

شبیه‌سازی آزمایشگاهی و عددی ضربه قوچ در خطوط انتقال آب و تأثیر لوله موج‌گیر در کنترل این پدیده

حدیث قنبری^۱، جعفر مامی‌زاده^{۱*} و مجید ولی‌زاده^۲

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۴/۱۶؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۷/۲۱)

چکیده

ضربه قوچ یکی از حالت‌های جریان‌های غیرماندگار در شبکه‌های توزیع آب شهری است که به دلیل خساراتی که در خط لوله به وجود می‌آورد اهمیت زیادی داشته و همواره مورد توجه پژوهشگران بوده است. در این تحقیق پدیده ضربه قوچ در اثر بسته شدن ناگهانی شیر در پایین دست به طور آزمایشگاهی و با استفاده از مدل عددی بررسی شده است. در بخش آزمایشگاهی تحقیق، تأثیر تغییرات دبی جریان با وجود تجهیزات کنترلی و بدون تجهیزات کنترلی روی حداکثر و حداقل ارتفاع موج فشاری بررسی شد. نتایج تحقیق نشان‌دهنده عملکرد مناسب لوله موج‌گیر در کاهش حداکثر موج فشاری و همچنین بهبود فشارهای منفی در سیستم است. در دبی حداکثر ۳۵/۷۵ لیتر در دقیقه، لوله موج‌گیر ارتفاع حداکثر موج فشاری را به اندازه ۷۰/۴۰ درصد کاهش داده است. در دبی حداقل ۷/۷۰ لیتر در دقیقه، لوله موج‌گیر باعث کاهش ۳۴/۸۲ درصدی ارتفاع حداکثر موج فشاری شده است. همچنین در دبی حداقل، لوله موج‌گیر حداقل موج فشاری را بیش از ۷۸ درصد بهبود داده است. برای تحلیل ضربه قوچ به صورت عددی از نرم‌افزار AFT Impulse استفاده شده است. نتایج مدل عددی با روش کاراکترستیک در یک مسئله نمونه بررسی شد و صحت عملکرد آن مورد تأیید قرار گرفت. شبیه‌سازی مدل آزمایشگاهی با نرم‌افزار نشان داد که این نرم‌افزار در مواقعی که ضربه قوچ فشارهای منفی تولید می‌کند تنها سیکل اول موج را به خوبی محاسبه می‌کند اما در سیکل‌های بعدی میزان استهلاك موج فشاری را به درستی نشان نمی‌دهد.

واژه‌های کلیدی: ضربه قوچ، خطوط انتقال آب، لوله موج‌گیر، فشار منفی

۱. گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ایلام

۲. گروه مهندسی برق، دانشکده فنی، دانشگاه ایلام

*: مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: j.mamizadeh@ilam.ac.ir

مقدمه

ضربه قوچ نوعی جریان میراست که در خطوط لوله می تواند در اثر بسته شدن شیرها و یا توقف ناگهانی پمپ ها ایجاد شود. در بعضی از سیستم های هیدرولیکی تحت فشار نظیر خطوط انتقال مایعات، شبکه های توزیع آب، تونل های آبی، سیستم های پمپاژ و جریان ثقلی پدیده ضربه قوچ با ایجاد موج های سریع، میرا و زودگذر موجب خطرات زیادی مانند ترکیدن خط لوله، خرابی شیرها، دریچه های کنترل و پمپ ها می شود. به طور نمونه بعد از خاموش شدن ناگهانی پمپ، یک موج کاهنده فشار از طرف پمپ به طرف انتهای خط لوله با سرعتی معادل سرعت موج در خط لوله به حرکت درمی آید، این موج فشار با حرکت به انتهای خط لوله، فشار را کاهش می دهد و از انتهای مسیر با فشار اولیه سامانه منعکس می شود تا به شیر یک طرفه پمپ برسد و پس از برخورد با شیر یک طرفه به صورت موج فشار مثبت منعکس می شود و این سیکل تناوب چندین بار تکرار می شود. با هر بار تکرار شدن این سیکل به علت اصطکاک خط لوله و سایر عوامل کاهنده، مقداری از فشار آن کاسته می شود تا به حالت پایدار برسد (۸).

محمدی و همکاران (۹) در مطالعه نوسانات فشاری ناشی از پدیده ضربه قوچ در جریان آرام تراکم پذیر درون یک لوله الاستیک، با استفاده از حل عددی معادلات پیوستگی و اندازه حرکت در نرم افزار فلونت، نشان دادند که بستن ناگهانی شیر باعث افزایش فشار درون لوله می شود که این افزایش فشار نوسانی بوده و با گذشت زمان از شدت آن کاسته می شود. همچنین پس از بررسی تأثیر ضخامت لوله در این تحقیق مشاهده کردند که با افزایش ضخامت لوله، شدت ضربه ایجاد شده در لوله افزایش می یابد. به علاوه تأثیر جنس لوله بر ضربه قوچ ایجاد شده در لوله هایی از جنس پلی اتیلن نسبت به لوله های بتنی کمتر بوده و در لوله های فلزی از همه بیشتر است. قهرمانی و همکاران (۴) بررسی کارایی تجهیزات کنترلی ضربه قوچ در مجتمع آبرسانی اورآمان سروآباد در دو حالت با استفاده از مدل عددی Hammer را شبیه سازی و تحلیل کردند. نتایج

آنها نشان داد که در صورت عدم به کارگیری تجهیزات کنترلی احتمال پدیده ضربه قوچ وجود دارد. در مدل دوم با انتخاب محل های مناسب که ازدیاد فشار در آنها زیاد است و تعبیه تجهیزات کنترلی ضربه قوچ در آن محل ها، سعی بر این شد تا فشارهای ناشی از ضربه قوچ کنترل شود. نتایج آنها نشان داد که تجهیزات کنترلی در مدل دوم باعث کاهش فشار حداکثری ضربه قوچ در سیستم شده و با این تجهیزات تغییرات فشار کاهش یافته و احتمال وقوع ضربه قوچ کمتر می شود (۴).

بهرامی و همکاران (۲) به تحلیل پدیده ضربه قوچ در خط انتقال آب پایانه مرزی شهرستان مهران با استفاده از نرم افزار Hammer پرداختند. تحقیق آنها در سه مرحله به صورت شبیه سازی بدون تجهیزات حفاظتی، با تجهیزات حفاظتی و تجهیزات پیشنهادی مشاور صورت گرفت که نتایج نشان داد در حالت بدون تجهیزات حفاظتی فشارهای منفی زیادی در طول خط انتقال به وجود آمده و باید کنترل شوند. در مرحله بعدی ترکیب های مختلف تانک ضربه گیر و شیر هوا پیشنهاد شد که نتایج شبیه سازی های متعدد نشان داد که تانک ضربه گیر دو مترمکعبی و سه عدد شیر هوای ۵۰ میلی متری قادر به کنترل فشارهای منفی در طول خط هستند. خوش فطرت و همکاران (۵) با استفاده از فشارسنج، فشار آب پیرانشهر و بوکان را اندازه گیری کردند و سپس با نرم افزار Hammer شبیه سازی مربوطه را انجام دادند. عملیات میدانی فشارسنجی توسط یک دستگاه دیجیتالی حساس و سریع انجام شد. افت اصطکاک با روش های مختلفی محاسبه شد که نتایج روش ناپایدار ویتکوفسکی را در مقایسه با سایر روش ها دارای حداقل خطا دانست. افزایش سرعت موج بر فشارهای حداکثر تأثیر مستقیم داشت و در مقابل بر فشارهای حداقل اثر معکوس گذاشت. در خطوط انتقال کوتاه، کاهش سرعت موج موجب کاهش حداکثر فشار و افزایش حداقل فشار شد. در خط انتقال طولانی احتمال تخریب بیشتری وجود داشت و حداقل فشار در سیکل اول موج رخ داد اما در خط انتقال با طول کمتر، نوسانات فشار سریع تر بود و حداقل فشار در سیکل اول موج فشاری رخ نداد.

موجب ترکیدن لوله می‌شود، کاهش فشار آب که منجر به آلودگی آب می‌شوند، اثر کاویتاسیون که به لوله‌ها و پروانه پمپ آسیب می‌رساند و نیروی ناپایداری که باعث جدا شدن اتصالات لوله می‌شود. فاکتور شکستگی لوله نیز به این چهار مورد اضافه شد و در نهایت روشی با عنوان روش ارزیابی ریسک شکستگی لوله برای محاسبه پنج عامل خطر فوق ذکر ارائه شد که این روش از طریق نمودار، خطرات شبکه تأمین آب را پیش‌بینی می‌کند. نتایج نشان داد که پیش‌بینی خطر شکستگی لوله و طبقه‌بندی نقشه‌های شکستگی لوله‌ها می‌تواند برای طراحی و محافظت از شبکه‌های توزیع آب مورد استفاده قرار گیرد.

لاهان و همکاران (۶) در بررسی پدیده ضربه قوچ در اثر بسته شدن ناگهانی شیر در لوله‌ها با استفاده از یک خط لوله و مدل کردن آن در نرم‌افزار گمبیت و سپس با استفاده از نرم‌افزار فلونت پدیده ضربه قوچ را شبیه‌سازی کردند و به حل عددی آن پرداختند. شبیه‌سازی کمک کرد تا درک بهتری از این پدیده داشته و راه‌های مختلف برای کاهش اثرات مخرب این پدیده پیشنهاد شود. در این تحقیق این امکان فراهم شد که با استفاده از نرم افزار فلونت مکان‌های بحرانی فشارهای مثبت زیاد و همچنین فشارهای منفی کم شناسایی شده و سپس دستگاه‌های حفاظتی مورد نیاز ارائه شد. مندر و همکاران (۷) تأثیر مدل‌های یک‌بعدی و سه‌بعدی را بر میرایی و سرعت موج ناشی از پدیده ضربه قوچ با استفاده از یک مدل ساده شامل دو مخزن که به وسیله یک لوله طولانی به هم وصل بودند و با یک شیر در بالادست لوله که طی زمان کوتاهی (۹ میلی ثانیه) بسته می‌شد، بررسی کردند. در این تحقیق از چند روش برای مدل‌سازی استفاده شد که نتایج نشان داد در همه مدل‌ها نتایج برای موج اول تفاوت چندانی ندارد اما پس از چند بار تکرار موج، روش یک‌بعدی خطوط مشخصه با ضریب اصطکاک پایدار کمترین همخوانی را با روش‌های دیگر دارد. در قسمت دیگری از تحقیق نیز به تحلیل پروفیل سرعت در هنگام بازگشت موج فشاری در نقاط مختلف از خط لوله پرداخته شد. ژانگ و

آسیابان و همکاران (۱) در مطالعه کاهش نوسانات فشاری ضربه قوچ، با استفاده از یک سامانه آزمایشگاهی شامل یک خط لوله با منبع تغذیه پمپ و شیر در بالادست ضربه قوچ را ایجاد کردند و به بررسی ساختارهای متخلخل پرداختند. ساختارهای متخلخل همگن توسط ذرات کاملاً کروی و سنگدانه‌های تیز گوشه با قطرهای متفاوت، در طول‌های مختلف لوله ایجاد شد. نتایج مشخص کرد که نوسانات فشار بالادست و پایین دست یک ساختار متخلخل در یک لوله حاوی یک ساختار متخلخل کمتر از نوسانات فشار در یک لوله با مسیر کاملاً باز در دبی مشابه است که دلیل آن کاهش سرعت انتشار موج فشاری بر اثر وجود ساختار متخلخل است. موسوی فرد و روحی (۱۰) جدایی ستون مایع در لوله‌های پرفشار تحت تأثیر پدیده ضربه قوچ را به صورت عددی با استفاده از مدل‌های یک‌بعدی و شبه دو بعدی گسسته حفره‌گازی بررسی کردند. مدل یک‌بعدی بر اساس روش مشخصه‌ها بوده و از مجموع اصطکاک ناماندگار برونون و اصطکاک شبه‌ماندگار برای شبیه‌سازی استهلاك انرژی استفاده شد. در مدل پیشنهادی شبه دو بعدی از معادله‌های مشخصه‌ها در راستای محور خط لوله و از معادله‌های تفاضل محدود در راستای شعاع، برای مدل‌سازی ضربه قوچ استفاده شد. ارزیابی نتایج مدل‌ها نشان داد که مدل شبه دو بعدی در محاسبه استهلاك انرژی به‌ویژه در چرخه‌های پایانی ضربه قوچ بهتر عمل کرده است. شریف و همکاران (۱۲) در بررسی تأثیر قطر و جنس لوله روی فشارهای ناشی از ضربه قوچ با استفاده از شبیه‌سازی عددی ضربه قوچ و جایگزینی جنس لوله‌ها و قطر لوله‌های مختلف و ترکیب همزمان این دو، سرعت امواج در لوله را بررسی و تحلیل کردند. مکان وقوع سرعت و فشار ماکزیم در تحقیق مشخص شد و همچنین مقدار آن در مرزها محاسبه شد و برای کاهش نوسانات فشار پیشنهاد شد که در خطوط انتقال لوله‌هایی با مدول الاستیسیته مشابه و لوله با قطر بیشتر انتخاب شود. وانگ و همکاران (۱۵) چهار مورد از خطرات ضربه قوچ در سیستم‌های انتقال آب را مورد بررسی قرار دادند که این خطرات عبارت بودند از: فشار بالای آب که

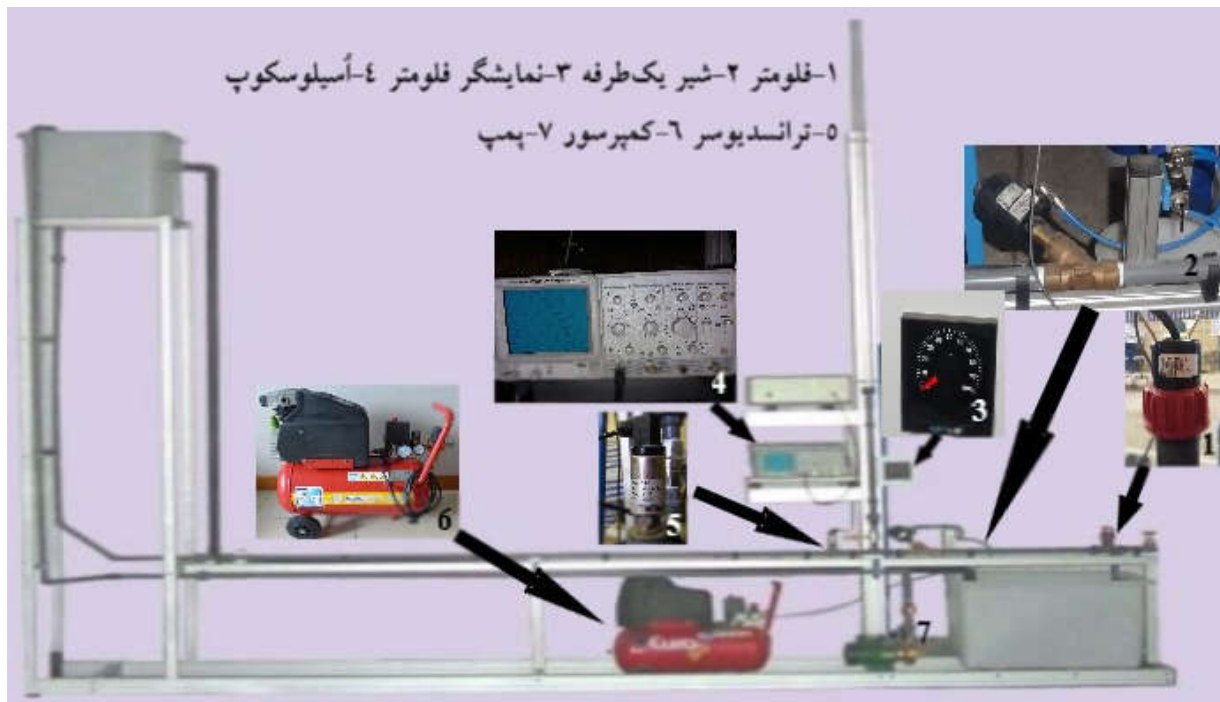
بوسینسک به منظور مدل‌سازی آشفستگی استفاده شد. بررسی نتایج آزمایشگاهی و مدل‌های عددی یک بعدی با مدل مذکور نشان داد که مدل‌های سه‌بعدی اثرات جدایی ستون مایع را به‌خوبی پیش‌بینی می‌کند. قابلیت مدل‌های یک‌بعدی در مدل‌سازی اثرات جدایی ستون مایع پایین است. یزدی و همکاران (۱۶) به بهینه‌سازی ابعاد و موقعیت تجهیزات کنترل ضربه قوچ در خطوط انتقال آب پرداختند. از سه مدل انفیس، ماشین بردار و شبکه عصبی مصنوعی استفاده شد. نتایج نشان داد که مدل شبکه عصبی مصنوعی و مدل انفیس به ترتیب بیشترین دقت و کمترین دقت را در پیش‌بینی دارند. همچنین نتایج نشان داد که تانک ضربه‌گیر از موثرترین وسایل کنترل ضربه قوچ هستند. شیر هوا نیز تأثیر کمی در کنترل ضربه قوچ در خطوط انتقال را دارد. در این تحقیق شبیه‌سازی ضربه قوچ در اثر بسته شدن ناگهانی شیر در پایین‌دست، با استفاده از مدل آزمایشگاهی انجام شده و سپس با استفاده از نتایج آزمایشگاه به مقایسه و ارزیابی نرم‌افزار AFT Impulse پرداخته شده است. همچنین در این تحقیق، تأثیر تغییرات دبی عبوری از خط لوله آزمایش روی ضربه قوچ در دو حالت با لوله موج‌گیر و بدون آن در کاهش میزان ارتفاع موج فشاری ناشی از آن بررسی و نتایج تحقیق ارائه شده است.

مواد و روش‌ها

مدل آزمایشگاهی

این تحقیق روی دستگاهی که در آزمایشگاه گروه مهندسی آب دانشگاه ایلام قرار دارد، انجام می‌گیرد. از داده‌های آزمایشگاهی استخراج شده از این دستگاه برای تشریح پدیده ضربه قوچ استفاده می‌شود. سپس این نتایج با نتایج حاصل از مدل عددی مقایسه شد. دستگاه آزمایش با نام (Water Hammer Apparatus with Surge Tower) ساخت شرکت Norwood انگلستان است. مشخصات کلی دستگاه در شکل (۱) نشان داده شده است. دستگاه دارای دو مخزن است که مخزن بالا به ابعاد ۴۵ در

همکاران (۱۷) با استفاده از یک مدل آزمایشگاهی شامل یک مخزن، یک لوله ثقلی با ورود هوای مداوم و یک شیر با زمان بسته شدن ۲/۲ ثانیه به بررسی پدیده ضربه قوچ پرداختند. در این تحقیق با استفاده از یک مدل عددی نیز بر مبنای روش بهبود یافته لکس، مدل‌سازی ضربه قوچ انجام شد و نتایج آن با مدل آزمایشگاهی همخوانی خوبی داشت. همچنین تأثیر زمان بسته شدن شیر روی سرعت موج فشاری و درصد اختلاط آب و هوا در این آزمایش بررسی شد و برای نزدیک شدن هرچه بیشتر نتایج به واقعیت پیشنهاد شد تا اثر اصطکاک نیز طی یک تابع اضافی به مدل بهبود یافته لکس افزوده شود. نورموسی و همکاران (۱۱) به بررسی اثر خواص و جنس لوله و دبی جریان بر میزان فشار حداکثر و نوسانات فشار به‌صورت آزمایشگاهی پرداختند که نتایج تحقیق آنها نشان داد که با افزایش دبی جریان، نوسانات فشار ماکزیمم نیز بیشتر می‌شود. همچنین حداکثر موج فشاری ایجاد شده در لوله‌های صلب نظیر UPVC بیشتر از لوله‌های انعطاف‌پذیر HPDE است که این امر در نتیجه تفاوت خصوصیات مکانیکی لوله‌ها است. وان و همکاران (۱۳) تأثیر تانک ضربه‌گیر در مستهلک کردن موج فشاری ناشی از ضربه قوچ با استفاده از دو نوع تانک ضربه‌گیر معمولی و تانک ضربه‌گیر با سیستم کنترلی بهبود یافته (بهبود عملکرد توسط دو شیر قطع‌کننده فشار و کنترل فشار که در کف تانک ضربه‌گیر تعبیه شده‌اند، اتفاق می‌افتد) مدل کردند و نتایج تحقیق آنها نشان داد که تانک ضربه‌گیر بهبود یافته در زمان کمتری نوسانات موج ضربه قوچ را از بین برده و همچنین حداکثر فشار ناشی از ضربه قوچ نیز در این سیستم کمتر از سیستم با تانک ضربه‌گیر معمولی بود. بنابراین در صورت استفاده از تانک ضربه‌گیر با سیستم کنترلی بهبود یافته، نوسانات سطح آب در تانک ضربه‌گیر کمتر بوده و ابعاد قائم تانک نیز کاهش می‌یابد. وردا و همکاران (۱۴) با استفاده از یک مدل سه‌بعدی مبتنی بر روش حجم محدود به بررسی ضربه قوچ و جدایی ستون مایع در اثر بسته شدن ناگهانی شیر در خطوط لوله آب پرداختند. از مدل حجم سیال به‌منظور دوفازی بودن جریان و از تقریب



شکل ۱. شمای کلی دستگاه آزمایش ضربه قوچ

فشاری ناشی از پدیده ضربه قوچ لوله موج‌گیر شفاف به طول ۲ متر و قطر خارجی ۴۰ میلی‌متر در بالادست شیر کنترل اول نصب شده است. در محل کارگذاری لوله یک اسیلوسکوپ برای ثبت تغییرات فشار هیدرواستاتیکی آب تعبیه شده است. حداکثر دبی خروجی پمپ ۳/۲۸ لیتر در ثانیه است که با سه دبی در این محدوده آزمایش انجام می‌شود و تغییرات فشار در طول لوله یک‌بار بدون لوله موج‌گیر و یک‌بار با لوله موج‌گیر اندازه‌گیری می‌شود. مراحل انجام آزمایش برای هر یک از دبی‌ها به صورت زیر است: ۱- تنظیم کردن دبی توسط شیر کنترل دبی موجود در انتهای خط لوله آزمایش و ثابت شدن سطح آب در مخزن بالادست ۲- بستن شیر کشویی به صورت ناگهانی در شرایط عدم وجود لوله موج‌گیر ۳- بستن شیر کشویی به صورت ناگهانی در شرایط موجود بودن لوله موج‌گیر ۴- ذخیره اطلاعات میزان نوسانات موج فشاری توسط دستگاه اسیلوسکوپ بلافاصله پس از بستن شیر یک‌طرفه. قبل از شروع آزمایشات نیاز است تا کالیبراسیون ترانسدیوسر فشار موجود در خط لوله آزمایش انجام شود. به منظور اندازه‌گیری نوسانات موج

۴۵ در ۴۵ سانتی‌متر و مخزن پایین به ابعاد ۶۵ در ۴۵ در ۷۵ سانتی‌متر است. یکی از مخازن (مخزن پایینی)، تأمین‌کننده آب مورد نیاز برای انجام آزمایش است. مخزن دیگر (مخزن بالایی) نیز تأمین‌کننده هد مورد نیاز آزمایش است. تغذیه مخزن بالایی توسط یک پمپ که دامنه دبی و هد پمپاژ آن به ترتیب ۱۰ تا ۱۹۷ لیتر بر دقیقه و ۲ تا ۱۳/۹ متر است، صورت می‌گیرد. به منظور تأمین هد ثابت از مخزن بالایی یک خط لوله سرریز در نظر گرفته شده است. خط لوله اصلی برای انجام آزمایش، لوله‌ای از جنس پی‌وی‌سی به طول ۵ متر و ۶۷ سانتی‌متر از کف مخزن بالا تا نقطه تخلیه به مخزن پایین و قطر داخلی ۲۱/۵ میلی‌متر است که در مسیر آن دو عدد شیر کنترل جریان، یک فلومتر، یک لوله موج‌گیر عمودی همراه با شیر قطع و وصل و یک ترانسدیوسر فشار قرار دارد. شیر کنترل اول به منظور قطع ناگهانی جریان به کار گرفته می‌شود. شیر کنترل دوم به منظور تنظیم دبی جریان خروجی مورد استفاده قرار می‌گیرد. در محل کارگذاری ترانسدیوسر فشار یک اسیلوسکوپ برای ثبت تغییرات فشار تعبیه شده است. به منظور مستهلک کردن امواج

که در روابط فوق V سرعت، H فشار پیزومتریک، A سطح مقطع جریان، f ضریب اصطکاک جریان، D قطر لوله، p فشار آب و a سرعت انتشار موج است. سرعت انتشار موج در داخل لوله به عوامل مختلفی از جمله جنس لوله، قطر لوله، ضخامت لوله، نحوه مهار کردن لوله و نوع سیال عبوری از لوله بستگی دارد که از رابطه (۳) محاسبه می‌شود:

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

که در آن: a = سرعت انتشار موج (متر بر ثانیه)، ψ = چگالی سیال (کیلوگرم بر مترمکعب)، K = مدول الاستیسیته حجمی سیال (نیوتن بر مترمربع)، ψ = پارامتری بدون بعد تابع خواص الاستیک لوله، قطر لوله و نحوه مهار کردن آن، E = مدول الاستیسیته یا ضریب ارتجاعی لوله (نیوتن بر مترمربع) است. مقدار ψ برای لوله‌های صلب برابر صفر است. مقدار ψ برای لوله‌های جدار نازک که در ابتدا و انتهای لوله گیردار و بدون مهار هستند به ترتیب از روابط ۴ و ۵ به دست می‌آید:

$$\psi = \frac{D}{e} (1 - \nu^2) \quad (4)$$

$$\psi = \frac{D}{e} \quad (5)$$

با حل معادلات فوق‌الذکر به روش خطوط مشخصه، دو معادله ۶ و ۷ به دست می‌آیند که با استفاده از آنها می‌توان دبی و ارتفاع معادل فشار را در هر یک از نقاط مجهول به دست آورد:

$$Q_p = C_p - \frac{gA}{a} H_p \quad \text{و} \quad C_p = Q_A + \frac{gA}{a} H_A - R \Delta t Q_A |Q_A| \quad (6)$$

$$Q_p = C_n + \frac{gA}{a} H_p \quad \text{و} \quad C_n = Q_B - \frac{gA}{a} H_B - R \Delta t Q_B |Q_B| \quad (7)$$

در هنگام وقوع پدیده ضربه قوچ احتمال وقوع فشار منفی در سیستم نیز وجود دارد که ممکن است فشار در نقاطی از سیستم به فشار کمتر از فشار بخار برسد. در این حالت پدیده کاویتاسیون در لوله رخ داده و جریان به صورت دوفازی شده و معادلات فوق برای این شرایط جوابگو نخواهند بود. در این

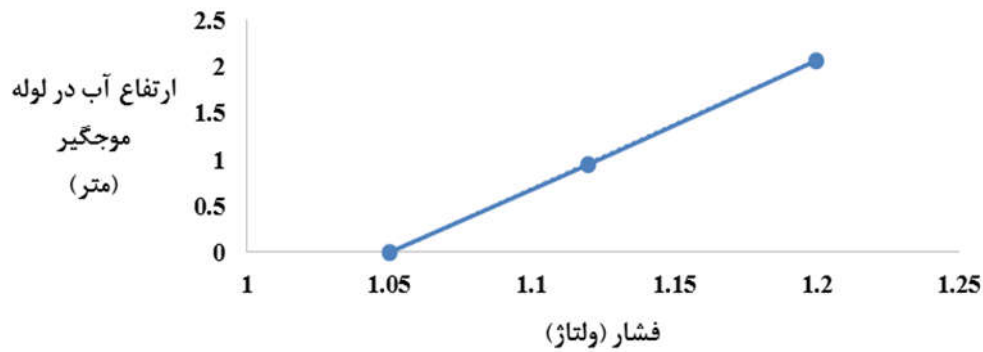
فشاری در طول خط لوله از یک فشارسنج یا همان ترانسدیوسر که بر اساس ولتاژ میزان فشار را اندازه گیری می‌کند، استفاده می‌شود. برای کالیبره کردن ترانسدیوسر و تبدیل فشار برحسب ولتاژ به فشار برحسب متر آب، طبق راهنمای دستگاه آزمایش، ابتدا بدون اینکه هیچ‌گونه آبی در داخل دستگاه باشد میزان ولتاژ دستگاه توسط اسیلسکوپ مشاهده و یادداشت می‌شود و میزان ارتفاع آب نیز صفر یادداشت می‌شود. حال شیر یک‌طرفه دستگاه بسته می‌شود و با روشن کردن پمپ اجازه داده می‌شود تا اندکی آب داخل خط لوله شود به طوری که آب در ابتدای لوله شفاف موج‌گیر مشاهده شود و بار دیگر میزان ولتاژ یادداشت شود. در این حالت ارتفاع آب برابر ارتفاع لوله زیرین لوله موج‌گیر یادداشت می‌شود چون آب تا آن قسمت از لوله بالا آمده است. در آخرین مرحله از این پروسه پمپ مجدداً روشن شده و آب به قدری در مخزن زیاد می‌شود که اضافه آن از طریق لوله مربوطه سرریز شود و در این حالت نیز میزان ولتاژ و ارتفاع آب در لوله موج‌گیر اندازه‌گیری و یادداشت می‌شود. حال در آخرین مرحله این داده‌ها به نرم افزار اکسل منتقل شده و از این نقاط یک خط برازش داده می‌شود که با استفاده از این معادله می‌توان واحد ولتاژ را به متر آب تغییر داد (شکل ۲).

مدل عددی

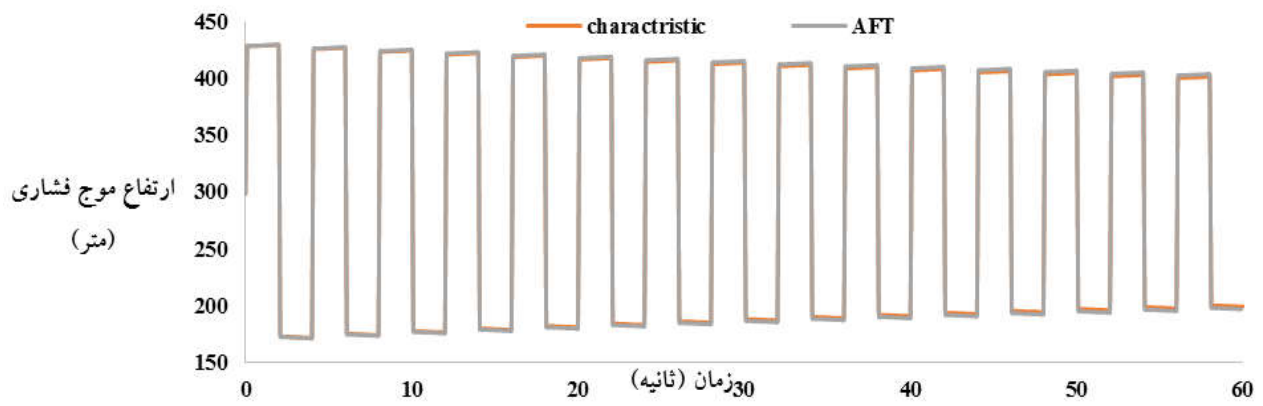
نرم افزار AFT Impulse یکی از نرم افزارهای کاربردی برای محاسبه افزایش فشارهای گذرا در سیستم های لوله‌کشی مایعات مثل آب، نفت و ... است که توسط شرکت Applied Flow Technology به بازار ارائه شده است. آخرین نسخه این نرم افزار نسخه هفتم آن است که سال ۲۰۱۹ به بازار ارائه شده است. تحلیل جریان‌های میرا در مجاری تحت فشار بر اساس دو معادله پیوستگی و مومنتوم انجام می‌گیرد که به ترتیب در معادلات (۱) و (۲) نشان داده شده‌اند:

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \rho a^2 \frac{\partial V}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + g A \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{f Q |Q|}{2 D A} = 0 \quad (2)$$



شکل ۲. خط برازش داده شده از داده‌های کالیبراسیون آزمایشگاه



شکل ۳. تغییرات زمانی ارتفاع موج فشاری در انتهای لوله به سه روش خطوط مشخصه، Hammer، و AFT Impulse

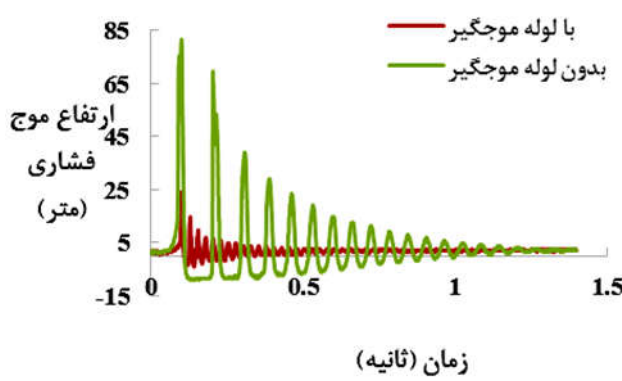
(رنگی در نسخه الکترونیکی)

نتایج و بحث

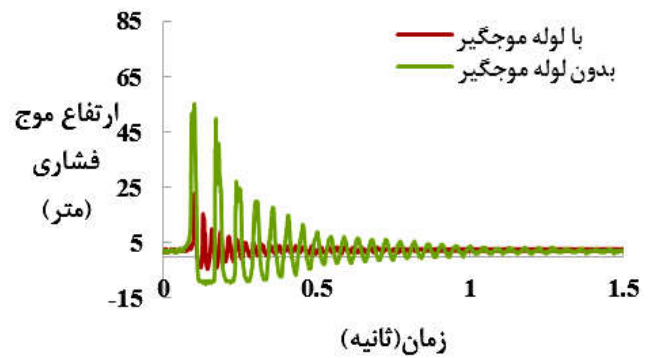
مسئله نمونه

در مسئله نمونه اول (۳) لوله انتقال آب افقی با طول ۱۰۰۰ متر، قطر لوله یک متر، سرعت موج در لوله ۱۰۰۰ متر در ثانیه، دبی یک مترمکعب در ثانیه را از مخزن بزرگی منتقل می‌کند. در انتهای پایین دست لوله، شیر کنترل جریان نصب شده است که به صورت آنی به طور کامل بسته می‌شود. هد بالادست آب در مخزن معادل ۳۰۰ متر در نظر گرفته شده است. در شکل (۳) تغییرات زمانی ارتفاع موج فشاری در انتهای لوله با دو روش مذکور نشان داده شده که با هم تطابق خوبی دارند. ارتفاع حداکثر موج فشاری در روش خطوط مشخصه و مدل عددی AFT Impulse به ترتیب برابر ۴۲۹/۶۶ و ۴۲۹/۸۸ متر به دست

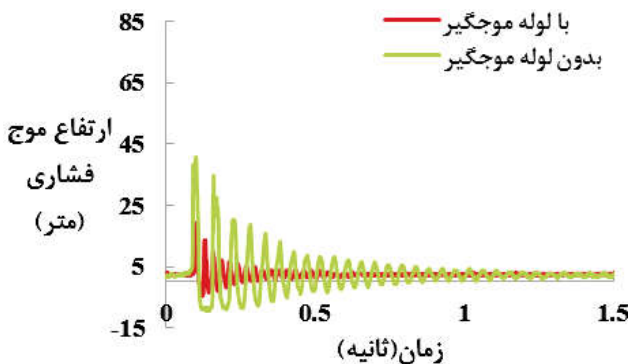
زمینه دو مدل Vapor cavity و Liquid-Gas Mixtures Model پیشنهاد شده است. در مدل Liquid-Gas Mixtures فرض می‌شود در اثر اختلاط آب و هوا، سرعت موج دیگر ثابت نیست و به‌ازای درصدهای مختلف هوا سرعت موج کاهش می‌یابد. در مدل Vapor cavity هنگامی که فشار در هر نقطه‌ای از لوله به فشار بخار مایع برسد، آن نقطه را به‌عنوان شرایط مرزی داخلی لحاظ کرده و فشار آن را برابر فشار بخار در نظر گرفته و حجم بخار موجود در لوله را از اختلاف بین دبی بالادست و پایین دست آن نقطه محاسبه می‌کند. در صورتی که در نقطه مذکور فشار پس از گام‌های زمانی بعدی به بالاتر از فشار بخار برسد، از همان معادلات اولیه مذکور استفاده می‌شود.



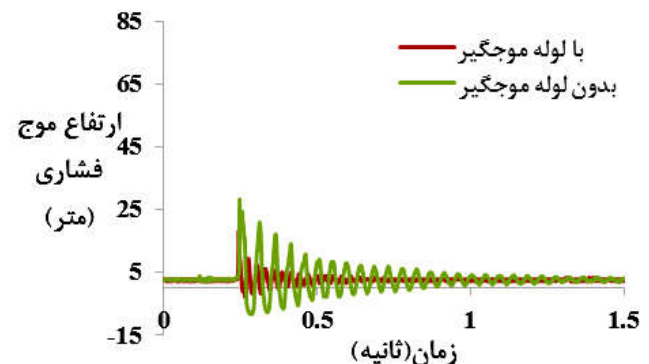
الف) دبی ۳۵/۷۵ لیتر در دقیقه



ب) دبی ۲۳/۳۹ لیتر در دقیقه



ج) دبی ۱۵/۱۳ لیتر در دقیقه



د) دبی ۷/۷۰ لیتر در دقیقه

شکل ۴. تغییرات ارتفاع موج فشاری برای دبی‌های مختلف (رنگی در نسخه الکترونیکی)

روند استهلاک امواج فشاری در مدت زمانی کمتر از ۱/۵ ثانیه در هر دو حالت به خوبی مشاهده می‌شود. ارتفاع حداکثر موج فشاری بدون تجهیزات کنترلی، برای دبی‌های ۳۵/۷۵ و ۷/۷۰ لیتر در دقیقه به ترتیب برابر ۲۷/۷۴ و ۸۱/۵۸ متر به دست آمد. در حالت استفاده از تجهیزات کنترلی، مقادیر ارتفاع حداکثر موج فشاری به ترتیب برابر ۱۸/۰۸ و ۲۴/۱۵ متر حاصل شد که نشان می‌دهد لوله موج‌گیر تأثیر بسزایی در کاهش حداکثر موج فشاری داشته و همچنین فشارهای منفی در سیستم را بهبود بخشیده است. در جدول (۱) نتایج کامل تأثیر لوله موج‌گیر در بهبود عملکرد خط لوله در اثر ضربه قوچ را نشان می‌دهد. با توجه به جدول، در دبی حداکثر ۳۵/۷۵ لیتر در دقیقه، لوله موج‌گیر ارتفاع حداکثر موج فشاری را به اندازه ۷۰/۴۰ درصد کاهش داده است. در دبی حداقل ۷/۷۰ لیتر در دقیقه، لوله موج‌گیر باعث کاهش ۳۴/۸۲ درصدی ارتفاع موج حداکثر شده

آمد. همچنین ارتفاع حداقل موج فشاری در روش خطوط مشخصه و مدل عددی AFT Impulse به ترتیب برابر ۱۷۱/۶۰ و ۱۷۱/۴۰ متر محاسبه شد. به طور کلی هر دو روش مقدار حداکثر و حداقل ارتفاع موج فشاری را با اختلاف کمتر از ۰/۵ درصد برآورد کرده‌اند.

بررسی نتایج آزمایشگاهی و مدل‌سازی عددی

نتایج آزمایشگاهی برای دبی‌های مختلف در دو حالت بدون تجهیزات کنترلی و با تجهیزات کنترلی مورد بررسی قرار گرفت. در حالت استفاده از تجهیزات کنترلی، اثر لوله موج‌گیر روی شکل و ارتفاع موج فشاری بررسی شد. با توجه به بازه دبی‌های آزمایش که بین صفر تا ۳۵/۷۵ لیتر در دقیقه بود، دبی‌های ۷/۷۰، ۱۵/۱۳، ۲۳/۳۹ و ۳۵/۷۵ لیتر در دقیقه انتخاب شد. نتایج آزمایشگاهی ارتفاع حداکثر موج فشاری در مقابل زمان برای دبی‌های مذکور در شکل (۴) نشان داده شده است.

جدول ۱. تأثیر لوله موج‌گیر در استهلاك ارتفاع موج فشاری

ردیف	دبی مورد مطالعه (لیتر در دقیقه)	حداکثر ارتفاع موج فشاری (متر)	بدون لوله	با لوله	حد اقل ارتفاع موج فشاری (متر)	بدون لوله	با لوله	درصد کاهش	درصد افزایش
		موج‌گیر	موج‌گیر	موج‌گیر	موج‌گیر	موج‌گیر	موج‌گیر	(%)	(%)
۱	۳۵/۷۵	۸۱/۵۸	۲۴/۱۵	-۸/۹۸	-۴/۰۱	۷۰/۴۰	۵۵/۳۵		
۲	۲۳/۳۹	۵۵/۰۸	۲۲/۵۰	-۸/۹۸	-۳/۴۶	۵۹/۱۵	۶۱/۴۷		
۳	۱۵/۱۳	۴۰/۷۲	۱۹/۱۸	-۸/۴۲	-۲/۳۵	۵۲/۹۰	۷۲/۰۹		
۴	۷/۷۰	۲۷/۷۴	۱۸/۰۸	-۸/۴۳	-۱/۸۰	۳۴/۸۲	۷۸/۶۵		

با مطالعات مندر و همکاران در خصوص عدم استهلاك امواج فشاری در مدل‌های یک بعدی، همخوانی دارد.

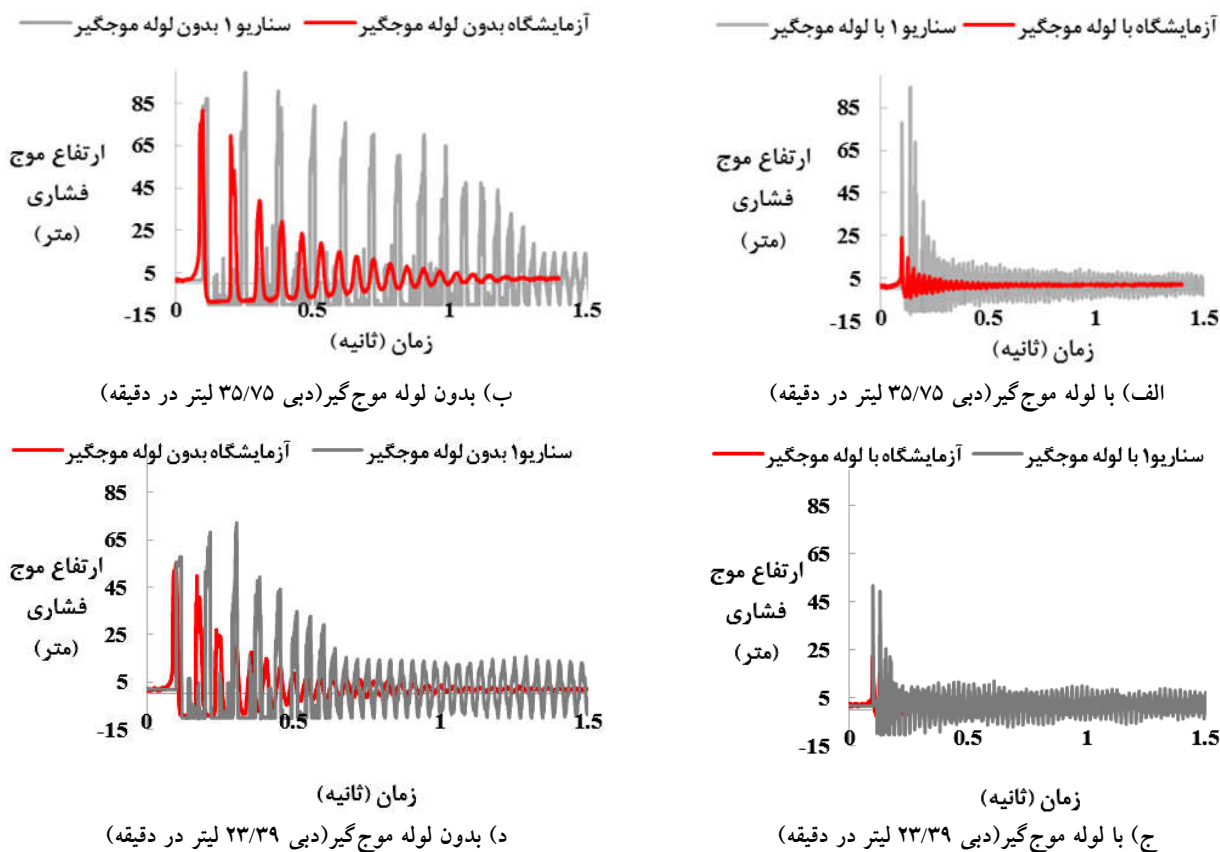
نتیجه‌گیری

با توجه به جریان‌های غیرماندگار ناگهانی و اثرات مخرب آن در شبکه‌های انتقال و توزیع آب شهری در این تحقیق به بررسی عددی و آزمایشگاهی پدیده ضربه قوچ در اثر بسته شدن ناگهانی شیر در پایین دست پرداخته شد. ابتدا در مدل آزمایشگاهی تأثیر تغییرات دبی جریان روی این پدیده بررسی شد و نتایج حاکی از آن است که هرچه دبی عبوری از خط لوله بیشتر باشد میزان حداکثر موج فشاری در اثر وقوع ضربه قوچ نیز بیشتر بوده و تأثیر لوله موج‌گیر در استهلاك آن نیز بیشتر است. در مسائلی که ضربه قوچ موجب فشار منفی بیشتر از فشار هوا در سیستم می‌شود، روش‌های معمول حل جریان غیرماندگار در لوله‌ها قادر به حل آنها نبوده که تحت این شرایط مدل **Vapor cavity Model** پیشنهاد شده است. نتایج شبیه‌سازی مدل عددی نشان می‌دهد که مدل عددی **AFT Impulse** در مسائل با فشار منفی به‌خوبی استهلاك امواج فشاری را نشان نمی‌دهد. به‌نظر می‌رسد دوفازی شدن جریان آب و هوا، یک‌بعدی فرض کردن مسئله در این شرایط و در نظر گرفتن افت اصطکاکی مربوط به جریان ماندگار، علت تفاوت نتایج مدل عددی و مدل آزمایشگاهی باشد که این نتایج با نتایج تحقیقات مندر و همکاران و وردا و همکاران مطابقت دارد. ارزیابی نتایج این تحقیق و نتایج سایر محققین نشان‌دهنده

است. لوله موج‌گیر علاوه بر بهبود حداکثر موج فشاری، در بهبود حداقل موج فشاری ناشی از پدیده ضربه قوچ نیز به‌خوبی عمل کرده، به‌طوری که در دبی ۷/۷۰ لیتر در دقیقه، این فشارها را تا بیش از ۷۸ درصد بهبود داده است.

در بخش دیگری از تحقیق، شبیه‌سازی دستگاه آزمایش در نرم‌افزار **AFT Impulse** انجام شد. به‌دلیل عدم تأثیر مخزن تأمین کننده آب پایین دست، پمپ و لوله مربوط به آن و لوله سرریز، شبیه‌سازی عددی بدون وجود آنها انجام شد. همچنین شبیه‌سازی بدون لوله‌های بعد از شیر یک‌طرفه انجام گرفت زیرا با بسته شدن شیر یک‌طرفه، عملاً لوله‌های مربوطه در مدار نیستند. در شکل (۵) مقایسه نتایج مدل عددی و مدل آزمایشگاهی برای دبی ۳۵/۷۵ لیتر در ثانیه نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود مدل عددی سیکل اول موج ضربه قوچ را به‌خوبی و متناسب با نتایج مدل آزمایشگاهی برآورد می‌کند اما در سیکل دوم به بعد با توجه به فشار منفی و وقوع کاویتاسیون دارای خطای زیادی است. بنابراین به‌نظر می‌رسد که مدل **Vapor cavity Model** به‌خوبی استهلاك امواج فشاری را نشان نمی‌دهد.

و در این موارد قابلیت و کارایی لازم را ندارد. از دیگر خطاهای احتمالی نیز می‌توان به ضعف معادلات در تعیین درست مقدار پارامتر اصطکاک، در نظر نگرفتن ترم غیردائم ضریب افت اصطکاکی و همچنین یک‌بعدی در نظر گرفتن مسئله اشاره کرد. استهلاك امواج فشاری در مدل عددی در مدت زمان بیشتری نسبت به مدل آزمایشگاهی اتفاق افتاده است. نتایج این تحقیق



شکل ۵. نتایج تغییرات ارتفاع موج فشاری در مدل آزمایشگاهی و نرم افزار AFT Impulse برای دبی های ۳۵/۷۵ و ۲۳/۳۹ لیتر در دقیقه (رنگی در نسخه الکترونیکی)

عملکرد ضعیف مدل های یک بعدی در پیش بینی رفتار ضربه عملکرد ضعیف مدل های یک بعدی در پیش بینی رفتار ضربه
 قوچ در حالت پدیده جدایی ستون مایع است. پیشنهاد می شود
 در تحقیقات آتی از مدل های عددی سه بعدی که توانایی
 غیردائم را نیز دارا هستند، استفاده کرده و نتایج آنها با نتایج
 آزمایشگاهی فوق مقایسه شود.

منابع مورد استفاده

1. Asiaban, P. and M. Fatahi Moghadam. 2018. Investigation of porous structures for protection of pipelines against water hammer. *Journal of Water & Wastewater* 29(5): 72-84. (In Farsi).
2. Bahrami, A., J. Mamizadeh, A. Hoseini and H. Lotfizadeh. 2017. 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). *Journal of Water & Wastewater Science & Engineering* 2: 34-40. (In Farsi).
3. Bentley Systems. 2018. Hammer User Manual. Haested Methods Solution Center. Siemon Company Drive, Watertown, USA.
4. Ghahramani, A., R. Daneshfaraz, A. Rahimi and A. Ghaderi, A. 2016. Numerical analysis of water hammering using water hammer software (Case study: Uraman Sarvabad conveyance line). In: 1st International Conference on Water-Environment- Sustainable Development, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran. (In Farsi).
5. Khoshfetrat, A. R., R. Daneshfaraz and J. Behmanesh. 2018. Numerical comparison of various methods of transient flow calculation in water conveyance systems with pumping station. *Journal of Water and Wastewater* 29(2): 85-100. (In Farsi).
6. Lahane, S., R. Patil, R. Mahajan and K. Palve. 2015. Analysis of water hammering in pipeline and its CFD

- simulation. *International Journal of Engineering Technology, Management and Applied Sciences* 3(5): 250- 255.
7. Mandair, Sh., B. Karney, R. Magnan and J. Morissette. 2018. Comparing pure CFD and 1-D solvers for the classic water hammer models of a pipe-reservoir system. In: 1st International WDSA / CCWI Joint Conference, Kingston, Ontario, Canada.
 8. Ministry of Energy. 2010. Instruction for Selection & Design of Water Hammer Facilities in Urban Water Supply. No. 517. Bureau of Engineering and Technical Criteria for Water and Wastewater. (In Farsi).
 9. Mohammadi, R., M. H. Davudi and A. Ramian. 2016. Numerical simulation of water hammering in laminar pipe flow. In: 1st International Conference on Mechanical and aerospace Engineering. Tehran University, Tehran, Iran. (In Farsi).
 10. Mousavifard, S. M. and R. Roohi. 2019. Quasi 2D analysis of column separation and bubbles growth in water hammer. *Journal of Hydraulics* 14(3): 147-160. (In Farsi).
 11. Nor Musa, M., S. Samion, M. K. Abdul Hamid, W. M. A. W. Yahya and E. Paiman, E. 2018. Study on water hammer effect in turbulent flow through the pipe system. *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences* 50(2): 122-133.
 12. Sharif, F., M. Siosemarde, E. Merufinia and M. Esmatsaatlo. 2014. Comparative hydraulic simulation of water hammer in transition pipe line systems with different diameter and types. *Journal of Civil Engineering and Urbanism* 1: 282- 286.
 13. Wan, W., B. Zhang, X. Chen and J. Lian. 2019. Water hammer control analysis of an intelligent surge tank with spring self-adaptive auxiliary control system. *Journal of Energies* 12(13): 2527.
 14. Warda, H. A., E. M. Wahba and M. Salah EI-Din. 2020. Computational fluid dynamics (CFD) simulation of liquid column separation in pipe transients. *Alexandria Engineering Journal* 59(5): 3451-3462 . doi.org/10.1016/j.aej.2020.05.025.
 15. Wang, R., X. Wang, H. Yang and J. Sun. 2014. Water hammer assessment techniques for water distribution systems. *Procedia Engineering* 70: 1717-1725.
 16. Yazdi, J., A. Hokmabadi and M. R. JaliliGhazizadeh. 2019. Optimal size and placement of water hammer protective devices in water conveyance pipelines. *Water Resources Management* 33: 569-590.
 17. Zhang, B., W. Wan and M. Shi. 2018. Experimental and numerical simulation of water hammer in gravitational pipe flow with continuous air entrainment. *Journal of Water* 10(7): 928.

Experimental and Numerical Simulation of Water Hammer in Water Conveyance Pipeline and Effect of Surge Tower Pipe in Controlling this Phenomenon

H. Ghanbary¹, J. Mamizadeh^{1*} and M. Valizadeh²

(Received: July 6-2020; Accepted: October 12-2020)

Abstract

Water hammer is one of the unsteady flows in urban water distribution networks, which has been of great importance due to the damage caused to the pipeline and has always been of interest to researchers. In this study, the phenomenon of water hammer due to the sudden closure of the valve in the downstream end has been investigated in a laboratory and using a numerical model. In the laboratory section of the study, the effect of flow changes with control equipment and without control equipment on the maximum and minimum height of pressure wave head was investigated. The results showed that the proper performance of the surge tower pipe in reducing the maximum pressure wave as well as improving the negative pressures in the system. In a maximum discharge of 35.75 liters per minute, surge tower pipe reduced pressure wave head by a maximum of 70.40%. In a minimum discharge of 7.70 liters per minute, the surge tower pipe reduced the height of maximum pressure by 34.82%. Also, in minimum discharge, surge tower pipe has improved the minimum pressure wave head by more than 78%. AFT Impulse numerical model was used to analyze the water hammer. The results of the numerical model were examined in a benchmark problem using a characteristic method and its validity was confirmed. Simulation of laboratory model with numerical software showed that this software only predicts the first wave properly when water hammer produces negative pressures, but in the next cycles it does not show the depreciation rate of the pressure wave, properly.

Keywords: Water hammer, Water conveyance pipeline, Surge tower pipe, Negative pressure

1. Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Ilam University, Ilam, Iran.

2. Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Ilam University, Ilam, Iran.

*: Corresponding author, Email: j.mamizadeh@ilam.ac.ir