

# بررسی عملکرد گزینه‌های کاهنده اثرات پدیده ضربه قوچ در یک خط انتقال آب، مطالعه موردی: خط انتقال شهرک مسکونی شیردم واقع در شهر تهران

کیومرث روشنگر<sup>۱</sup>      پدram پورحیدر<sup>۲</sup>

(دریافت ۹۲/۲/۲)      پذیرش ۹۲/۸/۱۹)

## چکیده

تغییر ناگهانی شرایط مرزی در سیستم‌های انتقال آب مانند باز و بسته شدن ناگهانی شیر فلکه و روشن و خاموش شدن ناگهانی پمپ و توربین، باعث ایجاد جریان گذرای می‌شود که اصطلاحاً ضربه قوچ نامیده می‌شود. این پژوهش، یک مطالعه موردی بود که در آن پارامترهای مؤثر موجود در خط انتقال نظیر جنس لوله و غیره و تأسیسات کاهنده ضربه قوچ به منظور کاهش اثرات ناشی از این پدیده بررسی شد. این کار با مدل‌سازی یک مثال عملی شامل خط انتقال آب از ایستگاه پمپاژ در نزدیکی شهرک مسکونی شهید شیردم به مخزن بالادست منطقه، واقع در شهر تهران به کمک نرم‌افزار Bentley HammerXMV:8 انجام شد. بررسی و مقایسه نتایج حاصله نشان داد که لوله GRP نسبت به لوله آزیست سیمانی، مقدار ۴۹/۱ کیلوپاسکال و نسبت به لوله آهنی مقدار ۵۰/۳ کیلوپاسکال، کاهش فشار داشته است. بررسی مقایسه‌ای سیستم‌های حفاظتی حاکی از این بود که اولاً مخازن ضربه‌گیر در کنترل فشار بهتر از سایر لوازم حفاظتی عمل نمودند به طوری که فشار بیشینه به میزان ۳/۹ بار، نسبت به چرخ طیار و ۵ بار، نسبت به شیر یک‌طرفه کاهش داشت و ثانیاً در به‌کارگیری ترکیبی عوامل حفاظتی، کاربرد همزمان مخزن بار ضربه‌گیر با چرخ طیار، ایده‌آل‌ترین روش برای کنترل ضربه قوچ در این مطالعه موردی بود.

**واژه‌های کلیدی:** ضربه قوچ، مخازن ضربه‌گیر، چرخ طیار، Bentley Hammer

## Evaluation of Reductive Option of Water Hammer Phenomenon for a Water Conveyance System, A Case Study of Shahid Shirdom Residential District-Tehran

K. Roshangar<sup>1</sup>

P. Pour Heidar<sup>2</sup>

(Received Apr. 22, 2013    Accepted Nov. 10, 2013)

### Abstract

Sudden changes in the boundary conditions of water transmission systems, such as sudden opening and closing of valves or abrupt on and off switching of pumps and turbines cause a transient flow called 'water hammer'. In this study, comparisons were made between the effective parameters including pipeline material, on the one hand, and the equipment and tools available for reducing the effects of water hammer, on the other. For this purpose, a practical example of a water transmission line from a pumping station located near Shahid Shirdom Residential District to the upstream reservoir in Tehran was used for modeling by the Bentley Hammer XMV: 8 software. The results obtained for the different parameters and options were compared and it was revealed that, regarding the pipe material, GRP pipes reduced pressure by 49.1 Kpa compared to the Asbestos cement pipes and by 50.3 Kpa compared to the iron pipes. Comparison of the results for the protective systems indicated that the surge tank outperformed the other alternatives in controlling pressure such that maximum pressure was reduced by 3.9 bar when using surge tanks compared to the flywheel and by 5 bar compared to the check valve. Finally, it was found that the concurrent use of the surge tank and the flywheel would be the most ideal method for controlling the water hammer effects.

**Keywords:** Water Hammer, Surge Tanks, Flywheel, Case Study, Bentley Hammer.

۱-Assist. Prof., Dept. of Civil Eng., Tabriz University, Tabriz  
(Corresponding Author) 09143162418 roshangari@tabriz.ac.ir

۲- Grad. MSc Student of Hydraulic Structures, Post Graduate Studies Faculty,  
Islamic Azad University, Ahar Branch, Ahar

۱-استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز (نویسنده مسئول) ۰۹۱۴۳۱۶۲۴۱۸  
roshangari@tabriz.ac.ir

۲- دانش‌آموخته کارشناس ارشد سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده تحصیلات تکمیلی،  
دانشگاه آزاد اسلامی، واحد اهر

نتایج تجربی توسط بسیاری از نویسندگان گزارش شده است. آنها وجود این اختلاف را مربوط به این واقعیت می‌دانند که تعدادی از اثرات در استاندارد نظریه ضربه قوچ در نظر گرفته نشده است [۷]. این اثرات عبارت‌اند از: هوای آزاد و محلول در مایع، اصطکاک ناپایدار در جریان گذرا، رفتار غیر الاستیک از مواد دیواره لوله و اثر متقابل سیال و جداره لوله [۷ و ۸].

تحقیقات فراوانی به منظور مدل‌سازی جریان گذرا در خطوط لوله به شیوه‌های مختلف صورت گرفته است. چادری و همکاران با کمک روش تفاضلات محدود، یافتند که معادله تفاضل محدود مرتبه دوم، عملکرد بهتری نسبت به مرتبه اول دارد [۹]. سایروس و همکاران در تحلیل عددی ضربه قوچ در یک لوله افقی بدون اصطکاک، قابلیت روش مشخصه را به‌طور اثر گذاری با استفاده از درون‌یابی اسپیلان افزایش دادند [۱۰]. در گذشته با اعمال ضرایب اطمینان در انتخاب لوله‌ها، اتصالات و سایر تجهیزات وابسته، این پدیده کنترل و اثرات منفی آن خنثی می‌شد ولی امروزه چنین راه حلی از نظر اقتصادی توجیه‌پذیر نیست. با توجه به موارد ذکر شده، در این مطالعه موردی با استفاده از نرم افزار Bentley HammerXMV:8 به بررسی میزان تأثیر جنس لوله و همچنین استفاده از تأسیسات حفاظتی به‌طور مجزا و ترکیبی، در کاهش اثرات ناشی از پدیده ضربه قوچ پرداخته شد.

## ۲- روش تحقیق

ضربه قوچ آب در خطوط لوله یکی از پیچیده‌ترین و در عین حال جذاب‌ترین پدیده در سیستم‌های پمپاژ و انتقال آب است. انرژی جنبشی جریان آب در یک لوله می‌تواند بسیار قابل توجه باشد و هر کاهشی در میزان جریان به وسیله شیریه که در انتهای سیستم، جریان را تنظیم می‌کند، ممکن است نیاز به استهلاک مقدار زیادی انرژی داشته باشد.

## ۲-۱- مبانی نظری

### ۲-۱-۱- حل معادلات تفاضلی (روش مشخصه)

برای جریان آب که در داخل لوله حرکت می‌کند، تحت هر شرایطی باید معادلات ممنتوم<sup>۴</sup> و پیوستگی<sup>۵</sup> به صورت یک زوج معادله دیفرانسیل با مشتقات جزئی به شرح زیر برقرار باشند معادله ممنتوم

$$L_1 = \frac{\partial V}{\partial t} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + g \sin \phi + \frac{fV|V|}{2D} = 0 \quad (1)$$

بهره‌برداری اصولی و برنامه‌ریزی شده از منابع کشور از کارهای ملی و پژوهش‌های است که در جهت دستیابی به مصارف شهری، صنعتی و تولیدات کشاورزی باید صورت پذیرد. در این زمینه، طراحی و انتقال صحیح آب حائز اهمیت است. یکی از پدیده‌های مهم و مشکل‌ساز در انتقال آب، پدیده ضربه قوچ<sup>۱</sup> است که در بعضی از متون از آن به‌عنوان چکش آبی نیز یاد شده است.

تغییر ناگهانی شرایط مرزی در سیستم‌های انتقال آب مانند باز و بسته شدن ناگهانی دریچه‌ها با یک شیر فلکه، قطع و وصل شدن ناگهانی پمپ و توربین و نظیر اینها باعث ایجاد جریان گذرای<sup>۲</sup> می‌شود که اصطلاحاً ضربه قوچ نامیده می‌شود [۱]. موج‌های فشاری<sup>۳</sup> که به‌صورت پیاپی در طول ماده منتشر می‌شود، در شبکه فشاری چندین برابر فشار کار سیستم را تولید کنند و موجب به‌وجود آمدن تنش‌های بسیار زیادی در اجزای مدار شده و در بدترین حالت قادر به از بین بردن لوله‌ها، پوسته پمپ و شکستن اتصالات گوناگونی می‌شود. به‌همین دلیل لازم است تا شرایط ایجاد این امواج شناخته شده و حتی‌الامکان با به‌کار بردن وسایلی از بالا رفتن فشار تا حد خطرناک جلوگیری شود [۲]. اولین محاسبات مربوط به برآورد ازدیاد فشار ناشی از ضربه قوچ، به‌وسیله ژوکوفسکی در سال ۱۸۹۸ انجام شد. ژوکوفسکی با لحاظ نمودن خاصیت کشسانی آب و جداره لوله و با اتکاء بر نتایج بررسی‌های تئوری و تجربی خود علاوه بر ارائه فرمول سرعت انتشار موج، در زمینه اثرات محفظه هوایی، مخزن موج‌گیر و تغییرات فشار ضربه قوچ نیز تحقیقاتی را در مسکو به انجام رسانده و نشان داده است که اگر مدت زمان بسته شدن شیر فلکه کمتر یا برابر با مدت زمان لازم برای رفت و برگشت موج باشد، افزایش فشار ضربه قوچ به مقدار بیشینه می‌رسد [۳]. با این حال، نظریه عمومی ضربه قوچ در سال ۱۹۰۲ توسط آلیوی توسعه داده شد. وی نموداری برای افزایش فشار در شیر به‌علت بسته شدن یکنواخت آن نیز، در همان سال ایجاد نمود [۴].

معروف‌ترین دسته آزمایش‌های تجربی در زمینه ضربه قوچ برای کانال ساده توسط آرایا در سال ۱۹۹۳ انجام شده است و امروزه اکثر محققان نتایج خود را با آن مقایسه می‌نمایند [۵]. بحث‌های زیادی در دراز مدت برای حل معادلات جریان‌های گذرا انجام شده و راهکارهای متفاوتی پیشنهاد شده است. این روند از فرم معادلات تقریبی شروع شده و تا فرم معادلات غیر خطی ناویر-استوکس تغییر یافته است [۶]. اختلاف بین محاسبات و

<sup>1</sup> Water Hammer

<sup>2</sup> Transient

<sup>3</sup> Pressure Wave

<sup>4</sup> Momentum Equations

<sup>5</sup> Quantity Equations

$$L_2 = \frac{\partial p}{\partial t} + \rho a^2 \frac{\partial V}{\partial x} = 0 \quad (2)$$

که در این روابط

$V$  سرعت،  $P$  فشار،  $x$  فاصله و  $t$  زمان است که سرعت و فشار متغیرهای وابسته و فاصله و زمان متغیرهای مستقل هستند.  $\rho$  جرم مخصوص،  $g$  شتاب ثقل،  $\phi$  زاویه تمایل محور لوله نسبت به افق،  $D$  قطر لوله،  $a$  سرعت انتشار امواج فشاری و  $f$  ضریب اصطکاک است. ضریب اصطکاک  $f$  تابع عدد رینولدز و زبری نسبی جدار لوله است؛ با وجود این در بسیاری از موارد مقدار آن ثابت فرض می شود، زیرا اثرات تغییرات  $f$  در جریان های ناپایدار قابل اغماض است [۱۱]. حل معادلات  $L_1$  و  $L_2$  با روش تحلیلی دشوار است، از این رو این معادلات با استفاده از روش مشخصه ابتدا به معادلات دیفرانسیل معمولی تبدیل شده و سپس به وسیله روش تفاضل های محدود صریح، تحلیل شدند. از آنجا که هر کدام از شرایط مرزی و هر یک از مقاطع لوله در هر فاصله زمانی به طور جداگانه مورد تحلیل قرار می گیرند، این روش برای سیستم های دارای شرایط مرزی پیچیده مناسب و قابل توصیه است. در معادله  $L_2$ ، سرعت موج فشاری  $a$  با رابطه زیر بیان می شود

$$a = \sqrt{\frac{K}{\rho \left[ 1 + \frac{K D}{E e} \right]}} \quad (3)$$

که در آن

$K$  مدول کشسانی حجمی مایع،  $E$  مدول کشسانی جدار لوله و  $e$  ضخامت جدار لوله است. با در نظر گرفتن ترکیب خطی  $L = L_1 + \lambda L_2$  از معادلات  $L_1$  و  $L_2$  و لحاظ کردن متغیرهای وابسته و با به کارگیری خطوط مشخصه، رابطه  $L$  به صورت معادله ۴ در می آید که به کمک خطوط مشخصه، مثبت و منفی و روابط ویژه برای نقاط مرزی قابل تحلیل است

$$L = \left( \frac{\partial V}{\partial x} \lambda \rho a^2 + \frac{\partial V}{\partial t} \right) + \lambda \left( \frac{\partial p}{\partial x} \frac{1}{\rho \lambda} + \frac{\partial p}{\partial t} \right) + g \sin \phi + \frac{f V |V|}{2D} = 0 \quad (4)$$

## ۲-۲- نمونه مورد مطالعه

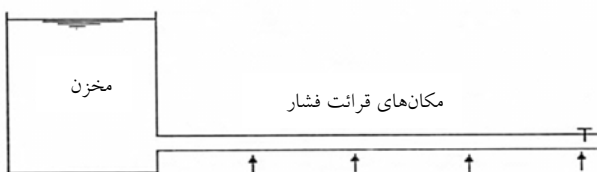
در این تحقیق به بررسی تأثیر پارامترهای مؤثر در میزان اثر ضربه کوچ نظیر جنس لوله، قطر لوله و سرعت سیال و همچنین وسایل و تجهیزات حفاظتی در کاهش اثرات ناشی از این پدیده پرداخته شد. علاوه بر آن برای رسیدن به یک نقطه بهینه از نظر تنوری و اجرا در سیستم پمپاژ واقع در نزدیکی شهرک مسکونی شهید شیردم به مخزن بالادست منطقه، مقایسه ای بین پارامترها و تجهیزات مختلف

نیز صورت گرفت. هدف از پمپاژ به مخزن بالادست (مخزن ۴۹)، تأمین آب منطقه تحت پوشش این مخزن بود. مخزن ۴۹ در رقوم تقریبی ۱۶۷۰ متر قرار داشت و آب آن از طریق پمپاژ از مخزن ۴۸ تأمین می شد. این مخزن با ظرفیت ۱۷۵۰۰ مترمکعب در حداکثر رقوم ۱۵۹۲/۹ متر قرار داشت. محل احداث تلمبه خانه ۴۸ در جنوب غربی محوطه جنوب مخزن ۴۸ پیش بینی شد. دو خط لوله به قطر ۷۰۰ میلی متر، دبی مورد نیاز پمپاژ را از کمپارتمان های مخزن به خط مکش اصلی تلمبه خانه به قطر ۱۰۰۰ میلی متر منتقل می کنند. خط پمپاژ از مخزن ۴۸ به مخزن ۴۹ با قطر ۹۰۰ میلی متر و طول تقریبی ۱۰۰۰ متر از جنس داکتیل و با فشار کار ۱۰ بار طراحی شده است. پمپ های انتخابی در تلمبه خانه ۴۸ بر مبنای دبی پمپاژ ۳۵۰۰ متر مکعب در ساعت و حداکثر ارتفاع دینامیک ۸۳ متر از نوع گریز از مرکز افقی انتخابی شد.

## ۳- نتایج و بحث

### ۳-۱- صحت سنجی نرم افزار

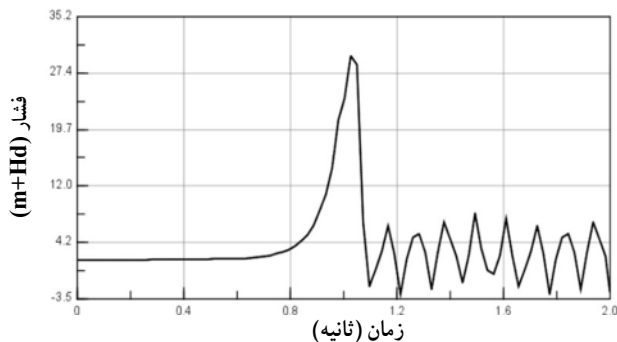
قبل از انجام هر گونه تحقیقی باید از صحت کارکرد نرم افزار اطمینان حاصل شود تا در مراحل بعدی بتوان به اطلاعات به دست آمده استناد و اطمینان نمود. برای این منظور آزمایش انجام شده توسط آرایا در سال ۱۹۹۳ در نرم افزار Bentley Hammer مدل سازی شد و نتایج به دست آمده از آن با نتایج آزمایش مورد مقایسه قرار گرفت. طرح آزمایش مطابق شکل ۱ شامل مخزن رو بازی بود که لوله ای از جنس فولاد با قطر داخلی ۰/۱۰۱ متر و ضخامت ۰/۰۰۶۳۵ متر و طول ۳۲ متر به آن متصل بود. در انتهای



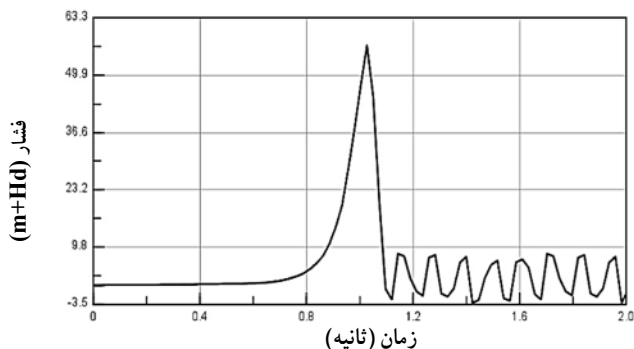
پارامتر	مقدار اولیه
دبی اولیه	۰/۰۱۶۵ (m <sup>3</sup> /s)
ارتفاع آب در مخزن	۲/۶۵ (m)
ضریب اصطکاک	۰/۰۲۲۳
مکان اولیه شیر	۰/۶۲
سرعت موج	۱۱۲۵ (m/s)
چگالی آب	۹۹۹/۱
ویسکوزیته دینامیکی	۱/۰۶ × ۱۰ <sup>-۳</sup> (m <sup>2</sup> /s)

شکل ۱- طرح آزمایش آرایا و داده های مربوطه

<sup>1</sup> Method of Characteristics



شکل ۴- میزان تغییرات فشار طی مدت زمان ۲ ثانیه در وسط لوله



شکل ۵- میزان تغییرات فشار طی مدت زمان ۲ ثانیه در محل شیر پروانه‌ای

جدول ۱- مقایسه بین دو دسته از نتایج

روش کمیت‌ها	داده‌های تجربی	نرم افزار	درصد خطا
سرعت حالت پایا (m/s)	۲/۳	۲/۲۶	۱/۷۷
فشار حداکثر اولیه در وسط لوله (Mpa)	۳۳	۳۱/۳۰	۵/۴۳
فشار حداکثر اولیه نزدیک شیر پروانه‌ای (Mpa)	۶۰	۵۶/۹۰	۵/۴۴
تعداد نوسانات موج فشاری	۸	۸	۰

### ۲-۳- جنس لوله

یکی از عوامل مؤثر در میزان اثر پدیده ضربه قوچ، جنس لوله است. هر لوله به تناسب جنس دارای ضرایب هیزن-ویلیامز<sup>۱</sup>، مانینگ<sup>۲</sup>، زبری و مدول کشسانی متفاوتی است که هر یک از این پارامترها در میزان سرعت موج<sup>۳</sup> و در نتیجه در میزان اثر ضربه قوچ مؤثر می‌باشند. لذا مدل‌سازی با نرم‌افزار Bentley Hammer انجام شد و میزان فشار و تغییرات آن در طول مسیر با سه نوع لوله فولادی، آزبست سیمانی<sup>۴</sup> و GRP<sup>۵</sup> مورد مطالعه قرار گرفت و اثرات آنها

<sup>1</sup> Hazen-Williams (c)

<sup>2</sup> Manning (n)

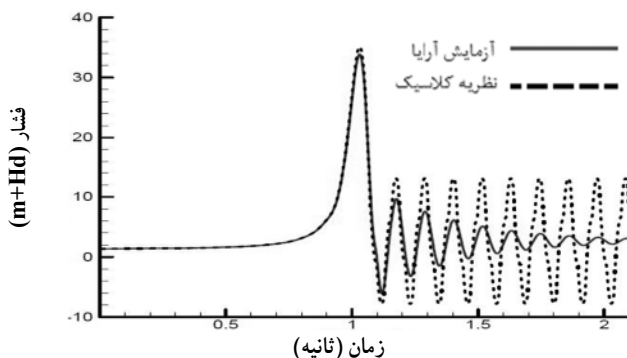
<sup>3</sup> Wave Speed

<sup>4</sup> Asbestos Cement

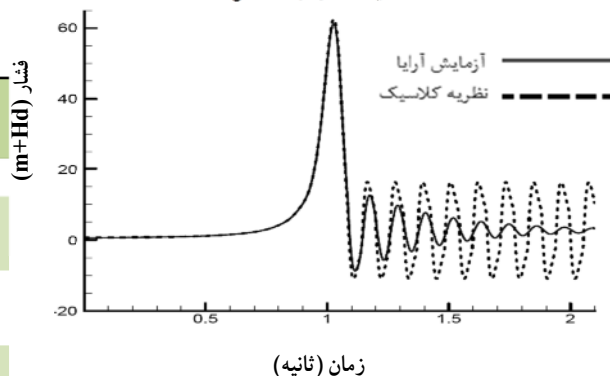
<sup>5</sup> Glass fiber Reinforced Plastics

لوله یک شیر از نوع پروانه‌ای قرار داشت. چهار عدد فشارسنج برای اندازه‌گیری تغییرات فشار و در طول ۰/۷۵L، ۰/۵L، ۰/۲۵L از لوله مورد استفاده قرار گرفت. در ابتدا ۰/۶۲ شیر باز بود و پس از آن، شیر در طی مدت زمان ۱/۰۸۵ ثانیه به‌طور کامل بسته شد. نوسانات فشاری ایجاد شده در سیستم تا زمان دو ثانیه پس از آغاز حالت گذرا ثبت شد.

شکل‌های ۲ و ۳ به ترتیب نوسانات فشاری حاصل از آزمایش آرایا در وسط لوله و در محل شیر را نشان می‌دهد.



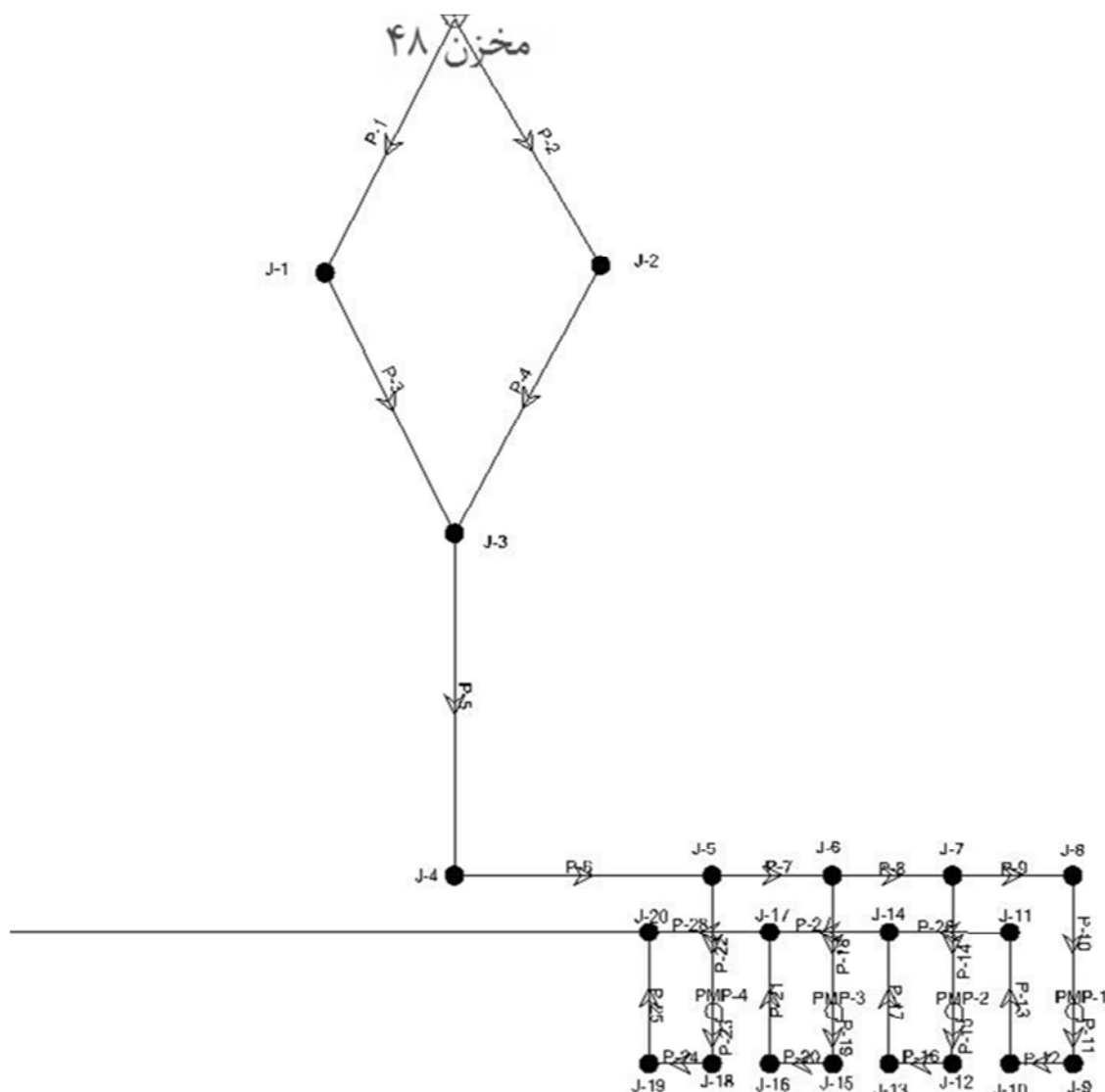
شکل ۲- مقایسه نتایج داده‌های تجربی آرایا و نتایج نظریه کلاسیک در وسط لوله



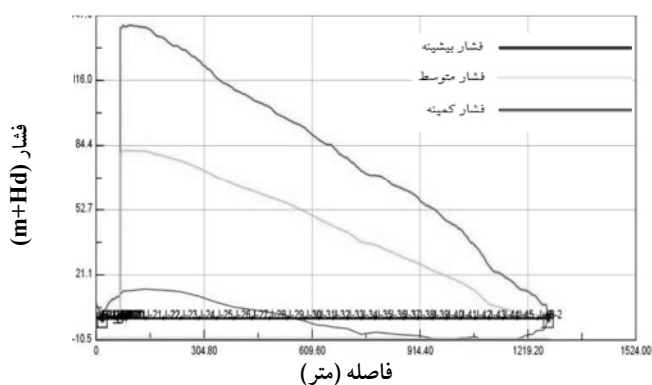
شکل ۳- مقایسه نتایج داده‌های تجربی آرایا و نتایج نظریه کلاسیک در محل شیر پروانه‌ای

اطلاعات اساسی و مورد نیاز برای مقایسه خروجی برنامه و یافته‌های آرایا، میزان فشار و تغییرات آن در وسط و محل شیر پروانه‌ای است. شکل ۴ و ۵ که از مدل آزمایش در نرم‌افزار Bentley Hammer استخراج شده است، به ترتیب میزان تغییرات فشار و جریان طی مدت زمان ۲ ثانیه در وسط و محل شیر پروانه‌ای را نشان می‌دهد.

با انجام مقایسه بین شکل‌های ۲ تا ۵ مطابق جدول ۱ مشاهده می‌شود که نتایج حاصل از نرم‌افزار، بسیار نزدیک به نتایج آزمایش آرایا است که این خود نشان‌دهنده صحت عملکرد نرم‌افزار است.



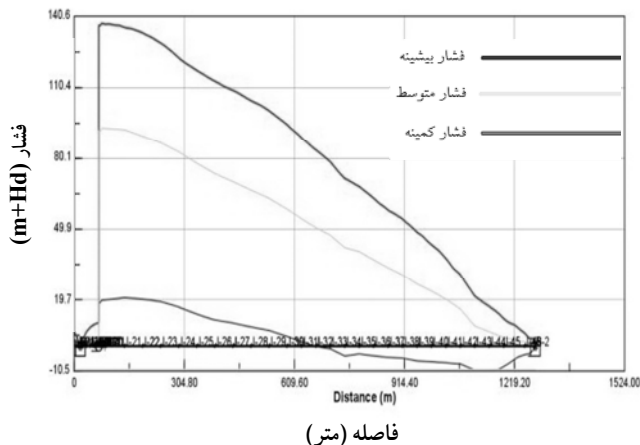
شکل ۶- پلان مدل ایجاد شده (مخزن ۴۸ و ایستگاه پمپاژ آن) در نرم افزار



شکل ۷- تغییرات فشار در طول مسیر خط انتقال با لوله های آهنی

همین روند برای لوله‌های دیگر انجام و نتایج در جدول ۲ جمع‌آوری و با یکدیگر مقایسه شد.

با یکدیگر مقایسه شد. در مدل‌سازی، برای مشخصات پمپ، حالت گذرا به گونه‌ای تعریف می‌شود که پمپ بعد از مدت زمان تأخیری ۵ ثانیه خاموش شود و به این صورت شرایط گذرا به سیستم تحمیل می‌شود. همچنین یکی از پارامترهای مؤثری که برای مدل‌سازی در این برنامه مورد نیاز است، سرعت موج فشاری است که در این سیستم با کمک رابطه ۳ مقدار آن برابر ۱۰۴۱ متر بر ثانیه محاسبه شد و نیز بر اساس روابط هیزن ویلیامز، ضریب افت داریسی و ایسباخ برابر  $f = 0.025$  به دست آمد. همانند شکل ۶، مدل در نرم‌افزار پیاده‌سازی شد و نتایج به صورت تغییرات فشار در طول مسیر خط انتقال و تغییرات ارتفاع نسبت به زمان در گره بعد از پمپ شماره ۱، مطابق شکل‌های ۷ و ۸ به دست آمد.



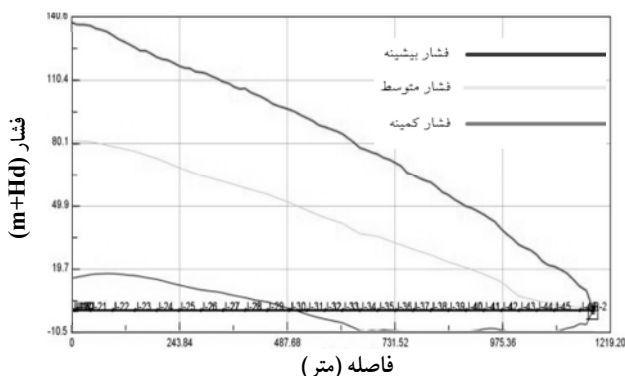
شکل ۱۰- تغییرات فشار در طول مسیر خط انتقال با لوله‌های GRP

### ۳-۳- اقدامات و لوازم حفاظتی

از آنجا که میزان فشار مثبت و منفی در مدل بسیار بالا است، لذا برای کنترل این پدیده باید با استفاده از لوازم حفاظتی مناسب، میزان فشار را تا جای ممکن به حد نرمال نزدیک کرد.

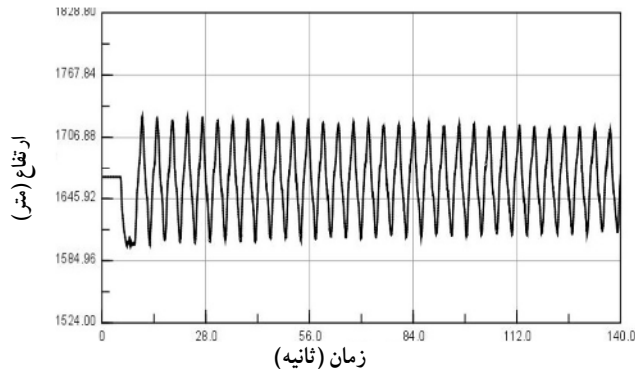
### ۳-۳-۱- شیر یک طرفه<sup>۱</sup>

خطوط رانش پمپ‌ها، معمولاً مجهز به شیرهای یک طرفه است. وظیفه اصلی این شیرها جلوگیری از معکوس شدن جریان پس از خاموش کردن پمپ یا از کار افتادن آن است که به این ترتیب از آسیب رسیدن به پمپ جلوگیری می‌شود. شیرهای یک طرفه‌ای که نتوانند سریع یعنی قبل از معکوس شدن جریان در خط لوله، بسته شوند، باعث تشدید ضربه قوچ و نیز به وجود آمدن پدیده کوبیده شدن دیسک شیرهای یک طرفه می‌شوند که صدا و ضربه بسیار شدیدی ایجاد می‌نماید ( $T=2L/A$ )، از این رو مشخصات چهار عدد شیر یک طرفه در سیستم تعریف شده و مدل آنالیز شد.



شکل ۱۱- میزان تغییرات فشار در طول مسیر خط انتقال

<sup>۱</sup>Check Valve

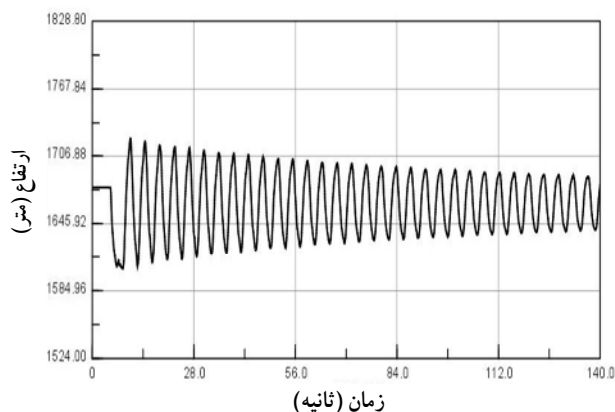


شکل ۸- تغییرات هد نسبت به زمان در گره بعد از پمپ شماره ۱

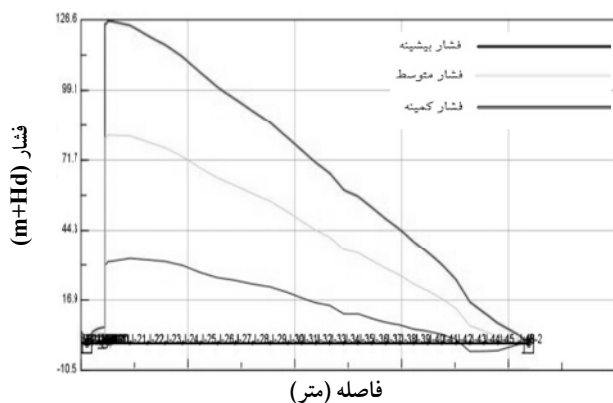
جدول ۲- مقایسه نتایج میزان فشار بیشینه و کمینه

نوع لوله	فشار بیشینه (Kpa)	فشار کمینه (Kpa)	قیمت هر متر لوله گذاری (ریال) (لوله به قطر ۱۰۰۰ میلی متر و عمق ترانشه ۲/۵ متر)
GRP	۱۳۴۹/۸	-۹۷/۹	۱۳۷/۵۰۰
آزبست سیمانی	۱۳۹۸/۹	-۹۷/۹	۱۸۵/۰۰۰
آهنی	۱۴۰۰/۱	-۹۷/۹	۲۵۲/۰۰۰

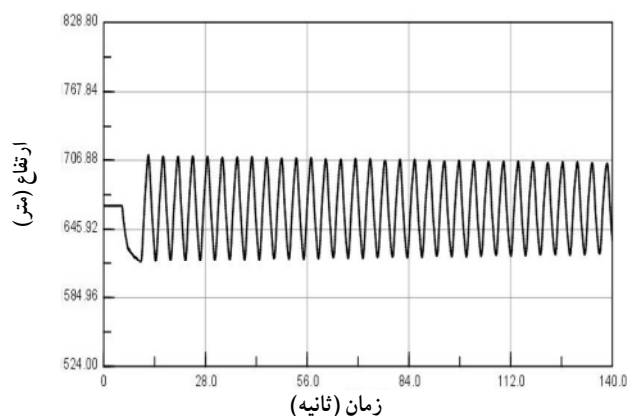
همانگونه که در جدول ۲ و شکل‌های ۹ و ۱۰ مشاهده می‌شود، رفتار و عملکرد لوله‌های GRP از دو نوع لوله دیگر مناسب‌تر بوده و میزان نوسانات و فشار بیشینه در این لوله‌ها کمتر است و شدت تغییرات ارتفاع و جریان، با گذر زمان کاهش می‌یابد که این امر به دلیل خاصیت کشسانی بالای این نوع لوله‌ها است که موجب کاهش سرعت موج و ضربه قوچ در سیستم می‌شود. از طرفی در جدول ۲ مشاهده می‌شود که هزینه اجرای لوله‌های GRP از سایر لوله‌ها کمتر است [۱۲].



شکل ۹- تغییرات ارتفاع و جریان نسبت به زمان در گره بعد از پمپ شماره ۱



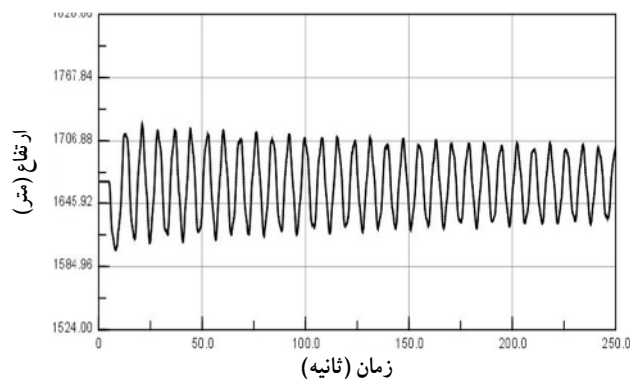
شکل ۱۳- تغییرات فشار در طول مسیر خط انتقال



شکل ۱۴- تغییرات ارتفاع و جریان نسبت به زمان بعد از پمپ شماره ۱

و به عکس، هنگام کاهش فشار در لوله، سیال از مخزن وارد لوله رانش شده و به این ترتیب از تغییرات سریع سرعت جلوگیری به عمل می‌آید. همانگونه که در شکل ۱۵ مشاهده می‌شود، یک مخزن ضربه‌گیر با مشخصات زیر در سیستم طراحی و جایگذاری شد: حجم هوای اولیه، ۱۰ مترمکعب؛ حجم کل ۲۰ مترمکعب؛ قطر پیشنهادی مخزن ۲۰۰۰ میلی‌متر؛ قطر لوله خروجی برای تخلیه جریان ۴۵۰ میلی‌متر؛ قطر صفحه روزنه دار<sup>۳</sup>، ۱۵۰ میلی‌متر.

همانگونه که در شکل ۱۵ مشخص است، برای جلوگیری از برگشت موج فشاری به ایستگاه پمپاژ و هدایت موج به سمت مخزن ضربه‌گیر، چهار عدد شیر یک‌طرفه در مدل تعبیه شد. پس از آنالیز مدل مطابق شکل ۱۶ و جدول ۳ ملاحظه می‌شود که اثر مخزن ضربه‌گیر در این مدل نسبت به دو روش دیگر بیشتر بوده و ضربه قوچ را در فاز فشار مثبت به خوبی مهار می‌نماید ولی مطابق شکل ۱۶ در مسیر خط انتقال از مخزن تا پمپ‌ها، هنوز در سیستم فشار منفی به مقدار ۰/۹- بار (۹- متر) وجود دارد که این میزان فشار حاشیه، امنیت مناسب را دارا نبوده و در خط انتقال،



شکل ۱۲- میزان تغییرات هد و جریان نسبت به زمان بعد از شیر یکطرفه شماره ۲ (گره J-11)

با مقایسه شکل‌های ۱۱ و ۱۲ با شکل‌های ۹ و ۱۰ مشاهده می‌شود که میزان اثر شیر یکطرفه در کاهش فشار مثبت به میزان اثر استفاده از لوله‌های GRP در سیستم مذکور بسیار نزدیک است اما میزان نوسانات در لوله‌ها GRP کمتر بوده و شدت تغییرات ارتفاع و جریان با گذر زمان در این لوله‌ها کاهش می‌یابد و از طرفی هزینه اجرای هر متر لوله GRP کمتر از لوله‌های آهنی بوده در نتیجه استفاده از شیر یک‌طرفه به تنهایی گزینه مناسبی نیست و استفاده از لوله‌های GRP نسبت به شیر یک‌طرفه مقرون به صرفه‌تر است.

### ۳-۳-۲- چرخ طیار<sup>۱</sup>

اضافه نمودن چرخ طیار بر روی محور پمپ، مانع از کاهش سریع سرعت آن شده و از افزایش و کاهش بسیار زیاد فشار جلوگیری می‌کند. یعنی در اصل ممان اینرسی پمپ، توسط چرخ طیار افزایش یافته و در نتیجه فشار منفی کمتری در اثر ضربه قوچ ایجاد می‌شود و به همان نسبت افزایش فشار نیز کمتر خواهد شد. همانگونه که در شکل‌های ۱۳ و ۱۴ مشاهده می‌شود، چرخ طیار تأثیر خوبی در افزایش فشار منفی و کاهش فشار مثبت نسبت به شیرهای یک‌طرفه داشته ولی همچنان میزان فشار مثبت بیش از فشار مجاز سیستم است.

### ۳-۳-۳- مخازن ضربه‌گیر<sup>۲</sup>

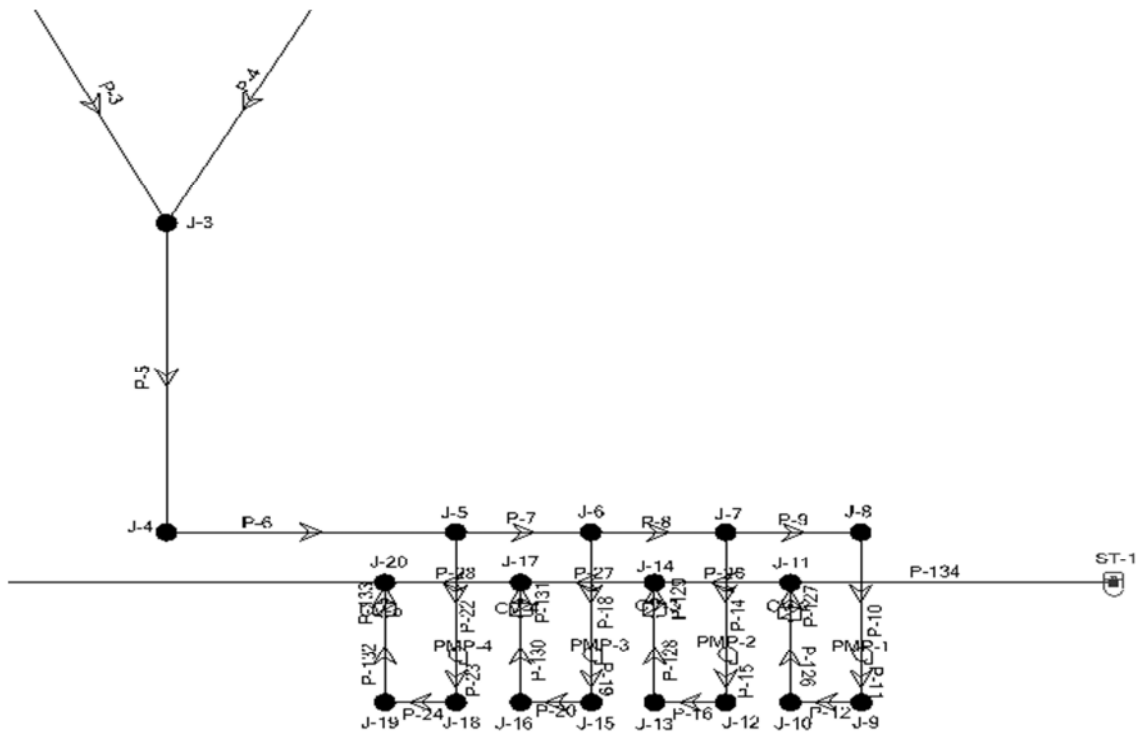
یکی دیگر از روش‌های حفاظتی، استفاده از مخازن ضربه‌گیر است. این مخازن که به‌عنوان یک منبع موج‌گیر عمل می‌نمایند، بر روی لوله رانش پمپ نصب می‌شوند. در مواقعی که فشار در لوله افزایش می‌یابد، سیال از داخل لوله وارد مخزن شده و در آن ذخیره می‌شود.

<sup>۱</sup> Flywheel

<sup>۲</sup> Surge Tank

<sup>۳</sup> Orifice Plate





شکل ۱۵- مدل سازی و جایگذاری مخزن ضربه گیر در سیستم

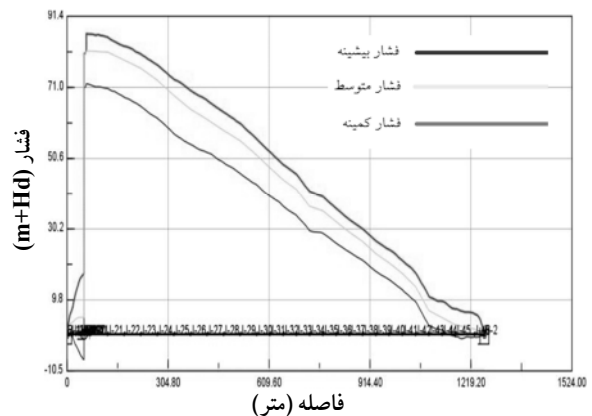
جدول ۳- مقایسه نتایج میزان فشار بیشینه و کمینه در سه نوع وسیله حفاظتی

فشار کمینه (بار)	فشار بیشینه (بار)	کمیت نوع وسیله
-۱	۱۳/۵	شیر یک طرفه
-۰/۳	۱۲/۴	چرخ طیار
-۰/۹	۸/۵	مخزن ضربه گیر

سیستم وارد می نماید و سپس با افزایش فشار، روزنه بزرگ بسته شده و هوای جمع شده در داخل لوله از طریق روزنه کوچک از خط لوله خارج می شود. از آنجایی که در ابتدای مسیر پمپاژ در مدل مذکور، فشار منفی وجود داشته و این شیر دارای ویژگی های لازم برای بر طرف کردن این مسئله است، پس از پیاده سازی، مدل آنالیز شد (شکل های ۱۶، ۱۷ و ۱۸).

با مقایسه شکل های ۱۶ و ۱۷ مشاهده می شود که استفاده از شیر هوای دو روزنه در ابتدای خط پمپاژ، میزان فشار منفی را افزایش داده ولی به نظر می رسد هنوز در انتهای خط انتقال، نزدیک به مخزن بالادست، فشار منفی با رقم جزئی ۰/۱- بار وجود دارد و از طرفی این روش، مشکلات بسیار زیادی را در خطوط لوله ایجاد می نماید زیرا شیر هوای دو روزنه، مدت زمان طولانی نیاز دارد تا هوا را از طریق روزنه کوچک که مقطع عبور در آن فقط چند میلی متر مربع است، تخلیه نماید که این امر موجب می شود کارکرد سیستم در این مدت زمان مختل شود.

کاویتاسیون<sup>۱</sup> رخ می دهد. از این رو برای افزایش و از بین بردن آن، کاربرد ترکیبی از لوازم حفاظتی در سیستم برای رسیدن به یک نقطه بهینه و ایده آل بررسی شد.



شکل ۱۶- تغییرات فشار در طول مسیر خط انتقال

### ۳-۴- کاربرد ترکیبی از لوازم حفاظتی

۳-۴-۱- مخازن ضربه گیر به همراه شیر هوای دو روزنه<sup>۲</sup> شیر هوای دو روزنه دارای یک روزنه بزرگ و یک روزنه کوچک بوده که روزنه بزرگ در خط لوله باز شده و هوا را به داخل

<sup>1</sup> Cavitation  
<sup>2</sup> Surge Valve

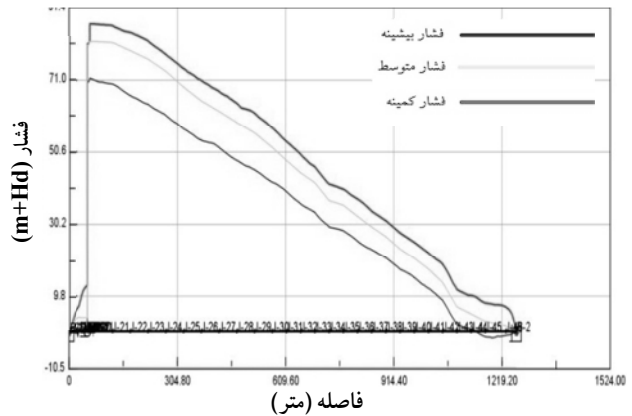


#### ۴- نتیجه گیری

نتایج این پژوهش مشخص نمود که لوله آزیست سیمانی میزان  $1/199$  کیلو پاسکال فشار را نسبت به لوله های آهنی کاهش داد و لوله GRP مقدار  $49/1$  کیلو پاسکال فشار را نسبت به لوله آزیست سیمانی و مقدار  $50/3$  کیلو پاسکال فشار را نسبت به لوله آهنی کاهش داد. این امر نشان می دهد رفتار و عملکرد لوله های GRP از دو نوع لوله دیگر مناسب تر بوده و میزان فشار بیشینه در این لوله ها کمتر است، زیرا در لوله های GRP به علت خاصیت کشسانی، سرعت موج کاهش یافته و به همین دلیل، اثر ضربه قوچ نیز کاهش می یابد همچنین مشخص شد که میزان اثر استفاده از شیر یک طرفه، با اثر استفاده از لوله های GRP برابر است، پس گزینه لوله های GRP مقرون به صرفه است. استفاده از چرخ طیار در سیستم، علاوه بر کاهش فشار مثبت به میزان  $1/1$  بار، میزان فشار منفی را نیز به میزان  $0/7$  بار نسبت به شیر یک طرفه افزایش داد که این اثر بسیار مطلوب بوده ولی کافی نیست.

استفاده از مخزن ضربه گیر، اثر بسیار مناسبی در کاهش فشار مثبت به میزان  $3/9$  بار، نسبت به چرخ طیار داشت و اثر ضربه قوچ را در فاز فشار مثبت به خوبی مهار نمود ولی اثر چندانی در افزایش فشار منفی از خود نشان نداد، که این میزان فشار، حاشیه امنیت مناسب را دارا نبوده و ممکن است در خط انتقال، کاویتاسیون رخ دهد.

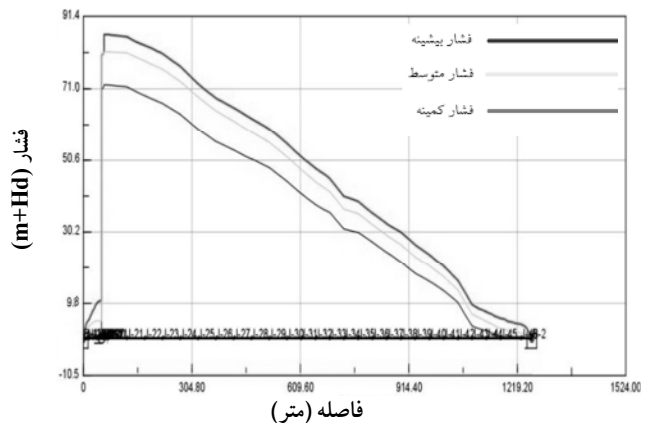
اگر چه روش کاربرد مخزن ضربه گیر به همراه شیر هوای دو روزه، عملکرد خوبی داشت و میزان فشار منفی موجود در این روش در حد مجاز بود و کاویتاسیون در سیستم ایجاد نشد، ولی این روش مشکلات بسیار زیادی را در خطوط لوله ایجاد می نماید زیرا در شیر هوای دو روزه، هوا در مدت زمان اندک از روزه بزرگ وارد خط لوله می شود ولی تخلیه آن از طریق روزه کوچک که مقطع عبور هوا در آن فقط چند میلی متر مربع است، زمان طولانی نیاز دارد و این امر موجب می شود که کارکرد سیستم در این مدت زمان مختل شود. اثر کاربرد ترکیبی مخزن ضربه گیر به همراه چرخ طیار، ایده آل ترین روش برای کنترل ضربه قوچ در این مطالعه موردی است و با این کار، در هیچ یک از نقاط خط انتقال، فشار منفی وجود نخواهد داشت.



شکل ۱۷- تغییرات فشار در طول مسیر خط انتقال از مخزن پایین دست تا مخزن بالادست

#### ۳-۴-۲- مخازن ضربه گیر به همراه چرخ طیار

همانگونه که قبلاً اشاره شد، توسط چرخ طیار، ممان اینرسی پمپ افزایش یافته و در نتیجه فشار منفی کمتری در اثر ضربه قوچ ایجاد می شود و از طرفی، وظیفه کاهش فشار مثبت را نیز تانک ضربه گیر در سیستم بر عهده دارد. پس با در نظر گرفتن این موضوع، این بار مدل با ترکیب تانک ضربه گیر و چرخ طیار همانند قبل اجرا شد. چنانچه در شکل ۱۸ مشاهده می شود، خطوط فشار کمینه، متوسط و بیشینه در پروفیل به یکدیگر نزدیک شده و در حاشیه امنیت بسیار خوبی قرار گرفته اند و آن میزان فشار منفی جزئی نیز دیگر در سیستم وجود ندارد.



شکل ۱۸- تغییرات فشار در طول مسیر خط انتقال از مخزن پایین دست تا مخزن بالادست

#### ۵- مراجع

1. Shmsaiy, A. (2006). *Applied hydraulic of unsteady flows*, Sharif University Pub., Tehran. (In Persian)
2. Kahrom, M. (210). *Water convey systems*, Ferdowsi Mashhad University Pub., Mashhad. (In Persian)
4. Ghidaoui, M., Zhao, M., McInnis, D., and Axworthy, D. (2005). "A review of water hammer theory and practice." *Transactions of the ASME*, 58, 49-76.

5. Silva-Araya, W. (1993). "Energy dissipation in transient flow." Ph.D., Dissertation, Washington State University, USA.
6. Filion, Y.R., and Karney, B.W. (2003). "Sources of error in network modeling: A question of perspective." *Journal of the American Water Works Association*, 95, 119-130.
7. Szymkiewicz, R., and Mitosek, M. (2007). "Numerical aspects of improvement of the unsteady pipe flow equations." *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 55, 1039-1058.
8. Bergant, A., Tijsseling, A., Vitkovsky, J., Covas, D., Simpson, A., and Lambert, M. (2008). "Parameters affecting water-hammer wave attenuation." shape and timing Part 1: Mathematical tools." *J. of Hydraulic Research*, 46 (3), 382-391 .
9. Chaudhry, H.M., and Hussaini, M.Y. (1985). "Second-order accurate explicit finite-difference schemes for water hammer analysis." *Journal of Fluids Engineering*, 107, 523-529.
10. Sibetheros, L.A., Holley, E.R., and Branksi, J.M. (1991). "Spline interpolation for water hammer analysis." *Journal of Hydraulic Engineering*, 117(10), 1332-1369.
11. Chaudhry, M.H. (1979). *Applied hydraulic transient*, Published by Van Nostrand Reinhold Company.
12. Programing nad Budget Organization. (2009). *List of basic cost of water conveyance system*, Tehran. (In Persian)