Journal of Water & Wastewater Science & Engineering (jwwse)
Summer 2017, Vol. 2, No. 2.
DOI: 10.22112/jwwse.2018.88848.1014

علوم و مهندسی آب و فاضلاب

نشریه علوم و مهندسی آب و فاضلاب
سال دوم، شماره ۲، تابستان ۱۳۹۶

Controlling the Negative Pressure Caused by Water Hammer in Water Conveyance Pipe Lines Using Hydropneumatics Tank and Air Valves (A Case Study of Mehran City, Ilam Province)

Asrin Bahrami[1], Jaafar Mamizadeh[2*], Alireza Hoseini[2] and Hamidreza Lotfizadeh[3]
1- MSc Student in Hydraulic Structures, Ilam University, Ilam, Iran.
2- Assistant Professor, Water Engineering Group, Ilam University, Ilam, Iran.
3- Lecturer, Azad Islamic University, Ilam Branch, Ilam, Iran.
* Corresponding author, Email: j.mamizadeh@ilam.ac.ir

Received: 9/6/2017
Revised: 17/10/2017
Accepted: 21/10/2017

Abstract

Whenever and for any reason the velocity of fluid ceases in the transfer line or water distribution networks, pressure waves will form in the pipe lines, which can produce a pressure several times more than a pressure in the pump station and lead to a great deal of tension on network's components, which in turn will cause the water hammer phenomenon. Today, in every water transfer project, a detailed study on the water hammer phenomenon is essential, so that with a full recognition of this process's adverse effects, the adequate measures would be taken to deal with it. This study uses Water Hammer V8i software to analyze the water hammer of Mehran city's border terminal water conveyance pipe. The study was executed in 3 phases of simulation with protective equipment, without the protective equipment and with consultant's recommended equipment. The results indicate that in the phase without protective equipment, a great deal of negative pressure builds up along the water conveyance pipe line that needs to be controlled. In the next step, various combinations of hydropneumatics tank and air valves were suggested. The results of several simulations showed that a 2-square meter hydropneumatics tank and 3 fifty-millimeter air valves will be capable of controlling the negative pressure along the pipe line.

Keywords: Hydropneumatics tank, Water conveyance, Water hammer,Water Hammer V8i.

کنترل فشارهای منفی ناشی از ضربه قوچ در خطوط انتقال آب با ترکیب تانک ضربه‌گیر و شیر هوا (مطالعه موردی: شهرستان مهران، استان ایلام)

اسرین بهرامی[۱]، جعفر مامی‌زاده[۲*]، علیرضا حسینی[۲] و حمیدرضا لطفی‌زاده[۳]
۱- دانشجوی کارشناسی ارشد سازه های آبی، گروه مهندسی آب، دانشگاه ایلام، ایلام، ایران.
۲- استادیار گروه مهندسی آب، دانشگاه ایلام، ایلام، ایران.
۳- مربی دانشگاه آزاد اسلامی، واحد ایلام، ایلام، ایران.
* نویسنده مسئول، ایمیل: j.mamizadeh@ilam.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۳/۱۹
تاریخ اصلاح: ۱۳۹۶/۷/۲۵
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۷/۲۹

چکیده

هرگاه در خطوط انتقال یا شبکه‌های توزیع آب، به‌هر دلیلی سرعت سیال به‌طور ناگهانی متوقف شود، امواج فشاری در لوله‌ها به‌وجود می‌آید. این امواج می‌توانند چندین برابر فشار کارکرد پمپ فشار تولید نموده و موجب به‌وجود آمدن تنش‌های زیادی در اجزای شبکه و بروز پدیده ضربه قوچ شوند. امروزه در کلیه طرح‌های انتقال آب، مطالعه دقیق ضربه قوچ یک امر لازم و ضروری است تا با شناخت کامل اثرات آن، برای کنترل اثرات سوء این فرآیند تمهیدات مناسب اتخاذ شود. در این تحقیق از نرم افزار Water Hammer V8i برای تحلیل ضربه قوچ خط انتقال آب پایانه مرزی شهرستان مهران استفاده شد. مطالعه حاضر در سه مرحله به‌صورت شبیه‌سازی بدون تجهیزات حفاظتی، با تجهیزات حفاظتی و تجهیزات پیشنهادی مشاور صورت گرفت. نتایج تحقیق نشان داد در حالت بدون تجهیزات حفاظتی فشارهای منفی زیادی در طول خط انتقال به‌وجود آمده و باید کنترل شوند. در مرحله بعدی ترکیب‌های مختلف تانک ضربه‌گیر و شیر هوا پیشنهاد شد. نتایج شبیه‌سازی‌های متعدد نشان داد که تانک ضربه‌گیر ۲ مترمکعبی و ۳ عدد شیر هوای ۵۰ میلی‌متری قادر به کنترل فشارهای منفی در طول خط هستند.

کلمات کلیدی: ضربه قوچ، خط انتقال آب، تانک ضربه‌گیر، شیرهوا، Water Hammer V8i.

۱- مقدمه

بهره‌برداری اصولی و برنامه‌ریزی‌شده از منابع کشور از کارهای ملی و پرهزینه‌ای است که برای دست‌یابی به مصارف شهری، صنعت و تولیدات کشاورزی باید صورت پذیرد. بنابراین در این زمینه طراحی و انتقال صحیح آب حائز اهمیت است. یکی از پدیده‌های مهم و مشکل‌ساز درخطوط انتقال آب پدیده ضربه قوچ است. این پدیده در خطوط لوله جریان تحت‌فشار و مجاری بسته اتفاق می‌افتد و به‌وضوح بر قوانین فشار، تغییرات دبی، تغییرات سرعت جریان و شرایط مکانی و زمانی حرکت سیال استوار است (Karimi, 2012). این پدیده به‌طور عمده در اثر تغییر ناگهانی شرایط مرزی در سامانه‌های انتقال سیال مانند قطع ناگهانی پمپ یا توربین، باز و بسته شدن سریع دریچه‌ها یا شیرفلکه، استفاده از شیر یک‌طرفه نامناسب و پر کردن غیراصولی خطوط لوله ناشی می‌شود. با توجه به این‌که در اثر این پدیده فشارهای مثبت و منفی شدیدی به‌وجود می‌آید، در طراحی، نگهداری و عملکرد سامانه‌های توزیع آب مهم است (Ehtesammanesh, 2012).

Ghobadian and Bahrami (2013) در تحقیق خود تأثیر طول و قطر انشعاب بر هیدرولیک جریان‌های میرا در لوله‌های تحت‌فشار به‌صورت عددی مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که با کاهش قطر و طول انشعاب، میزان فشار حداکثر و حداقل افزایش می‌یابد. بررسی پدیده ضربه قوچ با استفاده از روش مشخصه در خط لوله سیستم آبگیر سد خاکی آدرنجان بافت استان کرمان نشان داد که با بسته شدن ناگهانی و تدریجی شیری به قطر ۰/۶ متر با افزایش زمان بسته شدن شیر هد فشاری کاهش می‌یابد و با توجه به افت در سیستم و همچنین فشار ناشی از پدیده ضربه قوچ می‌توان قطر لوله را کمتر در نظر گرفت که این امر موجب کاهش هزینه‌های اجرایی می‌شود (Sayari and Khanjani, 2013). بررسی ضربه قوچ خط انتقال و ایستگاه پمپاژ آب دشت بناب در استان آذربایجان غربی با استفاده از نرم‌افزار Water Hammer در سه مرحله به‌صورت شبیه‌سازی بدون تجهیزات، با تجهیزات کمتر و با تجهیزات پیشنهادی مشاور نشان داد که تعدادی از نقاط در مقایسه با سایر قسمت‌های خط لوله دارای ضعف بیشتری در مواجهه با ضربه قوچ بوده و در اجرای طرح باید اصلاح شود (Masoomi Pahrabad et al., 2014).

مطالعه ضربه قوچ شبکه آبیاری اسماعیل‌آباد لرستان با استفاده از نرم‌افزار Water Hammer نشان داد که با کاهش سریع تقاضای آب و قطع جریان پمپ نوسانات فشاری ایجاد می‌شود که نتایج نامطلوبی از قبیل فشارهای مثبت بیش از اندازه بالا به وجود می‌آورد، بنابراین در این شبکه استفاده از روش‌های کنترل جریان میرای هیدرولیکی ناشی از ضربه قوچ به‌منظور کنترل این پدیده توصیه می‌شود (Hazeri et al., 2014).

در مطالعه پدیده ضربه قوچ ایستگاه پمپاژ ام‌الدبس و خطوط انتقال منتهی به مخازن ذخیره طرح غدیر واقع در استان خوزستان با استفاده از نرم‌افزار Water Hammer، ابتدا تجهیزات جلوگیری از ضربه قوچ طراحی شد و سپس کارایی آن برای جلوگیری از صدمات احتمالی این پدیده مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج آزمایش‌ها، بررسی‌ها و نمودارها نشان داد که با نصب تجهیزات جلوگیری از ضربه قوچ در مقایسه با حالت بدون تجهیزات تغییرات فشار کمتری مشاهده می‌شود و موج فشاری در مدت ۱۰۰ ثانیه میرا شده و تقریباً به حالت پایدار می‌رسد (Siahi and Jalilzadeh, 2015).

مطالعه کارایی شبکه‌های آب‌رسانی شهرستان فریدون‌شهر استان اصفهان تحت پدیده ضربه قوچ برمبنای ضریب پایداری با استفاده از نرم‌افزار Water Hammer نشان داد که می‌توان از پارامتر پایداری برای ارزیابی شبکه‌های آب‌رسانی استفاده نمود. در اثر وقوع پدیده ضربه قوچ ۴/۸۳ درصد نقاط شبکه موردمطالعه، ضریب پایداری کمتر از یک داشتند. در اثر استفاده از سازه حفاظتی در بیشتر نقاط، افزایش پارامتر پایداری رخداده و این مقدار به ۱/۱۱ درصد نقاط شبکه می‌رسد. همچنین افزایش ضریب هیزن و افزایش قطر لوله باعث افزایش پارامتر پایداری شده و کاهش ضریب باعث کاهش پارامتر پایداری شد (Khajehayzad and Ahadiyan, 2016).

شبیه‌سازی نوسانات فشاری ناشی از پدیده ضربه قوچ در جریان آرام تراکم‌پذیر درون یک لوله الاستیک با استفاده از حل عددی معادلات پیوستگی و اندازه حرکت در نرم‌افزارهای Ansys و Fluent نشان داد که بستن شیر به‌صورت ناگهانی باعث افزایش فشار درون لوله می‌شود که این افزایش فشار به‌صورت نوسانی بوده و در طی زمان شدت آن کاهش می‌یابد. همچنین پس از بررسی تأثیر ضخامت لوله ملاحظه شد که با افزایش ضخامت لوله، شدت ضربه ایجاد شده در لوله افزایش

می‌یابد. به‌علاوه تأثیر جنس لوله بر ضربه قوچ ایجاد شده در لوله‌هایی از جنس پلی‌اتیلن نسبت به لوله‌های بتنی کمتر بوده و در لوله‌های فلزی از همه بیشتر است (Mohammadi et.al, 2016).

Holloway and Chaudhry (1985) در پژوهشی دقت و پایداری الگوریتم‌های صریح با دقت مرتبه اول برای آنالیز و حل پدیده ضربه قوچ را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد زمانی که ترم افت اصطکاکی زیاد باشد و شرط کورانت نیز رعایت شده باشد، الگوریتم صریح دچار ناپایداری می‌شود. همچنین کارایی انواع مختلف الگوریتم‌های ضمنی برای تحلیل جریان غیردائمی بررسی شد. مدل‌سازی و بهینه‌سازی هیدرولیک گذرا در سامانه‌های توزیع آب با استفاده از دو روش کلاسیک (الگوریتم شبه‌نیوتن) و ابتکاری (الگوریتم ژنتیک) برای به حداقل رساندن اثرات ناپایدار ناشی از بسته شدن شیر در شبکه‌های توزیع آب نشان داد که حتی برای کوچک‌ترین ناپایداری استفاده از بهینه‌سازی می‌تواند اثرات منفی ناپایداری را به‌صورت قابل‌ملاحظه‌ای کاهش دهد (Skulovich et al., 2014).

۲- مواد و روش‌ها

نرم‌افزار Water Hammer v8i نرم‌افزاری توان‌مند برای طراحی و آنالیز شبکه لوله‌های تحت فشار در دو حالت جریان پایدار و ناپایدار است، که به مهندسان در تحلیل و درک بهتر سیستم‌های مرکب از پمپ و شبکه‌های لوله هنگام انتقال از یک حالت پایدار به حالت پایدار دیگر، کمک می‌کند و آن‌ها را قادر می‌سازد تا تجهیزات کنترلی اقتصادی و مطمئنی را طراحی کنند. در این نرم‌افزار علاوه‌بر امکان مدل‌سازی لوله‌ها، پمپ‌ها، شیرها، مخزن‌ها و سایر اجزای شبکه، امکان مدل‌سازی تجهیزات حفاظتی جهت جریان‌های ناپایدار شامل مخازن هوای باز و تحت فشار، انواع شیرهای کاهش فشار نظیرشیرهای هوا و اطمینان، قابلیت تعیین زمان باز یا بسته شدن شیر، امکان مدل‌سازی حالت از کار افتادن ناگهانی پمپ، امکان تعیین سرعت موج در لوله‌های مختلف و ... نیز وجود دارد. تاکنون ۸ نسخه از این نرم‌افزار به بازار عرضه شده و آخرین نسخه از این سری Water Hammer V8i است. روابط حاکم بر پدیده ضربه قوچ به‌صورت ترکیبی از معادلات مومنتم و معادله پیوستگی هستند که در حالت یک‌بعدی به‌صورت معادلات (۱) و (۲) نشان داده می‌شوند:

$$\frac{dv}{dt}+\frac{1}{\rho}.\frac{dp}{dx}+g\frac{dz}{dx}+\frac{f}{2D}v|v|=0 \qquad (۱)$$

$$a^2\frac{dv}{dx}+\frac{1}{\rho}.\frac{dp}{dt}=0 \qquad (۲)$$

که v: سرعت، p: فشار آب، f: ضریب زبری، D: قطر لوله، ρ: چگالی آب، g: شتاب جاذبه زمین و a: سرعت انتشار موج هستند. مدل موردنظر این معادلات را با گسسته‌سازی به‌روش تفاضل محدود و روش مشخصه حل می‌کند. سرعت انتشار موج در داخل لوله به عواملی از قبیل جنس، قطر و ضخامت لوله، نوع سیال و نحوه مهار کردن لوله بستگی دارد. برای محاسبه سرعت انتشار موج داخل لوله از رابطه (۳) استفاده می‌شود (Chaudhry, 2014).

که a: سرعت موج درون لوله، k: مدول الاستیسیته حجمی‌سیال،

$$a=\sqrt{\frac{k}{\rho(1+\left(\frac{k}{E}\right)\psi)}} \qquad (۳)$$

ρ: جرم مخصوص سیال، E: مدول الاستیسیته دیواره لوله و ψ: پارامتر بدون بعدی است که تابعی از خواص الاستیک لوله، قطر لوله و نحوه مهار کردن آن می‌باشد.

در این مطالعه فشارهای ناشی از ضربه قوچ در خط انتقال آب پایانه مرزی شهرستان مهران در استان ایلام (شکل ۱) با ترکیب تانک ضربه‌گیر و شیر هوا توسط نرم افزار Hammer V8i مورد بررسی قرار گرفت. محدوده مطالعاتی با طول جغرافیایی ۱۰ ۴۶ شرقی و عرض جغرافیایی ۰۷ ۳۳ شمالی و ارتفاع ۱۵۰ متر در فاصله حدود ۹۰ کیلومتری جنوب شهر ایلام واقع‌شده است.

آب مورد نیاز منطقه از طریق خط انتقالی به طول ۲۰ کیلومتر از جنس پلی‌اتیلن با قطر ۲۰۰ میلی متر و ضخامت ۱۴/۷ میلی‌متر تأمین می‌شود. ضریب هیزن ویلیامز لوله‌ها ۱۲۰ درنظر گرفته شده است. مشخصات فنی خط انتقال در جدول ۱ ارائه شده است. مقدار دبی مورد نیاز منطقه با توجه به جمعیت تقریبا برابر با ۲۰ لیتر در ثانیه برآورد شده است. سرعت موج در خط لوله (رابطه ۳) با توجه به جنس و مشخصات لوله برابر با ۳۰۰ متر در ثانیه محاسبه شد.

در این تحقیق ابتدا شرایط جریان ماندگار با استفاده از نرم‌افزار WaterGEMS مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. سپس به منظور تحلیل جریان غیرماندگار از نرم‌افزار Hammer v8i

شکل ۱- موقعیت جغرافیایی طرح موردمطالعه

جدول ۱- مشخصات فنی لوله‌ها، گره‌ها و مخازن

گره، مخزن	ارتفاع (متر)	شماره لوله	طول لوله (متر)
۱	۱۶۹	۱	۵
۲	۱۶۷	۲	۵۸۲
۳	۱۶۲	۳	۸۴۹
۴	۱۶۳	۴	۳۹۶
۵	۱۶۲	۵	۱۴۷
۶	۱۵۹	۶	۱۶۱
۷	۱۶۴	۷	۳۶۹
۸	۱۶۱	۸	۲۰۶۰
۹	۱۶۰	۹	۱۲۳۶
۱۰	۱۴۹	۱۰	۸۳۷
۱۱	۱۴۰	۱۱	۳۴۳۹
۱۲	۱۳۴	۱۲	۲۵۵۱
۱۳	۱۲۷	۱۳	۱۲۸۵
۱۴	۱۲۲	۱۴	۱۱۰۷
۱۵	۱۱۹	۱۵	۲۲۶۴
مخزن ۱	۱۷۴	۱۶	۱۱۷۸
مخزن ۲	۱۳۰	۱۷	۱۹۰۲

استفاده می‌شود. شرایط جریان غیرماندگار در خط لوله به‌وسیله خاموش شدن ناگهانی پمپ در ابتدای خط انتقال ایجاد شد. برای کنترل ضربه قوچ ناشی از این پدیده سناریوهای مختلفی شامل تانک ضربه‌گیر و شیر هوا اجرا و در نهایت گزینه مطلوب

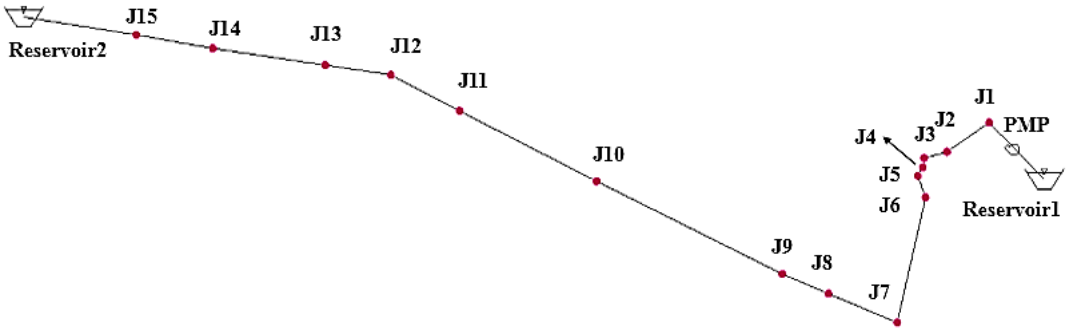
جدول ۲- مشخصات پمپ مورداستفاده

پمپ مدل (UQN345/3(22KW	
دبی پمپ (لیتر بر ثانیه)	۱۹/۸۴
هد پمپ (متر)	۷۶/۷۷
توان (کیلو وات)	۲۲
ممان اینرسی پمپ و موتور (نیوتن . مترمربع)	۱/۱۷۹
راندمان (درصد)	۸۰

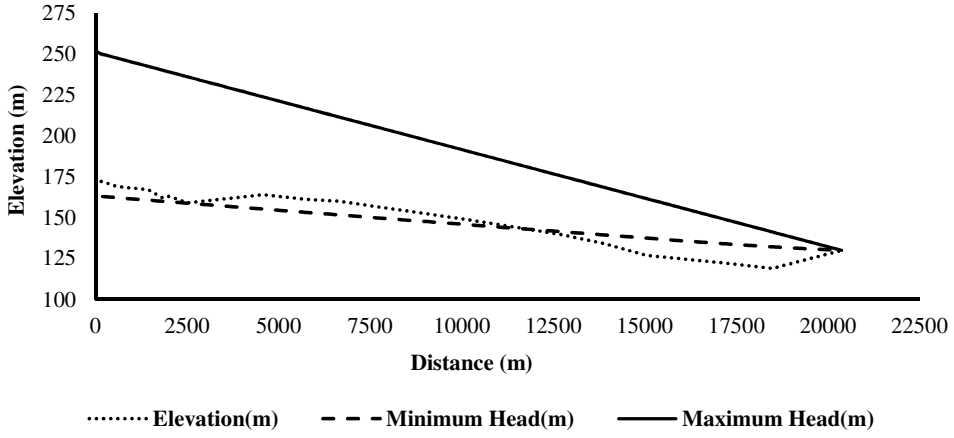
پیشنهاد شد.

۳- نتایج و بحث

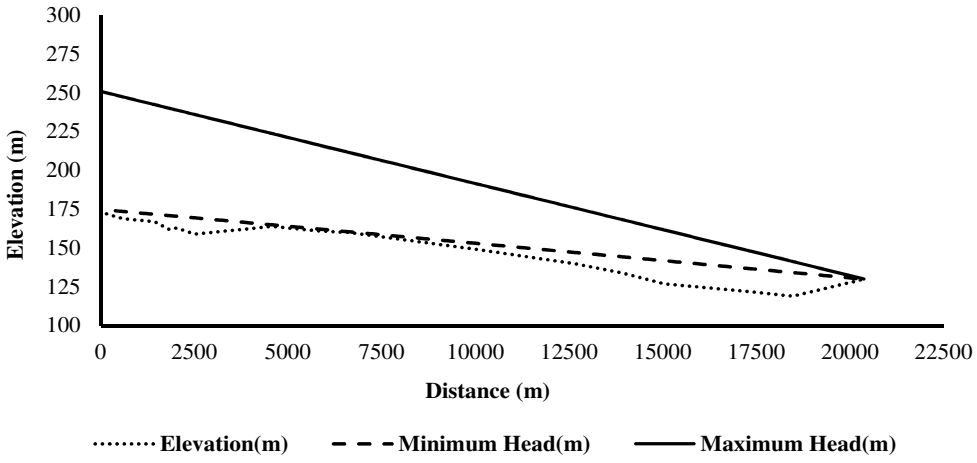
به منظور تحلیل خط انتقال تحت شرایط جریان ماندگار از نرم‌افزار WaterGEMS استفاده شد و تحت شرایط جریان به‌صورت ثقلی مشخص شد که حداکثر دبی قابل انتقال برابر با ۸ لیتر در ثانیه است. بنابراین به‌منظور تامین دبی منطقه که تقریباً برابر ۲۰ لیتر در ثانیه است باید در ابتدای خط انتقال پمپ مناسبی طراحی شود. با مراجعه به کاتالوگ و مشخصات پمپ‌های شرکت پمپیران، الکتروپمپی با مشخصات به شرح جدول ۲ انتخاب شد. تحلیل شرایط جریان غیرماندگار در نرم‌افزار Hammer v8i بدون تجهیزات مهارکننده ضربه قوچ مطابق شکل ۲ مدل‌سازی شد. پروفیل خط انتقال در برابر حداکثر و حداقل فشارهای ایجاد شده در شکل ۳ نشان داده شده است. نتایج حاصل از مدل‌سازی در این حالت نشان داد که حداکثر فشارهای مثبت



شکل ۲- مسیر خط انتقال بدون تجهیزات مهارکننده ضربه قوچ

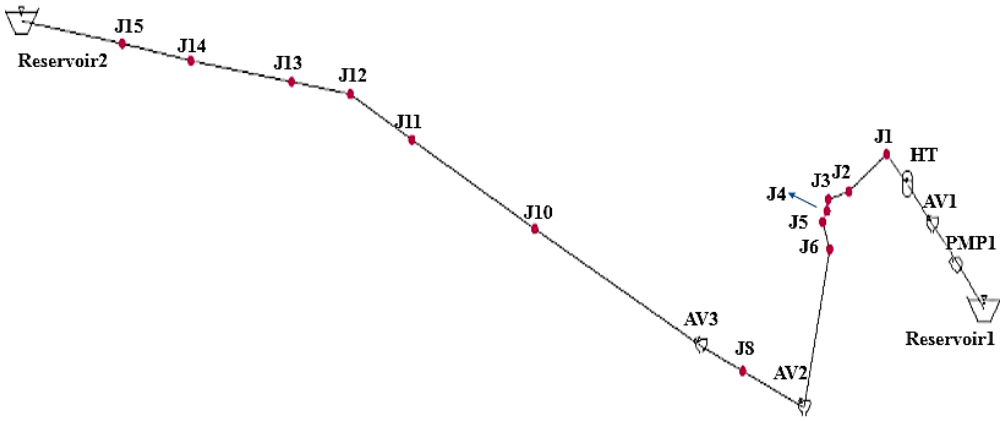


شکل ۳- پروفیل حداقل و حداکثر فشار خط انتقال در حالت بدون تجهیزات مهارکننده ضربه قوچ



شکل ۴- پروفیل حداقل و حداکثر فشار خط انتقال با قرار دادن تانک ضربه‌گیر ۳ مترمکعبی در ابتدای مسیر

ایجاد شده دارای مشکل قابل‌ملاحظه‌ای نبوده و فقط فشارهای منفی زیادی در طول خط ایجاد شده که این مسئله خطرآفرین است. با توجه به شکل مشخص است که خط انتقال از ابتدای مسیر تا کیلومتر ۱۲ دارای فشار منفی بوده و این فشار منفی منجر به پدیده جدایی ستون مایع می‌شود. بنابراین نیاز است که در این خط انتقال تجهیزات حفاظتی نصب شود.



شکل ۵- مسیر خط انتقال با قرار دادن تانک ضربه‌گیر و شیر هوا

در این مرحله سناریوهای مختلفی از ترکیب تانک ضربه‌گیر و آرایش‌های مختلف شیرهای هوا در طول خط استفاده شد. در ابتدا شبیه‌سازی‌های مختلفی به‌منظور تعیین حداقل حجم لازم تانک ضربه‌گیر با نرم‌افزار انجام گرفت که در نهایت با قرار دادن یک تانک ضربه‌گیر ۳ مترمکعبی بلافاصله بعد از پمپ مطابق با شکل ۴ تقریباً تمام فشار منفی ایجاد شده در خط لوله برطرف شد.

در مرحله بعد به منظور کاهش حجم تانک ضربه‌گیر از ترکیب تانک با شیر هوا در طول خط انتقال استفاده شد. نتایج شبیه‌سازی‌های متعدد توسط نرم‌افزار نشان داد که با قرار دادن یک تانک ضربه‌گیر ۲ مترمکعبی بلافاصله بعد از پمپ و سه عدد شیر هوا به قطر ۵۰ میلی‌متر به‌صورت شکل ۵ می‌توان فشارهای منفی ایجاد شده را از بین برد.

در مرحله آخر، خط انتقال با استفاده از تجهیزات پیشنهادی مهندسین مشاور که شامل یک عدد تانک ضربه‌گیر ۲ مترمکعبی و شش عدد شیر هوا به قطر ۵۰ میلی‌متر است مدل‌سازی شد. سه عدد از شیرهای هوا در فاصله بین گره شماره ۱۰ و مخزن ۲ قرار داشته و سه عدد دیگر مطابق با پروفیل شکل ۵ هستند. نتایج شبیه‌سازی این حالت نیز نشان داد که کلیه فشارهای منفی حذف شده است و نتایج آن نیز با حالت استفاده از تانک ۳ مترمکعبی هم‌خوانی داشت. مطابق با استانداردهای طراحی تجهیزات حفاظتی خطوط انتقال آب که در آن پیشنهاد شده شیرهای هوا در فواصل حداکثر ۷۵۰ متر از یکدیگر نصب شوند، به‌نظر می‌رسد که طراحی مشاور منطقی است.

۴- نتیجه‌گیری و پیشنهادات

در این تحقیق پدیده ضربه قوچ خط انتقال پایانه مرزی شهرستان مهران در سه مرحله به‌صورت شبیه‌سازی بدون تجهیزات حفاظتی، با تجهیزات حفاظتی و با تجهیزات پیشنهادی مشاور توسط نرم‌افزار Water Hammer V8i انجام شد. ابتدا مدل‌سازی جریان ماندگار با نرم‌افزار WaterGEMS انجام گرفت و نتایج نشان داد که شرایط جریان ثقلی قادر به تامین نیاز منطقه به مقدار ۲۰ لیتر در ثانیه نبوده و باید از سیستم پمپاژ استفاده کرد. سپس تحلیل شرایط جریان غیرماندگار بدون استفاده از تجهیزات حفاظتی با نرم‌افزار Water Hammer V8i نشان داد که خط انتقال از ابتدای مسیر تا کیلومتر ۱۲ دارای فشار منفی بوده و این فشار منفی منجر به پدیده جدایی ستون مایع می‌شود و نیاز است توسط روش‌های مختلف حفاظت شوند. به‌منظور کنترل فشارهای منفی، سناریوهای مختلفی از ترکیب تانک ضربه‌گیر و آرایش‌های مختلف شیرهای هوا در طول خط استفاده شد. در حالت اول با قرار دادن یک تانک ضربه‌گیر ۳ مترمکعبی بلافاصله بعد از پمپ تقریباً تمام فشار منفی ایجاد شده در خط لوله برطرف شد. در حالت دوم از تجهیزات پیشنهادی مشاور شامل یک تانک ضربه‌گیر دو مترمکعبی و شش عدد شیر هوا استفاده شد و در نهایت ترکیب یک تانک ضربه‌گیر و سه شیر هوا به قطر ۵۰ میلی‌متر (حالت سوم) به عنوان گزینه مطلوب در نظر گرفته شد.

۵- مراجع

احتشام منش، ج.، (۱۳۸۹)، *راهنمای نرم‌افزار Hammer*، انتشارات آیدین، تهران.

حاضری، ا.، قبادیان، ر.، و فاطمی، س.ح.، (۱۳۹۵)، «بررسی ضربه قوچ در شبکه آبیاری اسماعیل‌آباد با استفاده از نرم‌افزار Hammer»، اولین کنفرانس ملی پژوهش‌های نوین در علوم فنی و مهندسی، اردبیل.

خواجه‌های زاد، ف.، و احدیان، ج.، (۱۳۹۵)، "کارایی شبکه‌های آبرسانی تحت پدیده ضربه قوچ بر مبنای ضریب پایداری (مطالعه موردی: شبکه آبرسانی شهرستان فریدون‌شهر)»، نشریه دانش آب و خاک، ۲۶(۲/۱)، ۵۹-۷۱.

سیاحی، ع.، جلیل‌زاده، ر.، و سیاحی، ا.، (۱۳۹۴)، «بررسی پدیده ضربه قوچ در ایستگاه‌های پمپاژ و خطوط انتقال آبرسانی»، اولین همایش مدیریت تقاضا و بهره‌وری مصرف آب، شرکت آب و فاضلاب استان همدان، همدان.

سیاری، س.، و خانجانی، م.ج.، (۱۳۹۲)، «آنالیز چکش آبی در سیستم آبگیر سد آدرنجان»، دوازدهمین همایش ملی آبیاری و کاهش تبخیر، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان.

قبادیان، ر.، و بهرامی، ز.، (۱۳۹۲)، «بررسی عددی تأثیر طول و قطر انشعاب بر هیدرولیک جریان‌های میرا در لوله‌های تحت فشار»، کنفرانس مهندسی عمران و توسعه پایدار با محوریت کاهش خطرپذیری در بلایای طبیعی، مؤسسه آموزش عالی خاوران، مشهد.

کریمی، م.، (۱۳۹۱)، *Water Hammer*، انتشارات نوآور، تهران.

محمدی، ر.، داودی، م.ح.، و رامیان، آ.، (۱۳۹۵)، «شبیه‌سازی عددی ضربه قوچ در جریان آرام درون یک لوله»، اولین کنفرانس بین المللی مهندسی مکانیک و هوا فضا، تهران.

معصومی پهرآبادی، ع.، طحنی، آ.، و دانشفراز، ر.، (۱۳۹۳)، «بررسی ضربه قوچ در خط انتقال و ایستگاه پمپاژ آب (مطالعه موردی: دشت بناب)»، سیزدهمین کنفرانس هیدرولیک ایران، دانشگاه تبریز.

Chaudhry, H. (2014), *Applied hydraulic transients*, Springer, New York, Heidelberg, Dordrecht, London.

Holloway, M., and Chaudhry, H., (1985), "Stability and accuracy of water hammer analysis", *Advances in Water Resources*, 8(3), 128-121.

Skulovich, O., Perelman, L., and Ostfeld, A., (2014), "Modeling and optimizing hydraulic transients in water distribution systems", *Procedia Engineering*, 70, 1565-1558.