

Modeling Simultaneous Effects of Water Hammer and Cavitation Impact on Pipe


Alireza Chegnizadeh¹, Mohammad Javad Bahmani², Hamidreza Rabieifar^{3*}

1- Ph.D. Student, Islamic Azad University, South Tehran Branch, Faculty of Engineering and Technology

2- M.Sc. of Water Engineering and Hydraulic Structures, Islamic Azad University, South Tehran Branch, Department of Civil Engineering,

3- Assistant Professor, Islamic Azad University, South Tehran Branch, Faculty of Engineering and Technology

* h_rabieifar@azad.ac.ir

Received: 8 July 2021, Accepted: 14 November 2021  J. Hydraul. Homepage: www.jhyd.iha.ir

Abstract

Introduction: Transient currents occurs when cavitation change with time, and water hammer impact is one of these phenomena. Since the ram impact phenomenon is a transient and damping phenomenon, it can therefore be called a non-continuous damping current, which occurs between two flow regimes. In this study, in order to investigate the ram impact phenomenon along with cavitation, a flow model in pipes in two-dimensional (quasi-two-dimensional) space has been developed. This numerical modeling has been done in a cylindrical coordinate system and the finite element numerical solution method has been used to solve the equations. This model has been used to calculate the shear stress between different layers of the flow, for each type of flow (quiet or turbulent) of its own relations. In this modeling, the continuity equation is explicitly solved and the momentum equation is implicitly solved. In order to find the best model, Araya laboratory conditions were modeled in both ANSYS and Fluent models and the output results were considered as the basis for selecting the best model. The output results indicate that the model built in Fluent is closest to the laboratory results.

Methodology: A numerical model of ram shock is the solution of simplified Navira-Stokes equations in the space of a tube and a cavitation model involves solving two-phase equations with shock and ram equations which are continuous. For numerical solution of both ram impact and cavitation models, the finite difference numerical solution method has been used. In these equations, the variable u is a function of r , x and t , while H is a function of t , x , so this model is a quasi-two-dimensional model. Wardi and Wang (1991) showed that for both slow and turbulent currents, the maximum radial velocity is between 10 and 20 $\mu\text{m} / \text{s}$. Along the pipe, the normal stress value at all points is assumed to be equal to the pressure head, so the values σ_r , σ_x and σ_θ are assumed to be equal to zero.

Results and Discussion: In FLUENT, a moving mesh model is used to simulate valve closure. The relationships between wave velocity and compressibility (based on the bulk modulus) of the fluid are in the form of programs in the C programming language called ANSYS, and the Wall Function method is used to simulate the viscous substrate. The geometry provided in ANSYS is exactly the same as the geometry provided in FLUENT. To perform the same modeling in both codes, the type and number of equal geometry meshes have been selected and the independence of the answers to the geometry meshing has been

investigated. The boundary condition in ANSYS is similar to the boundary condition in FLUENT, in that a constant pressure boundary condition is applied at the inlet and outlet of the pipe and a wall boundary condition (zero velocity components) is applied to the walls. At the inlet constant pressure equal to 2.65 meters of water column and at the outlet constant atmospheric pressure is applied. With the gradual closing of the valve for a period of 1.085 seconds, the output boundary condition becomes the boundary condition of the wall after this time. Continuous lines are experimental values obtained from the experiment, and dashed lines are values that have been calculated from the classical theory of ram impact based on the assumption that the coefficient of friction is constant. As can be seen, the FLUENT results are better than the classical ram results, but the pressure wave in the FLUENT is consumed slightly earlier than it actually is. This means that the coefficient of friction for the ram impact in the Wall Function model is higher than the actual value. it is possible.

Conclusion: Transient conditions are created due to sudden changes in a hydraulic system. These changes are usually due to changes in flow by valves, turbines, etc. and cause sudden changes in pressure in pipelines. This increase or decrease in pressure can damage the pipes of hydraulic systems valves. Two-dimensionality of the model and consequently segmentation of the pipe section. To different layers and separate calculation of each layer, the modeling is closer to the real state of the phenomenon and as a result the results are more realistic. The two-dimensionality of the model and as a result of dividing the pipe cross section into different layers and calculating each layer separately, has brought the modeling closer to the real state of the phenomenon (compared to one-dimensional models) and as a result the results are more realistic. Also, the performed modelings show that omitting the radial velocity component of the fluid in the pipes has no effect on the accuracy of the problem.

Keywords: Numerical modeling, Cavitation, Water hammer, Simulation, Flow in pipe.



© 2022 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/>)

مدلسازی عددی همزمان ضربه قوچ و جدار خوردگی (حفره زدایی) در لوله

علیرضا چگنی زاده^۱، محمد جواد بهمنی^۲، حمیدرضا ربیعی فر^{۳*}

- ۱- دانشجوی دکتری، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران جنوب، دانشکده فنی و مهندسی.
 ۲- کارشناسی ارشد مهندسی آب و سازه های هیدرولیکی دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب.
 ۳- استادیار، دانشکده مهندسی عمران دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب، تهران، ایران.

* h_rabieifar@azad.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۰/۰۴/۱۷، پذیرش: ۱۴۰۰/۰۸/۲۳، وبگاه نشریه هیدرولیک: www.jhyd.iha.ir

چکیده: جریان های گذرا در هنگامی که پدیده ها با زمان تغییر می کنند رخ می دهند و ضربه قوچ نیز یکی از این پدیده ها می باشد. از آنجایی که پدیده ضربه قوچ یک پدیده زودگذر و میرا است، بنابراین می توان آنرا جریان ناماندگار میرایی نامید، که بین دو رژیم جریان روی می دهد. در این پژوهش، به منظور بررسی پدیده ضربه قوچ همراه با جدار خوردگی (حفره زدایی) یک مدل جریان در لوله ها در فضای دو بعدی (شبه دو بعدی) توسعه داده شده است. این مدلسازی عددی در سامانه مختصات استوانه ای انجام گرفته و برای حل معادله ها از روش حل عددی اجزا محدود استفاده شده است. این مدل برای محاسبه تنش برشی میان لایه های مختلف جریان، برای هر نوع جریان (آرام یا آشفته) از رابطه های خاص خود استفاده شده است. در این مدلسازی معادله پیوستگی به صورت صریح و معادله مومنتوم به صورت ضمنی حل شده است. برای در نظر گرفتن اثر پدیده جدار خوردگی در محاسبات، مدل به سه ناحیه جدار خوردگی توسعه یافته، ضربه قوچ و مرز بین آنها تقسیم بندی گشته و برای هر قسمت یک نوع معادله خاص در نظر و حل شده است. به عبارت دیگر، برای مدلسازی ناحیه جدار خوردگی توسعه یافته از معادله های جریان دو فازی، برای مدلسازی ناحیه ضربه قوچ از معادلات تک فازی و برای مدلسازی ناحیه مرزی آنها از معادله های تکانه استفاده گردیده است. برای صحت سنجی مدل سازی عددی همه مرحله های بالا با استفاده از مدل آزمایشگاهی Pezzinga بررسی شده است. روند کلی و نتایج به دست آمده در این پژوهش دو مرحله صورت گرفته است. مرحله نخست مربوط به یافتن بهترین مدل است و مرحله دوم برای مقایسه بین نتایج مدلسازی عددی که در متلب صورت گرفته بهترین مدل و نتایج آزمایشگاهی آرایا می باشد. برای یافتن بهترین مدل، شرایط آزمایشگاهی آرایا در هر دو مدل ANSYS و Fluent مدل سازی شده و نتایج خروجی مبنای انتخاب بهترین مدل در نظر گرفته شده است. نتایج خروجی نشان دهنده آن است که مدل ساخته شده در Fluent بیشترین نزدیکی را به نتایج آزمایشگاهی دارد. در مرحله دوم مدلسازی عددی صورت گرفته در نرم افزار MATLAB با بهترین مدل انتخاب شده و شرایط آزمایشگاهی آرایا صورت گرفته است. در این مرحله نیز هر سه نتایج قرابت نزدیکی به هم داشتند.

کلید واژگان: مدلسازی عددی، کاویتاسون، ضربه قوچ، شبیه سازی، جریان در لوله.

مقدمه

تحت فشار، به وسیله گذر سیال ممکن است به شدت بر جریان لوله تأثیر بگذارد، لذا تغییرپذیری های فشار ناشی از ماده سیال پویا تعامل باید در موارد بحرانی در نظر گرفته شود. افزون بر این، پدیده جدار خوردگی ممکن است رخ دهد. در هنگام رویداد گذرا سریع، وقتی فشار به میزان اشباع بخار می افتد. تبخیر و جداسازی در لوله ممکن است

با تغییر ناگهانی سرعت جریان مایع به دلیل عملکرد شیر یا پمپ یا علت های دیگر در امتداد لوله گسترش یافته و می تواند به لوله ها آسیب برساند و یا باعث اختلال در عملکرد سامانه جریان شود. (Rosselló et al. (2018) بررسی کردند که عنوان حرکت یا تغییر شکل لوله های

اویه است، تبدیل شد. از سوی دیگر برای شبیه‌سازی این جریان زمانی می‌توان گفت که شرایط واقعی در نظر گرفته شده است، که علاوه بر ضربه قوچ در طول مسیر جدار خوردگی نیز مدل شده باشد. (Washio et al. (2014) کاویتاسون هنگامی رخ می‌دهد که فشار موضعی پایین‌تر از فشار بخار اشباع شده از سیال باشد. ضربه قوچ ناشی از آب می‌تواند یک فشار گذرا را در خط لوله ایجاد کند، که ممکن است منجر به حفره شود. (Streeter (1983) معادله‌های تحلیلی را ایجاد کردند که سرعت بخار و کسر بخار را به عنوان تابع‌های زمان و مسافت در کل منطقه‌ها دو فاز ایجاد می‌کند. مدل عددی را برای تعیین فشار در خطوط لوله، از جمله تاثیر ورودی هوا، به صورت دقیق‌تر نشان داد. (Simpson (1986) در تاسیسات پمپاژ مانند ایستگاه‌های پمپاژ فاضلاب، که در آن محتوای گاز و ورودی هوا وجود دارد، محاسبه گذرگاه‌های فشار سیال در خطوط لوله را هنگامی فرض کرد که سرعت موج ثابت و اصطکاک ثابت باشد. (Lee (1991) یک مدل عددی و روش محاسبه‌ای فرض کرد تا بتواند محاسبه بهتر فشار مایع در یک خط لوله را با محاسبه اثرات ورودی هوا و ویژگی‌های گاز سیال حمل شده را محاسبه کند. (Bergant and Simpson (1994) به بررسی گازهای آزاد و حل شده در مایع و جدار خوردگی در فشار بخار سیال مدل‌سازی شده پرداخت. رفتار شبکه‌های لوله‌ای را با استفاده از مدل گذرا پیش‌بینی کرد و نتایج را با نتایج اندازه‌گیری‌های میدانی مقایسه کرد. نتایج با رفتار پیش‌بینی شده توسط یک مدل گذرا شبکه مقایسه شد که مدل رایانه اغلب با داده‌های تست میدانی همخوانی خوبی داشت. (McInnis and Karney (1995) مدل‌های دو فاز جریان همگن را در نظر گرفتند، که در آن جریان ممکن است در حالت مایع یا بخار وجود داشته باشد. یکی از پسنیده‌ترین مدل‌های دو فاز، مدل به کلی جدار خوردگی است که در آغاز توسط سینگال و آتاوال ارائه شده است. نتایج عددی از سه مدل با نتایج اندازه‌گیری برای شماری از رژیم‌های جریان آغاز شده توسط بسته شدن سریع یک دریچه پایین دست در یک دستگاه آزمایشگاهی لوله کشی شیب دار انجام شد. سرانجام، در

رخ دهد. یک شبیه‌سازی برای نوسان فشار ناشی از ضربه قوچ آب انجام شده که بر مبنای استفاده مشترک از روش یک بعدی ویژگی‌های (MOC) و روش حجم محدود سه بعدی (FVM) است. (Geng et al. (2017) به بررسی پیش‌بینی شبیه‌سازی که باعث ایجاد حفره در جلوی واشر می‌شود پرداخته اند که می‌تواند به بهینه‌سازی طرح‌های صنعتی کمک کند. سیستم‌های لوله برای انتقال مایع‌ها در صنایع نوین امروزی بسیار زیاد استفاده می‌شوند، به عنوان مثال، مایع‌های شیمیایی خطرناک، گاز، روغن، آب، و غیره. از سوی ایمنی سامانه‌های لوله‌ای اغلب توسط پدیده‌های گذرا ناشی از آب به چالش کشیده می‌شود. ضربه قوچ دلیل این چالش است، که پس از باز یا بسته شدن ناگهانی سوپاپ‌ها، یا پس از خاموش شدن پمپ‌ها رخ می‌دهد. جریان گذرا در هنگامی که پدیده‌ها با زمان تغییر می‌کنند رخ می‌دهند و ضربه قوچ نیز یکی از این پدیده‌ها می‌باشد. از آنجایی که پدیده ضربه قوچ یک پدیده زودگذر و میرا است، بنابراین می‌توان آنرا جریان ناماندگار میرایی نامید، که بین دو رژیم جریان روی می‌دهد. در واقع آنچه به نام ضربه قوچ در شبکه‌های انتقال شناخته می‌شود، شرایط گذرائی است که ممکن است به علت تغییرپذیری‌های سریع در هنگام باز و بسته کردن شیرها، راه اندازی یا متوقف شدن پمپ‌ها و یا تغییر بار مصرفی توربین‌ها رخ دهد. در این حالت تنش وارد شده با سرعت صوت به صورت موج فشاری مثبت یا منفی در سامانه به صورت رفت و برگشتی حرکت کرده و به علت تنش برشی دیواره به تدریج مستهلک می‌شود. ضربه قوچ هنگامی رخ می‌دهد که آب تحت فشار درونی لوله دچار تغییر ناگهانی شود (برای مثال سرعت آن عوض شود) و افزایش فشار پیدا کند که با بروز صدا همراه است. این پدیده اغلب در زمان بسته شدن شیرهای در انتهای خطوط لوله کشی رخ می‌دهد. در واقع سازوکار ضربه قوچ آب، حساسیت یک سیستم انتقال سیال را در مقابل هر نوع تغییر وضعیت دبی، سرعت و فشار جریان نشان می‌دهد و چون پدیده ضربه قوچ آب یک حالت زودگذر و موقتی است، لذا پس از آن که این موج مستهلک شد، جریان دوباره به حالت پایدار و دائمی که متفاوت از حالت پایدار

۲- طراحی کدی برای بررسی پدیده ضربه قوچ، جدار خوردگی و جریان دو فازی با استفاده از نرم افزار متلب صورت گرفته که صحت سنجی هر مرحله از این کد از طریق مدل آزمایشگاهی پزینگا صورت خواهد گرفت.

۳- مقایسه نتایج کد نوشته شده در متلب، بهترین نرم افزار و شرایط آزمایشگاهی ARAYA صورت خواهد گرفت.

۲- مواد و روش ها

روش اجزا محدود (FEM)، روشی است عددی برای حل تقریبی معادله های دیفرانسیل جزئی و نیز حل معادله های انتگرالی. اساس کار این روش حذف کامل معادلات دیفرانسیل یا ساده سازی آن ها به معادله های دیفرانسیل معمولی، که با روش های عددی مانند اویلر حل می شوند، می باشد. در این پژوهش معادله ها به کمک روش اجزاء محدود حل گردیده اند. در این حالت رابطه پیوستگی به صورت رابطه صریح (Explicit) زیر نوشته می شود:

$$\frac{H_i^{n+1} - H_i^n}{dx} + \frac{a^2}{g A_0} \frac{Q_{i+1}^n - Q_i^n}{\Delta x} = 0 \quad (1)$$

در این رابطه، نمایه های i و n به ترتیب به گره ها در جهت x و زمان اشاره دارند. برای جداسازی معادله مومنتوم از یک رابطه ای ضمنی (Implicit) برای چیره شدن بر قيود محاسبه ای و دستیابی پایداری استفاده شده است. بر این مبنای رابطه مومنتوم بصورت زیر قابل بازنویسی می باشد.

$$\frac{u_{i,j}^{n+1} - u_{i,j}^n}{\Delta x} + g \left[\frac{H_i^{n+1} - H_{i-1}^n}{\Delta x} + \sin \theta \right] \frac{2\pi}{\rho} \times (r_{j+i}^* \tau_{i,j-1}^* - r_j^* \tau_{i-j}^*) = 0 \quad (2)$$

برای محاسبه تنش های برشی نیز رابطه زیر مورد استفاده قرار گرفته است (Bergant and Simpson, 1999):

$$\tau_{i,j}^* = (1 - \beta) \tau_{i,j}^n + \beta \tau_{i,j}^{n+1} \quad (3)$$

که در این رابطه β ضریب وزنی بین صفر تا یک می باشد. اگر این ضریب برابر صفر منظور شود، یک رابطه همانند کارهای (Zielke (1968) و Modica and Pezzinga (1992)

مورد صحت رویکردهای مدل سازی نتیجه گیری شد. (Bergant and Simpson (1999) با استفاده از یک طرح از نوع Gadunov برای مدل سازی مسئله ضربه قوچ با مرتبه اول و دوم طرح های مبتنی بر گسترش سری تیلور از تغییر ناپذیرهای ریمان را مطرح کردند. مشخص شد که مرتبه اول طرح بسیار شبیه به روش ویژگی های (MOC) با درون یابی خطی استیک برنامه رایانه ای برای شبیه سازی سامانه های توزیع آب در آمریکای شمالی تهیه کردند. بررسی های گسترده آنان نشان داد که جلوگیری از جریان برگشتی در سامانه های توزیع آب می تواند تاثیر منفی گذرا را کاهش می دهد. (Kwon and Lee et al. (2003) and Lee (2005) روش MOC و روش Wave را مقایسه کردند. روش ویژگی ها (WCM) نشان می دهد، برای همان دقت مدل سازی، WCM محاسبات کمتری و زمان اجرای کمتر مورد نیاز است. یک بررسی عددی از جداسازی ستون آب در یک سامانه ساده مخزن -لوله و شیر با ایستگاه پمپاژ آزمایش کرده و معادله های حاکم برای جریان گذرا دو فاز در لوله ها بر مبنای روش ویژگی ها (MOC) و استفاده از یک مدل جدار خوردگی بخار تعمیم یافته (GIVCM) حل کرده اند. نتایج عددی برای اهداف اعتبارسنجی با داده های تجربی مقایسه شد، و مقایسه نشان داد که GIVCM نتایج تجربی را دقیقتر از مدل حفره بخار گسسته (DVCM) توصیف می کند. به طور خاص، GIVCM از نظر زمان بندی و بزرگی فشار با داده های تجربی نسبت به DVCM بهتر ارتباط دارد. (Kwon and Lee (2008) شبیه سازی برای نوسان فشار رانده شده توسط ضربه قوچ، بر مبنای استفاده مشترک از روش یک بعدی از ویژگی های (MOC) و روش حجم محدود سه بعدی (FVM) را انجام دادند. نتیجه آنان شامل، پیش بینی و شبیه سازی حفره ای که توسط ضربه قوچ پدید می آید و می تواند برخی از راهنمایی ها برای بهینه سازی طرح های صنعتی را داشته باشد شامل شد. این بررسی به دنبال آن خواهد بود که:

۱- بهترین نرم افزار از بین ANSYS و FLUENT برای مدل سازی پدیده ضربه قوچ به همراه جدار خوردگی با استفاده از مدل آزمایشگاهی ARAYA انتخاب شود.

یک مدل عددی ضربه قوچ عبارت است از حل معادله های ساده شده ناوراستوکس در فضای یک لوله و یک مدل جدارخوردگی شامل حل معادلات دو فازي به همراه معادله های تکانه و ضربه قوچ که به صورت پیوسته می باشد. برای حل عددی هر دو مدل ضربه قوچ و جدارخوردگی از روش حل عددی تفاضل محدود استفاده شده است. در این معادلات متغیر u تابعی از x و t می باشد، در حالی که H تابعی از x و t می باشد، به همین دلیل این مدل یک مدل شبه دو بعدی می باشد. Wardy and Wang (1999) نشان دادند که برای هر دو جریان های آرام و آشفته بیشینه مقدار سرعت شعاعی بین ۱۰ تا ۲۰ میکرومتر بر ثانیه می باشد. در طول لوله میزان تنش نرمال در همه نقطه ها برابر با بار فشار فرض می شود، بنابراین میزان های σ_x ، σ_r و σ_θ برابر با صفر در نظر گرفته می شوند. با توجه به این ساده سازی ها معادله مومنتوم در راستای r به شکل زیر تبدیل می شود (Geng et al., 2017).

معادله مومنتوم در راستای x :

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial t} + v \frac{\partial u}{\partial r} = -g \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} - \frac{1}{\rho r} \frac{\partial (r\tau)}{\partial r} \quad (5)$$

۲-۳- معادله های حفره زایی یا جدارخوردگی

جدارخوردگی از این جهت اهمیت دارد که این پدیده سبب نزدیکتر شدن نتایج محاسبه ها به واقعیت می شوند. معادله ها در هنگام حل، یک فشار و یک دبی برای یک نقطه در نظر گرفته می شود و این مسئله منجر می شود که هنگام افت فشار، فشار کمتر از فشار بخار آب برسد، که شاید پاسخ ریاضی مسئله است اما پاسخ واقعی نمی باشد و این فشار مجازی در مرحله بعد، بر روی بیشینه فشار مثبت نیز تأثیر می گذارد، و جواب غیر واقعی به دست می آید. معادله هایی که ناحیه جدارخوردگی بخاری پخش شده را در فضای دو بعدی (شبه دو بعدی) توصیف می کنند، شامل معادله های پیوستگی و معادلات اندازه حرکت می باشند:

و اگر این ضریب برابر با یک قرار داده شود، یک رابطه کامل ضمنی به دست خواهد آمد. به هر حال رابطه صریح در صورتی پایدار خواهد بود که گام زمانی بر مبنای میزان پارامترهای مسئله تعیین شده باشد. در این برنامه برای حل این مسئله، میزان ضریب β برابر ۰/۵ در نظر گرفته شده است. جهت مدلسازی دقیق تر ترم اصطکاک می توان ضریب β را بزرگتر از ۰/۵ و حتی برابر یک نیز منظور کرد.

۲-۱- مدلسازی جریان دو فازي

به طور ساده یک فاز یکی از حالت های ماده است و می تواند مایع، جامد یا گاز باشد. جریان های چند فازي جریان توام و با هم چند فاز می باشند. جریان دو فازي ساده ترین حالت جریانهای چند فازي است. عبارت دو جزئی (two component) گاهی وقت ها برای توصیف جریان هایی که شامل ماده شیمیایی یکسان نیستند استفاده می شود. برای مثال جریان های آب - بخار دو فازي هستند. در حالی که جریان های هوا - آب دو جزئی (two component) هستند. بعضی از جریانهای دو جزئی (اغلب مایع - مایع) شامل یک فاز هستند اما اغلب جریان های دو فازي نام نهاده می شوند که در آنها، فازها به طور پیوسته یا نا پیوسته قابل تشخیص خواهند بود. گرچه محاسبه هایی که جریان های دو فازي و یا دو جزئی را توصیف می کنند، از یکدیگر قابل تشخیص هستند، مشکلی برای تعریف های مربوطه به هر کدام از دو اصطلاح بالا وجود ندارد.

۲-۲- کد ضربه قوچ

معادلات ضربه قوچ در لوله ها را می توان به وسیله ساده سازی معادله های انتقال جرم بدست آورد. معادلات کلی انتقال جرم عبارتند از:

$$\frac{\partial \rho}{\partial \tau} + v \cdot (\rho \bar{v}) = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial}{\partial \tau} (\rho \bar{v}) + \nabla \cdot (\rho \bar{v} \bar{v}) = -\nabla \rho + \nabla \cdot (\bar{\tau}) + \rho \bar{g} + \bar{F}$$

$$\bar{\tau} = \mu \left[\nabla v + \nabla v^T \right] - \frac{2}{3} \nabla \cdot v \mathbf{I}$$

نظر حباب‌ها (در حالتی که میزان کسر حجمی بخار خیلی کم است)، بر روی اصطکاک دیواره می‌باشد.

۲-۴- کد سامانه دو فازی ضربه قوچ

در هنگامی که جدار خوردگی رخ می‌دهد، میزان فشار در همه نقطه های سیال دو فازی ثابت و برابر با فشار بخار آب می‌باشد بنابراین میزان گردابان فشار همواره صفر است. همچنین فرض می‌شود که لغزش مولکول‌های دو فاز بسیار ناچیز می‌باشد و در نتیجه از اثر نیروی لغزش مولکول‌های فازهای مختلف صرف نظر می‌گردد. در معادله های جدار خوردگی بخاری چگالی مخلوط را می‌توان به صورت زیر تعریف نمود:

$$\rho_m = \alpha_v \rho_v + (1 - \alpha_v) \rho_l \quad (8)$$

که در این رابطه α_v درصد حجمی بخار، ρ_v چگالی بخار و ρ_l چگالی سیال (در اینجا آب) می‌باشد. برای میزان های کوچک کسر نسبت حجمی $\alpha_v \gg 1$ می‌توان میزان چگالی مخلوط را به شکل زیر تعریف نمود:

$$\rho_m = (1 - \alpha_v) \rho_l \quad (9)$$

حال با توجه به این فرضیه‌ها و همچنین فرضیه هایی که برای به دست آوردن معادله ضربه قوچ شبه دو بعدی به کار رفته بود، در نهایت معادله پیوستگی جریان دوفازی به صورت زیر تبدیل می‌شود:

$$\partial \alpha \partial t v + U_m \partial \partial \alpha x v - \partial U \partial x m = 0 \quad (10)$$

در معادله بالا U_m سرعت میانگین مخلوط سیال و α_v درصد حجمی بخار در مقطع لوله می‌باشد. با توجه به اینکه مسئله درصد حجمی بخار دارای میزان‌های ناچیزی می‌باشد، میزان تنش دیواره‌ها و همچنین تنش برشی لایه‌های میانی تفاوتی با حالت تک فازی ندارد و در نتیجه از همان معادله‌های تک فازی برای محاسبه تنش‌های برشی استفاده می‌شود. پس از ساده‌سازی معادله مومنتوم با فرض مولفه سرعت در راستای شعاع لوله v برابر با صفر و همچنین صرف نظر کردن از تاثیر نیروی لغزش مولکول‌های فازهای مختلف در نهایت به معادله زیر می‌رسیم:

$$u_{tm} + u_m \partial \partial u x m + g \cdot \sin \theta + \rho r \quad (11)$$

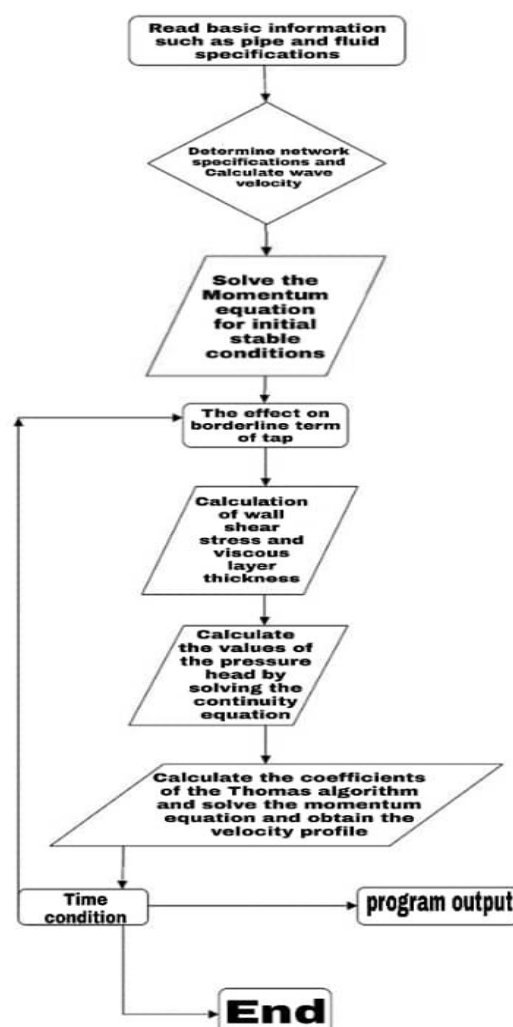


Fig 1 Flow chart of water hammer

شکل ۱ روندنمایی ضربه قوچ

$$\frac{\partial \alpha_v}{\partial t} + v_m \frac{\partial \alpha_m}{\partial x} - \frac{\partial v_m}{\partial x} = 0 \quad (6)$$

$$\frac{\partial \alpha_v}{\partial t} + u_m \frac{\partial u_m}{\partial x} + g \cdot \sin \theta + \frac{1}{\rho r} \frac{\partial (r \tau)}{\partial r} = 0 \quad (7)$$

در این معادله‌ها فشار مقداری ثابت و برابر با فشار بخار در نظر گرفته شده و نیروهای وارده شامل جاذبه و اصطکاک می‌باشد. همچنین میزان مولفه سرعت در راستای شعاع لوله برابر با صفر فرض شده است. دو معادله یادشده برای میزان های کوچک کسر حجمی بخار و تا دمایی در حدود ۳۳۰ کلوین برقرار می‌باشد و در این حالت تاثیرهای ترمودینامیکی مهم نیست. در این معادله های میزان اصطکاک دیواره برابر مقدار آن در حالت تک فازی تعیین شده است این به خاطر تاثیرات خیلی کم و قابل صرف

که در آنها، فازها بطور پیوسته یا غیر پیوسته قابل تشخیص خواهند بود. گرچه محاسبه‌هایی که جریان‌های دو فاز و دو جزئی را توصیف می‌کنند، از یکدیگر قابل تشخیص است با این حال مسئله‌ای برای تعریف‌های مربوطه به هر کدام از دو اصطلاح بالا وجود ندارد. معادله‌ها برای مخلوطی از سیال‌ها که در فازهای مختلف قرار دارند به صورت کلی به شکل زیر تعریف می‌شوند:

پیوستگی:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_m) + \nabla(\rho_m \vec{v}_m) = 0 \quad (15)$$

مومنتوم:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_m \vec{v}_m) + \nabla(\rho_m \vec{v}_m \vec{v}_m) =$$

$$-\nabla \rho + \nabla \left[\mu_m (\nabla \vec{v}_m + \nabla^T \vec{v}_m) \right] + \rho_m \vec{g} + \vec{F}$$

$$+ \nabla \left(\sum_{n=1}^n \alpha_n \rho_n \vec{v}_{dr,n} \vec{v}_{dr,n} \right)$$

$$\vec{v}_m = \frac{\sum_{n=1}^n \alpha_m \rho_n \vec{v}_n}{\rho_m}$$

$$\rho_m = \sum_{n=1}^n \alpha_m \rho_n$$

$$\mu_m = \sum_{n=1}^n \alpha_m \rho_n$$

$$\vec{v}_{dr,n} = \vec{v}_n - \vec{v}_m$$

در هنگامی که جدار خوردگی رخ می‌دهد، میزان فشار در همه نقطه‌های سیال دو فاز ثابت و برابر با فشار بخار آب می‌باشد بنابراین میزان گردآیان فشار همواره صفر است. همچنین فرض می‌شود که لغزش مولکول‌های دو فاز بسیار ناچیز می‌باشد و در نتیجه از اثر نیروی لغزش مولکول‌های فازهای مختلف صرف‌نظر می‌شود. در معادله‌های جدار خوردگی بخاری چگالی مخلوط را می‌توان به صورت زیر تعریف نمود:

$$\rho_m = \alpha_v \rho_v + (1 - \alpha_v) \rho_l \quad (17)$$

برای میزان‌های کوچک کسر نسبت حجمی می‌توان میزان چگالی مخلوط را به شکل زیر تعریف نمود:

لازم به یادآوری است که در معادله بالا، از ترم انتقال (Advection) صرف‌نظر شده است. این ترم اغلب در مدلسازی ضربه قوچ تاثیر داده نمی‌شود، زیرا در این پدیده به علت بسته بودن شیر انتقال جرم صورت نمی‌شود. در این پژوهش معادله‌ها به کمک روش اجزاء محدود حل شده‌اند. در این حالت رابطه پیوستگی به صورت رابطه صریح (Explicit) زیر نوشته می‌شود:

$$\frac{H_i^{n+1} - H_i^n}{\Delta x} + \frac{\alpha^2}{g A_0} \frac{Q_{i+1}^n - Q_i^n}{\Delta x} = 0 \quad (12)$$

در این رابطه نمایه‌های i و n به ترتیب به گره‌ها در جهت x و زمان اشاره دارند. برای جداسازی معادله مومنتوم از یک رابطه‌ای ضمنی (Implicit) برای چیره شدن بر قیود محاسبه‌ای و حصول پایداری استفاده شده است. بر این مبنا رابطه مومنتوم بصورت زیر قابل بازنویسی می‌باشد.

$$\frac{u_{i,j}^{n+1} - u_{i,j}^n}{\Delta x} + g \left[\frac{H_i^{n+1} - H_{i-1}^n}{\Delta x} + \sin \theta \right] \frac{2\pi}{\rho} \times$$

$$\frac{(r_{j+1}^* \tau_{i,j-1}^* - r_j^* \tau_{i-j}^*)}{\Delta A} = 0 \quad (13)$$

برای محاسبه تنش‌های برشی نیز رابطه زیر استفاده شده است (Bergant and Simpson, 1999):

$$\tau_{i,j}^* = (1 - \beta) \tau_{i,j}^n + \beta \tau_{i,j}^{n+1} \quad (14)$$

که در این رابطه β ضریب وزنی بین صفر تا یک می‌باشد. در این برنامه برای حل این مسئله، میزان ضریب β برابر 0.5 نظر گرفته شده است. برای مدلسازی دقیق تر ترم اصطکاک می‌توان ضریب β را بزرگتر از 0.5 و حتی برابر یک نیز منظور کرد. به طور ساده یک فاز یکی از حالت‌های ماده است و می‌تواند مایع، جامد یا گاز باشد. جریان‌های چند فاز و جریان توام و با هم چند فاز می‌باشند. جریان دو فاز ساده‌ترین حالت جریان‌های چند فاز است. عبارت دو جزئی (two component) گاهی برای توصیف جریان‌هایی که شامل ماده شیمیایی یکسان نیستند استفاده می‌شود. برای مثال جریان‌های آب - بخار دو فاز هستند. در حالی که جریان‌های هوا - آب دو جزئی (two component) هستند. بعضی از جریان‌های دو جزئی (اغلب مایع - مایع) شامل یک فاز هستند اما اغلب جریان‌های دو فاز نام نهاده می‌شوند

همچنین تنش برشی لایه‌های میانی تفاوتی با حالت تک فازی ندارد و در نتیجه از همان معادله های تک فازی برای محاسبه تنش های برشی استفاده می‌شود. پس از ساده سازی معادله مومنتوم با فرض مولفه سرعت در راستای شعاع لوله v برابر با صفر و همچنین صرف نظر کردن از اثر نیروی لغزش مولکول‌های فازهای مختلف در نهایت به معادله زیر می‌رسیم:

(۲۰)

$$\frac{\partial u_m}{\partial t} + U_m \frac{\partial u_m}{\partial x} + g \cdot \sin \theta + \frac{1}{\rho r} \frac{\partial(r\tau)}{\partial r} = 0$$

لازم به یادآوری است که در معادله بالا، از ترم انتقال صرف نظر شده است. این ترم اغلب در مدل سازی ضربه قوچ اثر داده نمی‌شود، زیرا در این پدیده به علت بسته بودن شیر انتقال جرم صورت نمی‌گیرد. معادله مومنتوم به دست آمده همانند معادله مومنتوم جریان تک فازی (ضربه قوچ) می‌باشد با این تفاوت که ترم گرادیان فشار در اینجا وجود ندارد. بنابراین می‌توان معادله مومنتوم را به همان شیوه پیشین حل نمود و سرعت‌های جریان مخلوط سیال و بخار را در همه شبکه بدست آورد.

در مرحله بعدی با استفاده از سرعت هایی که در قسمت قبلی بدست آمده‌اند معادله پیوستگی را حل نموده و مقادیر αv بدست می‌آیند. برای حل ترم انتقال در معادله پیوستگی از روش درجه دقت یک پیشرو استفاده شده است.

بنابراین:

$$\alpha_{vi}^{n+1} = \alpha_{vi}^{n+1} \frac{\Delta t}{\Delta x} (u_{1+i}^{n+1} \alpha_{vi+1}^n - u_i^{n+1} \alpha_{vi}^n) + \frac{u_{1+i}^{n+1} - u_i^{n+1}}{\Delta x} \quad (21)$$

به این ترتیب درصد حجمی بخار محاسبه می‌شود. پس از افت فشار آب به فشار بخار، یک ناحیه حفره زایی بخاری در نتیجه انتشار یک موج کم فشار انبساط می‌کند و پس از مدتی رشد ناحیه حفره زایی متوقف شده و عمل تقطیر رخ می‌دهد. عمل تقطیر بخار به آب باعث جابه جایی سطح جدا کننده فاز مایع و ناحیه دو فازی مخلوط مایع - بخار در سیال شده و در اینجا به وسیله معادله‌های تکانه اثر افزایش فشار ناگهانی در اثر محو شدن حباب‌های بخار

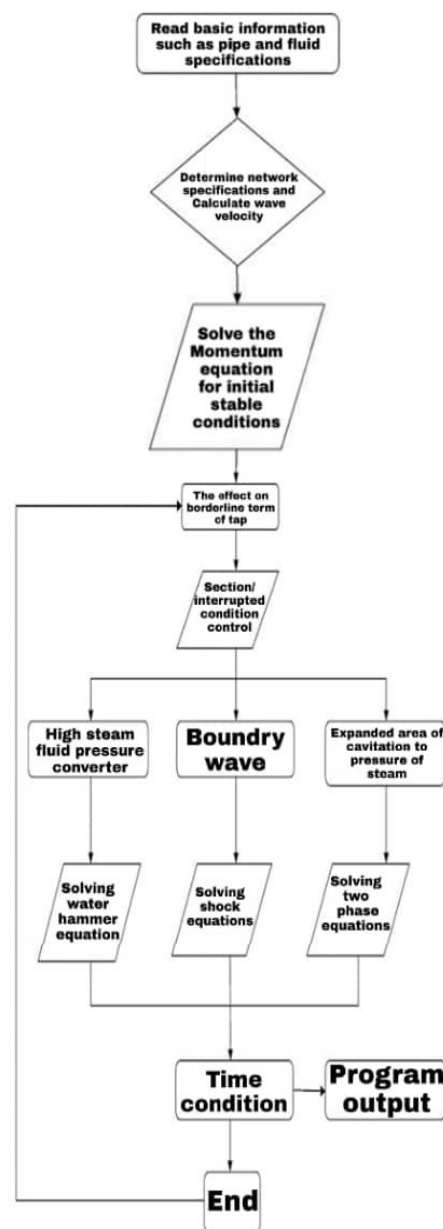


Fig 2 Two-phase program flowchart

شکل ۲ روندنمایی برنامه دوفازی

$$\rho_m = (1 - \alpha_v) \rho_l \quad (18)$$

حال با توجه به این فرضیه ها و همچنین فرضیه‌هایی که برای به دست آوردن معادله ضربه قوچ شبه دو بعدی به کار رفته بود، در نهایت معادله پیوستگی جریان دوفازی به صورت زیر تبدیل می‌شود:

$$\frac{\partial \alpha_v}{\partial t} + U_m \frac{\partial \alpha_v}{\partial x} - \frac{\partial U_m}{\partial x} = 0 \quad (19)$$

با توجه به این مسئله که مقدار درصد حجمی بخار دارای میزان های ناچیزی می‌باشد، مقدار تنش دیواره‌ها و

$$\frac{u_{1,ni}^{n+1} - u_{i,nj-1}^n}{\Delta t} + g \left[\frac{H_i^{n+1} - H_{i-1}^n}{\Delta x} + \sin \theta \right] + \quad (25)$$

$$\frac{2\pi (r_i \tau_{i,1}^*)}{\rho \Delta A} = 0$$

در یک مخزن بزرگ در بالا دست جریان، می‌توان خط تراز هیدرولیکی در جریان غیر دائم را همواره ثابت در نظر گرفت، بنابراین:

$$H_p = H_0 \quad (26)$$

که در رابطه بالا، H_0 بار در مخزن بالادست، H_p میزان بار گره منطبق بر مخزن می‌باشد.

بنابراین معادله مومنوم در نخستین گره به صورت زیر می‌باشد.

$$\frac{u_{1,i}^{n+1} - u_{i,j-1}^n}{\Delta t} + g \frac{H_i^{n+1} - H_0}{\Delta x} + \quad (27)$$

$$\frac{2\pi (r_{j+1} t_{i,j+1}^* r_j t_j^*)}{\rho \Delta \rho} = 0$$

که در معادله بالا H_i^{n+1} هد فشار در اولین گره پس از مخزن می‌باشد.

۷-۲- شرط مرزی شیر

جریان دائمی در یک شیر فلکه می‌تواند به صورت زیر بیان شود:

$$Q_0 = (L_d A_v)_0 \sqrt{2gH} \quad (28)$$

که در معادله بالا Q_0 دبی جریان دائم، L_d ضریب دبی، A_v بازدهی شیر و H هد فشار در بالادست شیر می‌باشد. در حالتی که شیر نیمه باز باشد میزان دبی برابر است با:

$$Q_p = (L_d A_v)_0 \sqrt{2g\Delta H} \quad (29)$$

که ΔH اختلاف هد در دو طرف شیر می‌باشد. حال با تعریف کمیت زیر:

$$t = \frac{L_d A_v}{(L_d A_v)_0} \quad (30)$$

میزان دبی برابر می‌شود با:

$$Q_p = \frac{Q_0}{\sqrt{H}} t \sqrt{\Delta H} \quad (31)$$

برای جریان در حالت دائم $t = 1$ و برای حالتی که شیر بسته است $t = 0$ می‌باشد. حال با مشخص شدن میزان

تشریح می‌شود. با فرض هم دمایی و همچنین با فرض ضخامت ناچیز سطح جدا کننده می‌توان معادله‌های تکانه را شامل پیوستگی و مومنوم را به صورت زیر نوشت:

$$\alpha_s \left[\frac{g}{\alpha^2} (H_s - H_{sv}) + \alpha_v \right] - (U - U_m) = 0 \quad (22)$$

$$g (H_s - H_{sv}) + (U - U_m)(U - U_m - \alpha_s) = 0 \quad (23)$$

معادله مومنوم بدست آمده همانند معادله مومنوم جریان تک فازی (ضربه قوچ) می‌باشد با این تفاوت که ترم گرادیان فشار در اینجا وجود ندارد. بنابراین می‌توان معادله مومنوم را به همان شیوه پیشین حل کرد و سرعت‌های جریان مخلوط سیال و بخار را در همه شبکه بدست آورد.

۵-۲- شرایط مرزی

در هر دو قطع دو شرط مرزی وجود دارد یکی شرط مرزی دیواره لوله که در این میزان مقدار تنش برشی برابر تنش برشی دیواره قرار داده می‌شود. مرز دیگر مربوط به لایه میانی می‌باشد، که در آنجا میزان تنش برشی واقع در خط مرکز لوله را برابر با صفر قرار داده و معادلات حل می‌شوند. در طول لوله نیز دو مرز وجود دارد یکی مرز بالادست و دیگری مرز پایین دست که در مدلسازی ضربه قوچ و جدار خوردگی یکی از این مرزها هد مخزن و دیگری سرعت یا دبی جریان در محل شیر می‌باشد.

۶-۲- شرط مرزی دیواره لوله

در محل دیوار لوله، میزان تنش برشی برابر تنش برشی دیواره قرار داده می‌شود و حال اگر n_j شماره معادل مرز لوله در شبکه باشد، معادله مومنوم را می‌توان به شکل زیر نوشت:

$$\frac{u_{1,ni}^{n+1} - u_{i,nj-1}^n}{\Delta t} + g \left[\frac{H_i^{n+1} - H_{i-1}^n}{\Delta x} + \sin \theta \right] \quad (24)$$

$$+ \frac{2\pi (R \tau_{i,nj}^* - r_{nj-1} \tau_{i,nj-1}^*)}{\rho \Delta A} = 0$$

شرط مرزی مرزی خط مرکز لوله در محل خط مرکز لوله، میزان تنش برشی برابر با صفر قرار داده می‌شود و حال اگر ۱ شماره معادل اولین خط بعد از خط مرکز لوله در شبکه باشد، معادله مومنوم را می‌توان به شکل زیر نوشت:

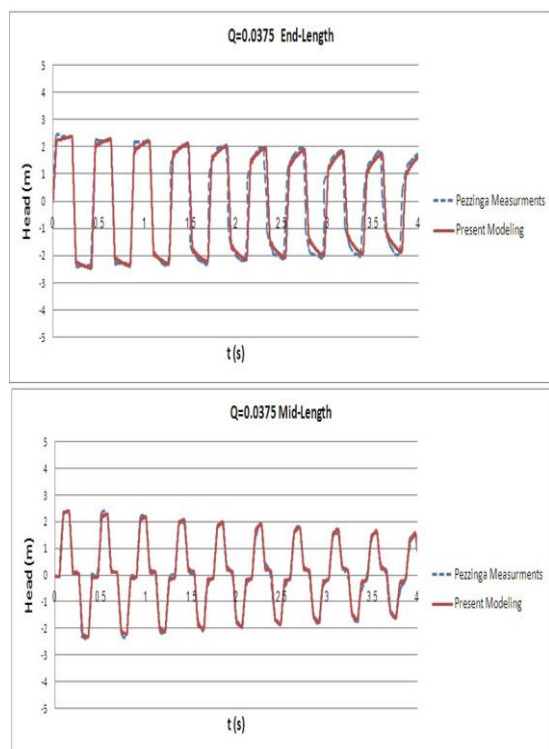


Fig. 4 Comparison of modeling results with Pezzinga laboratory results for discharge 0.0375 lit/s (Slow flow)

شکل ۴ مقایسه نتایج مدلسازی انجام گرفته با نتایج

آزمایشگاهی پزینگا برای دبی ۰/۰۳۷۵ lit/s (جریان آرام)

و همه اندازه‌گیری‌های دبی به وسیله یک جریان سنج الکترومگنتیک انجام می‌شود. در این شبکه، فشار به وسیله چندین مبدل تنش- کرنش اندازه‌گیری می‌گردد. این مبدل‌ها قابلیت سنجش فشارهای ۱۰-۰ بار را داشته و دارای بیشینه خطای ۵٪ می‌باشند.

در حالی که جریان آشفتگی می‌باشد (شکل ۷)، بار فشار به دست آمده از مدلسازی عددی شبه دو بعدی در نقطه‌های بیشینه و کمینه کمی بیشتر از میزان‌های بار فشار آزمایشگاهی می‌باشند که بار دیگر این اختلاف در محل شیر بیشتر از میانه لوله بوده ولی به دلیل این که این اختلاف‌ها فشار کمتر از ۵ درصد می‌باشد، لذا نتایج به دست آمده قابل قبول می‌باشند.

در هر دو حالت کمی اختلاف فاز بین نتایج آزمایشگاهی پزینگا و مدل دو بعدی ایجاد شده در این مقاله برای زمان‌های بعد از ۲ ثانیه وجود دارد که این امر می‌تواند به خاطر تفاوت تنش برشی دیواره لوله محاسبه گشته در مدلسازی عددی با میزان واقعی باشد.

دبی در گره واقع در محل شیر می‌توان معادله پیوستگی را برای این گره به صورت زیر نوشت:

$$\frac{H_i^{n+1} - H_i^n}{\Delta t} + \frac{\alpha^2}{gA_0} \frac{Q_p - Q_i^n}{\Delta x} = 0 \quad (32)$$

که در این معادله Q_i^n دبی عبوری از گره مجاور شیر در زمان معلوم می‌باشد.

۳- بحث

۳-۱- صحت سنجی کد ساخته شده در هر

مرحله با استفاده از مدل آزمایشگاهی پزینگا

پزینگا (Pezzinga, 1992) یک سری آزمایش‌های گسترده برای بررسی پدیده ضربه قوچ به عمل آورده است. اطلاعات کلی این مدل آزمایشگاهی به صورت زیر می‌باشد.

این آزمایش‌ها بر روی یک شبکه لوله که به وسیله شیرهایی به هم متصل شده‌اند انجام گرفته است. شکل ۳ نمایی از این شبکه را نشان می‌دهد. این شبکه دارای یک الکترو پمپ گریز از مرکز می‌باشد. لوله‌های تشکیل دهنده این شبکه از جنس گالونیزه DN50 با قطر درونی 2.53 mm ضخامت 35.3 mm مدول کشسانی Nm 1011×06.2 و زبری 11.0 mm می‌باشد. یک تانک به حجم یک مترمکعب در بالادست لوله‌های اصلی قرارداشته

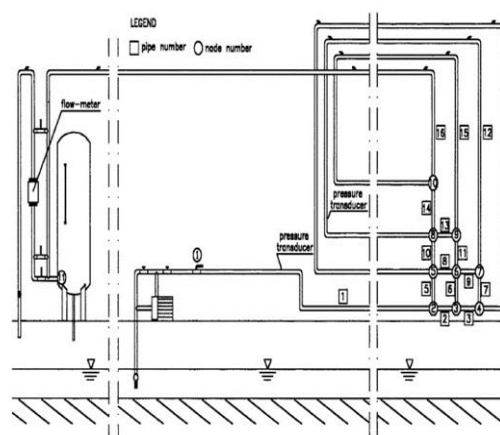


Fig. 3 Pipe network used in Pezzinga (1993) tests
شکل ۳ شبکه لوله‌های مورد استفاده در آزمایش‌های Pezzinga (1993)

جریان آشفته در مقطع‌های ابتدایی (محل مخزن)، وسط و انتهای لوله (محل شیر) به ترتیب در شکل ۷، شکل ۸ و شکل ۹ برای زمان‌های $t=0.05, 0.10, \dots, 0.40s$ نشان داده شده‌اند. همان‌طور که مشاهده می‌شود نیمرخ سرعت در

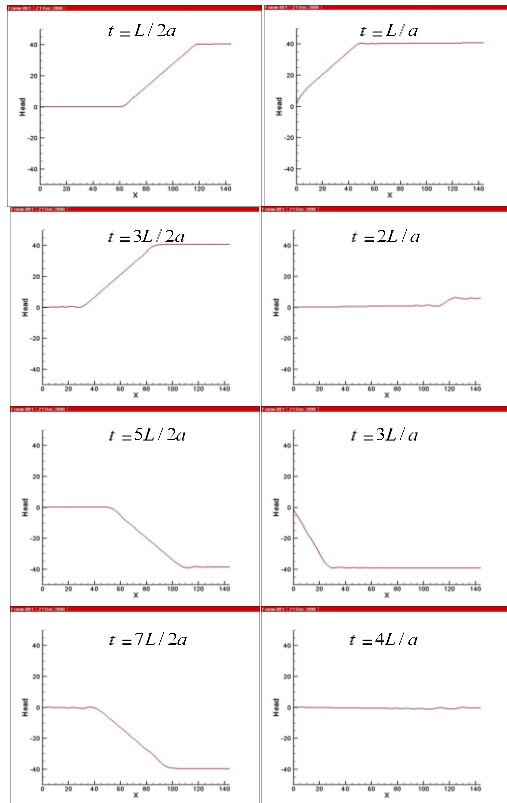


Fig. 6 Graph of pressure head changes along the pipe for time intervals $L/2a=0.0533s$

شکل ۶ نمودار تغییر پذیری‌های هد فشار در طول لوله برای بازه‌های زمانی $L/2a=0.0533s$

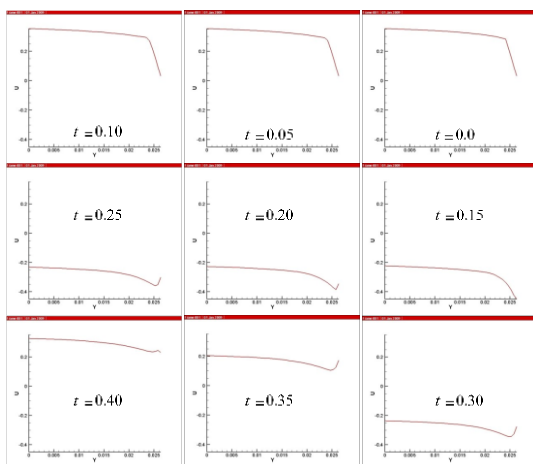


Fig. 7 Profile of speed changes at the beginning of the pipe (tank) for times $t=0.05, 0.10, \dots, 0.40s$

شکل ۷ نیمرخ تغییر پذیری‌های سرعت در مقطع ابتدای لوله (مخزن) برای زمان‌های $t=0.05, 0.10, \dots, 0.40s$

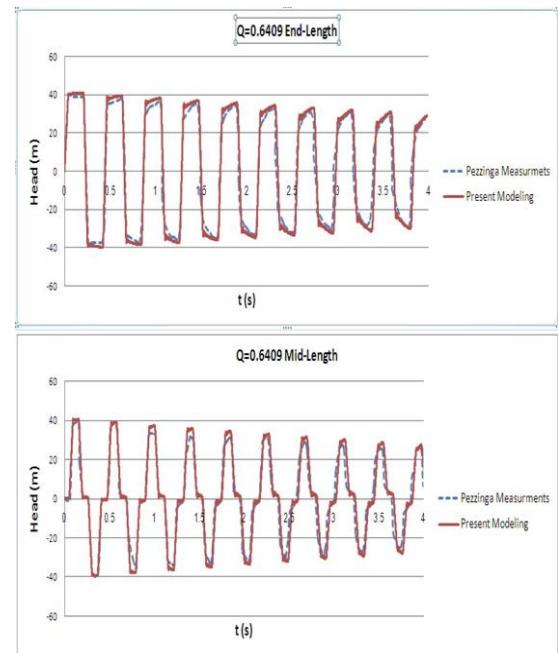


Fig. 5 Comparison of modeling results with Pezzinga laboratory results for discharge 0.6409 lit/s (Turbulent flow)

شکل ۵ مقایسه نتایج مدلسازی انجام گرفته با نتایج آزمایشگاهی پزینگا برای دبی 0.6409 lit/s (جریان آشفته)

بنابر توضیح‌های ارائه شده در بخش پیشین افزایش فشار باعث انتشار یک موج فشاری به سمت بالا دست لوله با سرعت a می‌شود. میزان سرعت این موج به ویژگی‌های لوله و سیال بستگی دارد و تا هنگامی که این ویژگی‌ها تغییر نکنند سرعت موج ثابت باقی خواهد ماند. این موج در زمانی در حدود L/a ثانیه پس از بستن شدن شیر به انتهای لوله می‌رسد و در زمان در حدود $L/2a$ ثانیه بار دیگر به شیر باز می‌گردد و پس از آن فشار منفی گشته و سپس موج منفی پس از $L/3a$ به انتهای لوله رسیده و پس از آن در زمان $L/4a$ بار دیگر به شیر باز می‌گردد و این روند به طور مرتب تا زوال کامل فشار ادامه می‌یابد. در شکل ۶ جهت کنترل نحوه تغییرهای فشار در طول لوله اطمینان از صحت نتایج نمودار تغییرهای فشار در طول لوله برای بازه‌های زمانی $L/2a=0.0533s$ در حالتی که دبی برابر با 0.6409 لیتر بر ثانیه می‌باشد، ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در زمان‌های $t=2L/a$ و $t=4L/a$ موج فشاری به محل شیر بازگشته و این نشان دهنده صحت نتایج از لحاظ سرعت انتشار موج می‌باشد. نیمرخ تغییرهای سرعت به دست آمده برای مدلسازی

جدول ۱ مقایسه تغییرپذیری های بار فشار در وسط لوله در حالت جریان آشفته

Table 1 Comparison of pressure head changes in the middle of the pipe in turbulent flow

Time	Pezinga tests	Numerical modeling
0.10	39.12	40.66
0.20	39.12	40.88
0.30	-37.47	-38.77
0.40	-37.47	-39.68
0.50	35.44	40.48
0.60	37.22	40.52
0.70	-33.77	-36.38
0.80	-36.93	-38.18
0.90	30.52	34.86
1.00	34.90	37.62
1.10	-26.31	-30.39
1.20	-34.40	-36.62
1.30	22.43	20.34
1.40	34.17	35.94
1.50	-14.88	-18.15
1.60	-32.21	-36.24
1.70	-6.19	-7.19
1.80	31.39	34.68
1.90	23.79	27.75
2.00	-29.52	-32.72
2.10	-33.15	-36.54
2.20	28.02	31.83
2.30	32.49	36.75
2.40	-25.94	-29.14
2.50	-32.10	-35.30
2.60	24.67	28.17
2.70	30.95	34.91
2.80	-23.26	-26.02
2.90	-29.23	-32.43
3.00	19.54	23.16
3.10	29.14	32.83
3.20	-16.74	-19.23
3.30	-27.39	-30.32
3.40	11.51	15.45
3.50	26.60	30.13
3.60	-9.92	-13.27
3.70	-24.88	-28.05
3.80	-22.03	-25.42
3.90	23.05	26.32

۳-۲- واسنجی مدل

برای رسیدن به نتایج مطلوب در یک مدل احتیاج به واسنجی کردن آن می‌باشد. برای واسنجی کردن مدل می‌توان دانسته‌های مسئله را بیشینه تا ۵ درصد تغییر داد. در اینجا برای واسنجی کردن مدل از تغییر سرعت موج در حدود ۲ درصد استفاده شده است. به عنوان مثال در اینجا

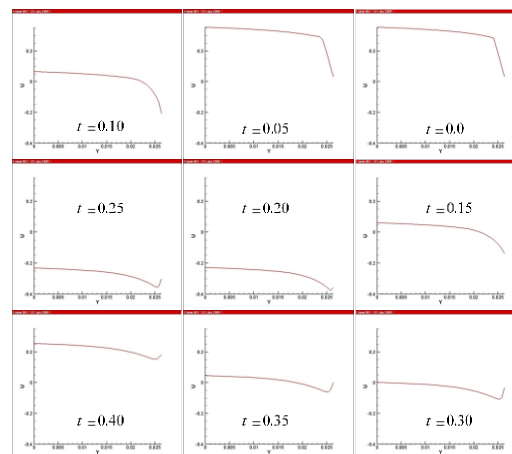


Fig. 8 Profile of velocity changes in the middle section of the pipe for times $t=0.05, 0.10, \dots, 0.40s$

شکل ۸ نیمرخ تغییرپذیری‌های سرعت در مقطع وسط لوله برای زمان‌های $t=0.05, 0.10, \dots, 0.40s$

مقطع ابتدایی لوله در سه نمودار ابتدایی و در مقطع میانی در دو نمودار ابتدایی به صورت میزان اولیه خود باقی می‌ماند، که این امر نشان دهنده این است که در این زمان‌ها هنوز موج فشار به آنها نرسیده است.

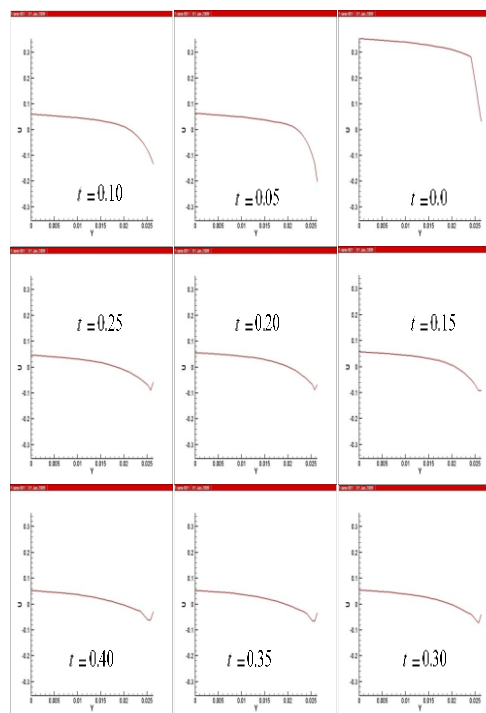


Fig. 9 Profile of speed changes at the end of the pipe (valve) for times $t=0.05, 0.10, \dots, 0.40s$

شکل ۹ نیمرخ تغییرپذیری‌های سرعت در مقطع انتهای لوله (شیر) برای زمان‌های $t=0.05, 0.10, \dots, 0.40s$

راستای شعاعی به مراتب بیش از راستای طول لوله است. در این حالت میزان Δx در همه حالت‌ها برابر با ۰/۵ در نظر

جدول ۲ آنالیز حساسیت بر روی مش بندی در راستای طول

لوله (X) برای هد فشار در انتهای لوله در حالت جریان آشفته

Table 2 Sensitivity analysis on meshing along the length of the pipe (x) for the pressure head at the end of the pipe in turbulent flow

t	Δx		
	1	0.5	0.25
0.10	40.66	40.66	40.66
0.20	40.88	40.89	40.89
0.30	-38.77	-38.83	-38.85
0.40	-39.68	-39.67	-39.66
0.50	38.23	38.11	38.14
0.60	39.29	39.29	39.30
0.70	-36.38	-36.66	-36.56
0.80	-38.18	-38.21	-38.23
0.90	34.86	35.74	35.70
1.00	37.62	37.67	37.66
1.10	-30.39	-33.68	-34.50
1.20	-36.61	-36.52	-36.55
1.30	9.63	13.24	15.02
1.40	35.83	35.80	35.84
1.50	11.45	7.78	5.98
1.60	-34.46	-34.49	-34.58
1.70	-32.09	-27.90	-24.55
1.80	33.49	33.63	33.68
1.90	35.69	35.71	35.78
2.00	-32.09	-32.15	-32.33
2.10	-34.61	-34.68	-34.69
2.20	31.21	31.26	31.24
2.30	34.12	34.04	34.08
2.40	-30.05	-29.45	-29.63
2.50	-32.77	-32.87	-32.96
2.60	27.60	28.32	28.16
2.70	31.93	32.18	32.24
2.80	-24.49	-27.03	-26.44
2.90	-30.67	-30.80	-30.95
3.00	7.15	15.37	19.78
3.10	29.75	30.00	30.10
3.20	9.04	2.05	-1.49
3.30	-28.22	-28.56	-28.70
3.40	-26.16	-17.17	-13.77
3.50	27.07	27.41	27.66
3.60	30.64	30.35	28.99
3.70	-25.05	-25.87	-26.10
3.80	-29.88	-30.19	-30.29
3.90	23.79	24.51	24.84
4.00	29.24	29.49	29.58

با استفاده از رابطه های موجود، سرعت موج برابر با ۱۳۴۶ متر بر ثانیه به دست آمده بود که برای دستیابی به پاسخ‌های دقیقتر، مقدار سرعت موج برابر با ۱۳۶۰ متر بر ثانیه قرار داده شد.

برای بررسی نتایج مدل‌سازی اجزاء محدودی در متلب نیاز به بررسی و واسنجی شبکه و نتایج آن می‌باشد که در ادامه بررسی خواهند شد.

۳-۳- پایداری مدل

همان طور که پیشتر بیان شد، در مدلسازی عددی انجام گرفته معادله ممنوم به صورت ضمنی و معادله پیوستگی به صورت صریح حل شده است.

در مدلسازی انجام گرفته میزان بازه زمانی برابر با ۰/۰۰۳ و فاصله خطوط شبکه در راستای طول لوله برابر با ۰/۵ متر و مقدار سرعت انتشار موج برابر با ۱۳۶۰ متر بر ثانیه می‌باشد، بنابراین میزان عدد کورانت برابر با ۰/۸ به دست می‌آید.

۳-۴- تحلیل حساسیت شبکه بندی

برای بررسی حساسیت نتایج مدل به شبکه‌بندی دو تجزیه و آنالیز بر روی ابعاد شبکه انجام رفته است. در تجزیه و آنالیز اول با تغییر دادن میزان Δx و مقایسه نتایج، مشاهده شده است که هر چه میزان Δx کوچک تر در نظر گرفته شود میزان هد فشار به دست آمده بیشتر بوده ولی تفاوتها چندان زیاد نمی‌باشند. در این حالت شمار خطوط شبکه در راستای شعاع برابر با در همه حالات 25 عدد در نظر گرفته شده است. جدول ۲ تجزیه و تحلیل انجام گرفته برای مش بندی در راستای طول لوله را برای میزان‌های $\Delta x=1.0, 0.5, 0.25$ نشان می‌دهد.

در تجزیه و تحلیل دوم این بار با تغییر دادن شمار تقسیم‌بندی در راستای شعاع و ثابت نگهداشتن میزان Δx و مقایسه نتایج، مشاهده شده است که هر چه شمار تقسیم بندی ها در راستای شعاع لوله بیشتر در نظر گرفته شود شمار هد فشار بدست آمده کمتر بوده ولی در اینجا تفاوت‌ها قابل ملاحظه بوده و این امر نشان دهنده آن است که حساسیت مدل به نوع شبکه‌بندی و فاصله‌های آنها در

گرفته شده است. جدول ۳ آنالیز دوم را در حالت‌هایی که تقسیم‌بندی در راستای شعاع لوله برابر با ۱۰، ۲۵، ۵۰ باشد را نشان می‌دهد.

۳-۵- مدل آزمایشگاهی

سیلوا-آرایا

معروف ترین دسته آزمایش‌های تجربی در زمینه ضربه قوچ برای آبراهه ساده توسط آرایا انجام شده است و امروزه بیشتر محققان نتایج خود را با آن مقایسه می‌نمایند. (1993) Silva-Araya تجهیزات را برای آزمایشگاه هیدرولیک آبروک واقع در دانشگاه واشینگتن برای آزمایش خود آماده کرد.

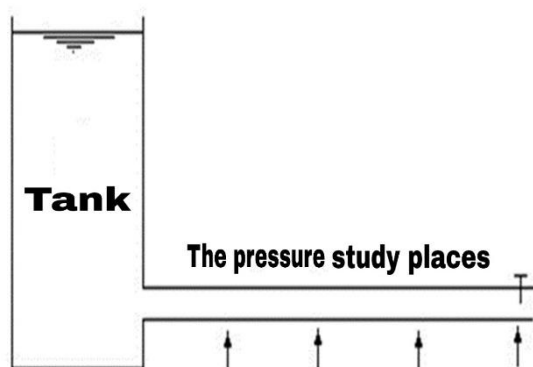


Fig. 10 Test plan for Araya and related data

شکل ۱۰ طرح آزمایش آرایا و داده‌های مربوطه

جدول ۴ طرح آزمایش آرایا و داده‌های مربوطه

Table 4 Test plan for votes and related data

Initial value	parameter
0/0165 m ³ /s	Primary flow
2/65 m	Water height in tank
0/0223	Friction coefficient
0/62	Primary place of tap
1125 m/s	Wave speed
999/1	Water density
1/06×10-3 m ² /s	Viscosity

طرح آزمایش شامل مخزن رو بازی است که لوله ای از جنس فولاد با قطر درونی ۰/۱۰۱ متر و ضخامت ۰/۰۰۶۳۵ متر و طول ۳۲ متر به آن متصل می‌باشد. در انتهای لوله یک شیر از نوع پروانه ای قرار دارد. آب خارج شده از لوله در یک مخزن واسطه گردآوری می‌شود و از

جدول ۳ تحلیل حساسیت بر روی مش بندی در راستای شعاع

لوله برای هد فشار در انتهای لوله در حالت جریان آشفته

Table 3 Sensitivity analysis on meshing along the radius of the pipe for the pressure head at the end of the pipe in turbulent flow mode

t	Number of network lines along the length of the pipe		
	10	25	50
0.10	46.77	40.66	35.87
0.20	46.61	40.89	36.27
0.30	-45.76	-38.83	-33.58
0.40	-45.73	-39.67	-34.68
0.50	45.27	38.11	33.04
0.60	45.33	39.29	34.84
0.70	-44.41	-36.66	-30.43
0.80	-44.46	-38.21	-33.42
0.90	43.89	35.74	28.38
1.00	44.06	37.67	33.26
1.10	-42.54	-33.68	-23.58
1.20	-43.15	-36.52	-31.78
1.30	19.27	13.24	6.15
1.40	42.72	35.80	31.28
1.50	6.30	7.78	11.63
1.60	-41.77	-34.49	-29.55
1.70	-32.25	-27.90	-26.66
1.80	41.35	33.63	28.62
1.90	41.83	35.71	31.88
2.00	-40.36	-32.15	-26.39
2.10	-41.11	-34.68	-30.73
2.20	40.13	31.26	24.80
2.30	40.69	34.04	30.34
2.40	-39.00	-29.45	-21.53
2.50	-39.86	-32.87	-29.00
2.60	38.76	28.32	18.50
2.70	39.52	32.18	28.45
2.80	-38.63	-27.03	-13.71
2.90	-38.59	-30.80	-26.87
3.00	26.85	15.37	3.54
3.10	38.28	30.00	26.04
3.20	-4.35	2.05	9.85
3.30	-37.42	-28.56	-24.16
3.40	-17.73	-17.17	-20.23
3.50	36.89	27.41	22.81
3.60	36.74	30.35	27.65
3.70	-36.08	-25.87	-20.41
3.80	-37.21	-30.19	-26.87
3.90	35.55	24.51	18.35
4.00	36.89	29.49	26.33

تجربی به دست آمده از آزمایش می باشند و خطوط خط چین میزان هایی هستند که از نظریه کلاسیک ضربه قوچ و بر مبنای فرض ثابت بودن ضریب اصطکاک محاسبه شده اند. همان گونه که مشاهده می شود نتایج FLUENT از نتایج کلاسیک ضربه قوچ بهتر می باشند، ولی موج فشاری در FLUENT از حالت واقعی کمی زودتر مستهلک می گردد. این بدان معنا است که ضریب اصطکاک برای ضربه قوچ در مدل Wall Function از مقدار واقعی بیشتر برآورد می شود. هندسه تهیه شده در ANSYS به دقت همانند هندسه تهیه شده در FLUENT می باشد. برای انجام مدل سازی یکسان در هر دو کد، نوع و تعداد مش هندسه برابر انتخاب گردیده و عدم وابستگی پاسخ به مش بندی هندسه، بررسی شده است.

جدول ۵ داده های تجربی حاصل از آزمایش های سیلوا-آرایا

و نتایج حاصل از FLUENT و ANSYS

Table 5 Experimental data from Silva-Araya and FLUENT and ANSYS results

Number of oscillation	Pressure limit	Stable speed	
8	60	2.3	Experimental data
9	56	2.5	FLUENT
12	2293	6.0	ANSYS

۴-۲- نتیجه گیری و انتخاب نرم افزار مناسب تر برای تحلیل پدیده ضربه قوچ

در این قسمت سه دسته از نتایج با هم مقایسه خواهند شد:

۱- داده های تجربی به دست آمده از آزمایش های آرایا

۲- نتایج به دست آمده از FLUENT

۳- نتایج به دست آمده از ANSYS

نتایج، به عنوان معیارهای انجام مقایسه بین این سه دسته نتایج انتخاب شده اند. در جدول شماره ۵ برای سه گروه نتایج آورده شده و با هم مقایسه شده اند. همان طور که مشاهده می شود نتایج ANSYS با دیگر نتایج همخوانی ندارد. با توجه به پاسخ های نامناسب ANSYS می توان نتیجه گیری کرد که این نرم افزار، پدیده ضربه قوچ را به شکل مناسبی مدلسازی نکرده است. همان طور که مشاهده

طریق یک پمپ به مخزن اصلی برگردانده می شود، به گونه ای که ارتفاع سطح آب در آن همواره ثابت باقی بماند. چهار عدد فشارسنج برای اندازه گیری تغییرپذیری های فشار در طول 0.5 L، 0.75 L، و 0.25 L از لوله استفاده می شود. در شرایط پایدار آب با دبی $0.165 \text{ m}^3/\text{s}$ از لوله تخلیه می گردد که این دبی معادل با عدد رینولدز 105×2.06 است.

ایجاد حالت گذرا در سامانه با بستن تدریجی شیر آغاز می شود. در آغاز ۰/۶۲ شیر باز است و پس از آن شیر در طی مدت زمان ۱/۰۸۵ ثانیه به طور کامل بسته می شود. نوسان های فشاری ایجاد شده در سیستم تا زمان دو ثانیه پس از آغاز حالت گذرا ثبت شده است (Ghidaoui, et al., 2005).

۴- نتیجه گیری

۴-۱- نتایج مقایسه FLUENT و ANSYS با

سیلوا-آرایا

در FLUENT از مدل مش متحرک برای شبیه سازی بستن شیر استفاده شده است. رابطه های سرعت موج و تراکم پذیری (بر مبنای مدول بالک) سیال به صورت برنامه هایی به زبان برنامه نویسی C که در اصطلاح ANSYS نامیده می شوند و از روش Wall Function برای شبیه سازی زیر لایه لزوج استفاده شده است. هندسه تهیه شده در ANSYS به دقت همانند هندسه تهیه شده در FLUENT می باشد. برای انجام مدل سازی یکسان در هر دو کد، نوع و شمار مش هندسه برابر انتخاب شده است و عدم وابستگی پاسخ ها به مش بندی هندسه، بررسی گرفته شد. شرایط مرزی نیز در ANSYS مشابه شرایط مرزی در FLUENT انتخاب شده است، بدین صورت که در ورودی و خروجی لوله شرط مرزی فشار ثابت و در دیواره ها شرط مرزی دیواره (مؤلفه های سرعت برابر صفر) اعمال شده است. در ورودی فشار ثابت برابر ۲/۶۵ متر ستون آب و در خروجی فشار ثابت هوا اعمال گردیده است. با بسته شدن تدریجی شیر در مدت زمان ۱/۰۸۵ ثانیه شرط مرزی خروجی بعد از این زمان به شرط مرزی دیواره تبدیل می گردد. خطوط پیوسته میزان های

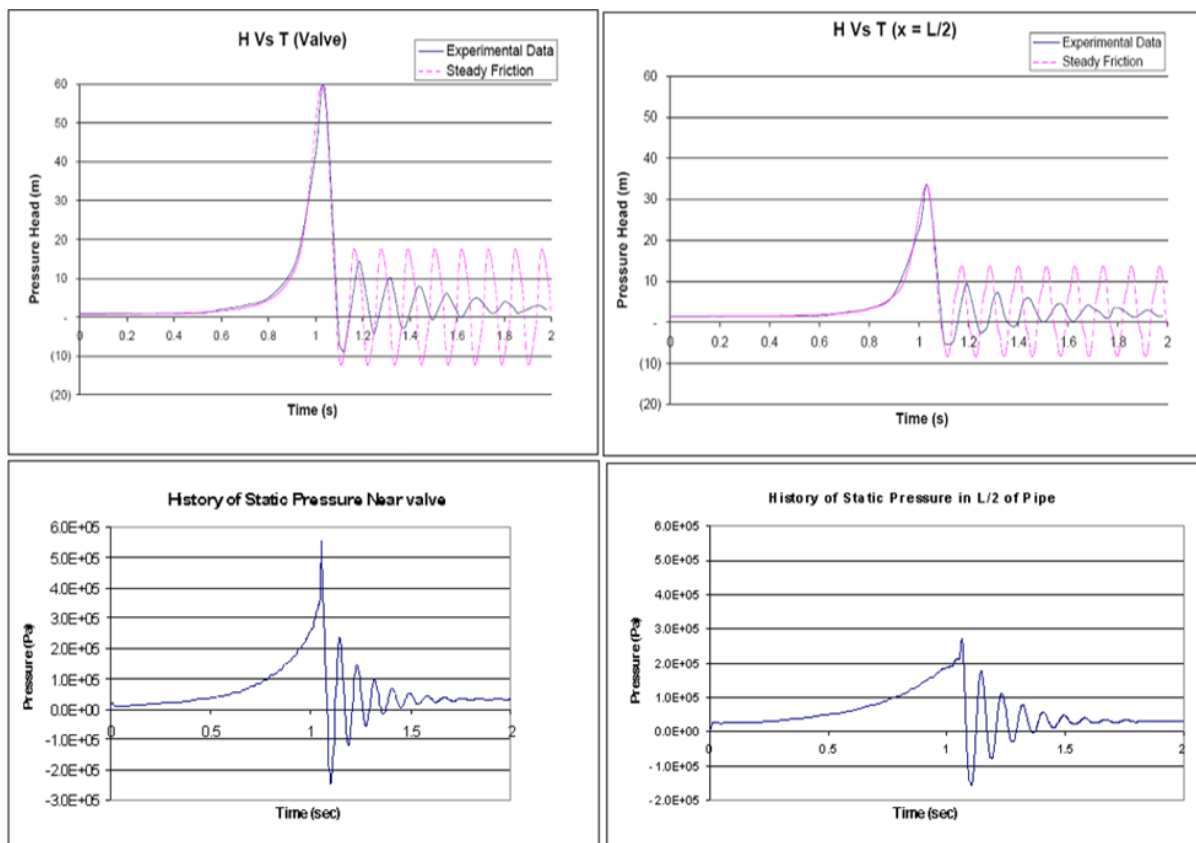


Fig. 11 The results are plotted for two adjacent locations of the valve and the middle of the pipe. (As can be seen, the results of ANSYS are very different from the actual results and are much higher than the actual results.)

شکل ۱۱ نتایج به دست آمده برای دو مکان مجاور شیر و وسط لوله رسم شده اند. (همان گونه که مشاهده می شود، نتایج ANSYS با نتایج واقعی تفاوت زیادی داشته و بسیار بیشتر از نتایج واقعی می باشد).

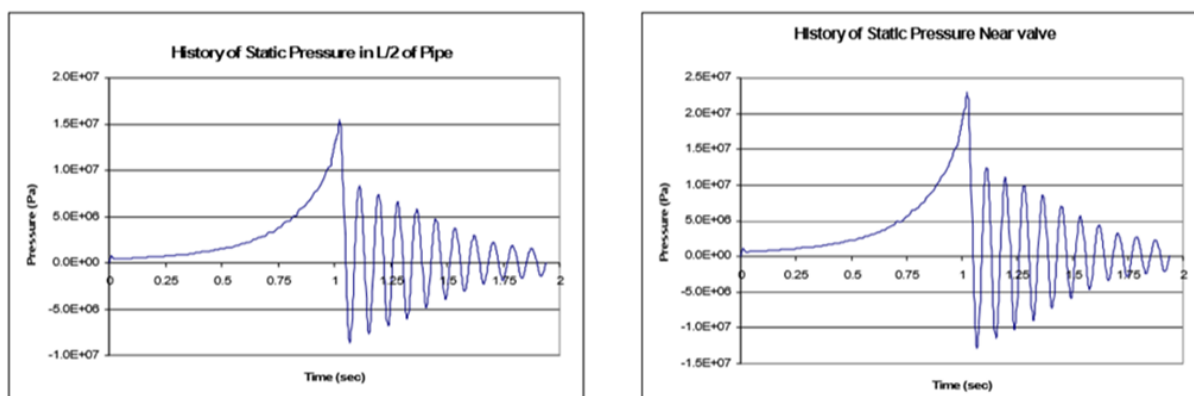


Fig. 12 The quantities of steady state velocity, initial maximum pressure and the number of pressure wave oscillations generated during the 2 seconds of recording the results have been selected as criteria for comparing these three categories of results.

شکل ۱۲ کمیت های سرعت حالت پایا، فشار بیشینه اولیه و شمار نوسان های موج فشاری ایجاد شده در طی ۲ ثانیه ثبت نتایج، به عنوان معیارهای انجام مقایسه بین این سه دسته نتایج انتخاب شده اند.

شکل مناسبی مدلسازی نکرده است. علت های زیر را برای این موضوع می توان بیان کرد:

می شود نتایج ANSYS با سایر نتایج همخوانی ندارد. باتوجه به جواب های نامناسب ANSYS می توان نتیجه گیری کرد که این نرم افزار، پدیده ضربه قوچ را به

مسئله اشاره شده است.

۵- جمع‌بندی

در اثر تغییرپذیری های ناگهانی در یک سامانه هیدرولیکی، شرایط گذرای ایجاد می‌شود. این تغییرپذیری های اغلب در اثر تغییرپذیری های ایجاد شده در دبی به وسیله شیرها، توربین‌ها و... صورت گرفته و باعث تغییرپذیری های ناگهانی فشار در خطوط لوله می‌شوند. این افزایش یا کاهش فشار می‌تواند باعث تخریب لوله‌ها شیر های سامانه هیدرولیکی شوند. این افزایش در اثر تغییرپذیری های دبی سیال با نام ضربه قوچ معروف می‌باشد. گاهی تغییرات فشار در یک سیستم به حدی زیاد خواهد بود که باعث افت فشار به فشار زیر بخار مایع نتیجه تبخیر سیال در لوله می‌شود، که این پدیده را کجدارخوردگی می‌نامند. بر اساس نتایج مدلسازی، چه در حالتی که تنها ضربه قوچ مد نظر است و چه در حالتی که ضربه قوچ به همراه جدارخوردگی مد نظر باشد، میزان هد فشار به دست آمده از لحاظ بیشینه فشار، کمینه فشار و همچنین از لحاظ زمان رخداد و یا فاز تغییر پذیری های ، سازگاری مناسبی با نتایج آزمایشگاهی مورد بررسی دارد. این امر نشان می‌دهد که دو بعدی بودن مدل و در نتیجه تقسیم‌بندی مقطع لوله به لایه‌های مختلف و محاسبه جداگانه هر یک از لایه‌ها، باعث نزدیک شدن مدلسازی به حالت واقعی پدیده (در مقایسه با مدل‌های یک بعدی) و در نتیجه واقعی‌تر بودن نتایج شده است. همچنین مدلسازی های انجام گرفته نشان می‌دهند که صرف‌نظر کردن از مولفه سرعت شعاعی سیال در لوله‌ها تأثیری در دقت مسئله ندارند.

منبع‌ها

- Bergant, A. and Simpson, A.R. (1994). Estimating unsteady friction in transient cavitating pipe flow. In: Miller, D.S. (ed.), Water Pipeline Systems, Mechanical Engineering Publications, London, pp. 3-16.
- Bergant, A. and Simpson, A.R. (1999). Pipeline column separation flow regimes. Journal of Hydraulic Engineering, 125(8), 835-848.

۱- ANSYS تغییرپذیری های چگالی را با استفاده از معادله انرژی محاسبه می‌کند. برای آنکه تغییرپذیری های چگالی را بتوان بر حسب تغییرپذیری های فشار در ANSYS مدل کرد تنها می‌توان میزان مدول بالک سیال را در مدل به طور دستی وارد کرد. در حالت پیش فرض فرض شده که سیال تراکم پذیر نیست.

۲- در ANSYS نیز مانند FLUENT می‌توان بعضی از مدل‌سازی‌هایی را که به طور مستقیم در نرم‌افزار وجود ندارد توسط برنامه جانبی ANSYS در نرم‌افزار مدل کرد. این برنامه‌ها در FLUENT به زبان برنامه نویسی C و در نرم‌افزار ANSYS به زبان برنامه نویسی فرترن می‌باشد. هرچند در FLUENT برای اعمال تغییرپذیری‌ها به ویژگی‌های سیال ANSYS وجود دارد؛ ولی در ANSYS چنین چیزی وجود ندارد.

۳- نکته دیگر که باید به آن توجه کرد مسئله مدل کردن WALL SHEAR STRESS می‌باشد. به علت طبیعت مسئله ضربه قوچ، مدل کردن میدان سرعت در نزدیکی دیواره بسیار مهم می‌باشد. در FLUENT مدل‌های تجربی بسیاری برای این مدل‌سازی وجود دارد که می‌توان در هنگام تحلیل مسئله و بسته به نوع فیزیک حاکم بر مساله از آنها استفاده کرد. نمونه چنین انتخاب‌هایی عبارتند از:

Standard Wall Function
Non-Equilibrium wall Function Enhanced wall Treatment

که در مدل‌سازی ضربه قوچ با نرم‌افزار FLUENT گزینه نخست انتخاب شده است. اما در FLUENT گزینه‌های همانندی برای این منظور وجود ندارد. البته FLUENT دارای مدل‌های گوناگونی برای مدل‌سازی جریان آشفته می‌باشد، ولی برای مدل‌سازی گرادیان سرعت در کنار دیواره و گیراندازی زیر لایه لزج تنها ریزتر کردن شبکه را توصیه می‌کند.

۴- مسئله همگرا شدن پاسخ‌ها در ANSYS نیز هنگامی که چگالی سیال متغیر در نظر گرفته می‌شود، مسئله‌ساز می‌باشد. با وجود درست مدل کردن مسئله، گاهی خطای وجود ضریب‌های منفی در ماتریس سختی مسئله بروز می‌کند. در راهنمای خود ANSYS نیز به این

- Modica, S. and Pezzinga, G. (1992). Spline interpolation for water hammer analysis. *J. of Hydraulic Engineering*, ASCE, 117(10), 1332-1369.
- Pezzinga, G. (1992). Quasi-2D Model for Unsteady Flow in pipe Networks, *Journal of Hydraulic Engineering*, 125(7), 676-685.
- Pezzinga, G. (1999). Quasi-2D Model for Unsteady Flow in pipe Networks, *Journal of Hydraulic Engineering*, 125(7), 676-685.
- Pezzinga, G. (2003). Second viscosity in transient cavitating pipe flows, *J. Hydraul. Res.*, 41(6), 656-665.
- Rosselló, J.M., Urteaga, R. and Bonetto, F.J. (2018). A novel water hammer device designed to produce controlled bubble collapses, *Experimental Thermal and Fluid Science*, 92, 46-55.
- Sadafi, M., Raisi, A., and Nourbakh, S.A. (2012). Cavitating flow during water hammer using a generalized interface vaporous cavitation model, *Journal of Fluids and Structures*, 34, 190-201.
- Silva-Araya, W. (1993). Energy Dissipation in Transient Flow, Ph.D. Dissertation, Washington State University, Washington.
- Simpson, A.R. (1986). Large Water Hammer Pressures due to Column Separation in a Sloping Pipe. Ph.D. Thesis. University of Michigan, Ann Arbor, MI.
- Streeter, V.L. (1983). Transient cavitating pipe flow. *Journal of Hydraulic Engineering*, 109, 1408-1423.
- Wardy, S. and Wang, B. (1999). *Fluid Transient in Systems*, Prentice-Hall, inc, Edition 3, New York.
- Washio, S. (2014). *Recent developments in cavitation mechanisms: A guide for scientists and engineers*, Woodhead Publishing.
- Zielke, W. (1968). Frequency-Dependent Friction in Transient Pipe Flow. *Journal of Basic Engineering*, 90(1), 109-115.
- Geng, J., Yuan, X.-I., Li, D. and Du, G.-S. (2017) Simulation of cavitation induced by water hammer, *Journal of Hydrodynamics*, 29, 972-978.
- Ghidaoui, M.S., Zhao, M., McInnis, D.A., and Axworthy, D.H. (2005). A review of water hammer theory and practice, *Appl. Mech. Rev.*, 58(1), 49-76.
- Guinot, V. (2002). Riemann solvers for water hammer simulations by Godunov method. *Int. J. Numerical Methods Eng.*, 49, 851-870.
- Lee, T.S. (1991). Numerical computation of fluid pressure transients in pumping installations with air entrainment. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 12, 747-793.
- Lee, J.J., Schwartz, P., Sylvester, P., Crane, L., Haw, J., Chang, H., and Kwon, H.J. (2003). Impacts of cross-connections in North American water supplies. Technical Rep. No.90928. AWWA Research Foundation, Denver, Colo.
- Kwon, H.J. (2005). Transient flow in water distribution system, Ph.D. thesis, Univ. of Southern California, Los Angeles.
- Kwon, H.J. and Lee, J.J. (2005). The role of backflow prevention assemblies in transient flow. *ABPA News*. 18(6), 13-14.
- Kwon, H.J. and Lee, J.J. (2008). Computer and experimental models of transient flow in pipe involving backflow preventers. *J. Hydraulic Eng.*, ASCE, 134(4), 426-434.
- McInnis, D. and Karney, B.W. (1995). Transients in distribution networks: Field tests and demand models. *J. Hydraulic Eng. ASCE*, 121(3), 218-231.

