

Research Article

Assessment of Unsteady Friction Coefficients in Pressure Transient Wave Simulation During Water Leakage from Pipeline Using Inverse Analysis

K Mohammadi^{1*}, M Fathi-Moghadam²

Received: April 28, 2022

Accepted: September 21, 2022

Received in Revised: September 5, 2022

Published online: September 23, 2023

1- Assist. Prof., Dept. of Water Engineering, Razi University, Kermanshah, Iran.

2- Prof., Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University, Ahvaz, Iran.

*Corresponding Author, E-mail: k_mohammadi@razi.ac.ir

Abstract

Background and Objectives

The analysis of transient flows in closed ducts has always been one of the most important and favorite topics of hydraulic engineers. Haghighi and Ramos (2012) performed leak detection in pipelines using inverse transient analysis and CFO optimization method. Akbari et al. (2021) investigated the detection of leaks in polyethylene transmission pipelines using pressure wave reflection of transient flow. Therefore, a laboratory model was conducted and a computer model was coded by Visual Basic programming language, with the ability to simulate transient flow in pipelines in presence of leakage. Then the parameters of temporal and spatial acceleration coefficients k_{ut} and k_{ux} and discharge coefficient of leak orifice c_d were calculated.

Methodology

In this research, a 47m long pipe that made of polyethylene with 10bar nominal pressure and diameter of 63mm was used in experiments (Tab. 1). The transient flow was generated in it by very fast closure of the end valve. The coded model analyzes the basic unsteady flow equations in pressurized ducts, and the inverse analyzer is an optimization algorithm using a defined goal function to find the best fit of the recorded pressure waves and those simulated with the least error.

Table 1- Range of variables during experiments

Parameters	Diameter (mm)	Pipe length (m)	Discharge ($L s^{-1}$)	Time to valve closure (s)	Leak diameter (mm)	Distance of leak from reservoir (m)
Range	63	47	2.5 – 3 – 3.5 – 4 – 4.5	Very Fast	4 – 6 – 8 – 10	27 – 33 – 39 – 45

The Torricelli orifice equation was used to simulate the leak:

$$Q_L = A_e \sqrt{2g(H_L - Z_L)} \quad (1)$$

After describing this equation in the pipeline for method of characteristic in x-t plane, below equations was obtained to calculate unknown parameters in order to simulate the leak:

$$Q_{L_i}^n = A_e \sqrt{2g(H_{L_i}^n - Z_L)} \quad (2)$$

$$H_{i+1}^n = H_{i+1}^n - \frac{(Q_{L_i}^n/A)^2}{2g} \quad (3)$$

Findings

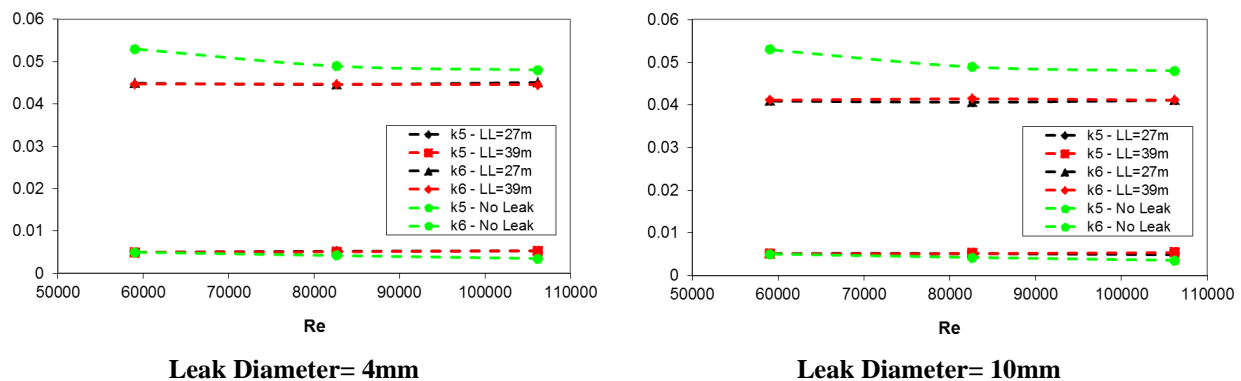
Table 2 shows the values of k_{ut} and k_{ux} coefficients related to the wave simulations, in which the waves from computer simulations in comparison to the recorded laboratory data have the lowest total squares of error. The values of k_{ut} for leakage and non-leakage state were approximately the same, and the coefficient of k_{ux} for leak state would be less than non-leakage state. The values of k_{ux} coefficients for leakage with a diameter of 4 mm were greater than those for leakage with a diameter of 10 mm, and both of these values were less than non-leaking. The reason is that as the diameter of the leak increases, the damping rate of the pressure waves increased and therefore the value of the k_{ux} coefficient decreased.



Table 2- Comparison of k_{ut} and k_{ux} coefficients for simulated transient flows with leak and no leak using two coefficient unsteady friction model

Discharge ($L s^{-1}$)		2.5	3.5	4.5	
Reynolds number		59003	82605	106206	
Leak location: 27m	Leak diameter: 4mm	k_{ut}	0.0050	0.0052	0.0053
		k_{ux}	0.0449	0.0446	0.0451
	Leak diameter: 10mm	k_{ut}	0.0051	0.0051	0.0049
		k_{ux}	0.0410	0.0407	0.0412
Leak location: 39m	Leak diameter: 4mm	k_{ut}	0.0050	0.0051	0.0053
		k_{ux}	0.0447	0.0446	0.0445
	Leak diameter: 10mm	k_{ut}	0.0051	0.0052	0.0054
		k_{ux}	0.0412	0.0415	0.0412
No leak	k_{ut}	0.0050	0.0042	0.0035	
	k_{ux}	0.0530	0.0498	0.0480	

The change in the leak location had almost no effect on the values of k_{ut} and k_{ux} . The coefficient of k_{ux} in the presence of leak, either at a distance of 27 m or at a distance of 39 m, were less than its values in non-leak state, and both values were also approximately equal to each other (Fig.1). The performance of the two-coefficient unsteady friction model was evaluated by statistical indexes. Also, the numerically simulated waves and the laboratory samples was compared to each other. The two-coefficient unsteady friction model had a good ability to simulate a transient pressure wave in presence of a leak.

**Fig.1- Comparison of k_{ut} and k_{ux} in two-coefficient unsteady friction model with leak location changes in presence of leak**

Conclusion

- The values of k_{ut} for leak and no-leak state were almost constant and the values of k_{ux} for leak state was less than the k_{ux} for the no-leak state.
- Changes in leak location had almost no effect on the values of k_{ut} and k_{ux} .
- Selecting a steady or unsteady type of friction model to simulate the transient flow in the presence of leakage had almost no effect on the orifice discharge coefficient.
- Two coefficient unsteady friction model had a good ability to simulate the pressure wave of transient flow in the presence of leakage

Keywords: Coefficients of unsteady friction model, Discharge coefficient of orifice, Inverse analysis, Leakage, Transient flow.

مقاله پژوهشی

ارزیابی ضرایب اصطکاک غیرماندگار در شبیه‌سازی امواج فشاری جریان گذرا هنگام نشت آب از خط لوله با روش تحلیل معکوس

کامران محمدی^{۱*}، منوچهر فتحی مقدم^۲

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۲/۰۸

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۶/۳۰

تاریخ دریافت و ویرایش: ۱۴۰۱/۰۶/۱۴

تاریخ انتشار آنلاین: ۱۴۰۲/۷/۱

۱- استادیار، گروه مهندسی آب، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران

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

* مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: k_mohammadi@razi.ac.ir

چکیده

مطالعه جریان‌های غیرماندگار در خطوط لوله دارای نشت از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در این تحقیق جریان گذرا در حضور نشت در خط لوله‌ای از جنس پلی‌اتیلن به قطر ۶۳ میلیمتر و طول ۴۷ متر در آزمایشگاه بررسی و توسط مدل حل عددی شده مورد تحلیل و شبیه‌سازی قرار گرفت. به هنگام شبیه‌سازی، پارامترهای مجهول ضرایب شتاب‌های زمانی k_{ut} و مکانی k_{ux} و همچنین ضریب تخلیه روزنه نشت C_d تا عدد رینولدز حدود ۱۰۶۰۰۰ محاسبه شد. نتایج حاکی از آن بود که مقادیر k_{ut} برای حالت وجود نشت و حالت بدون نشت تقریباً ثابت و یکسان می‌باشند و همچنین ضریب k_{ux} برای حالت وجود نشت کمتر از مقادیر k_{ux} برای حالت بدون نشت است. تغییر در محل نشت تأثیر چندانی بر روی مقادیر k_{ux} و k_{ut} ندارد. انتخاب نوع مدل اصطکاکی ماندگار و یا غیرماندگار برای شبیه‌سازی جریان گذرا، اثر چندانی بر ضریب تخلیه روزنه نشت نداشت. همچنین مقادیر حداقل و حداکثر ۰/۹۷ و ۴/۵۹ پارامتر مجموع مربعات خطای موج فشاری و جریان گذرای شبیه‌سازی شده توسط مدل اصطکاکی غیرماندگار دو ضریبی در حضور نشت، نمایان‌گر توانایی مناسب مدل اصطکاکی مذکور می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: تحلیل معکوس، جریان گذرا، ضرایب مدل اصطکاکی غیرماندگار، ضریب تخلیه روزنه، نشت

مقدمه

با فرسوده شدن تاسیسات آبرسانی به دلایل مختلف به هنگام بهره‌برداری، نشست آب در هر کجای سامانه نظیر آبگیرها، خطوط انتقال، تصفیه‌خانه، مخازن ذخیره و شبکه‌های توزیع و حتی خطوط لوله شبکه‌های آبیاری و زهکشی ممکن است رخ دهد. در این میان، خطوط لوله انتقال از اهمیت فراوان‌تری برخوردار می‌باشد، چرا که هرگونه مشکل در بهره‌برداری و عملکرد آن موجب ایجاد اختلال کلی در روند انتقال آب می‌گردد. وجود نشست در خطوط انتقال آب می‌تواند تاثیر عمده‌ای بر رفتار هیدرولیکی جریان‌های میرای سریع به وجود آمده در خطوط انتقال داشته باشد. لذا مدل‌سازی و شبیه‌سازی خصوصیات هیدرولیکی امواج فشاری گذرای به وجود آمده در خطوط انتقال در اثر وجود نشست دارای اهمیت فراوانی می‌باشد. این موضوع از منظر اینکه وقوع جریان‌های غیرماندگار سریع بر مقدار دبی خروجی از روزنه نشست تاثیرگذار بوده و همچنین به واسطه ماهیت فشارهای منفی به وجود آمده در سیستم و مکش حاصله، امکان ورود آلودگی به خطوط انتقال فراهم می‌گردد نیز حائز اهمیت خواهد بود.

برونون و گولیا (۱۹۹۱) و همچنین برونون و همکاران (۱۹۹۱) مدل‌های اصطکاکی غیرماندگار شتاب لحظه‌ای را اصلاح کردند. مدل مشهور برونون و همکاران (۱۹۹۱) پرکاربردترین مدل تصحیح شده در مسائل ضربه‌قوچی است که دلیل آن سهولت و توانایی مدل در ایجاد شبیه‌سازی‌های موفق با نتایج امواج فشاری اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه می‌باشد. لای (۱۹۹۱) یکی از نخستین تحقیقات بین‌المللی را بر روی موضوع نشست در چندین کشور و شهر مختلف جهان انجام داد و مشخص شد که مقدار نشست در نقاط گوناگون جهان بسیار متفاوت است. فانک و همکاران (۱۹۹۹) میزان خطر ورود مواد آلاینده به خط لوله انتقال که به وسیله ارزیابی حجم قابل دسترس آب زیرزمینی که از طریق مدت زمان جریان میرا و آنالیز حساسیت

آن به دست می‌آید، را تشخیص دادند. جانسون (۲۰۰۱) با انجام تحقیق بر روی خط لوله‌ای به طول ۳۵۰۰ متر، اثر نشست بر روی جریان غیرماندگار را به منظور تعیین موقعیت نشست بررسی کرد و با مد نظر قرار دادن چگونگی تاثیر نشست بر روی موج فشاری، محل نشست را با دقتی مناسبی معین کرد. کواس و همکاران (۲۰۰۳) طی مطالعاتی آزمایشگاهی، کاربرد روش آنالیز معکوس جریان میرا در مشخص کردن نشست‌ها، ترکیدگی‌ها، تغییرات قطر و شاخه‌های لوله را مورد بررسی قرار دادند. دانش‌فراز و همکاران (۲۰۱۱) طی پژوهشی تأثیر ترم‌های غیر خطی بر فرآیند محاسبه ضربه‌قوچ با توجه به ضریب اصطکاک برای لوله‌های چدنی مختلف را بررسی نمودند. نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهد برای لوله‌های آهنی با ضریب اصطکاک متفاوت (صاف،

چندساله و فرسوده) با کاهش ضریب سز، میرایی موج افزایش یافته و اثر ترم‌های غیرخطی کاهش می‌یابد. کالینز و همکاران (۲۰۱۲) تاثیر باز کردن و یا بستن شیر به صورت ناگهانی، بر چگونگی شدت و تشکیل جریان‌های غیرماندگار شدید را مورد بررسی قرار دادند. در این تحقیق مشخص شد که برداشتن فشار به طور ناگهانی از یک سیستم می‌تواند باعث به وجود آمدن فشارهای سنگینی در خط لوله شود که موجب خساراتی در آن خواهد شد. حقیقی و راموس (۲۰۱۲) با استفاده از روش آنالیز معکوس جریان میرا و به کمک روش بهینه‌سازی CFO به انجام نشستیابی در خطوط لوله پرداختند. فتحی‌مقدم و همکاران (۲۰۱۳) دقت روش تفاضل‌های محدود صریح را به جهت بررسی هیدرولیکی جریان‌های میرا در سامانه انتقال آب نیروگاه‌های برقابی بررسی کردند که نتایج نشان از دقت بالای روش انتخابی بود.

محمدی و فتحی‌مقدم (۲۰۱۷) جریان غیرماندگار سریع در خطوط لوله را توسط مدل اصطکاکی غیرماندگار تحلیل نمودند. آزمایشات و تحلیل عددی صورت پذیرفته نشان داد امواج فشاری آزمایشگاهی،

و شبیه سازی شده توسط مدل کامپیوتری مقایسه و خصوصیات آنها مورد تحلیل قرار گرفت.

مواد و روش ها

آزمایشات این تحقیق در آزمایشگاه مدل های هیدرولیکی دانشکده مهندسی آب و محیط زیست دانشگاه شهید چمران اهواز انجام پذیرفت. مدل ساخته شده، از یک مخزن، لوله انعطاف پذیر پلی اتیلن و شیر قطع و وصل به منظور تولید جریان غیرماندگار تشکیل شده است. مخزن آب دارای ارتفاع استاتیکی ۵ متر نسبت مدل بوده و در ابتدای خط قرار دارد. همچنین در انتهای خط، شیر قطع و وصلی تعبیه شده است. لوله به طول ۴۷ متر و از جنس پلی اتیلن با فشار کاری ۱۰ اتمسفر بوده و با قطر ۶۳ میلیمتر در آزمایشات به کار رفته است. جدول ۱ محدوده متغیرهای به کار رفته در ۸۰ آزمایش را نشان می دهد. همچنین لوله در طول مسیر بر روی تکیه گاهی فلزی قرار گرفته و مهار گردیده است.

برای اندازه گیری دبی سیستم، از دستگاه دبی سنج اولتراسونیک UF6000 P870 استفاده شده است. همچنین به منظور اندازه گیری فشار دینامیکی نیز مبدل فشار (Pressure Transducer) مورد استفاده قرار گرفته است (شکل ۱). مبدل فشاری در نزدیک ترین محل قبل از شیر قرار داده شده تا بتواند حداکثر فشار به وجود آمده که در آن محل رخ می دهد را به ثبت رساند. به علاوه اعداد رینولدز به کار رفته در آزمایشات این تحقیق در دمای ۲۰ درجه سانتیگراد برای دبی های ۲/۵، ۳، ۳/۵، ۴ و ۴/۵ لیتر بر ثانیه به ترتیب برابر ۵۹۰۰۳، ۷۰۸۰۴، ۸۲۶۰۵، ۹۴۴۰۵ و ۱۰۶۲۰۶ بوده اند. این در حالی است که آزمایشات قبلی تا عدد رینولدز حدود ۶۰۰۰۰ انجام پذیرفته بود (راموس و همکاران، ۲۰۰۴).

معادلات اساسی حاکم بر جریان های غیرماندگار در مجاری تحت فشار عبارتند از معادلات پیوستگی و مومنوم که در محیط برنامه نویسی ویزوال بیسیک

شبیه سازی شده با مدل اصطکاک غیرماندگار و مدل اصطکاک شبه ماندگار روند میرایی سریع تری داشتند. دانش فراز و همکاران (۲۰۱۷) بررسی عددی تأثیر انقباض ناگهانی بر رفتار جریان در یک خم ۹۰ درجه را ارزیابی نمودند. نتایج نشان داد رفتار سیال به انقباض متصل است و همچنین تحت تأثیر عدد رینولدز است. فتحی مقدم و کیانی (۲۰۱۹) به بررسی شبیه سازی جریان میرا در شبکه های لوله با خاصیت ویسکوالاستیک پرداختند. نتایج آزمایشگاهی و عددی این تحقیق مطالعات گذشته را توسعه داد. رحمانشاهی و همکاران (۲۰۱۹) به کمک مدل عددی، پدیده های دینامیکی افت غیرماندگار و اثرات ویسکوالاستیک در خطوط لوله تحت جریان گذرا را مدل سازی نمودند. در این تحقیق مشخص شد اثرات ویسکوالاستیک نقش بسیار مهمتری نسبت به افت غیرماندگار در شکل گیری سیگنال های ضربه قوچ بازی می کنند، تاجایی که در نظر گرفتن آن به تنهایی می تواند به پاسخ های قابل قبولی منجر شود. اکبری و همکاران (۲۰۲۱) تشخیص نشست در خطوط انتقال پلی اتیلن با استفاده از بازتاب موج فشاری جریان گذرا را مورد بررسی قرار دادند. این تحقیق نشان داد نتایج حاصل از مکان یابی نشان می دهد که استفاده از روابط تئوری درصد خطای نسبی بیشتری نسبت به استفاده از سرعت متوسط موج فشاری به دست آمده از آزمایش دارد.

بنابراین در این تحقیق ابتدا با استفاده از مدل سازی آزمایشگاهی، جریان غیرماندگار سریع در خطوط لوله ای که دارای نشست می باشد مورد بررسی قرار گرفت و پس از آن به کمک زبان برنامه نویسی ویزوال بیسیک حل عددی کامپیوتری ارائه شد که توانایی شبیه سازی جریان گذرا در خطوط لوله در حضور نشست را دارا می باشد. در ادامه پارامترهای مجهول ضرایب شتاب های زمانی و مکانی K_{ux} و K_{ut} و ضریب تخلیه روزنه نشست C_d تا عدد رینولدز در حدود ۱۰۶۰۰۰ محاسبه شد. همچنین امواج فشاری مشاهداتی

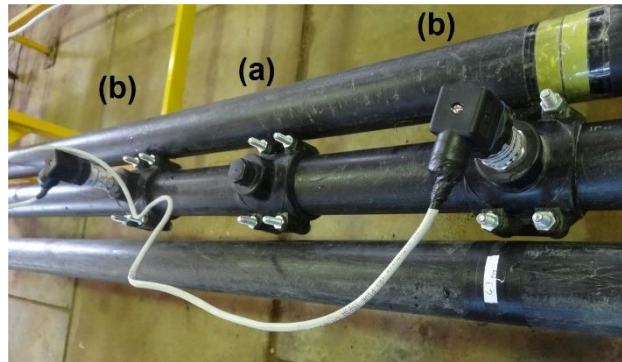
(VB) کدنویسی شده و در ادامه به اختصار به آنها اشاره خواهیم کرد.

معادله مومنتوم (اندازه حرکت):

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial t} + V \frac{\partial V}{\partial x} + g \sin \theta + \frac{fV|V|}{2D} = 0 \quad [۱]$$

معادله پیوستگی:

$$\frac{\partial P}{\partial t} + V \frac{\partial P}{\partial x} + \rho c^2 \frac{\partial V}{\partial x} = 0 \quad [۲]$$



شکل ۱ - نمایی از (a) نشت ایجاد شده در خط لوله و (b) سنسور مبدل فشاری.

جدول ۱- محدوده متغیرها در طول آزمایشات.

نام متغیر	قطر اسمی لوله (mm)	طول لوله (m)	دبی ($L s^{-1}$)	زمان بستن شیر (s)	قطر نشت (mm)	فاصله نشت از مخزن (m)
محدوده	۶۳	۴۷	۲/۵ - ۳ - ۳/۵ - ۴ - ۴/۵	خیلی سریع	۴ - ۶ - ۸ - ۱۰	۲۷ - ۳۳ - ۳۹ - ۴۵

تاثیر نشت در خط لوله به شکل روزنه آن، خصوصیات جریان میرای به وجود آمده، محل نشت و ... بستگی دارد. در این تحقیق به منظور مدل‌سازی عددی، از معادله روزنه که توسط توریچلی ارائه شده است استفاده می‌گردد (شاملو و حقیقی ۲۰۰۹) و (مینکنی و همکاران ۲۰۱۲):

$$Q_L = A_e \sqrt{2g(H_L - Z_L)} \quad [۴]$$

در رابطه ۴، Q_L دبی نشت، $A_e = C_d A_L$ سطح موثر روزنه نشت، C_d ضریب دبی، A_L سطح ظاهری نشت، Z_L ارتفاع خط لوله در آن نقطه از سطح افق و H_L ارتفاع پیزومتریک لحظه‌ای در محل نشت می‌باشد.

اکنون به منظور تحلیل جریان گذرا در محل نشت با استفاده از روش خطوط مشخصه و کاربرد آن در شبیه‌سازی نشت در جریان گذرا لازم است شرایط مرزی مربوط به معادلات در تحلیل‌ها وارد شود. لذا شرایط مرزی وجود نشت در خط لوله در صورت

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 دارسی-وایسباخ و C سرعت موج فشاری می‌باشند. حل این معادلات در مدل عددی کامپیوتری تهیه شده با روش خطوط مشخصه انجام پذیرفته است که این روش در منابع گوناگون به طور مفصل ارائه شده است (چوداری ۲۰۱۴). موج فشاری پدیده‌ای است که موجب انتقال مومنتوم و انرژی بدون انتقال ماده خواهد شد. سرعت انتشار موج فشاری در لوله‌های تحت فشار از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$c = \sqrt{\frac{\frac{K}{\rho}}{1 + \frac{KD}{Ee}}} \quad [۳]$$

در رابطه ۳، K مدول الاستیسیته حجمی سیال، E مدول کشسانی لوله و e ضخامت لوله است. چگونگی

اصطکاک و اختلاف ارتفاع بار، معادل سرعت ناشی از خارج شدن مقداری آب از محل نشست لحاظ خواهد شد. مدل برونون و همکاران (۱۹۹۱) مشهورترین مدل اصطکاکی غیرماندگار در کاربردهای شبیه سازی جریان میرای سریع می باشد (محمدی ۲۰۲۱):

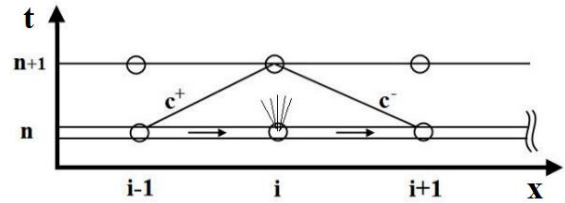
$$J = J_{qs} + \frac{K}{g} \left(\frac{\partial V}{\partial t} - a \frac{\partial V}{\partial x} \right) \quad [16]$$

در این معادله ضریب k یک ضریب وزنی است که به ترم غیرماندگار اصطکاک اثرگذار است و a سرعت انتشار موج فشاری در سیال مورد نظر می باشد. این رابطه با وجود اینکه هر دو ترم شتاب مکانی و زمانی را لحاظ نموده است اما تاثیر هر دو ترم را به صورت یکسان در نظر گرفته است. بدین معنی که ضریب k با مقداری ثابت، به هر دو پارامتر اعمال شده است. این مسئله بیان می دارد، در این رابطه، اصطکاک غیرماندگار به یک اندازه از دو پارامتر شتاب مکانی و شتاب زمانی تاثیر می پذیرد. در حالی که این مسئله صحیح نیست و $\frac{\partial V}{\partial x}$ به نوعی نمایانگر چگونگی تغییرات موج فشاری در جهت طولی لوله (محور x) و $\frac{\partial V}{\partial t}$ نمایانگر تغییرات موج فشاری نسبت به زمان (محور t) خواهد بود. واضح است که تغییرات در این دو جهت یکسان نیست و نحوه تغییرات موج فشاری در جهت طولی با چگونگی تغییرات زمانی موج فشاری تفاوت دارد. برای بر طرف نمودن این مشکل، رابطه زیر ارائه شد (لوریرو و راموس ۲۰۰۳ - راموس و همکاران ۲۰۰۴ - ویسکوفسکی و همکاران ۲۰۰۰):

$$J = J_{qs} + \frac{1}{g} \left[K_{ut} \frac{\partial V}{\partial t} + K_{ux} \text{Sign}(V) a \left| \frac{\partial V}{\partial x} \right| \right] \quad [17]$$

در این تحقیقات مشخص شد برای این ضرایب رابطه $K_{ut} < K_{ux}$ ($K_{ut} \approx 10\% K_{ux}$) برقرار بوده و برای ضرایب تاخیر محدوده $0.004 < K_{ut} < 0.0054$ و $0.033 < K_{ux} < 0.05$ محاسبه گردید. همان گونه که مشخص می باشد، هر کدام از ضرایب فوق جداگانه به ترم های شتاب مکانی و مکانی اعمال و میزان تاثیر هر یک در مقدار اصطکاک کل مشخص شده است. در واقع

وجود جریان گذرا در آن با در نظر گرفتن شکل زیر به دست خواهد آمد.



شکل ۲- نمای شماتیک وجود نشست در خط لوله برای روش حل خطوط مشخصه در صفحه مختصات $x-t$

حال با در نظر گرفتن معادله پیوستگی در محل نشست خواهیم داشت:

$$Q_{i-1}^n = Q_{Li}^n + Q_{i+1}^n \quad [5]$$

اکنون در معادله خط مشخصه مثبت در پایین دست محل نشست و معادله مشخصه منفی در بالادست محل نشست در مقاطع $(i-1, n)$ و $(i+1, n)$ معادلات زیر صادق می باشند:

$$Q_{Pi}^{n+1} = C_p - C_a H_{Pi}^{n+1} \quad [6]$$

$$Q_{Pi}^{n+1} = C_n + C_a H_{Pi}^{n+1} \quad [7]$$

که در آنها:

$$C_p = Q_{i-1}^n + C_a H_{i-1}^n - R \Delta t Q_{i-1}^n |Q_{i-1}^n| \quad [8]$$

$$C_n = Q_{i+1}^n - C_a H_{i+1}^n - R \Delta t Q_{i+1}^n |Q_{i+1}^n| \quad [9]$$

بنابراین برای شبیه سازی جریان گذرا در محل نشست خواهیم داشت:

$$H_{Pi}^{n+1} = (C_p - C_n) / 2C_a \quad [10]$$

$$Q_{Pi}^{n+1} = (C_p + C_n) / 2 \quad [11]$$

$$C_p = Q_{i-1}^n + C_a H_{i-1}^n - R \Delta t Q_{i-1}^n |Q_{i-1}^n| \quad [12]$$

$$C_n = (Q_{i-1}^n - Q_{Li}^n) - C_a H_{i+1}^n - R \Delta t (Q_{i-1}^n - Q_{Li}^n) |Q_{i-1}^n - Q_{Li}^n| \quad [13]$$

$$Q_{Li}^n = A_e \sqrt{2g(H_{Li}^n - Z_L)} \quad [14]$$

$$H_{i+1}^m = H_{i+1}^n - \frac{(Q_{Li}^n/A)^2}{2g} \quad [15]$$

لازم به ذکر است برای محاسبه H_{i+1}^m در معادله ۱۵ این گونه فرض شده است که از افت موضعی ناشی از نشست صرف نظر می شود و مقدار افت طولی ناشی از

تابع هدف را مورد ارزیابی قرار دهد. نکته مهم در مورد تحلیل‌گر جریان گذرا آن است که دقت پایین در شبیه‌سازی هیدرولیکی پدیده جریان گذرا می‌تواند باعث شکست محاسبات و روش معکوس گردد. بنابراین در تحلیل‌گر معکوس جریان گذرا از روش مرسوم خطوط مشخصه برای حل معادلات دیفرانسیلی جزئی استفاده شده است.

تحلیل‌گر معکوس به عنوان یک الگوریتم بهینه‌سازی با استفاده از تابع هدف تعریف می‌شود که در ساده‌ترین شکل ممکن می‌تواند به صورت مجموع مربعات خطا بین داده‌های مشاهداتی و محاسباتی بیان گردد:

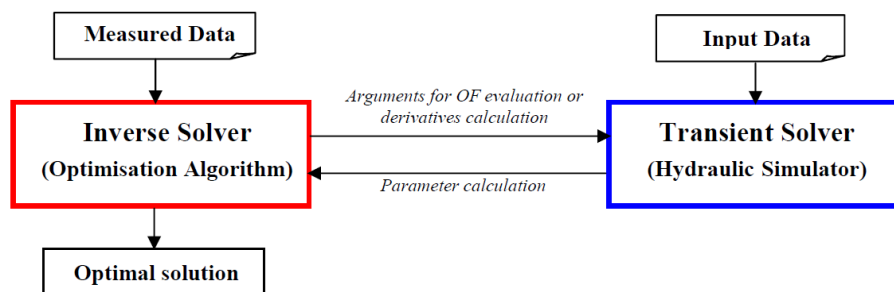
$$Of = \sum_{i=1}^k (Hc_i - Ho_i)^2 \quad [18]$$

که در آن Of تابع هدف، k تعداد بار فشاری محاسبه شده، Hc_i بار فشاری محاسبه شده و Ho_i بار فشاری مشاهده شده هستند. همچنین هر کدام از پارامترهای مجهول مانند ضریب زبری، سرعت موج فشاری، محل نشست، مساحت نشست، مقدار نشست و ... (یا تمام آنها) که تابع هدف برای آن بهینه‌سازی می‌گردد، باید قیدهای مربوط به آن پارامتر نیز تعریف شود. لذا عمل بهینه‌سازی می‌تواند برای تعیین یک یا چند پارامتر مجهول به طور هم زمان انجام گیرد.

ترم اول عبارت داخل کروشه بر جابجایی فاز^۱ موج فشاری جریان گذرا و ترم دوم بر مقدار میرایی^۲ موج فشاری تاثیر خواهد داشت (محمدی ۲۰۲۱).

تحلیل معکوس جریان گذرا^۳ به منظور تعیین پارامترهای مجهول سیستم با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری شده فشار انجام می‌شود. به منظور استفاده از این تکنیک لازم است که یک حل کننده معادلات جریان گذرا و یک موتور جستجوی معکوس با هم در ارتباط باشند (کواس و راموس ۲۰۰۱). تفاوت این روش با تحلیل مستقیم جریان گذرا این است که در تحلیل مستقیم جریان گذرا تمام پارامترهای سیستم معلوم است و با معلوم بودن آنها موج فشاری جریان گذرا محاسبه خواهد شد اما در روش تحلیل معکوس جریان گذرا پارامترهایی از سیستم مجهول است و با شبیه‌سازی موج فشاری و کمینه کردن تابع هدف، پارامترهای مجهول سیستم محاسبه می‌گردد (شکل ۳).

تحلیل‌گر معکوس یک موتور جستجو است که روند بهینه‌سازی را اجرا می‌کند تا بهترین پاسخ را برای مسئله پیدا کند. از سوی دیگر، تحلیل‌گر جریان گذرا عمل شبیه‌سازی هیدرولیکی جریان گذرا را با در نظر گرفتن شرایط مرزی معین بر عهده دارد. تحلیل‌گر جریان گذرا توسط تحلیل‌گر معکوس فراخوانی شده تا



شکل ۳- نحوه ارتباط درونی یک مدل تحلیل معکوس جریان (کواس و راموس ۲۰۰۱).

³ Inverse transient analysis- ITA

¹ Phase shift

² Damping rate

نتایج و بحث

پس از انجام آزمایش‌ها و ثبت داده‌های مربوط به امواج فشاری تولید شده در خط لوله با وجود نشت، شبیه سازی جریان گذرا در حالت وجود نشت در لوله در حالت استفاده از مدل اصطکاکی غیرماندگار دو ضریبی انجام گرفت. اشکال ۴ و ۵ نتایج شبیه‌سازی عددی جریان گذرا در حالت وجود نشت با استفاده از مدل اصطکاکی غیرماندگار دو ضریبی در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی را برای محل‌ها و اقطار مختلف نشت در دبی‌های گوناگون برای بستن آبی شیر ($T_c = 0.1s$) نشان می‌دهد. در این شکل از بستن شیر، زمان بستن آنقدر کوتاه است که حداکثر فشارهای مثبت و منفی برگشتی امواج فشاری در سامانه باقی خواهد ماند تا توسط افت‌های موجود در خطوط لوله و تاسیسات موجود مستهلک شود:

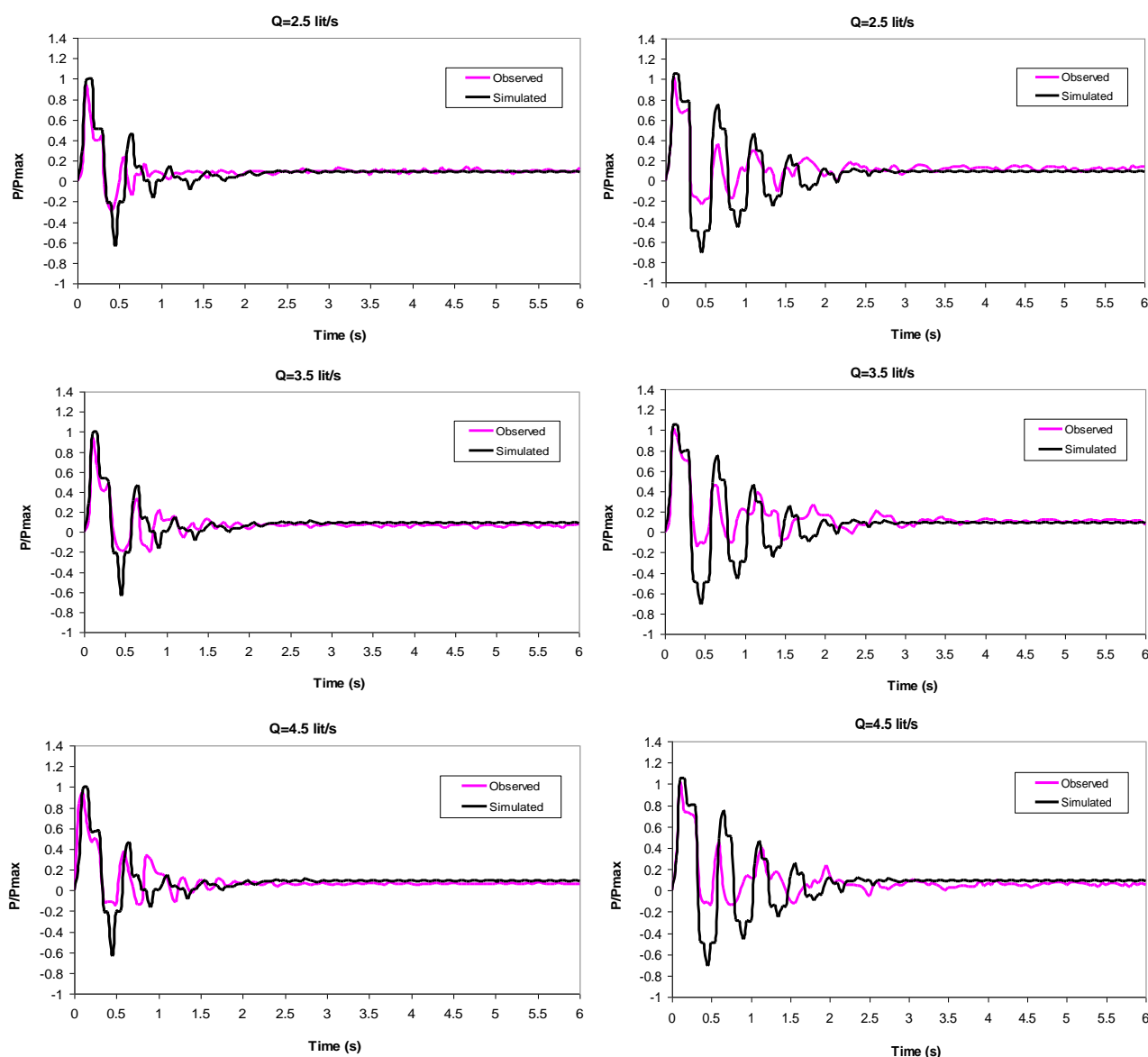
$$T_c = 0.1s < \frac{2L}{c} = \frac{2 \times 47}{300} = 0.31s \quad [19]$$

همان‌گونه که در اشکال ۴ و ۵ مشخص است مدل اصطکاکی غیرماندگار دو ضریبی مقادیر بیشینه‌های فشاری مثبت را تقریباً صحیح و نزدیک به

بیشینه فشاری برداشت شده از مدل فیزیکی شبیه‌سازی می‌نماید اما بیشینه‌های فشاری منفی را کمتر از حد معمول پیش‌بینی می‌نماید.

همچنین با در نظر گرفتن مدول الاستیسیته (یانگ) لوله پلی‌اتیلن ۰/۸ گیگا پاسکال، وزن مخصوص سیال (آب) ۹۸۰۰ نیوتن بر متر مکعب، مدول الاستیسیته حجمی (مدول بالک) سیال $2/1 \times 10^9$ نیوتن بر مترمربع (چوداری ۲۰۱۴) و استفاده از رابطه ۳، می‌توان سرعت موج فشاری در آزمایشات انجام شده را محاسبه کرد که مقدار آن معادل ۳۰۰ متر بر ثانیه است.

در این حالت از شبیه‌سازی که در اشکال ۴ و ۵ نشان داده شده است، مکان و قطر نشت مشخص بوده و بنابراین پارامترهای ضرایب شتاب‌های زمانی و مکانی k_{ux} و k_{ut} و همچنین ضریب تخلیه روزنه نشت C_d تعیین شد. جدول ۲ مقادیر ضرایب k_{ux} و k_{ut} مربوط به شبیه‌سازی‌های انجام شده مذکور را نشان داده است که در واقع امواج حاصل از شبیه‌سازی کامپیوتری با آنها کمترین مجموع مربعات خطا را در مقایسه با داده‌های آزمایشگاهی ثبت شده دارا می‌باشند.



قطر روزنه نشت برابر ۱۰ میلیمتر

قطر روزنه نشت برابر ۴ میلیمتر

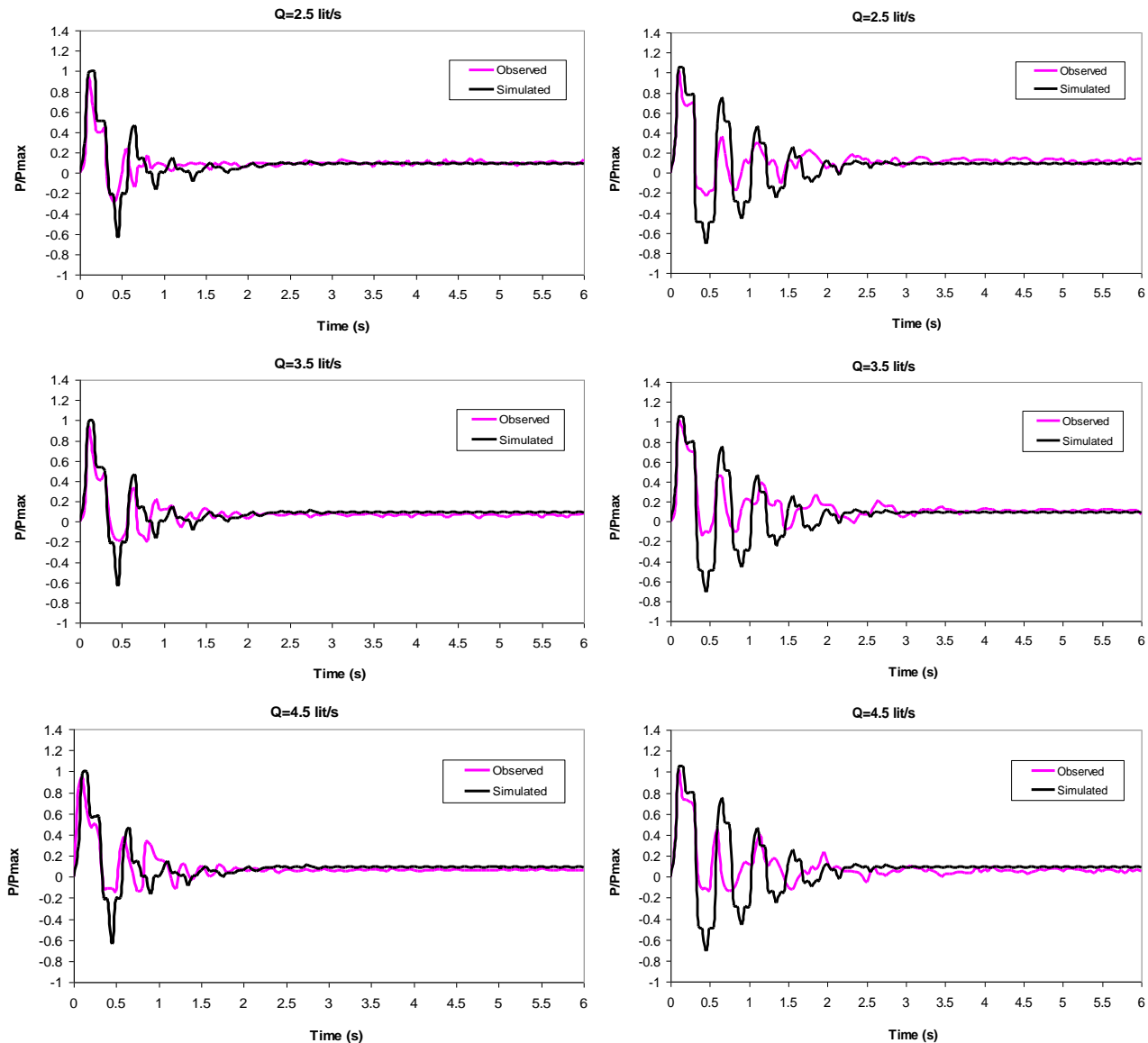
شکل ۴- نتایج شبیه‌سازی عددی جریان گذرا در حالت وجود نشت با استفاده از مدل اصطکاکی غیرماندگار دو ضریبی در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی برای محل نشت ۲۷ متر.

که در جریان گذرای با شتاب کاهنده، لایه‌ای از گرداب‌ها^۱ در نزدیکی جدار لوله شکل می‌گیرد (پوتوف ۲۰۰۸). در حالی که این مسئله برای جریان گذرای با شتاب افزایشی وجود ندارد. در شتاب افزایشی، اصطکاک غیرماندگار تنها تحت تاثیر افزایش گرادیان سرعت در نزدیکی جداره لوله می‌باشد. لذا از توانایی

آن گونه که در شکل‌های ۴ و ۵ مشاهده می‌گردد، در حداکثرهای اولیه منفی اختلاف نتایج آزمایشگاهی و شبیه‌سازی برای دبی‌های مختلف کمی بیشتر می‌شود. این مسئله به آن دلیل است که شبیه‌سازی تنش‌های برشی موجود در جداره لوله به هنگام شتاب کاهنده تا حدودی مشکل خواهد بود. چرا

¹ Vortex sheet

مدل های اصطکاکی افت غیر ماندگار در این ناحیه تا حدودی کاسته خواهد شد.



قطر روزنه نشت برابر ۱۰ میلیمتر

قطر روزنه نشت برابر ۴ میلیمتر

شکل ۵- نتایج شبیه سازی عددی جریان گذرا در حالت وجود نشت با استفاده از مدل اصطکاکی غیر ماندگار دو ضریبی در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی برای محل نشت ۳۹ متر.

k_{ux} موجود در جدول ۲ نیز نشان می دهند، ارقام بدست آمده برای مقادیر k_{ut} برای حالت وجود نشت و حالت بدون نشت تقریباً ثابت و یکسان است چرا که k_{ut} بر جابجایی فاز موج در طول محور X (زمان) موثر است و همچنین ضریب k_{ux} که بر چگونگی روند میرایی موج و

با کاهش دامنه نوسانات، روند میرایی در شکل امواج سریع تر رخ داده و این موضوع به وسیله کاهش مقدار ضریب k_{ux} امکان پذیر می گردد. به این دلیل که هر چقدر مقدار ضریب k_{ux} بیشتر باشد افت فشار کمتر خواهد بود و بالعکس. بنابراین آنچنان که مقادیر k_{ut} و

است که با زیاد شدن قطر نشت، میزان میرایی امواج فشاری افزایش می‌یابد و بنابراین با توجه به مطالب قبلی، مقدار ضریب k_{ux} کاهش می‌یابد. نمودارهای ارائه شده در شکل ۷ نشان می‌دهند تغییر در محل نشت تاثیر چندانی بر روی مقادیر k_{ux} و k_{ut} ندارد. برای ضریب k_{ux} در حالت وجود نشت چه در فاصله ۲۷ متری و چه در فاصله ۳۹ متری، هر دو مقدار کمتر از مقادیر k_{ux} در حالت بدون نشت می‌باشد و هر دو این مقادیر نیز حدوداً با یکدیگر برابر هستند.

در جهت محور y (فشار) تاثیرگذار اشته، برای حالت وجود نشت کمتر از مقادیر k_{ux} برای حالت بدون نشت خواهد بود. اشکال ۶ و ۷ مقادیر k_{ux} و k_{ut} را برای حالت‌های بدون نشت و با وجود نشت مورد مقایسه قرار می‌دهد.

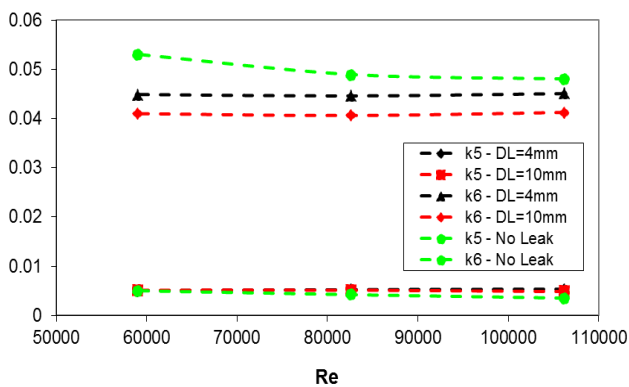
آن‌گونه که در شکل ۶ مشخص است، در حالت وجود نشت با قطرهای متفاوت، عموماً ضرایب k_{ut} برابر و با حالت بدون نشت یکسان است. اما مقدار ضرایب k_{ux} برای نشت با قطر ۴ میلیمتر بیشتر از مقادیر آن برای نشت با قطر ۱۰ میلیمتر است و همچنین هر دو این مقادیر کمتر از حالت بدون نشت می‌باشند. دلیل این مسئله آن

جدول ۲- مقایسه مقادیر ضرایب k_{ux} و k_{ut} برای جریان گذرای شبیه‌سازی شده در حالت وجود نشت و بدون نشت با مدل اصطکاکی دو ضریبی

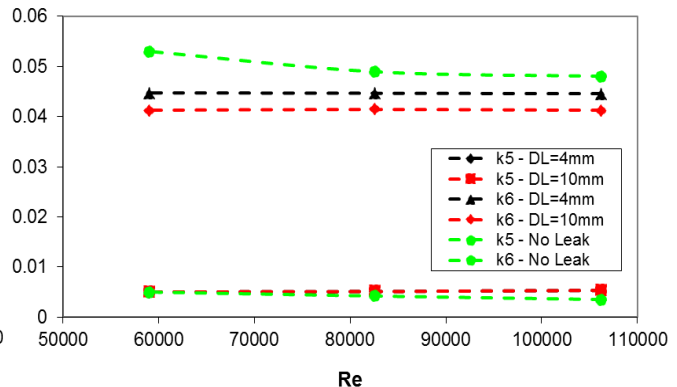
دبی ($L s^{-1}$)	۲/۵	۳/۵	۴/۵		
عدد رینولدز	۵۹۰۰۳	۸۲۶۰۵	۱۰۶۲۰۶		
محل نشت برابر ۲۷ متر	قطر نشت برابر ۴ میلیمتر	k_{ut}	۰/۰۰۵۰	۰/۰۰۵۲	۰/۰۰۵۳
		k_{ux}	۰/۰۴۴۹	۰/۰۴۴۶	۰/۰۴۵۱
	قطر نشت برابر ۶ میلیمتر	k_{ut}	۰/۰۰۵۲	۰/۰۰۵۱	۰/۰۰۵۰
		k_{ux}	۰/۰۴۳۵	۰/۰۴۳۳	۰/۰۴۳۹
	قطر نشت برابر ۸ میلیمتر	k_{ut}	۰/۰۰۵۰	۰/۰۰۵۳	۰/۰۰۴۸
		k_{ux}	۰/۰۴۲۱	۰/۰۴۱۹	۰/۰۴۲۵
قطر نشت برابر ۱۰ میلیمتر	k_{ut}	۰/۰۰۵۱	۰/۰۰۵۱	۰/۰۰۴۹	
	k_{ux}	۰/۰۴۱۰	۰/۰۴۰۷	۰/۰۴۱۲	
محل نشت برابر ۳۹ متر	قطر نشت برابر ۴ میلیمتر	k_{ut}	۰/۰۰۵۰	۰/۰۰۵۱	۰/۰۰۵۳
		k_{ux}	۰/۰۴۴۷	۰/۰۴۴۶	۰/۰۴۴۵
	قطر نشت برابر ۶ میلیمتر	k_{ut}	۰/۰۰۵۲	۰/۰۰۵۳	۰/۰۰۵۴
		k_{ux}	۰/۰۴۳۸	۰/۰۴۳۶	۰/۰۴۳۸
	قطر نشت برابر ۸ میلیمتر	k_{ut}	۰/۰۰۵۱	۰/۰۰۵۱	۰/۰۰۵۲
		k_{ux}	۰/۰۴۲۵	۰/۰۴۲۷	۰/۰۴۲۳
قطر نشت برابر ۱۰ میلیمتر	k_{ut}	۰/۰۰۵۱	۰/۰۰۵۲	۰/۰۰۵۴	
	k_{ux}	۰/۰۴۱۲	۰/۰۴۱۵	۰/۰۴۱۳	
بدون نشت	k_{ut}	۰/۰۰۵۰	۰/۰۰۴۲	۰/۰۰۳۵	
	k_{ux}	۰/۰۵۳۰	۰/۰۴۹۸	۰/۰۴۸۰	

افزایش یا کاهش عدد رینولدز تغییر نمی‌نماید. ضرایب مذکور صرفاً بر خصوصیات فاز زمانی و مکانی موج فشاری به ترتیب در جهت های طولی و ارتفاعی تاثیر می‌گذارند. به عبارتی ضرایب k_{ux} و k_{ut} پارامترهایی می‌باشند که با کالیبره شدن، به ترتیب طول فرکانس موج فشاری و روند میرایی آن را مشخص می‌نمایند.

در به کار بردن مدل‌های اصطکاک دو ضریبی در شبیه‌سازی جریان گذرا هدف کالیبره کردن ضرایب k_{ux} و k_{ut} است و اصولاً این ضرایب که باید کالیبره شوند، یک عدد خاص بوده که تابع پارامتر به خصوصی نمی‌باشند. این ضرایب همانگونه که در اشکال ۶ و ۶ نیز مشخص است تقریباً مستقل از عدد رینولدز بوده و با

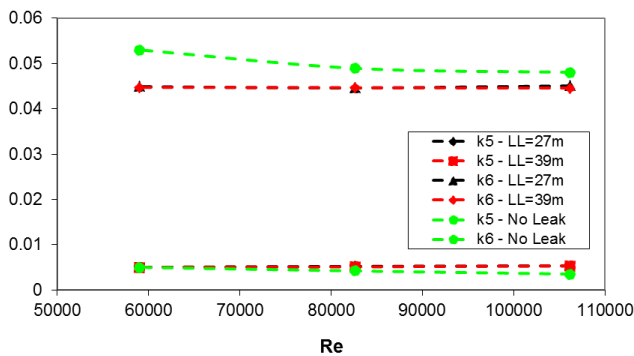


فاصله نشت از مخزن برابر ۲۷ متر

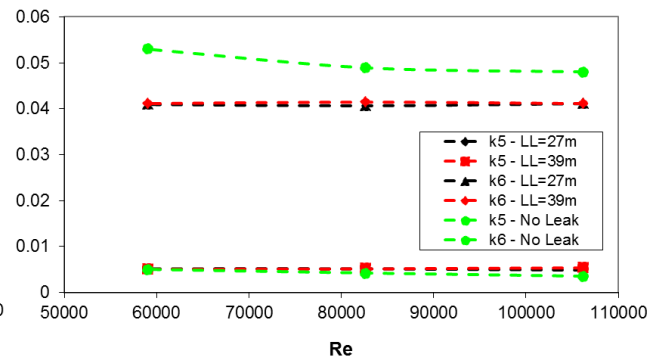


فاصله نشت از مخزن برابر ۳۹ متر

شکل ۶- مقایسه مقادیر k_{ux} و k_{ut} در مدل اصطکاکی غیر ماندگار دو ضریبی با تغییرات قطر نشت در حالت وجود نشت.



قطر روزنه نشت برابر ۴ میلیمتر



قطر روزنه نشت برابر ۱۰ میلیمتر

شکل ۷- مقایسه مقادیر k_{ux} و k_{ut} در مدل اصطکاکی غیر ماندگار دو ضریبی با تغییرات محل نشت با وجود نشت.

به دلیل مقاومت کمتر و استهلاک کمتر انرژی آنها در مقابل ازدیاد فشار به وجود آمده در سیستم بر اثر موج فشاری جریان گذرا می‌باشد. استفاده از مدل اصطکاکی متفاوت در شبیه‌سازی جریان گذرا که خصوصیات هیدرولیکی را در محل نشت تعیین می‌نماید، حداقل در مدل آزمایشگاهی به کار رفته در این تحقیق (که طول لوله زیاد نمی‌باشد) اثر چندانی بر ضریب تخلیه محاسبه

دیگر پارامتری که در این حالت توسط مدل عددی کدنویسی شده باید معین شود، ضریب تخلیه روزنه نشت است. مقادیر پارامترهای محاسبه شده برای ضرایب تخلیه روزنه‌های نشت در جدول ۳ ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود روزنه‌های نشت با قطر بیشتر (۱۰ میلیمتر) ضریب تخلیه بزرگتری نسبت به روزنه‌های با قطر کمتر (۴ میلیمتر) دارند و این مسئله

مذکور را در شبیه‌سازی موج فشاری به وسیله شاخص آماری مجموع مربعات خطا سنجیده شد. همان‌گونه که از ارقام جدول ۴ مشخص است، مدل اصطکاکی غیرماندگار دو ضریبی توانایی کاملاً مناسبی در شبیه‌سازی موج فشاری جریان گذرا در حالت وجود نشت دارد. نتایج به دست آمده از این تحقیق برای مقادیر K_{ux} و K_{ut} به خوبی نتایج تحقیقات راموس و همکاران، ۲۰۰۴ که در آنها برای این ضرایب محدوده $0.033 < K_{ux} < 0.05$ و $0.004 < K_{ut} < 0.054$ شده و همچنین چادری، ۲۰۱۴ که در آن نیز محدوده $0.025 < K_{ux} < 0.053$ و $0.006 < K_{ut} < 0.057$ گردیده است را تایید می‌نماید (جدول ۵).

شده روزنه نداشت. چرا که در این حالت، ضریب تخلیه بیشتر تابع خصوصیات فیزیکی خود روزنه و سپس شرایط هیدرولیکی جریان است و تنها در خطوط انتقال طولانی، در شرایطی که تفاوت افت محاسبه شده توسط مدل اصطکاکی شبه‌ماندگار و غیرماندگار چشم‌گیر باشد و پس از رفت و برگشت موج فشاری جریان گذرای تولید شده، تفاوت هد فشاری تولیدی در محل نشت به شکل کاملاً معنی‌داری بزرگ باشد، آن وقت احتمالاً می‌توان انتظار داشت ضریب تخلیه روزنه نشت در دو حالت مذکور با هم تفاوت محسوسی داشته باشد. همچنین در ادامه عملکرد مدل اصطکاکی غیرماندگار دو ضریبی با شاخص آماری بررسی و اشکال امواج شبیه‌سازی شده عددی محاسبه و با نمونه ثبت شده آزمایشگاهی مقایسه شد. توانایی مدل کدنویسی شده

جدول ۳- مقایسه مقادیر ضریب تخلیه روزنه برای جریان گذرای شبیه‌سازی شده با مدل اصطکاکی غیرماندگار دو ضریبی

دبی ($L s^{-1}$)		۲/۵	۳/۵	۴/۵
عدد رینولدز		۵۹۰۰۳	۸۲۶۰۵	۱۰۶۲۰۶
محل نشت برابر ۲۷ متر	قطر نشت برابر ۴ میلیمتر	۰/۴۸۶	۰/۴۴۲	۰/۳۹۳
	قطر نشت برابر ۱۰ میلیمتر	۰/۵۴۱	۰/۵۰۸	۰/۴۶۳
محل نشت برابر ۳۳ متر	قطر نشت برابر ۴ میلیمتر	۰/۵۰۲	۰/۴۵۱	۰/۴۰۴
	قطر نشت برابر ۱۰ میلیمتر	۰/۵۴۶	۰/۵۱۱	۰/۴۶۴
محل نشت برابر ۳۹ متر	قطر نشت برابر ۴ میلیمتر	۰/۵۱۲	۰/۴۶۵	۰/۴۰۶
	قطر نشت برابر ۱۰ میلیمتر	۰/۵۵۳	۰/۵۱۷	۰/۴۶۹
محل نشت برابر ۴۵ متر	قطر نشت برابر ۴ میلیمتر	۰/۵۲۷	۰/۴۷۹	۰/۴۰۶
	قطر نشت برابر ۱۰ میلیمتر	۰/۵۶۱	۰/۵۲۵	۰/۴۷۶

جدول ۴- مقادیر مجموع مربعات خطای موج فشاری و جریان گذرای شبیه‌سازی شده با مدل اصطکاکی دو ضریبی.

دبی ($L s^{-1}$)		۲/۵	۳/۵	۴/۵
عدد رینولدز		۵۹۰۰۳	۸۲۶۰۵	۱۰۶۲۰۶
محل نشت برابر ۲۷ متر	قطر نشت برابر ۴ میلیمتر	۲/۷۵	۳/۸۳	۴/۵۹
	قطر نشت برابر ۱۰ میلیمتر	۱/۲۱	۰/۹۶	۱/۷۸
SSE محل نشت برابر ۳۳ متر	قطر نشت برابر ۴ میلیمتر	۴/۱۹	۳/۱۴	۳/۷۶
	قطر نشت برابر ۱۰ میلیمتر	۳/۷۷	۲/۱۱	۲/۴۵
محل نشت برابر ۳۹ متر	قطر نشت برابر ۴ میلیمتر	۴/۳۳	۲/۸۶	۳/۵۹

	قطر نشت برابر ۱۰ میلیمتر	۱/۳۳	۱/۰۱	۰/۹۷
	قطر نشت برابر ۴ میلیمتر	۲/۶۳	۱/۸۸	۴/۳۴
محل نشت برابر ۴۵ متر	قطر نشت برابر ۱۰ میلیمتر	۳/۵۵	۳/۳۷	۲/۲۳

جدول ۵- مقایسه محدوده تغییر مقادیر ضرایب k_{ux} و k_{ut} در تحقیقات مختلف

محدوده k_{ux}	محدوده k_{ut}	عدد رینولدز	طول لوله (m)	دبی ($L s^{-1}$)
۰/۰۳۳۰ - ۰/۰۵۰۰	۰/۰۰۴۰ - ۰/۰۰۵۴	۶۰۰۰۰ - ۲۰۰۰۰	۱۰۰ - ۲۰۰	راموس و همکاران (۲۰۰۴)
۰/۰۲۵۰ - ۰/۰۵۳۰	۰/۰۰۶۰ - ۰/۰۰۷۰	کلی	کلی	چادری (۲۰۱۴)
۰/۰۴۶۰ - ۰/۰۵۴۰	۰/۰۰۳۵ - ۰/۰۰۵۹	۱۰۶۰۰۰ - ۲۳۰۰۰	۴۷	تحقیق حاضر

نتیجه گیری کلی

تحلیل جریان های گذرا در مجاری بسته همواره یکی از مباحث بسیار مهم و مورد علاقه مهندسان علم هیدرولیک بوده است، چرا که اصولاً جریان های پایدار در سیستم های انتقال آب بسیار کم مشاهده شده و عموماً ماهیت جریان از نوع غیرماندگار و گذرا است. از طرفی با فرسوده شدن تاسیسات آبرسانی به هنگام بهره برداری، نشت آب در هر کجای سامانه خطوط لوله انتقال ممکن است رخ دهد و از اهمیت فراوانی برخوردار می باشد، چرا که هرگونه مشکل در بهره برداری و عملکرد آن موجب ایجاد اختلال کلی در روند انتقال آب می گردد. بنابراین در این تحقیق ابتدا با استفاده از مدل سازی آزمایشگاهی، جریان غیرماندگار سریع در خطوط لوله ای که دارای نشت می باشد مورد بررسی قرار گرفت و پس از آن به کمک زبان برنامه نویسی ویژوال بیسیک مدلی کامپیوتری کدنویسی شد که توانایی شبیه سازی جریان گذرا در خطوط لوله در حضور نشت را دارا می باشد. در ادامه پارامترهای ضرایب شتاب های زمانی و مکانی k_{ux} و k_{ut} و ضریب تخلیه روزنه نشت Cd برای عدد رینولدز بیش از ۶۰۰۰۰ و تا محدوده ۱۰۶۰۰۰ محاسبه شد. همچنین امواج فشاری مشاهداتی در آزمایشگاه و شبیه سازی شده توسط مدل کامپیوتری مقایسه و خصوصیات آنها مورد تحلیل قرار گرفت. نتایج نشان داد با به وجود آمدن

نشت در سیستم خط لوله، دامنه نوسان فشاری امواج تغییر نموده با گذشت زمان کاهش می یابد. با کاهش دامنه نوسانات، روند میرایی در شکل امواج سریع تر رخ داده و این موضوع با کاهش مقدار ضریب k_{ux} میسر می گردد. ضریب k_{ux} برای حالت وجود نشت کمتر از مقادیر k_{ux} برای حالت بدون نشت است. عموماً ضرایب k_{ut} یکسان و با حالت بدون نشت برابر است. اما مقدار ضرایب k_{ux} برای نشت با قطر ۴ میلیمتر بیشتر از مقادیر آن برای نشت با قطر ۱۰ میلیمتر است و همچنین هر دو این مقادیر کمتر از حالت بدون نشت می باشند. همچنین تغییر در محل نشت تاثیر چندانی بر روی مقادیر k_{ux} و k_{ut} ندارد. روزنه های نشت با قطر بیشتر (۱۰ میلیمتر) ضریب تخلیه بزرگتری نسبت به روزنه های با قطر کمتر (۴ میلیمتر) دارند. انتخاب نوع مدل اصطکاکی متفاوت در مدلسازی جریان گذرا حداقل در مدل آزمایشگاهی به کار رفته در این تحقیق (که طول لوله زیاد نمی باشد) اثر چندانی بر ضریب تخلیه محاسبه شده روزنه ندارد. چرا که در این حالت، ضریب تخلیه بیشتر تابع خصوصیات فیزیکی خود روزنه و سپس شرایط هیدرولیکی جریان است و تنها در خطوط انتقال طولانی، می توان انتظار داشت ضریب تخلیه روزنه نشت تفاوت محسوسی داشته باشد. همچنین مدل اصطکاکی غیرماندگار دو ضریبی توانایی کاملاً مناسبی در

شبیه‌سازی موج فشاری جریان گذرا در حضور نشت دارد.

منابع مورد استفاده

- Akbari A, Fathi-moghadam M and Mirzaee M. 2021. Detection of leakage in polymeric transmission pipelines with using reflected compress wave of transient flow. *Journal of Irrigation Sciences and Engineering* 44(1):61-75. (In Persian with English abstract)
- Brunone B and Golia UM, 1991. Some considerations on velocity profiles in unsteady pipe flows. Pp. 481–487. *Proceedings of International Conference on Entropy and Energy Dissipation in Water Resources*, Maratea, Italy.
- Brunone B, Golia UM and Greco M, 1991. Some remarks on the momentum equation for fast transients. Pp. 201–209. *Proceedings of International Conference on Hydraulic Transients with Water Column Separation*, IAHR, Valencia, Spain.
- Chaudhry MH, 2014. *Applied Hydraulic Transients*. Springer, New York.
- Collins RP, Boxall JB, Karney BW and Brunone B, 2012. How severe can transients be after a sudden depressurization. *Journal of American Water Work Association*. 104(4): 67-75.
- Covas D and Ramos H, 2001. Hydraulic transients used for leakage detection in water distribution systems. In: *Proceedings of the 4th Conference on Water Pipeline Systems: Managing Pipeline Assets in an Evolving Market*. York, UK.
- Covas D, Graham N, Maksimovic C, Ramos H, Kapelan Z, Savic D and Walters G, 2003. An assessment of the application of inverse transient analysis for leak detection: Part II – Collection and application of experimental data. In: *Proceedings of the International Conference on Advances in Water Supply Management*. London, Balkema.
- Daneshfaraz R, Rezazadeh Joudi A and Abraham J, 2017. Numerical investigation on the effect of sudden contraction on flow behavior in a 90-degree bend. *KSCE Journal of Civil Engineering*. DOI 10.1007/s12205-017-1313-3
- Daneshfaraz R, Sadeqfam S and Majedi-Asl M, 2011. The effect of non-linear terms on the process of computing water hammer with regard to friction coefficient for different cast iron pipe. *International Journal of Engineering & Applied Sciences* 3(3):15-22
- Fathi-Moghadam M and Kiani S, 2019. Simulation of transient flow in viscoelastic pipe network. *Journal of Hydraulic Research*, IAHR. Pp. 1-10
- 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*, ASCE, Pp. 200-208.
- Funk JE, Wood DJ, vanVuuren SJ and LcChevallier M, 1999. Pathogen intrusion into water distribution systems due to transients. *Proceedings of 3rd ASME/JSME Joint Fluids Engineering Conference*, July 18-23, San Francisco.
- Haghighi A and Ramos HM, 2012. Detection of leakage freshwater and friction factor calibration in drinking networks using central force optimization. *Journal of Water Resource Management* 26:2347–2363.
- Jönsson L, 2001. Interaction of a hydraulic transient with a leak in a pipe flow. 14th Australasian Fluid Mechanics Conference. Adelaide University, Adelaide, Australia.
- Joukowski NE, 1898. *Memoirs of the Imperial Academy Society of St. Petersburg*. Amer. Water Works Association 24:341-424.
- Lai CC, 1991. Unaccounted for water and the economics of leak detection. *Water Supply* 9(3,4): IR1-1– IR1-8.
- Loureiro D and Ramos H, 2003. A modified formulation for estimating the dissipative effect of 1-D transient pipe flow. Pp. 755-763. *Proceedings of Conference on Pumps, Electromechanical Devices and Systems Applied to Urban Water Management*, International Water Association (IWA)/International Association on Hydraulic Engineering and Research (IAHR), Madrid, Spain.
- 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.

- Mohammadi K, 2021. A review of unsteady friction models in transient flow. 9th National Conference on Civil Engineering, Architecture and Sustainable Urban Development of Iran (ISC) Tehran, Iran. (In Persian with English abstract)
- Mohammadi K and Fathi-moghadam M, 2017. Analysis of rapid unsteady flow in pipelines using unsteady friction model. *Water and Soil Science* 27(2):157 – 169. (In Persian with English abstract)
- Pothof I, 2008. A turbulent approach to unsteady friction. *Journal of Hydraulic Research* 46(5):679–690.
- Rahmanshahi M, Fathi-moghadam M and Haghghi A, 2019. Numerical simulation of dynamic phenomena of unsteady friction and viscoelastic effects in pipeline under the transient flow. *Journal of Irrigation Sciences and Engineering* 41(4):201-216. (In Persian with English abstract)
- Ramos H, Covas D, Borga A and Lourerio D, 2004. Surge damping analysis in pipe systems: Modeling and Experiments *Journal of Hydraulic Research* 42(4):413-425.
- Shamloo H and Haghghi A, 2009. Leak detection in pipelines by inverse backward transient analysis. *Journal of Hydraulic Research* 47(3):311–318.
- Vitkovsky JP, Lambert MF, Simpson AR and Bergant A, 2000. Advances in unsteady friction modeling in transient pipe flow. Pp. 471-482. *Proceedings of 8th International Conference on Pressure Surges*, BHR Group, Bedford, UK.