

تحلیل جریان غیرماندگار سریع در خطوط لوله توسط مدل اصطکاکی غیرماندگار

کامران محمدی^۱، منوچهر فتحی مقدم^{۲*}

تاریخ دریافت: ۹۴/۱۰/۲۵

تاریخ پذیرش: ۹۵/۱۰/۱۱

^۱ دانشجوی دکتری سازه‌های آبی دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز

^۲ استاد گروه سازه‌های آبی دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز

* مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: fathi49@gmail.com

چکیده

تحلیل جریان‌های غیرماندگار سریع از این جهت که منجر به جلوگیری از وارد شدن خسارات شدید به سیستم آبرسانی می‌شود دارای اهمیت فراوان است. در تحلیل‌های رایج فرض بر این است که ارتباط تنش برشی جداره با سرعت متوسط در سطح مقطع لوله در حالت غیرماندگار همانند حالت ماندگار است و روابط بیان‌کننده تنش برشی جداره مانند رابطه داریسی-ویسباخ یا هیزن-ویلیامز در هرگام زمانی از جریان غیرماندگار نیز صادق می‌باشد. این در حالی است که در تحلیل جریان‌های غیرماندگار سریع مانند ضربه‌قوچ، روابط تنش برشی جداره در حالت ماندگار نامعتبر است چرا که افت ناشی از اصطکاک را کمتر از مقدار واقعی پیش‌بینی می‌کند. لذا در این تحقیق ابتدا طی مدل‌سازی آزمایشگاهی، پدیده جریان غیرماندگار سریع بر روی یک سیستم مخزن، لوله و شیر مورد بررسی قرار گرفت که لوله آن از جنس پلی‌اتیلن به قطر ۶۳ میلی‌متر و با ۳ طول ۳۲، ۴۷ و ۸۰ متر می‌باشد. هر طول لوله با ۳ دبی مختلف و بستن سریع شیر در حضور مخزن تامین بار آبی با ارتفاع استاتیکی تراز آب ۵ متر مورد آزمایش قرار گرفته است. این شرایط هیدرولیکی فوق توسط مدلی کامپیوتری که با زبان برنامه‌نویسی MATLAB کدنویسی شده است شبیه‌سازی و نتایج آن با داده‌های آزمایشگاهی مورد مقایسه قرار گرفت. این برنامه قادر است جریان غیرماندگار سریع را به کمک مدل‌های اصطکاکی شبه‌ماندگار و غیرماندگار شبیه‌سازی نماید. نتایج نشان دهنده آن است که مدل به خوبی قادر است داده‌های آزمایشگاهی را شبیه‌سازی نماید و مدل‌های اصطکاکی غیرماندگار ($RMSE=0.0529$) و شبه‌ماندگار ($RMSE=0.0858$) به ترتیب عملکرد بهتری را در تخمین جریان غیرماندگار سریع از خود نشان می‌دهند. همچنین امواج فشاری آزمایشگاهی، شبیه‌سازی شده با مدل اصطکاکی غیرماندگار و مدل اصطکاکی شبه‌ماندگار روند میرایی سریع‌تری داشتند.

واژه‌های کلیدی: افت غیرماندگار، جریان غیرماندگار سریع، خطوط انتقال آب، مدل‌های اصطکاکی

Analysis of Rapid Unsteady Flow in Pipelines Using Unsteady Friction Model

K Mohammadi¹, M Fathi-moghadam^{2*}

Received: 15 January 2016 Accepted: 31 December 2016

¹- Ph.D. Student of Hydraulic Structures, Faculty of Water Sci. Eng., Shahid Chamran Univ., Ahwaz, Iran

²- Prof. of Hydraulic Structure Dept., Faculty of Water Sci. Eng., Shahid Chamran Univ., Ahwaz, Iran

*Corresponding Author, Email: fathi49@gmail.com

Abstract

Analysis of unsteady flows is very important as it leads to prevent severe damage to water supply system. In the current analysis, it is assumed that the relationship between wall shear stress and mean velocity in the pipe cross-sectional area in unsteady state flow is similar to that in steady state flow. In other words, the formula expressing the wall shear stress in steady state like Darcy-Visbakh or Hazen-Williams is true for unsteady flows in each time step. Meanwhile, in the analysis of rapid unsteady flows like water hammer, wall shear stress equations in steady state are invalid because they underestimate the losses due to friction loss. Therefore, in the present study, the phenomenon of rapid unsteady flow was examined in a reservoir, pipe and valve system that consisted of 63 mm diameter polyethylene pipe with 32, 47 and 80 m lengths. Each pipe was tested with 3 discharges and immediate closing of the valve at the presence of reservoir tank with static water level of 5 meters. This hydraulic condition also was simulated by a computer model that was coded with the programming language MATLAB and was calibrated with the experimental results. This program was able to simulate the rapid unsteady flows with quasi-steady and unsteady friction models. The results indicated that the model was well able to simulate experimental results, and unsteady friction model (RMSE=0.0529) and quasi-steady friction model (RMSE=0.0858) had better estimation of unsteady state condition, respectively. Also, the laboratory pressure waves that were simulated with unsteady and quasi-steady frictional model had a faster damping in their appearance, respectively.

Keywords: Friction models, Rapid Unsteady Flow, Unsteady head loss, Water conveyance pipelines

مقدمه

مسئله اصطکاک می‌باشد. استفاده از روابط تنش برشی جداره در حالت ماندگار برای حالت غیرماندگار، برای جریان غیرماندگار بسیار کند، قابل قبول می‌باشد اما در تحلیل جریان‌های غیرماندگار سریع این معادلات معتبر نیستند چرا که افت ناشی از اصطکاک را کمتر از مقدار واقعی پیش‌بینی می‌کند. در واقع، یک از دلایل مهم تفاوت بین نتایج عددی، داده‌های آزمایشگاهی و داده‌های میدانی مربوط به شبیه‌سازی جریان‌های غیرماندگار سریع به علت استفاده از روابط تنش برشی جداره در حالت ماندگار در معادلات مربوطه می‌باشد.

ژوکوفسکی (۱۸۹۸) در شهر مسکو اولین شخصی بود که نشان داد علت بالا رفتن فشار در مسیر خطوط لوله انتقال سیالات در نتیجه تغییر سرعت و جرم سیال است. ایشان رابطه $\Delta P = -\rho c \Delta V$ را برای تعیین و محاسبه سرعت انتشار موج فشار ناشی از

تحلیل جریان‌های غیرماندگار سریع از این جهت که منجر به جلوگیری از وارد شدن خسارات شدید به سیستم آبرسانی می‌شود دارای اهمیت فراوان است. این خسارات سالانه هزینه‌های فراوانی را بر سامانه‌های انتقال آب وارد می‌سازد. با توجه به ماهیت غیرماندگار بودن جریان دخالت دادن عامل زمان در محاسبات غیرقابل چشم‌پوشی به نظر می‌رسد. در واقع تمام جریان‌های ناپایدار، تبدیل یا انتقال کوتاه مدت یا بلند مدت از حالت جریان پایدار به حالت پایدار دیگری هستند. لذا با توجه به موارد فوق تعیین مشخصات جریان غیرماندگار از مباحث حائز اهمیت هیدرولیک خطوط انتقال آب است.

یکی از عوامل بسیار مهمی که در تعیین خصوصیات هیدرولیکی جریان غیرماندگار مؤثر است،

خیاطزاده و سامانی (۱۳۷۶) برنامه کامپیوتری بر اساس مدل ریاضی هیدرولیکی جهت تحلیل شبکه در حالت غیرماندگار ارائه دادند. نتایج این مدل با نتایج عددی مقایسه گردید و جوابها قابل قبول بودند. فتحی‌مقدم و همکاران (۲۰۱۳) دقت روش تفاضل‌های محدود صریح را در ارزیابی هیدرولیک جریان‌های میرا در سیستم انتقال آب نیروگاه‌های برقابی بررسی و نتایج حاکی از دقت بالای روش حل بود. حقیقی‌پور (۱۳۹۱) و همچنین تائبی (۱۳۹۱) به ترتیب به بررسی هیدرولیک جریان غیرماندگار در خط لوله‌های سری و موازی پرداختند. آن‌ها در تحقیقات خود به این نتیجه دست یافتند که جریان غیرماندگار که با ضرایب افت ثابت و یا شبه‌ماندگار محاسبه می‌شود، مقداری کمتری را نسبت به نیروی اصطکاک واقعی نشان می‌دهد.

با توجه به مطالب گفته شده، هدف از این تحقیق بررسی جریان غیرماندگار سریع در خطوط لوله توسط مدل فیزیکی، شبیه‌سازی امواج فشاری به وجود آمده در آزمایش‌ها با مدل‌های اصطکاکی شبه‌ماندگار و غیرماندگار و مقایسه با داده‌های آزمایشگاهی ثبت شده جهت بررسی عملکرد مدل کامپیوتری تهیه شده در محیط برنامه‌نویسی MATLAB می‌باشد.

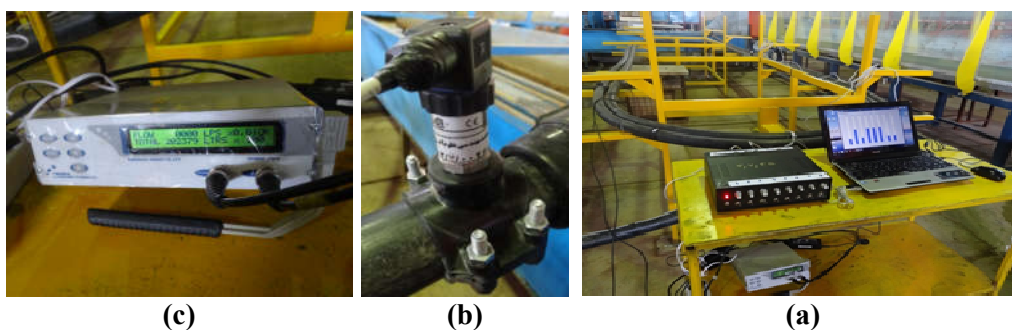
مواد و روش‌ها

مدل فیزیکی از یک سیستم مخزن، لوله انعطاف‌پذیر و شیر قطع و وصل به منظور تولید جریان غیرماندگار شکل گرفته است که نمای کلی آن در شکل ۱ نمایش داده شده است. مخزن موجود دارای بار استاتیکی ۵ متر نسبت به انشعاب گرفته شده برای لوله می‌باشد. لوله از جنس پلی‌اتیلن با فشار کاری ۱۰ اتمسفر بوده و با قطر ۶۳ میلی‌متر و ۳ طول ۳۲، ۴۷ و ۸۰ متر در آزمایش‌ها به کار گرفته شد. جدول ۱ محدوده پارامترهای به کار رفته در آزمایش‌ها را نشان می‌دهد. لوله در طول مسیر خود بر روی ساپورتی قرار دارد. این قسمت به صورت دایره‌هایی هم مرکز با

ضربه قوچ ارائه نمود. آلیوی (۱۹۱۳) به تجزیه و تحلیل جدیدی در فرآیند ضربه قوچ رسیدند و دامنه مطالعاتی قبلی را به صورت گسترده‌ای بسط و توسعه دادند. همچنین استریتر و وایلی (۱۹۶۷) در مقاله خود صدمات مربوط به شیر را در سیستم لوله‌های سری، موازی، انشعابات همراه با در نظر گرفتن اصطکاک ارائه نمودند. آن‌ها پیشنهاد نمودند تا روش ارائه شده به منظور بهره‌برداری بهتر و همچنین در انتخاب مطمئن‌تر مواد و مصالح ساخت در سیستم‌های انتقال آب و نیروگاه‌های برقابی مورد استفاده قرار گیرد. پارکر و جونز (۱۹۹۰) روش جدیدی برای جدا کردن موج رفت و برگشت برای جریان در حالت یک‌بعدی پیدا کردند که بر اساس تحلیل جریان به صورت غیرخطی می‌باشد. ولی آن‌ها فرض کردند که موج رفت و برگشت در هنگام برخورد به صورت خطی جمع می‌شود. برونونه و گولیا (۱۹۹۱) و برونونه و همکاران (۱۹۹۱) مدل‌های اصطکاک در جریان ناپایدار مبتنی بر شتاب لحظه‌ای را تصحیح نمودند. مدل مشهور برونونه و همکاران (۱۹۹۱) مورد پسندترین مدل تصحیح‌شده در کاربردهای ضربه قوچی به دلیل سادگی و توانایی آن در ایجاد هماهنگی منطقی با نتایج بار فشاری اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه می‌باشد. مینیکنی و همکاران (۲۰۱۲) به بررسی رفتار موج فشاری در سیستم‌های با تغییر ناگهانی سطح مقطع لوله پرداختند. در نهایت این تحقیقات منجر به ارائه مدل عددی گسترش یافته‌ای شد که نتایج آن هماهنگی مناسب‌تری با نتایج تجربی دارد. قیدویی و همکاران (۲۰۰۵) در خلال مقاله‌ای مروری به شکل تقریباً کاملی تمامی تجربیات علمی به دست آمده تا آن زمان را گردآوری و ارائه نمودند. کالینز و همکاران (۲۰۱۲) این مسئله را که باز کردن و یا بستن شیر به صورت ناگهانی، چگونه و به چه شدتی می‌تواند جریان‌های غیرماندگار شدیدی به وجود آورد را مورد بررسی قرار دادند.

کامپیوتری و نرم‌افزار پردازشگر اطلاعات مرتبط می‌گردد. لازم به ذکر است مبدل‌های فشاری بلافاصله قبل از شیر نصب شده‌اند تا قادر باشند بیشینه فشار به وجود آمده در سیستم را که در محل شیر رخ می‌دهد به ثبت برسانند.

کمترین شعاع انحنای ۱/۵ متر بروی اسکلت فلزی نصب شده است. به منظور اندازه‌گیری دبی در لوله، از دستگاه دبی‌سنج اولتراسونیک UF6000 P870 استفاده شد (شکل b۱). جهت اندازه‌گیری فشار دینامیکی از مبدل فشار استفاده شد (شکل c۱). این حسگرها توسط سیم‌های رابط به دستگاه دیتالاگر و از آنجا به سیستم



شکل ۱- (a) نمای کلی مدل فیزیکی، (b) مبدل فشاری و (c) دستگاه دبی‌سنج اولتراسونیک به کار رفته در آزمایش‌ها.

جدول ۱- محدوده پارامترهای به کار رفته در آزمایش‌ها.

نام متغیر	قطر لوله	طول لوله	دبی	زمان بستن شیر	نوع مدل اصطکاکی
		۳۲ m	$1/5 - 2/8 - 4/1 - 5/9 \text{ L S}^{-1}$		
محدوده	۶۳ mm	۴۷ m	$1 - 2 - 3 - 4 \text{ L S}^{-1}$	آنی	شبه‌ماندگار - غیرماندگار
		۸۰ m	$2 - 3 - 4/1 \text{ L S}^{-1}$		

روابط حاکم

معادلات اساسی حاکم بر جریان‌های غیرماندگار در مجاری تحت فشار عبارتند از معادلات پیوستگی و مومنوم که در ادامه به آن‌ها اشاره می‌شود.

معادله مومنوم (اندازه حرکت):

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial t} + V \frac{\partial V}{\partial x} + g \sin \theta + \frac{fV|V|}{2D} = 0 \quad [1]$$

معادله پیوستگی:

$$\frac{\partial P}{\partial t} + V \frac{\partial P}{\partial x} + \rho c^2 \frac{\partial V}{\partial x} = 0 \quad [2]$$

در این معادلات A و P فشار و سطح مقطع

جریان، ρ جرم حجمی و یا چگالی سیال، θ زاویه بین محور لوله و سطح مبنا، V سرعت سیال، g شتاب گرانش زمین، D قطر لوله، f ضریب اصطکاکی

داریسی-ویسباخ و C سرعت موج فشاری می‌باشند. این معادلات در مدل کامپیوتری تهیه شده با روش خطوط مشخصه مورد استفاده قرار گرفته‌اند. سرعت انتشار موج فشاری در لوله‌های تحت فشار به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$c = \sqrt{\frac{\frac{K}{\rho}}{1 + \frac{K D}{E e}}} \quad [3]$$

در رابطه ۳، K مدول الاستیسیته حجمی سیال،

E مدول کشسانی لوله و e ضخامت لوله می‌باشد.

در تحلیل‌های رایج از جریان میرا، فرض بر این

است که روابط بیان‌کننده تنش برشی جداره مانند رابطه داریسی-ویسباخ یا هیزن-ویلیامز در هرگام زمانی از جریان غیرماندگار، نیز صادق است. برای مثال، شکل

شبه‌ماندگار $\tau_{ws}(t)$ در نظر گرفته و به بیان ریاضی می‌توان نوشت:

$$\tau_w(t) = \tau_{ws}(t) + \tau_{wu}(t) \quad [5]$$

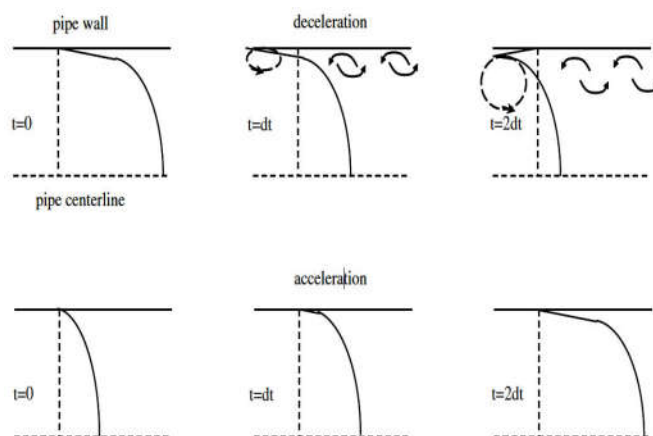
برای $\tau_{wu}(t)$ برای جریان ماندگار برابر صفر و برای جریان‌های غیرماندگار سریع مقدار قابل توجهی دارد. قسمت غیرماندگار تنش برشی، بیان‌گر تغییرات ناشی از جریان‌های غیرماندگار در شکل پروفیل سرعت می‌باشد که این تغییرات در برگیرنده جریان معکوس و یک گرادیان بزرگ در نزدیک جدار لوله می‌باشد (شکل ۲).

معادله داریسی- ویسیباخ که در مدل‌های ضربه کوچی استفاده می‌شود، عبارت است از (استریتز و وایلی ۱۹۸۵):

$$\tau_{ws}(t) = \frac{\rho f(t)|V(t)|V(t)}{8} \quad [4]$$

که در آن $\tau_{ws}(t)$ تنش برشی جداره در حالت شبه‌ماندگار و تابعی از زمان می‌باشد. استفاده از روابط تنش برشی جداره در حالت ماندگار برای جریان غیرماندگار بسیار کند، قابل قبول می‌باشد.

$\tau_{wu}(t)$ را در واقع تفاوت بین تنش برشی لحظه‌ای دیوار $\tau_w(t)$ و مقدار تنش برشی در حالت



شکل ۲- نمای شماتیک جریان معکوس در پروفیل سرعت در حالت جریان‌های غیرماندگار (پوتوف ۲۰۰۸).

نتایج و بحث

در این بخش، پس از اعمال تنظیمات مربوطه و اجرای تحلیل، نتایج جریان غیرماندگار سریع از برنامه کدنویسی شده به دست آمده و داده‌های حاصل به منظور مقایسه با داده‌های آزمایشگاهی گردآوری شده‌اند. سپس این داده‌ها با نتایج آزمایشگاهی مورد مقایسه قرار گرفته که در ادامه تشریح خواهند شد. پارامترهای ثابت به کار رفته برای شبیه‌سازی جریان غیرماندگار سریع عبارتند از وزن مخصوص سیال ۹۸۰۰ نیوتن بر متر مکعب، مدول الاستیسیته حجمی (مدول بالک) سیال (آب) $2/1 \times 10^9$ نیوتن بر مترمربع،

از جمله مدل‌های اصطکاکی غیرماندگار می‌توان به مدل دیلی و همکاران (۱۹۵۶) اشاره کرد. برای مجرای با قطر ثابت، رابطه ارائه شده توسط دیلی و همکاران (۱۹۵۶) عبارت است از:

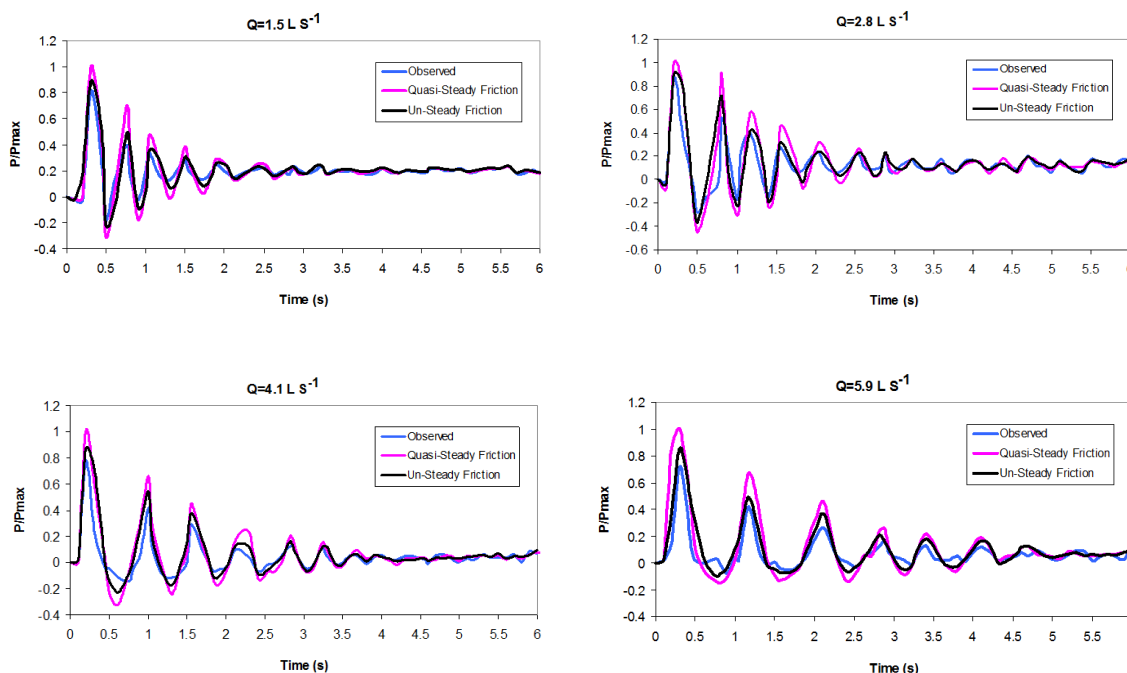
$$\tau_w = \tau_{ws} + \frac{K\rho D}{4} \frac{\partial V}{\partial t} \quad [6]$$

فرمول دیلی و همکاران (۱۹۵۶) نشان داد که ضریب K یک معیار از انحرافات ناشی از ناپایداری تنش برشی جداره و شار مومنتم می‌باشد و به طور کلی ضریب k وابسته به مکان و زمان است.

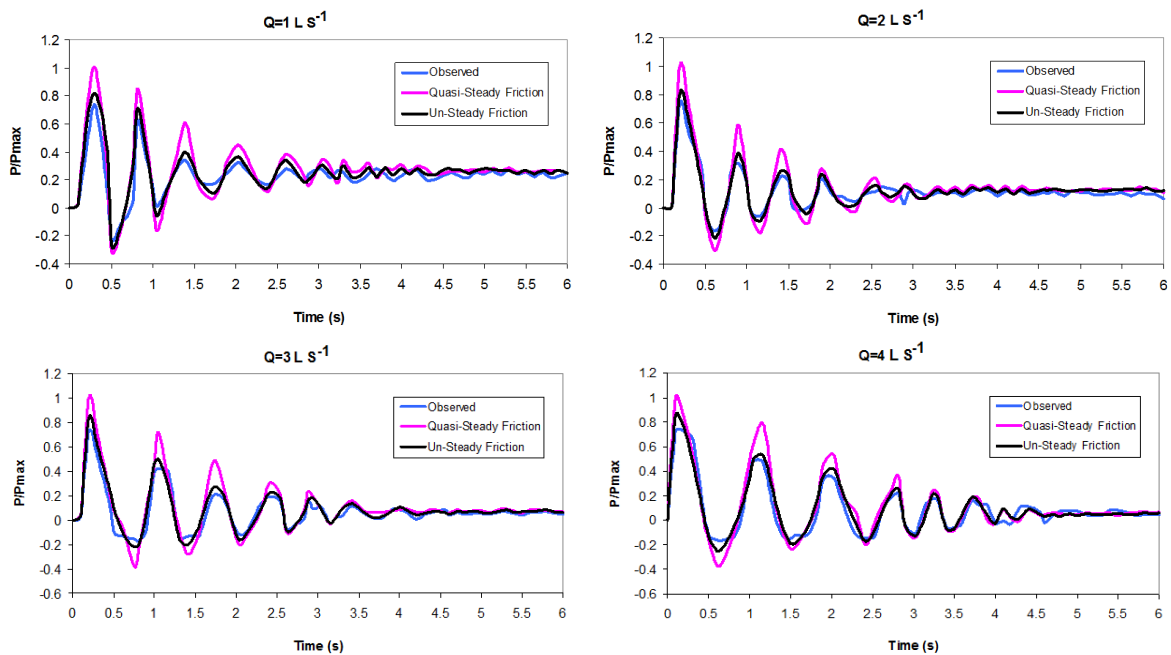
مقادیر اصطکاک محاسبه شده توسط مدل غیرماندگار بیشتر از مدل شبه‌ماندگار باشد.

از طرفی امواج فشاری شبیه‌سازی شده با مدل اصطکاک غیرماندگار نزدیک‌تر به امواج ثبت شده در آزمایشگاه می‌باشند چرا که وجود ترم غیرماندگار در مدل اصطکاک غیرماندگار باعث می‌شود شرایط شبیه‌سازی اصطکاک و افت به شرایط واقعی نزدیک‌تر باشد که نشان‌دهنده دقت بالاتر این مدل نسبت به مدل اصطکاک شبه‌ماندگار است. چرا که علاوه بر ترم ماندگار اصطکاک، ترم غیرماندگار نیز به آن اضافه می‌گردد که باعث افزایش مقدار افت می‌شود. لذا در واقعیت افت به وجود آمده در امواج فشاری بیشتر از آنچه می‌باشد که توسط اصطکاک شبه‌ماندگار محاسبه می‌شود.

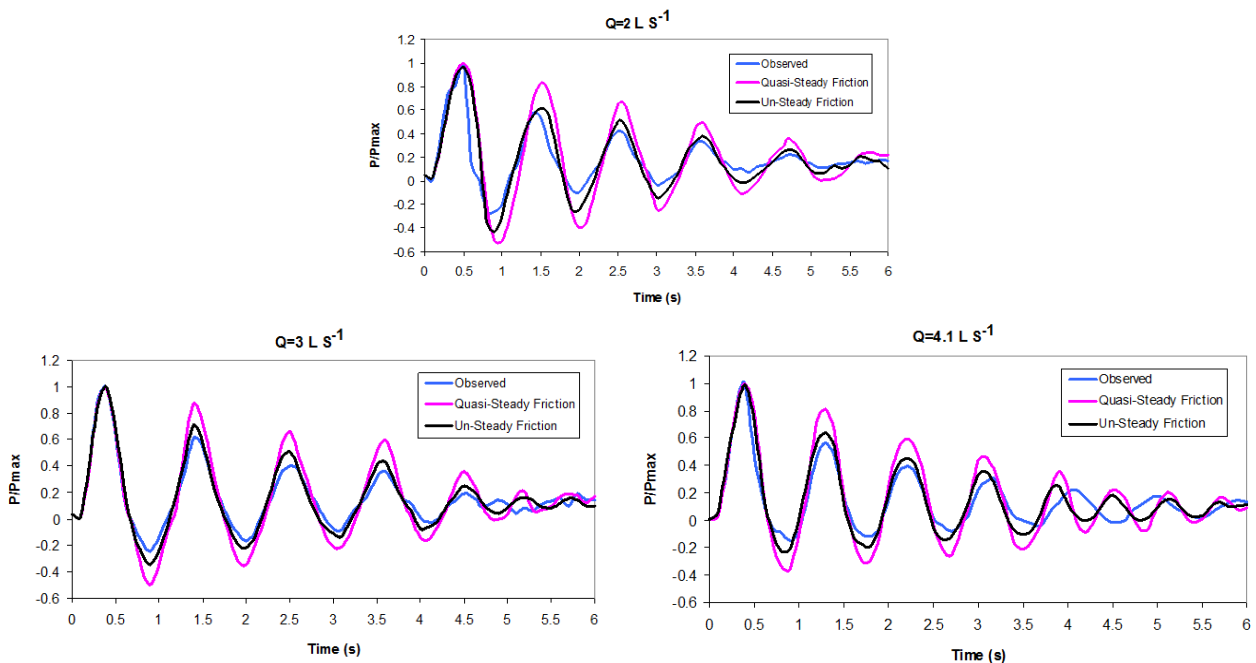
مدول الاستیسیته (یانگ) لوله پلی‌اتیلن ۰/۸ گیگا پاسکال، ضریب پواسن لوله ۰/۴۶ و فشار بخار حدوداً ۱۰- متر. اشکال ۳ تا ۵ نتایج حاصل از شبیه‌سازی امواج فشاری توسط مدل عددی را در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهد. همان‌گونه که در اشکال مشخص است، در حالت کلی مدل عددی قادر می‌باشد تغییرات موج فشاری به وجود آمده به دلیل پدیده ضربه‌قوچ را به خوبی شبیه‌سازی نماید. در تمامی موارد امواجی که با مدل اصطکاک شبه‌ماندگار شبیه‌سازی شده‌اند مقادیر بیشتری را نسبت به امواجی که با مدل اصطکاک غیرماندگار شبیه‌سازی شده‌اند نشان می‌دهند. این موضوع به دلیل اضافه شدن ترم غیرماندگار به مدل اصطکاک غیرماندگار نسبت به مدل اصطکاک شبه‌ماندگار است (رابطه ۴) که باعث می‌گردد



شکل ۳ - نتایج شبیه‌سازی عددی جریان غیرماندگار سریع با استفاده از مدل‌های اصطکاک شبه‌ماندگار و غیرماندگار در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی برای طول ۳۲ متر.



شکل ۴- نتایج شبیه‌سازی عددی جریان غیرماندگار سریع با استفاده از مدل‌های اصطکاکی شبه‌ماندگار و غیرماندگار در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی برای طول ۴۷ متر.



شکل ۵- نتایج شبیه‌سازی عددی جریان غیرماندگار سریع با استفاده از مدل‌های اصطکاکی شبه‌ماندگار و غیرماندگار در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی برای طول ۸۰ متر.

توسط مدل عددی بیشتر از مقادیر آزمایشگاهی برداشت شده باشد. بنابراین با توجه به دلایل ذکر شده، همان‌طور که در اشکال ۳ تا ۵ دیده می‌شود، پیک‌های مثبت و منفی امواج فشاری شبیه‌سازی شده توسط مدل

از سوی دیگر خاصیت ویسکوالاستیک لوله پلی‌اتیلن دیگر دلیل کمتر بودن مقادیر آزمایشگاهی از مقادیر برآورد شده توسط مدل عددی می‌باشد. این خاصیت باعث می‌شود امواج فشاری برآورد شده

(۳) پارامتر R^2 که نمایانگر مجذور ضریب همبستگی می‌باشد.

(۴) پارامتر α که نشانگر شیب خط رگرسیون است در حالی که عرض از مبدأ آن صفر باشد.

همان‌طور که در جداول ۲ تا ۴ مشخص است، برای دبی‌های هر دو طول شبیه‌سازی شده، مقادیر R^2 بین امواج فشاری شبیه‌سازی شده با مدل اصطکاکی غیرماندگار و داده‌های آزمایشگاهی (Un St. - Obs.) همواره بیشتر از مقادیر R^2 بین امواج فشاری شبیه‌سازی شده با مدل اصطکاکی شبه‌ماندگار و داده‌های آزمایشگاهی (Qu. St. - Obs.) است که این موضوع نشانگر همبستگی بیشتر امواج فشاری شبیه‌سازی شده با مدل اصطکاکی غیرماندگار با امواج آزمایشگاهی نسبت به امواج شبیه‌سازی شده با مدل اصطکاکی شبه‌ماندگار است. بنابراین مطابق این شاخص آماری مهم نیز مدل اصطکاکی غیرماندگار نسبت به مدل اصطکاکی شبه‌ماندگار در شبیه‌سازی امواج فشاری غیرماندگار سریع ناشی از بستن آبی شیر تواناتر است.

عددی تیزتر و بلندتر از مقادیر برداشت شده آزمایشگاهی می‌باشد. به عبارتی روند میرایی امواج فشاری در مدل فیزیکی تندتر از مدل عددی در حالت اصطکاک شبه‌ماندگار و غیرماندگار می‌باشد.

همچنین مقایسات آماری مقادیر امواج فشاری ثبت شده در آزمایشگاه و امواج فشاری میرایی شبیه‌سازی شده توسط نرم‌افزار و به کمک دو مدل اصطکاکی شبه‌ماندگار و غیرماندگار در جداول ۲ تا ۴ ذکر شده‌اند. پارامترهای آماری استفاده شده در این جداول عبارتند از:

(۱) متوسط خطای مطلق که به صورت زیر تعریف خواهد شد:

$$ME = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n [(P_M)_i - (P_P)_i] \quad [7]$$

N = تعداد داده‌ها، P_M = میزان فشار اندازه‌گیری شده و P_P = مقدار فشار برآورد شده می‌باشند. (۲) جذر میانگین مربعات خطا که این شاخص آماری نیز به شکل زیر قابل توصیف است:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^n [(P_M)_i - (P_P)_i]^2} \quad [8]$$

جدول ۲- مقایسه آماری امواج فشاری آزمایشگاهی و شبیه‌سازی شده با مدل‌های اصطکاکی شبه‌ماندگار و غیرماندگار برای طول ۳۲ متر.

		R^2	RMSE	ME	α
$Q = 1/5 \text{ L S}^{-1}$	Qu. St. - Obs.	۰/۷۶۵۸	۰/۰۷۸۰	۰/۰۰۹۴	۰/۸۲۶۳
	Un St. - Obs.	۰/۸۲۵۴	۰/۰۶۲۲	۰/۰۱۱۸	۰/۸۸۸۶
	Qu. St. - Un St.	۰/۸۸۴۴	۰/۰۴۵۵	۰/۰۰۰۵	۰/۹۱۸۰
$Q = 2/8 \text{ L S}^{-1}$	Qu. St. - Obs.	۰/۶۵۵۵	۰/۱۱۹۸	۰/۰۰۵۳	۰/۶۵۴۵
	Un St. - Obs.	۰/۸۰۳۷	۰/۰۷۱۴	۰/۰۰۵۵	۰/۷۶۷۸
	Qu. St. - Un St.	۰/۹۲۶۵	۰/۰۶۳۰	۰/۰۰۷۶	۰/۸۸۴۲
$Q = 4/1 \text{ L S}^{-1}$	Qu. St. - Obs.	۰/۸۴۲۹	۰/۰۸۳۱	۰/۰۲۱۴	۰/۶۱۴۶
	Un St. - Obs.	۰/۹۲۰۷	۰/۰۵۳۸	۰/۰۱۴۲	۰/۸۲۷۳
	Qu. St. - Un St.	۰/۹۵۲۰	۰/۰۴۱۷	۰/۰۰۰۳	۰/۸۷۵۳
$Q = 5/9 \text{ L S}^{-1}$	Qu. St. - Obs.	۰/۷۸۰۶	۰/۱۰۴۱	۰/۰۲۶۷	۰/۶۳۳۱
	Un St. - Obs.	۰/۸۴۱۶	۰/۰۶۵۳	۰/۰۲۴۹	۰/۶۸۷۳
	Qu. St. - Un St.	۰/۸۸۶۲	۰/۰۵۵۷	۰/۰۰۵۹	۰/۷۵۹۵

جدول ۳- مقایسه آماری امواج فشاری آزمایشگاهی و شبیه‌سازی شده با مدل‌های اصطکاکی شبه‌ماندگار و غیرماندگار برای طول ۴۷ متر.

		R ²	RMSE	ME	α
Q= ۱ L S ⁻¹	Qu. St. - Obs.	۰/۷۸۱۹	۰/۰۸۸۸	۰/۰۴۳۶	۰/۷۶۴۰
	Un St. - Obs.	۰/۸۴۳۱	۰/۰۶۲۴	۰/۰۲۶۹	۰/۸۶۱۱
	Qu. St. - Un St.	۰/۹۳۰۰	۰/۰۵۰۷	۰/۰۱۶۷	۰/۸۸۵۶
Q= ۲ L S ⁻¹	Qu. St. - Obs.	۰/۸۷۸۵	۰/۰۶۶۰	۰/۰۲۶۱	۰/۷۱۲۲
	Un St. - Obs.	۰/۹۱۳۳	۰/۰۴۰۰	۰/۰۱۲۹	۰/۸۸۰۹
	Qu. St. - Un St.	۰/۹۶۱۶	۰/۰۴۲۵	۰/۰۱۳۱	۰/۸۰۸۲
Q= ۳ L S ⁻¹	Qu. St. - Obs.	۰/۸۹۲۵	۰/۰۸۳۷	۰/۰۳۴۷	۰/۶۷۸۲
	Un St. - Obs.	۰/۹۲۴۲	۰/۰۵۰۰	۰/۰۱۸۶	۰/۸۴۷۰
	Qu. St. - Un St.	۰/۹۶۲۷	۰/۰۵۴۱	۰/۰۱۶۱	۰/۸۰۰۰
Q= ۴ L S ⁻¹	Qu. St. - Obs.	۰/۸۹۷۰	۰/۰۸۵۸	۰/۰۲۵۰	۰/۷۵۳۱
	Un St. - Obs.	۰/۹۱۸۷	۰/۰۵۲۹	۰/۰۰۹۳	۰/۹۲۴۰
	Qu. St. - Un St.	۰/۹۷۶۳	۰/۰۵۷۰	۰/۰۱۵۷	۰/۸۱۵۱

جدول ۴- مقایسه آماری امواج فشاری آزمایشگاهی و شبیه‌سازی شده با مدل‌های اصطکاکی شبه‌ماندگار و غیرماندگار برای طول ۸۰ متر.

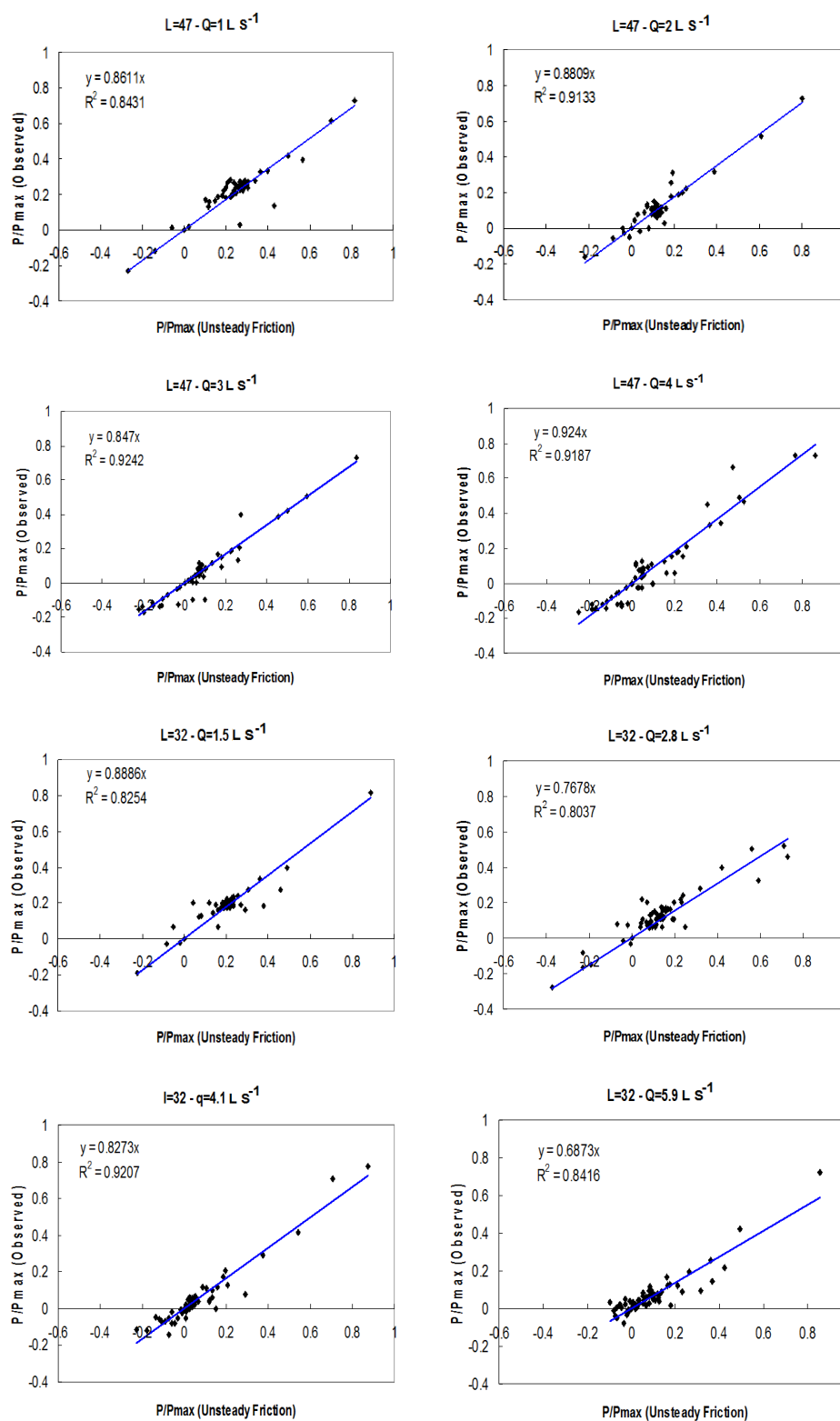
		R ²	RMSE	ME	α
Q= ۲ L S ⁻¹	Qu. St. - Obs.	۰/۶۲۰۳	۰/۱۹۲۳	۰/۰۰۴۵	۰/۶۴۰۷
	Un St. - Obs.	۰/۷۷۲۶	۰/۱۲۱۱	۰/۰۰۰۲	۰/۸۰۱۷
	Qu. St. - Un St.	۰/۹۰۵۵	۰/۱۱۰۰	۰/۰۰۴۴	۰/۸۱۶۷
Q= ۳ L S ⁻¹	Qu. St. - Obs.	۰/۸۲۸۴	۰/۱۳۳۶	۰/۰۰۳۷	۰/۷۳۳۰
	Un St. - Obs.	۰/۹۱۷۸	۰/۰۷۳۲	۰/۰۰۵۱	۰/۸۹۱۹
	Qu. St. - Un St.	۰/۹۵۲۵	۰/۰۸۰۷	۰/۰۰۰۸	۰/۸۳۸۰
Q= ۴/۱ L S ⁻¹	Qu. St. - Obs.	۰/۷۹۶۹	۰/۰۹۰۱	۰/۰۲۰۳	۰/۶۰۸۸
	Un St. - Obs.	۰/۸۶۸۲	۰/۰۷۱۰	۰/۰۲۹۵	۰/۵۹۷۸
	Qu. St. - Un St.	۰/۹۳۸۶	۰/۰۴۴۰	۰/۰۰۷۶	۰/۹۲۹۷

ثانیه از طول ۴۷ متر، مقادیر ME و RMSE برای مقایسه امواج فشاری شبیه‌سازی شده با مدل اصطکاکی غیرماندگار با امواج آزمایشگاهی به ترتیب ۰/۰۰۹۳ و ۰/۰۵۲۹ است و برای مقایسه امواج فشاری شبیه‌سازی شده با مدل اصطکاکی شبه‌ماندگار با امواج آزمایشگاهی به ترتیب ۰/۰۲۵۰ و ۰/۰۸۵۸ می‌باشد که نشان می‌دهد مدل اصطکاکی غیرماندگار از مدل

همچنین در ردیف Qu. St. - Un St. عملکرد دو مدل اصطکاکی غیرماندگار و شبه‌ماندگار با هم مقایسه شده که نسبت به هم تفاوت خیلی قابل توجهی را نشان نمی‌دهند. شاخص‌های آماری ME و RMSE در تمامی موارد با مقادیر بسیار کمی که نشان می‌دهند حاکی از عملکرد خوب دو مدل و مخصوصاً مدل اصطکاکی غیرماندگار می‌باشند. به عنوان مثال برای دبی ۴ لیتر بر

α و R^2 بین داده‌های آزمایشگاهی و خروجی مدل اصطکاکی غیرماندگار در شکل ۶ نشان داده شده‌اند.

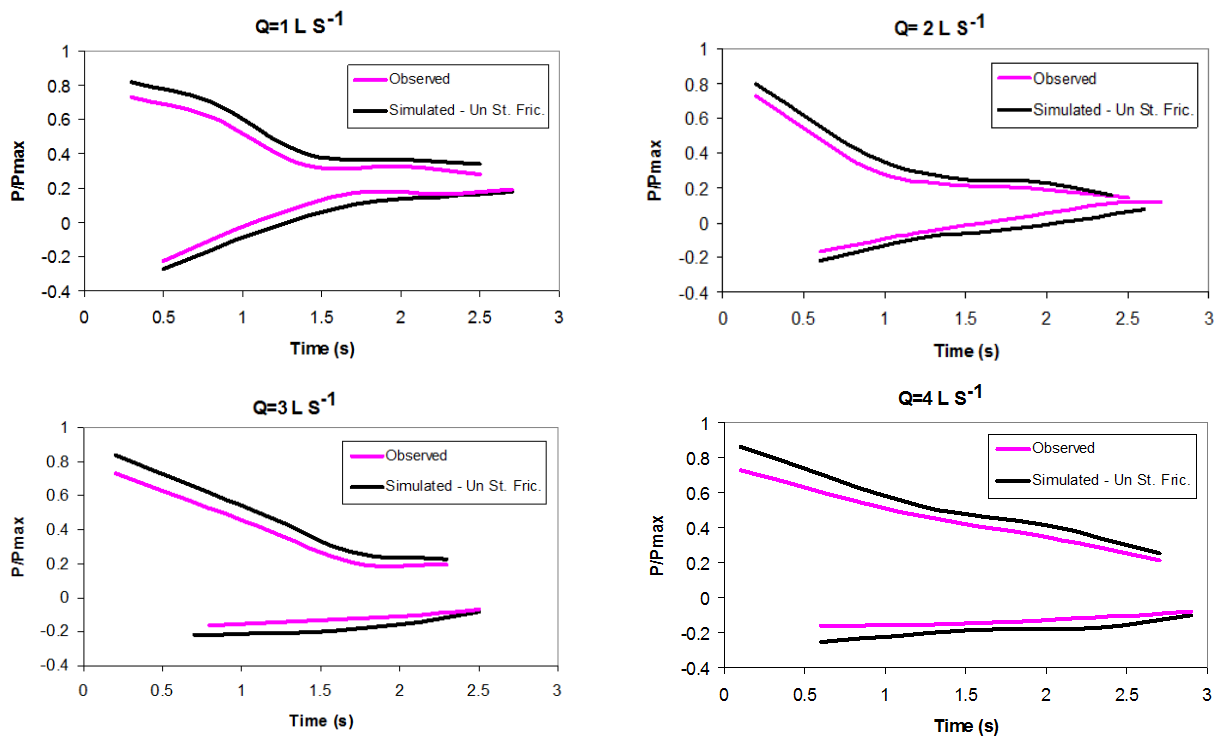
اصطکاکی شبه‌ماندگار در شبیه‌سازی امواج فشاری توانا تر است. تعدادی از نمودارهای پارامترهای آماری



شکل ۶- نمودارهای پارامترهای آماری α و R^2 بین داده‌های آزمایشگاهی و خروجی مدل اصطکاکی غیرماندگار برای طول‌های ۳۲ و ۴۷ متر.

این به آن معنی است که امواج فشاری ثبت شده در مدل فیزیکی سریع‌تر از امواج فشاری شبیه‌سازی شده با مدل اصطکاکی غیرماندگار، و امواج فشاری شبیه‌سازی شده با مدل اصطکاکی غیرماندگار سریع‌تر از امواج فشاری شبیه‌سازی شده با مدل اصطکاکی شبه‌ماندگار انرژی خود را از دست داده و مستهلک می‌شوند. روند میرایی یا مستهلک شدن امواج فشاری شبیه‌سازی شده با مدل اصطکاکی غیرماندگار و مشاهده شده در آزمایشگاه به‌عنوان نمونه برای طول ۴۷ متر در شکل ۷ نشان داده شده است.

همان‌طور که قبلاً گفته شد و در شکل ۷ برای طول لوله ۴۷ متر مشخص است، روند میرایی امواج فشاری در مدل فیزیکی تندتر از مدل عددی در حالت اصطکاک شبه‌ماندگار و غیرماندگار می‌باشد. همچنین این روند برای امواج فشاری شبیه‌سازی شده با مدل اصطکاکی غیرماندگار سریع‌تر از مدل اصطکاکی شبه‌ماندگار است. به عبارتی امواج فشاری ثبت شده در مدل فیزیکی، شبیه‌سازی شده با مدل اصطکاکی غیرماندگار و شبیه‌سازی شده با مدل اصطکاکی شبه‌ماندگار به‌ترتیب روند میرایی سریع‌تری دارند و



شکل ۷- روند استهلاک امواج فشاری شبیه‌سازی شده با مدل اصطکاکی غیرماندگار و مشاهده شده در آزمایشگاه برای لوله با طول ۴۷ متر.

غیرماندگار سریع، تغییرات سرعت بسیار شدید است لذا مطابق رابطه ۶ عبارت $\partial V / \partial t$ در ترم غیرماندگار اصطکاک غیرماندگار نیز مقدار بزرگتری را به خود اختصاص می‌دهد. همین مسئله باعث می‌شود در ابتدای تولید جریان غیرماندگار سریع به‌دلیل به‌وجود آمدن تغییرات شدید سرعت مقدار اصطکاک غیرماندگار و در نتیجه افت غیرماندگار نیز افزایش یابد. نتیجه این امر

نکته قابل تأمل در نمودارهای شکل ۷ آن است که روند میرایی و استهلاک امواج در ابتدا و پس از بسته شدن آنی شیر و به‌وجود آمدن امواج فشاری بسیار سریع است و پس از گذشت مدتی شیب استهلاک کند می‌شود (از حدود ۱/۵ ثانیه به بعد برای طول ۴۷ متر). این مسئله را می‌توان با در نظر گرفتن رابطه ۶ توجیه نمود. از آنجایی که در ابتدای ایجاد جریان

در این تحقیق به کمک برنامه عددی کد نویسی شده توسط MATLAB چگونگی تأثیر مدل‌های اصطکاکی شبه‌ماندگار و غیرماندگار بر روی امواج فشاری جریان‌های غیرماندگار سریع بررسی و به منظور سنجش توانایی نرم‌افزار و مدل‌های اصطکاکی مذکور، امواج فشاری شبیه‌سازی شده با داده‌های آزمایشگاهی مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج نشان داد امواج فشاری شبیه‌سازی شده با مدل اصطکاکی غیرماندگار همبستگی بیشتری را با امواج آزمایشگاهی نشان می‌دهند که مقادیر R^2 مؤید این موضوع می‌باشند. شاخص‌های آماری ME و RMSE در تمامی موارد با مقادیر بسیار کمی که نشان می‌دهند حاکی از عملکرد بسیار خوب دو مدل و مخصوصاً مدل اصطکاکی غیرماندگار در شبیه‌سازی امواج فشاری در این حالت می‌باشند. همچنین مشخص شد امواج فشاری ثبت شده در مدل فیزیکی، شبیه‌سازی شده با مدل اصطکاکی غیرماندگار و شبیه‌سازی شده با مدل اصطکاکی شبه‌ماندگار به ترتیب روند میرایی سریع‌تری دارند.

تقدیر و تشکر

بدین‌وسیله مؤلفین مراتب تقدیر و تشکر خود را از دانشگاه شهید چمران اهواز به دلیل حمایت‌های بی‌دریغ خود از انجام آزمایش‌های تحقیق حاضر در آزمایشگاه هیدرولیک دانشکده مهندسی علوم آب آن دانشگاه، اعلام می‌دارند.

شیب تند میرایی و استهلاك موج فشاری در ابتدای تشکیل آن خواهد بود.

همان‌طور که در شکل ۷ دیده می‌شود روند تغییر شیب برای استهلاك قسمت فشار منفی مانند قسمت فشار مثبت موج فشاری نیست. دلیل این موضوع وجود محدودیت فشار حدود ۱۰- متر آب برای فشار بخار آب است که به‌عنوان کمینه فشار در آزمایشگاه و شبیه‌سازی در نظر گرفته شده است. چرا که کمتر از این فشار آب به بخار تبدیل شده و کاویتاسیون رخ می‌دهد که در آزمایش‌ها انجام شده در آزمایشگاه چنین موردی رخ نداد و لذا در شبیه‌سازی عددی انجام گرفته نیز این مورد لحاظ گردید. بنابراین کمینه فشار منفی تولید شده در آزمایشگاه و شبیه‌سازی عددی برابر فشار بخار آب و حدود ۱۰- متر آب است. این موضوع باعث می‌شود روند استهلاك موج فشاری برای فشار منفی روندی یکنواخت و ملایم داشته باشد.

نتیجه‌گیری کلی

از عوامل مهمی که بر امواج فشاری به وجود آمده در جریان متغیر سریع تأثیر مستقیم دارد مسئله اصطکاک است. استفاده از روابط تنش برشی جداره در حالت ماندگار برای جریان غیرماندگار بسیار کند، قابل قبول می‌باشد اما در تحلیل جریان‌های غیرماندگار سریع این معادلات نامعتبر هستند چرا که افت ناشی از اصطکاک را کمتر از مقدار واقعی پیش‌بینی می‌کند. لذا

منابع مورد استفاده

- تائبی ح، ۱۳۹۱. بررسی هیدرولیکی جریان‌های میرا در خطوط لوله موازی با استفاده از مدل فیزیکی و عددی. رساله دکتری تخصصی، دانشکده مهندسی علوم آب دانشگاه شهید چمران اهواز.
- حقیقی پور ص، ۱۳۹۱. بررسی هیدرولیکی جریان‌های میرا در خطوط لوله سری با استفاده از مدل فیزیکی و عددی. رساله دکتری تخصصی، دانشکده مهندسی علوم آب دانشگاه شهید چمران اهواز.
- خیاط زاده ع و سامانی ح، ۱۳۷۶. مدل ریاضی هیدرولیکی تحلیل جریان در شبکه لوله‌ها در حالت ماندگار. پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد، دانشکده مهندسی دانشگاه شهید چمران اهواز.

- Allievi L, 1913. The Theory of Water hammer. (Discussed by Bergant et al., 2006. Water hammer with column separation: A historical review. *Journal of Fluids and Structures* 22: 135-171.)
- Brunone B and Golia UM, 1991. Some considerations on velocity profiles in unsteady pipe flows. *Proc. Int. Conf. on Entropy and Energy Dissipation in Water Resources*, Maratea, Italy 481-487.
- Brunone B, Golia UM and Greco M, 1991. Some Remarks on the Momentum Equation for Fast Transients, *Proc. Int. Conf. on Hydr. Transients with Water Column Separation*, IAHR, Valencia, Spain, 201-209.
- Collins RP, Boxall JB, Karney BW and Brunone B, 2012. How severe can transients be after a sudden depressurization. *Journal of American Water Works Association* 104(4): 67-75.
- Daily JW, Hankey WL, Olive RW and Jordaan, JM, 1956. Resistance coefficients for accelerated and decelerated flows through smooth tubes and orifices. *American Society of Mechanical Engineers* 78(5): 1071-1077.
- Fathi-Moghadam M, Haghhighipour S and Mohammad Vali Samani H, 2013. Design-variable optimization of hydropower tunnels and surge tanks using a genetic algorithm. *Journal of Water Resources Planning and Management* 139(2): 200-208.
- Ghidaoui MS, Zhao M, McInnis DA and Axworthy DH, 2005. A review of water hammer theory and practice. *Journal of Applied Mechanics Reviews* 58(1): 49-76.
- Joukowski NE, 1898. Memoirs of the imperial academy society of St. Petersburg. *Proceedings of the American Water Works Association* 24: 341-424.
- Meniconi S, Brunone B, and Ferrante M, 2012. Water-hammer pressure waves interaction at cross-section changes in series in viscoelastic pipes. *Journal of Fluids and Structures* 33: 44-58.
- Parker KH and Jones CJH, 1990. Forward and backward running waves in the arteries: analysis using the method of characteristics. *Journal of Biomechanical Engineering* 112: 322-326.
- Pothof I, 2008. A turbulent approach to unsteady friction. *Journal of Hydraulic Research* 46(5): 679-690.
- Streeter V L and Wylie EB, 1985. *Fluid Mechanics*. 8th Edition, McGraw Hill, New York.
- Streeter VL and Wylie EB, 1967. *Hydraulic Transients*. McGraw- Hill Book Co., New York.