

EXTENDED ABSTRACT

Numerical and Experimental Study of Transient Flow Properties in Viscoelastic Pipe Network Using Inverse Analysis

P. Chahardah-Cheriki Gholizadeh¹, M. Fathi-Moghadam^{2*} and S. Haghhighipour³

1- PhD Student of Hydraulic Structures, Faculty of Water Sciences Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran.

2* - Corresponding Author, Professor of Hydraulic Structures, Faculty of Water Sciences Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran. (fathi49@gmail.com).

3- Management of Khuzestan Water and Sewage Co., Ahvaz, Iran.

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 5 January 2020

Revised: 30 July 2020

Accepted: 2 August 2020

Keywords:

Polyethylene pipe, Genetic algorithm, Unsteady friction loss, Creep compliance function, Viscoelasticity.

TO CITE THIS ARTICLE:

Chahardah-Cheriki Gholizadeh, P., Fathi Moghadam, M., Haghhighipour, S. (2023). 'Numerical and Experimental Study of Transient Flow Properties in Viscoelastic Pipe Network Using Inverse Analysis', *Irrigation Sciences and Engineering*, 46(2), pp. 31-44. doi: 10.22055/jise.2020.32057.1900.

Introduction

The analysis of transient flow plays a critical role in designing pipe systems and pipe networks. Controlling and collecting the pressure wave signals at proper spots in the pipeline can provide much information about the system. Many researchers have studied transient flow and the loss caused by unsteady flow (Brunone et al, 1991; Pezzinga, 1999; Vitkovsky et al., 2000).

Compared with steel pipes, the use of polymer pipes such as polyethylene (PE) and PVC in pipelines and pipe networks has attracted much attention due to their superior properties. Researches have been conducted on the dynamic behaviour of these pipes on transient flow. Brunone et al. (1995) explained that pressure wave damping in a polyethylene pipeline is caused by unsteady friction loss; however, the research showed that there is a large difference between the numerical and the experimental results, and this is due to the viscoelastic effects of polymer pipe walls, which were neglected in this study. Soares et al. (2008) examined the viscoelastic behaviour of PVC pipes on transient flow. The creep function of these pipes was calculated by inverse solution of the transient flow. The results showed that the damping, scattering, and shape of the transient pressure waves are fully described by taking into account the viscoelastic behaviour in the developed numerical model. Carriço et al. (2016) studied the uncertainties of the transient flow numerical model in polyethylene pipes, indicating that unsteady friction loss and viscoelasticity of polyethylene pipe walls have parallel effects on transient signals and the effects cannot be simultaneously distinguished.

Most studies have been so far conducted on the transient flow in a simple pipeline made up of steel and concrete. Since few research has been done on transient flow in more complex systems and plastic pipes, the present paper investigates the numerical and experimental model of transient flow and its properties in polyethylene pipe networks in time domain. In this study, by collecting transient signals of the pipe network, unknown parameters are calibrated and extracted by inverse analysis of

the transient flow for different discharges. The pressure signal properties in polymer pipes are also compared with discharge variations.

Methodology

Numerical model

One-dimensional equations governing the transient flow in closed ducts, namely the continuity and momentum equations, are extracted as Eqs. (1) and (2) by applying steady and unsteady friction loss, and viscoelastic effect of the pipe wall (Covas *et al.*, 2005):

$$\frac{dH}{dt} + \frac{a^2}{gA} \frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{2a^2}{g} \frac{d\varepsilon_r}{dt} = 0 \quad (1)$$

$$g \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{1}{A} \frac{dQ}{dt} + g(h_{fs} + h_{fu}) = 0 \quad (2)$$

Where x is the coordinates of the pipe axis, t time, H piezometric head, Q flow rate, a pressure wave speed, g gravity acceleration, A pipe cross-sectional area, h_{fs} steady friction loss, h_{fu} unsteady friction loss, and ε_r retarded strain.

The continuity and momentum equations are solved using the method of characteristics, by considering a reservoir with fixed head as the upstream boundary condition and a transient valve in downstream of the pipe network as the downstream boundary condition.

Experimental model

In this research, a polyethylene pipe network fabricated in the Hydraulic Laboratory of the Faculty of Water Sciences Engineering of Shahid Chamran University, Ahwaz, was used to numerically and experimentally examine the transient flow in pipe networks. This network consists of six 3m×3m squares. The pipes are made up of high-density polyethylene (HDPE) with a nominal diameter of 50 mm, wall thickness of 5 mm, and nominal pressure of 16 bar. A 700-L pressurized reservoir is located at one end of the system and a ball valve at the other end of the network to generate transient flow for the experiments. A globe valve, placed after the ball valve, is used to adjust the steady flow of the experiments. The transient flow signals of the tests at upstream of the ball valve and in the pressurized reservoir were collected by pressure transducers with a measurement range from 0 to 16 bar (T1 and T2).

Results and Discussion

The pressure values at upstream of the transient valve were collected for three steady state discharges of 0.82, 1.16, and 1.5 lit/s using the experimental model of the pipe network. comparison of pressure signals for different discharges shows that as the discharge increases, the intensity of the transient flow signal increases, the phase shift decreases, and the number of cycles per a specified time period increases (Fig. 1).

Since the unsteady friction loss and viscoelasticity of polymer pipe walls cause damping and phase shift in the transient flow, the effect of each case on the transient flow should be determined for the numerical model calibration so as to obtain the best state for the calibration of the pipe network numerical model. The results show that considering the viscoelastic effect of the pipe wall, the numerical model is able to simulate, with high accuracy, the transient flow reactions, and there is consistency between the numerical and experimental results.

The creep compliance functions for polyethylene pipe network were determined by applying the inverse solution of the transient flow and the pressures collected at the upstream of the transient valve. The results show that by applying the viscoelastic effects for the pipe network, the creep

function value in the numerical model depends on the initial discharge value. Moreover, the variations in the retarded strain for three discharges were calculated. The results indicate that due to the increase in the effective time of pressure loading and unloading in smaller discharges, the time of variations in the retarded strain per each cycle is also increased.

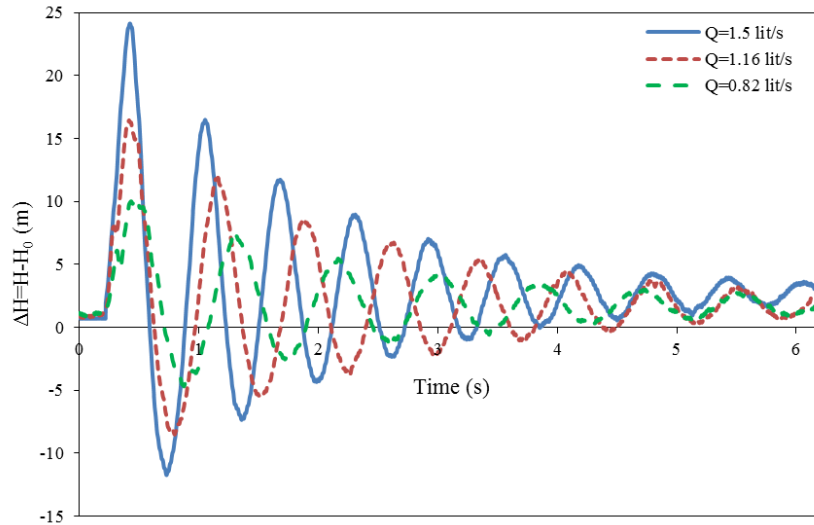


Fig. 1- Time variations in the pressure at upstream of the transient valve for different discharges

Conclusions

The purpose of this study is investigate the numerical and experimental properties of transient signals in a polyethylene pipe network under different flow discharge conditions. The calibration and validation of the numerical model of pipe network were performed by inverse transient analysis and the genetic algorithm. The results showed, that the best state for calibrating the polyethylene pipe network numerical model is to consider only the viscoelastic effect of the pipe wall with 1 Kelvin-Voigt element. The creep functions of the viscoelastic model were calculated at different steady state discharges and it was shown that with increasing discharge, the creep function decreases.

Acknowledgments

The writers acknowledge the Research Council of Shahid Chamran University of Ahvaz and Center of Excellence of the Network Improvement and Maintenance of the Faculty of Water and Environmental Engineering for financial support and facilitation of the experiments (Grant No. SCU-99/3/02/7543). The financial support of the Khuzestan Water and Power Authority (KWPA) is also acknowledged.

References

- 1- Brunone, B., Golia, U.M. and Greco, M., 1991. Modelling of fast transients by numerical methods. In *International Conference on Hydraulic Transients with Water Column Separation (9th and last round Table of IAHR Group), Valencia, Spain*, pp.273-281.
- 2- Brunone, B., Golia, U.M. and Greco, M., 1995. Effects of two-dimensionality on pipe transients modeling. *Journal of Hydraulic Engineering*, 121(12), pp.906-912.
- 3- Covas, D., Stoianov, I., Mano, J., Ramos, H., Graham, N. and Maksimovic, C., 2005. The dynamic effect of pipe-wall viscoelasticity in hydraulic transients, Part II—Model development, calibration and verification. *Journal of Hydraulic Research, IAHR*. 43(1), pp.56-70.

4- Carriço, N.J., Soares, A.K. and Covas, D.I.C. 2016. Uncertainties of inverse transient modelling with unsteady friction and pipe-wall viscoelasticity. *Journal of Water Supply: Research and Technology-AQUA*, 65(4), pp.342-353.

5- Pezzinga, G., 1999. Quasi-2D model for unsteady flow in pipe networks. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, 125(7), pp.676-685.

6- Soares, A.K., Covas, D. and Reis, F.R., 2008. Analysis of PVC pipe-wall viscoelasticity during water hammer. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, 134(9), pp.1389-1394.

7- Vitkovsky, J.P., Lambert, M.F. and Simpson, A.R., 2000. Advances in unsteady friction modelling in transient pipe flow. In the *8th International Conference on Pressure Surges. BHR Group Ltd., The Hague, The Netherlands*.



© 2023 Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran. This article 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 و آزمایشگاهی خصوصیات جریان گذرا در شبکه لوله ویسکوالاستیک با استفاده از تحلیل معکوس

پروین چهارده چریکی قلی زاده^۱، منوچهر فتحی مقدم^{۲*} و صادق حقیقی پور^۳

۱- دانشجوی دکتری سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران.

۲- نویسنده مسئول، استاد بازنشسته گروه سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران.

fathi49@gmail.com

۳- مدیریت شرکت آب و فاضلاب خوزستان، اهواز، ایران.

پذیرش: ۱۳۹۹/۰۵/۱۲

بازنگری: ۱۳۹۹/۰۵/۰۹

دریافت: ۱۳۹۸/۱۰/۱۵

چکیده

مطالعه حاضر به بررسی عددی خصوصیات جریان گذرا در شبکه لوله پلی‌اتیلن می‌پردازد. به این منظور معادله‌های پیوستگی و مومنتم حاکم بر جریان گذرا در سیستم‌های تحت فشار با در نظر گرفتن اثرات افت اصطکاکی ماندگار و غیرماندگار و اثر ویسکوالاستیک دیواره لوله‌های پلیمری با بهره‌گیری از روش خطوط مشخصه در حوزه زمان تحلیل شدند. آزمایش‌هایی با مقادیر مختلف دبی حالت ماندگار بر روی یک شبکه لوله پلی‌اتیلن ساخته شده در آزمایشگاه هیدرولیک دانشکده مهندسی آب و محیط زیست دانشگاه شهید چمران اهواز انجام شد و سیگنال‌های فشار گذرا در نقاط مختلف شبکه توسط فشارسنج‌هایی برداشت شدند. نتایج مقایسه سیگنال‌های فشاری برداشت شده از مدل آزمایشگاهی نشان داد که با افزایش دبی، سیگنال جریان گذرا دارای شدت بیشتر و اختلاف فاز کم‌تری است. واسنجی مدل عددی شبکه لوله با در نظر گرفتن اثرات افت اصطکاکی غیرماندگار و ویسکوالاستیک دیواره لوله با استفاده از تحلیل معکوس جریان گذرا انجام شد و صحت‌سنجی نشان داد که سیگنال عددی جریان گذرا با در نظر گرفتن تنها اثر ویسکوالاستیک دیواره با یک المان کلونین- ویت دارای بیش‌ترین میزان مطابقت با اطلاعات برداشت شده از مدل آزمایشگاهی است. همچنین مقایسه توابع خزش تطابقی برای مقادیر مختلف دبی نشان داد مقدار تابع خزش در شبکه لوله وابسته به مقدار دبی جریان ماندگار است.

کلید واژه‌ها: لوله پلی‌اتیلن، الگوریتم ژنتیک، افت اصطکاکی غیرماندگار، تابع خزش تطابقی، ویسکوالاستیسیته.

مقدمه

Brunone et al. (1995) بیان نمودند که استهلاک موج

فشاری در یک خط لوله پلی‌اتیلن مربوط به افت اصطکاکی غیرماندگار است، اما بررسی‌های آن‌ها نشان داد که اختلاف زیادی بین نتایج عددی و اطلاعات آزمایشگاهی وجود دارد و دلیل این تفاوت، وجود اثرات ویسکوالاستیک دیواره لوله‌های پلیمری است که در این مطالعه در نظر گرفته نشده بود.

Covas et al. (2004) به شناخت رفتار دینامیکی لوله‌های

پلی‌اتیلن در جریان‌های گذرا پرداختند. بررسی‌های عددی و آزمایشگاهی آن‌ها نشان داد که امواج فشاری در این لوله‌ها به سرعت مستهلک و دچار تأخیر زمانی می‌گردند و یک افت فشار ناگهانی بلافاصله بعد از بستن سریع شیر اتفاق می‌افتد. همچنین وجود پسماند مکانیکی مواد لوله در طی رویداد گذرا بر اساس تحلیل اطلاعات فشار و کرنش مشاهده شد.

در مطالعه‌ای دیگر Covas et al. (2005) به توسعه یک

مدل عددی به منظور محاسبه جریان‌های گذرا در سیستم‌های لوله تحت فشار از جنس پلی‌اتیلن پرداختند. مقایسه بین سیگنال‌های جریان گذرا در این سیستم با یک مدل کلاسیک نشان داد که مدل

جریان گذرا در سیستم‌های لوله تحت فشار در اثر تغییرات در شرایط مرزی سیستم ایجاد می‌شود و موجب انتشار یک موج فشاری در سیستم می‌گردد. تحلیل جریان‌های گذرا در طراحی سیستم‌های خط لوله و شبکه لوله امری مهم است. با کنترل و برداشت سیگنال‌های امواج فشاری در مکان‌های مناسب در خط لوله می‌توان اطلاعات زیادی راجع به سیستم استخراج نمود. مطالعه جریان گذرا و افت ناشی از جریان‌های غیرماندگار توسط محققین زیادی صورت گرفته است (Joukowski, 1904; Daily et al., 1956; Zielke, 1968; Trikha, 1975; Brunone et al., 1991; Pezzinga, 1999; Vitkovsky et al., 2000).

در مقایسه با لوله‌های فولادی، لوله‌های پلیمری مانند پلی‌اتیلن (PE) و پی‌وی‌سی (PVC) به دلیل دارا بودن ویژگی‌های برتر، در خطوط لوله و شبکه‌های لوله بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند. بنابراین مطالعه و شناخت رفتار سازه‌ای و هیدرولیکی این لوله‌ها امری ضروری است. مطالعاتی در رابطه با بررسی رفتار دینامیکی این نوع لوله‌ها در جریان‌های گذرا صورت گرفته است.

پارامترهای مجهول مدل عددی با بهره‌گیری از حل معکوس جریان گذرا و الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک.

۳- مقایسه و بررسی خصوصیات جریان گذرا در شبکه‌های لوله پلیمری برای شرایط مختلف دبی حالت ماندگار با بهره‌گیری از مدل عددی توسعه‌داده‌شده در تحقیق حاضر.

مواد و روش‌ها

مدل عددی

معادله‌های یک‌بعدی حاکم بر جریان گذرا در مجاری بسته که شامل معادلات پیوستگی و مومنت می‌باشند، با در نظر گرفتن افت اصطکاکی ماندگار و غیرماندگار و اثر ویسکوالاستیک دیواره لوله به صورت دو معادله (۱) و (۲) استخراج می‌شوند (Covas et al., 2005):

$$\frac{dH}{dt} + \frac{a^2}{gA} \frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{2a^2}{g} \frac{d\varepsilon_r}{dt} = 0 \quad (1)$$

$$g \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{1}{A} \frac{dQ}{dt} + g(h_{fs} + h_{fu}) = 0 \quad (2)$$

که در این معادله‌ها، x مختصات در راستای محور لوله، t زمان، H ارتفاع پیزومتریک لحظه‌ای، Q میزان دبی لحظه‌ای، a سرعت موج فشاری، g شتاب ثقل، A مساحت مقطع لوله، h_{fs} افت اصطکاکی حالت ماندگار، h_{fu} افت اصطکاکی حالت غیرماندگار و ε_r کرنش تأخیری است.

معادله‌های پیوستگی و مومنت با استفاده از روش خطوط مشخصه (method of characteristics) و با در نظر گرفتن یک مخزن با هد ثابت به‌عنوان شرط مرزی بالادست و شیر تولید جریان گذرا در پایین دست شبکه لوله به عنوان شرط مرزی پایین دست حل شد. در این مطالعه، افت اصطکاکی حالت ماندگار (h_{fs}) از رابطه داری ویسیاخ (Darcy-Weisbach) به‌دست آمد که برای محاسبه ضریب افت در این حالت از رابطه بلازیوس (Blasius) رابطه (۳) در جریان آشفتنه و لوله صاف برای مقادیر $4000 < Re < 10^5$ استفاده شد. همچنین برای محاسبه افت اصطکاکی حالت غیرماندگار (h_{fu}) از مدل اصلاح‌شده (Brunone et al 1995) که توسط Vitkovsky et al (2000) رابطه (۴) ارایه شد استفاده گشت.

$$f_s = 0.316Re^{-0.25} \quad (3)$$

$$h_{fu} = \frac{K}{gA} \left(\frac{\partial Q}{\partial t} + aSGN(Q) \left| \frac{\partial Q}{\partial x} \right| \right) \quad (4)$$

عدد توسعه داده شده به خوبی قادر به پیش‌بینی نوسانات فشار و کرنش‌های محیطی در لوله‌های PE است.

Soares et al. (2008) به بررسی اثر رفتار ویسکوالاستیک لوله‌های PVC بر روی جریان گذرا پرداختند. تابع خزش این نوع لوله توسط حل معکوس جریان گذرا محاسبه شد و نتایج بررسی‌ها نشان داد که استهلاک، پراکندگی و شکل امواج فشاری گذرا با در نظر گرفتن رفتار ویسکوالاستیک در مدل عددی توسعه‌داده‌شده در این مطالعه به خوبی توصیف می‌گردند.

Evangelista et al. (2015) انتقال و انعکاس امواج فشاری گذرا در شبکه‌های شاخه‌ای پلی‌اتیلن با دانسیته بالا (HDPE) را بررسی نمودند. نتایج آن‌ها نشان داد که تغییر قابل ملاحظه‌ای در مقادیر ضرایب انتقال و بازتاب در محل اتصال لوله‌ها در مقایسه با مقادیر حاصل از تئوری کلاسیک وجود دارد که این اختلاف‌ها ناشی از رفتار ویسکوالاستیک مواد می‌باشند. در این مطالعه، پارامترهای ویسکوالاستیک مربوط به سیستم لوله با صرف‌نظر از اثرات افت اصطکاکی غیرماندگار، کالیبره شدند.

Carricho et al. (2016) به بررسی عدم قطعیت‌های مدل عددی جریان گذرا در لوله‌های پلی‌اتیلن پرداختند. آن‌ها نشان دادند که اصطکاک غیرماندگار و ویسکوالاستیسیته دیواره لوله‌های پلی‌اتیلن اثرات مشابه بر روی سیگنال‌های گذرا دارند و نمی‌توان این اثرات را هم‌زمان از هم متمایز نمود.

Rahmanshahi et al. (2019) با مدل‌سازی افت اصطکاکی غیرماندگار و رفتار ویسکوالاستیک لوله‌های پلیمری در یک خط لوله پلی‌اتیلن نشان دادند که اثرات ویسکوالاستیک نقش بسیار مهم‌تری نسبت به افت اصطکاکی غیرماندگار در این نوع لوله‌ها دارند و با در نظر گرفتن این اثرات به درستی می‌توان سیگنال‌های جریان گذرا را پیش‌بینی نمود.

تاکنون اکثر مطالعه‌های صورت‌گرفته به بررسی جریان گذرا در یک سیستم خط لوله ساده و از جنس فولادی و بتنی پرداخته‌اند. از آنجایی که مطالعه‌های بسیار کمی در رابطه با بررسی جریان گذرا در سیستم‌های پیچیده‌تر و همچنین لوله‌های پلاستیکی وجود دارد، تحقیق حاضر به مطالعه آزمایشگاهی و عددی جریان گذرا و خصوصیات آن در شبکه‌های لوله و از جنس مصالح پلی‌اتیلن می‌پردازد. به این منظور، معادله‌های حاکم بر جریان گذرا در سیستم‌های تحت فشار با اضافه نمودن اثرات افت اصطکاکی و ویسکوالاستیک دیواره لوله‌های پلیمری تحلیل شد. سپس با بهره‌گیری از روش تحلیل معکوس جریان گذرا و اطلاعات آزمایشگاهی، مدل عددی توسعه‌داده‌شده در تحقیق حاضر واسنجی و پارامترهای مجهول استخراج شد. اهداف اصلی پژوهش حاضر به صورت زیر می‌باشند:

۱- ترسیم و بررسی آزمایشگاهی سیگنال‌های فشار گذرا در شبکه لوله برای مقادیر مختلف دبی جریان ماندگار.

۲- توسعه و واسنجی مدل عددی شبکه لوله با لحاظ اثرات اصطکاکی و ویسکوالاستیسیته دیواره لوله‌های پلیمری و استخراج

مجهول را شناسایی می‌کند. تابع هدف مورد نظر در این تحقیق، متوسط حداقل مربعات خطا (LSE) است و با رابطه زیر تعریف می‌گردد:

$$\text{Min } OF = \sum_{i=1}^M [H_i^* - H_i]^2 / M \quad (\lambda)$$

در رابطه (λ)، OF تابع هدف، H_i^* مقادیر فشار برداشت شده از مدل آزمایشگاهی، H_i مقادیر فشار محاسبه شده توسط مدل عددی و M تعداد فشارهای اندازه‌گیری شده است. الگوریتم ژنتیک مورد استفاده از نوع پیوسته بوده و شامل مراحل استاندارد تولید جمعیت اولیه، محاسبه مقدار تابع هدف هر کروموزوم، انتخاب طبیعی والدین به روش تورنومنت، تبادل ژنی و تولید فرزندان به روش یکنواخت و جهش ژنی می‌باشد.

مدل آزمایشگاهی

به منظور بررسی عددی و آزمایشگاهی جریان گذرا در شبکه لوله در مطالعه حاضر، از یک شبکه لوله پلی‌اتیلن ساخته شده در آزمایشگاه هیدرولیک دانشکده مهندسی علوم آب دانشگاه شهید چمران اهواز استفاده شد. نمای کلی مدل آزمایشگاهی در شکل (۱) نشان داده شده است. این شبکه از شش حلقه مربعی به ابعاد $3\text{m} \times 3\text{m}$ تشکیل شده است. لوله‌های شبکه از جنس پلی‌اتیلن با دانسیته بالا (PE80) به قطر اسمی ۵۰ میلی‌متر، ضخامت دیواره پنج میلی‌متر (SDR9) و فشار اسمی ۱۶ بار می‌باشند. یک مخزن تحت فشار با حجم ۷۰۰ لیتر در ابتدای سیستم قرار دارد و یک شیر ربع‌گرد (Ball valve) در انتهای شبکه لوله به منظور تولید جریان گذرا در آزمایش‌ها قرار داده شده است. برای تنظیم میزان جریان ماندگار، از یک شیر سوزنی (Globe valve) که بعد از شیر تولید جریان گذرا قرار داشت، استفاده شد. همچنین میزان جریان ماندگار به صورت حجمی در انتهای سیستم اندازه‌گیری می‌شد. برای جلوگیری از حرکت‌های طولی و عرضی سیستم در طی آزمایش‌ها، لوله‌های تشکیل‌دهنده شبکه در فواصل یک متری به زمین مهار شدند. سیگنال‌های فشار در بالادست شیر تولید جریان گذرا و در محل مخزن تحت فشار با استفاده از فشارسنج‌های با دامنه اندازه‌گیری صفر تا ۱۶ بار برداشت شدند (T1 و T2). همچنین آزمایش‌های این تحقیق در سه دبی حالت ماندگار با مقادیر ۰/۸۲، ۱/۱۶ و ۱/۵ لیتر بر ثانیه و رژیم جریان آشفتنه انجام شدند. نحوه انجام آزمایش‌های این مطالعه به این صورت بود که ابتدا فشار مخزن توسط کمپرسور هوا تثبیت می‌شد و دبی جریان ماندگار در انتهای سیستم به میزان مورد نظر تنظیم می‌شد. سپس با بستن سریع شیر ربع‌گرد در انتهای شبکه، جریان گذرا در سیستم تولید می‌شد و سیگنال‌های فشار در نقاط مختلف شبکه توسط فشارسنج برداشت می‌شدند.

در روابط بالا، f_s ضریب افت اصطکاکی حالت ماندگار، Re عدد بدون بعد رینولدز، K ضریب زوال افت اصطکاکی برونون و $SGN(Q)$ تابع علامت است.

لوله‌های پلی‌اتیلن وقتی تحت تأثیر یک تنش آبی قرار می‌گیرند، پاسخی مطابق قانون هوک (Hooke's law) ندارند. کرنش در این نوع لوله‌ها به دو کرنش الاستیک آبی (ϵ_e) و کرنش تأخیری (ϵ_r) تقسیم می‌شوند (Covas et al., 2005):

$$\epsilon(t) = \epsilon_e + \epsilon_r(t) \quad (5)$$

در لوله‌های پلی‌اتیلن، کرنش‌های ناشی از اعمال پیوسته یک تنش $\sigma(t)$ ، طبق اصل برهم‌نهی بولتزمن (Boltzmann superposition principle) می‌توانند به صورت خطی با هم جمع شوند و کرنش کل از رابطه زیر محاسبه گردد (Aklonis et al., 1972):

$$\epsilon(t) = J_0 \sigma(t) + \int_0^t \sigma(t-t') \frac{\partial J(t')}{\partial t'} dt' \quad (6)$$

در رابطه بالا، J_0 خزش تطابقی آبی و $J(t')$ تابع خزش در زمان t' است. تابع خزش برای جامد ویسکوالاستیک، با استفاده از مدل مکانیکی تعمیم‌یافته کلونین-ویت (generalized Kelvin-Voigt mechanical model) به صورت زیر تعریف می‌شود (Aklonis et al., 1972):

$$J(t) = J_0 + \sum_{k=1}^N J_k (1 - e^{-t/\tau_k}) \quad (7)$$

که در آن J_0 خزش تطابقی فنر اول است و به صورت $J_0 = 1/E_0$ تعریف می‌شود. E_0 مدول الاستیسیته لوله است. J_k خزش تطابقی فنر المان k ام مدل کلونین-ویت است و به صورت $J_k = 1/E_k$ تعریف می‌شود. E_k مدول الاستیسیته فنر المان k ام است. τ_k زمان تأخیر میراگر المان k ام است، μ_k ، $\tau_k = \mu_k/E_k$ ، μ_k ویسکوزیته میراگر است و N تعداد المان‌های مدل کلونین-ویت است.

در مطالعه حاضر به منظور واسنجی مدل عددی، از روش تحلیل معکوس جریان گذرا استفاده شد. به این صورت که با معرفی پارامترهای معلوم مسأله شامل مقادیر فشار و دبی جریان به مدل عددی، پارامترهای مجهول شامل سرعت موج، ضرایب تابع خزش تطابقی و ضریب افت اصطکاکی غیرماندگار به دست آمد. حل معکوس جریان گذرا توسط الگوریتم‌های بهینه‌سازی صورت گرفت. روش بهینه‌سازی در این تحقیق الگوریتم ژنتیک می‌باشد. در این نوع مسائل، بهینه‌ساز با کمینه کردن مقدار تابع هدف، پارامترهای

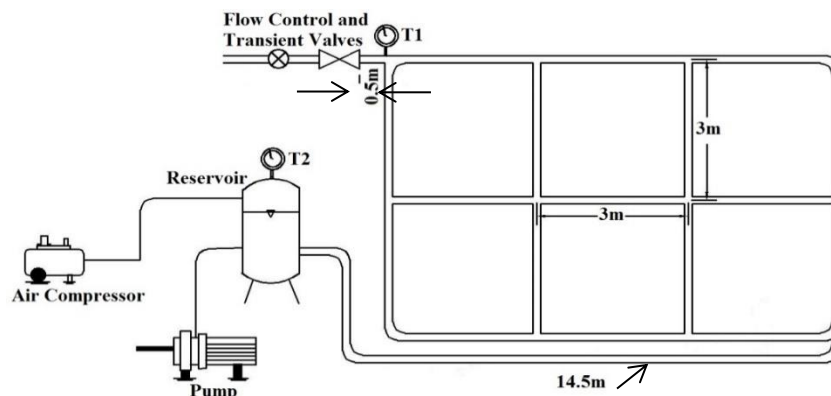


Fig. 1- The experimental model of the pipe network

شکل ۱- مدل آزمایشگاهی شبکه لوله

آزمایشگاهی است. پارامترهای مورد نظر در واسنجی مدل عددی شامل سرعت موج، ضرایب تابع خزش و ضریب افت اصطکاکی غیرماندگار می‌باشند. از آنجایی که افت اصطکاکی غیرماندگار و خاصیت ویسکوالاستیک دیواره لوله‌های پلیمری هر دو موجب استهلاک و اختلاف فاز جریان گذرا می‌شوند، در واسنجی مدل عددی باید تأثیر هر کدام از این پدیده‌ها بر روی جریان گذرا مشخص گردد تا بهترین حالت برای واسنجی مدل عددی شبکه لوله پلی‌اتیلن تعیین شود. بنابراین در ابتدا با در نظر گرفتن اثر ویسکوالاستیک دیواره لوله به واسنجی و تخمین پارامترهای مجهول مدل عددی پرداخته می‌شود.

در این حالت اصطکاک سیال تنها شامل اصطکاک ماندگار است و از اثر اصطکاک غیرماندگار بر روی واکنش‌های گذرا صرف نظر شده است. پارامترهای مجهول مدل در این قسمت شامل سرعت موج (a)، زمان تأخیر (τ_k) و ضرایب خزش المان‌های کلین-ویت (I_k) می‌باشند.

مطابق مطالعه Covas (2003) تعداد بهینه المان‌های کلین-ویت در لوله‌های پلی‌اتیلن برابر سه است، اما در تحقیق حاضر با توجه به ابعاد کوچکتر شبکه لوله پیش‌بینی می‌شود که با انتخاب تعداد المان‌های کمتر نیز نتیجه مناسبی استخراج گردد و سرعت انجام محاسبات نیز کم شود. بنابراین با استفاده از اطلاعات فشار برداشت‌شده در بالادست شیر تولید جریان گذرا در دبی ۱/۵ لیتر بر ثانیه تحلیلی بر روی تعداد المان‌های مؤثر در مدل عددی شبکه لوله صورت گرفت. در تحلیل مدل عددی پژوهش حاضر معادله‌های مربوط به جریان گذرا در سیستم‌های تحت فشار معادله‌های (۱ و ۲) با به کارگیری روش خطوط مشخصه گسسته‌سازی شدند. گام مکانی در مدل عددی برابر با $\Delta x = 0.5m$ در نظر گرفته شد و میزان گام زمانی به گونه‌ای محاسبه شد تا شرط کورانت به منظور پایداری مدل و جلوگیری از ایجاد نوسانات عددی برقرار گردد. همچنین مدت زمان شبیه‌سازی سیگنال فشار گذرا در تحلیل معکوس برابر شش ثانیه در نظر گرفته شد. با توجه به این که جریان در لوله، آشفته می‌باشد، ضریب افت اصطکاکی ماندگار از رابطه بلانزیوسرابطه (۳) محاسبه شد.

نتایج و بحث

بررسی سیگنال‌های فشار گذرا

به منظور بررسی سیگنال‌های جریان گذرا در شبکه لوله پلیمری، مقادیر فشار در بالادست شیر تولید جریان گذرا (فشارسنج T1) برای سه دبی حالت ماندگار با مقادیر ۰/۸۲، ۱/۱۶ و ۱/۵ لیتر بر ثانیه توسط مدل آزمایشگاهی شبکه لوله برداشت شد و مقدار اضافه فشار گذرا $\Delta H = H - H_0$ ، فشار پیژومتریک گذرا و H_0 فشار پیژومتریک حالت ماندگار است. در شکل (۲) ترسیم شد. در تمامی سیگنال‌های فشار، با بستن سریع شیر جریان گذرا یک پیک فشاری تولید می‌گردد. این پیک فشار با گذشت زمان در سیکل‌های متوالی سیگنال جریان گذرا به میزان زیادی مستهلک می‌گردد. همان‌طور که از روی سیگنال‌ها نیز مشخص می‌باشد استهلاک موج فشاری در شبکه لوله پلی‌اتیلن، در مدت زمان بسیار کوتاهی صورت می‌گیرد.

در لوله‌های پلی‌اتیلن برخلاف لوله‌های فولادی، به علت وجود خواص ویسکوالاستیک مواد، سرعت موج در حین رویداد گذرا ثابت باقی نمی‌ماند و با گذشت زمان، کاهش در انرژی و به دنبال آن کاهش سرعت موج فشاری ایجاد می‌شود (Covas, 2003) که نتیجه آن وجود اختلاف فاز در سیگنال موج فشاری به میزان زیادی می‌باشد (شکل ۲). از طرفی دیگر، وجود افت اصطکاکی غیرماندگار در حین وقوع امواج گذرا نیز موجب استهلاک و تغییر فاز در سیگنال‌های گذرا می‌گردد. در بخش بعدی مقاله حاضر به بررسی دقیق‌تر میزان اثرات دو پدیده افت اصطکاکی غیرماندگار و اثر ویسکوالاستیک دیواره لوله‌های پلیمری بر روی جریان گذرا پرداخته می‌شود. همچنین نتایج مقایسه سیگنال‌های فشار برای مقادیر مختلف دبی نشان می‌دهد که هر چه میزان دبی افزایش می‌یابد، سیگنال جریان گذرا دارای شدت بیش‌تر، اختلاف فاز کم‌تر و تعداد سیکل بیش‌تر در یک مدت زمان معین است.

واسنجی مدل عددی

در این قسمت هدف واسنجی و صحت‌سنجی مدل عددی در مطالعه حاضر بر اساس اطلاعات اندازه‌گیری‌شده توسط شبکه لوله

حاضر برابر یک در نظر گرفته شد. مقدار زمان تأخیر المان کلوین-ویت با توجه به مطالعات Covas (2003) برابر با ۰/۰۵ s است. مقدار سرعت موج و ضریب خزش تطابقی المان کلوین-ویت با به کارگیری حل معکوس جریان گذرا به صورت همزمان کالیبره و به ترتیب برابر $a = ۳۳۹ \text{ m/s}$ و $\text{Pa}^{-۱} = ۲۶ \times ۱۰^{-۱۱}$ تخمین زده شدند. در ادامه نیز واسنجی مدل عددی برای دو مقدار دبی ۰/۸۲ و ۱/۱۶ لیتر بر ثانیه با در نظر گرفتن اثر ویسکوالاستیک با یک المان کلوین-ویت انجام شد. نتایج واسنجی و صحت‌سنجی در جدول (۱) و شکل (۴) نشان داده شده‌اند.

همچنین مطابق مطالعه Chaudhry (1987) از افت فشار در محل اتصالات لوله‌ها صرف‌نظر شد. سیگنال‌های فشار برداشت شده از مدل آزمایشگاهی و استخراج شده از مدل عددی با یک، دو و سه المان کلوین-ویت در شکل (۳) نشان داده شده‌اند. همان‌طور که در این شکل مشخص است، مدل عددی با در نظر گرفتن اثر ویسکوالاستیک دیواره لوله با دقت بسیار بالایی قادر به شبیه‌سازی واکنش‌های جریان گذرا است. مقدار تابع هدف برای مدل با یک، دو و سه المان کلوین-ویت، یکسان و برابر با $LSE = ۰/۵ \text{ m}^2$ است و اختلاف واضحی بین نتایج در سه حالت وجود ندارد. بنابراین تعداد بهینه المان‌های کلوین-ویت برای شبکه لوله در مطالعه

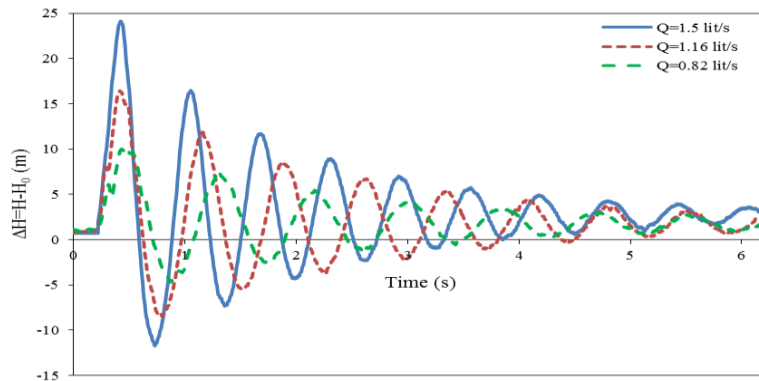


Fig. 2- Time variations in the pressure at upstream of the transient valve for different discharges
 شکل ۲- تغییرات زمانی فشار در بالادست شیر تولید جریان گذرا در دبی‌های متفاوت

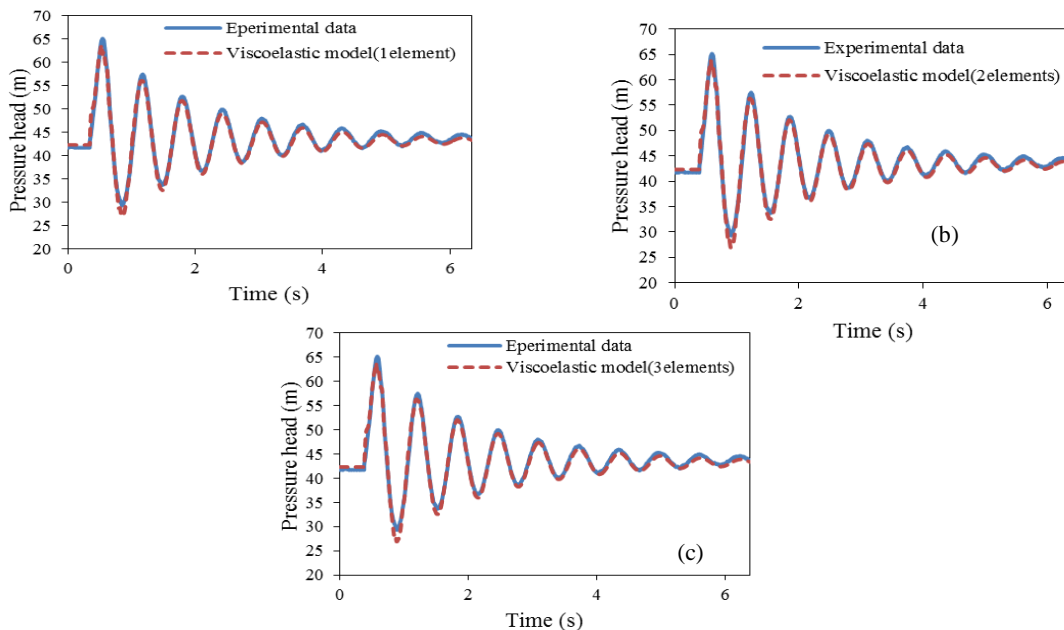


Fig. 3- Comparison of the experimental and numerical results of the viscoelastic model with (a) one, (b) two, and (c) three Kelvin-Voigt elements

شکل ۳- مقایسه نتایج آزمایشگاهی و عددی در مدل ویسکوالاستیک با (a): یک، (b): دو و (c): سه المان کلوین-ویت

جدول ۱- نتایج واسنجی مدل ویسکوالاستیک شبکه لوله برای دبی با مقادیر ۰/۸۲ و ۱/۱۶ لیتر بر ثانیه

Table 1- The calibration results of the pipe network viscoelastic model for discharges of 0.82 and 1.16 lit/s

Q (lit/s)	a (m/s)	J_1 (Pa^{-1})	τ_1 (s)	LSE (m^2)
0.82	252	51×10^{-11}	0.05	0.3
1.16	286	31×10^{-11}	0.05	0.4

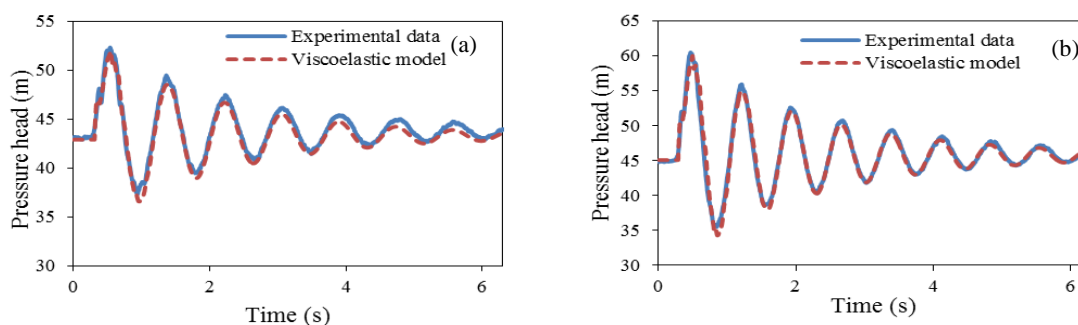


Fig. 4- Comparison of the experimental and numerical results of the viscoelastic model for discharges of (a) 0.82 and (b) 1.16 lit/s

شکل ۴- مقایسه نتایج آزمایشگاهی و عددی در مدل ویسکوالاستیک برای دبی با مقادیر (a): ۰/۸۲ و (b): ۱/۱۶ لیتر بر ثانیه

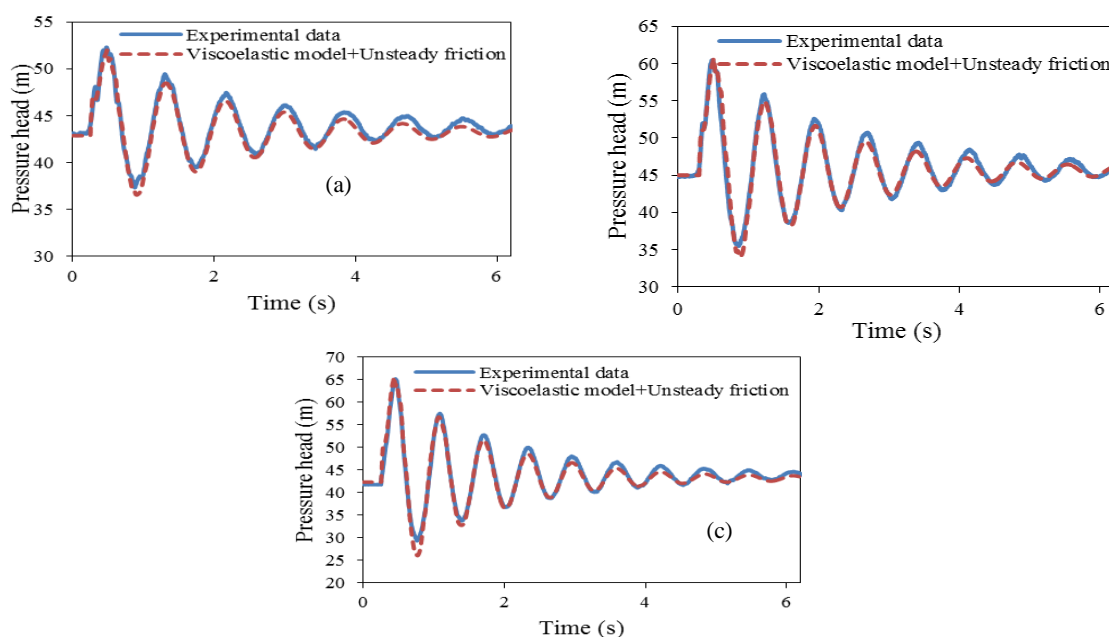


Fig. 5- Comparison of the experimental and numerical results by taking into account the pipe wall viscoelasticity and the unsteady friction loss for discharges of (a) 0.82, (b) 1.16 and (c) 1.5 lit/s

شکل ۵- مقایسه نتایج آزمایشگاهی و عددی با در نظر گرفتن ویسکوالاستیک دیواره لوله و افت اصطکاکی غیرماندگار برای دبی با مقادیر (a): ۰/۸۲، (b): ۱/۱۶ و (c): ۱/۵ لیتر بر ثانیه

رابطه اصلاح شده Brunone et al (1995) رابطه (۴) محاسبه شد. نتیجه مقایسه بین سیگنال‌های عددی و آزمایشگاهی در این حالت برای دبی‌های ۰/۸۲، ۱/۱۶ و ۱/۵ لیتر بر ثانیه در شکل (۵) نشان داده شده است.

در حالتی دیگر واسنجی و صحت‌سنجی مدل عددی با در نظر گرفتن هر دو اثر افت اصطکاکی غیرماندگار و ویسکوالاستیک دیواره لوله با یک المان کلونین- ویت با استفاده از فشارهای اندازه-گیری شده در بالادست شیر تولید جریان گذرا (T1) انجام شد. در این حالت افت اصطکاکی غیرماندگار در مدل عددی با به‌کارگیری

نتایج صحت‌سنجی در این حالت نشان می‌دهد که مدل عددی با در نظر گرفتن افت اصطکاکی غیرماندگار قادر به پیش‌بینی میرایی و اختلاف فاز سیگنال گذرا با دقت بالایی نیست. همچنین مطابقت بین فشارهای گذرا در حالت عددی و آزمایشگاهی نسبت به دو حالت قبل نیز کاهش یافته است. مقادیر کالیبره شده برای پارامترهای مجهول مدل عددی در جدول (۳) ارائه شده‌اند. بالا بودن مقدار ضریب افت اصطکاکی غیرماندگار در این حالت نشان می‌دهد که مدل عددی با افزایش مقدار K ، سعی در جبران میرایی و اختلاف فاز حاصل از اثر ویسکوالاستیک دیواره لوله نموده است.

بنابراین با توجه به نتایج بهترین حالت برای واسنجی مدل عددی شبکه لوله پلی‌اتیلن در تحقیق حاضر در نظر گرفتن تنها اثر ویسکوالاستیک دیواره لوله با یک المان کلونین-ویت است.

نتایج نشان می‌دهد که با اضافه شدن اثر افت اصطکاکی غیرماندگار به مدل عددی، از دقت شبیه‌سازی سیگنال گذرا نسبت به حالت قبل کاسته شده است. ضرایب مجهول مدل عددی در این قسمت شامل پارامترهای سرعت موج گذرا، ضریب افت اصطکاکی غیرماندگار و ضریب خزش هستند که با حل معکوس جریان گذرا و به‌کارگیری الگوریتم ژنتیک هم‌زمان واسنجی و تخمین زده شدند. نتایج واسنجی پارامترهای مجهول برای مقادیر مختلف دبی در جدول (۲) آورده شده‌اند.

در حالت بعدی مدل عددی شبکه لوله به صورت یک مدل الاستیک شامل افت اصطکاکی غیرماندگار در نظر گرفته شد. در این مدل از اثرات ویسکوالاستیک دیواره لوله صرف‌نظر شده است. سیگنال‌های برداشت‌شده از شبکه لوله آزمایشگاهی و شبیه‌سازی-شده توسط مدل عددی الاستیک برای دبی‌های جریان ماندگار به میزان ۰/۸۲، ۱/۱۶ و ۱/۵ لیتر بر ثانیه در شکل (۶) ترسیم شده است.

جدول ۲- نتایج واسنجی مدل عددی با لحاظ اثرات ویسکوالاستیک و افت اصطکاکی غیرماندگار

Table 2- The calibration results of the numerical model by taking into account the viscoelastic and the unsteady friction loss effects

Q (lit/s)	a (m/s)	J_1 (Pa^{-1})	τ_1 (s)	K	LSE (m^2)
0.82	254	50×10^{-11}	0.05	0.01	0.4
1.16	295	22×10^{-11}	0.05	0.09	0.6
1.5	340	15×10^{-11}	0.05	0.13	0.8

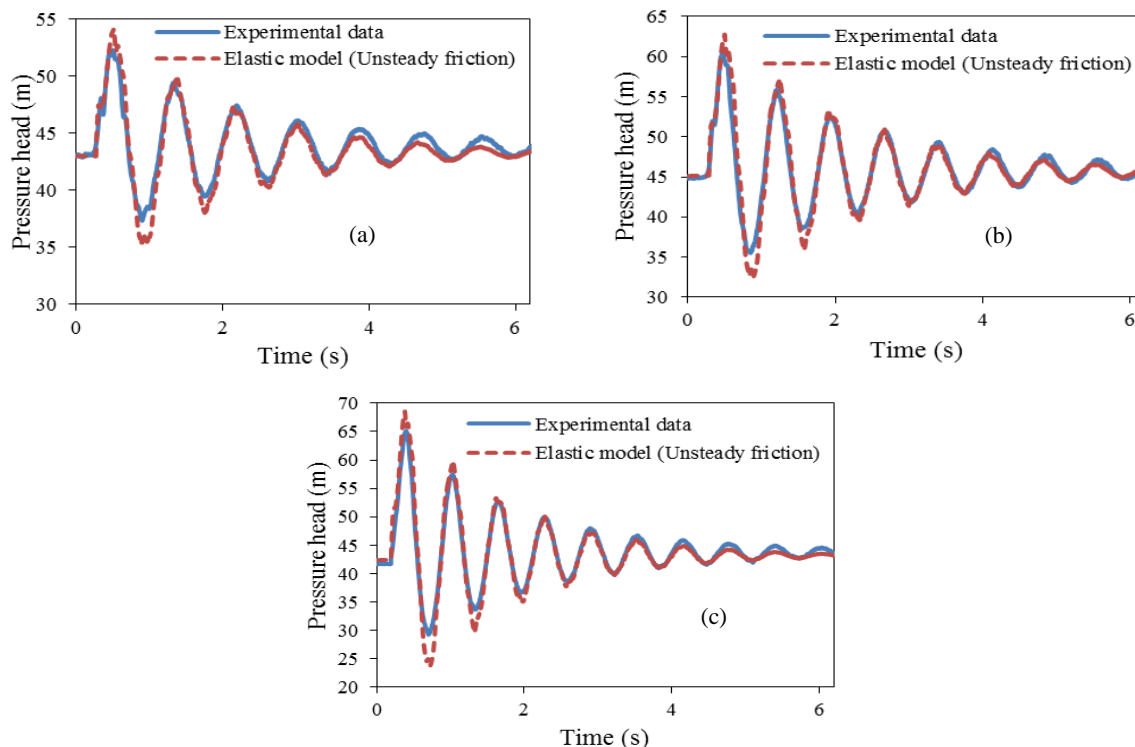


Fig. 6- Comparison of the experimental and numerical results by taking into account the unsteady friction loss for discharges of (a) 0.82, (b) 1.16 and (c) 1.5 lit/s

شکل ۶- مقایسه نتایج آزمایشگاهی و عددی با در نظر گرفتن افت اصطکاکی غیرماندگار برای دبی با مقادیر (a): ۰/۸۲، (b): ۱/۱۶ و (c): ۱/۵ لیتر بر ثانیه

جدول ۳- نتایج واسنجی مدل عددی با لحاظ افت اصطکاکی غیرماندگار

Table 3- The calibration results of the numerical model by taking into account the unsteady friction loss

Q (lit/s)	a (m/s)	K	LSE (m^2)
0.82	261	0.20	0.6
1.16	295	0.23	1.3
1.5	345	0.28	2

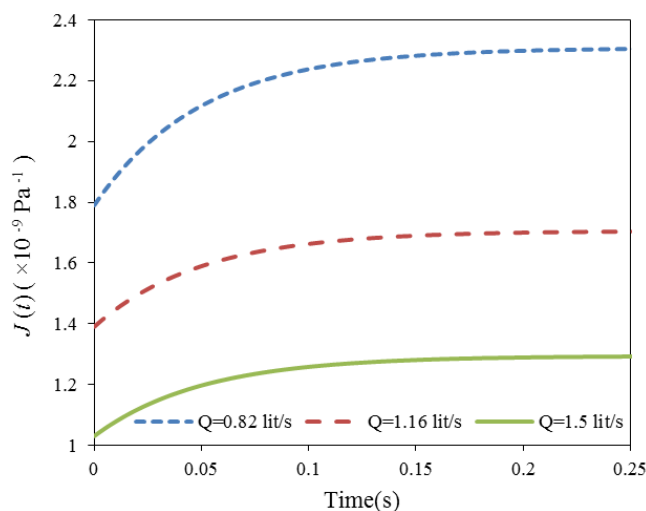


Fig. 7- Comparison of the creep function for different discharges

شکل ۷- مقایسه تابع خزش در مقادیر مختلف دبی

همچنین ضریب خزش تطابقی کم تر (J_k) مقدار تابع خزش کاهش می یابد.

مطابق با مطالعه های گذشته، در مقایسه با لوله های فولادی، خواص ویسکوالاستیک مواد پلیمری در حین ضربه قوچ علاوه بر تغییر شکل الاستیک موجب تغییر شکل های تأخیری در جداره لوله نیز می گردند که بلافاصله پس از باربرداری به حالت اولیه باز نمی گردند. به منظور بررسی این موضوع در شبکه لوله تحقیق حاضر، تغییرات فشار- کرنش برای دبی $1/16$ لیتر بر ثانیه در شکل (۸) ترسیم شد. بررسی تغییرات کرنش در این شکل به وضوح وجود تغییر شکل های تأخیری و همچنین پسماند مکانیکی در شبکه لوله را به اثبات می رساند.

همچنین تغییرات کرنش تأخیری نیز برای سه مقدار دبی ذکر شده، در شکل (۹) مقایسه شده اند. نتایج نشان می دهند هرچه میزان دبی اولیه کاهش می یابد، مدت زمان تغییرات فشاری در هر سیکل بیش تر می شود. به عبارتی دیگر، زمان مؤثر بارگذاری و باربرداری فشار در دبی های کم تر، افزایش می یابد و به همین دلیل زمان تغییرات کرنش تأخیری نیز در هر سیکل افزایش می یابد.

بررسی تابع خزش و کرنش در مدل ویسکوالاستیک

خاصیت ویسکوالاستیک در لوله های پلیمری با به کارگیری تابع خزش مشخص می گردد. به منظور بررسی این موضوع، تابع های خزش تطابقی برای شبکه لوله پلی اتیلن در مطالعه حاضر با به کارگیری حل معکوس جریان گذرا در مدل عددی با لحاظ اثرات ویسکوالاستیک دیواره لوله و همچنین توسط فشارهای برداشت شده در بالادست شیر تولید جریان گذرا تعیین شدند. توابع خزش برای سه دبی جریان ماندگار به میزان 0.82 ، 1.16 و 1.5 لیتر بر ثانیه با مقادیر کالیبره شده ضرایب خزش توسط معادله (۷) محاسبه و در شکل (۷) ترسیم و مقایسه شدند. تابع خزش در تمامی دبی های اولیه مورد نظر، در ابتدا روندی افزایشی دارد و پس از مدت زمان بسیار کوتاهی ثابت می گردد. مقدار تابع خزش محاسبه شده برای مقادیر ذکر شده دبی اولیه، متفاوت می باشد. بنابراین نتیجه گیری می شود که مقدار تابع خزش در مدل عددی با لحاظ اثرات ویسکوالاستیک برای شبکه لوله، وابسته به مقدار دبی شرایط اولیه است. هر چه میزان دبی افزایش می یابد، به علت J_0 کم تر و

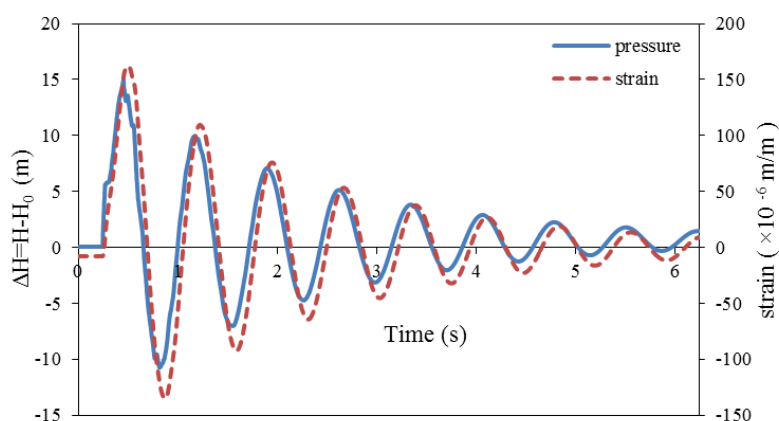


Fig. 8- Time variations in the pressure-strain for discharge of 1.16 lit/s

شکل ۸- تغییرات زمانی فشار- کرنش در دبی ۱/۱۶ لیتر بر ثانیه

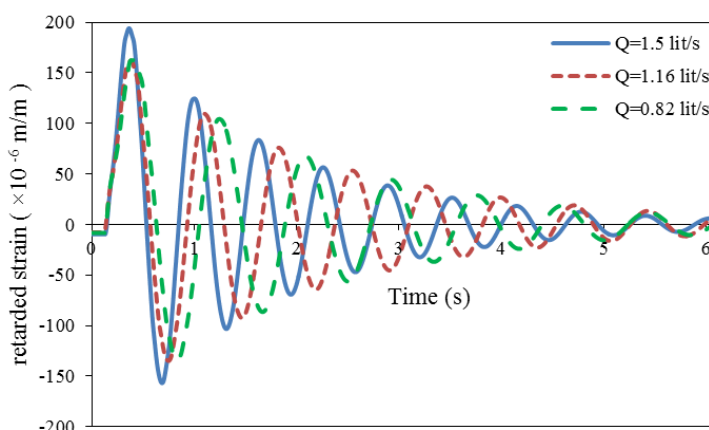


Fig. 9- Variations in the retarded strain for different discharges

شکل ۹- تغییرات کرنش تأخیری در دبی‌های مختلف

نظر گرفتن تنها اثر ویسکوالاستیک با یک المان کلین- ویت با دقت بالایی قادر به شبیه‌سازی سیگنال‌های گذرا است. توابع خزش مدل ویسکوالاستیک در دبی‌های مختلف حالت ماندگار محاسبه شدند و نشان داده شد که با افزایش دبی، مقدار تابع خزش کاهش می‌یابد. هم‌چنین در این مطالعه وجود تغییر شکل‌های تأخیری و پسماند مکانیکی در شبکه‌های لوله پلی اتیلن اثبات شد.

تشکر و قدردانی

این مقاله از نتایج پایان‌نامه دکتری نویسنده اول و با حمایت مالی معاونت پژوهشی دانشگاه از طریق پژوهانه نویسنده دوم (شماره پژوهانه ۹۹/۳/۰۲/۷۵۴۳) تهیه شده که بدینوسیله از معاونت پژوهشی دانشگاه شهید چمران اهواز و قطب علمی "بهسازی و نگهداری شبکه‌های آبیاری و زهکشی" تشکر و قدردانی می‌گردد. ضمناً حمایت مالی سازمان آب و برق خوزستان مورد تشکر و قدردانی است.

نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر هدف بررسی عددی و آزمایشگاهی خصوصیات سیگنال‌های جریان گذرا در یک شبکه لوله پلی‌اتیلن در شرایط مختلف دبی جریان است. معادله‌های حاکم بر جریان‌های گذرا در سیستم‌های تحت فشار با در نظر گرفتن اثرات اصطکاکی و ویسکوالاستیسیته دیواره لوله‌های پلیمری با استفاده از روش خطوط مشخصه گسسته‌سازی شدند. سیگنال‌های فشاری در بالادست شیر تولید جریان گذرا برای میزان دبی‌های متفاوت حالت ماندگار توسط شبکه لوله آزمایشگاهی جمع‌آوری و ترسیم شدند و مقایسه آن‌ها نشان داد که هر چه میزان دبی افزایش یابد، سیگنال جریان گذرا دارای شدت بیشتر، تعداد سیکل بیشتر در یک بازه زمانی معین و اختلاف فاز کمتری است. واسنجی و صحت‌سنجی مدل عددی شبکه لوله توسط حل معکوس جریان گذرا با وجود اثرات افت اصطکاکی غیرماندگار و ویسکوالاستیک لوله انجام شد و پارامترهای مجهول مدل عددی شامل سرعت موج، ضرایب تابع خزش تطابقی و ضریب افت اصطکاکی غیرماندگار برای مقادیر متفاوت دبی استخراج شدند و نتایج نشان داد که مدل عددی با در

References

- 1- Aklonis, J.J., MacKnight, W.J. and Shen, M., 1972. *Introduction to Polymer Viscoelasticity*. Wiley-Interscience- John Wiley & Sons, Inc. New York.
- 2- Brunone, B., Golia, U.M. and Greco, M., 1991. Modelling of fast transients by numerical methods. In *International Conference on Hydraulic Transients with Water Column Separation (9th and last round Table of IAHR Group), Valencia, Spain*.
- 3- Brunone, B., Golia, U.M. and Greco, M., 1995. Effects of two-dimensionality on pipe transients modeling. *Journal of Hydraulic Engineering*, 121(12), pp.906-912.
- 4- Chaudhry, M.H., 1987. *Applied hydraulic transients*, 2nd Ed., Van Nostrand Reinhold, New York.
- 5- Covas, D., 2003. Inverse transient analysis for leak detection and calibration of water pipe systems modelling special dynamic effects, Thesis, *Imperial College of Science, Technology and Medicine, University of London*, London, UK. 322p.
- 6- Covas, D., Stoianov, I., Mano, J., Ramos, H., Graham, N. and Maksimovic, C., 2004. The dynamic effect of pipe-wall viscoelasticity in hydraulic transients, Part I—Experimental analysis and creep characterization. *Journal of Hydraulic Research, IAHR*. 42(5), pp.516-530.
- 7- Covas, D., Stoianov, I., Mano, J., Ramos, H., Graham, N. and Maksimovic, C., 2005. The dynamic effect of pipe-wall viscoelasticity in hydraulic transients, Part II—Model development, calibration and verification. *Journal of Hydraulic Research, IAHR*. 43(1), pp.56-70.
- 8- Carriço, N.J., Soares, A.K. and Covas, D.I.C. 2016. Uncertainties of inverse transient modelling with unsteady friction and pipe-wall viscoelasticity. *Journal of Water Supply: Research and Technology-AQUA*, 65(4), pp.342-353.
- 9- Daily, J.W., Hankey, Jr.W.L., Olive, R.W. and Jordan, Jr.J.M., 1956. Resistance coefficients for accelerated and decelerated flows through smooth tubes and orifices. *Journal of Basic Engineering, Trans. ASME*. 78(7), pp.1071-1077.
- 10- Evangelista, S., Leopardi, A., Pignatelli, R. and de Marinis, G., 2015. Hydraulic transients in viscoelastic branched pipelines. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, 141(8), pp.1-9.
- 11- Joukowski, N.E., 1904. Waterhammer (Mem. Imperial Academy Soc. of St. Petersburg, 1898) (In Russian. translated by O. Simin). In *the 24th Annual Convention of the American Water Works Association*.
- 12- Pezzinga, G., 1999. Quasi-2D model for unsteady flow in pipe networks. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, 125(7), pp.676-685.
- 13- Rahmanshahi, M., Fathi-Moghaddam, M. and Haghghi, A., 2019. Numerical simulation of dynamic phenomena of unsteady friction and viscoelastic effects in pipeline under the transient flow. *Irrigation Sciences and Engineering*, 41(4), pp.201-216. (In Persian).
- 14- Soares, A.K., Covas, D. and Reis, F.R., 2008. Analysis of PVC pipe-wall viscoelasticity during water hammer. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, 134(9), pp.1389-1394.
- 15- Trikha, A.K., 1975. An efficient method for simulating frequency-dependent friction in transient liquid flow. *Journal of Fluids Engineering, Trans. ASME*, 97(1), pp.97-105.
- 16- Vitkovsky, J.P., Lambert, M.F. and Simpson, A.R., 2000. Advances in unsteady friction modelling in transient pipe flow. In *the 8th International Conference on Pressure Surges. BHR Group Ltd., The Hague, The Netherlands*.
- 17- Zielke, W., 1968. Frequency-dependent friction in transient pipe flow. *Journal of Basic Engineering, Trans. ASME. Series D*. 90(1), pp.109-115.