

## Research Paper

## Investigation of transient flow field data in water transmission mains using Bentley Hammer software (Case Study)

Ali.Reza. Khoshfetrat<sup>1</sup>,Rasul. Daneshfaraz<sup>2</sup>,Javad. Behmanesh<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup> M.Sc. Graduate of Civil Eng.- Hydraulic Structures, Faculty of Engineering, University of Maragheh ,Iran , Alirezakhoshfetrat@yahoo.com

<sup>2</sup> Prof. of Civil engineering, Faculty of Engineering, Civil Eng. Dep., University of Maragheh, Iran, daneshfaraz@yahoo.com

<sup>3</sup> Prof. of Water engineering Department, Urmia University , Iran, j.behmanesh@urmia.ac.ir,(\*Corresponding Author)



10.22125/IWE.2020.229048.1344

Received:  
**April.29.2020**  
Accepted:  
**October.13.2020**  
Available online:  
**October.05.2022**

**Keywords:**  
**Bentley Hammer,**  
**Conveyance lines,**  
**Piranshahr, Pumping**  
**satation, Unsteady**  
**flow**

### Abstract

Water transmission systems consist of storage reservoirs, pumping stations and pipelines. Pump station power failure, opening and closing of control valves and pipe rupture because transient conditions in pipelines. Transient flow principal equations such as momentum and continuity equations are mainly analyzed by the method of characteristics using engineering software and under boundary conditions. In this study, friction head losses were calculated by Bentley Hammer software under steady, quasi steady, unsteady and unsteady-Vitkovsky states and the results were compared. In Piranshahr water transmission system, the pressure changes were measured using a rapid and sensitive pressure indicator at the pumping station and under critical conditions of electricity power failure. Field data were compared to the Bentley Hammer output data using statistical methods. A comparison between the two, demonstrated the correspondence of time periods. Under unsteady-Vitkovsky method, the mean absolute errors were 5.13 and 5.45 mH<sub>2</sub>O for the initial stages and full period of data logging, respectively. For the maximum pressures values, the maximum difference was observed in the unsteady method (-14.62 mH<sub>2</sub>O) and the least values were associated with the steady and quasi steady method (-4.58 and -4.56m H<sub>2</sub>O respectively). As for the minimum pressures, the steady method yielded the highest (-5.55 mH<sub>2</sub>O) and the unsteady method the lowest difference (-1.52 mH<sub>2</sub>O). Increasing and decreasing the wave speed directly affected the maximum pressures while having an inverse impact on the minimum values. Based on the results of this study, the use of unsteady-Vitkovsky method in hydraulic modeling is recommended.

## 1. Introduction

In a water pipeline under steady flow conditions, flow variations are constant. Abrupt changes of control systems such as power failure or pipes rupture, cause unsteady condition. During unsteady conditions rapid fluctuations include enormous pressure differences occur, hence disastrous collapses

in hydraulic systems and water mains. The complicity of analytical solving of the unsteady flow principal equations such as momentum and continuity equations leads to use numerical methods. This is a necessity to evaluate and recognize control methods of possible high pressures in hydraulic systems. Plenty of engineering soft-wares are using to simulate unsteady flow and design of pipelines. Understanding of these simulations outputs is essential for engineers to comprehension of transient hydraulic phenomenon and engineering judgment. Use of characteristics method in a computer program declared that Poisons factor and Elasticity module affect pressure variations in a pipeline. Owing to the low elasticity module of pipe's material wave celerity reduces, which causes to reduction of water hammer impact in pipes. (Kandil et al., 2020) Comparing outputs of experimental and computer programming with Crank Nikelson method elucidate acceptable results. Characteristics method consist of fewer calculation steps in comparison of Nikelson method and results are more accurate. (Behroozi et al., 2020)

## 2. Materials and Methods

This research concentrates on a pump station in Piranshar situated in West Azerbaijan province at the North West of Iran. Analyzing of transient flow is done by Bentley Hammer V8i which is suitable for water pipelines design and able to design of transient wave control systems. Characteristics method is used to solve primary water hammer equations and the software uses this method. The software uses four methods to calculate unsteady conditions head loss consist of Steady, Semi Steady, Unsteady and Unsteady Vitkovsky. Digital Pressure transmitter and data logger is used to log data. The transmitter pressure sense range is between -1 to +40 Bars with 4 to 20 mA output signal. Due to the occurrence of maximum pressure at the start point of the pipe line, the transmitter installed in the end of the pump station discharge collector pipe. While the pumps are working and the flow regime is steady, recording of data is started and by turning the pumps off unsteady condition starts and after a while the process of data registering is cut down. The pressure data are registered in 245 samples per second rate with data logger. The statistical methods of RMSE and MAE are used to compare field and simulation output data. The water main diameter is 500 mm and the material of pipes includes Ductile Iron, Steel and Asbestos cemented with 6270 m of long.

## 3. Discussion and Conclusion

Based on field pressure data and calibrated simulation outputs with Bentley hammer software at the end point of discharge collector, results are demonstrated as graphs for two periods of 0 to 30 second and 0 to 230 seconds for different methods of head loss calculation. From the graphs It is obvious that there is close superficial correspondence between field data and hydraulic model results. Errors investigated by two procedure present that Unsteady Vitkovsky method has superior outputs in comparison with other methods in time period of 0 to 230 second. The method of head loss calculation does not affect results at initial times. Owing to considering of unsteady conditions in head loss calculations for Unsteady Vitkovsky method optimal results are reached in this way. At initial times the differences of maximum amounts are similar for filed data and simulation results in each method which elucidates the occurrence of maximum transient pressure at first 24 second. The greatest difference for maximum pressures are achieved with Unsteady method (-7.96% of errors) and the lowest difference related to Steady and Semi Steady methods (-2.48%). Unsteady Vitkovsky method situated between other methods by -3.65% of error. For the maximum pressures values, the maximum difference is observed in the unsteady method (-14.62 mH<sub>2</sub>o) and the least values are associated with the steady and quasi steady method (-4.58 and -4.56m H<sub>2</sub>o respectively). As for the minimum pressures, the steady method yielded the highest (-5.55 mH<sub>2</sub>o) and the unsteady method the lowest difference (-1.52 mH<sub>2</sub>o). Increasing and decreasing the wave speed directly affected the maximum pressures while having an inverse impact on the minimum values

#### 4. Results

Transient flow occurrence causes more pressure than steady flow in water mains. Investigations on field pressure data and simulation outputs errors by statistical methods for Piranshahr pipe lines demonstrate that the Unsteady Vitkovsky method of head loss calculating had lower errors than other methods. Research on the amounts of maximum and minimum pressures illustrates the utmost numbers had lower errors in comparison with smallest numbers. Due to the lower quantities of minimum pressures, net difference is not great figures. Calculating of head loss in transient conditions by using of the Unsteady Vitkovsky method is preferred to other methods and recommended to practice in hydraulic model preparation.

#### 5. Six important references

1. Behroozi, Abdol Mahdi. Vaghefi, Mohammad, 2020. Numerical simulation of water hammer using implicit Crank-Nicolson Local Multiquadric Based Differential Quadrature. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*. Volume 181, March 2020, 104078
2. Chaudhry, M.H. 2014. *Applied hydraulic transients*. Springer New York Heidelberg Dordrecht, London, Third Edition. 583p
3. Delgado, J.N. Martins, N.M.C. Covas, D.I.C. 2014. *Uncertainties in hydraulic transient modeling in raising pipe systems: laboratory case studies*. Elsevier Ltd Published by Elsevier Ltd. *Procedia Engineering* 70 : 487 – 496
4. El-Turki, A. 2013. *Modeling of Hydraulic Transients in Closed Conduits*, MS Thesis, University of Fort Collins, Colorado, USA
5. Kandil, M. Kamal, A.M. El-Sayed, T.A., 2020. Effect of pipe materials on water hammer. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*. Volume 179, January 2020, 103996
6. Wylie E B and Streeter V L, 1993. *Fluid Transients in Systems*. Prentice Hall. Englewood Cliffs. USA.

#### Conflict of Interest

Authors declared no conflict of interest.



## بررسی داده‌های واقعی جریان گذرا در خطوط لوله انتقال آب با استفاده از نرم‌افزار بنتلی‌همر (مطالعه موردی)

علیرضا خوش فطرت<sup>۱</sup>، رسول دانشفراز<sup>۲</sup>، جواد بهمنش<sup>۳</sup>

تاریخ ارسال: ۱۳۹۹/۰۲/۱۰

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۷/۲۲

### مطالعه موردی

#### چکیده

سیستم‌های انتقال آب متشکل از مخازن ذخیره، ایستگاه‌های پمپاژ و خطوط لوله می‌باشند. خاموشی ناگهانی ایستگاه‌های پمپاژ، باز کردن و بستن شیرهای کنترلی و شکستگی لوله‌ها، باعث ایجاد حالت گذرا در خطوط انتقال می‌شود. معادلات اصلی جریان گذرا شامل مومنوم و پیوستگی با استفاده از روش مشخصه‌ها و با لحاظ شرایط مرزی بوسیله نرم‌افزارهای مهندسی تحلیل می‌شوند. در پژوهش حاضر، افت اصطکاکی حالت گذرا با چهار روش پایدار، شبه پایدار، ناپایدار و ناپایدار ویتکوفسکی با نرم‌افزار بنتلی‌همر محاسبه شده و مورد مقایسه قرار گرفت. در سیستم انتقال آب شهر پیرانشهر در محل ایستگاه پمپاژ و در شرایط بحرانی قطع جریان برق، با فشارسنج حساس و سریع، فشارسنجی شد. داده‌های ثبت شده با خروجی نرم‌افزار بنتلی‌همر و با استفاده از روش‌های آماری مقایسه گردید. نتایج شبیه‌سازی و داده‌های واقعی حاکی از انطباق پریودهای زمانی است. در حالت محاسبه افت به روش ناپایدار ویتکوفسکی، خطای متوسط مطلق مقادیر فشار در زمان‌های اولیه برابر ۵/۱۳ متر آب و در محدوده زمانی داده‌برداری ۵/۴۵ مترآب بدست آمد. برای مقادیر حداکثر فشار، بیشترین اختلاف مربوط به روش محاسبه ناپایدار (۱۴/۶۲- مترآب) و کمترین اختلاف مربوط به دو روش محاسبه پایدار و شبه پایدار (به ترتیب ۴/۵۸- و ۴/۵۶- مترآب) بود. بیشترین اختلاف مقادیر حداقل فشار برای روش پایدار بوده (۵/۵۵- مترآب) و کمترین آن برای روش ناپایدار (۱/۵۲- مترآب) بدست آمد. افزایش و کاهش سرعت موج بر فشارهای حداکثر اثر مستقیم و بر فشارهای حداقل اثر معکوس دارد. استفاده از روش ناپایدار ویتکوفسکی در تهیه مدل هیدرولیکی پیشنهاد می‌گردد.

واژه‌های کلیدی: ایستگاه پمپاژ، بنتلی‌همر، پیرانشهر، جریان غیرماندگار، خطوط انتقال

<sup>۱</sup> کارشناسی ارشد مهندسی عمران - سازه‌های هیدرولیکی، دانشگاه مراغه، ایران، ۰۹۱۴۳۸۹۵۱۰۵، Alirezakhoshfetrat@yahoo.com

<sup>۲</sup> استاد گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه مراغه، ایران، ۰۹۱۴۳۲۰۲۱۲۶، daneshfaraz@yahoo.com

<sup>۳</sup> استاد گروه مهندسی آب، دانشگاه ارومیه، ایران، ۰۹۱۴۱۴۶۰۲۷۲، j.behmanesh@urmia.ac.ir (نویسنده مسئول)

## مقدمه

در سیستم خط لوله تحت شرایط حثت پلیدار، 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 شروع شده و قبل از برقراری حالت پلیدار جدید در سیستم خط لوله، در یک بازه زمانی محدود، حالت گذرا ایجاد می‌شود. پدیده‌ای که مربوط به جریان با این چنین تغییرات سریع است هیدرولیک گذرا یا حالت گذرای جریان سیال نامیده می‌شود. در زمان وقوع حالت گذرا در یک سیستم، نوسانات سریع و با اختلاف زیاد فشار اتفاق افتاده که می‌تولند باعث خرابی فاجعه بار در سیستم خطوط لوله و تاسیسات هیدرولیکی گردد.

مدل‌های عددی بطور گسترده جهت مطالعه هیدرولیک گذرا استفاده می‌شوند چرا که حل تحلیلی معادلات حاکم بر جریان‌های گذرا مشکل می‌باشد. یک مدل عددی کارآمد، بایستی توانایی تحلیل پتانسیل وقوع هیدرولیک گذرا را داشته باشد. این امر جهت تشخیص و ارزیابی روش‌های کنترلی برای فشارهای اضافی ممکن در سیستم لازم می‌باشد. نرم افزارهای تجاری مختلفی برای شبیه سازی هیدرولیک گذرا وجود دارند که می‌توانند برای طراحی خطوط لوله شبکه‌های پیچیده و نیز در مطالعات بکار روند. برای مهندسی هیدرولیک، فهم پدیده هیدرولیک گذرا جهت امکان ارزیابی نتایج خروجی شبیه‌سازی‌ها و قضاوت مهندسی صحیح، لازم می‌باشد.

(نجمایی، ۱۳۷۴) مطالعات جدی در مورد چگونگی حرکت مایع در مجاری بسته که سرعت سیال درون آن به طور ناگهانی تغییر می‌یابد، در اواخر قرن نوزدهم میلادی توسط یک دانشمند روسی بنام ژاکوفسکی پی‌گیری شد. از سال ۱۹۳۰ مطالعه جریان‌های گذرا با شتاب بیشتری ادامه یافت و تحقیقات ارزشمندی به انجام رسید. جان پارماکیان در سال ۱۹۵۵ کتابی را در زمینه ضربه قوچ منتشر کرد. همزمان، تکنیک کاربرد کامپیوتر در مهندسی و ابداع روش مشخصه‌ها در حل معادلات پیوستگی و

مومنتوم موجب شد در بیشتر قسمت‌های لاینحل مسائل ضربه قوچ، راه حل‌های دقیقی بدست آید.

(پارسا صدر و همکاران، ۱۳۹۳) به بررسی ضربه قوچ ناشی از خاموشی گام به گام و همزمان پمپ‌ها در سیستم پمپاژ سری با پمپ‌های متفاوت، پرداختند و نتایج آنها نشان داد که در صورت توقف گام به گام پمپ‌ها نسبت به حالت توقف ناگهانی کل پمپ‌های ایستگاه پمپاژ، فشار کمتری به سیستم وارد می‌شود (۸۳ متر آب به ۷۸ متر آب کاهش است). زمانی که در ابتدا پمپ قوی خاموش گردد، حداقل فشار افزایش (از ۲۰- به صفر متر آب افزایش) و حداکثر فشار کاهش (از حدود ۷۹ به ۷۵ متر آب کاهش) می‌یابد. زمانی که ابتدا پمپ قوی خاموش گردد نسبت به حالت خاموشی پمپ ضعیف (در ابتدا)، فشارهای بحرانی وارده بر سیستم تا چندین برابر کاهش می‌یابد.

(El-Turki, 2013) در مطالعه مدل هیدرولیک جریان گذرا در مجاری بسته، با استفاده از نرم‌افزار بنتلی همبر بخشی از مسیر خط انتقال آب در کشور لیبی با قطر ۴۰۰۰ میلیمتر که در اثر ضربه قوچ ناشی از بسته شدن ناگهانی شیر تخریب گردیده بود را مدل نمود. نتایج نشان داده که فشار در محل تخریب لوله ۲ بار (حدود ۲۰٪) بیشتر از فشار کاری لوله بوده و موجب تخریب لوله شده است.

(Kandil et al., 2020) با برنامه نویسی و استفاده از روش مشخصه‌ها، تغییرات فشار در لوله تحت تاثیر تغییرات مدول الاستیسیته و ضریب پواسون را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج حاصله نشان داد که فشار گذرا تحت تاثیر مستقیم تغییرات ضریب پواسون و مدول الاستیسیته بر اساس جنس لوله می‌باشد. بر این اساس مواد با مدول الاستیسیته کم باعث کاهش سرعت موج و در نتیجه موجب کاهش اثر ضربه قوچ در لوله‌ها می‌گردد. لوله فولادی در مقایسه با لوله صلب ۵۸٪ کاهش سرعت موج داشته است.

(Behroozi et al., 2020) با مقایسه نتایج دو نمونه آزمایشگاهی ضربه قوچ با نتایج برنامه نویسی با استفاده از روش کرانک نیکلسون دریافتند که نتایج قابل قبولی از این روش و نتایج داده‌های واقعی آزمایشگاهی به دست می‌آید. همچنین با مقایسه نتایج محاسباتی حاصل از

بهره‌برداری، بررسی علمی و عملی این موضوع ضرورت دارد. فشار بالای ضربه‌ای غیر مجاز، قابل مشاهده نبوده و در اغلب موارد اثر آن تا زمان زیادی پس از وقوع قابل مشاهده نیست و صدمات ناشی از آن پنهان بوده و خسارات جبران ناپذیری به سیستم وارد نموده و لوله و اتصالات و متعلقات مورد استفاده در خطوط انتقال و شبکه‌های توزیع آب، در اثر پدیده خستگی مصالح به مرور ضعیف گردیده و نهایتاً تخریب می‌گردند. شناسایی رفتار علمی این پدیده با استفاده از شبیه‌سازی عددی در نرم افزار و مقایسه با نتایج عملی حاصله از سنجش میدانی فشار، کمک شایانی به طراحی و اجرای طرح‌های بهینه خواهد نمود.

## مواد و روش‌ها

### منطقه طرح

ایستگاه پمپاژ بررسی شده در این تحقیق در شهر پیرانشهر واقع در استان آذربایجان غربی و در شمال غرب ایران قرار گرفته است. شکل ۱ منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد. مختصات جغرافیایی جهانی محل ایستگاه پمپاژ برابر ۵۱۳۹۵۰ متر شرقی و ۴۰۵۷۴۴۵ متر شمالی می‌باشد

روش مشخصه‌ها در مقایسه با روش نیکلسون، که دارای مراحل محاسباتی کمتری می‌باشد، نتایج با دقت حاصل نمودند.

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

(کیانی و همکاران، ۱۳۹۷) با مدل سازی اثرات ویسکو الاستیک در لوله‌های پلیمری در جریان گذرا در آزمایشگاه و با به کارگیری روش تحلیل معکوس جریان گذرا و استفاده از روش الگوریتم ژنتیک دریافتند که مدل کلاسیک ضربه قوچ به هیچ عنوان قادر به شبیه‌سازی نوسانات فشار در لوله‌های پلی اتیلنی نمی‌باشد و در مدل سازی می‌بایست اثرات دینامیکی افت ناماندگار و ویسکو الاستیک لحاظ گردد تا پاسخ‌های قابل قبولی حاصل شود.

به دلیل خطرات ناشی از تغییرات فشار ناشی از ضربه قوچ سیستم‌های انتقال آب، جهت کاهش هزینه‌ها و جلوگیری از خروج موقت این سیستم‌ها از مدار



شکل (۱): موقعیت منطقه طرح

### معرفی نرم افزار بنتلی همر

این نرم افزار برای سیستم‌های پمپاژ و شبکه لوله‌ها مناسب بوده و قادر به طراحی سیستم‌های کنترل موج می‌باشد. حالت گرافیکی بنتلی همر کار را برای ارائه سریع شبکه‌های پیچیده لوله‌ها، مخازن، پمپ‌ها و تجهیزات کنترل موج آسان می‌کند. همچنین برای تسریع شبیه‌سازی، از جداول آماده یا اطلاعات کتابخانه‌ای پارامترهای مورد نیاز می‌توان استفاده نمود. برای حل معادلات اساسی ضربه قوچ، از روش مشخصه‌ها استفاده می‌شود، بنتلی 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 می‌باشد 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 بدست می‌آید. در بنتلی همر آنالیز هیدرولیک گذرا معمولاً با محاسبات شرایط اولیه (حالت ماندگار) که هد و جریان را برای هر لوله درسیستم محاسبه می‌کند شروع می‌شود. قبل از شروع محاسبات حالت گذرا، همر بطور اتوماتیک بر اساس وضعیت سیستم، نحوه محاسبه ضریب اصطکاک مورد نیاز را شناسایی می‌کند. این برنامه در ابتدا بصورت اتوماتیک از روش دارسی ویسباخ ضریب اصطکاک را بر اساس هدهای انتهای هر لوله، طول لوله، قطر و جریان در لوله محاسبه می‌کند.

### معادلات حاکم بر نرم‌افزار

معادلات ضربه قوچ ترکیب معادلات مومنوم و پیوستگی در جریان گذرا بوده و بصورت معادله دیفرانسیل جزئی با روابط زیر بیان می‌گردند.

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

$$a^2 \frac{\partial v}{\partial s} + \frac{1}{\rho} \frac{dp}{dt} = 0 \quad (۲) \text{ پیوستگی}$$

$V$  سرعت متوسط جریان،  $t$  زمان،  $\rho$  جرم مخصوص سیال،  $P$  فشار،  $s$  فاصله المان،  $g$  شتاب ثقل،  $Z$  تراز ارتفاعی،  $f$  ضریب دارسی ویسباخ،  $D$  قطر لوله و  $a$  سرعت موج می‌باشند.

معادلات مشخصه ضربه قوچ بر اساس هد و سرعت مطابق رابطه (۳) می‌باشند:

$$\begin{cases} \frac{dv}{dt} + \frac{g}{a} \frac{dH}{dt} + \frac{f}{2D} V|V| = 0 & \frac{ds}{dt} = a \quad C^+ \\ \frac{dv}{dt} - \frac{g}{a} \frac{dH}{dt} + \frac{f}{2D} V|V| = 0 & \frac{ds}{dt} = -a \quad C^- \end{cases} \quad (۳)$$

با استفاده از روش تفاضل‌های محدود معادلات اساسی به صورت زیر گسسته سازی می‌شوند.

$$(V_{pi} - V_{i-1}) + \frac{g}{a} (H_{pi} - H_{i-1}) + \frac{f\Delta t}{2D} V_{i-1}|V_{i-1}| = 0 \quad C^+ \quad (۴)$$

$$(V_{pi} - V_{i+1}) - \frac{g}{a} (H_{pi} - H_{i+1}) + \frac{f\Delta t}{2D} V_{i+1}|V_{i+1}| = 0 \quad C^- \quad (۵)$$

شرایط مرزی برای پمپ با سرعت ثابت بصورت یک معادله مرتبه دو از دبی آن بصورت معادله ۶ می‌باشد.

$$hp = A'pQ^2 + B'pQ + C'p \quad (۶)$$

در رابطه فوق  $Q$  دبی پمپ،  $hp$  افزایش هد توسط پمپ می‌باشد. با جایگزینی این دو مشخصه با مقادیر معادل مناسب فرم معادله بصورت معادله ۷ تبدیل می‌گردد.

$$Hp_1 = ApVp_1^2 + BpVp_1 + Cp \quad (۷)$$

با توجه به اینکه اغلب منحنی مشخصه پمپ بصورت مقعر بوده و شیب آن با افزایش  $Q$  به طرف پائین می‌باشد. مقادیر  $Ap < 0$ ،  $Bp < 0$ ،  $Cp > 0$  می‌باشند و از این اطلاعات برای شرایط مرزی استفاده خواهد شد. با حذف  $Hp_1$  از معادلات ۷ و معادله ۵ خواهیم داشت.

$$Vp_1 - V_2 - \frac{g}{a} (ApVp_1^2 + BpVp_1 + Cp) + \quad (۸)$$

$$\frac{g}{a} H_2 + \frac{f\Delta t}{2D} V_2|V_2| = 0$$

پس از بازنویسی معادله ۸ معادله نهایی به فرم معادله ۹ منتج می‌گردد.

$$\begin{aligned} & \left( \frac{g}{a} Ap \right) Vp_1^2 + \left( \frac{g}{a} Bp - 1 \right) Vp_1 + \\ & \left( V_2 + \frac{g}{a} Cp - \frac{g}{a} H_2 - \frac{f\Delta t}{2D} V_2|V_2| \right) = 0 \quad (۹) \end{aligned}$$

مقادیر  $Ap$  و  $Bp$  و  $Cp$  ثابت بوده و بسته به نوع پمپ از روی منحنی مشخصه پمپ یا کاتالوگ سازنده قابل



می‌باشد. دقت بر اساس روش بهترین خط مستقیم مناسب برای دمای ۰ تا ۵۰ درجه سلسیوس برابر ۱٪ می‌باشد. داده‌های ارسال شده از سنسور فشار، توسط دستگاه ثبت کننده داده‌ها که در شکل ۲ دیده می‌شود، در حافظه دستگاه ثبت می‌گردد. در شکل‌های ۳ و ۴ سنسور فشار و نحوه نصب آن رور لوله کلکتور رانش ایستگاه پمپاژ نشان داده شده است.

### عملیات فشار سنجی

برای انجام عملیات فشار سنجی بر روی خطوط لوله موجود در ایستگاه پمپاژ، وجود محل اتصال سنسور بر روی کلکتور رانش ایستگاه پمپاژ ضروری است. در محل نصب سنسور روی کلکتور رانش وجود شیر قطع و وصل جریان از کلکتور به طرف سنسور ضرورت دارد. شیرهای موجود در این فشار سنجی از نوع شیر گازی ۱/۲ اینچی بوده و با یک تبدیل اتصال ۱/۴ اینچی سنسور به تبدیل ۱/۲ وصل و سپس به شیر متصل می‌شود

استخراج خواهد بود. با حل معادله درجه دوم مقادیر مورد نظر برای سرعت و هد فشاری حاصل می‌گردد.

### فشار سنجی

برای انجام فشار سنجی نیاز به دستگاه فشار سنج می‌باشد. در فشار نسبی، فشار زیر یک اتمسفر، فشار منفی در نظر گرفته می‌شود. وسایل اندازه گیری فشار معمولاً فشار نسبی را نشان می‌دهند از این رو فشار نسبی، فشار گیج نیز نامیده می‌شود. فشار سنج مورد استفاده در این تحقیق از نوع دیجیتالی و ساخت کارخانه کلسونیس بود. این سنسور با مدل PA-21Y انتخاب گردید و محدوده فشار این سنسور از ۱- تا ۴۰+ بار با سیگنال خروجی ۴ تا ۲۰ میلی آمپر بوده و دارای محدوده فرکانس ۲ کیلوهرتز و تغذیه ۸ تا ۳۲ ولت می‌باشد. محل اتصال فشار با قطر ۱/۴ اینچ بوده که با استفاده از یک تبدیل به سایز ۱/۲ اینچ به محل فشار سنجی وصل می‌گردد. قابلیت پاسخ دهی سنسور زیر ۵ میلی ثانیه



شکل (۴): نصب سنسور فشار

سنسور به دستگاه ثبت داده را وصل نموده و با روشن نمودن دستگاه و تعداد داده‌های مورد نظر در هر ثانیه جهت ثبت انتخاب می‌گردد.

در حالیکه پمپ‌های ایستگاه پمپاژ فعال بوده و حالت جریان یکنواخت در سیستم برقرار می‌باشد، 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 می‌باشد.



شکل (۳): سنسور فشار



شکل (۲): ثبت کننده داده‌ها

به دلیل وقوع حداکثر فشار در ابتدای مسیر خط لوله انتقال آب، محل نصب سنسور فشار در انتهای ترین نقطه کلکتور رانش ایستگاه پمپاژ انتخاب گردید. به دلیل اینکه نرم افزار محاسبات را برای محور مرکزی لوله انجام می‌دهد و سنسور فشار نصب شده دارای فاصله از محور لوله می‌باشد، اعداد حاصل از فشار سنجی با اضافه نمودن مقادیر مربوط به اندازه نصف قطر لوله رانش بعلاوه ارتفاع شیر واتصالات موجود تا سنسور فشار، اصلاح گردید. پس از اتصال سنسور به روی لوله کلکتور رانش، کابل اتصال



تا ۲۳۰ ثانیه برای روش‌های مختلف محاسبه افت حالت گذرا رسم شدند. با توجه به فاصله زمانی مربوط به داده‌های ثبت شده، در نرم‌افزار این فاصله زمانی جهت ارائه نتایج وارد می‌گردد. با استفاده از این برابری زمان‌ها، فشارهای حاصله با روش‌های آماری مورد مقایسه قرار گرفته و نتایج ارائه گردید. سایر ورودی‌های مورد نیاز نرم افزار از جمله سرعت موج، ممان اینرسی موتور و پمپ بصورت محاسبه‌ای یا از روی کاتالوگ‌های مربوطه و یا سایر منابع اطلاعاتی تهیه و در نرم‌افزار وارد شد.

### خط انتقال و ایستگاه پمپاژ پیرانشهر

این ایستگاه دارای چهار پمپ از نوع WKL125/4a می‌باشد. با توجه به ترکیب (۳+۱) پمپ‌های این ایستگاه، همزمان سه پمپ کارکرد داشته و خطوط انتقال مربوطه برای دبی ۱۵۰ لیتر در ثانیه طراحی گردیده ولی از دو پمپ در انجام آزمایش فشار سنجی استفاده شده است. تراز نصب این پمپ‌ها در روی پایه‌های بتنی برابر ۱۴۰۵/۶ متر، تراز کلکتور رانش برابر ۱۴۰۷/۱۵ متر و تراز محل تخلیه در مخزن بالادست ۱۵۰۳/۷۹ متر می‌باشد. خط انتقال این سیستم با طول ۶۲۷۰ متر و از جنس چدنی و فولادی و آزیست سیمانی به قطر ۵۰۰ میلیمتر بوده و ۷ دستگاه شیر تخلیه هوا در فاصله مختلف از ایستگاه و از نوع دو روزنه با قطر فلنج ۱۰۰، قطر روزنه کوچک ۳ و قطر روزنه بزرگ ۸۰ میلیمتر نصب گردیده‌اند. جنس لوله‌ها در محل ایستگاه پمپاژ و در محل تخلیه به مخزن، فولادی و در محل قبل از تخلیه به مخزن از جنس آزیست سیمانی کلاس D می‌باشد. سایر قسمت‌های مسیر از جنس چدن استفاده شده است. در جدول ۱ سایر مشخصات سیستم ایستگاه پمپاژ و خط انتقال آورده شده است. پروفیل طولی مسیر خط لوله از ایستگاه پمپاژ تا مخزن در شکل ۵ آمده است. شیر یک‌طرفه استفاده شده در محل ایستگاه پمپاژ برای هر پمپ از نوع ضد ضربه قوچ فنردار با قطر ۲۵۰ میلیمتری باشند.

جهت ایجاد حالت ناپایدار، نسبت به قطع جریان برق پمپ‌ها بطور همزمان اقدام می‌گردد. با قطع جریان برق حالت گذرا شروع شده و اطلاعات مربوطه در حافظه ثبت می‌گردد. با توجه به اینکه زمان مورد نیاز برای ثبت داده‌ها به مقدار ۴۰ برابر  $L/a$  می‌باشد. این زمان رعایت می‌گردد.  $L$  طول کل خط انتقال و  $a$  سرعت موج است. پس از اتمام عملیات داده برداری این اطلاعات که با فرمت فایل متنی می‌باشند به نرم افزار صفحه گستر اکسل جهت ترسیم نمودارهای مورد نظر، منتقل می‌گردد. تعداد داده‌ها در این فشار سنجی برابر ۲۴۵ نمونه در ثانیه می‌باشد.

### آماره‌های خطا

جهت بررسی خطای موجود در نتایج حاصل از شبیه سازی نسبت به داده‌های واقعی و انتخاب مدل برتر از دو روش آماری میانگین خطای مطلق (MAE) و مجذور میانگین مربعات خطاها (RMSE) استفاده گردید. میانگین خطای مطلق با رابطه ۱۰ و مجذور میانگین مربعات خطاها با رابطه ۱۱ محاسبه می‌شود.

$$MAE = \sum |S - O| \quad (10)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum (O - E)^2}{n}} \quad (11)$$

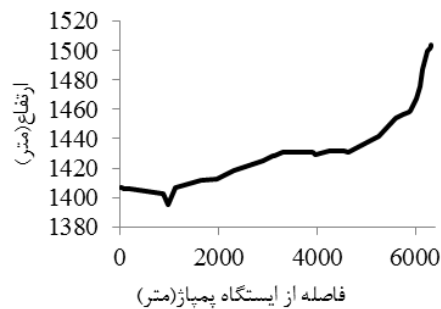
$S$  داده مربوط به مدل،  $O$  داده واقعی مشاهده شده،  $n$  تعداد داده‌ها و  $E$ : داده مربوط به مدل می‌باشد.

### شبیه‌سازی عددی

جهت بررسی نتایج داده‌های واقعی با نتایج حل عددی می‌بایست نتایج حاصله در یک نمودار بطور همزمان ترسیم و مورد بررسی قرار گیرند. با استفاده از قابلیت‌های نرم افزار بنتلی همگر که امکان رسم تغییرات فشار در محل هر گره را می‌دهد، نمودار مربوط به محل نصب فشار سنج را رسم و داده‌های آن منحنی به نرم افزار اکسل منتقل و همراه با داده‌های واقعی گراف‌های مربوط رسم گردید. گراف‌های مورد نیاز برای زمان‌های صفر تا ۳۰ ثانیه و صفر

جدول (۱): مشخصات ایستگاه پمپاژ پیرانشهر

مقدار	واحد	شرح
۹۶/۲	متر آب	فشار استاتیک
۱۰۱/۵	متر آب	فشار دینامیک
۱۱۰۰	متر در ثانیه	لوله فولادی
۱۱۳۰	متر در ثانیه	لوله چدنی
۸۴۵	متر در ثانیه	لوله آزیست سیمانی
-۸/۴۴	متر آب	فشار بخار آب
۶/۵	کیلوگرم متر مربع	اینرسی پمپ و موتور
۱۴۵۰	دور در دقیقه	سرعت چرخش موتور



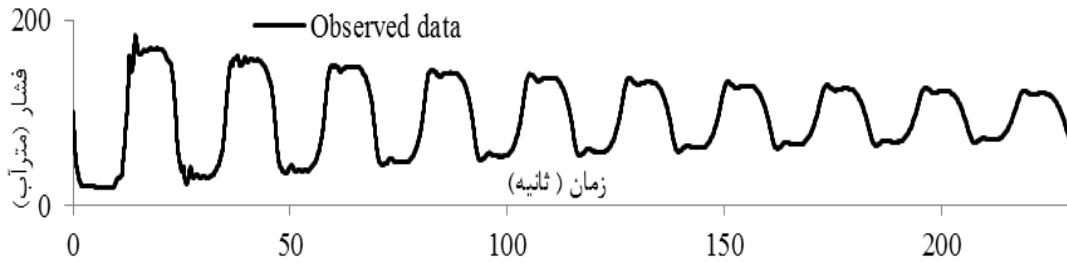
شکل (۵): پروفیل طولی خط انتقال

می‌شود در شکل ۷ تغییرات فشار در بازه زمانی صفر تا ۳۰ ثانیه برای داده‌های واقعی و نتایج حاصل از مدل به روش افت حالت پایدار نشان داده می‌شود. این تغییرات برای روش‌های افت متفاوت به ترتیب در شکل ۸ برای حالت شبه پایدار، در شکل ۹ برای حالت ناپایدار و در شکل ۱۰ برای حالت ناپایدار ویتکوفسکی نشان داده شده است. اشکال ۷ تا ۱۰ نشان می‌دهند که از نظر ظاهری تطابق قابل قبولی مابین داده‌های واقعی و نتایج حاصل از مدل وجود دارد. تفاوت‌های موجود در برخی نقاط حداقل و حداکثر ناشی از عدم وجود اطلاعات کافی احتمالی از تغییرات موجود در مسیر خط انتقال و یا جزئیات مد نظر قرار نگرفته در محل ایستگاه پمپاژ می‌باشد

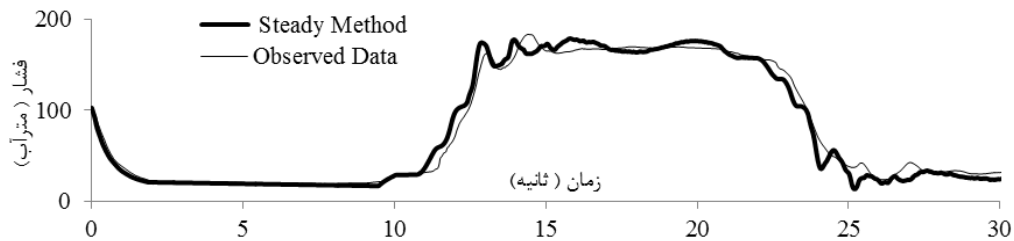
## نتایج و بحث

### بررسی مقادیر فشار در خط انتقال پیرانشهر

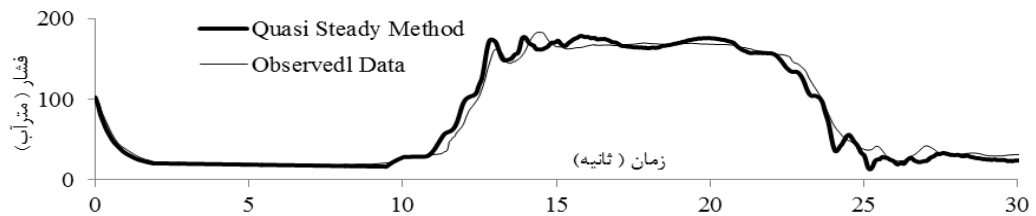
بر اساس نتایج حاصل از فشارسنجی فشار گذرا، در محل انتهای کلکتور رانش ایستگاه پمپاژ و نتایج حاصل از مدل هیدرولیکی کالیبره شده در نرم افزار بنتلی هم، نتایج بصورت گراف برای دو مرحله زمانی صفر تا ۳۰ ثانیه و صفر تا ۲۳۰ ثانیه برای روش‌های مختلف محاسبات افت ارائه و مورد بررسی قرار گرفته است. شکل ۶ تغییرات فشار واقعی در فاصله زمانی صفر تا ۲۳۰ ثانیه در محل ایستگاه پمپاژ را نشان می‌دهد. میرایی جریان بعد از خاموشی پمپ و زمان‌های وقوع حداقل و حداکثر فشار در این شکل دیده



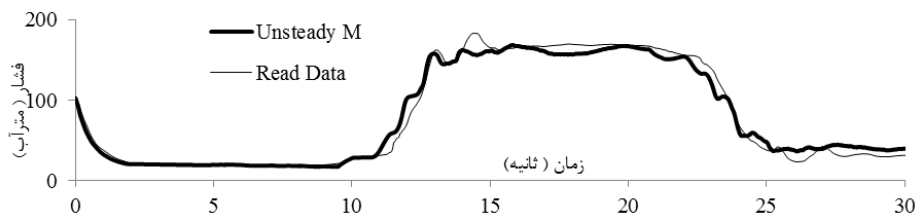
شکل (۶): تغییرات فشار حاصل از داده‌های واقعی روی کلکتور رانش ایستگاه پمپاژ



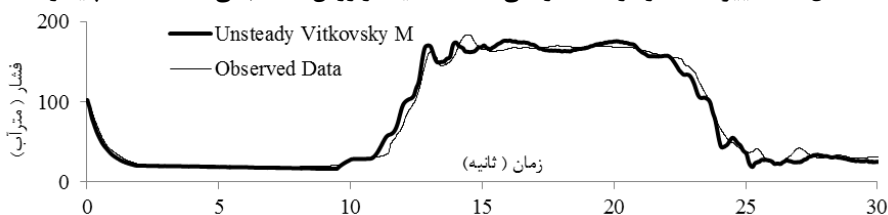
شکل (۷): تغییرات فشار در فاصله زمانی ۰ تا ۳۰ ثانیه در روش محاسباتی افت حالت پایدار



شکل (۸): تغییرات فشار در فاصله زمانی ۰ تا ۳۰ ثانیه در روش محاسباتی افت حالت شبه پایدار



شکل (۹): تغییرات فشار در فاصله زمانی ۰ تا ۳۰ ثانیه در روش محاسباتی افت حالت ناپایدار



شکل (۱۰): تغییرات فشار در فاصله زمانی ۰ تا ۳۰ ثانیه در روش محاسباتی افت حالت ناپایدار ویتکوفسکی اعداد

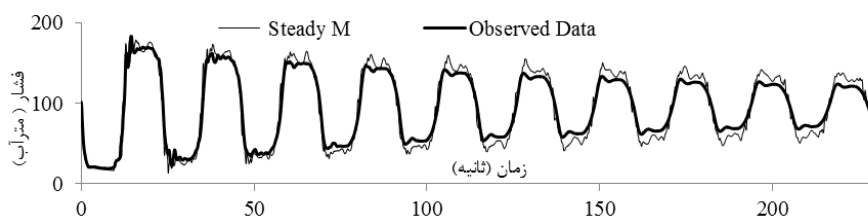
جدول (۲) نتایج آنالیز خطای فشار داده‌های واقعی و شبیه‌سازی شده (متر آب)

زمان (ثانیه)	۰-۲۴	
روش	RMSE	MEA
شبه پایدار	۷/۹۵۷	۵/۴۲
پایدار	۷/۹۶۴	۵/۴۲
ناپایدار	۸/۴۷۵	۵/۵۹
ناپایدار ویتکوفسکی	۷/۴۱۱	۵/۱۳

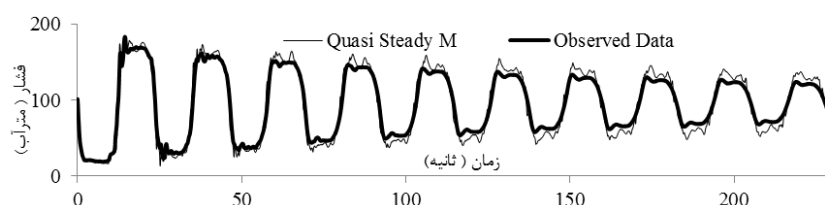
روش‌ها در محدوده زمانی صفر تا ۲۳۰ ثانیه ارائه نموده است.

با توجه به اینکه در زمان‌های اولیه اثرات روش محاسبه افت اصطکاکی زیاد تاثیر گذار نمی‌باشد اما به دلیل بهینه بودن روش افت اصطکاکی ناپایدار ویتکوفسکی به دلیل لحاظ شرایط ناپایدار در محاسبه افت‌ها علاوه بر شرایط حالت پایدار، این روش خطای کمتری نشان داده است. (Delgado et al., 2014)، نیز در مطالعات آزمایشگاهی که بر روی سیستم پمپاژ با لوله‌های فلزی و مسی انجام دادند به این نتیجه رسیدند که داده‌های حاصل شده از آزمایش خاموشی ناگهانی پمپ تطابق قابل قبولی با نتایج حاصل از برنامه نویسی انجام شده برای محاسبه فشار جریان گذرا با استفاده از روش افت ناپایدار ویتکوفسکی دارد. در شکل‌های ۱۱ تا ۱۴ تطابق خوبی از نظر پیروی زمانی با نمودار داده‌های واقعی وجود داشته ولی از نظر مقادیر حداکثر و حداقل فشارها اختلافاتی دیده می‌شود.

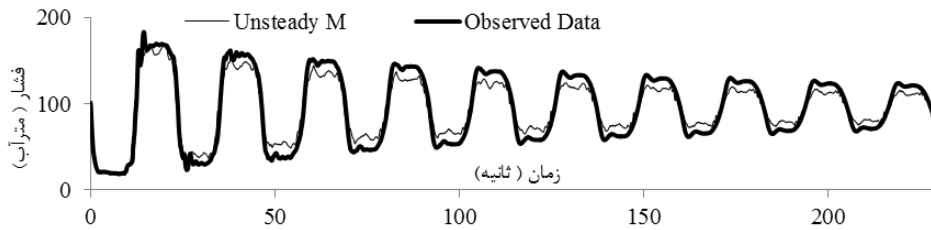
جدول ۲ نشان می‌دهند که خطا در روش محاسباتی میانگین خطای مطلق کمتر از روش مجذور میانگین مربعات خطاها است. با توجه به بررسی خطاهای ایجاد شده در مدت زمان صفر تا ۲۴ ثانیه با دو روش میانگین خطای مطلق و مجذور میانگین مربعات خطاها برای داده‌های واقعی و نتایج مدل، دیده می‌شود که به ترتیب روش‌های محاسبه افت جریان، گذرای ناپایدار ویتکوفسکی، شبه پایدار، پایدار و ناپایدار نتایج بهتری را ارائه داده‌اند در شکل‌های ۱۱ تا ۱۴ تغییرات فشار در محدوده زمانی صفر تا ۲۳۰ ثانیه به همراه داده‌های واقعی در این محدوده زمانی نشان داده شده است. شکل ۱۱ مربوط به تغییرات فشار ناشی از محاسبه افت به روش پایدار، شکل ۱۲ مربوط به روش شبه پایدار، شکل ۱۳ با روش ناپایدار و شکل ۱۴ مربوط به محاسبه افت به روش ناپایدار ویتکوفسکی می‌باشد. روش ناپایدار ویتکوفسکی برای هر دو حالت بررسی خطاها نتایج بهتری نسبت به سایر



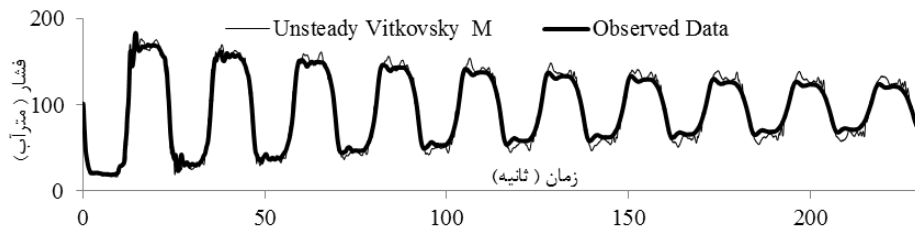
شکل (۱۱): تغییرات فشار در محدوده زمانی ۰ تا ۲۳۰ ثانیه برای حالت محاسبه افت به روش پایدار



شکل (۱۲): تغییرات فشار در محدوده زمانی ۰ تا ۲۳۰ ثانیه برای حالت محاسبه افت به روش شبه پایدار



شکل (۱۳): تغییرات فشار در محدوده زمانی ۰ تا ۲۳۰ ثانیه برای حالت محاسبه افت به روش ناپایدار

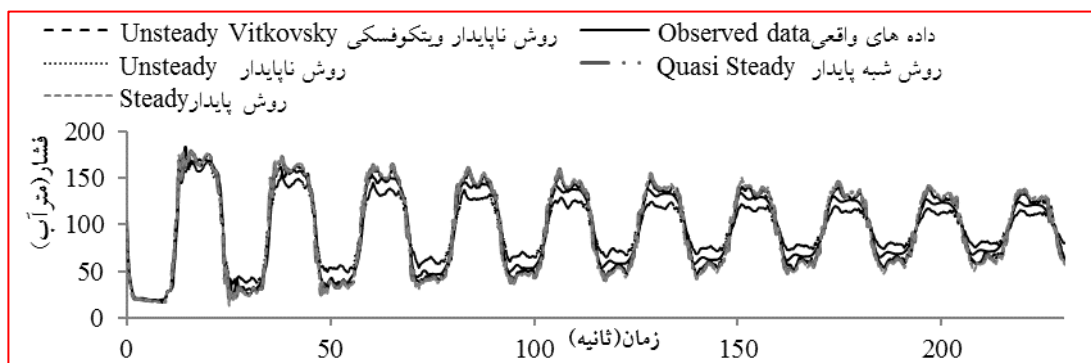


شکل (۱۴): تغییرات فشار در محدوده زمانی ۰ تا ۲۳۰ ثانیه برای حالت محاسبه افت به روش ناپایدار ویتکوفسکی

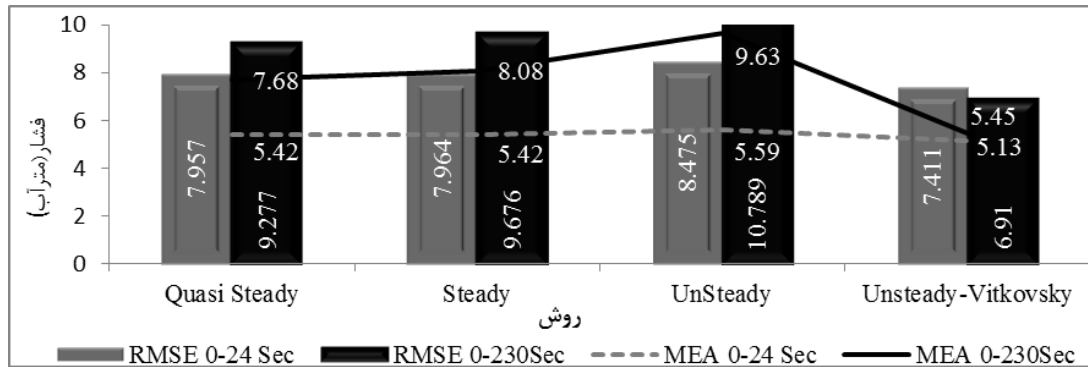
نسبت به سایر روش‌ها داده است. به ترتیب روش شبه پایدار، پایدار و ناپایدار خطاهای بیشتری نسبت به روش اول را نشان می‌دهند. به دلیل لحاظ مولفه‌های جریان ناپایدار در محاسبه افت، در روش افت اصطکاکی ناپایدار ویتکوفسکی خطای کمتری ایجاد شده است

در شکل ۱۵ جهت مقایسه، تمامی حالات محاسبه افت اصطکاکی در مقایسه با داده‌های واقعی آورده شده است. نتایج بررسی خطاهای مربوط به فشار در شکل ۱۶ آمده است.

در شکل ۱۶ دیده می‌شود که روش ناپایدار، ویتکوفسکی برای هر دو روش بررسی خطاها جواب بهتری



شکل (۱۵): تغییرات فشار در محدوده زمانی ۰ تا ۲۳۰ ثانیه

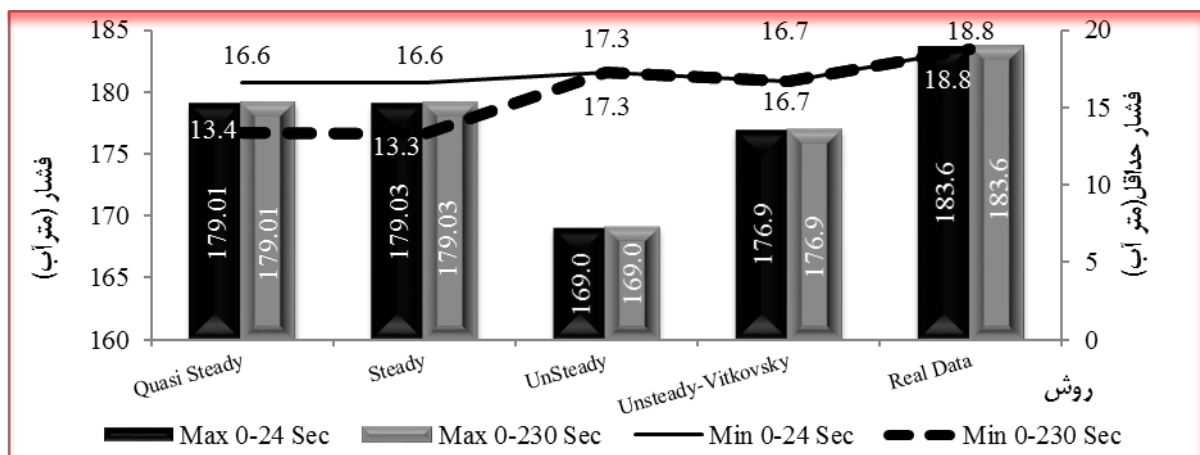


شکل (۱۶): بررسی خطای داده‌های واقعی و شبیه‌سازی شده

جهت مقایسه اختلاف مقادیر حاصل از شبیه‌سازی با داده‌های واقعی، اختلاف مقادیر حداقل و حداکثر حاصل در شکل ۱۸ بصورت درصدی نشان داده شده است. از شکل ۱۸ مشخص می‌شود که اختلاف مقادیر حداکثر در حالت شبیه‌سازی با مقادیر واقعی در زمان‌های اولیه با سایر زمان‌ها برای هر روش برابر بوده که حاکی از وقوع حداکثر فشار گذرا در ۲۴ ثانیه اول می‌باشد. 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. روش ناپایدار ویتکوفسکی بین این روش‌ها با ۳/۶۵٪ خطا قرار می‌گیرد

### بررسی مقادیر حداکثر و حداقل فشار

در این بخش، با نگرش تعیین مقادیر حداکثر و حداقل فشارها توسط نرم‌افزار شبیه‌سازی به موضوع پرداخته شده است. آنچه بیشتر مد نظر این تحقیق بوده مقایسه حداکثر فشار حاصله در حالت گذرا می‌باشد. برای این منظور مقادیر حداکثر و حداقل فشار حاصل از فشار سنجی (داده‌های واقعی) با نتایج حاصل از شبیه‌سازی در روش‌های مختلف بررسی گردیده است. داده‌های فشار واقعی و نتایج حاصل از نرم‌افزار با روش‌های مختلف محاسبه افت‌ها برای مقادیر حداکثر و حداقل فشار در محل ایستگاه پمپاژ در شکل ۱۷ نشان داده شده است.



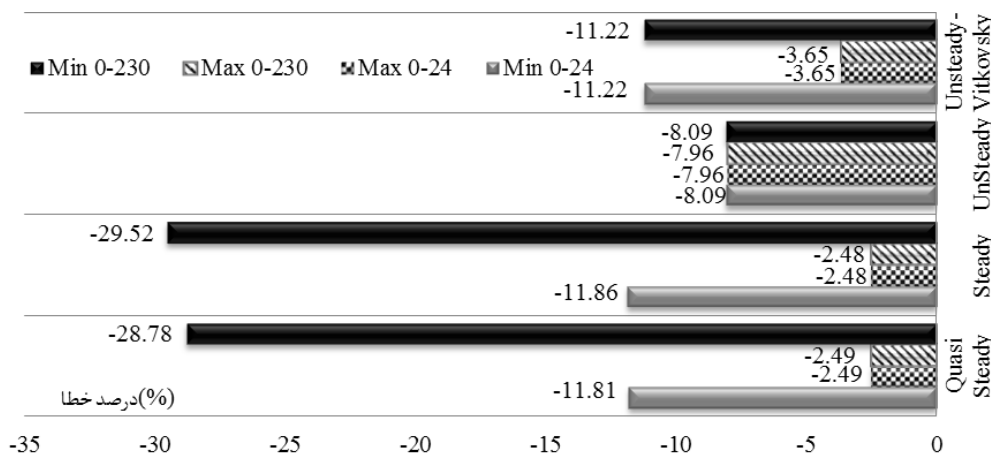
شکل (۱۷): مقادیر حداکثر و حداقل فشار حاصله در شبیه‌سازی و داده‌های واقعی

این صورت نیست. بیشترین اختلاف مقدار حداقل داده‌های شبیه‌سازی با داده‌های واقعی برای روش پایدار بوده (۲۸/۷۸٪) که به ترتیب برای روش شبه پایدار (۲۸/۷۸٪)

بر اساس شکل ۱۸ مشخص می‌گردد که در دو روش ناپایدار و ناپایدار ویتکوفسکی حداقل مقادیر در زمان‌های اولیه حاصل شده ولی در دو روش پایدار و شبه پایدار به

زمان‌ها ایجاد شده است. مقادیر خالص عددی این اختلاف‌ها در جدول شماره ۳ نشان داده شده است.

(/ و ناپایدار ویتکوفسکی (۱۱/۲۲) و ناپایدار (۸/۰۹) می‌باشد. کمترین اختلاف در هر دو بازه زمان اولیه و سایر



شکل (۱۸): درصد اختلاف مقادیر حداکثر و حداقل فشار شبیه‌سازی شده نسبت به داده‌های واقعی

جدول (۳): اختلاف خالص مقادیر حداکثر و حداقل مدل و داده‌های واقعی (مترآب)

زمان (ثانیه)	۰-۲۴	۰-۲۳۰
روش	حداکثر	حداکثر
شبه پایدار	-۴/۵۸	-۲/۲۲
پایدار	-۴/۵۶	-۲/۲۳
ناپایدار	-۱۴/۶۲	-۱/۵۲
ناپایدار ویتکوفسکی	-۶/۷۱	-۲/۱۱
	حداقل	حداقل
	-۵/۴۱	-۴/۵۸
	-۵/۵۵	-۴/۵۶
	-۱/۵۲	-۱۴/۶۲
	-۲/۱۱	-۶/۷۱

در بررسی نتایج آنالیز خطای فشار داده‌های واقعی و شبیه‌سازی شده برای خط لوله پیرانشهر، روش محاسبه افت ناپایدار ویتکوفسکی خطای کمتری نسبت به سایر روش‌های محاسبه افت حاصل نموده است.

در بررسی مقادیر حداکثر و حداقل فشار حاصله از شبیه‌سازی و داده‌برداری واقعی مشخص گردیده که مقادیر حداکثر، خطای کمتری نسبت به مقادیر حداقل از خود نشان داده‌اند ولی به دلیل مقادیر کم حداقل فشار، اختلاف خالص اعداد، ارقام بزرگی نیستند.

برای محاسبه افت حلت جریان گذرا، استفاده از روش ناپلیدار ویتکوفسکی نسبت به سایر روش‌های محاسبه افت ارجحیت داشته و به کاربرد آن در تهیه مدل هیدرولیکی پیشنهاد می‌گردد

## نتیجه گیری

در سیستم‌های انتقال آب، وقوع شرایط جریان گذرا باعث ایجاد فشارهای بیشتری نسبت به حالت دینامیک جریان می‌گردد. این مقادیر با استفاده از داده‌های واقعی فشار سنجی در سیستم انتقال آب و مقایسه با نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی توسط نرم‌افزار بنتلی‌همر مورد بررسی قرار گرفته است. انتقال آب در سیستم با استفاده از ایستگاه پمپاژ انجام گرفته و جهت ایجاد شرایط گذرا جریان برق پمپ‌ها بطور همزمان قطع و فشار سنجی با استفاده از یک دستگاه فشار سنج سریع دیجیتالی انجام شده است.

بررسی خطاها با دو روش آماری میانگین مطلق خطاها و ریشه مجذور مربعات خطاها، صورت گرفته است.



## منابع

- پارسا صدر، ا.ا.، احمدی، ع.، کرامت، ب.، لشکر آرا. ۱۳۹۳. بررسی ضربه قوچ ناشی از خاموشی گام به گام و همزمان پمپها در سیستم پمپاژ سری. مجله علمی پژوهشی مکانیک سازه‌ها و شاره‌ها، دوره ۴ شماره ۴، ص ۲۰۷ تا ۲۲۱
- کیانی، س.، م. فتحی مقدم، ا.، فتحی و ع. حقیقی. ۱۳۹۷. مدل‌سازی عددی جریان گذرا در شبکه آبرسانی ویسکوالاستیک. فصلنامه علمی پژوهشی آبیاری و آب، سال نهم، شماره ۳۳، ص ۶۱-۷۵
- معاونت برنامه ریزی و نظارت راهبردی رئیس جمهور، ۱۳۸۸. وزارت نیرو، دستور العمل انتخاب و طراحی تجهیزات کنترل ضربه قوچ در تاسیسات آبرسانی شهری نشریه شماره ۵۱۷. معاونت نظارت راهبردی. ۱۳۶ صفحه. تهران. ایران. نجمایی، م. ۱۳۷۴. ضربه قوچ. ناشر: نجمایی. ۴۱۵ صفحه. تهران. ایران.
- Behroozi, Abdol Mahdi. Vaghefi, Mohammad, 2020. Numerical simulation of water hammer using implicit Crank-Nicolson Local Multiquadric Based Differential Quadrature. International Journal of Pressure Vessels and Piping. Volume 181, March 2020, 104078
- Chaudhry, M.H. 2014. Applied hydraulic transients. Springer New York Heidelberg Dordrecht, London, Third Edition. 583p
- Delgado, J.N. Martins, N.M.C. Covas, D.I.C. 2014. Uncertainties in hydraulic transient modeling in raising pipe systems: laboratory case studies. Elsevier Ltd Published by Elsevier Ltd. Procedia Engineering 70 : 487 – 496
- El-Turki, A. 2013. Modeling of Hydraulic Transients in Closed Conduits, MS Thesis, University of Fort Collins, Colorado, USA
- Kandil, M. Kamal, A.M. El-Sayed, T.A., 2020. Effect of pipe materials on water hammer. International Journal of Pressure Vessels and Piping. Volume 179, January 2020, 103996
- Ministry of energy, 2010. Instruction for selection & design of water hammer facilities in urban water supply No.517. Islamic republic of Iran vice presidency for strategic planning and supervision. Ministry of energy. Tehran, 117p.
- Wylie E B and Streeter V L, 1993. Fluid Transients in Systems. Prentice Hall. Englewood Cliffs. USA.





## Investigation of Transient Flow Field Data in Water Transmission Mains Using Bentley Hammer Software (Case Study)

Ali.Reza. Khoshfetrat<sup>1</sup> Rasul Daneshfaraz<sup>2</sup>, Javad. Behmanesh<sup>3\*</sup>

### Abstract

Water transmission systems consist of storage reservoirs, pumping stations and pipelines. Pump station power failure, opening and closing of control valves and pipe rupture because transient conditions in pipelines. Transient flow principal equations such as momentum and continuity equations are mainly analyzed by the method of characteristics using engineering software and under boundary conditions. In this study, friction head losses were calculated by Bentley Hammer software under steady, quasi steady, unsteady and unsteady-Vitkovsky states and the results were compared. In Piranshahr water transmission system, the pressure changes were measured using a rapid and sensitive pressure indicator at the pumping station and under critical conditions of electricity power failure. Field data were compared to the Bentley Hammer output data using statistical methods. A comparison between the two, demonstrated the correspondence of time periods. Under unsteady-Vitkovsky method, the mean absolute errors were 5.13 and 5.45 mH<sub>2</sub>O for the initial stages and full period of data logging, respectively. For the maximum pressures values, the maximum difference was observed in the unsteady method (-14.62 mH<sub>2</sub>O) and the least values were associated with the steady and quasi steady method (-4.58 and -4.56m H<sub>2</sub>O respectively). As for the minimum pressures, the steady method yielded the highest (-5.55 mH<sub>2</sub>O) and the unsteady method the lowest difference (-1.52 mH<sub>2</sub>O). Increasing and decreasing the wave speed directly affected the maximum pressures while having an inverse impact on the minimum values. Based on the results of this study, the use of unsteady-Vitkovsky method in Hydraulic modeling is recommended

**Keywords:** Bentley Hammer, Conveyance lines, Piranshahr, Pumping station, unsteady flow

Hydraulic modeling is recommended

<sup>1</sup> M.Sc. Graduate of Civil Eng. - Hydraulic Structures, Faculty of Engineering, University of Maragheh ,  
[Alirezakhoshfetrat@yahoo.com](mailto:Alirezakhoshfetrat@yahoo.com)

<sup>2</sup> Prof. of Civil engineering, Faculty of Engineering, Civil Eng. Dep., University of Maragheh, [daneshfaraz@yahoo.com](mailto:daneshfaraz@yahoo.com)

<sup>3</sup> Prof. of Water engineering Department, Urmia University, Iran , [j\\_behmanesh@urmia.ac.ir](mailto:j_behmanesh@urmia.ac.ir) (\*Corresponding Author)