

Numerical Comparison of Various Methods of Transient Flow Calculation in Water Conveyance Systems with Pumping Station

A. R. Khoshfetrat¹, R. Daneshfaraz², J. Behmanesh³

1. MSc Student of Civil Engineering, Unvivesity of Maragheh, Maragheh, Iran
2. Assoc. Prof. of Civil Engineering, Unvivesity of Maragheh, Maragheh, Iran
3. Assoc. Prof. of Civil Engineering, Unvivesity of Urmia, Urmia, Iran
(Corresponding Author) J.behmanesh@urmia.ac.ir

(Received May. 25, 2016 Accepted Oct. 28, 2016)

To cite this article :

Khoshfetrat, A. R., Daneshfaraz, R., Behmanesh, J., 2018, "Numerical comparison of various methods of transient flow calculation in water conveyance systems with pumping station" Journal of Water and Wastewater, 29(2), 85-100. Doi: 10.22093/wwj.2017.54595.2198. (In Persian)

Abstract

Under transient flow condition, the behavior of water conveyance system varies according to their characteristics. In the present study, the pressure was measured using a fast and sensitive pressure gauge in Bukan and Piranshahr water conveyance system. The pressure simulation was conducted using Bentley Hammer software. The friction head loss was calculated by different methods. The results showed that Unsteady Vitkovsky method had minimum error comparing with other methods. Wave velocity increase had direct effect on maximum pressures while velocity decrease affected minimum pressures. In a shorter water conveyance system, the reduction of wave velocity had direct effect on maximum pressure. Destruction to the long conveyance system was more probable and maximum and minimum pressures occurred during the first period. Shorter conveyance system had more pressure fluctuations and the minimum pressure did not occur in the first period. Coincidence of periods happened at the beginning and continued until the end of data recording in the longer conveyance system. However, as time passed by, such coincidence did not occur in shorter conveyance system.

Keywords: Simulation, Water Hammer, Unsteady Vitkovsky, Bukan, Piranshahr.



مقایسه عددی روش‌های مختلف محاسبه جریان گذرا در سیستم‌های انتقال آب دارای ایستگاه پمپاژ

علی‌رضا خوش فطرت^۱، رسول دانشفراز^۲، جواد بهمنش^۳

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد گروه مهندسی عمران، دانشگاه مراغه، مراغه، ایران
۲- دانشیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه مراغه، مراغه، ایران
۳- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران
(نویسنده مسئول) J.behmanesh@urmia.ac.ir

(دریافت ۹۵/۳/۵ پذیرش ۹۵/۸/۷)

برای ارجاع به این مقاله به صورت زیر اقدام بفرمایید:

خوش فطرت، ع. ر.، دانشفراز، ر.، بهمنش، ج.، ۱۳۹۷، "مقایسه عددی روش‌های مختلف محاسبه جریان گذرا در سیستم‌های انتقال آب دارای ایستگاه پمپاژ" مجله آب و فاضلاب، ۲۹(۲)، ۸۵-۱۰۰. Doi: 10.22093/wwj.2017.54595.2198

چکیده

در شرایط جریان گذرا رفتار خطوط انتقال آب بر اساس مشخصات آنها تغییر می‌یابد. در پژوهش حاضر فشار با یک فشارسنج حساس و سریع در خطوط انتقال آب بوکان و پیرانشهر اندازه‌گیری شد. شبیه‌سازی با استفاده از نرم‌افزار بنتلی‌همر انجام پذیرفت. افت اصطکاک با روش‌های مختلف محاسبه شد. نتایج نشان داد که روش ناپایدار ویتکوفسکی در مقایسه با سایر روش‌ها، حداقل خطا را دارد. افزایش سرعت موج، بر فشارهای حداکثر، اثر مستقیم و بر فشارهای حداقل، اثر معکوس داشت. در خط انتقال کوتاه‌تر، کاهش سرعت موج بر فشار حداکثر، اثر مستقیم و بر فشار حداقل اثر معکوس داشت. خط انتقال طولانی احتمال تخریب بیشتری داشت و حداقل و حداکثر فشار در پرپود اول به وقوع پیوست. خط انتقال با طول کمتر دارای نوسانات فشار سریع‌تری بود و حداقل فشار در پرپود اول رخ نداد. تطابق از نظر پرپود زمانی در زمان‌های ابتدایی وجود داشت و در خط انتقال با طول زیاد تا انتهای داده‌برداری حفظ شد. با گذر زمان این تطابق در خط انتقال کوتاه‌تر حذف شد.

واژه‌های کلیدی: شبیه‌سازی، ضربه قوچ، ناپایدار ویتکوفسکی، بوکان، پیرانشهر

۱- مقدمه

فشار روی می‌دهد که ممکن است باعث خرابی‌های فاجعه‌بار در سیستم خطوط لوله و تاسیسات هیدرولیکی شود. مدل‌های عددی به‌طور گسترده به‌منظور مطالعه هیدرولیک گذرا استفاده می‌شوند زیرا حل تحلیلی معادلات حاکم بر جریان‌های گذرا مشکل است. یک مدل عددی کارآمد، باید کارایی تحلیل پتانسیل وقوع هیدرولیک گذرا را داشته باشد. این امر برای تشخیص و ارزیابی روش‌های کنترلی فشارهای اضافی ممکن در سیستم، لازم است. نرم‌افزارهای تجاری مختلفی برای شبیه‌سازی هیدرولیک گذرا وجود دارند که می‌توانند برای طراحی خطوط لوله شبکه‌های پیچیده و نیز در مطالعات به‌کار روند. برای مهندسی هیدرولیک فهم پدیده هیدرولیک گذرا، به‌منظور امکان ارزیابی نتایج خروجی شبیه‌سازی‌ها و قضاوت مهندسی صحیح، لازم است.

در سیستم خط لوله تحت شرایط حالت پایدار^۱، تغییرات جریان، ثابت است. اگر تغییر ناگهانی در سیستم‌های کنترلی مانند بستن شیر در پایین دست جریان یا خاموشی ناگهانی پمپ در اثر قطع جریان برق، اتفاق بیفتد حالت گذرا^۲ شروع شده و قبل از برقراری حالت پایدار جدید در سیستم خط لوله، در یک بازه زمانی محدود، حالت گذرا ایجاد می‌شود. پدیده‌ای که مربوط به جریان با این تغییرات سریع است، هیدرولیک گذرا^۳ یا حالت گذرای جریان سیال^۴ نامیده می‌شود. در زمان وقوع حالت گذرا در یک سیستم، نوسانات سریع

¹ Steady State

² Transient

³ Transient Hydraulic

⁴ Fluid Transient Flow

استراتژی دیگری برای کنترل موج بالا و پایین ضربه قوچ در سیستم لوله فلزی با جایگزینی مقطع کوتاهی از لوله با جنس مواد پلیمری با دانسیته بالا و پایین مدل جریان یک بعدی تحت فشار، به کار گرفته شد و مشخص شد که این نوع تکنیک می‌تواند امواج بحرانی ضربه قوچ را کاهش داده و اطمینان سیستم‌های هیدرولیکی صنعتی و تجهیزات آب شهری را برای حفاظت اپراتورها، تا حد زیادی افزایش دهد. نتایج نشان داد که مقطع ساخته شده از پلیمر با دانسیته کم دارای اهمیت بیشتری نسبت به پلیمر با دانسیته زیاد است. سایر پارامترهای دخیل در میزان استهلاک وابسته به طول مقطع کوتاه و قطر می‌باشد (Triki 2015).

در پژوهشی با ارائه روش جبری ضربه قوچ که بر انتقال و انعکاس امواج در گره‌ها تمرکز دارد به آنالیز شبکه بزرگ لوله‌ها توسط برنامه نوشته شده، پرداخته شد. حل شرایط مرزی پیچیده در این روش نیازمند فرمول‌بندی طولانی نیست. برای جبران دقت محاسبات در فواصل لحاظ نشده در برنامه یک طرح انعطاف‌پذیر برای حفظ دقت میرایی موج پیشنهاد شد. نتایج شبیه‌سازی با نتایج روش مدل مشخصه‌ها مقایسه و نشان داده شد که هر دو روش نتایج یکسان نزدیکی را به دست می‌دهند (Nault et al. 2016).

تدقیق راه حل عددی جریان‌های گذرا در خطوط لوله نسبتاً طولانی، بررسی شده است. در معادلات حاکم بر این نوع جریان فاکتور اصطکاک مهم است. برای حصول اطمینان از صحت مدل جریان گذرا توسط برنامه کامپیوتری نوشته شده، افزایش گام زمانی خیلی کوچکی در آن صورت گرفته است. پژوهش مذکور نتایج متفاوتی نسبت به خطوط لوله کوتاه‌تر و سیالات با ویسکوزیته کمتر را نشان داد. نتایج نشان داد که نیروی جاذبه ممکن است اثر مهمی در فشار بیشینه محل شیر داشته باشد. فاکتور ایمنی که برای فواصل یکسان مقاطع خط محاسبه شده، فاصله بین مخزن و محل ضعیفی که امکان وقوع شکست وجود دارد را مشخص می‌کند. برای کاربرد مورد نظر نتایج نشان داد که خط لوله در نزدیکی مخزن بالادست، امن‌تر است (Dallali et al. 2015).

به دلیل تغییرات مختصات اجرایی ایستگاه پمپاژ شهر بوکان نسبت به طرح اولیه و افزایش ارتفاع پمپاژ و با توجه به عدم نصب تانک ضربه‌گیر در ایستگاه پمپاژ پیرانشهر، بررسی وضعیت عملکردی فشار گذرا در این دو ایستگاه در حالت وقوع ضربه قوچ برای بازنگری در طرح مورد نیاز است. این پژوهش با هدف بررسی

پژوهش‌های زیادی بر روی موج و بررسی اثر موج ضربه قوچ بر دیواره لوله‌ها انجام شده است و افت‌های اصطکاکی نیز در محاسبات لحاظ شده است. پیشرفت‌های تکنولوژیکی و کاربرد کامپیوتر در مهندسی و ابداع روش مشخصه‌ها^۱ زمینه حل معادلات پیوستگی و مومنتم راه حل‌های دقیق در حل مسائل دشوار ضربه قوچ را فراهم ساخته است (Najmaei 1995).

در پژوهشی با عنوان مدل هیدرولیک جریان گذرا در مجاری بسته، پژوهشگران با استفاده از نرم‌افزار بنتلی‌همر بخشی از مسیر خط انتقال آب در کشور لیبی با قطر ۴۰۰ میلی‌متر را که در اثر ضربه قوچ ناشی از بسته شدن ناگهانی شیر تخریب شده بود، مدل نمودند. نتایج نشان داده است که فشار در محل تخریب ۲ بار (حدود ۲۰٪) بیشتر از فشار کاری لوله بوده و موجب تخریب لوله شده است. استفاده از نرم‌افزار برای بررسی اثر هیدرولیک گذرا در طرح‌های ارائه شده توسط مهندسین هیدرولیک در پژوهش توصیه شده است (El-Turki 2013).

در پژوهش دیگری با بررسی آزمایشگاهی، خطاهای مدل هیدرولیکی جریان گذرا در لوله‌های انتقال آب با روش محاسبه افت اصطکاکی ناپایدار ویتکوفسکی مقایسه شد. در این پژوهش با برنامه‌نویسی بر اساس تئوری کلاسیک ضربه قوچ برای جریان گذرای یک بعدی در حالت قطع جریان برق پمپ نشان داده شد که تطابق خیلی خوبی بین داده‌های واقعی آزمایشگاهی و شبیه‌سازی عددی وجود دارد (Delgado et al. 2014).

مدل هیدرولیکی یک بعدی برای جریان گذرای مایع در لوله با قطر ثابت در پژوهش دیگری ارائه شده و معادلات سیستم که رفتار ماکروسکوپی ترمومکانیکال سیستم جریان لوله را بیان می‌کند، در چهار چوب ترمودینامیک کلاسیک و مکانیک پیوسته به دست آمده و مسئله جریان به عنوان یک مسئله معکوس فرمول‌بندی شده است. در این پژوهش از نتایج آزمایشگاهی درباره انتشار امواج در لوله‌های پر شده با مایع، برای استنتاج پارامترهایی که سیستم لوله سیال را مشخص می‌کند، استفاده شد. نتایج نشان داد که مدل توانایی بازتولید ویژگی‌های جریان شامل میرایی و تغییر فاز امواج فشاری شدیدی که در پدیده ضربه قوچ ایجاد می‌شود را دارد (Nucci & Russo Spena 2015).

¹ Characteristic Method



همر برای حل معادلات مربوطه از روش مشخصه‌ها استفاده می‌نماید. اساس این روش تبدیل دو معادله دیفرانسیل با مشتقات جزئی به دو معادله دیفرانسیل معمولی است که برای این امر ترکیب خطی معادلات نوشته می‌شود. این معادلات برای هر نقطه از سیستم و برای شرایط مرزی متفاوت حل و مقادیر سرعت و هد فشاری برای آنها به دست می‌آید. در بنتلی هم‌آنالیز هیدرولیک گذرا معمولاً با محاسبات شرایط اولیه (حالت پایدار) که هد و جریان را برای هر لوله در سیستم محاسبه می‌کند، شروع می‌شود. این برنامه در ابتدا به صورت اتوماتیک از روش دارسی و ایسباخ ضریب اصطکاک را بر اساس هدهای انتهایی هر لوله، طول لوله، قطر و جریان در لوله محاسبه می‌کند.

جدول ۱- مشخصات ایستگاه پمپاژ و خط انتقال بوکان و پیرانشهر

Table.1. Characteristics of pump stations and conveyance system in Bukan & Piranshahr

System	Unit	Piranshahr	Bukan		
Pump	Pump type	Set	WKL 125/4a	CP150- 50-500	
	Combination	Number	1+3	1+2	
	Active Pump	Set	2	2	
	Discharge	l/s	138	264.4	
	Pump elevation	m	1405.6	1400.2	
	Pump & electro motor inertia	Kg/m ²	6.5	6.53	
	Motor rotation Speed	rpm	1450	1450	
	Conveyance System	Water level in suction reservoir	m	1408.5	1408.7
		Discharge Collector axis elevation	m	1407.1	1401.7
		Discharge collector diameter	mm	500	500
Axis elevation of reservoir input to discharge pipe		m	1503.8	1473.7	
Static Pressure		mH ₂ O	96.2	70.6	
Dynamic pressure		mH ₂ O	101.5	74.63	
Vapor pressure (relative)		mH ₂ O	-8.44	-8.44	
Pipeline Diameter		Mm	500	500	
Pipeline Length		m	6270	870	
Pipeline material		-	DI	DI	
Wave Velocity	Number of air valves	Set	7	1	
	Flange diameter-type of air valve	Set	100- double	100- double	
	Steel pipe		1100	1100	
	Ductile iron Pipe	m/s	1130	1130	
	Asbestos cement pipe		845	-	

فشار حالت گذرا و ضرورت یا عدم نیاز تعبیه سیستم‌های مقابله با ضربه قوچ در ایستگاه‌های پمپاژ مذکور، انجام شد. با توجه به اینکه در مقالات منتشر شده در این زمینه بیشتر پژوهش‌ها بر روی کارهای آزمایشگاهی و یا مدل‌های هیدرولیکی محدود شده بود، در این پژوهش از داده‌های واقعی مربوط به سیستم خطوط انتقال و ایستگاه پمپاژ اجرا شده و در حال بهره برداری برای داده‌برداری و مقایسه با شبیه‌سازی استفاده شد که تفاوت زیادی با شرایط آزمایشگاهی دارد.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- منطقه طرح

ایستگاه‌های پمپاژ بررسی شده در این پژوهش در شهرهای بوکان و پیرانشهر واقع در استان آذربایجان غربی و در شمال غرب ایران قرار گرفته است. منطقه طرح در شکل ۱ دیده می‌شود.

مختصات جغرافیایی جهانی محل ایستگاه پمپاژ بوکان برابر ۶۰۹۵۵۷ متر شرقی و ۴۰۴۱۸۷۶ متر شمالی و ایستگاه پمپاژ پیرانشهر ۵۱۳۹۵۰ متر شرقی و ۴۰۵۷۴۴۵ متر شمالی است.

۲-۲- خط انتقال و ایستگاه پمپاژ شهر بوکان و پیرانشهر

مشخصات ایستگاه پمپاژ و خط انتقال مربوط به دو شهر بوکان و پیرانشهر در جدول ۱ نشان داده شده است. بر اساس کدهای اجرا شده برای لوله، پروفیل خط انتقال مطابق شکل‌های ۲ و ۳ است. جنس لوله‌ها در محل ایستگاه پمپاژ و در محل تخلیه به مخزن، فولادی و در طول مسیر چدنی است. نوع شیرهای یک طرفه استفاده شده در محل ایستگاه پمپاژ بوکان از نوع وزنه‌دار با قطر ۴۰۰ میلی‌متر و در پیرانشهر از نوع فن‌دار و ضد ضربه قوچ با قطر ۲۵۰ میلی‌متر است.

۲-۳- نرم‌افزار بنتلی هم^۱

برای حل معادلات اساسی ضربه قوچ، تاکنون از روش‌های مختلفی استفاده شده است که دقیق‌ترین آنها روش مشخصه‌هاست. این روش انعطاف زیادی برای حل عددی به‌وسیله کامپیوتر دارد. بنتلی

¹ Bentley Hammer





Fig.1. Project region situation
شکل ۱- موقعیت منطقه طرح

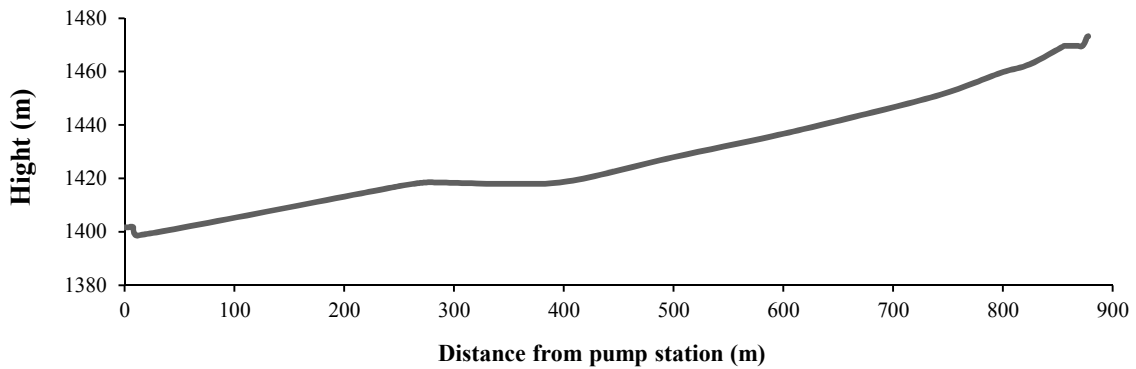


Fig.2. Longitudinal profile of Bukan conveyance system
شکل ۲- پروفیل طولی خط انتقال بوکان

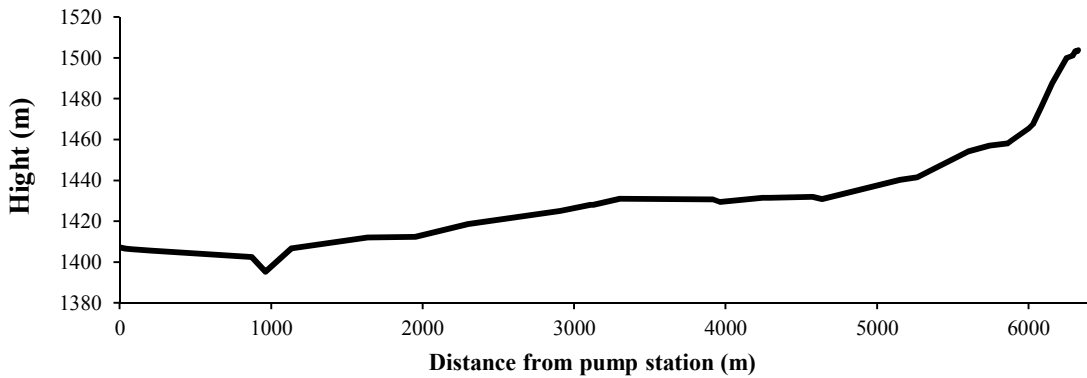


Fig. 3. Longitudinal profile of Piranshahr conveyance system
شکل ۳- پروفیل طولی خط انتقال پیرانشهر

$$a^2 \frac{\partial v}{\partial s} + \frac{1}{\rho} \frac{dp}{dt} = 0$$

(۲) پیوستگی

V سرعت جریان، t زمان، ρ چگالی سیال، P فشار، s فاصله المان، g شتاب ثقل، Z تراز ارتفاعی، f ضریب دارسی و ایسباخ، D قطر لوله، a سرعت موج می‌باشند.

۴-۲- معادلات حاکم بر نرم افزار

معادلات مومنتم و پیوستگی در جریان گذرا که به صورت مشتقات جزئی و معادله دیفرانسیل جزئی است و معادلات اصلی ضربه قوچ محسوب می‌شوند با معادلات ۱ و ۲ بیان می‌شوند

$$\frac{dv}{dt} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial s} + g \frac{dz}{ds} + \frac{f}{2D} v|v| = 0 \quad (۱) \text{ مومنتم}$$

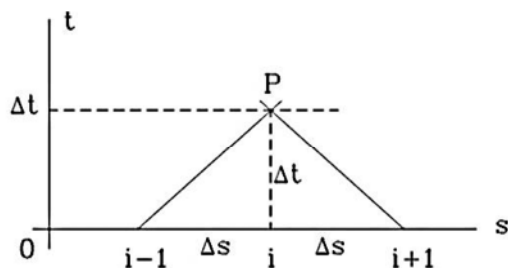


Fig. 4. Temporal & spatial steps of a point in characteristics method

شکل ۴- مراحل زمانی و مکانی یک نقطه از شبکه در روش مشخصه‌ها

سیستم ساده طول لوله را به N قسمت مساوی تقسیم نمود. در این صورت طول هر قسمت برابر $\Delta s = \frac{L}{N}$ خواهد شد، بنابراین مقدار Δs معلوم شده و به این ترتیب مقدار $\Delta t = \frac{\Delta s}{a}$ نیز به دست خواهد آمد. با مشخص بودن Δs و از روی معادلات منحنی مشخصه‌ها مقدار Δt به دست می‌آید. مطابق شکل ۵ شبکه‌ای از مشخصه‌ها رسم می‌شود و با استفاده از شرایط اولیه و شرایط مرزی، مقادیر هد و سرعت به دست می‌آید. این عمل تا زمانی که مقادیر هد و سرعت در تمام نقاط طول لوله محاسبه شود، ادامه پیدا می‌کند.

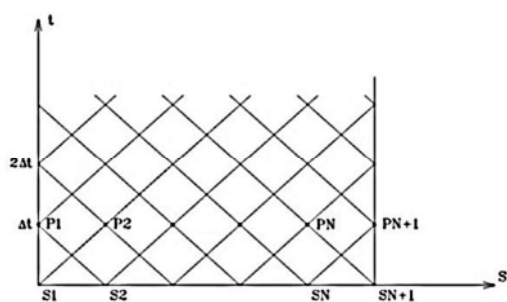


Fig. 5. Characteristics method gridding

شکل ۵- شبکه بندی حل به روش مشخصه‌ها

در این نرم افزار، فواصل زمانی و مکانی شبکه بندی به طور اتوماتیک به نحوی تعیین می‌شود که همگرایی و سازگاری سیستم حاصل شود (Taebi & Chamani 2006).

۲-۶- روش‌های محاسبه افت اصطکاکی

۲-۶-۱- اصطکاک شبه پایدار

در این حالت ضریب دارسی و ایسباخ در هر نقطه وابسته به حالت سیستم در گام زمانی قبلی است. در ابتدا ضریب اصطکاک برای هر لوله تابعی از جریان اولیه Q_0 است و از شرایط حالت پایدار جریان

معادلات مشخصه ضربه قوچ بر اساس هد و سرعت به صورت زیر است

$$\begin{cases} \frac{dv}{dt} + \frac{g}{a} \frac{dH}{dt} + \frac{f}{2D} V|V| = 0 & \frac{ds}{dt} = a \quad C^+ \\ \frac{dv}{dt} - \frac{g}{a} \frac{dH}{dt} + \frac{f}{2D} V|V| = 0 & \frac{ds}{dt} = -a \quad C^- \end{cases} \quad (3)$$

با استفاده از روش تفاضل‌های محدود^۱ معادلات اساسی به صورت زیر گسسته‌سازی می‌شوند

$$(V_{pi} - V_{i-1}) + \frac{g}{a} (H_{pi} - H_{i-1}) + \frac{f\Delta t}{2D} V_{i-1}|V_{i-1}| = 0 \quad C^+ \quad (4)$$

$$(V_{pi} - V_{i+1}) - \frac{g}{a} (H_{pi} - H_{i+1}) + \frac{f\Delta t}{2D} V_{i+1}|V_{i+1}| = 0 \quad C^- \quad (5)$$

با استفاده از شرایط مرزی و حل همزمان آنها با معادلات ۴ و ۵ برای شرط مرزی پمپ، معادله ۶ حاصل می‌شود.

$$\left(\frac{g}{a} A_p\right) V_{p1}^2 + \left(\frac{g}{a} B_p - 1\right) V_{p1} + \quad (6)$$

$$\left(V_2 + \frac{g}{a} C_p - \frac{g}{a} H_2 - \frac{f\Delta t}{2D} V_2|V_2|\right) = 0$$

مقادیر A_p و B_p و C_p ثابت بوده و با در نظر گرفتن نوع پمپ از روی منحنی مشخصه پمپ یا کاتالوگ سازنده قابل استخراج هستند. با حل معادله درجه دوم مقدار مورد نظر برای سرعت و هد فشاری حاصل می‌شود.

۲-۵- روش مشخصه‌ها

معمول‌ترین و دقیق‌ترین روش حل معادلات ۱ و ۲ روش مشخصه‌ها است. از رسم مشخصه‌های معادله ۳ در سیستم مختصات s-t مطابق شکل ۴ استفاده شده و لوله به قسمت‌های مساوی تقسیم می‌شود. برای سادگی مقادیر مربوط به گام زمانی جدید با اندیس P و مقادیر معلوم مربوط به گام زمانی قبل بدون اندیس نشان داده شده و معادلات ۴ و ۵ نوشته می‌شود.

برای حل معادلات مشخصه با روش فوق می‌توان در یک

¹ Finite Difference



ضریب اصطکاک برونونه است. ضریب k با استفاده از معادله زیر محاسبه می‌شود

$$k = \frac{\sqrt{C^*}}{2} \quad (9)$$

که در این معادله

C^* ضریب افت برشی وردی است که برای جریان‌های لایه‌ای $C^*=0.00476$ است. برای جریان‌های آشفته مقدار به صورت زیر محاسبه می‌شود

$$C^* = \frac{7.41}{\text{Re}^{\log\left(\frac{14.3}{\text{Re}^{0.05}}\right)}} \quad (10)$$

۷-۲- محاسبه سرعت موج

سرعت موج برای لوله‌های فولادی و چدنی از معادله ۱۲ محاسبه شد

$$a = \frac{1}{\sqrt{\rho \times \left(\frac{1}{k} + \frac{D \times C_1}{E \times e} \right)}} \quad (11)$$

که در این معادله

a سرعت موج، ρ چگالی مایع، k مدول الاستیسیته حجمی سیال، D قطر لوله، C_1 ضریب حالت لوله، E مدول یانگ و e ضخامت جدار لوله است (Chaudhry 2014).

۸-۲- فشارسنجی

برای انجام فشارسنجی نیاز به دستگاه فشارسنج است. در فشار نسبی، فشار زیر یک اتمسفر، فشار منفی در نظر گرفته می‌شود. وسایل اندازه‌گیری فشار معمولاً فشار نسبی را نشان می‌دهند. از این رو فشار نسبی، فشار گیج^۱ نیز نامیده می‌شود. فشارسنج مورد استفاده در این پژوهش از نوع دیجیتال و ساخت کارخانه کلر^۲ سوئیس بود. این سنسور با مدل PA-21Y انتخاب شد که با توجه به مشخصات فنی سنسورهای تولیدی این شرکت فشار ۱۰۰۰ میلی بار مطلق را برابر صفر نشان می‌دهد. محدوده فشار این سنسور از ۱- تا ۴۰+ بار با سیگنال خروجی ۴ تا ۲۰ میلی آمپر است و دارای محدوده فرکانس ۲ کیلوهرتز و تغذیه ۸ تا ۳۲ ولت می‌باشد. محل اتصال فشار با قطر ۱/۴ اینچ است که با استفاده از

استفاده می‌شود. برای مقدار آغازین ضریب اصطکاک، زبری مربوط به هر لوله به وسیله تقریب سوامی و جین برای دیگرام مودی استفاده می‌شود. برای گام‌های زمانی بعدی عدد رینولدز در هر نقطه بر اساس سرعت تکرارهای قبلی محاسبه و سپس ضریب اصطکاک بهنگام شده تعیین می‌شود. روش اصطکاک حالت پایدار در واقع حالت خاصی از روش شبه پایدار است زیرا در این روش فرض بر این است که عامل اصطکاک با زمان تغییر نمی‌کند.

۲-۶-۲- اصطکاک گذرا یا ناپایدار

در مقایسه با حالت پایدار، اصطکاک سیال در زمان وقوع هیدرولیک گذرا به دلیل تغییرات سریع فشار گذرا و افزایش تنش برشی اغتشاشی جریان، افزایش می‌یابد. شتاب موقتی و سرعت زمان قبلی، نقش مهمی در تعیین اصطکاک گذرا ایفا می‌کند. به وسیله داده‌های آزمایشگاهی و فرمول‌های انتشار یافته در سال‌های اخیر، برای تخمین عوامل اصطکاک گذرا روش پیشنهادی برای مدل اصطکاک ناپایدار که تقویت شده عامل اصطکاک شبه پایدار است، به صورت معادله ۶ می‌باشد

$$1 + \text{Min}\left(\frac{\alpha \left| \frac{\partial V}{\partial t} \right|}{g}, \beta\right) \quad (7)$$

که در این معادله

V سرعت، t زمان، g شتاب ثقل $\alpha=10000$ و $\beta=4$. استخراج سرعت جزئی، با ملاحظه زمان و شتاب موقت در هر نقطه است و در گام زمانی قبلی مقدار آن تعیین شده است. در نظر داشتن پژوهش‌های انجام یافته در این مورد، روش دیگر اصطکاک گذرا نیز ارائه شده است. فرمول اصطکاک حالت ناپایدار ویتکوفسکی به صورت زیر است

$$f = f_q + \frac{kD}{v|v|} \left[\frac{\partial V}{\partial t} \pm a \left| \frac{\partial V}{\partial x} \right| \right] \quad (8)$$

که در این معادله

f عامل اصطکاک داری وایسباخ، f_q مولفه عامل اصطکاک شبه پایدار (بر اساس عدد رینولدز بهنگام شده برای هر محاسبه جدید)، D قطر لوله، V سرعت جریان، t زمان، a سرعت موج، x زمانی که سرعت بالای صفر، - زمانی که سرعت زیر صفر، x فاصله، k

¹ Gage pressure

² Keller



۲-۱۰- عملیات فشارسنجی

برای انجام عملیات فشارسنجی بر روی خطوط لوله موجود در ایستگاه‌های پمپاژ، وجود محل اتصال سنسور بر روی کلکتور رانش ایستگاه پمپاژ ضروری است. این سنسور باید در محلی نصب شود که بعد از آن شیر یک طرفه وجود نداشته باشد و در حین فشارسنجی نیز هیچ‌گونه تغییری در وضعیت شیرآلات ایجاد نشود. همچنین در محل نصب سنسور روی کلکتور رانش، وجود شیر قطع و وصل جریان از کلکتور به طرف سنسور ضرورت دارد. شیر موجود در این فشارسنجی از نوع شیر گازی ۳/۴ اینچی است و با یک تبدیل مخصوص اتصال ۱/۴ اینچی سنسور به تبدیل ۱/۲ وصل و سپس با تبدیل ۱/۲ به ۳/۴ به شیر متصل می‌شود.

با توجه به این که حداکثر فشار در انتهای خطوط انتقال رخ می‌دهد، محل نصب سنسور فشار در انتهایی‌ترین نقطه کلکتور رانش ایستگاه پمپاژ انتخاب شد. به دلیل این که محاسبات برای محور مرکزی لوله توسط نرم‌افزار انجام می‌شود و سنسور فشار نصب شده دارای فاصله از محور لوله است، اعداد حاصل از فشارسنجی با اضافه نمودن مقادیر مربوط به اندازه نصف قطر لوله رانش به علاوه ارتفاع شیر و اتصالات موجود تا سنسور فشار، اصلاح می‌شود.

پس از اتصال سنسور به روی لوله کلکتور رانش، کابل اتصال سنسور به دستگاه ثبت داده وصل و با روشن نمودن دستگاه، تعداد داده‌های مورد نظر در هر ثانیه برای ثبت انتخاب می‌شود.

در حالی که پمپ‌های ایستگاه پمپاژ فعال بوده و حالت جریان یکنواخت در سیستم برقرار است، با انتخاب حالت ثبت داده‌ها، دستگاه شروع به ثبت داده‌های ارسالی از سنسور بر روی کارت حافظه ثبت کننده داده‌ها می‌نماید. داده‌های ثبت شده در زمان‌های اولیه مربوط به فشار دینامیک پمپاژ سیستم در حالت جریان پایدار است. برای ایجاد حالت گذرا، نسبت به قطع جریان برق پمپ‌ها به‌طور همزمان اقدام می‌شود. با قطع جریان برق، حالت گذرا شروع شده و اطلاعات مربوطه در حافظه ثبت می‌شود. با توجه به این که زمان مورد نیاز برای ثبت داده‌ها به مقدار ۴۰ برابر L/a می‌باشد، این زمان رعایت می‌شود. L طول کل خط انتقال و a سرعت موج است.

یک تبدیل به سایز ۱/۲ اینچ به محل فشارسنجی وصل می‌شود. قابلیت پاسخ‌دهی سنسور کمتر از ۵ میلی ثانیه است. دقت بر اساس روش بهترین خط مستقیم مناسب^۱ برای دمای ۰ تا ۵۰ درجه سلسیوس، برابر ۱ درصد است.

۲-۹- ثبت کننده داده‌ها^۲

داده‌های ارسال شده از سنسور فشار، توسط دستگاه ثبت کننده داده‌ها که در شکل‌های ۶ و ۷ دیده می‌شود، به‌صورت اعداد فشار موجود در محل فشارسنجی، در حافظه دستگاه ثبت می‌شود.



Fig. 6. Data logger & pressure sensor in Bukan
شکل ۶- ثبت کننده داده‌ها و سنسور فشار بوکان



Fig. 7. Data logger & pressure sensor in Piranshahr
شکل ۷- ثبت کننده داده‌ها و سنسور فشار پیرانشهر

¹ BFSL

² Data Logger

ترسیم شده است. گراف‌های مورد نیاز برای زمان‌های صفر تا ۱۲ ثانیه و صفر تا ۱۸۰ ثانیه برای بوکان و صفر تا ۲۴ ثانیه و صفر تا ۲۹۵ ثانیه برای پیرانشهر با روش‌های مختلف محاسبه افت حالت گذرا ترسیم شده است. با توجه به گام زمانی مربوط به داده‌های ثبت شده، این فاصله زمانی به منظور ارائه نتایج در نرم‌افزار وارد شده است و با استفاده از این برابری زمان‌ها، فشارهای به دست آمده با روش‌های آماری مورد مقایسه قرار گرفته و نتایج ارائه شده‌اند. سایر ورودی‌های مورد نیاز نرم‌افزار از جمله فشار بخار آب، سرعت موج، ممان اینرسی موتور و پمپ به صورت محاسبه‌ای یا از روی کاتالوگ‌های مربوطه و یا سایر منابع اطلاعاتی تهیه و به نرم افزار وارد شده‌اند.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- بررسی مقادیر فشار حاصل از خطوط انتقال

با استفاده از داده برداری‌های انجام شده، نمودار کلی فشار گذرا برای دو ایستگاه پمپاژ در شکل‌های ۸ و ۹ ترسیم شده است. با مقایسه این دو شکل نشان می‌دهد که خط انتقال بوکان، با طول کمتر، دارای نوسانات فشار سریع‌تری نسبت به خط انتقال پیرانشهر، با طول زیادتر است، زیرا موج فشاری زمان بیشتری برای رسیدن از مبدا انتشار تا مقصد و برگشت دوباره آن لازم دارد. مسئله مهم دیگر مدت زمان پایایی فشارهای حداکثر است. مدت زمان تقریبی نیم پر بود بوکان ۱/۶ ثانیه و پیرانشهر ۱۱ ثانیه اندازه‌گیری شده است (جداول ۲ و ۳ و شکل‌های ۱۰ و ۱۱). این موضوع به آن معنی است که کلکتور رانش پمپاژ بوکان در هر پر بود مدت زمان کمتری فشار حداکثر را تحمل می‌نماید ولی از نظر تعداد پیک فشاری در مدت مشابه برای پیرانشهر، کلکتور سه بار پیک فشار را تجربه می‌کند. با توجه به این موضوع می‌توان گفت که خطوط انتقال با طول بیشتر، به دلیل قرارگیری مدت زمان زیادتر در معرض فشار بالا، احتمال تخریب بالاتری نسبت به خطوط انتقال کوتاه‌تر دارند.

برای هر دو ایستگاه پمپاژ نتایج داده‌های واقعی و داده‌های حاصل از شبیه‌سازی در شکل‌های ۱۲ تا ۱۵ دیده می‌شود. نتایج آماری برای زمان‌های صفر تا ۲۹۵ ثانیه برای بوکان و صفر تا ۲۳۰ ثانیه برای پیرانشهر محاسبه شده‌اند. آنچه که در این شکل‌ها دیده

پس از اتصال سنسور به لوله کلکتور رانش، کابل اتصال سنسور به دستگاه ثبت داده را وصل نموده و با روشن نمودن دستگاه، تعداد داده‌های مورد نظر در هر ثانیه برای ثبت انتخاب می‌شود.

پس از اتمام عملیات داده برداری به منظور رسم نمودارها از نرم‌افزار Excel^۱ استفاده شده است. تعداد داده‌ها در نمونه برداری بوکان برابر ۱۹۵ نمونه در ثانیه و برای پیرانشهر ۲۴۵ نمونه در ثانیه بوده است.

۲-۱۱- آماره‌های خطا

به منظور بررسی خطای موجود در نتایج حاصل از شبیه‌سازی نسبت به داده‌های واقعی و انتخاب مدل برتر از دو روش آماری میانگین خطای مطلق (MAE)^۲ و مجذور میانگین مربعات خطاها (RMSE)^۳ استفاده شده است. میانگین خطای مطلق در معادله زیر ارائه شده است

$$MAE = \frac{\sum |S - O|}{n} \quad (12)$$

که در آن

S داده مربوط به مدل، O داده واقعی مشاهده شده و n تعداد داده‌هاست.

مجذور میانگین مربعات خطاها با استفاده از معادله ۱۱ محاسبه می‌شود

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum (O - E)^2}{n}} \quad (13)$$

که در آن

O داده واقعی مشاهده شده، E داده مربوط به مدل، n تعداد داده‌هاست

۲-۱۲- شبیه‌سازی عددی

برای بررسی نتایج داده‌های واقعی با نتایج حل عددی باید نتایج در یک نمودار به‌طور هم‌زمان ترسیم و مورد بررسی قرار گیرند. با استفاده از داده‌های مربوط به تغییرات فشار در محل گره‌ها، نمودار مربوط به محل نصب فشارسنج ترسیم و داده‌های آن به نرم‌افزار Excel منتقل شده و همراه با داده‌های واقعی نمودارهای مربوطه

¹ Microsoft Excel

² Mean Absolute Error

³ Root Mean Square Error



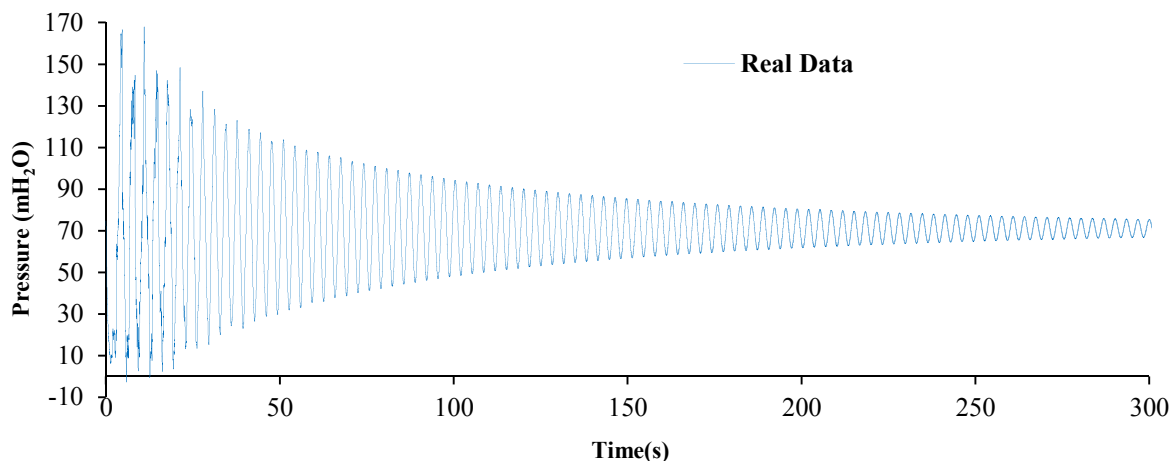


Fig. 8. Pressure changes observed from actual data on discharge collector of Bukan pumping station
شکل ۸- تغییرات فشار حاصل از داده‌های واقعی بوکان روی کلکتور رانش ایستگاه پمپاژ

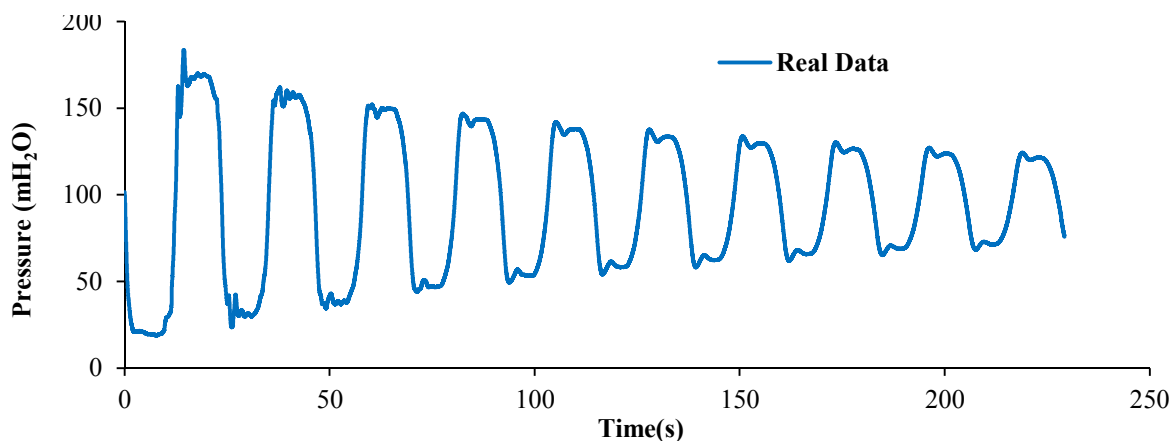


Fig. 9. Pressure changes observed from actual data on discharge collector of Piranshahr pumping station
شکل ۹- تغییرات فشار حاصل از داده‌های واقعی پیرانشهر روی کلکتور رانش ایستگاه پمپاژ

جدول ۳- دوره‌های تناوب اولیه بوکان

Table 3. Initial periods of Bukan

Half period	Time of half period	Duration of half period	Proportion to first half period (Percentage)
1	3.579344	3.579344	
2	4.989544	1.4102	153.82%
3	6.82024	1.830696	95.52%
4	8.456072	1.635832	118.81%

در حالی که برای پیرانشهر تطابق پریودهای زمانی تا انتها حفظ شده است، کمترین تأخیر مربوط به روش ناپایدار ویتکوفسکی است. از نظر مقدار حداکثر و حداقل فشار و نیز میرایی فشار نیز در روش ناپایدار ویتکوفسکی جواب بهتری نسبت به سایر روش‌ها حاصل شده است. به‌طور کلی نمودار حاصل از روش

می‌شود نشان می‌دهد در همه روش‌ها تطابق از نظر پریود زمانی در زمان‌های ابتدایی وقوع جریان گذرا برای هر دو ایستگاه وجود دارد ولی با گذر زمان این تطابق در ایستگاه پمپاژ بوکان از بین رفته و نتایج شبیه‌سازی دچار تاخیر زمانی شده است.

جدول ۲- دوره‌های تناوب اولیه پیرانشهر

Table 2. Initial periods of Piranshahr

Half period	Time of half period	Duration of half period	Proportion to first half period (percentage)
1	12.45306	12.45603	
2	23.62041	11.16735	11.51%
3	38.17551	11.5551	7.77%
4	46.34286	11.16735	11.51%



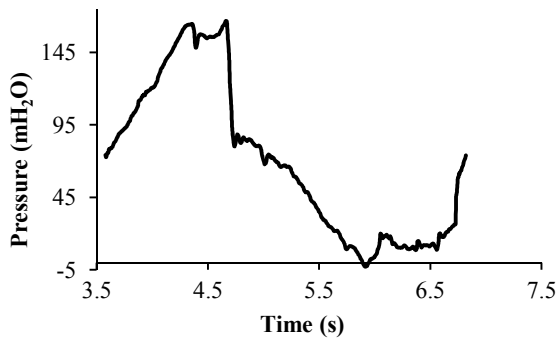


Fig. 11. Pressure changes in a time period on the basis of actual data in Bukan

شکل ۱۱- تغییرات فشار در یک پریود زمانی بر اساس داده‌های واقعی بوکان

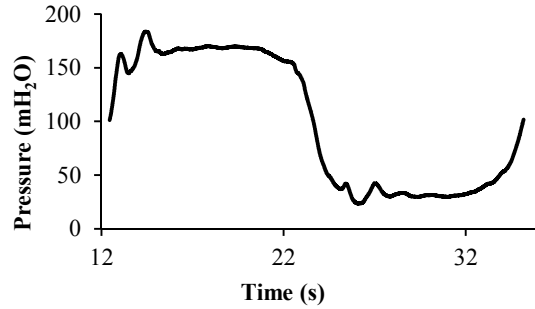


Fig. 10. Pressure changes in a time period on the basis of actual data in Piranshahr

شکل ۱۰- تغییرات فشار در یک پریود زمانی بر اساس داده‌های واقعی پیرانشهر

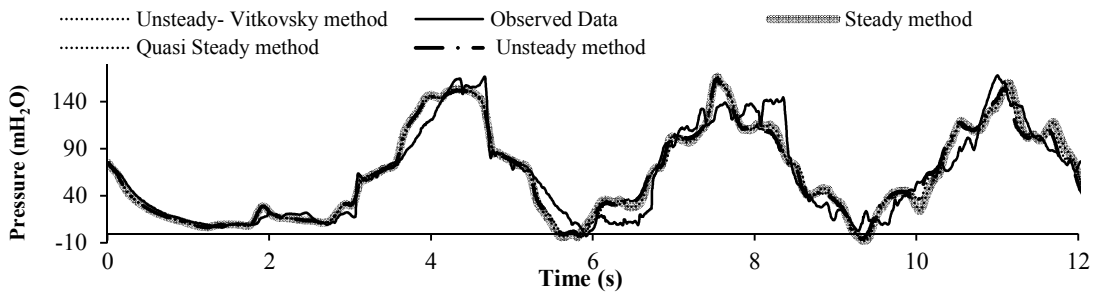


Fig. 12. Pressure changes from 0 to 12 seconds for Bukan

شکل ۱۲- تغییرات فشار در محدوده زمانی صفر تا ۱۲ ثانیه برای بوکان

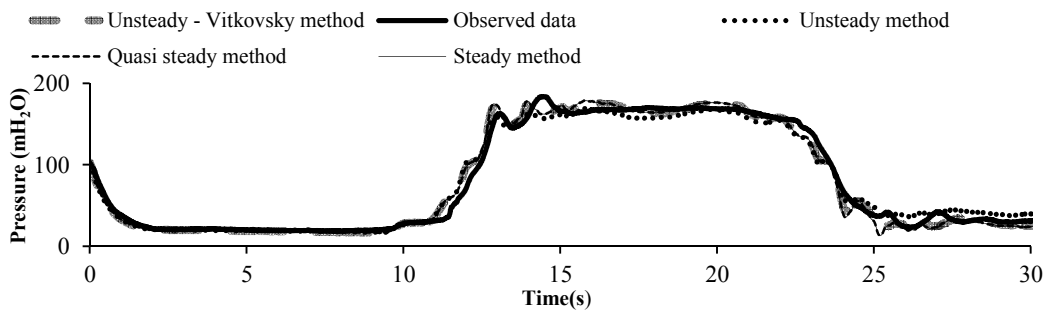


Fig. 13. Pressure changes from 0 to 30 seconds for Piranshahr

شکل ۱۳- تغییرات فشار در محدوده زمانی صفر تا ۳۰ ثانیه برای پیرانشهر

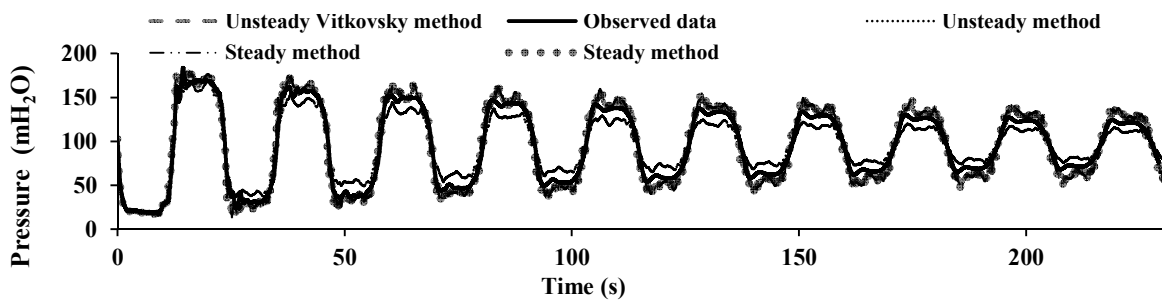


Fig.14. Pressure changes from 0 to 230 seconds for Piranshahr

شکل ۱۴- تغییرات فشار در محدوده زمانی صفر تا ۲۳۰ ثانیه برای پیرانشهر



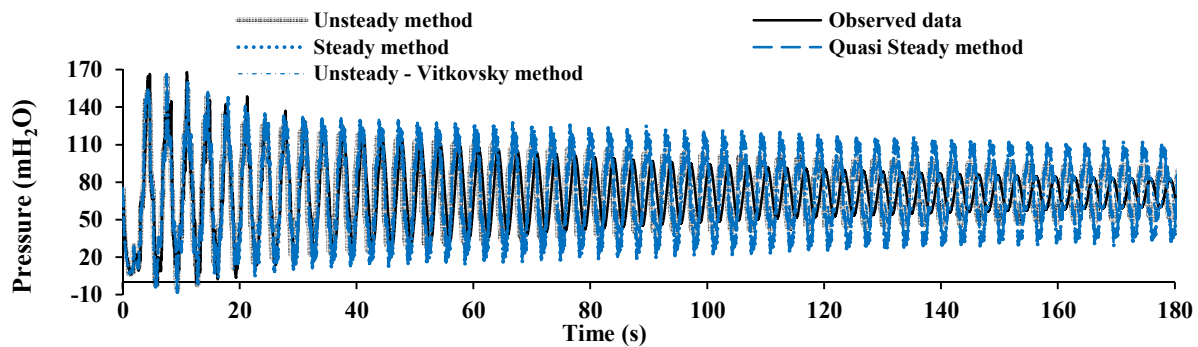


Fig. 15. Pressure changes from 0 to 180 seconds for Bukan
شکل ۱۵- تغییرات فشار در محدوده زمانی صفر تا ۱۸۰ ثانیه برای بوکان

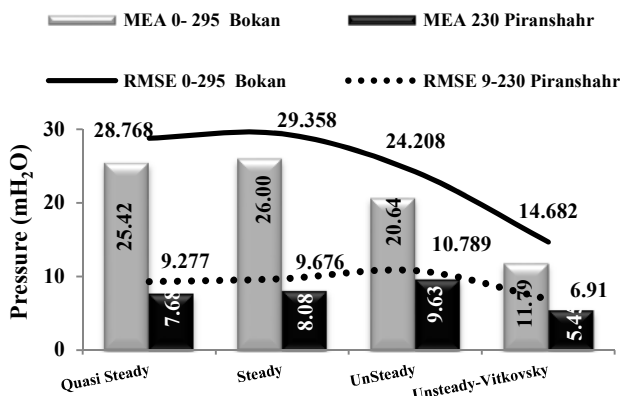


Fig. 17. Investigating actual and simulated data errors during data logging for both pump stations
شکل ۱۷- بررسی خطای داده‌های واقعی و شبیه سازی شده در هر دو ایستگاه پمپاژ در محدوده زمانی داده برداری

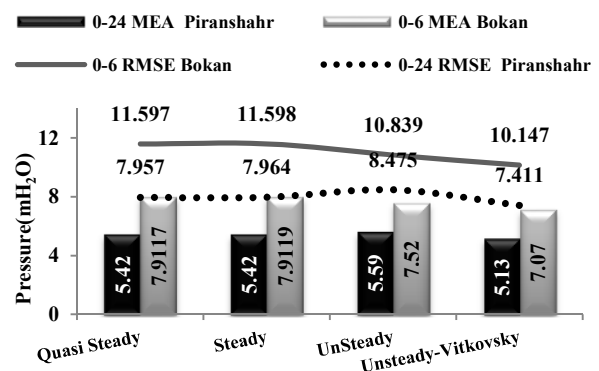


Fig. 16. Investigating actual and simulated data errors at initial times in both pump stations
شکل ۱۶- بررسی خطای داده‌های واقعی و شبیه سازی شده در محدوده زمان‌های اولیه در هر دو ایستگاه پمپاژ

و پایدار رخ داده است.

۲-۳- مقادیر حداقل و حداکثر فشار حاصله از خط انتقال

آنچه از داده‌های واقعی و نتایج نرم‌افزار در مورد مقادیر حداقل و حداکثر فشار ایستگاه‌های پمپاژ حاصل شده در شکل‌های ۱۸ و ۱۹ نشان داده شده است. درصد اختلاف اعداد حاصله برای فشار، در مقادیر حداقل و حداکثر، در شکل‌های ۲۰ و ۲۱ نشان داده شده است. شکل ۲۱ بیانگر درصد اختلاف بیشتر داده‌ها در زمان‌های اولیه نسبت به داده‌ها در زمان‌های بعدی برای بوکان است. بیشترین اختلاف در زمان‌های اولیه برای روش ناپایدار بوده است که اختلاف مقداری آن برابر ۱۴/۶۱ متر آب است. اختلاف این مقادیر با گذشت زمان کم می‌شود به طوری که برای زمان صفر تا ۲۹۵ ثانیه، این مقدار به ۳/۲۴ متر آب کاهش می‌یابد. در بررسی

ناپایدار ویتکوفسکی برای هر دو سیستم پمپاژ جواب بهتری دارد. بهینه بودن روش افت اصطکاکی ناپایدار ویتکوفسکی که به دلیل لحاظ کردن شرایط ناپایدار و شبه پایدار در محاسبه افت‌ها علاوه بر شرایط حالت پایدار به وجود می‌آید، موجب شده است که در این روش خطای کمتری نشان داده شود. پارامتر تغییرات سرعت در هر نقطه از خط لوله، بر میزان میرایی اثرگذار باشد و پارامتر تغییرات سرعت نسبت به زمان تغییرات فاز موج فشاری را در سیستم اعمال نماید که خود موجب دقت بیشتر و کاهش خطا نسبت به اعداد واقعی در این روش است.

این موضوع با محاسبه خطاهای آماری به صورت نمودار در شکل‌های ۱۶ و ۱۷ قابل مشاهده است. این شکل‌ها بیان می‌کنند که روش ناپایدار ویتکوفسکی کمترین مقدار خطا را در هر دو ایستگاه داشته است. افزایش خطا به ترتیب در روش ناپایدار، شبه پایدار

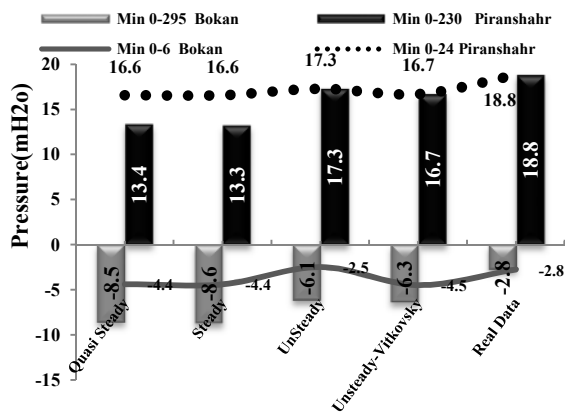


Fig. 19. Minimum pressure values in actual and simulated data for Bokaan & Piranshahr pump stations
 شکل ۱۹- مقادیر حداقل فشار حاصله در شبیه سازی و داده های واقعی ایستگاه‌های پمپاژ بوکان و پیرانشهر

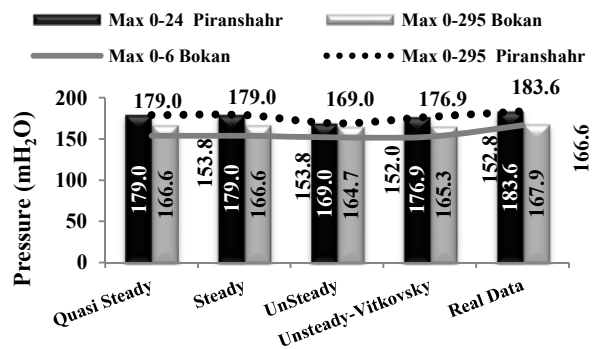


Fig. 18. Maximum pressure values in actual and simulated data for Bokaan and Piranshahr pump stations
 شکل ۱۸- مقادیر حداکثر فشار حاصله در شبیه سازی و داده های واقعی ایستگاه‌های پمپاژ بوکان و پیرانشهر

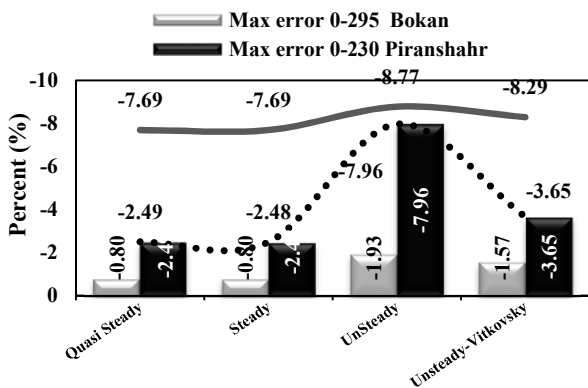


Fig. 20. Difference between maximum values of simulation and actual data (percentage)
 شکل ۲۰- درصد اختلاف مقادیر حداکثر فشار در شبیه سازی نسبت به داده های واقعی

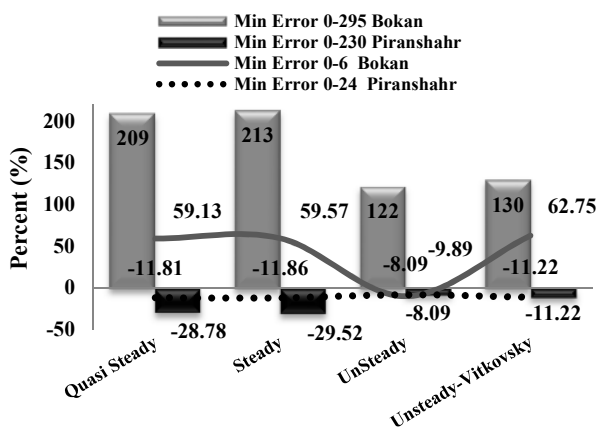


Fig. 21. Difference between minimum values of simulation and actual data (percentage)
 شکل ۲۱- درصد اختلاف مقادیر حداقل فشار در شبیه سازی نسبت به داده های واقعی

موارد مشابه برای ایستگاه پمپاژ پیرانشهر می توان گفت که برای حداکثر فشارها بیشترین اختلاف مربوط به روش محاسبه ناپایدار (۷/۹۶٪) و کمترین اختلاف مربوط به دو روش محاسبه پایدار و شبه پایدار (۲/۴۸٪) است. اختلاف مقادیر حداکثر در حالت شبیه سازی با مقادیر واقعی در زمان های اولیه با سایر زمان ها، برای هر روش محاسبه افت، برابر است و حاکی از وقوع حداکثر فشار گذرا در ۲۴ ثانیه اول است. این موضوع نشان می دهد که در خط انتقال با طول کوتاه تر، حداکثر فشار گذرا در پریود اول رخ نداده، ولی در خط انتقال طویل، حداکثر فشار در اولین پریود واقع شده است.

در ایستگاه پمپاژ بوکان روش ناپایدار ویتکوفسکی در پریود اول بیشترین اختلاف را داشته است. در زمان صفر تا ۲۹۵ ثانیه بیشترین اختلاف مربوط به روش پایدار است. این در حالی است که برای پیرانشهر در پریود اول و سایر زمان ها درصد اختلاف مقادیر، کم است و در روش ناپایدار کمترین اختلاف با ۸/۰۹٪ و بیشترین اختلاف با ۲۹/۵۲٪ مربوط به روش پایدار در زمان های بعد از پریود اول می باشد. مقادیر خالص اختلاف عددی فشارها در جدول ۴ دیده می شوند.

با توجه به موارد ذکر شده برای مقادیر حداقل فشار، مشخص شد که در خط انتقال با طول زیاد در پیرانشهر مقدار حداقل فشار در پریود اول ایجاد شده است و مقادیر مربوطه اختلاف چندانی با سایر زمان ها داشته است در حالی که برای خط انتقال بوکان با طول



جدول ۴- اختلاف خالص مقادیر حداکثر و حداقل مدل‌ها و داده‌های واقعی (مترآب)

Table 4. Net difference between maximum and minimum values of the models and actual data (mH₂O)

Pump Station	Bukan				Piranshahr			
	0-6		0-295		0-24		0-230	
Time	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.
Method								
Quasi steady	-12.81	-1.63	-1.34	-5.78	-4.58	-2.22	-4.58	-5.41
Steady	-12.81	-1.64	-1.34	-5.88	-4.56	-2.23	-4.56	-5.55
Unsteady	-14.61	0.27	-3.24	-3.36	-14.62	-1.52	-14.62	-1.52
Unsteady-Vitkovsky	-13.81	-1.73	-2.64	-3.59	-6.71	-2.11	-6.71	-2.11

جدول ۵- تأثیر تغییرات سرعت موج در مقادیر حداکثر و حداقل مدل نسبت به داده‌های واقعی (مترآب)

Table 5. Wave velocity changes in maximum and minimum values of the models and actual data (mH₂O)

Pump station	Bukan				Piranshahr			
	0-6		0-295		Time		0-6	
Wave velocity changes	Max.	Min.	Wave velocity changes	Max.	Min.	Wave velocity changes	Max.	
+5%	165.6	-10.48	165.6	-10.48	182.33	14.2	182.33	
-5%	171.5	-10.48	171.5	-10.48	174.88	21.2	174.88	
+10%	175.4	-10.48	175.4	-10.48	193.4	9.9	193.4	
-10%	185.5	-10.48	185.5	-10.48	175.2	24.3	175.2	
0%	165.3	-6.35	165.3	-6.35	176.9	16.7	176.9	
Actual Data	167.94	-2.76	167.9	-2.76	186.6	18.8	183.6	
"0.5%"	165.6	-9.2	165.6	-9.20				
"-0.5%"	165.5	-7.07	165.5	-7.07				
"1%"	164.4	-9.43	164.4	-9.43				
"-1%"	163.1	-6.84	163.1	-6.84				

یافته است. در خط انتقال پیرانشهر هنگام کاهش سرعت موج، این میزان با تغییرات مشابه به محدوده عدد ۱۷۵ مترآب تغییر یافته که تغییرات زیادی نسبت به مدل روش افت ناپایدار ویتکوفسکی نداشته است. در فشارهای حداقل بوکان، با افزایش‌های ۵ و ۱۰ درصدی سرعت موج، کاهش فشار به مقدار برابر یا کمتر از فشار بخار آب رسید که برای امکان مقایسه از درصدهای کمتر ۵/۰ و ۱ درصد استفاده شد. با افزایش سرعت موج مقدار فشار حداقل نیز کمتر شد. این موضوع در مورد کاهش سرعت موج نشان از کاهش فشار حداقل دارد. برای خط انتقال پیرانشهر در فشار حداقل، با افزایش سرعت موج، کاهش فشار نسبت به مقدار مدل ناپایدار ویتکوفسکی دیده شده است. با توجه به شکل‌های ۲۲ و ۲۳ که بیانگر درصد تغییرات فشار نسبت به تغییرات سرعت موج است، مشخص شد که برای بوکان با کاهش ۱ درصد سرعت موج مقدار فشار حداقل بیشتر از حالت کاهش ۵/۰ درصد بوده ولی با این حال روند کاهش فشار حداقل، نسبت به مقدار مدل اولیه دیده شده است.

کم، مقادیر حداقل در زمان‌های اولیه اختلاف زیادی با سایر زمان‌ها داشت و حداقل فشار در پرپود اول ایجاد نشده است.

۳-۳- حساسیت به تغییرات

به منظور بررسی حساسیت مدل به تغییرات پارامترهای موجود سیستم، در مدل هیدرولیکی مربوط به ایستگاه پمپاژ بوکان و پیرانشهر استفاده شد. این تغییرات در پارامتر سرعت موج در جدول ۵ نشان داده شده است. برای خط انتقال بوکان که طول کمتری دارد، با افزایش سرعت موج، مقدار فشار حداکثر افزایش یافته است به طوری که با ۵ درصد افزایش، به فشار حداکثر حاصل از داده‌های واقعی نزدیک شده است و با رسیدن این مقدار به ۱۰ برای خط انتقال پیرانشهر با طول بیشتر نیز، به طور مشابه با رسیدن این مقدار به ۱۰ درصد فشار، از حداکثر حاصل از داده‌های واقعی گذشته و به مقدار ۱۹۳/۴ مترآب رسیده است. در حالت کاهش ۵ و ۱۰ درصد سرعت موج در مدل بوکان، حداکثر فشار کاهش و به عدد ۱۷۱/۵ و ۱۸۵/۵ مترآب تغییر



۲۴ و ۲۵ تغییرات فشار حداکثر و حداقل خط انتقال بوکان و پیرانشهر نسبت به تغییرات سرعت موج به صورت خطی ترسیم و رگرسیون خطی آنها نشان داده شده است. مطابق شیب خط رگرسیون، برای بوکان با افزایش و کاهش سرعت موج مقدار فشار حداکثر، افزایشی و مقدار فشار حداقل، کاهش یافته است. شدت تغییرات در کاهش موج بیشتر از حالت افزایشی موج است. در پیرانشهر با افزایش سرعت موج مقدار حداکثر فشار افزایش و مقادیر حداقل فشار کاهش یافته است. با کاهش سرعت موج، حداکثر فشارها کاهش و حداقل فشارها افزایش یافته است.

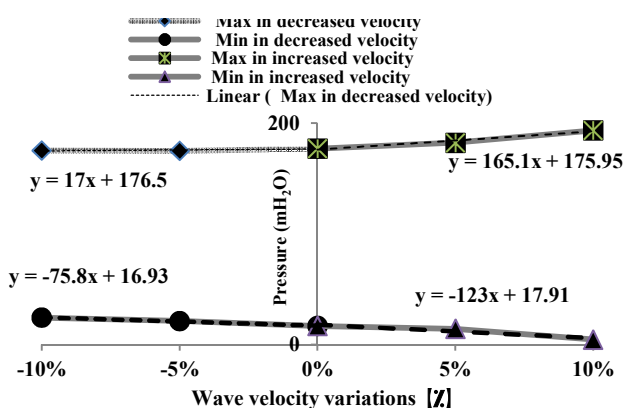


Fig.24. Variation of pressure to wave velocity in Piranshahr

شکل ۲۴- تغییرات فشار نسبت به تغییرات سرعت موج پیرانشهر

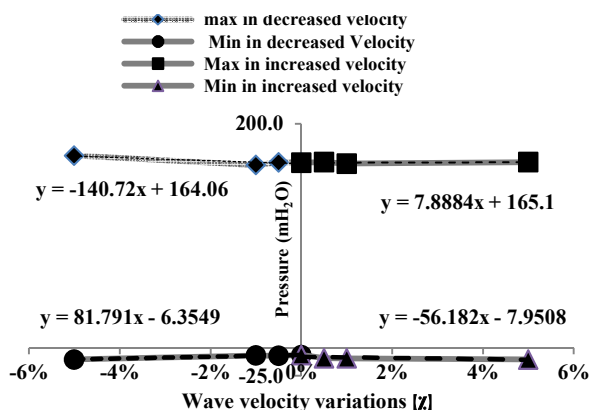


Fig.25. Variation of pressure to wave velocity in Bukan
شکل ۲۵- تغییرات فشار نسبت به تغییرات سرعت موج بوکان

۴- نتیجه‌گیری

مقایسه داده‌های واقعی حاصل از فشارسنجی در سیستم انتقال آب با ایستگاه پمپاژ و نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی توسط نرم‌افزار

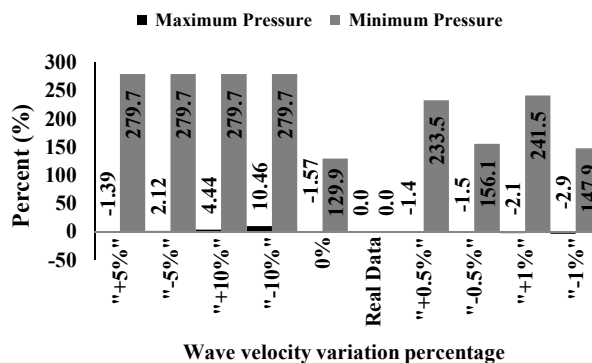


Fig. 22. Pressure changes percentage for actual data in Bukan

شکل ۲۲- درصد تغییرات فشار نسبت به داده‌های واقعی بوکان

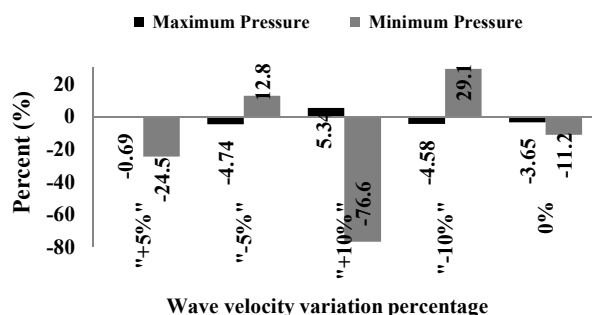


Fig. 23. Pressure changes percentage for actual data in Piranshahr

شکل ۲۳- درصد تغییرات فشار نسبت به داده‌های واقعی پیرانشهر

در پیرانشهر کاهش سرعت موج باعث افزایش مقدار حداقل فشار به بیش از مقدار واقعی و مقدار مدل ناپایدار و تیکوفسکی شده است در خطوط انتقال بوکان و پیرانشهر، درصد اختلاف فشارهای حداکثر خیلی کمتر از مقدار درصدی اختلاف فشارهای حداقل است.

در مقدار حداقل فشار، درصد اختلاف خطا در مدل اولیه، با ۱۲۹/۹ درصد خطا نسبت به داده‌های واقعی نشان داده است که با افزایش سرعت موج مقدار اختلاف خطا نیز افزایش می‌یابد. کاهش سرعت موج نیز روند افزایش اختلاف مثبت را برای حداقل فشارها بیان نموده است. این در حالی است که در خط انتقال پیرانشهر با افزایش سرعت موج، فشار حداکثر افزایش یافته و با کاهش سرعت موج این تغییرات روند کاهشی به خود گرفته است. مقدار فشار حداقل پیرانشهر، با افزایش سرعت موج، کاهشی بوده و با کاهش سرعت موج فشار حداقل روند افزایشی داشته است. در شکل‌های

بنتلی هم‌مر ۸ مشخص نموده است که:

- ۱- خطای فشار داده‌های واقعی و شبیه‌سازی شده با روش محاسبه افت ناپایدار ویتکوفسکی، خطای کمتری نسبت به سایر روش‌های محاسبه افت برای کل داده‌ها دارد.
- ۲- در خط انتقال با طول کمتر، حداکثر فشار گذرا در پریود اول رخ نداده ولی در خط انتقال با طول زیاد حداکثر فشار در اولین پریود به وقوع پیوسته است.
- ۳- مقدار حداقل فشار در خط انتقال با طول زیاد (پیرانشهر) در پریود اول ایجاد شده در حالی که برای خط انتقال بوکان حداقل فشار در پریود اول ایجاد نشده است.
- ۴- در خطوط انتقال، افزایش سرعت موج بر فشارهای حداکثر اثر مستقیم و بر فشارهای حداقل اثر معکوس داشته است.
- ۵- در خط انتقال کوتاه‌تر (بوکان) کاهش سرعت موج بر فشارهای حداکثر اثر معکوس و بر فشارهای حداقل اثر مستقیم داشته است.
- ۶- در خط انتقال طولانی‌تر، (پیرانشهر) کاهش سرعت موج بر فشارهای حداکثر اثر مستقیم و بر فشارهای حداقل اثر معکوس

داشته است.

۷- خط انتقال با طول کمتر، نوسانات فشار سریع‌تری نسبت به خط انتقال طولانی‌تر داشته است.

۸- خط انتقال با طول بیشتر، احتمال تخریب بالاتری نسبت به خط انتقال کوتاه‌تر دارد.

۹- در همه روش‌های محاسبه افت، تطابق از نظر پریود زمانی در زمان‌های ابتدایی وقوع جریان گذرا برای هر دو ایستگاه وجود دارد ولی با گذر زمان این تطابق در ایستگاه پمپاژ بوکان از بین رفته و نتایج شبیه‌سازی دچار تاخیر زمانی شده است، در حالی که برای پیرانشهر تطابق پریودهای زمانی تا انتها حفظ شده است.

۵- قدردانی

این پژوهش با حمایت و همکاری شرکت آب و فاضلاب شهری آذربایجان غربی انجام شده که از مسئولان محترم آن شرکت قدردانی می‌شود.

References

- Chaudhry, M.H., 2014, *Applied hydraulic transients*, 3rd Ed., Springer, New York, Heidelberg Dordrecht London.
- Delgado, J.N., Martins, N.M.C. & Covas, D.I.C., 2014, "Uncertainties in hydraulic transient modeling in raising pipe systems: Laboratory case studies", *Procedia Engineering*, 70, 487-496.
- Dallali, M., Guidara, M.A., Bouaziz, M.A., Schmitt, C., Haj-Taieb, E. & Azari, Z., 2015, "Accuracy and security analysis of transient flows in relatively long pipelines", Published by Elsevier Ltd. *Engineering Failure Analysis*. <http://dx.doi.org/10.1016/j.engfailanal.2015.03.001>. 1350-6307/_ 2015 Elsevier Ltd.
- El-Turki, A., 2013, "Modeling of hydraulic transients in closed conduits", MSc Thesis, University of Fort Collins, Colorado, USA.
- Najmaei, M., 1995, *Water Hammer*, Tehran, Iran.
- Nucci, D. & Russo Spena, A., 2015, "On transient liquid flow", *Meccanica*, DOI 10.1007/s11012-015-0352-4 Springer Science+Business Media Dordrecht.
- Nault, J. D., Karney, B. W. & Jung, B., 2016, "Algebraic water hammer: Global formulation for simulating transient pipe network hydraulics", *World Environmental and Water Resources Congress*, American Society of Civil Engineers (ASCE), 19020.
- Taebi, A. & Chamani, R., 2006, *Water distribution systems*, 2th Ed., Isfahan University of Technology. Isfahan, Iran. (In Persian)
- Triki, A., 2015, "Water-hammer control in pressurized-pipe flow using an in-line polymeric short-section", *Acta Mech*, DOI: 10.1007/s00707-015-1493-1. Springer-Verlag Wien.

