

Effect of the Pump as Turbine Failure on Unsteady Flow in Water Transmission Pipelines (Case Study: Masjed Soleyman City Water Pipeline)

Fereshte Azizieh¹ , Javad Zahiri^{*2} , Adell Moradi Sabzkouhi³ ,
Mehdi Zamani-Fekri⁴ 

1. M.Sc. Graduate in Water Structures, Dept. of Water Science and Engineering, Agricultural Sciences and Natural Resources University of Khuzestan, Iran. E-mail: azizyehfereshte@gmail.com
2. Corresponding Author, Associate Prof., Dept. of Water Science and Engineering, Agricultural Sciences and Natural Resources University of Khuzestan, Iran. E-mail: j.zahiri@asnruk.ac.ir
3. Assistant Prof., Dept. of Water Science and Engineering, Agricultural Sciences and Natural Resources University of Khuzestan, Iran. E-mail: adellmoradi@asnruk.ac.ir
4. Instructor, Dept. of Mechanical Engineering, Behbahan Branch, Islamic Azad University, Behbahan, Iran. E-mail: mehdi.fek@gmail.com

Article Info

Article type:
Research Full Paper

Article history:
Received: 07.14.2023
Revised: 09.23.2023
Accepted: 11.12.2023

Keywords:
Pressure relief valves,
Reverse pump,
Water hammer

ABSTRACT

Background and Objectives: The occurrence of phenomena such as surges in complex devices such as turbines, and problems caused by neglecting safety precautions, may result in significant economic damage and losses to the transmission system. On the other hand, electricity production is very important for developing countries, and energy production is a key factor for economic and social development of these countries. Recently, institutions involved in electricity supply have recommended pump as turbine projects as hydroelectric power plant for supplying electricity to rural areas due to their economic benefits. The issue under investigation in this study is the effect of pump shutdown on surge occurrence and its effects on the water transmission line.

Materials and Methods: The case study project is the water transmission line to the city of Masjed Soleyman located in the northeast of Khuzestan province. In this study, by using WaterGEMS software, the route of the transmission line, the type and diameter of the pipes, pressure relief valves, tanks, etc., have been defined and modeled in steady state. After processing the line in steady state, in order to investigate the replacement of the pressure relief valve with a reverse pump and its shutdown effect on the created water hammer impact phenomenon, the designed model is called in Bentley HAMMER CONNECT software to analyze and investigate the unsteady state. Since the Hammer software does not have the ability to model the reverse pump, the turbine is used as a reverse pump in the modeling. The phenomenon of surge has been investigated in three scenarios as follows: The first scenario involves studying the flow conditions in a steady state without any changes in the transmission line. The second scenario involves replacing the pressure relief valve at kilometer 0+054 from the Tang-e Mo reservoir with a reverse pump. The third scenario involves replacing the pressure relief valve at kilometer 3+700 from the Tang-e Mo reservoir with a reverse pump.

Results: As the downstream pressure wave reaches the upstream side, the pressure in the pipes before and after the reverse pump located at 3+700

km from the Tang-e Mo reservoir increases in the second state and reaches its maximum when the valve is fully closed. Over time, due to the friction of the fluid with the pipe wall, the pressure wave created will be dissipated until the flow will return to the initial steady state. In the mentioned pipes, the maximum pressure created is estimated to be about 22.5 bar. The modeling of the third mode shows that if the reverse pump valves are closed, the pressure before the pump increases up to 20 bar momentarily. As a result of the start of the surge impact and the decrease in flow rate, the pipe pressure decreases to minus 10 meters. The shutdown of the 3+700 reverse pump does not cause significant pressure changes in the pipes before and after the 0+054 reverse pump. About 14 cubic meters of water vapor will accumulate in the area of the pipe after the 3+700 reverse pump. Without the air valve in the line, the volume of steam created will prevent the fluid passage.

Conclusions: The results indicate that the occurrence of the surge due to the failure of the PAT(s) installed in the transmission line, despite the creation of positive and negative pressure waves in the transmission line, does not cause serious disturbance in the pipeline. It is also concluded that the thickness of the steel material selected for the pipeline has the required strength to withstand the maximum and minimum pressures. As a result, it is possible to replace the reverse pump with a pressure relief valve and extract energy without causing any problems. In the event of a ram impact, the transmission line will have the ability to withstand the double pressure wave created, and water supply to downstream cities will be possible without disruption.

Cite this article: Azizieh, Fereshte, Zahiri, Javad, Moradi Sabzkouhi, Adell, Zamani-Fekri, Mehdi. 2024. Effect of the Pump as Turbine Failure on Unsteady Flow in Water Transmission Pipelines (Case Study: Masjed Soleyman City Water Pipeline). *Journal of Water and Soil Conservation*, 30 (4), 81-102.



© The Author(s).

DOI: 10.22069/jwsc.2024.21567.3667

Publisher: Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources

اثر خاموشی پمپ معکوس و بررسی جریان غیرماندگار در خط انتقال آب (مطالعه موردی: خط آبرسانی شهر مسجدسلیمان)

فرشته عزیزیه^۱، جواد ظهیری^{۲*}، عادل مرادی سبزوکی^۳، مهدی زمانی فکری^۴

۱. دانش‌آموخته کارشناسی ارشد سازه‌های آبی، گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان، ایران. رایانامه: azizyehfereshte@gmail.com
۲. نویسنده مسئول، دانشیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان، ایران. رایانامه: j.zahiri@asnrukh.ac.ir
۳. استادیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان، ایران. رایانامه: adelmoradi@asnrukh.ac.ir
۴. مربی گروه مهندسی مکانیک، واحد بهبهان، دانشگاه آزاد اسلامی، بهبهان، ایران. رایانامه: mehdi.fek@gmail.com

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله کامل علمی - پژوهشی	سابقه و هدف: در صورت وقوع مشکلاتی مانند ضربه قوچ در دستگاه‌های پیچیده‌ای؛ مانند توربین‌ها و بروز مشکلاتی ناشی از بی‌توجهی به رعایت نکات ایمنی و عدم کنترل ضربه قوچ، ممکن است سیستم انتقال، متحمل ضرر و زیان اقتصادی بالایی شود. از طرفی تولید برق برای کشورهای در حال توسعه از اهمیت بسیار بالایی برخوردار است. بدون شک تولید انرژی عامل کلیدی برای توسعه اقتصادی و اجتماعی کشورها است. مؤسسات درگیر تأمین برق، اخیراً پمپ مبتنی بر توربین را به‌عنوان طرح‌های نیروگاه برق‌آبی برای برق‌رسانی به روستاها، به دلیل مزایای اقتصادی توصیه کرده‌اند. مسأله موردبررسی در پژوهش حاضر، اثر خاموشی پمپ معکوس بر وقوع پدیده ضربه قوچ و اثرات ایجادشده بر خط انتقال آب است.
تاریخ دریافت: ۰۲/۰۴/۲۳	
تاریخ ویرایش: ۰۲/۰۷/۰۱	
تاریخ پذیرش: ۰۲/۰۸/۲۱	
واژه‌های کلیدی: پمپ معکوس، شیر فشارشکن، ضربه قوچ	مواد و روش‌ها: پروژه مورد مطالعه، خط انتقال آب به شهر مسجدسلیمان واقع در محدوده شمال شرق استان خوزستان است. در این مطالعه به کمک قابلیت‌های نرم‌افزار WaterGEMS، مسیر خط انتقال، جنس و قطر لوله‌ها، شیرهای فشارشکن، مخازن و ... طراحی و مدل در حالت پایدار شبیه‌سازی و پردازش گردیده است. پس از پردازش خط در حالت پایدار، به‌منظور بررسی جایگزینی شیر فشارشکن با پمپ معکوس و اثر خاموشی آن بر پدیده ضربه قوچ ایجادشده در خط انتقال، مدل طراحی‌شده، در نرم‌افزار Bentley HAMMER CONNECT فراخوانی می‌شود تا حالت ناپایدار مورد تحلیل و بررسی قرار گیرد. از آنجایی‌که نرم‌افزار Hammer قابلیت مدل‌سازی پمپ در حالت معکوس را ندارد، توربین به‌عنوان پمپ معکوس در مدل‌سازی به‌کاربرده شده است. پدیده ضربه قوچ در سه حالت به شرح زیر موردبررسی

قرار گرفته است. حالت اول شامل بررسی شرایط جریان در حالت ماندگار بدون اعمال هرگونه تغییری در خط انتقال، حالت دوم شامل جایگزینی شیر فشارشکن کیلومتر ۰+۰۵۴ از مخزن تنگ‌مو با پمپ معکوس و حالت سوم شامل جایگزینی شیر فشارشکن کیلومتر ۳+۷۰۰ از مخزن تنگ‌مو با پمپ معکوس است.

یافته‌ها: براساس مدل‌سازی صورت گرفته برای حالت دوم، با رسیدن موج فشاری پایین‌دست به سمت بالادست، فشار در لوله‌های قبل و بعد از پمپ معکوس واقع در ۳+۷۰۰ کیلومتری از مخزن تنگ‌مو افزایش می‌یابد و با بسته شدن ۱۰۰ درصد دریچه به حداکثر خود رسیده و با گذشت زمان در اثر اصطکاک سیال با جدار لوله موج فشاری ایجاد شده مستهلک می‌گردد تا زمانی که جریان مجدداً به حالت پایدار اولیه باز خواهد گشت. در لوله‌های مذکور حداکثر فشار ایجاد شده حدود ۲۲/۵ بار برآورد شده است. مدل‌سازی حالت سوم نشان می‌دهد که در صورت بسته شدن دریچه‌های پمپ معکوس، فشار قبل از پمپ تا حدود ۲۰ بار به صورت لحظه‌ای افزایش می‌یابد. در اثر شروع ضربه قوچ و کاهش دبی، فشار لوله به منفی ۱۰ متر کاهش می‌یابد. خاموشی پمپ معکوس ۳+۷۰۰ باعث ایجاد تغییرات فشار چشمگیر در لوله‌های قبل و بعد از پمپ معکوس ۰+۰۵۴ نمی‌گردد. در محدوده لوله بعد از پمپ معکوس ۳+۷۰۰ حدود ۱۴ مترمکعب بخار آب تجمع خواهد یافت. در صورت عدم تعبیه شیر هوا در مسیر خط، حجم بخار ایجاد شده مانع از عبور سیال خواهد گشت.

نتیجه‌گیری: نتایج نشان می‌دهد که وقوع پدیده ضربه قوچ در اثر ازکارافتادن پمپ‌های معکوس تعبیه شده در خط انتقال با وجود ایجاد موج‌های فشاری مثبت و منفی باعث ایجاد اختلال در آبرسانی و تخریب خط نمی‌گردد. لازم به توضیح است رده لوله‌های فلزی انتخاب شده در خط، استحکام لازم برای تحمل حداکثر و حداقل فشارهای وارده را دارا هستند. در نتیجه جایگزینی پمپ معکوس با شیر فشارشکن و استحصال انرژی بدون ایجاد هیچ‌گونه مشکلی امکان‌پذیر است. در صورت وقوع پدیده ضربه قوچ، خط انتقال توانایی تحمل در برابر موج فشاری مضاعف ایجاد شده را خواهد داشت و آبرسانی به شهرهای پایین‌دست بدون اختلال امکان‌پذیر است.

استناد: عزیزیه، فرشته، ظهیری، جواد، مرادی سبزه‌کوهی، عادل، زمانی فکری، مهدی (۱۴۰۲). اثر خاموشی پمپ معکوس و بررسی جریان غیرماندگار در خط انتقال آب (مطالعه موردی: خط آبرسانی شهر مسجدسلیمان). پژوهش‌های حفاظت آب و خاک، ۳۰ (۴)، ۸۱-۱۰۲.

DOI: 10.22069/jwsc.2024.21567.3667



© نویسندگان.

ناشر: دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

مقدمه

در میان جایگزین‌های منابع انرژی متعارف، سیستم برق‌آبی یکی از پیشرفته‌ترین فناوری‌ها بوده و به‌طور گسترده در دهه‌های گذشته به کار گرفته شده است. ظرفیت نیروگاه‌های آبی نصب‌شده تا پایان سال ۲۰۱۷ به میزان ۱۹/۲ درصد از کل ظرفیت نصب‌شده را تشکیل می‌دهد که بیش‌ترین بخش از انرژی‌های تجدیدپذیر را به خود اختصاص داده است (۱). از سوی دیگر با توجه به کاستی‌های نیروگاه‌های آبی بزرگ، نیروگاه‌های آبی کوچک، مینی، میکرو و پیکو با ظرفیت بیش از ۲۵ مگاوات به راه‌حلی محبوب برای بهره‌برداری از پتانسیل برق‌آبی در مناطق روستایی تبدیل شده‌اند (۲). توربین‌های مقرون‌به‌صرفه با عملکرد قابل‌قبول، به‌عنوان جزء حیاتی در سیستم برق‌آبی، تضمینی برای منافع مالی هستند. در مقایسه با توربین‌های با مقیاس معمولی، هزینه توربین‌های مقیاس کوچک با توجه به بودجه کل پروژه سیستم برق‌آبی نسبتاً بالا است. در نتیجه پمپ معکوس یک انتخاب عملی برای جایگزینی توربین‌های معمولی است. تجزیه و تحلیل هزینه چرخه عمر سالانه بین فناوری PAT و توربین فرانسیس، کم‌تر بودن هزینه PAT را تأیید کرده است (۳). هم‌چنین در سیستم‌های تحت فشار، پمپی که در حالت معکوس استفاده می‌شود در مقایسه با دستگاه‌های تولید انرژی سنتی راه‌حلی بسیار مقرون‌به‌صرفه و قابل‌اعتماد است (۴). به‌طور معمول، شیرهای کاهش فشار برای مدیریت فشار و کاهش نشت در شبکه توزیع آب استفاده می‌شوند (۵). در نتیجه مدیریت فشار در شبکه‌های توزیع و انتقال آب با استفاده از شیرهای کاهش فشار معمولی، منجر به ازدست‌رفتن انرژی می‌شود و از طرفی شیرهای فشارشکن می‌توانند محلهایی برای بازیابی انرژی به حساب آیند (۶ و ۷). براساس مطالعات صورت گرفته استفاده از PAT یک راه‌حل اقتصادی برای بازیابی این انرژی به حساب می‌آید

(۸، ۹ و ۱۰). لیدون (۲۰۱۷)، عملکرد شیر فشارشکن و PAT مورد بررسی قرار داد و نشان داد که تا ۴۰ درصد پتانسیل توان ناخالص را می‌توان با استفاده از PAT بازیابی کرد (۱۱). علاوه بر مزیت در بازیافت انرژی، سود اقتصادی استفاده از PAT در شبکه توزیع آب نیز قابل توجه است. یک مطالعه موردی در ایتالیا نشان می‌دهد که PAT می‌تواند در عرض ۲/۵ سال سرمایه اولیه را بازگرداند (۱۲). اخیراً، فناوری PAT حتی در پالایشگاه‌های نفت برای بازیابی انرژی از فاضلاب استفاده می‌شود (۱۳). کارکرد پمپ به‌عنوان توربین در سه حالت باید مورد تحلیل و بررسی قرار داده شود (۱۴). یکی در حالت گذرا، دیگری زمانی که به هر دلیلی جریان معکوس گردد و حالت سوم زمانی که پمپ معکوس در حالت پایدار مورد استفاده قرار می‌گیرد. جریان گذرا، وضعیتی موقتی است که در یک سیستم هیدرولیکی مانند خطوط تأمین آب و تصفیه فاضلاب بین یک شرایط اولیه و شرایط نهایی پایدار رخ می‌دهد. هنگامی که سرعت جریان سیال در پاسخ به عملکرد یک دستگاه کنترل جریان (مانند بسته شدن شیر یا راه‌اندازی پمپ) در کسری از ثانیه تغییر کند، تراکم‌پذیری مایع و کشش خط لوله، باعث انتشار موج فشار گذرا در سراسر سیستم می‌شود. تحت چنین شرایطی اگر تنش‌های سازه‌ای ناشی از این موج فشاری گذرا، نسبت به آستانه تحمل لوله و تجهیزات وابسته به آن بیشتر بوده و اقدامات کنترل جریان گذرا به اندازه کافی در نظر گرفته نشده باشد، می‌تواند باعث خرابی اجزای هیدرولیکی سیستم (مانند ترکیدگی لوله) شود. به‌طور کلی، جریان گذرا ناشی از تغییرات نسبتاً آهسته سرعت جریان را سرچ^۱ و در صورتی که ناشی از تغییرات سریع‌تر سرعت جریان باشد، ضربه فوج یا چکش آبی^۲ نامیده می‌شود. موج چکش آبی در سیستم تحت فشار بسیار سریع‌تر

1- Surges

2- Water Hammer

جزئی مومتوم و اندازه حرکت (به‌عنوان مثال، نایرواستوکس) را به معادلات دیفرانسیل معمولی تبدیل می‌کند که به صورت جبری در امتداد خطوطی به نام خطوط مشخصه‌ها حل می‌شوند. نتایج این روش در امتداد خطوط مشخصه‌ها، از دقت بالایی برخوردار است (۲۰). این روش از شرایط مرزی پیچیده، مدل‌های اصطکاک و کاویتاسیون بخار استفاده می‌کند. روش خطوط مشخصه را می‌توان با استفاده از مدل‌سازی کامپیوتری انجام داد (۲۱). مدل‌های رایانه‌ای، ابزارهای کاربردی برای ردیابی حرکت، اینرسی و اصطکاک با تکامل حالت گذرا و محاسبه صحیح تغییرات جرم و انرژی در مرزها هستند.

در صورت وقوع مشکلاتی مانند چکش آبی در دستگاه‌های پیچیده‌ای؛ مانند توربین‌ها و بروز مشکلاتی ناشی از بی‌توجهی به رعایت نکات ایمنی و عدم کنترل ضربه قوچ، ممکن است سیستم انتقال، متحمل ضرر و زیان اقتصادی بالایی شود (۲۲). حسن‌زاده و همکاران (۲۰۱۷) در پژوهشی به مقایسه روش‌های کنترل فشار بیشینه و کمینه ناشی از پدیده ضربه قوچ در ایستگاه‌های پمپاژ فشارقوی پرداختند (۲۳). نتایج نشان داد که محفظه هوایی بهترین روش کنترل فشارهای ناشی از ضربه قوچ است. پارسا صدر و همکاران (۲۰۱۵) ضربه قوچ ناشی از خاموشی گام‌به‌گام و هم‌زمان پمپ‌ها در سیستم پمپاژ سری را مورد تحلیل و بررسی قرار دادند (۲۴). نتایج این پژوهش‌گرانی نشان داد که توقف گام‌به‌گام پمپ‌ها نسبت به حالت توقف ناگهانی تمام پمپ‌های ایستگاه پمپاژ، فشار کم‌تری به سیستم وارد می‌کند. در صورتی که هر یک از پمپ‌ها به صورت گام‌به‌گام متوقف شوند تأثیر متفاوتی بر سیستم می‌گذارند. کرامر و همکاران (۲۰۱۸) به بررسی کارایی پمپ معکوس بر روی خطوط انتقال آب پرداختند (۲۵). این پژوهش‌گران زمان بسته شدن شیر را برابر با ۲۲

حرکت کرده و اثرات تخریبی بالایی ایجاد می‌نماید. اگر هیچ حالت گذرای دیگری توسط جبهه‌های موج فشار ایجاد نشود، شرایط جریان ناپایدار تا زمانی ادامه می‌یابد که انرژی گذرا به‌طور کامل در اثر اصطکاک مستهلک گردد (۱۵). از جمله علل شروع حالت گذرا می‌توان به تغییر در خواص سیال (گرمایش یا سرمایش در سیستم‌های تولید صنعتی)، تغییر در مرزهای سیستم (مانند باز یا بسته شدن سریع شیر، راه‌اندازی/ سوئیچینگ/ توقف پمپ، خروج ناگهانی سیال از یک شیر فشار یا شیلنگ آتش‌نشانی)، عملکرد پمپ (هنگام شروع کار پمپ)، عملکرد توربین یا توربین‌های برق‌آبی، عملکرد سوپاپ (بستن ناگهانی یک شیر کنترل جریان) اشاره کرد. اگر یک سیستم در بازه‌های زمانی کوتاه دچار تغییرات زیادی در سرعت و فشار شود، آنالیز جریان گذرا موردنیاز است. به‌منظور تجزیه و تحلیل، طراحی و شبیه‌های عملیاتی می‌توان از روش‌های مختلف تحلیلی و یا عددی بهره‌مند شد. مطالعه جریان گذرای هیدرولیکی با پژوهش‌های جوکوفسکی (۱۹۸۹) و لوی (۱۹۰۲) آغاز شده است (۱۶). پژوهش‌گرانی از جمله پارماکیان و انگوس (۱۹۶۳) روش محاسبه گرافیکی را رواج داده و اصلاحاتی را در روش‌های محاسباتی نیز اعمال کرده‌اند (۱۷). از تکنیک‌های مدل‌سازی جریان گذرا، می‌توان در کاربردهای خاص از جمله تشخیص نشت و انسداد در خطوط لوله استفاده نمود (۱۸). روش‌های عددی برای توصیف جریان ناپایدار^۱ در لوله‌ها و حل معادلات دیفرانسیل جزئی با کمک معادلات تقریبی تا حل عددی معادلات غیرخطی نایرو - استوکس^۲ ایجاد شده‌اند. در میان بسیاری از روش‌های عددی (مانند حجم محدود و غیره)، روش خطوط مشخصه بیش‌تر مورد استقبال قرار گرفته است (۱۹). روش خطوط مشخصه، معادلات دیفرانسیل

1- Transient Flow

2- The Nonlinear Navier-Stokes Equations

تصفیه شده و از طریق ایستگاه پمپاژ با لوله‌ای به قطر اسمی ۶۰۰ میلی‌متر و طول ۱۳,۶۰۰ متر از جنس فولادی به سمت مخزن تنگ‌مو هدایت می‌شود. در مسیر خط انتقال آب، یک مخزن تعادلی با نام مخزن تعادلی ۲ در فاصله ۵+۱۵۰ کیلومتری از مخزن تنگ‌مو و در طول مسیر خط انتقال دو عدد شیر فشارشکن در فاصله‌های ۰+۰۵۴ و ۳+۷۰۰ کیلومتری از مخزن تنگ‌مو تعبیه شده است. قطر داخلی لوله فولادی مورد استفاده در ابتدای مسیر (حداصل مخزن تعادل دو شیر فشارشکن در فاصله ۳+۷۰۰ کیلومتری) ۵۹۷/۲ میلی‌متر و قطر داخلی لوله (حداصل شیر فشارشکن در فاصله ۳+۷۰۰ کیلومتری - مخزن بتنی تنگ‌مو) برابر ۵۹۲/۶ میلی‌متر است. در فاصله ۰+۰۵۴ کیلومتری از مخزن تنگ‌مو یک شیر کنترل فشار با قابلیت استهلاک ۹۱ متر و شیر در فاصله ۳+۷۰۰ کیلومتری از مخزن، فشاری معادل ۱۳۷ متر را مستهلک می‌نماید. برای تحلیل قابلیت تحمل فشار به وجود آمده در اثر ضربه قوچ برای لوله‌های استفاده شده در خط انتقال باتوجه به ساختار لوله‌ها با استاندارد ST-44 از ۷۵ درصد فشار مجاز لوله‌ها استفاده شده است. این اطلاعات در جدول ۱ ارائه شده‌اند.

ثانیه در نظر گرفتند و نشان دادند که ضربه قوچ ایجاد شده از قدرت بالایی برخوردار نبوده و پمپ معکوس را می‌توان بدون استفاده از ساختارهای حفاظتی در خط لوله استفاده نمود.

مسئله مورد بررسی در پژوهش حاضر، اثر خاموشی پمپ معکوس بر وقوع پدیده ضربه قوچ و اثرات ایجاد شده بر خط انتقال آب است. محدوده مورد مطالعه، خطوط آب‌رسانی به شهرهای تحت پوشش شهرستان مسجدسلیمان واقع در استان خوزستان است. به منظور طراحی خطوط انتقال آب در حالت پایدار از نرم‌افزار WaterGEMS و در حالت ناپایدار از نرم‌افزار Bentley HAMMER CONNECT استفاده شد. لازم به توضیح است تمام تجهیزات مورد استفاده در خط انتقال باتوجه به نحوه اثرگذاری آن‌ها بر شرایط ناپایدار، در مدل هیدرولیکی لحاظ شده است.

مواد و روش‌ها

پروژه مورد مطالعه، خط انتقال آب به شهر مسجدسلیمان واقع در محدوده شمال شرق استان خوزستان است. آب مورد نیاز شهر مسجدسلیمان، از طریق رودخانه کارون در منطقه گدارلندر (مخزن سد گدار) تأمین می‌گردد. جریان برداشت شده از دریاچه سد گدار، در تصفیه‌خانه شهید بهنام محمدی

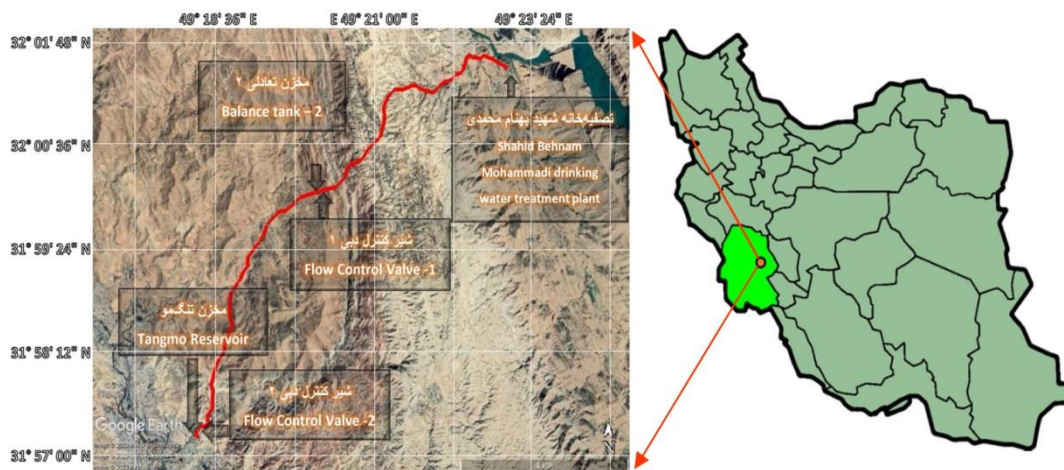
جدول ۱- مشخصات لوله‌های مورد استفاده در خط انتقال مسجدسلیمان و فشار مجاز قابل تحمل آن‌ها.

Table 1. Specifications of the pipes used in the transmission line of Masjid Suleiman and their allowable tolerable pressure.

قطر خارجی External diameter (mm)	قطر داخلی Internal diameter (mm)	ضخامت لوله Wall thickness (mm)	۵۰٪ حداکثر فشار مجاز 50% Extra Pressure (bar)	۷۵٪ حداکثر فشار مجاز 75% Extra pressure (bar)
609.6	597.2	12.4	70.27	105.60
609.6	592.6	17	98.72	148.36

پروفیل طولی مسیر خط انتقال آب از مخزن تعادلی ۲ به سمت مخزن تنگ‌مو قابل مشاهده است.

در شکل ۱- موقعیت جغرافیایی سد گدار لندر، شکل ۲- مسیر خط انتقال تصفیه‌خانه شهید بهنام محمدی به سمت مخزن تنگ‌مو و در شکل ۳-

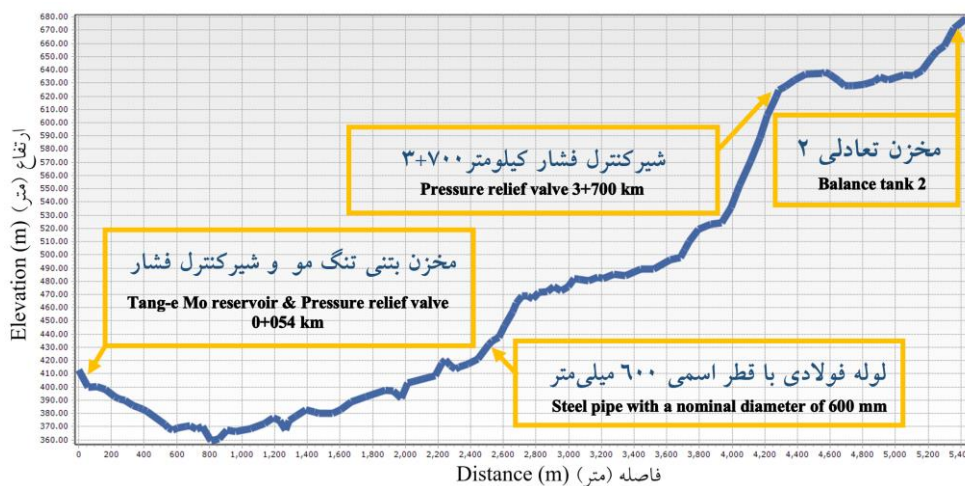


شکل ۲- مسیر خط انتقال تصفیه‌خانه شهید بهنام محمدی به سمت مخزن تنگ‌مو.

شکل ۱- موقعیت جغرافیایی سد گدار لندر.

Figure 1. Geographical location of Godar Lander Dam.

Figure 2. The transmission line of Shahid Behnam Mohammadi treatment plant towards Tangmo reservoir.



شکل ۳- پروفیل طولی مسیر خط انتقال آب از مخزن تعادلی ۲ به سمت مخزن تنگ‌مو.

Figure 3. Longitudinal profile of the transmission line from the balance tank 2 to the Tangmu tank.

امواج فشار در یک لوله است (۲۶). در طول یک تحلیل گذرا، مرزهای سیال و سیستم می‌توانند الاستیک (جریان ناپایدار یک مایع قابل تراکم در یک سیستم الاستیک) یا غیرالاستیک (جریان ناپایدار یک

معادلات حاکم بر جریان ناپایدار یا گذرا شامل معادلات ضربه قوچ پایه مربوط به تغییر فشار ناشی از تغییر آنی در سرعت جریان و بیانی برای سرعت

1- Transient Flow

توسط حرکت سیال و ویسکوزیته به دست آورد. معادلات اندازه- حرکت سه بعدی یک سیستم سیال واقعی به معادلات ناویر- استوکس معروف است. از آنجاکه جریان عمود بر دیوارهای لوله تقریباً صفر است، جریان در یک لوله را می توان تک بعدی در نظر گرفت که در این حالت، معادله اندازه- حرکت به شرح زیر است (۲۷):

$$\frac{\partial V}{\partial t} + V \frac{\partial V}{\partial x} + g \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{fV|V|}{2D} = 0 \quad (۳)$$

در این معادله، f ضریب اصطکاک داریسی- ویس باخ، D قطر داخلی لوله (متر)، V سرعت سیال (متر بر ثانیه)، عبارت $V \frac{\partial V}{\partial x}$ شتاب جابجایی (اغلب متناسب با تغییر فضایی سرعت در نقطه ای از سیال نادیده گرفته می شود)، عبارت $\frac{fV|V|}{2D}$ نشان دهنده تلفات اصطکاک در جهت جریان و عبارت $\frac{\partial V}{\partial t}$ شتاب محلی هستند. در نهایت معادله ساده شده زیر به دست می آید (۲۷):

$$\frac{\partial V}{\partial t} + g \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{fV|V|}{2D} = 0 \quad (۴)$$

از متداول ترین روش های حل معادلات حاکم بر جریان ناپایدار در لوله ها، روش خطوط مشخصه ها معرفی شده است. با استفاده از این روش، دو معادله دیفرانسیل جزئی حاکم بر جریان ناپایدار خطوط لوله را می توان به دو جفت معادله دیفرانسیل کامل به شکل زیر تبدیل کرد (۲۷):

$$\left. \begin{aligned} \frac{g}{a} \frac{dH}{dt} + \frac{dV}{dt} + \frac{fV|V|}{2D} &= 0 \\ \frac{dx}{dt} &= +a \end{aligned} \right\} C^+ \quad (۵)$$

$$\left. \begin{aligned} -\frac{g}{a} \frac{dH}{dt} + \frac{dV}{dt} + \frac{fV|V|}{2D} &= 0 \\ \frac{dx}{dt} &= -a \end{aligned} \right\} C^- \quad (۶)$$

مایع تراکم ناپذیر در یک سیستم صلب و سخت) باشند. هر دو نظریه گذرا از معادلات حاکم یکسان نشئت می گیرند. معادله پیوستگی و معادله اندازه- حرکت برای تعیین سرعت و فشار در یک سیستم جریان تک بعدی مورد نیاز است. اگر داده ها و مفروضات مورد استفاده برای ساخت مدل عددی معتبر باشد، حل این دو معادله یک نتیجه نظری ایجاد می کند که معمولاً با اندازه گیری های واقعی سیستم مطابقت دارد (۹).

معادله پیوستگی یک سیال بر اساس اصل بقا جرم است. شکل کلی معادله پیوستگی جریان سیال ناپایدار به شرح زیر است (۲۷):

$$\frac{\partial H}{\partial t} + V \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{a^2}{g} \frac{\partial V}{\partial x} = 0 \quad (۱)$$

که، a سرعت موج فشاری (متر بر ثانیه)، V سرعت متوسط در لوله (متر بر ثانیه) و H شیب خط هیدرولیکی است. لازم به ذکر است که عبارت دوم در معادله نسبت به سایر عبارات کوچک تر است و معمولاً نادیده گرفته می شود و معادله پیوستگی ساده شده زیر در اکثر مدل های ناپایدار استفاده می شود (۲۷):

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{a^2}{g} \frac{\partial V}{\partial x} = 0 \quad (۲)$$

مقدار سرعت موج فشار از حداقل ۳۴۰ متر بر ثانیه تا حداکثر ۱۴۳۸ متر بر ثانیه به ترتیب برای لوله های آب رسان پلاستیکی با دیواره نازک تا لوله های فولادی ضخیم متغیر است. سرعت موج فشار تحت تأثیر نصب لوله به دلیل بستر، لنگر و شرایط خاک است.

معادله اندازه- حرکت برای یک سیال را می توان با در نظر گرفتن نیروهای وارد بر یک المان کوچک یا حجم کنترل، از جمله تنش های برشی ایجاد شده

در صورتی که نسبت قطر داخلی و ضخامت لوله $(\frac{D}{e})$ بیش‌تر از ۲۵ باشد، حالات زیر برقرار است:
در حالتی که لوله فقط در بالادست ثابت باشد (خط لوله جدار نازک تنها در انتهای بالادست مهار شده است):

$$\psi = 1 - \frac{\mu}{2} \quad (11)$$

زمانی که تمام لوله‌ها ثابت هستند (خط لوله جدار نازک در تمام طول در مقابل حرکت طولی مهار شده است):

$$\psi = 1 - \mu^2 \quad (12)$$

در صورتی که تمام لوله‌ها توسط اتصالات انبساطی به یکدیگر متصل شده باشند:

$$\psi = 1 \quad (13)$$

در صورتی که نسبت قطر داخلی به ضخامت لوله $(\frac{D}{e})$ کم‌تر یا مساوی ۲۵ باشد، حالات زیر برقرار است:
چنانچه لوله فقط در بالادست ثابت باشد (خط لوله جدار ضخیم تنها در انتهای بالادست مهار شده است):

$$\psi = \frac{2e}{D}(1 + \mu) + \frac{D}{D+e}\left(1 - \frac{\mu}{2}\right) \quad (14)$$

در صورتی که تمام لوله‌ها ثابت باشند (خط لوله جدار ضخیم در تمام طول در مقابل حرکت طولی مهار شده است):

$$\psi = \frac{2e}{D}(1 + \mu) + \frac{D(1-\mu^2)}{D+e} \quad (15)$$

چنانچه تمام لوله‌ها توسط اتصالات انبساطی به یکدیگر متصل شده‌اند:

این معادلات را به صورت تحلیلی نمی‌توان حل کرد، اما می‌توان آن‌ها را به صورت گرافیکی در مختصات مکان-زمان به صورت خطوط (منحنی‌های) مشخصه که ویژگی‌ها نامیده می‌شوند، بیان کرد. این خطوط یا منحنی‌ها سیگنال‌هایی هستند که به طور هم‌زمان به راست (C+) و چپ (C-) منتشر می‌شوند. زمان رفت و برگشت موج در لوله: جهت محاسبه زمان رفت و برگشت موج در لوله می‌توان از رابطه زیر استفاده نمود (۲۸):

$$t_w = 2L/c \quad (7)$$

که، t_w معرف زمان رفت و برگشت موج در لوله (ثانیه)، L طول لوله (متر) و c سرعت موج (متر بر ثانیه) می‌باشد که از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$c = \sqrt{\frac{K/\rho}{1 + \frac{KD}{Ee}}\psi} \quad (8)$$

که، ρ چگالی (دانسیته) سیال (کیلوگرم بر مترمکعب)، D قطر داخلی لوله (متر)، e ضخامت لوله (متر)، K مدول الاستیسیته حجمی سیال (نیوتن بر مترمربع)، E مدول الاستیسیته لوله (نیوتن بر مترمربع) و ψ پارامتری بدون بعد تابع خواص الاستیک لوله، قطر لوله و نحوه مهار کردن آن (ضریبی است که شرایط تکیه‌گاهی لوله را بسته به جدار نازک یا ضخیم بودن در نظر می‌گیرد) است (۲۸). مقدار ψ برای لوله‌های جدار نازک که در ابتدا و انتهای لوله گیردار یا بدون مهار هستند به ترتیب از روابط زیر به دست می‌آید (۲۸):

$$\psi = \frac{D}{e}(1 - \nu^2) \quad (9)$$

$$\psi = \frac{D}{e} \quad (10)$$

$$\psi = \frac{2e}{D}(1 + \mu) + \frac{D}{D+e} \quad (16)$$

در معادلات فوق μ نسبت پواسن برای مصالح لوله است (۲۹).

نحوه مدل‌سازی: در این مطالعه به کمک قابلیت‌های نرم‌افزار WaterGEMS، مسیر خط انتقال، جنس و قطر لوله‌ها، شیرهای فشارشکن، مخازن و... طراحی و مدل در حالت پایدار شبیه‌سازی و پردازش گردیده است. پس از پردازش خط در حالت پایدار، به منظور بررسی جایگزینی پمپ معکوس با شیر فشارشکن و اثر خاموشی آن بر پدیده ضربه قوچ ایجادشده در خط انتقال، مدل طراحی‌شده در نرم‌افزار مذکور، در نرم‌افزار Bentley HAMMER CONNECT فراخوانی می‌شود تا تحلیل حالت ناپایدار مورد تحلیل و بررسی قرار گیرد. از آنجایی که نرم‌افزار Hammer قابلیت مدل‌سازی پمپ در حالت معکوس را ندارد، توربین به‌عنوان پمپ معکوس در مدل‌سازی به‌کاربرده شده است. لازم به ذکر است که راندمان پمپ در حالت توربین از حالت پمپ کمتر است. به همین دلیل به کمک روابط موجود هد و دبی در حالت پمپ، به هد و دبی در حالت پمپ معکوس، راندمان در حالت پمپ به راندمان در حالت پمپ معکوس و دور موتورپمپ به دور ژنراتور در حالت توربینی تبدیل می‌گردد. پس از انجام تغییرات موردنظر، پدیده ضربه قوچ در سه حالت به شرح زیر موردبررسی قرار گرفته است. در حالت اول به بررسی شرایط جریان در حالت ماندگار بدون اعمال هرگونه تغییری در شیرآلات، در حالت دوم به جایگزینی شیر فشارشکن کیلومتر ۰+۰۵۴ از مخزن تنگ‌مو با پمپ معکوس و بررسی ضربه قوچ حاصل از خاموشی آن بر خط انتقال درحالی‌که توربین کیلومتر ۰+۰۵۴ از مدار خارج شده است، در حالت سوم به جایگزینی شیر فشارشکن کیلومتر ۳+۷۰۰ از مخزن تنگ‌مو با

پمپ معکوس و بررسی ضربه قوچ حاصل از خاموشی آن بر خط انتقال درحالی‌که توربین کیلومتر ۳+۷۰۰ از مدار خارج شده است پرداخته شده است و تمامی حالات به تفکیک مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته‌اند. لازم به ذکر است دریچه ورودی هرکدام از پمپ‌های معکوس در مدت ۲۰ ثانیه بسته می‌گردد و در نتیجه دبی عبوری از هر توربین طی ۲۰ ثانیه به صفر می‌رسد. باتوجه‌به دبی و هد بالای موجود در خط انتقال، پمپ‌های معکوس به‌صورت موازی طراحی شده‌اند و از طراحی یک پمپ منفرد صرف‌نظر شده است. علت این امر، کاهش احتمال توقف هم‌زمان پمپ‌های معکوس در هر محل نصب و در نظر گرفتن ضریب اطمینان در طراحی است. با این عمل ضربه قوچ ایجادشده بر اثر خاموشی یک یا چندین پمپ معکوس با ابعاد کوچک‌تر، کمتر از حالت منفرد خواهد بود. از طرفی با انجام این کار احتمال مسدودشدن مسیر به‌طور کامل حذف گردیده و تأمین آب پایین‌دست با اعتمادپذیری بالاتری توأم خواهد بود. لازم به توضیح است پمپ‌های معکوس به‌صورت کنارگذر در مسیر خط انتقال قرار داده شده‌اند تا در صورت ازکارافتادن هم‌زمان تمامی پمپ‌ها، تأمین آب پایین‌دست دچار اختلال نگردد.

نتایج و بحث

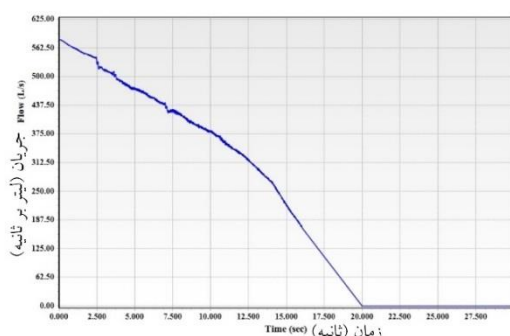
در این قسمت به بررسی اثر ضربه قوچ حاصل از جایگزینی شیرهای فشارشکن تعبیه‌شده در خط انتقال با پمپ معکوس و خاموشی پمپ در مدت ۲۰ ثانیه و تغییرات فشار ایجادشده در خط انتقال پرداخته شده است. در واقع منظور از خاموشی در مدت ۲۰ ثانیه به صفر رساندن دبی عبوری از پمپ معکوس در این مدت‌زمان است. پدیده ضربه قوچ ایجادشده بر اثر خاموشی مجزای هر پمپ معکوس و به صفر رساندن دبی عبوری از هر پمپ معکوس اثرات مختلفی بر

حالت اول: شرایط پایدار خط در حالت وجود شیرهای فشارشکن در فاصله‌های ۰+۰۵۴ و ۳+۷۰۰ کیلومتر: در این حالت به بررسی شرایط جریان در خط انتقال بدون اعمال هرگونه تغییرات در خط لوله پرداخته شده است. زمانی که شیرهای فشارشکن در حال کار هستند سرعت در شیر فشارشکن کیلومتر ۳+۷۰۰ معادل ۲/۰۷ متر بر ثانیه و فشار قبل از شیر فشارشکن برابر ۱۵۷/۷ متر آب به ۲۰ متر آب می‌رسد؛ هم‌چنین در شیر فشارشکن کیلومتر ۰+۰۵۴، سرعت معادل ۲/۱ متر بر ثانیه و فشار از ۱۰۴/۷۷ متر آب به ۱۳/۲ متر آب کاهش می‌یابد. لازم به توضیح است که از اختلاف فشار ورودی و خروجی در شیرهای کاهش فشار می‌توان انرژی برق‌آبی تولید نمود.

حالت دوم: جایگزینی شیر فشارشکن با پمپ معکوس در فاصله ۰+۰۵۴ و بررسی ضربه قوچ حاصل از خاموشی آن بر خط انتقال: در شیر فشارشکن اول به میزان ۹۱ متر فشار مستهلک می‌گردد. هم‌چنین دبی عبوری از آن ۵۸۰/۱۹ لیتر بر ثانیه است. در این حالت پمپ معکوس با دبی و فشار توربینی جایگزین شیرهای فشارشکن موجود گردیده است. دریچه‌های ورودی و خروجی به پمپ معکوس اول در مدت ۲۰ ثانیه بسته شده و دبی عبوری از آن به صفر کاهش می‌یابد. این درحالی است که پمپ معکوس کیلومتر ۳+۷۰۰ با دریچه‌های کاملاً باز در حال کار و تولید انرژی است. با خاموش شدن پمپ معکوس اول تغییراتی در فشار، جهت حرکت و سرعت سیال ایجاد می‌گردد و تمام مسیر خط انتقال متأثر از این تغییرات خواهد گردید. بر اساس معادله ۷ و با توجه به مشخصات لوله بالادست پمپ معکوس کیلومتر ۰+۰۵۴، زمان رفت و برگشت موج فشاری در طول لوله معادل ۵/۶۸ ثانیه محاسبه گردید. همان‌طور که در شکل ۴ تغییرات دبی در لوله قبل از پمپ معکوس کیلومتر ۰+۰۵۴ قابل مشاهده است دریچه

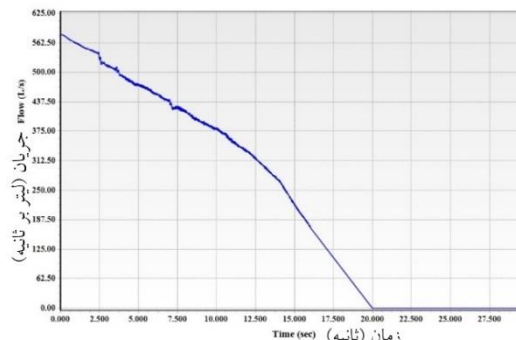
خط انتقال می‌گذارد. بر همین اساس لازم است تا تغییرات ایجاد شده در فشار، سرعت و دبی عبوری از تجهیزات خط انتقال در حالات گوناگون مورد تحلیل و بررسی قرار گیرد. بدین‌منظور در این مقاله اثر وقوع پدیده ضربه قوچ حاصل از خاموشی هر پمپ معکوس در سه حالت مختلف و یک حالت شرایط پایدار خط انتقال مورد بررسی قرار داده شده است. در حالت اول به بررسی شرایط جریان در حالت ماندگار بدون اعمال هرگونه تغییری در شیرآلات پرداخته شده است. در حالت دوم جایگزینی شیر فشارشکن کیلومتر ۰+۰۵۴ از مخزن تنگ‌مو با پمپ معکوس و ضربه قوچ حاصل از خاموشی پمپ معکوس بر خط انتقال درحالی‌که توربین کیلومتر ۰+۰۵۴ از مدار خارج شده است، مورد مطالعه قرار گرفته است. در حالت سوم جایگزینی شیر فشارشکن کیلومتر ۳+۷۰۰ از مخزن تنگ‌مو با پمپ معکوس و ضربه قوچ حاصل از خاموشی پمپ معکوس بر خط انتقال مورد بررسی شده است که توربین کیلومتر ۳+۷۰۰ از مدار خارج شده است. در حالت سوم فرض شده است که توربین کیلومتر ۳+۷۰۰ از مدار خارج شده است. در ادامه شکل‌های حاصل از شبیه‌سازی پدیده ضربه قوچ در نرم‌افزار Hammer مورد تحلیل و بررسی قرار داده شده‌اند. لازم به ذکر است باتوجه به تصفیه شدن آب در تصفیه‌خانه شهید بهنام محمدی و در نتیجه عدم وجود هرگونه جسم شناور در سیال احتمال انهدام پروانه پمپ نزدیک به صفر خواهد بود و پمپ‌های معکوس موجود در خط انتقال به واسطه یک جسم شناور از مدار خارج نمی‌گردند. هم‌چنین لازم به توضیح است در صورت از کار افتادن پروانه، پمپ معکوس مانند یک شیر عمل می‌نماید و جریان را از خود عبور می‌دهد. در نتیجه بسته شدن دریچه‌های پمپ‌ها و به صفر رسیدن دبی عبوری به‌منظور انجام تعمیرات که شرایط قابل کنترل را فراهم می‌آورد بدترین شرایط و بیش‌ترین موج فشاری را ممکن است ایجاد نماید.

مشاهده است دبی بالادست نیز کاهش خواهد یافت و جهت جریان تغییر می‌کند. طبق شکل‌های ۶ و ۷ حدود ۲/۵ ثانیه بیش از ۲۰ ثانیه بسته شدن دریچه‌های پمپ معکوس زمان می‌برد تا دبی عبوری کاهش یابد. بعد از این‌که سیال به پمپ معکوس ۳+۷۰۰ رسید جهت جریان معکوس می‌گردد و سیال به سمت بالادست حرکت کرده و لوله تخلیه می‌گردد.

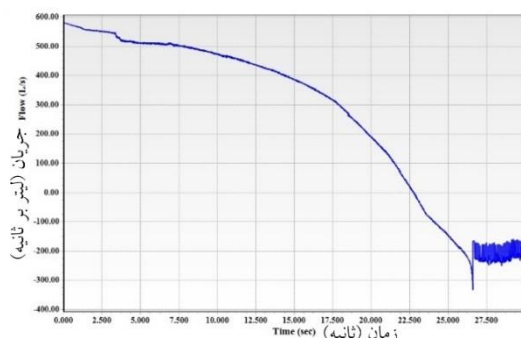


شکل ۵- تغییرات دبی در لوله بعد از پمپ معکوس ۰+۰۵۴.
Figure 5. Flow changes in the pipe after the reverse pump 0+054 km.

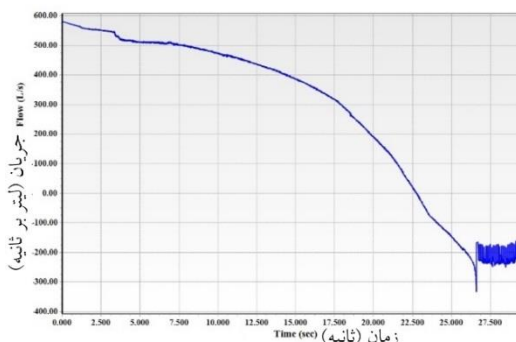
پمپ معکوس اول در مدت ۲۰ ثانیه بسته می‌شود و دبی عبوری در همان مدت زمان به صفر می‌رسد. در این هنگام پدیده ضربه قوچ به وقوع خواهد پیوست و نقاط بالادست پمپ معکوس اول متاثر از این پدیده خواهند شد. در شکل ۵ تغییرات دبی در لوله بعد از پمپ معکوس کیلومتر ۰+۰۵۴ نیز قابل مشاهده است. در لوله بعد از پمپ معکوس نیز جریان ورودی به صفر کاهش می‌یابد. همان‌طور که در شکل ۶ قابل



شکل ۴- تغییرات دبی در لوله قبل از پمپ معکوس ۰+۰۵۴.
Figure 4. Flow changes in the pipe before the reverse pump 0+054 km.



شکل ۷- تغییرات دبی در لوله بعد از پمپ معکوس واقع در کیلومتر ۳+۷۰۰ بر اثر خاموشی پمپ معکوس کیلومتر ۰+۰۵۴.
Figure 7. Flow changes after the reverse pump 3+700 due to the shutdown of the reverse pump 0+054.

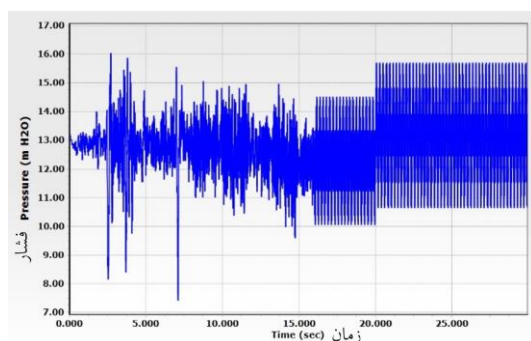


شکل ۶- تغییرات دبی در لوله قبل از پمپ معکوس واقع در کیلومتر ۳+۷۰۰ بر اثر خاموشی پمپ معکوس کیلومتر ۰+۰۵۴.
Figure 6. Flow changes before the reverse pump 3+700 due to the shutdown of the reverse pump 0+054.

معکوس رخ می‌دهد. طبق شکل ۸ در این لوله فشاری معادل ۳۶۰ متر آب (۳۶ بار) ایجاد می‌گردد و از این لحظه به بعد موج فشاری طی هر رفت و برگشت شروع به کاهش می‌نماید. در لوله پایین دست پمپ

در شکل ۸ تغییرات فشار در لوله قبل از پمپ معکوس ۰+۰۵۴ و در شکل ۹ تغییرات فشار در لوله بعد از پمپ معکوس ۰+۰۵۴ مشاهده می‌گردد. بیشترین موج فشاری در نزدیکترین لوله به پمپ

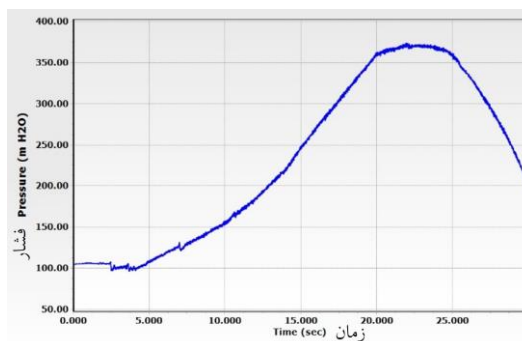
۰+۰۵۴ و در شکل ۱۱ تغییرات فشار در لوله بعد از پمپ معکوس واقع در کیلومتر ۳+۷۰۰ بر اثر خاموشی پمپ معکوس ۰+۰۵۴ مشاهده می‌گردد.



شکل ۹- تغییرات فشار در لوله بعد از پمپ معکوس ۰+۰۵۴.

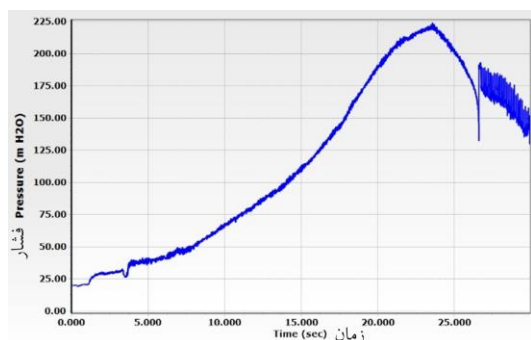
Figure 9. Pressure changes in the pipe after the reverse pump 0+054.

معکوس طبق شکل ۹ تغییرات فشار ناچیز است. در شکل ۱۰ تغییرات فشار در لوله قبل از پمپ معکوس واقع در کیلومتر ۳+۷۰۰ بر اثر خاموشی پمپ معکوس



شکل ۸- تغییرات فشار در لوله قبل از پمپ معکوس ۰+۰۵۴.

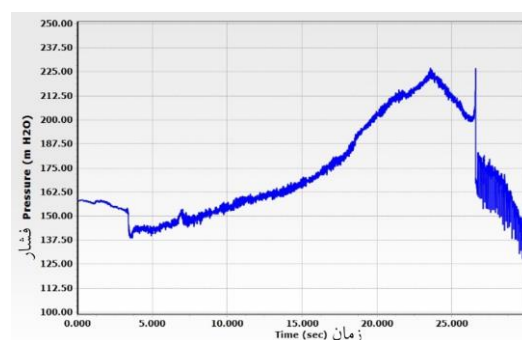
Figure 8. Pressure changes in the pipe before the reverse pump 0+054.



شکل ۱۱- تغییرات فشار در لوله بعد از پمپ معکوس واقع در

کیلومتر ۳+۷۰۰ بر اثر خاموشی پمپ معکوس ۰+۰۵۴.

Figure 11. Pressure changes after the reverse pump 3+700 due to the shutdown of the reverse pump 0+054.



شکل ۱۰- تغییرات فشار در لوله قبل از پمپ معکوس واقع در

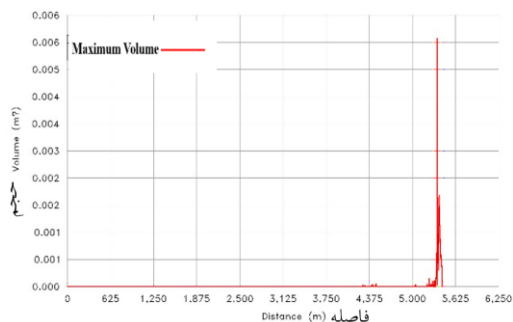
کیلومتر ۳+۷۰۰ بر اثر خاموشی پمپ معکوس ۰+۰۵۴.

Figure 10. Pressure changes before the reverse pump 3+700 due to the shutdown of the reverse pump 0+054.

۵۰ درصد حداکثر فشار مجاز برای لوله با قطر اسمی ۶۰۰ میلی‌متر ۷۰ بار و ۷۵ درصد حداکثر فشار مجاز برای همان قطر و ضخامت لوله معادل ۱۰۵ بار است. ۵۰ درصد حداکثر فشار مجاز برای لوله با قطر اسمی ۶۰۰ میلی‌متر برابر ۹۸ متر و برای ۷۵ درصد حداکثر فشار مجاز همان قطر و ضخامت لوله ۱۴۸ بار است. در راهنما شکل مذکور خط ممتد به رنگ قرمز نشان از حداکثر فشار ایجاد شده در مسیر خط انتقال، خط به رنگ سبز خط سه نقطه فشار اولیه خط انتقال و خط چین به رنگ آبی حداقل فشار ایجاد شده را

مطابق شکل‌های مذکور با رسیدن موج فشاری پایین‌دست به سمت بالادست فشار در لوله‌های قبل و بعد از پمپ معکوس واقع در ۳+۷۰۰ کیلومتری از مخزن تنگ‌مو افزایش می‌یابد و با بسته شدن ۱۰۰ درصد دریچه به حداکثر خود رسیده و با گذشت زمان در اثر اصطکاک سیال با جدار لوله موج فشاری ایجاد شده مستهلک می‌گردد تا جریان مجدداً به حالت پایدار اولیه باز خواهد گشت. در لوله‌های مذکور حداکثر فشار ایجاد شده حدود ۲۲/۵ بار معادل ۲۲۵ متر آب فشار برآورد شده است. طبق جدول ۱،

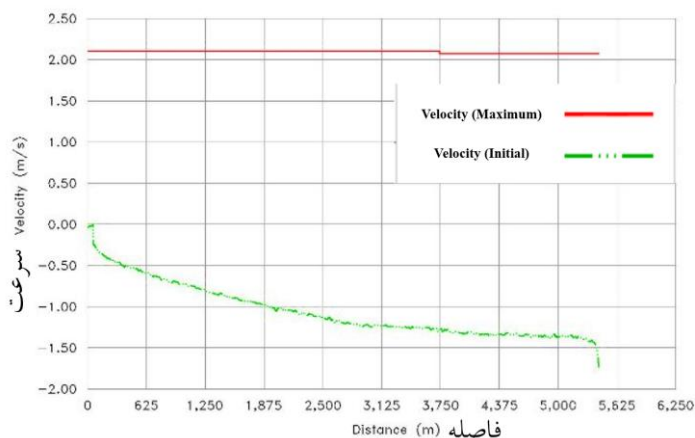
تحلیل شرایط ایجاد شده این نتیجه حاصل گردید که لوله‌های تعبیه شده در خط انتقال قابلیت تحمل فشار حداکثری مازاد تحمیل شده بر خط انتقال را دارا هستند. از طرفی باتوجه به شکل ۱۳ حداکثر حجم بخار آب ایجاد شده در نزدیکی مخزن تعادلی شماره ۲ رخ خواهد داد.



شکل ۱۳- فشار بخار آب ایجاد شده در طول مسیر خط انتقال بر اثر خاموشی پمپ معکوس در ۰+۰۵۴.

Figure 13. Vapor pressure at transmission line due to the shutdown of the reverse pump at 0+054.

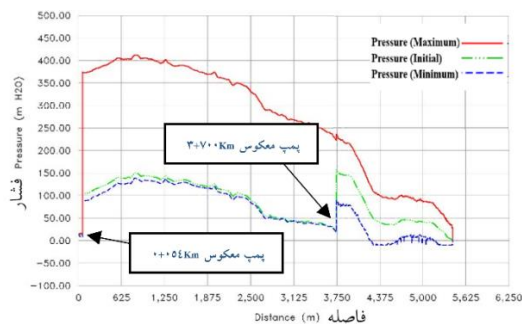
مقطع بالادست به صورت لحظه‌ای سرعت جریان به صفر می‌رسد و در ادامه مسیر باتوجه به شکل ۱۴- تغییرات سرعت سیال در طول مسیر خط انتقال بر اثر خاموشی پمپ معکوس در ۰+۰۵۴ مشاهده می‌شود که جهت و سرعت جریان معکوس گردیده است.



شکل ۱۴- تغییرات سرعت سیال در طول مسیر خط انتقال بر اثر خاموشی پمپ معکوس در ۰+۰۵۴.

Figure 14. Fluid speed changes at the transmission line due to reverse pump shutdown at 0+054.

نشان می‌دهد. در محل صفر پروفیل‌های ترسیم شده، مخزن تنگم قرار دارد و در ادامه طول مسیر خط انتقال به سمت بالادست قابل مشاهده است. در شکل ۱۲ تغییرات فشار در طول مسیر خط انتقال بر اثر خاموشی پمپ معکوس ۰+۰۵۴ ارائه شده است. باتوجه به نتایج حاصل از شبیه‌سازی ضربه قوچ و

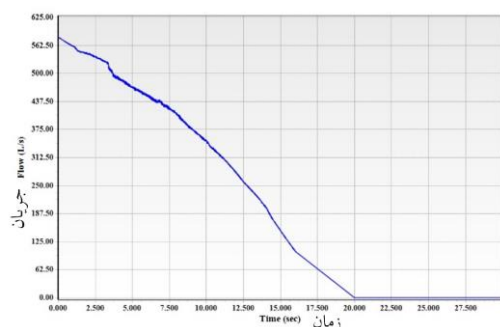


شکل ۱۲- تغییرات فشار در طول مسیر خط انتقال بر اثر خاموشی پمپ معکوس در ۰+۰۵۴.

Figure 12. Pressure changes at transmission line due to the shutdown of the reverse pump at 0+054.

حداکثر حجم بخار آب ایجاد شده حدود ۰/۰۰۶ مترمکعب، رخ می‌دهد. تجمع این حجم از بخار به علت ناچیز بودن قابل صرف‌نظر کردن است. زیرا که تجمع این حجم از بخار آب باعث عدم عبور سیال نمی‌گردد. به هر حال یک شیر تخلیه هوا در این محل تعبیه می‌گردد. با رسیدن موج فشاری ایجاد شده به هر

خروجی پمپ معکوس جایگزین شیر فشارشکن کیلومتر ۳+۷۰۰ شده در مدت ۲۰ ثانیه بسته می‌شود. از سوی دیگر پمپ معکوس در فاصله ۰+۰۵۴ کیلومتری مطابق شکل‌های ۱۷ و ۱۸ با دریچه‌های کاملاً باز انرژی الکتریکی تولید می‌نماید. لازم به توضیح است در صورت بسته شدن دریچه‌های پمپ ۳+۷۰۰ جریان پایین دست نیز کاهش می‌یابد؛ اما به دلیل کنارگذر بودن پمپ‌های معکوس در کیلومتر ۳+۷۰۰، دبی ورودی به پمپ‌های پایین دست به صفر نمی‌رسد و پمپ‌ها از مدار خارج نمی‌گردند.

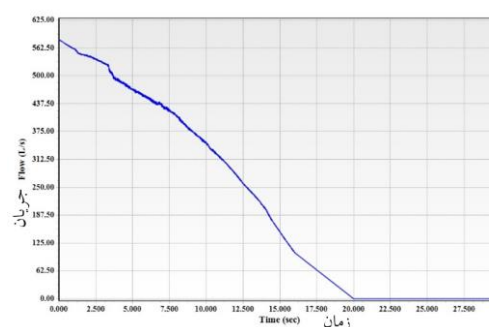


شکل ۱۶- تغییرات دبی در لوله بعد از پمپ معکوس ۳+۷۰۰.

Figure 16. Flow changes in the pipe after the reverse pump 3+700.

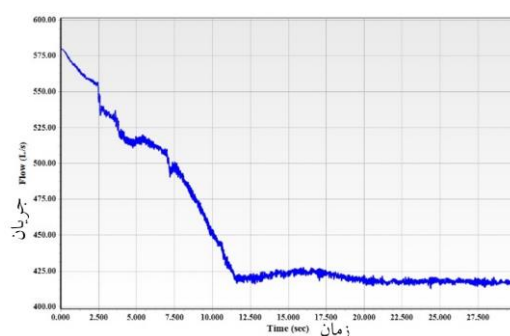
حالت سوم: جایگزینی پمپ معکوس با شیر فشارشکن در فاصله ۳+۷۰۰ کیلومتری از مخزن تنگ‌مو و بررسی ضربه قوچ حاصل از خاموشی آن بر خط انتقال: در شیر فشارشکن دوم به میزان ۱۳۷ متر فشار مستهلک می‌گردد. هم‌چنین دبی عبوری از آن ۵۸۰/۱۹ لیتر بر ثانیه است.

بر اساس معادله ۷ و با توجه به مشخصات لوله بالادست پمپ معکوس کیلومتر ۳+۷۰۰، زمان رفت و برگشت موج فشاری در طول لوله معادل ۲/۶۷ ثانیه محاسبه گردید. در این حالت مطابق شکل‌های ۱۵ و ۱۶ مشاهده می‌شود که دریچه‌های ورودی و



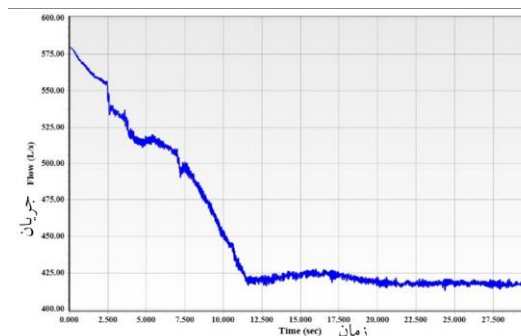
شکل ۱۵- تغییرات دبی در لوله قبل از پمپ معکوس ۳+۷۰۰.

Figure 15. Flow changes in the pipe before the reverse pump 3+700.



شکل ۱۸- تغییرات دبی در لوله بعد از پمپ معکوس واقع در

کیلومتر ۰+۰۵۴ بر اثر خاموشی پمپ معکوس ۳+۷۰۰.
Figure 18. Flow changes after the reverse pump 0+054 due to the shutdown of the reverse pump 3+700.

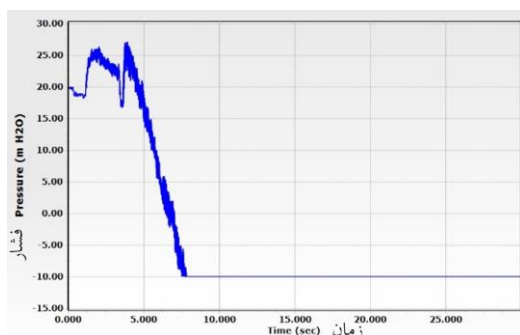


شکل ۱۷- تغییرات دبی در لوله قبل از پمپ معکوس واقع در

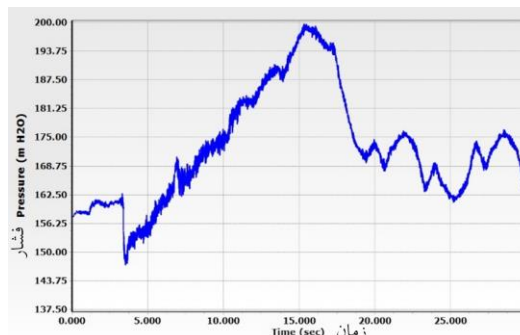
کیلومتر ۰+۰۵۴ بر اثر خاموشی پمپ معکوس ۳+۷۰۰.
Figure 17. Flow changes before the reverse pump 0+054 due to the shutdown of the reverse pump 3+700.

خاموشی پمپ معکوس ۳+۷۰۰ باعث ایجاد تغییرات فشار چشمگیر در لوله‌های قبل و بعد از پمپ معکوس ۰+۰۵۴ نمی‌گردد. در شکل ۲۳ تغییرات فشار در طول مسیر خط انتقال بر اثر خاموشی پمپ معکوس در ۳+۷۰۰ ارائه شده است. باتوجه به شکل ۲۴ در محدوده لوله بعد پمپ معکوس ۳+۷۰۰ حدود ۱۴ مترمکعب بخار آب تجمع خواهد یافت. در صورت عدم تعبیه شیر هوا در مسیر خط، حجم بخار ایجاد شده مانع از عبور سیال خواهد گشت.

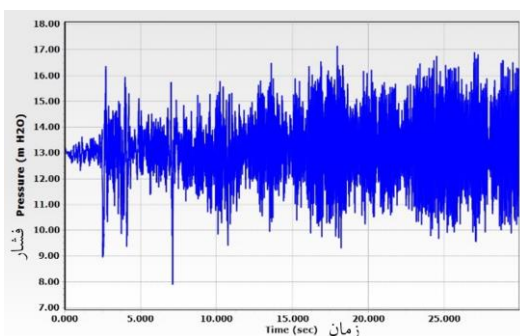
در شکل ۱۹ تغییرات فشار در لوله قبل از پمپ معکوس ۳+۷۰۰ و در شکل ۲۰ تغییرات فشار در لوله بعد از پمپ معکوس ۳+۷۰۰ مشاهده می‌گردد. همان‌طور که در شکل ۱۹ قابل مشاهده است در صورت بسته شدن دریچه‌های پمپ معکوس فشار قبل از پمپ تا حدود ۲۰۰ متر معادل ۲۰ بار به صورت لحظه‌ای افزایش می‌یابد. در شکل ۲۰ فشار لوله بعد از پمپ نشان داده شده است که در اثر شروع ضربه قوچ و کاهش دبی، فشار لوله به منفی ۱۰ متر کاهش می‌یابد. شکل‌های ۲۱ و ۲۲ نشان‌دهنده این است که



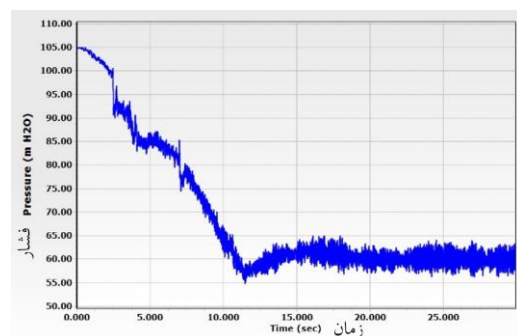
شکل ۲۰- تغییرات فشار در لوله بعد از پمپ معکوس ۳+۷۰۰.
Figure 20. Pressure changes in the pipe after the reverse pump 3+700.



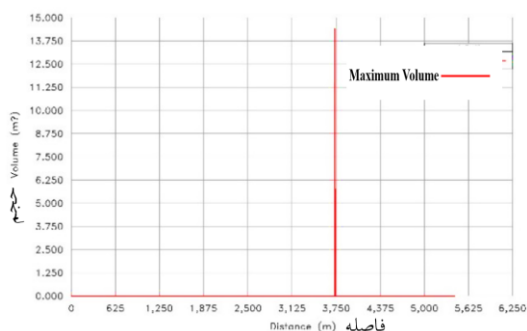
شکل ۱۹- تغییرات فشار در لوله قبل از پمپ معکوس ۳+۷۰۰.
Figure 19. Pressure changes in the pipe before the reverse pump 3+700.



شکل ۲۲- تغییرات فشار در لوله بعد از پمپ معکوس واقع در کیلومتر ۰+۰۵۴ بر اثر خاموشی پمپ معکوس ۳+۷۰۰.
Figure 22. Pressure changes after the reverse pump 0+054 due to the shutdown of the reverse pump 3+700.

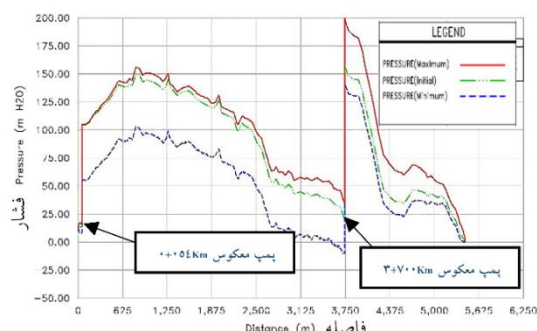


شکل ۲۱- تغییرات فشار در لوله قبل از پمپ معکوس واقع در کیلومتر ۰+۰۵۴ بر اثر خاموشی پمپ معکوس ۳+۷۰۰.
Figure 21. Pressure changes before the reverse pump 0+054 due to the shutdown of the reverse pump 3+700.



شکل ۲۴- فشار بخار آب ایجاد شده در طول مسیر خط انتقال بر اثر خاموشی پمپ معکوس در ۳+۷۰۰.

Figure 24. Vapor pressure at transmission line due to the shutdown of the reverse pump at 3+700.

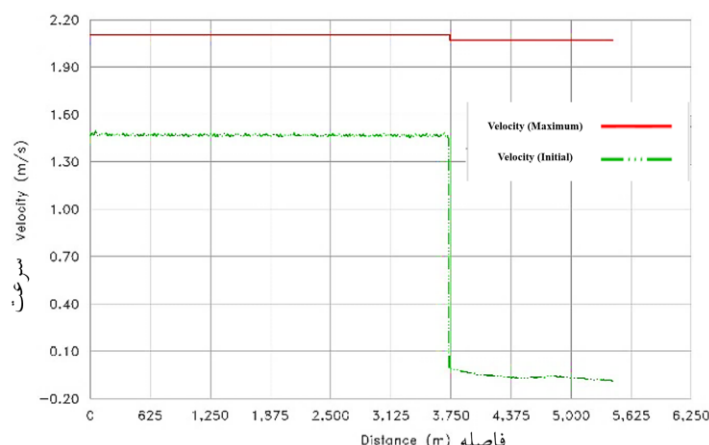


شکل ۲۳- تغییرات فشار در طول مسیر خط انتقال بر اثر خاموشی پمپ معکوس در ۳+۷۰۰.

Figure 23. Pressure changes at transmission line due to the shutdown of the reverse pump at 3+700.

جریان و سرعت سیال عبوری در لوله می‌گردد. هم‌چنین هم‌زمان با تغییر جهت حرکت و سرعت سیال از سرعت سیال نیز کاسته می‌شود.

از طرفی باتوجه به شکل ۲۵ بعد از خاموشی پمپ معکوس ۳+۷۰۰ خط انتقال بالادست آن شاهد تغییرات سرعت زیادی خواهد بود. توقف پمپ معکوس و موج فشاری ایجاد شده باعث تغییر جهت



شکل ۲۵- تغییرات سرعت سیال در طول مسیر خط انتقال بر اثر خاموشی پمپ معکوس در ۳+۷۰۰.

Figure 25. Fluid speed changes at the transmission line due to reverse pump shutdown at 3+700.

شرب است. در حالت اول شرایط پایدار خط انتقال در حالت وجود شیرهای فشارشکن در فاصله‌های ۰+۰۵۴ و ۳+۷۰۰ کیلومتر ارائه شد. در این حالت مشخص شد زمانی که شیرهای فشارشکن در حال کار هستند سرعت در شیر فشارشکن ۳+۷۰۰ معادل ۲/۰۷ متر بر ثانیه و فشار قبل از شیر فشارشکن برابر ۱۵۷/۷ متر آب به ۲۰ متر آب می‌رسد؛ هم‌چنین در شیر فشارشکن ۰+۰۵۴، به ترتیب سرعت معادل ۲/۱

نتیجه‌گیری کلی

در این پژوهش به بررسی اثر وقوع پدیده ضربه قوچ، حداکثر و حداقل فشار تحمیلی به خط انتقال در اثر جایگزینی پمپ معکوس با شیرهای فشارشکن موجود در خط انتقال آب شرب تصفیه‌شده شهر مسجدسلیمان پرداخته شده است. دلیل اصلی جایگزینی پمپ‌های معکوس با شیرهای فشارشکن استحصال انرژی مازاد ناشی از اختلاف ارتفاع در خط انتقال آب

ایجادشده مؤثر قلمداد کردند. براساس نتایج این پژوهش‌گران چنانچه نحوه بسته شدن شیر به صورت خطی باشد، در موج فشاری ایجادشده، شاهد نوسانات غیرمعمول خواهیم بود (۳۱). قابل ذکر است که در پژوهش حاضر از روش خطی جهت بسته شدن شیر استفاده شده است. به طور کلی نتایج بیانگر آن است که وقوع پدیده ضربه قوچ در اثر ازکارافتادن پمپ‌های معکوس تعبیه شده در خط انتقال باوجود ایجاد موج‌های فشاری مثبت و منفی در خط انتقال باعث ایجاد اختلال در آبرسانی و تخریب خط نمی‌گردد. از سوی دیگر حداکثر و حداقل فشارهای ایجادشده در خطوط انتقال آب بعد از گذشت مدت‌زمانی مستهلک می‌گردد. نتایج به دست آمده با نتایج کرامر و همکاران (۲۰۱۸) همخوانی دارد. این پژوهش‌گران جهت بررسی تأثیر ضربه قوچ بر پمپ معکوس، زمان بسته شدن شیر را برابر با ۲۲ ثانیه در نظر گرفتند. نتایج مدل‌سازی این پژوهش‌گران نشان داد که ضربه قوچ ایجادشده در شرایط مذکور قدرت بالایی نداشته و نیاز به محافظت از پمپ معکوس در برابر ضربه قوچ وجود ندارد (۲۵). لازم به توضیح است رده لوله‌های فلزی انتخاب شده در خط، استحکام لازم برای تحمل حداکثر و حداقل فشارهای وارده را دارا هستند. در نتیجه جایگزینی شیر فشارشکن با پمپ معکوس و استحصال انرژی بدون ایجاد هیچ‌گونه مشکلی امکان‌پذیر است و در صورت وقوع پدیده ضربه قوچ، خط انتقال توانایی تحمل در برابر موج فشاری مضاعف ایجادشده را خواهد داشت و آبرسانی به شهرهای پایین دست امکان‌پذیر است.

داده‌ها و اطلاعات

داده‌های این پژوهش مربوط به پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد نویسنده اول است که با مکاتبه با نویسنده مسئول قابل دسترسی می‌باشند.

متر بر ثانیه و فشار از $104/77$ متر آب به $13/2$ متر آب کاهش می‌یابد. در حالت دوم به بررسی جایگزینی شیر فشارشکن $0+054$ با پمپ معکوس و بررسی ضربه قوچ حاصل از خاموشی آن بر خط انتقال پرداخته شد. نتایج این تحلیل بیانگر آن است که با بسته شدن دریچه‌های پمپ‌ها در مدت ۲۰ ثانیه فشار در لوله قبل از پمپ معکوس $0+054$ به اندازه حدود 360 متر افزایش یافته است. لازم به توضیح است که پمپ معکوس در فاصله $3+700$ کیلومتری با دریچه کاملاً باز در حال کار و استحصال انرژی است. در حالت سوم پمپ معکوس جایگزین شیر فشارشکن در فاصله $3+700$ کیلومتری از مخزن تنگ‌موشده است و به اثر وقوع ضربه قوچ حاصل از خاموشی پمپ معکوس بر خط انتقال پرداخته شده است، درحالی‌که پمپ معکوس $0+054$ کیلومتری از مخزن تنگ‌موشده در حال کار است. نتایج بیانگر آن است که به دلیل کنارگذر بودن پمپ‌ها دبی ورودی به پمپ معکوس پایین دست به صفر نمی‌رسد و درصدی کاهش می‌یابد. در لوله قبل از پمپ معکوس $3+700$ فشاری معادل 200 متر آب ایجاد می‌گردد. فشار لوله بعد از پمپ معکوس در اثر شروع ضربه قوچ و کاهش دبی به منفی 10 متر کاهش می‌یابد. از سوی دیگر در محدوده لوله بعد پمپ معکوس $3+700$ حدود 14 مترمکعب بخار آب تجمع خواهد یافت. از جمله مواردی که در گراف‌های مربوط به تغییرات فشار مشاهده می‌شود، نوسانات غیرمعمول فشار نسبت به زمان است. کیکوتو و همکاران (۲۰۱۹) نیز چنین نوسان‌هایی را در گراف‌های مربوط به فشار داخل لوله تحت تأثیر بسته شدن شیر ارائه نموده‌اند که این پدیده تحت تأثیر پارامترهای مختلفی مانند دبی جریان و تراز انرژی در نقطه موردنظر است (۳۰). آداموسکی و لواندوسکی (۲۰۱۵) در پژوهشی که بر روی موج فشاری ناشی از بسته شدن شیر انجام دادند، نحوه بسته شدن شیر را بر روی نوسانات فشار

تعارض منافع

در این مقاله تعارض منافع وجود ندارد.

اصول اخلاقی

نویسندگان اصول اخلاقی را در انجام و انتشار این اثر علمی رعایت نموده‌اند و این موضوع مورد تأیید همه آن‌ها است.

مشارکت نویسندگان

نویسنده اول: جمع‌آوری اطلاعات، انجام مدل‌سازی. نویسنده دوم: انجام تحلیل‌ها، اصلاح و نهایی‌سازی مقاله. نویسنده سوم: مشارکت در تحلیل‌ها. نویسنده چهارم: مشارکت در مدل‌سازی.

حمایت مالی

این پژوهش در قالب پایان‌نامه کارشناسی ارشد در دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان انجام شده است.

منابع

- Liu, M., Tan, L., & Cao, S. (2022). Performance Prediction and Geometry Optimization for Application of Pump as Turbine: A Review. *Front. Energy Res.* 9, 818118. doi: 10.3389/fenrg.2021.818118.
- Binama, M., Su, W. T., Li, X. B., Li, F. C., Wei, X. Z., & An, S. (2017). Investigation on Pump as Turbine (PAT) Technical Aspects for Micro Hydropower Schemes: A State-Of-The-Art Review. *Renew. Sust. Energ. Rev.* 79, 148-179. doi:10.1016/j.rser.2017.04.071.
- Motwani, K. H., Jain, S. V., & Patel, R. N. (2013). Cost Analysis of Pump as Turbine for Pico Hydropower Plants - A Case Study. *Proced. Eng.* 51, 721-726. doi:10.1016/j.proeng.2013.01.103.
- Carravetta, A., Del Giudice, G., Fecarotta, O., Morani, M. C., & Ramos, H. M. (2022). A New Low-Cost Technology Based on Pump as Turbines for Energy Recovery in Peripheral Water Networks Branches. *Water*, 14 (10), 1526.
- Araujo, L. S., Ramos, H., & Coelho, S. T. (2006). Pressure Control for Leakage Minimisation in Water Distribution Systems Management. *Water Resour. Manage.* 20, 133-149. doi: 10.1007/s11269-006-4635-3.
- Samora, I., Manso, P., Franca, M. J., Schleiss, A. J., & Ramos, H. M. (2016). Energy recovery using micro-hydropower technology in water supply systems: The case study of the city of Fribourg. *Water*. 8 (8), 344.
- Mitrovic, D., Novara, D., García Morillo, J., Rodríguez Díaz, J. A., & Mc Nabola, A. (2022). Prediction of Global Efficiency and Economic Viability of Replacing PRVs with Hydraulically Regulated Pump-as-Turbines at Instrumented Sites within Water Distribution Networks. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 148 (1), 04021089.
- Carravetta, A., Del Giudice, G., Fecarotta, O., & Ramos, H. (2013). Pump as Turbine (PAT) Design in Water Distribution Network by System Effectiveness. *Water*. 5, 1211-1225. doi:10.3390/w5031211.
- Buono, D., Frosina, E., Mazzone, A., Cesaro, U., & Senatore, A. (2015). Study of a Pump as Turbine for a Hydraulic Urban Network Using a Tridimensional CFD Modeling Methodology. *Energ. Proced.* 82, 201-208. doi:10.1016/j.egypro.2015.12.020.
- Rossi, M., Righetti, M., & Renzi, M. (2016). Pump-as-Turbine for Energy Recovery Applications: the Case Study of an Aqueduct. *Energ. Proced.* 101: 1207-1214. doi:10.1016/j.egypro.2016.11.163.
- Lydon, T., Coughlan, P., & McNabola, A. (2017). Pump-As-Turbine: Characterization as an Energy Recovery Device for the Water Distribution Network. *J. Hydraul. Eng.* 143 (8), 04017020. doi:10.1061/(asce)hy.1943-7900.0001316.

12. De Marchis, M., Fontanazza, C. M., Freni, G., Messineo, A., Milici, B., Napoli, E., Nataro, V., Puleo, V., & Scopa, A. (2014). Energy Recovery in Water Distribution Networks. Implementation of Pumps as Turbine in a Dynamic Numerical Model. *Proced. Eng.* 70, 439-448.
13. Renzi, M., Rudolf, P., Štefan, D., Nigro, A., & Rossi, M. (2019). Installation of an Axial Pump-As-Turbine (PaT) in a Wastewater Sewer of an Oil Refinery: A Case Study. *Appl. Energ.* 250, 665-676. doi:10.1016/j.apenergy.2019.05.052.
14. Nourbakhsh, A., & Derakhshan, SH. (2006). Analyzing and prediction of the best performance point of pump rotating as turbine. *Journal of Faculty of Engineering (University of Tehran)*, 39 (6), 765-771. [Translated in Persian]
15. Abdel Fatah, M., Ashraf, A., & Al Bazed, G. A. (2022). Model and protected design of water piping system to minimize the water hammer effect. Chemical Engineering and Pilot Plant Department, Engineering Research Division, National Research Center, Dokki, Cairo, Egypt.
16. Wood, F. M. (1970). History of Waterhammer. Civil Engineering Research Report, #65, Queens University, Canada.
17. Brunone, B., Karney, B. W., Mecarelli, M., & Ferrante, M. (2000). Velocity profiles and unsteady pipe friction in transient flow. *Journal of water resources planning and management*, 126 (4), 236-244.
18. Pal, S., Hanmaiahgari, P. R., & Karney, B. W. (2021). An overview of the numerical approaches to water hammer modelling: The ongoing quest for practical and accurate numerical approaches. *Water*. 13 (11), 1597.
19. Urbanowicz, K. (2017). Computational compliance criteria in water hammer modelling. In E3S Web of Conferences. 19, 03021. EDP Sciences.
20. Streeter, V. L., & Lai, C. (1962). Waterhammer Analysis Including Fluid Friction. *Journal of Hydraulics Division, ASCE*. 88 (3), 79-112.
21. Wylie, E. B., & Streeter, V. L. (1993). Fluid Transients in Systems. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey.
22. Pejovic, S., Zhang, Q. F., Karney, B., & Gajic, A. (2011). Analysis of pump-turbine 'S' instability and reverse water hammer incidents in hydropower systems. In 4-th International meeting on Cavitation and dynamic problems in hydraulic machinery and systems (26-28). IAHR.
23. Hassanzadeh, Y., Kardan, N., Hassanzadeh, M., & Zamanian, J. (2017). Comparison of the Controlling Methods of the Maximum and Minimum Pressures Resulting from Water Hammer Phenomenon in High Pressure Pumping Stations. *Water and Soil Science*. 27 (1), 121-134. [Translated in Persian]
24. Parsasadr, A., Ahmadi, A., Keramat, A., & 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 (4), 207-221. [Translated in Persian]
25. Kramer, M., Terheiden, K., & Wieprecht, S. (2018). Pumps as turbines for efficient energy recovery in water supply networks. *Renewable Energy*. 122, 17-25.
26. Chaudhry, M. H. (2014). Applied hydraulic transients (Vol. 415). New York: Springer.
27. Bentley HAMMER. (2018). Bentley Hammer CONNECT Edition Help. Watertown, CT, USA. Available from: <https://docs.bentley.com/LiveContent/web/Bentley%20HAMMER%20SS6-v1/en/GUID-12FD39B9-2B8A-4C84-938F-0583CAD2AB23.html>.
28. Hwang, N. H., Houghtalen, R. J., Akan, A. O., & Hwang, N. H. (1996). Fundamentals of hydraulic engineering systems (No. TC160. H8213 1981.). Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall.
29. Abuiziah, I., Oulhaj, A., Sebari, K., & Ouazar, D. (2013). Controlling transient flow in Pipeline systems by desurging tank with automatic air control. *International Journal of Physical, Natural Science and Engineering*, 7 (12), 334-340.

30. Kikuta, H., Shimokawa, K., Izutsu, K., Tsukamoto, T., & Nakamura, S. (2019). March. Unusual pressure rise during the load rejection at a Deriaz turbine. In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science (240: 2. 022058). IOP Publishing.
31. Adamkowski, A., & Lewandowski, M. (2015). Preventing destructive effects of water hammer in hydropower plant penstocks. In Proceedings of the ACI's Hydropower Development Conference: Europe.