

شبیه‌سازی جریان غیر دائمی در انتهای لوله رانش ایستگاه پمپاژ

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

تاریخ دریافت: ۹۵/۰۳/۲۶

تاریخ پذیرش: ۹۸/۰۳/۲۲

۱-دانش آموخته کارشناسی ارشد مهندسی عمران - سازه‌های هیدرولیکی، دانشگاه مراغه

۲-دانشیار گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه مراغه

۳-استاد گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه

*مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی j.behmanesh@urmia.ac.ir

چکیده

بررسی شرایط جریان گذرا نقش مهمی در سامانه‌های انتقال آب دارد. در این تحقیق سامانه انتقال آب متشکل از مخزن ذخیره، ایستگاه پمپاژ و خط انتقال جهت بررسی بیشینه فشار حاصل از وقوع شرایط جریان گذرا مورد مطالعه قرار گرفت. با قطع جریان برق الکتروپمپ‌ها، وقوع جریان گذرا آغاز و تغییر شرایط جریان در یک زمان کوتاه، در محل کلکتور رانش ایستگاه پمپاژ بررسی گردید. افت اصطکاک حالت گذرا با چهار روش پایدار، شبه پایدار، ناپایدار و ناپایدار ویتکوفسکی توسط نرم افزار بنتلی هم‌محاسبه شد. با استفاده از فشارسنج حساس و سریع، فشارسنجی انجام و با نتایج حاصل از نرم افزار شبیه‌سازی و با استفاده از روش‌های آماری مقایسه گردید. نتایج شبیه‌سازی، حاکی از عدم انطباق دوره‌های تناوب از نظر زمانی می‌باشد. کمترین خطا برای فشار در حالت محاسبه افت به روش ناپایدار ویتکوفسکی، در زمان‌های ابتدایی برابر ۷/۰۷ متر آب و در دوره داده‌برداری برابر ۱۱/۷۹ متر آب حاصل گردید. برای مقادیر بیشینه فشار بیشترین اختلاف مربوط به روش محاسبه ناپایدار و کمترین اختلاف مربوط به دو روش محاسبه پایدار و شبه‌پایدار بدست آمد. بیشترین اختلاف مقدار کمینه فشار در زمان‌های ابتدایی برای روش پایدار و در زمان‌های بعدی با روش ناپایدار ویتکوفسکی و کمترین آن برای روش ناپایدار محاسبه شد. افزایش سرعت موج بر فشارهای بیشینه اثر مستقیم و بر فشارهای کمینه اثر معکوس داشت.

واژه‌های کلیدی: جریان گذرا، داده‌های واقعی، شبیه‌سازی، ضربه قوچ، ناپایدار ویتکوفسکی

Unsteady Flow Simulation at Pumping Station in the End of Supply Pipe

A Khoshfetrat¹, R Daneshfaraz², J Behmanesh^{3*}

Received: June 15, 2016 Accepted: June 12, 2019

1 M.Sc. Graduate of Civil Eng. - Hydraulic Structures, Univ. of Maragheh, Iran

2 Assoc. Prof. Faculty of Engineering, Civil Eng. Dep., Univ. of Maragheh, Maragheh, Iran

3 Prof. Faculty of Agriculture, Water Eng. Dep., Univ. of Urmia, Urmia, Iran

*Corresponding Author, Email: j.behmanesh@urmia.ac.ir

Abstract

Investigation of the unsteady flow has an important role in water conveyance systems. In the present study water conveyance system including the storage tank, pumping station and pipeline was studied to investigate the maximum pressure due to occurrence of transient flow conditions. The transient condition was started by cutting the power of pumps and in a short time period, the change of flow condition was investigated in the supply collector. The friction losses in transient condition were calculated using Bentley Hammer software. In this process, four methods including steady, quasi steady, unsteady and unsteady Vitkovsky states were used. The pressure was measured by using a fast and sensitive pressure gauge and the observed results were compared with the simulation results and in this process the statistical methods were used. The results showed that there was not time correspondent between the period of cycles. The least amount of error for pressure, gained by method of unsteady Vitkovsky, is equal to 7.07m water at initial times and 11.79 m water in data logging period. For the maximum pressure values, maximum difference was obtained by use of unsteady method and the minimum difference by the two methods of steady and quasi steady methods. The maximum difference for the minimum pressure value was obtained for steady and unsteady Vitkovsky methods at initial and ulterior, respectively and its minimum difference was calculated for unsteady method. Increasing wave velocity had a direct effect on the maximum pressures and an inverse impact on the minimum pressures.

Keywords: Field data, Simulation, Transient flow, Unsteady Vitkovsky, Water hammer

مقدمه

باعث خرابی‌های فاجعه بار در سامانه خطوط لوله و تاسیسات هیدرولیکی گردد. مدل‌های عددی به‌طور گسترده جهت مطالعه هیدرولیک گذرا استفاده می‌شوند چرا که حل تحلیلی معادلات حاکم بر جریان‌های گذرا مشکل 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.

بر اساس نظر وود در سال ۱۸۵۰ میلادی، ویلهلم وبر^۳ اثر کشسانی دیواره یا جدار لوله‌ها را بر روی سرعت موج حاصل از ضربه قوچ مطالعه نمود. در سال ۱۸۷۵ ماری^۴ به نتایج آزمایشگاهی دست یافت و چنین

در سامانه خط لوله تحت شرایط حالت پایدار^۱، تغییرات جریان، ثابت است. اگر تغییر ناگهانی در سامانه‌های 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 پایدار جدید در سامانه خط لوله، در یک بازه زمانی محدود، حالت گذرا ایجاد می‌شود. پدیده‌ای که مربوط به جریان با این چنین تغییرات سریع است هیدرولیک گذرا^۲ نامیده می‌شود. بزرگترین نگرانی در زمان وقوع حالت گذرا در یک سامانه، نوسانات سریع فشار می‌باشد چرا که تغییرات زیاد در فشار، می‌تواند

³ Wilhelm Weber

⁴ Marey

¹ Steady state

² Transient hydraulic

است. پارسا صدر و همکاران (۱۳۹۳) به بررسی ضربه قوچ ناشی از خاموشی گام به گام و همزمان پمپ‌ها در سامانه پمپاژ سری پرداختند و دریافتند در صورت توقف گام به گام پمپ‌ها نسبت به حالت توقف ناگهانی کل پمپ‌ها، فشار کمتری به سامانه وارد و زمانی که پمپ قوی ابتدا از کار می‌افتد کمینه فشار بیشتر و بیشینه فشار کمتر می‌گردد. زمانی که ابتدا پمپ قوی از کار بیفتد فشارهای وارده بر سامانه را نسبت به حالت عکس آن تا چندین برابر کاهش می‌دهد.

روشنگر و پورحیدر (۱۳۹۳) در بررسی عملکرد گزینه‌های کاهنده اثرات پدیده ضربه قوچ در یک خط انتقال آب، با مدل هیدرولیکی جوسیله نرم‌افزار بنتلی‌همردریافتند که در لوله‌های جی آر پی نسبت به لوله‌های آنزبست سیمانی و آهنی کاهش فشار وجود داشته و مخازن ضربه‌گیر در کنترل فشار بهتر از سایر لوازم حفاظتی عمل نموده و کاربرد همزمان مخزن ضربه‌گیر با چرخ طیار، ایده‌آل‌ترین روش برای کنترل ضربه قوچ در این مطالعه موردی بوده است.

نظری و رضایی (۱۳۹۳) در ارزیابی کارایی نرم‌افزارهای هم‌و هایت‌رن ۱۱ و روش حل معادله ژوکوفسکی برای تحلیل ضربه قوچ در ایستگاه پمپاژ سد حسنلو دریافتند که میزان ضربه در حل معادله ژوکوفسکی نسبت به دو نرم‌افزار گفته شده بیشتر بوده بطوری که نرم افزار هایت‌رن به مقدار ۲۳٪ و نرم افزار هم‌و به مقدار ۳۲٪ مقدار ضربه را کمتر نشان می‌دهد.

الترکی (۲۰۱۳) در مطالعه مدل هیدرولیک جریان گذرا در مجاری بسته، با استفاده از نرم افزار بنتلی هم‌و بخشی از مسیر خط انتقال آب در کشور لیبی با قطر ۴۰۰۰ میلی متر را که در اثر ضربه قوچ ناشی از بسته شدن ناگهانی شیر تخریب گردیده بود مدل نمود. نتایج نشان داده که فشار در محل تخریب لوله ۲ بار

بیان نمود که سرعت انتشار موج فشار ضربه قوچ تحت یک شرایط معین، ثابت می‌باشد. میچاود^۵ نیز به مطالعه اثر محفظه فشار در استهلاک موج فشار ضربه قوچ پرداخت. شاید ژاکوفسکی^۶ در سال ۱۸۹۸ اولین شخصی بود که نشان داد علت بالا رفتن فشار در مسیر خط لوله انتقال آب در نتیجه تغییر سرعت و جرم مخصوص سیال است. در حدود سال ۱۹۱۳ یک شخص ایتالیایی بنام آلیوی^۷ و همکارانش با بسط و توسعه دامنه مطالعات قبلی روش ریاضی و ترسیمی را برای تعیین فشار ضربه قوچ ابداع کردند. مولفین و محققانی همچون پارماکیان^۸، استریتر^۹ و شارپ^{۱۰} در پیشرفت و توسعه نظری و عملی فرآیند ضربه قوچ سهم بسزایی دارند (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 ژاکوفسکی پی‌گیری شد (چاودری ۲۰۱۴). از سال ۱۹۳۰ مطالعه جریان‌های گذرا و ضربه قوچ با شتاب بیشتری ادامه یافت و تحقیقات ارزشمندی به انجام رسید. پارماکیان در سال ۱۹۵۵ کتاب بسیار با ارزشی را در زمینه ضربه قوچ منتشر کرد (پارماکیان ۱۹۵۵). به موازات انتشار این کتاب، 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. پیشتازان این فصل دانشمندانی چون وایلی و استریتر می‌باشند (وایلی و استریتر ۱۹۹۳). برای اولین بار گرومیکا هنگام تحلیل ضربه قوچ، افت‌های اصطکاکی را نیز مورد نظر قرار داد (گرومیکا ۱۹۸۳).

اخیراً مطالعات جدیدی در جریان‌های گذرا انجام گردیده که در ادامه به بررسی این موارد پرداخته شده

⁹ Streeter

¹⁰ Sharp

¹¹ Hammer & Hytran

⁵ Michaud

⁶ Jakovsky

⁷ Allievi

⁸ Parmakian

تعیین فشارهای وارده به سامانه، اثر گذار است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی با نرم‌افزار در سامانه‌های انتقال آب مشابه می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد. انتخاب روش بهینه محاسبه افت اصطکاکی مسیر خط انتقال در مدل هیدرولیکی، کمک شایانی به تطابق بیشتر نتایج مدل با واقعیت طرح خواهد نمود.

موقعیت مخزن ذخیره در یکی از نواحی فشاری بوکان، در رقومی بالاتر از تراز پیشنهادی مشاور طرح احداث گردیده است. نیاز آبی روزانه این مخزن از طریق ایستگاه پمپاژ تامین می‌گردد. با توجه به این که قبل از انجام این تغییرات، وضعیت کل سامانه از نظر هیدرولیک گذرا بررسی نگردیده است، لذا برای بررسی رفتار سامانه، نیاز به تحقیقات علمی احساس می‌گردد. هدف از پژوهش حاضر بررسی سامانه انتقال آب بوکان و مدل‌سازی آن برای بهره‌برداری در آینده و اخذ تصمیمات مدیریتی بود.

مواد و روش‌ها

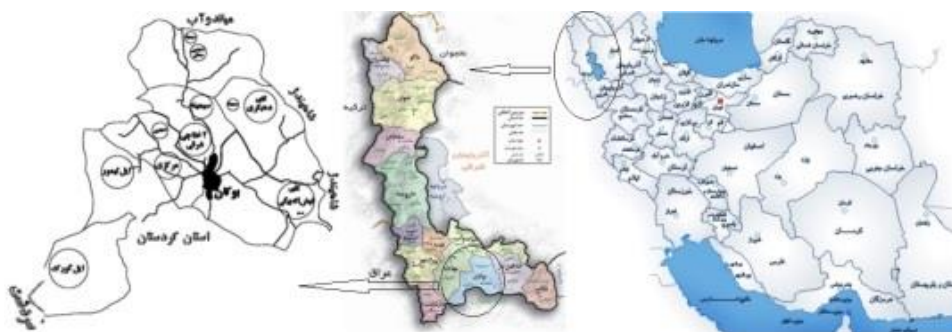
منطقه طرح

ایستگاه پمپاژ بررسی شده در این تحقیق در شهر بوکان 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 ۶۰۹۵۵۷ متر شرقی و ۴۰۴۱۸۷۶ متر شمالی می‌باشد.

(حدود ۲۰٪) بیشتر از فشار کاری لوله بوده و موجب تخریب لوله شده است. استفاده از نرم افزار جهت بررسی اثر هیدرولیک گذرا در طرح‌های ارائه شده توسط مهندسين هیدرولیک در این تحقیق توصیه شده است. شریف و همکاران (۲۰۱۴) در مقایسه شبیه‌سازی هیدرولیکی ضربه قوچ در سامانه‌های خط لوله انتقال با قطر و نوع‌های مختلف دریافتند که فشار گذرای حاصل از وقوع ضربه قوچ برای تخریب لوله‌ها و برخی تجهیزات کافی است. قطر و نوع لوله بایستی طوری انتخاب شود تا موج فشاری گذرا را کاهش دهد. جهت کاهش نوسان فشار، انتخاب لوله‌های با مدول الاستیسیته مشابه و اندازه قطر یکسان توصیه گردید.

دلگادو و همکاران (۲۰۱۴) با بررسی آزمایشگاهی، خطاهای مدل هیدرولیکی جریان گذرا در لوله‌های انتقال آب را با روش محاسبه افت اصطکاکی ناپایدار ویتکوفسکی مقایسه نمودند. در این تحقیق با برنامه‌نویسی بر اساس تئوری کلاسیک ضربه قوچ برای جریان گذرای یک بعدی در حالت قطع جریان برق پمپ دریافتند که تطابق خیلی خوبی بین داده‌های واقعی آزمایشگاهی و شبیه‌سازی عددی وجود دارد.

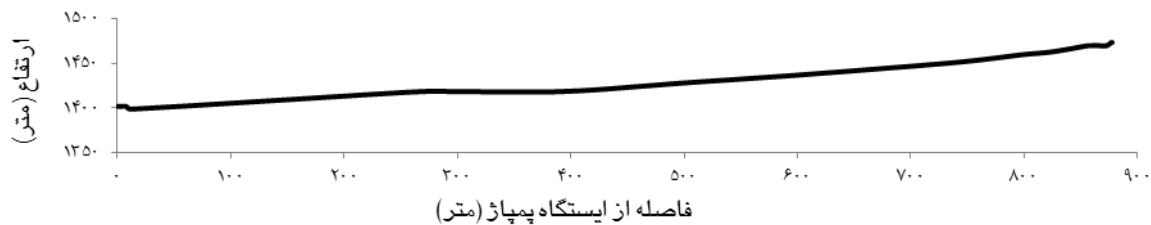
قبل از اجرای طرح، جهت تعیین جنس و فشار کاری لوله‌ها و همچنین تعیین نیازمندی سامانه به استفاده از تاسیسات مقابله با ضربه قوچ ناشی از جریان گذرا، شبیه‌سازی دقیق سامانه مورد نیاز است. روش محاسبه افت اصطکاکی و تغییرات سرعت موج در



شکل ۱- موقعیت منطقه طرح

بوده و شیر تخلیه هوا در فاصله ۲۷۲ متری ایستگاه و از نوع دو روزنه با قطر فلنج ۱۰۰، قطر روزنه بزرگ ۸۰ میلی‌متر و قطر روزنه کوچک ۳ میلی‌متر می‌باشد. بر اساس کدهای اجرا شده برای لوله، پروفیل خط انتقال مطابق شکل ۲ می‌باشد.

جنس لوله‌ها در محل ایستگاه پمپاژ و در محل تخلیه به مخزن، فولادی و در طول مسیر چدنی می‌باشد. در جدول ۱ سایر مشخصات سامانه ایستگاه پمپاژ و خط انتقال آورده شده است. نوع شیرهای یک طرفه استفاده شده در محل ایستگاه پمپاژ از نوع وزنه دار با قطر ۴۰۰ میلی‌متر است.



شکل ۲- پروفیل طولی خط انتقال بوکان

لوله‌های شبکه در حالت انتقال از یک حالت پایدار به حالت دیگر کمک می‌کند. این نرم افزار مناسب برای سامانه‌های پمپاژ و شبکه لوله‌ها بوده و قادر به طراحی مناسب و اقتصادی سامانه‌های کنترل موج می‌باشد. بنتلی‌همر بر اساس تکنولوژی بنا شده توسط ژنیوار^۲ (گروه پیشین هیدرولیک زیست محیطی^۳)، متخصصین آب بنتلی‌همر و با پشتوانه همکاری طولانی مدت بین ژنیوار و بنتلی‌همر بوجود آمده است (بی نام ۲۰۱۴).

توانایی‌های بنتلی‌همر

حالت گرافیکی بنتلی‌همرکار را برای ارائه سریع شبکه‌های پیچیده لوله‌ها، مخازن، پمپ‌ها و تجهیزات کنترل موج آسان می‌کند. برای حل معادلات اساسی ضربه قوچ، تاکنون از روش‌های مختلفی استفاده شده

خط انتقال و ایستگاه پمپاژ شهر بوکان

این ایستگاه پمپاژ دارای سه دستگاه پمپ گریز از مرکز نوع CP150-50-500 می‌باشد. با توجه به سامانه پمپاژ این ایستگاه که (۲+۱) می‌باشد، همزمان دو پمپ کارکرد داشته و خطوط انتقال مربوطه نیز برای دبی ۲۶۰ لیتر بر ثانیه طراحی گردیده است. تراز نصب این پمپ‌ها در روی پایه‌های بتنی برابر ۱۴۰۰/۲۰ متر، تراز سطح آب در مخزن مکش ۱۴۰۸/۷۰ متر، تراز کلکتور رانش برابر ۱۴۰۱/۷۰ متر و تراز محل تخلیه در مخزن بالادست ۱۴۷۳/۶۷ متر می‌باشد. خط انتقال این سامانه با طول ۸۷۰ متر و از جنس چدنی به قطر ۵۰۰ میلی‌متر

فشار دینامیک در حالت جریان پایدار در زمان روشن بودن پمپ‌ها و فشار استاتیک در حالت جریان پایدار قبل از روشن کردن پمپ‌ها، از داده‌های فشارسنجی قابل استخراج است.

جدول ۱- مشخصات ایستگاه پمپاژ بوکان.

مقدار	واحد	شرح
۷۰/۶	m-H ₂ O	فشار استاتیک
۷۴/۶۳	m-H ₂ O	فشار دینامیک
۱۱۰۰	m s ⁻¹	لوله فولادی
۱۱۲۰	m s ⁻¹	لوله چدنی
۱۰/۴۸	m-H ₂ O	فشار بخار آب
۶/۵۳	kg-m ²	اینرسی پمپ و موتور
۱۴۵۰	RPM	سرعت چرخش موتور

معرفی نرم افزار بنتلی‌همر

این نرم افزار توانمند، برنامه‌ای است که به مهندسين جهت آناليز سامانه‌های پیچیده پمپاژ و

¹³ Formerly Environmental Hydraulics Group

¹² GENIVAR

ضربه قوچ بر اساس هد و سرعت مطابق رابطه ۳ می‌باشند:

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

با استفاده از روش تفاضل‌های محدود^{۱۵} معادلات

اساسی به صورت زیر گسسته سازی می‌شوند.

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

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

اندیس p مربوط به مقادیر گام زمانی جدید

می‌باشد. با استفاده از شرایط مرزی و حل همزمان آنها

با معادلات ۴ و ۵ در نهایت برای شرط مرزی پمپ رابطه

زیر منتج می‌گردد.

$$\begin{aligned} & \left(\frac{g}{a} Ap\right) V_{p1}^2 + \left(\frac{g}{a} Bp - 1\right) V_{p1} + \\ & (V_2 + \frac{g}{a} Cp - \frac{g}{a} H_2 - \frac{f\Delta t}{2D} V_2 |V_2|) = 0 \end{aligned} \quad [7]$$

مقادیر Ap و Bp و Cp ثابت بوده و بستگی به نوع

پمپ دارند و از روی منحنی مشخصه پمپ یا کاتالوگ

سازنده قابل استخراج خواهند بود. با حل معادله درجه

دوم مقادیر مورد نظر برای سرعت و هد فشاری حاصل

می‌گردد.

اصطکاک گذرا یا ناپایدار

در مقایسه با حالت پایدار، اصطکاک سیال در

زمان وقوع حالت 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. بوسیله 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 رابطه ۷ می‌باشد:

است که دقیق‌ترین آنها روش مشخصه‌ها^{۱۴} می‌باشد، این

روش انعطاف زیادی برای حل عددی بوسیله کامپیوتر

دارد. بنتلی هم 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 سامانه و برای شرایط مرزی متفاوت حل و

مقادیر سرعت و هد فشاری برای آنها بدست می‌آید.

در بنتلی هم آنالیز هیدرولیک گذرا معمولاً با

محاسبات شرایط اولیه (حالت پایدار) که هد و جریان را

برای هر لوله در سامانه محاسبه می‌کند شروع می‌شود.

قبل از شروع محاسبات حالت گذرا، هم بطور اتوماتیک

بر اساس وضعیت سامانه، نحوه محاسبه ضریب

اصطکاک مورد نیاز را شناسایی می‌کند. این برنامه در

ابتدا بصورت اتوماتیک از روش داریسی و یسباخ ضریب

اصطکاک را بر اساس هدهای انتهای هر لوله، طول لوله،

قطر و جریان در لوله محاسبه می‌کند (بی نام ۲۰۱۴).

معادلات حاکم بر نرم افزار

معادلات مومنتوم و پیوستگی در جریان گذرا که

بصورت مشتقات جزئی و معادله دیفرانسیل جزئی بوده

و معادلات اصلی ضربه قوچ می‌باشند با روابط ۸ و ۹

بیان می‌گردند (چاودری ۲۰۱۴).

$$\frac{dv}{dt} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial s} + g \frac{dz}{ds} + \frac{f}{2D} V|V| = 0 \quad \text{مومنتوم} \quad [1]$$

$$a^2 \frac{\partial v}{\partial s} + \frac{1}{\rho} \frac{dP}{dt} = 0 \quad \text{پیوستگی} \quad [2]$$

V سرعت جریان، t زمان، ρ چگالی سیال، P

فشار، s فاصله المان، g شتاب ثقل، z تراز ارتفاعی، f

ضریب داریسی و یسباخ، D قطر لوله و a سرعت موج

می‌باشند.

برای حل معادلات اساسی از روش مشخصه‌ها

در این نرم افزار استفاده می‌گردد. معادلات مشخصه

¹⁵ Finite differences

¹⁴ Method of Characteristic

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 بوده و دارای محدوده فرکانس ۲ کیلوهرتز و تغذیه ۸ تا ۳۲ ولت می‌باشد. قابلیت پاسخ دهی سنسور زیر ۵ میلی ثانیه می‌باشد. دقت بر اساس روش بهترین خط مستقیم مناسب^{۱۷} برای دمای ۰ تا ۵۰ درجه سلسیوس برابر ۱٪ می‌باشد. شکل ۳ سنسور فشار مورد استفاده را نشان می‌دهد.

ثبت کننده داده‌ها^{۱۸}

داده‌های ارسال شده از سنسور فشار، توسط دستگاه ثبت کننده داده‌ها که در شکل ۴ و ۵ دیده می‌شود بصورت اعداد فشار موجود در محل فشار سنجی، در حافظه دستگاه ثبت می‌گردد.



شکل ۳ - سنسور فشار. شکل ۴ - نصب سنسور فشار.



شکل ۵ - ثبت کننده داده‌ها.

عملیات فشار سنجی

برای انجام عملیات فشار سنجی بر روی خطوط لوله موجود در ایستگاه‌های پمپاژ، وجود محل اتصال

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

که V سرعت، t زمان، g شتاب ثقل $\alpha=10000$ و $\beta=4$. استخراج سرعت جزئی، با ملاحظه زمان و شتاب موقت در هر نقطه بوده و در گام زمانی قبلی تعیین مقدار شده است. با لحاظ تحقیقات انجام یافته در این مورد، روش دیگر اصطکاک گذرا نیز ارائه شده است. فرمول اصطکاک حالت ناپایدار ویتکوفسکی بصورت زیر می‌باشد.

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

f عامل اصطکاک دارسی ویسباخ، 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، $+$ زمانیکه سرعت بالای صفر، $-$ زمانیکه سرعت زیر صفر، x فاصله، k ضریب اصطکاک برونونه است. ضریب k با استفاده از معادله زیر محاسبه می‌شود.

$$k = \frac{\sqrt{C^*}}{2} \quad [9]$$

که C^* ضریب افت برشی وردی است که برای جریان‌های لایه‌ای $C^*=0.00476$ می‌باشد. برای جریان‌های متلاطم مقدار آن بصورت زیر محاسبه می‌شود (بی نام ۲۰۱۴).

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

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 کلر^{۱۶} سوئیس بود. این سنسور با مدل PA-21Y انتخاب گردیده که با توجه به

¹⁸ Data logger

¹⁶ Keller

¹⁷ BFSL

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 (معاونت برنامه ریزی و نظارت راهبردی ۱۳۸۸) این زمان رعایت می‌گردد. L برابر 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^{۱۹} جهت ترسیم نمودارهای مورد نظر، منتقل می‌گردد. تعداد داده‌ها در این نمونه برداری برابر ۱۹۵ 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)^{۲۰} (رابطه ۱۱) و جذر میانگین مربعات خطاها (RMSE)^{۲۱} (رابطه ۱۲) استفاده گردید که در روابط مذکور S و E داده مربوط به مدل، O داده واقعی مشاهده شده و n تعداد داده‌ها می باشد.

$$MAE = \frac{\sum |S - O|}{n} \quad [11]$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum (O - E)^2}{n}} \quad [12]$$

شبیه سازی عددی

برای 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 هم که امکان رسم نمودار 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 مربوطه رسم گردید. گراف‌های مورد نیاز

سنسور بر روی کلکتور رانش ایستگاه پمپاژ ضروری است. این سنسور باید در محلی که بعد از آن شیر یک‌طرفه وجود نداشته نصب گردیده و در حین فشار سنجی نیز هیچ‌گونه تغییری در وضعیت شیرآلات نبایستی ایجاد گردد. 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 فشار سنجی از نوع شیر گازی ۳/۴ اینچی بوده 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 اینکه بیشینه فشار در انتهای خطوط انتقال رخ می‌دهد (معاونت برنامه ریزی و نظارت راهبردی ۱۳۸۸)، 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 و اتصالات موجود تا سنسور فشار، اصلاح می‌گردد.

پس از اتصال سنسور به روی لوله کلکتور رانش، کابل اتصال سنسور به دستگاه ثبات داده را وصل نموده و با روشن نمودن دستگاه تعداد داده‌های مورد نظر در هر ثانیه جهت ثبت انتخاب گردید. در حالیکه پمپ‌های ایستگاه پمپاژ فعال بوده و حالت جریان یکنواخت در سامانه 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 سامانه در حالت جریان پایدار می‌باشد. جهت ایجاد حالت گذرا، نسبت به قطع جریان برق پمپ‌ها

²¹ Root Mean Square Error

¹⁹ Microsoft Excel

²⁰ Mean Absolute Error

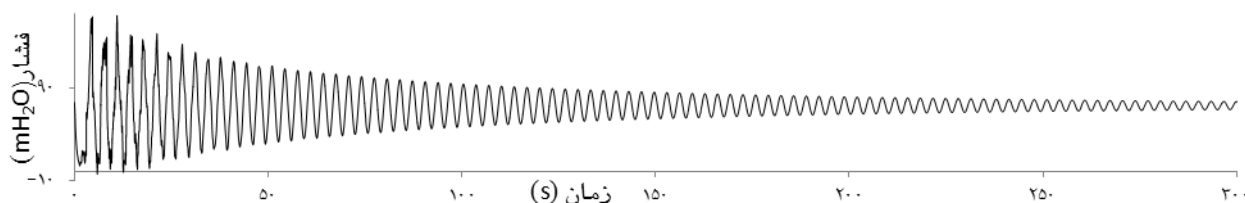
نرمال می‌گردند. جهت مدل نمودن شرایط ایستگاه در زمان‌های اولیه، باید بجای انتخاب حالت شیر یکطرفه پمپ، شیر کنترل انتخاب و زمان بسته شدن آن به زمان $3/1$ ثانیه تنظیم گردد. این زمان با سعی و خطا بدست آمده است. در شکل ۶ تغییرات فشار حاصل از داده‌برداری در فاصله زمانی ۰ تا ۳۰۰ ثانیه برای ایستگاه پمپاژ بوکان دیده می‌شود. میرایی فشار و فشارهای کمینه و بیشینه سامانه در این شکل قابل مشاهده است. با توجه به اشکال ۷ تا ۱۰ دیده می‌شود که در زمان‌های اولیه انطباق نسبتاً خوبی مابین داده‌های واقعی و شبیه‌سازی شده وجود دارد. این مقادیر با توجه به نتایج بررسی‌های آماری در جدول ۲ نشان داده شده که بیانگر دقت بیشتر محاسبه افت حالت گذرا با روش ناپایدار ویتکوفسکی نسبت به سایر روش‌ها است. به ترتیب دقت روش ناپایدار نسبت به روش شبه پایدار و روش پایدار در ۶ ثانیه اول بیشتر بوده است. در این بازه زمانی مقادیر بیشینه فشار در برخی نقاط کمتر از داده‌های واقعی و در برخی نقاط بیشتر بوده‌اند. این موارد در خصوص مقادیر کمینه فشار هم به همین منوال می‌باشد. نوسانات موجود در داده‌های واقعی در نقاط بیشینه و کمینه ناشی از عملکرد نامناسب شیر یکطرفه نصب شده بر روی خط رانش پمپ‌ها می‌باشد. آنچه در این سامانه خطا ایجاد نموده، عملکرد نادرست شیر یکطرفه نصب شده است که به دلیل عدم نصب وزنه مربوط به شیر امکان شبیه‌سازی را به واسطه عملکرد نامشخص، از نرم‌افزار صلب نموده است. با توجه به جدول ۲ مشخص می‌گردد در مدت زمان ۶ ثانیه اول وقوع حالت گذرا در این سامانه پمپاژ، روش ناپایدار ویتکوفسکی خطای کمتری نسبت به سایر روش‌های محاسبه افت در هر دو حالت محاسبه خطاها نشان داده است.

برای زمان‌های صفر تا ۱۲ ثانیه و صفر تا ۱۸۰ 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 فشار بخار آب، سرعت موج، ممان اینرسی موتور و پمپ بصورت محاسبه‌ای یا از روی کاتالوگ‌های مربوطه و یا سایر منابع اطلاعاتی تهیه و به نرم افزار وارد شد. فشار بخار آب بر اساس فشار جو بدست آمد که متاثر از تغییرات دما نیز می‌باشد. برای بوکان این مقدار برابر $10/48$ متر آب می‌باشد. سرعت موج برای لوله‌های فولادی و چدنی و نیز ممان اینرسی موتور و پمپ محاسبه و در نرم افزار تعریف شد. مقدار ضریب اصطکاک هیزن ویلیامز برابر ۱۲۵ لحاظ شد.

نتایج و بحث

بررسی مقادیر فشار حاصل از خط انتقال بوکان
برای ایستگاه پمپاژ بوکان نتایج داده‌های واقعی و داده‌های حاصل از شبیه‌سازی بصورت نمودار برای زمان‌های ۰ تا ۱۲ ثانیه که زمان‌های اولیه وقوع حالت گذرا می‌باشند و همچنین برای زمان‌های صفر تا ۱۸۰ ثانیه که نتایج برای مدتی بعد از وقوع این پدیده است در اشکال ۷ تا ۱۱ دیده می‌شود. نتایج آماری برای زمان‌های صفر تا ۶ ثانیه و صفر تا ۲۹۵ ثانیه محاسبه شده‌اند. با توجه به اینکه در این ایستگاه پمپاژ از شیرهای یکطرفه از نوع وزنه‌دار استفاده گردیده و در عمل این وزنه‌ها نصب نشده‌اند این شیرها به موقع عمل ننموده و باعث ایجاد اختلال در سامانه و افزایش فشار نسبت به حالت



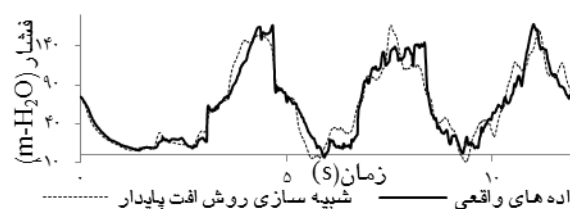
شکل ۶- تغییرات فشار داده‌های واقعی بوکان در کلکتور خروجی.

جدول ۲- نتایج آنالیز خطای فشار داده‌های واقعی و شبیه‌سازی شده ($m-H_2O$).

زمان (s)	۰-۶		۰-۲۹۵	
	RMSE	MAE	RMSE	MAE
شبه پایدار	۱۱/۵۹۷	۷/۹۱۱۷	۲۸/۷۶۸	۲۵/۴۲
پایدار	۱۱/۵۹۸	۷/۹۱۱۹	۲۹/۳۵۸	۲۶/۰۰
ناپایدار	۱۰/۸۳۹	۷/۵۲	۲۴/۲۰۸	۲۰/۶۷
ناپایدار ویتکوفسکی	۱۰/۱۴۷	۷/۰۷	۱۴/۶۸۲	۱۱/۷۹

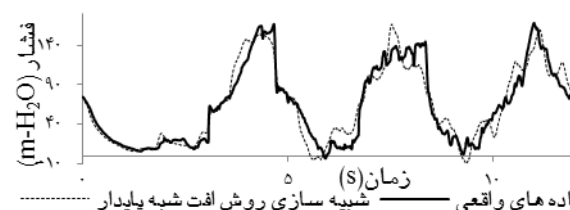
نسبت به سایر روش‌ها حاصل گردیده است. بطور کلی نمودار حاصل از روش ناپایدار ویتکوفسکی برای این سامانه پمپاژ جواب بهتری حاصل نموده است. با توجه به اینکه در زمان‌های اولیه اثرات روش محاسبه افت اصطکاکی زیاد تاثیر گذار نمی‌باشد اما به دلیل بهینه بودن روش افت اصطکاک ناپایدار ویتکوفسکی، به لحاظ شرایط ناپایدار در محاسبه افت‌ها علاوه بر شرایط حالت پایدار، این روش خطای کمتری نشان داده است.

این موضوع بوسیله محاسبه خطاهای آماری بصورت نمودار در شکل‌های ۱۵ و ۱۶ و داده‌های عددی در جدول ۲ قابل مشاهده است. مطابق شکل ۱۵ در ۶ ثانیه ابتدایی روش ناپایدار ویتکوفسکی کمترین مقدار خطا را برای دو روش آماری دارا بوده است. در زمان صفر تا ۲۹۵ ثانیه مطابق شکل ۱۶ نیز به همین منوال است. افزایش خطا به ترتیب در روش ناپایدار، شبه پایدار و پایدار در هر دو زمان صفر تا ۶ و صفر تا ۲۹۵ ثانیه رخ می‌دهد. در این تحلیل آماری، خطای داده‌های شبیه‌سازی نسبت به داده‌های واقعی با روش میانگین خطای مطلق در کل کمتر از روش مجذور میانگین مربعات خطاها بوده و در زمان صفر تا ۶ ثانیه خطاها کمتر از محدوده زمانی ۰ تا ۲۹۵ ثانیه می‌باشد.



شکل ۷- تغییرات فشار در فاصله زمانی ۰ تا ۱۲ ثانیه در روش محاسباتی افت حالت پایدار.

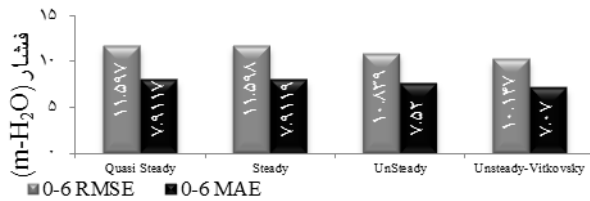
برای مدت زمان صفر تا ۱۸۰ ثانیه نتایج داده‌های واقعی و شبیه‌سازی فشار در اشکال ۱۱ تا ۱۴ آمده است. آنچه که در این شکل‌ها دیده می‌شود این است که در همه روش‌ها تطابق از نظر پریود زمانی در زمان‌های ابتدایی وقوع جریان گذرا وجود دارد ولی با



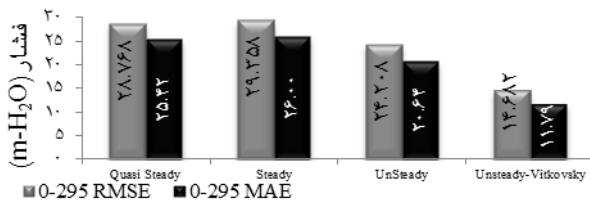
شکل ۸- تغییرات فشار در محدوده زمانی ۰ تا ۱۲ ثانیه.

برای حالت محاسبه افت به روش شبه پایدار گذر زمان این تطابق از بین رفته و نتایج شبیه‌سازی دچار تاخیر زمانی شده است. کمترین تاخیر مربوط به روش ناپایدار ویتکوفسکی بوده است.

از نظر مقادیر بیشینه و کمینه فشار و نیز میرایی فشار نیز در روش ناپایدار ویتکوفسکی جواب بهتری



شکل ۱۵- بررسی خطای داده‌ها در زمان ۰ تا ۶ ثانیه.

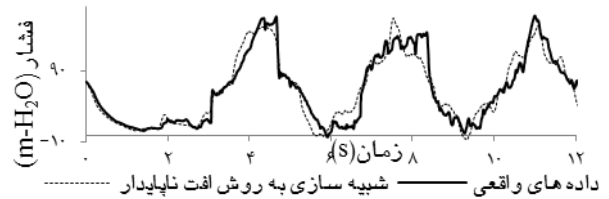


شکل ۱۶- بررسی خطای داده‌ها در زمان ۰ تا ۲۹۵ ثانیه.

مقادیر کمینه و بیشینه فشار خط انتقال بوکان

در این بخش، با نگرش تعیین مقادیر بیشینه و کمینه فشارها توسط نرم‌افزار شبیه‌سازی به موضوع پرداخته شده است. آنچه بیشتر مدنظر این تحقیق بوده مقایسه بیشینه فشار حاصله در حالت گذرا می‌باشد. داده‌های واقعی و نتایج نرم افزار در مورد مقادیر کمینه و بیشینه فشار ایستگاه پمپاژ بوکان در شکل‌های ۱۷ و ۱۸ نشان داده شده است. درصد اختلاف اعداد حاصله برای فشار در مقادیر کمینه و بیشینه در شکل‌های ۱۹ و ۲۰ نشان داده شده است. شکل ۲۰ بیانگر درصد اختلاف زیادتر داده‌ها در زمان‌های اولیه نسبت به داده‌ها در زمان‌های بعدی (۰ تا ۲۹۵ ثانیه) می‌باشد. بیشترین اختلاف در زمان‌های اولیه (۰-۶ ثانیه) در روش ناپایدار و در حدود ۸/۷۷٪ نسبت به ماگزیمم فشار ۱۶۶/۶ متر آب بوده که اختلاف مقداری آن برابر ۱۴/۶۱- متر آب می‌باشد. اختلاف این مقادیر با گذشت زمان کم شده بطوریکه برای زمان صفر تا ۲۹۵ ثانیه این مقادیر به ۱٪/۹۳ و ۳/۲۴- متر آب کاهش پیدا می‌کنند.

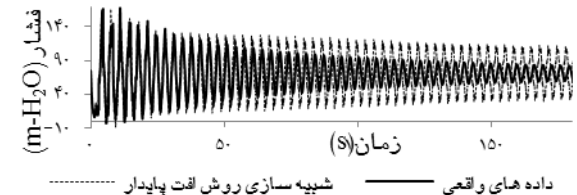
برای مقادیر کمینه به دلیل کم بودن مقدار این فشار، اختلاف عدد واقعی و شبیه‌سازی درصد بیشتری را نشان می‌دهد. برای روش پایدار در فشار کمینه در زمان صفر تا ۶ بیشترین اختلاف با ۶۳٪ مربوط به روش



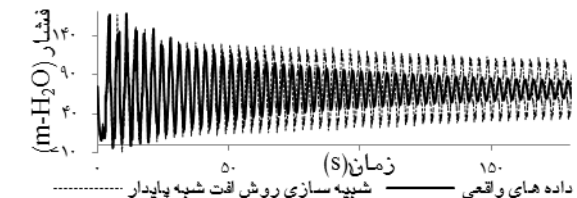
شکل ۹- تغییرات فشار در محدوده زمانی ۰ تا ۱۲ ثانیه برای حالت محاسبه افت به روش ناپایدار.



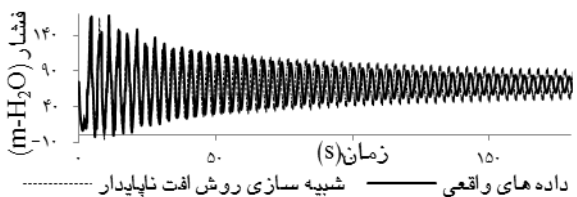
شکل ۱۰- تغییرات فشار در محدوده زمانی ۰ تا ۱۲ ثانیه برای روش افت ناپایدار ویتکوفسکی.



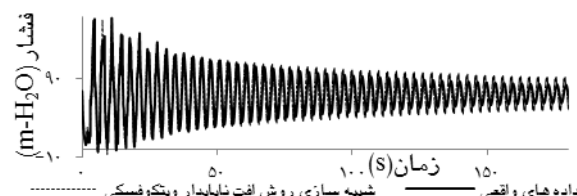
شکل ۱۱- تغییرات فشار در محدوده زمانی ۰ تا ۱۸۰ ثانیه برای حالت محاسبه افت به روش پایدار.



شکل ۱۲- تغییرات فشار در محدوده زمانی ۰ تا ۱۸۰ ثانیه برای حالت محاسبه افت به روش شبه پایدار.



شکل ۱۳- تغییرات فشار در محدوده زمانی ۰ تا ۱۸۰ ثانیه برای حالت محاسبه افت به روش ناپایدار



شکل ۱۴- تغییرات فشار در محدوده زمانی ۰ تا ۱۸۰ ثانیه برای حالت محاسبه افت به روش ناپایدار ویتکوفسکی.

بصورت تغییرات $\pm 5\%$ و $\pm 10\%$ و $\pm 0.5\%$ و $\pm 1\%$ در این عامل است. در شکل‌های ۲۱ و ۲۲ مقادیر بیشینه و کمینه فشار در حالت تغییرات اعمال شده نشان داده شده است.

جدول ۳- اختلاف خالص مقادیر بیشینه و کمینه مدل و

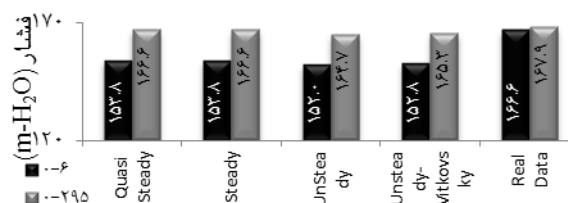
داده‌های واقعی ($m-H_2O$)

زمان (s)	-۶		-۲۹۵	
	بیشینه	کمینه	بیشینه	کمینه
روش				
شبه پایدار	-۱۲/۸۱	-۱/۶۳	-۱/۳۴	-۵/۷۸
پایدار	-۱۲/۸۱	-۱/۶۴	-۱/۳۴	-۵/۸۸
ناپایدار	-۱۴/۶۱	۰/۲۷	-۳/۲۴	-۳/۳۶
ناپایدار				
وینکوفسکی	-۱۳/۸۱	-۱/۷۳	-۲/۶۴	-۳/۵۹

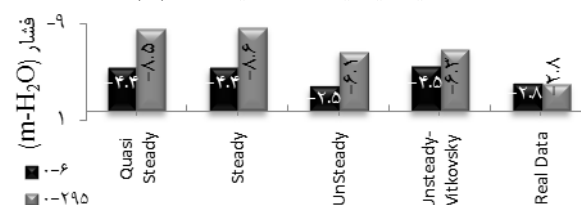
با توجه به شکل ۲۱ و ۲۳ با افزایش سرعت موج، مقدار فشار بیشینه در حال افزایش بوده بطوریکه با 5% افزایش به فشار بیشینه حاصل از داده‌های واقعی نزدیک شده و با رسیدن این مقدار به 10% از بیشینه فشار حاصله داده‌های واقعی گذشته و به مقدار $175/4$ متر آب می‌رسد. مقدار افزایش 0.5% موجب افزایش فشار نسبت به مدل گردیده ولی کاهش جزئی فشار بیشینه در افزایش 1% سرعت موج نسبت به مدل دیده می‌شود.

در حالت کاهش سرعت موج برای بیشینه فشارها، تغییرات بیشینه فشار بیش از نتایج حاصل از افزایش سرعت موج می‌باشد. این میزان با 5% و 10% کاهش به عدد $171/5$ و $185/5$ متر آب تغییر می‌یابد که تغییرات نسبت به مدل روش ناپایدار وینکوفسکی قابل مشاهده است. در فشارهای کمینه (شکل ۲۲ و ۲۴)، با افزایش‌های 5% و 10% درصدی سرعت موج، کاهش فشار به مقدار برابر یا کمتر از فشار بخار آب رسیده است که برای امکان مقایسه از درصد‌های کمتر 0.5% و 1% درصد استفاده شده است. با افزایش سرعت موج مقادیر فشار کمینه نیز کمتر شده است. این موضوع در خصوص کاهش سرعت موج نشان از کاهش فشار کمینه داشته ولی مقدار کاهش کمتر از مقادیر تغییرات افزایشی سرعت می‌باشد. با کاهش 1%

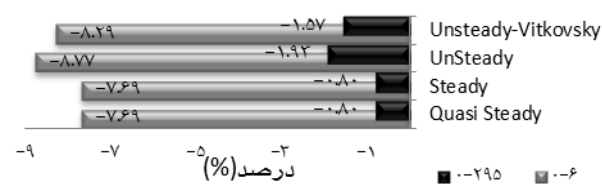
ناپایدار وینکوفسکی با مقدار اختلاف خالص $1/73$ - متر آب و در زمان صفر تا 295 ثانیه بیشترین اختلاف با مقدار 213% و مقدار خالص $5/88$ - متر آب را نشان می‌دهد. مقادیر اختلاف عددی خالص در جدول ۳ دیده می‌شوند.



شکل ۱۷- مقادیر بیشینه فشار ایستگاه پمپاژ بوکان.

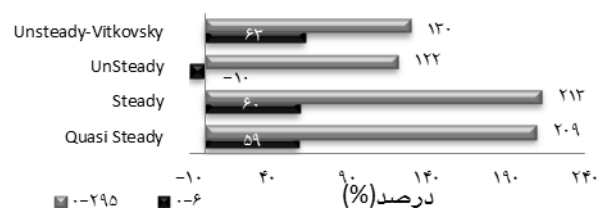


شکل ۱۸- مقادیر کمینه فشار ایستگاه پمپاژ بوکان.



شکل ۱۹- درصد اختلاف مقادیر بیشینه فشار در

شبیه‌سازی نسبت به داده‌های واقعی بوکان.



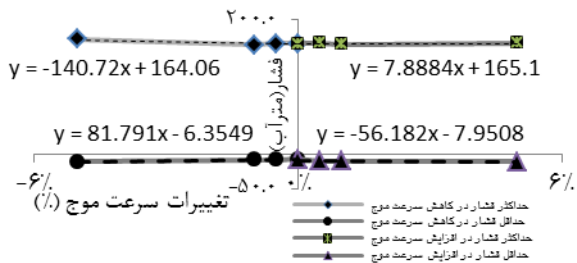
شکل ۲۰- درصد اختلاف مقادیر کمینه فشار در

شبیه‌سازی نسبت به داده‌های واقعی.

تحلیل حساسیت

جهت بررسی حساسیت مدل به تغییرات پارامترهای موجود در سامانه، از مدل هیدرولیکی مربوط به ایستگاه پمپاژ بوکان و از روش ناپایدار وینکوفسکی که بهترین جواب از آن حاصل شده است، استفاده شد. این تغییرات در پارامتر سرعت موج ایجاد گردید که

در شکل ۲۵ تغییرات فشار بیشینه و کمینه نسبت به تغییرات سرعت موج بصورت خطی ترسیم و رگرسیون خطی آنها نشان داده شده و معادلات مربوطه نوشته شده است. با توجه به شیب خط رگرسیون که ضریب متغیر x در معادلات می‌باشد، با افزایش و کاهش سرعت موج مقدار فشار بیشینه افزایشی بوده و مقدار فشار کمینه کاهش می‌یابد. متغیر y مقادیر فشار را نشان می‌دهد. شدت تغییرات در کاهش موج بیشتر از حالت افزایشی موج بوده است.

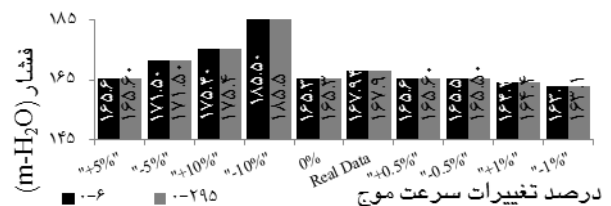


شکل ۲۵- تغییرات فشار نسبت به تغییرات سرعت موج.

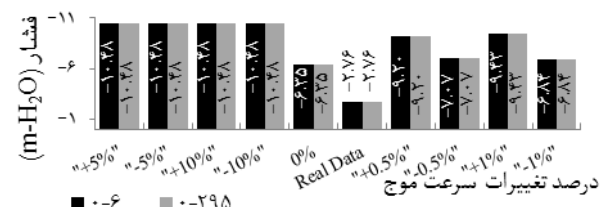
نتیجه گیری کلی

نتایج آنالیز خطای فشار داده‌های واقعی و شبیه‌سازی شده برای خط لوله بوکان نشان داد که روش محاسبه افت ناپایدار و ویتکوفسکی خطای کمتری نسبت به سایر روش‌های محاسبه افت برای کل داده‌ها حاصل نمود. مقادیر بیشینه و کمینه فشار حاصله از شبیه‌سازی و داده‌برداری واقعی مشخص کرد که مقادیر بیشینه، خطای کمتری نسبت به مقادیر کمینه از خود نشان داده‌اند ولی به دلیل مقدار عددی کم مقادیر کمینه فشار، اختلاف خالص اعداد، ارقام بزرگی نیستند. به دلیل حساسیت در خصوص فشار منفی در مقادیر زیر فشار بخار آب این موضوع از اهمیت بیشتری برخوردار است. نتایج این تحقیق نشان داد که تاثیر زیاد شدن سرعت موج بر فشارهای بیشینه بصورت افزایش مقادیر فشار بیشینه، نسبت به مقادیر حاصل از سرعت موج اولیه ظاهر می‌شود. این موضوع برای فشارهای بیشینه، با کم شدن سرعت موج نیز اثر افزایشی فشار را به همراه

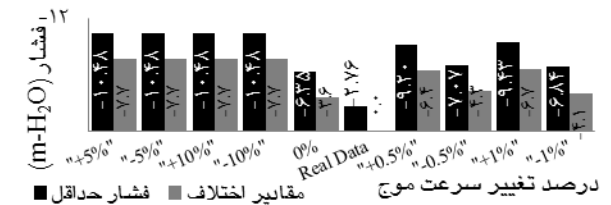
سرعت موج مقدار فشار کمینه بیشتر از حالت کاهش $0\%/5$ بوده ولی با این حال روند کاهش فشار کمینه نسبت به مقادیر مدل اولیه دیده می‌شود. برای مقادیر بیشینه فشار، درصد اختلاف فشارها خیلی کمتر از مقادیر درصد اختلاف فشارهای کمینه می‌باشد. با افزایش سرعت موج مقدار خطای $1/57$ مدل نسبت به داده‌های واقعی افزایش یافته و در 10% به $10/46$ می‌رسد. این موضوع در مقادیر کمینه فشار درصد اختلاف خطا را در مدل اولیه با $129/9$ خطا نسبت به داده‌های واقعی نشان می‌دهد که با افزایش سرعت موج مقادیر اختلاف خطا نیز افزایش یافته و در 10% به $279/9$ می‌رسد. کاهش سرعت موج نیز روند افزایش اختلاف مثبت را برای کمینه فشارها بیان می‌کند.



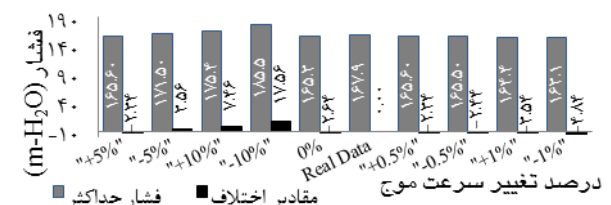
شکل ۲۱- مقادیر بیشینه فشار ناشی از تغییرات سرعت موج.



شکل ۲۲- مقادیر کمینه فشار ناشی از تغییرات سرعت موج.



شکل ۲۳- تغییرات مقادیر بیشینه فشار در اثر تغییرات سرعت موج.



شکل ۲۴- تغییرات مقادیر کمینه فشار در اثر تغییرات سرعت موج.

سرعت موج بر فشارهای بیشینه اثر معکوس و بر فشارهای کمینه اثر مستقیم دارد.

تشکر و قدردانی

این تحقیق تحت حمایت و همکاری شرکت آب و فاضلاب شهری استان آذربایجان غربی انجام گردیده که از مسئولین محترم این شرکت قدردانی می‌گردد.

داشت. شدت تغییرات فشار در کاهش سرعت موج بیشتر از شدت تغییرات ناشی از افزایش سرعت موج بود. همچنین تاثیر زیاد شدن سرعت موج بر فشارهای کمینه، بصورت کاهش فشار کمینه نسبت به مقادیر حاصل از سرعت موج اولیه است. با کم شدن سرعت موج نسبت به سرعت موج اولیه، مقدار فشارهای کمینه روند کاهشی به خود گرفت. افزایش سرعت موج بر فشارهای بیشینه اثر مستقیم و بر فشارهای کمینه اثر معکوس دارد. کاهش

منابع مورد استفاده

- Anonymous, 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. (In Farsi).
- Anonymous, 2014. Bentley Water Hammer V8i User's Guide, pdf file, attached to software.
- Chaudhry M H, 2014. Applied Hydraulic Transients. Springer New York Heidelberg Dordrecht London. Third Edition. Pp6
- Delgado JN, Martins NMC and Covas DIC, 2014. Uncertainties in hydraulic transient modeling in raising pipe systems: laboratory case studies. Published by 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.
- Gromeka I. S, 1983. Concerning the Propagation Velocity of Water Hammer Wave in Elastic Pipes, Scientific Soc. of Univ of Kazan USSR.
- Najmii M, 1995. Water hammer. Author .Tehran .Iran. (In Farsi).
- Nazari P, Rezaie H, 2013. Efficiency evaluation of hammer & hytran software and joukowski equation solution in analysis of water hammer at hasanlu dam pumping Station, Water and Soil Science - University of Tabriz , 24: 131-142. (In Farsi).
- Parmakian J, 1955. Water Hammer Analysis. Prentice-Hall, Inc. Englewood. Cliffs, N.J.
- Parsasadr A, Ahmadi A, Keramat A and Lashkarara B, 2015. Waterhammer caused by intermittent and simultaneously pump failure in pipe systems including series pump groups, Journal of Solid and Fluid Mechanics, 4: 207 – 221. (In Farsi).
- Roshangar K, Pour Heidar P, 2013. Evaluation of reductive option of water hammer phenomenon for a water conveyance system, a case study of shahid shirdom residential district-Tehran, Journal of Water & Waste water, 6: 67-76. (In Farsi).
- Sharif F, Siosemarde M, Merufinia E and Esmat Saatlo M, 2014. Comparative hydraulic simulation of water hammer in transition pipeline systems with different diameter and types. Journal of Civil Engineering and Urbanism. 4, (3): 282-286.
- Wylie E B and Streeter V L, 1993. Fluid Transients in Systems. Prentice Hall. Englewood Cliffs. USA.