جریانی

به علت تفاوت های خواص فیزیکی (عمدتاً چگالی) بین مایع و گاز، هنگامی که گاز و مایع به طور همزمان در خط لوله در جریان باشند، الگوهای جریانی متفاوتی شکل می گیرند. الگو های جریانی از لحاظ سطوح مشترک گاز - مایع و مکانیزم جرم، اندازه حرکت، و انتقال انرژی بین فازها با هم متفاوتند. از گذشته تا کنون تحقیقات زیادی در رابطه با تقسیم بندی الگو های جریانی صورت پذیرفته است، با این وجود، دسته بندی الگو های جریانی کاملاً قراردادی بوده و عمدتاً به مشاهدات فردی بستگی دارد و در یک موقعیت جریانی مشخص، افراد مختلف ممکن است تعاریف متفاوتی از الگوی جریان داشته باشند. هندسه ی خط لوله شامل قطر و شیب خط لوله، مشخصات هیدرولیکی جریان در هر یک از فازها و شار حرارتی لوله از عوامل موثر در شکل گیری الگو های جریانی هستند. در جریان همزمان گاز - مایع افقی معروف ترین الگو های جریانی به اختصار شامل جریان روان لایه ای، جریان موجی لایه ای، جریان لخته ای، جریان حلقوی و جریان حبابی پراکنده هستند، که در شکل شماره (۱) نشان داده شده اند. در جریان همزمان گاز - مایع عمودی، الگوهای

۲-۳- محاسبه افت فشار در جریان دو فازی

در این تحقیق به منظور محاسبه کمیت های افت فشار ناشی از اصطکاک و شتاب بیان شده در معادله (۲) از روش تجربی بیگز-بریل استفاده گردیده است (بریل و بیگز، ۱۹۹۱).

۲-۴- رابطه ی تجربی بیگز-بریل

اساس این روش بر پایه مطالعات آزمایشگاهی انجام شده در یک لوله به طول ۹۰ فوت و از جنس آکرلیک بوده که تحت زوایای مختلف قرار گرفته و سپس روابطی برای محاسبه ی افت فشار ناشی از اصطکاک و شتاب به صورت زیر ارائه گردیده است، بریل و بیگز، ۱۹۹۱.

۲-۴-۱- افت فشار ناشی از اصطکاک

در این روش ضریب اصطکاک استفاده شده در محاسبه ی افت فشار از رابطه زیر محاسبه می گردد:

$$f_{ip} = f_n \left(\frac{f_{ip}}{f_n} \right) \quad (3)$$

که مقادیر f_n و $\frac{f_{ip}}{f_n}$ به ترتیب از روابط (۴) و (۵)

به دست می آیند:

$$f_n = \frac{1}{\left[2 \log \left(\frac{N_{Re}}{4.5223 \log N_{Re} - 3.8215} \right) \right]^2} \quad (4)$$

$$N_{Re} = (\rho_m v_m d) / \mu_m \quad (5)$$

$$\frac{f_{ip}}{f_n} = e^S \quad (6)$$

$$V_m = V_{sl} + V_{sg} \quad (7)$$

$$\mu_m = \mu_l \lambda_l + \mu_g \lambda_g \quad (8)$$

$$\lambda_l = Q_l / (Q_l + Q_g) \quad (9)$$

$$\lambda_g = Q_g / (Q_l + Q_g) \quad (10)$$

$$V_{sg} = Q_g / A \quad (11)$$

$$V_{sl} = Q_l / A \quad (12)$$

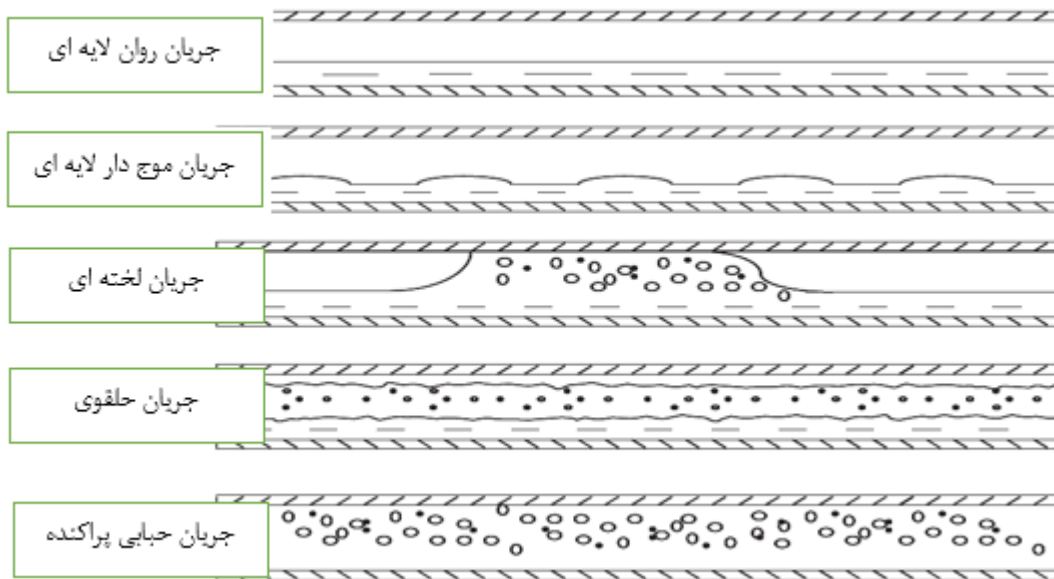
که N_{Re} عدد رینولدز ترکیبی، A سطح مقطع عرضی جریان خط لوله، Q_l و Q_g دبی های گاز و مایع، λ_l و λ_g انباشت حجمی مایع و گاز، μ_l و μ_g لزجت مایع و گاز هستند. نکته قابل توجه این است که رابطه ی چهار برای اعداد N_{Re} بزرگتر از ده صادق است.

کمیت S در رابطه ی (۵) به صورت زیر محاسبه می گردد:

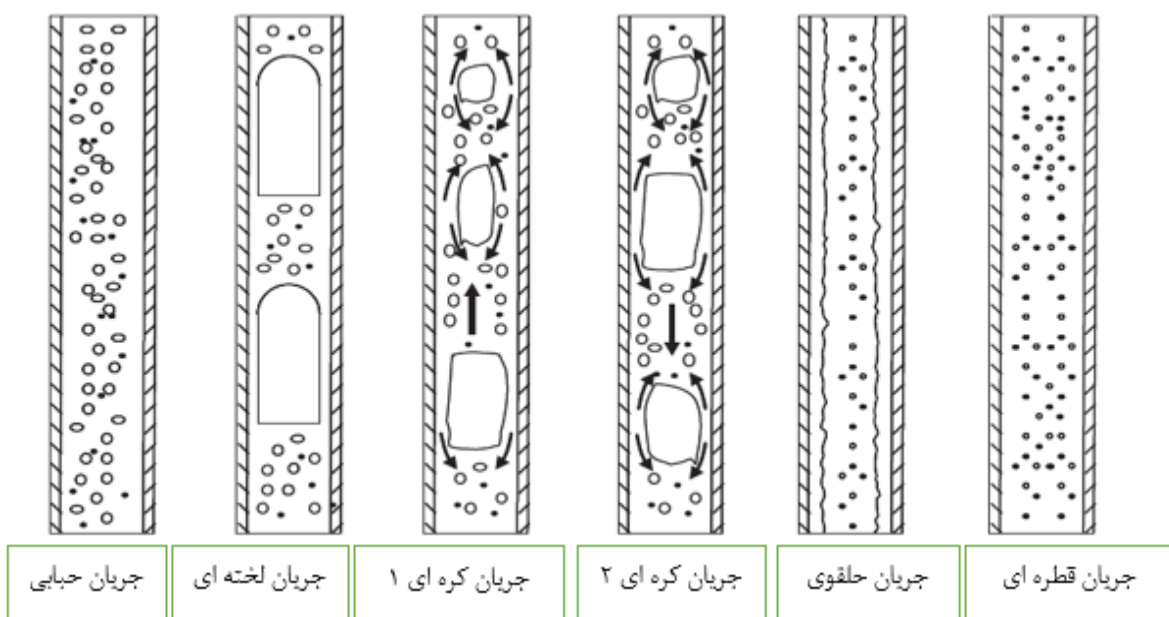
$$(13)$$

های پیش بینی الگوهای جریان‌ی به طور کلی به دو دسته روشهای آزمایشگاهی هوگندورن (۱۹۵۹)، بگز و بریل (۱۹۷۳) و تحلیلی تایتل و داکلر (۱۹۷۶) و بارنه و همکاران (۱۹۸۰) طبقه بندی می گردند. در این تحقیق برای تعیین الگوهای جریان‌ی از روش نیمه تئوری تایتل و داکلر برای لوله های افقی و شیب دار استفاده شده است (بارنه و هکاران، ۱۹۸۰؛ هوگندورن، ۱۹۵۹؛ تام، ۲۰۱۴).

جریان به اختصار شامل جریان حبایی، جریان لخته ای، جریان کره ای، جریان حلقوی و جریان قطره ای هستند، که در شکل (۲) نشان داده شده اند (گو و همکاران، ۲۰۱۴). اگر خط لوله به صورت شیب دار باشد، شکل گیری الگوهای جریان‌ی تابع شیب هستند. در جریان شیب دار روبه بالا الگوی جریان‌ی تقریباً همیشه لخته ای یا حلقوی است. در جریان شیب‌دار روبه پایین الگوی جریان‌ی معمولاً لایه ای (به علت تاثیر جاذبه بر مایع و کاهش انباشت حجمی مایع) یا حلقوی (در صورت افزایش شدید دبی جریان فاز گازی) می‌باشد (سیمیسکی، ۲۰۰۱). روش



شکل ۱- الگوی جریان گاز - مایع افقی و نزدیک به افقی (گو و همکاران، ۲۰۱۴).



شکل ۲- الگوی جریان گاز - مایع عمودی (گو و همکاران، ۲۰۱۴).

که آن ها:

$(\frac{dP}{dx})_g^s$: شیب فشار برای جریان گازی تک فازی

$(\frac{dP}{dx})_l^s$: شیب فشار برای جریان مایع تک فازی

θ_p : زاویه شیب خط لوله

D_l : لزجت کینماتیک مایع

D : قطر لوله

ρ_l و ρ_g : به ترتیب چگالی مایع و گاز هستند.

۲-۵-۲- صحت سنجی

صحت سنجی نرم افزار با استفاده از کار آزمایشگاهی پوتوف (۲۰۱۱) که به بررسی پرش هیدرولیکی بر روی خط لوله ای تحت جریان دوفازی آب و هوا و الگو های جریانی حاکمه با توجه به شکل شماره ۴ انجام پذیرفته است. بدین منظور خط لوله ای با مشخصات همچون قطر برابر با 8 in، دبی آب برابر با و دبی هوا برابر با 32040 kg/hr و دیگر مشخصات فیزیکی و هندسی شامل زبری 0.045 و زاویه 10 درجه و طول 120m با شکل هندسی نشان داده شده در شکل ۵ و نسبت $L/D=209$ که انتقال دهنده ی آب و هوا بطور همزمان هستند شبیه سازی گردید (سایر مشخصات خط لوله در جداول ۱ بیان گردیده اند). که نتایج حاصله از شبیه سازی به شرح زیر هستند.

128160 kg/hr

۲-۵-۱- تعیین الگو های جریانی در خطوط لوله

افقی و شیب دار با استفاده از روش تایتل و داکلر

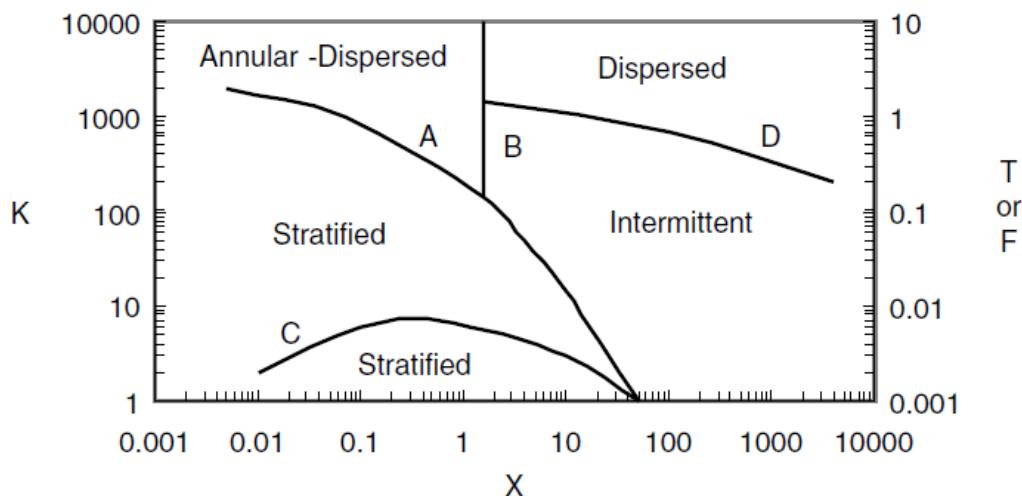
تایتل و داکلر (۱۹۷۶) برای تعیین الگو های جریانی به صورت نیمه تئوری ابتدا جریان لایه ای را در یک لوله با فرض جریان پایا شبیه سازی نمودند و سپس شرایط نحوه انتقال از الگو جریان لایه ای به سایر الگو های جریانی را تعیین نمودند. نتایج تحلیل های انجام شده به صورت یک نقشه برای جریان های دو فازی گاز- مایع ارائه گردیده که در شکل (۳) نشان داده شده است. در نقشه ی ارائه شده، الگو های جریانی با منحنی های گذار تعریف می شوند. منحنی های A و B به وسیله ی مختصات X و F، منحنی C به وسیله ی مختصات X و K و منحنی D به وسیله ی مختصات T و X تعریف می شوند. پارامترهای X، F، K، T بصورت زیر تعریف می شوند (گو و همکاران، ۲۰۱۴؛ تایتل و داکلر ۱۹۷۶).

$$X = \left[\frac{(\frac{dP}{dx})_l^s}{(\frac{dP}{dx})_g^s} \right]^{1/2} \quad (17)$$

$$K = \left[\frac{\rho_l v_{sg}^2 v_{sl}}{(\rho_l - \rho_g) g v_l \cos \theta_p} \right]^{1/2} \quad (18)$$

$$F = \sqrt{\frac{\rho_g}{(\rho_l - \rho_g)} \frac{v_{sg}}{\sqrt{Dg \cos \theta_p}}} \quad (19)$$

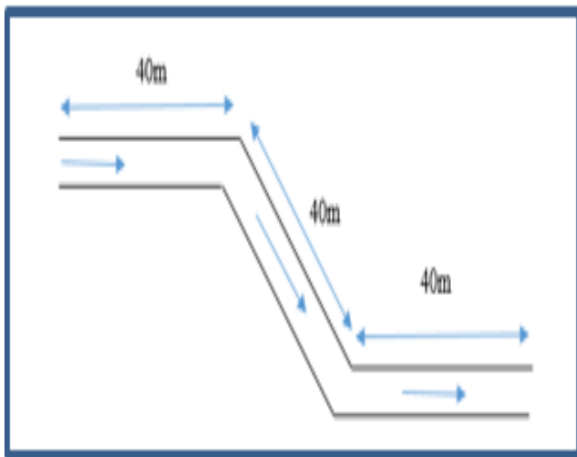
$$T = \left[\frac{\left| (\frac{dP}{dx})_l^s \right|}{(\rho_l - \rho_g) g \cos \theta_p} \right]^{1/2} \quad (20)$$



شکل ۳- نقشه ی الگو جریانی تایتل- داکلر برای جریان افقی (گو و همکاران، ۲۰۱۴).

حداکثر اختلاف فشار هیدرو استاتیکی و اصطکاکی در شرایط آزمایشگاهی ارائه شده حدود 18 Kpa در فاصله ای معین اندازه گیری و گزارش شده است. با توجه به نتایج فشار هیرواستاتیکی و اصطکاکی ارائه شده به صورت عددی (شکل ۶)، مشاهده می گردد که در همین نقطه با اختلاف ناچیز (در حدود 0.001bar) مقدار افت فشار کل منطبق بر مقدار ارائه شده آزمایشگاهی هستند.

با توجه به نتیجه گیری به دست آمده از این بخش، در قسمت های بعد سعی بر آن است تا به بررسی تاثیر زوایا در تغییرات فشار و الگوهای جریانی در جریان دو فازی پرداخته شده و نتایج با حالت تک فازی مقایسه گردد.



شکل ۵- شکل هندسی خط لوله

جدول ۱- مشخصات کلی لوله مستغرق

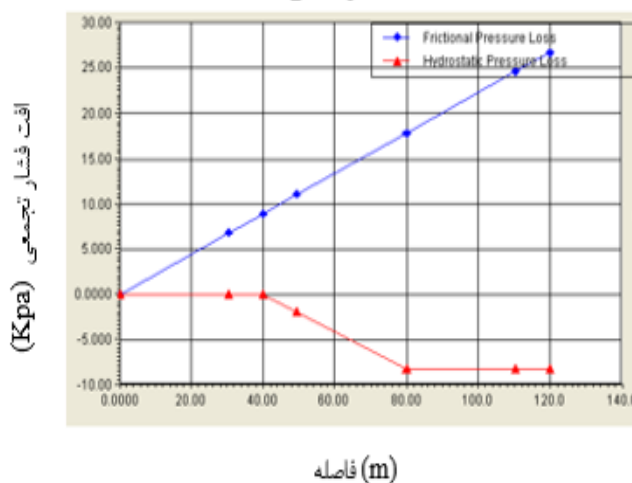
فولاد پیش فرض	رساناهای پیش فرض
48.461 W/m-K	رسانایی لوله
997.988 kg/m ³	چگالی آب
1 cP	لزجت آب
0.517 W/m-K	رسانایی آب
0.447 m/s	سرعت آب
4.1813 kj/kg-C	ظرفیت حرارتی آب

با توجه به نتایج به دست آمده از نرم افزار و مقایسه آن با نتایج آزمایشگاهی می توان دریافت که الگوی جریانی از نوع حلقوی قطره ای که در آزمایشگاه مشاهده گردیده، در حالت عددی نیز باز تولید گردیده است. علاوه بر آن



شکل ۴- خط لوله ای با زاویه 10 درجه و قطر 8 اینچ و نسبت طول به قطر L/D=209. (پوتوف، ۲۰۱۱)

افت فشار تجمعی



شکل ۶- نمودار افت فشار اصطکاکی و هیرواستاتیکی.

۳- نتایج و بحث

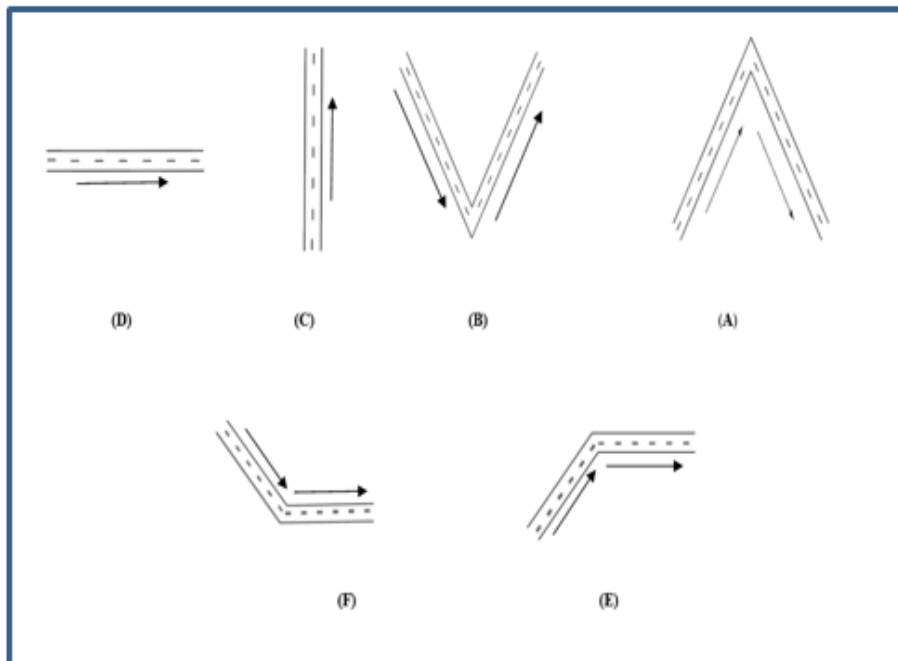
با توجه به شکل ۷، در این تحقیق شش نوع خط لوله با قطر اسمی ۲۴ اینچ در نظر گرفته شده اند. در حالت اول (شکل ۷-۱)، خط لوله ای به طول ۵۰۰ متر به صورت صعودی تا ارتفاع ۲۵۰ متر و سپس خط لوله به طول ۵۰۰ متر به صورت نزولی همانند مسیر رفت مسیر برگشت را طی می کند. در حالت دوم (شکل ۷-۲)، خط لوله با طول ۵۰۰ متر از تراز ۲۵۰ متر به تراز صفر رسیده و سپس به صورت صعودی با طول ۵۰۰ متر به تراز ۲۵۰ متر می رسد. در حالت سوم (شکل ۷-۳)، یک خط لوله به صورت قائم با طول و ارتفاع ۱۰۰۰ متر و در حالت چهارم (شکل ۷-۴)، خط لوله به صورت افقی با طول ۱۰۰۰ متر و دو خط لوله ی دیگر به شکل های ۷-۵ و ۷-۶ که طول لوله در هر بند ۵۰۰ متر که طول کل خط لوله در مجموع ۱۰۰۰ متر است مورد بررسی قرار گرفته است. مقدار فشار خروجی ۱۰۰۰۰ کیلو پاسکال، دمای جریان و محیط ۲۵ درجه ی سانتی گراد و زبری مطلق داخلی لوله ۰/۰۴۵۷ میلیمتر است. دبی آب ورودی به صورت ثابت ۵۰۰۰۰ کیلوگرم بر ساعت است (جریان تک فاز). حال فرض می گردد، به طور ناگهانی مقداری هوا به میزان

های ۲۶۳۱۵/۷۹ کیلوگرم بر ساعت معادل ۵ درصد (حالت اول)، ۵۵۵۵۵/۵۵۶ کیلوگرم بر ساعت معادل ۱۰ درصد (حالت دوم)، ۸۸۲۳۵/۳ کیلوگرم بر ساعت معادل ۱۵ درصد (حالت سوم) و ۱۲۵۰۰۰ کیلوگرم بر ساعت معادل ۲۰ درصد (حالت چهارم) در جریان دو فاز ی وارد سیستم می گردند. علاوه بر آن فرض می گردد، خط لوله در آبی با مشخصات ارائه شده در جدول یک مستغرق است. در ادامه، نتایج حاصل از شبیه سازی در بخش های بعدی برای شکل های مختلف هندسه خط لوله ارائه شده در شکل ۷ بررسی گردیده است. تغییرات فشار و الگوهای جریانی برحسب درصدهای مختلف هوا در جریان دو فاز ی محاسبه گردیده و با حالت تک فاز ی مقایسه گردیده اند.

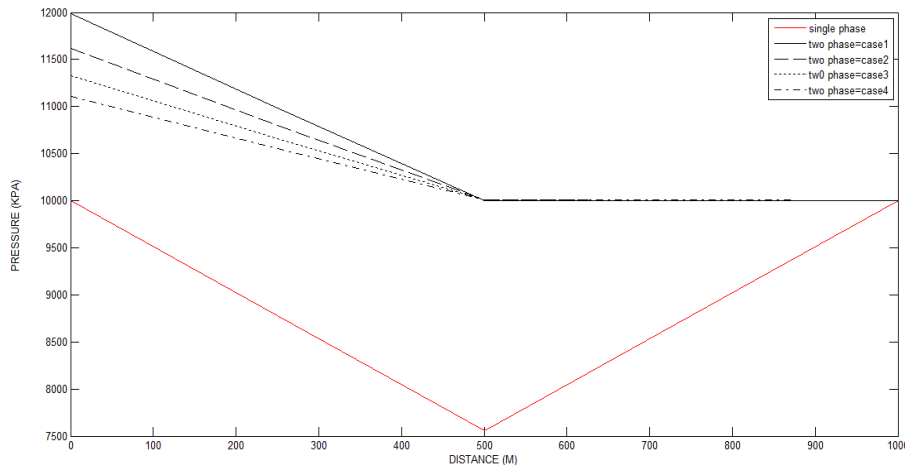
۳-۱- شبیه سازی برای هندسه ی لوله ی A در

شکل ۷

با توجه به هندسه ی خط لوله در شکل ۷-۱ و شکل ۸ می توان دریافت که حداکثر فشار در جریان دو فاز ی در کل خط لوله نسبت به حالت تک فاز ی بیشتر است (در بیشترین حالت در نزدیک به ۱۷ درصد در سر لوله) و این



شکل ۷- نیمرخ هندسی خطوط لوله



شکل ۸- تغییرات فشار در جریان تک فازى آب و جریان دو فازى آب- هوا برای نیمرخ خط لوله ی (A)

حالت در حدود ۱۴ درصد)، اما در حالت دو فازى فشار سر لوله افزایش قابل توجهی را نسبت به حالت تک فازى دارا می باشد (در بیشترین حالت نزدیک به ۱۷ درصد). الگوهای جریانی در هندسه ی مطالعه شده مطابق جدول ۳ در مسیر رفت به صورت موجی و در مسیر برگشت به صورت متناوب به دست آمده و برای این زاویه خاص در خط لوله مستقل از درصد هوای ورودی است. با مقایسه ی هندسه ی خط لوله ارائه شده A و B در شکل ۷ می توان دریافت که برای زوایای ارائه شده، الگوی جریان در مسیر رو به بالا به صورت متناوب بوده که این امر به علت افزایش انباشت حجمی مایع و پایداری حاصل از تشکیل امواج بر روی سطح مایع است. در جریان رو به پایین با توجه به آنکه سرعت فاز گازی زیاد بوده الگوی جریان از حالت لایه ای که الگوی متداول در جریان های رو به پایین است به الگوی جریان موجی تغییر یافته است.

۳-۳- شبیه سازی برای هندسه ی لوله ی C در

شکل ۷

نتایج حاصل از تغییرات فشار در جریان تک فازى و دو فازى برای لوله ی قائم در شکل ۱۰ نشان داده شده اند. همان طور که از این شکل مشاهده می گردد، حداکثر فشار در جریان تک فازى در کل خط لوله نسبت به حالت دو فازى بیشتر بوده (در بیشترین حالت تقریباً ۲۶%) و هرچه میزان هوای ورودی بیشتر شود، به اعمال فشار کمتری برای خارج کردن سیال نیازمندیم. نتایج حاصل از تعیین فازهای جریان براساس الگوی تایتل و داکلر (۱۹۷۶) برای

حداکثر فشارها در درصدهای کم هوا بیشتر است یعنی هرچه در حالت دو فازى هوای کمتری وارد جریان شود با فشار بحرانی تری مواجه خواهیم بود زیرا هوای موجود حالتی نامتلاطمی را در الگوهای جریانی به وجود می آورد. با توجه به مطالب عنوان شده و با توجه به شکل ۸، حالت اول در جریان دو فازى بحرانی تر است. همچنین با توجه به جدول ۲ مشاهده می گردد، الگو های جریانی در مسیرهای رفت و برگشت با هم متفاوتند که این امر باعث ایجاد افت فشارهای مختلف در خط لوله می شود. جریان متناوب در مسیر رفت به علت شیب زیاد خط لوله، ترکیبی از الگوی جریان قالبی و لخته ای است که الگوی جریان قالبی دارای قالب های مایعی که به وسیله ی حباب های گازی کشیده مجزا شده اند بوده و الگوی جریان لخته ای در اثر ایجاد لخته مایع (امواجی که به علت بزرگی بیش از حد مانع جریان یافتن گاز می شوند) رخ می دهد. در مسیر برگشت الگوی جریان به صورت موجی بوده که بر اثر موجی شدن سطح مشترک گاز- مایع ایجاد می شود (تام ۲۰۱۴؛ گو، ۲۰۱۴؛ نرگس و قدم پور، ۲۰۱۴). الگو های جریانی در این حالت به درصد های هوا حساسیت نداشته و تغییر وضعیت نمی دهند.

۳-۲- شبیه سازی برای هندسه ی لوله ی B در

شکل ۷

با توجه به هندسه ی خط لوله در شکل B-۷ و تغییرات فشار در طول خط لوله در شکل ۹ در می یابیم که حداکثر فشار در حالت تک فازى بیشتر بوده (در بیشترین

حدود یک متر بر ثانیه می رسد، الگوی جریان از حالت لخته ای به حالت جریان کف آلود تغییر می یابد؛ این حالت یک جریان بسیار آشفته از گاز و مایع است.

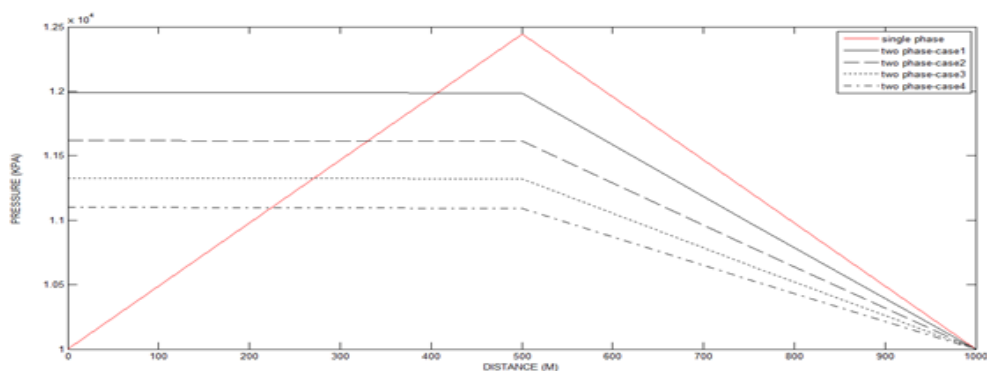
غلظت های مختلف هوای ورودی در جدول ۴ نشان داده شده است. همان طور که از این جدول مشاهده می گردد، الگوی جریان به طور کلی، لخته ای بوده و درصد های مختلف ورودی هوا، بر الگوهای جریانی تشکیل شونده در خطوط لوله تاثیر دارد. در حالتی که سرعت فاز گازی به

جدول ۲- الگوهای جریانی حاکم در طول مسیر خط لوله ی A برای درصدهای مختلف هوا

طول (m)	سرعت سطحی گاز (m/s)	سرعت سطحی مایع (m/s)	الگوی جریانی
	Air (%): 5 - 10 - 15 - 20		
15.24	0.198 - 0.430 - 0.679 - 1.003	0.530	متناوب
500	0.239 - 0.505 - 0.803 - 1.137	0.530	متناوب
515.12	0.240 - 0.506 - 0.804 - 1.138	0.530	موجی
1000	0.233 - 0.492 - 0.782 - 1.108	0.530	موجی

جدول ۳- الگوهای جریانی حاکم در طول مسیر خط لوله ی B برای درصدهای مختلف هوا

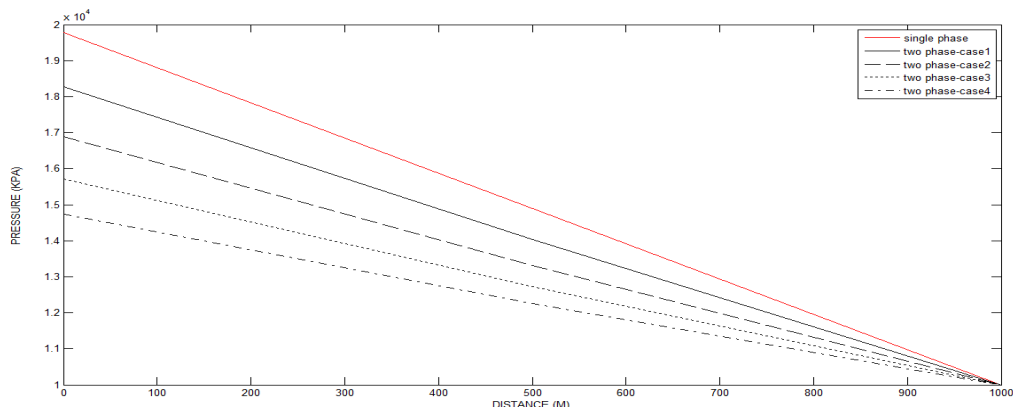
طول (m)	سرعت سطحی گاز (m/s)	سرعت سطحی مایع (m/s)	الگوی جریانی
	Air (%): 5 - 10 - 15 - 20		
30.48	0.199 - 0.430 - 0.697 - 1.02	0.530	موجی
500	0.193 - 0.418 - 0.678 - 0.976	0.530	موجی
522.9	0.194 - 0.419 - 0.679 - 0.977	0.530	متناوب
1000	0.232 - 0.491 - 0.780 - 1.103	0.530	متناوب



شکل ۹- تغییرات فشار در جریان تک فاز آب و جریان دو فاز آب- هوا برای نیمرخ خط لوله ی (B)

جدول ۴- الگوهای جریانی حاکم در طول مسیر خط لوله ی C برای درصدهای مختلف هوا

طول (m)	سرعت سطحی گاز (m/s)	سرعت سطحی مایع (m/s)	الگوی جریانی (5% air)	الگوی جریانی (10% air)	الگوی جریانی (15% air)	الگوی جریانی (20% air)
	Air (%): 5 - 10 - 15 - 20					
7.62	0.128 - 0.281 - 0.464 - 0.683	0.530	لخته ای	لخته ای	لخته ای	لخته ای
500	0.164 - 0.357 - 0.583 - 0.848	0.530	لخته ای	لخته ای	لخته ای	لخته ای
723.9	0.165 - 0.359 - 0.585 - 0.850	0.530	لخته ای	لخته ای	لخته ای	کف آلود
1000	0.232 - 0.490 - 0.778 - 1.102	0.530	لخته ای	لخته ای	لخته ای	کف آلود



شکل ۱۰- تغییرات فشار در جریان تک فازی آب و جریان دو فازی آب- هوا برای نیمرخ خط لوله ی (C)

شود مقدار این حداکثر فشار افزایش می یابد. الگوی جریان برای غلظت های هوا کمتر از ۲۰ درصد از نوع متناوب بوده و با افزایش غلظت هوا، به الگوی حلقوی قطره ای تغییر پیدا می کنند. همان طور که ملاحظه می گردد، این تغییر الگوی جریان ناشی از افزایش سرعت ظاهری گاز بوده که باعث می گردد تا گاز به شکل هسته ای در مرکز خط لوله جریان یافته و مایع به صورت حلقه ای دور دیواره خط لوله جریان یابد (گو و همکاران، ۲۰۱۴). توجه به این الگوی جریانی، از نظر میزان سایش درون خط لوله از اهمیت خاصی برخوردار است.

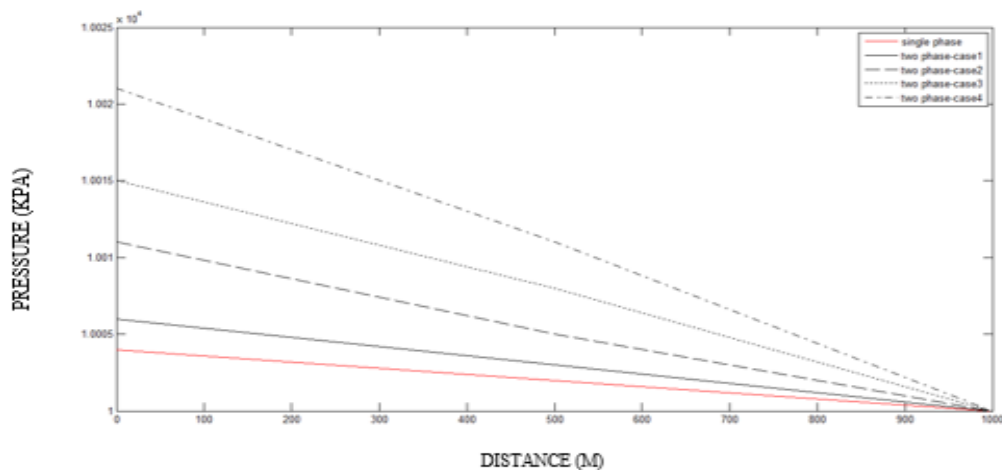
۳-۴- شبیه سازی برای هندسه ی لوله ی D در

شکل ۷

با توجه به هندسه خط لوله در شکل D-۷، تحلیل تغییرات فشار در حالت تک فازی و دو فازی برای غلظت های مختلف هوا انجام پذیرفته که نتایج در شکل شماره ۱۱ و جدول شماره ۵ نشان داده شده اند. همان طور که از شکل ۱۱ مشاهده می گردد، حداکثر فشار در جریان دو فازی برای لوله ی افقی در تمام غلظت های ورودی هوا به میزان کمی بیشتر از حالت تک فازی بوده (کمتر از یک درصد)، و هرچه مقدار درصد هوا به درون خط لوله بیشتر

جدول ۵- الگوهای جریانی حاکم در طول مسیر خط لوله ی D برای درصدهای مختلف هوا

طول (m)	سرعت سطحی گاز (m/s)	سرعت سطحی مایع (m/s)	الگوی جریانی (5% air)	الگوی جریانی (10% air)	الگوی جریانی (15% air)	الگوی جریانی (20% air)
	Air (%): 5 - 10 - 15 - 20					
30.48	0.233 - 0.492 - 0.781 - 1.106	0.530	متناوب	متناوب	متناوب	حلقوی قطره ای
1000	0.233 - 0.492 - 0.782 - 1.108	0.530	متناوب	متناوب	متناوب	حلقوی قطره ای



شکل ۱۱- تغییرات فشار در جریان تک فازی آب و جریان دو فازی آب- هوا برای نیمرخ خط لوله ی (D)

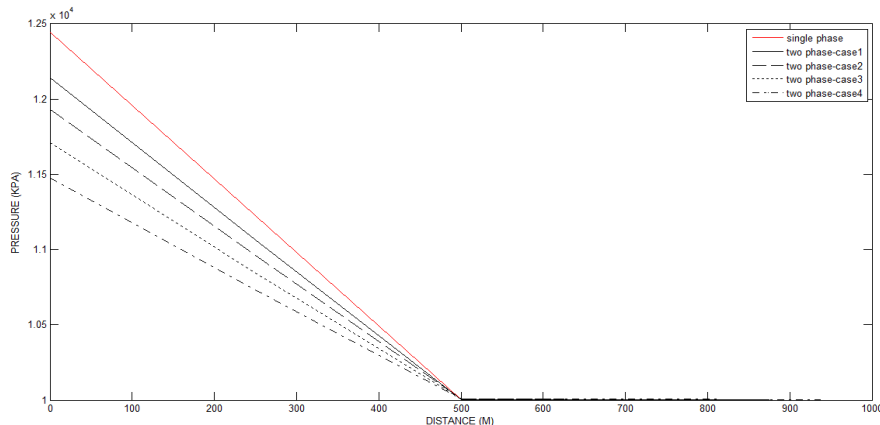
یابد. با توجه به هندسه ی خط لوله، الگوی جریانی در قسمت شیب دار رو به بالا به صورت متناوب و مستقل از میزان غلظت هوای ورودی است. در صورتی که حساسیت قسمت افقی نسبت به میزان هوای ورودی بیشتر بوده و با افزایش این غلظت به ۲۰ درصد، الگوی جریان از حالت متناوب به حالت حلقوی قطره ای تغییر می یابد (گو و همکاران، ۲۰۱۴).

۳-۵- شبیه سازی برای هندسه ی لوله ی E در شکل ۷

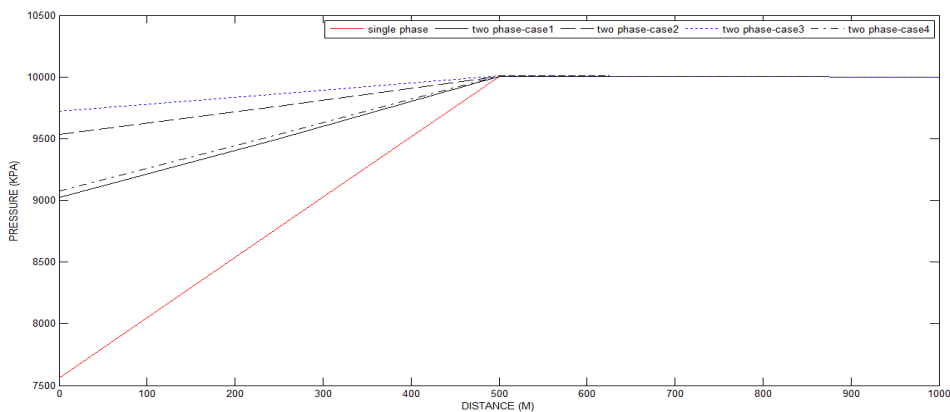
در شکل ۱۲، تغییرات فشار برای هندسه خط لوله ارائه شده در شکل E-۷ نشان داده شده است. همان طور که از این شکل مشخص است، برای یک فشار مشخص در خروجی، در حالت تک فازی فشار بیشتری در ورودی نیاز است (در بیشترین حالت در حدود ۸ درصد در ورودی). این در حالی است که در حالت دو فازی، هرچه میزان غلظت هوای ورودی افزایش یابد، این فشار کاهش می

جدول ۶- الگوهای جریانی حاکم در طول مسیر خط لوله ی E برای درصدهای مختلف هوا

طول (m)	سرعت سطحی گاز (m/s)	سرعت سطحی مایع (m/s)	الگوی جریانی (5% air)	الگوی جریانی (10% air)	الگوی جریانی (15% air)	الگوی جریانی (20% air)
	Air (%): 5 - 10 - 15 - 20					
15.24	0.193 - 0.419 - 0.678 - 0.975	0.530	متناوب	متناوب	متناوب	متناوب
500	0.232 - 0.490 - 0.779 - 1.103	0.530	متناوب	متناوب	متناوب	متناوب
515.2	0.233 - 0.492 - 0.780 - 1.105	0.530	متناوب	متناوب	متناوب	حلقوی قطره ای
1000	0.233 - 0.492 - 0.781 - 1.106	0.530	متناوب	متناوب	متناوب	حلقوی قطره ای



شکل ۱۲- تغییرات فشار در جریان تک فازی آب و جریان دو فازی آب- هوا برای نیمرخ خط لوله ی (E)



شکل ۱۳- تغییرات فشار در جریان تک فازی آب و جریان دو فازی آب- هوا برای نیمرخ خط لوله ی (F)

فشار ورودی با غلظت هوا رابطه ی مستقیم داشته و هرچه این غلظت افزایش یابد، میزان فشار ورودی بیشتری لازم است (در بیشترین حالت در حدود ۲۳ درصد افزایش فشار نسبت به حالت تک فازی). با این حال، این روند در جریان دو فازی زمانی که غلظت هوا به ۲۰ درصد افزایش می یابد، تغییر کرده و به فشار کمتری نیاز است. این امر به علت تغییر الگوی جریان از حالت متناوب به حالت حلقوی قطره ای (جدول ۷) برای این غلظت مشخص بوده که افت فشار کمتری را در مسیر ایجاد می کند.

۳-۶- شبیه سازی برای هندسه ی لوله ی F در

شکل ۷

با توجه به هندسه ی خط لوله در شکل F-۷، تغییرات فشار برای درصد های مختلف هوا در ورودی در شکل ۱۳ و تغییرات الگو های جریانی در جدول ۷ نشان داده شده است. همانطور که در شکل ۱۳ مشاهده می گردد، برای یک فشار مشخص در خروجی، در جریان تک فازی و در جریان رو به پایین به فشار کمتری در ورودی لازم است. علاوه بر آن در جریان دو فازی میزان نیاز به

جدول ۷- الگوهای جریانی حاکم در طول مسیر خط لوله ی F برای درصدهای مختلف هوا

طول (m)	سرعت سطحی گاز (m/s)	سرعت سطحی مایع (m/s)	الگوی جریانی (5% air)	الگوی جریانی (10% air)	الگوی جریانی (15% air)	الگوی جریانی (20% air)
	Air (%): 5 – 10 – 15 – 20					
30.48	0.240 – 0.506 – 0.804 – 1.138	0.530	موجی	موجی	موجی	موجی
500	0.233 – 0.492 – 0.782 – 1.108	0.530	موجی	موجی	موجی	موجی
545.7	0.233 – 0.492 – 0.782 – 1.107	0.530	متناوب	متناوب	متناوب	حلقوی قطره ای
1000	0.233 – 0.492 – 0.782 – 1.108	0.530	متناوب	متناوب	متناوب	حلقوی قطره ای

ضرورت توجه به رژیم های جریانی را در طراحی خطوط لوله بیشتر می نماید تا در زمان بهره برداری این خطوط و تجهیزات وابسته تخریبی صورت نگیرد.

منابع

- 1) Adljo, S. Y., Ansari, M., Rostami, P., 2017. Numerical simulation of upward co-current gas-liquid two-phase flow in the vertical pipes of large diameter by volume of fluid method, Modares Mechanical Engineering, Vol. 17, Vo. 1, pp. 441-452. (In Persian).
- 2) 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, Vol. 6, pp217-225.
- 3) Beggs, H.D., and Brill, J.P.: "A Study of Two-Phase Flow in Inclined Pipes," Journal of Petroleum Technologists, p. 607, May (1973).
- 4) Brill, J.P., and Beggs, H.D., 1991. TWO-PHASE FLOW IN PIPES.
- 5) Frank, T., 2005. Numerical Simulation of Slug Flow Regime for an Air-Water Two-Phase Flow in Horizontal Pipes. The

۴- نتیجه گیری

در این تحقیق، تغییرات فشار در مسیر خط لوله برای هندسه و غلظت های مختلف هوا در جریان دو فازی آب - هوا مورد بررسی قرار گرفته و با حالت تک فازی مقایسه شده است. با توجه به نتایج ارائه شده، می توان دریافت که فشار عملکرد متفاوتی را در جریان های دو فازی در مقابل حالت تک فازی از خود نشان می دهد. این امر به دلیل وجود هوا در سامانه و اثر گذاری آن بر الگو های جریانی چند فازی، و متعاقباً تاثیر آن بر انباشت حجمی مایع در هندسه های مختلف خط لوله است. هوا بنا به نحوه ی استقرار خط لوله ممکن است موجب افزایش حداکثر فشار ها یا بالعکس کاهش آنها گردد. در جریان های رو به بالا در حالت قائم و هندسه ارائه شده در شکل (C-۷ و E-۷) افزایش فشار در سرلوله در جریان تک فازی نسبت به دو فازی وجود داشته که مقادیر آن به ترتیب ۲۶ درصد و ۸ درصد است. در سایر هندسه های ارائه شده، فشار سرلوله در حالت جریان دو فازی بیشتر از حالت تک فازی بوده که بیشترین مقدار آن برابر با ۲۳ درصد در هندسه ارائه شده در شکل (F-۷) و کمترین مقدار آن در جریان دو فازی کمتر از یک درصد در شکل (D-۷) است. این نحوه ی عملکرد جریان چند فازی نسبت به حالت تک فازی،

11th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal-Hydraulics (NURETH-11) Popes' Palace Conference Center, Avignon, France.

6) Guo, B., Song, S., Ghalambor, A., Lin, T.R., 2005&20014. Offshore Pipelines, ELSEVIER PUBLICATION.

7) Hoogendoorn, C.J., 1959. Gas-Liquid Flow in Horizontal Pipes. Chem. Eng. Sci. 9, 205.

8) Kyriakides, S., Corona, E., 2007. Mechanics of Offshore Pipelines (volume1), ELSEVIER PUBLICATION.

9) Lai, Hau, K.F., Noghrehkar, R, Swartz, R., 2000. Investigation of waterhammer in piping networks with void containing non-condensable gas, Nuclear Engineering and Design, Vol. 197, Pts 1 and 2, pp61-74

10) Lauchlan, C.S., Escarameia, M., RWP, M., Gahan, C., 2005. Air in Pipeline (A Literature Review), HR Wallingford.

11) Narges, M.S. and Ghadampour, Z.: "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. 2014.

12) Pothof, I.: "Co-current air-water flow in downward sloping pipes," The University of Delf at Switzerland (2011).

13) Simsci, Simulation Sciences INC, 2001. Introduction to Pipephase.

14) Taitel, Y. and Dukler, A.E., 1976. A model for predicting flow regime trans Takacs, G., 2005. Gas Lift Manual, PennWell Corp.

15) Zeynalabedini, M., Ansari, M. R., 2017. Evaluation of the slug flow parameters in a horizontal two-dimensional duct, Modares Mechanical Engineering, Vol. 17, No. 4, pp. 349-358. (In Persian). nsition in horizontal and near horizontal liquid flow, AIChE, Journal, Vol. 22, No. 1, pp47-55.

16) Thome, J.R., 2014, Two-Phase Flow ition in horizontal and near horizontal liquid flow, AIChE, Journal, Vol. 22, No. 1, pp47-55.

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