



بررسی پارامترهای موثر (قطر لوله و سرعت سیال) در شبیه سازی پدیده ضربه قوچ در خطوط انتقال آب

نیما اسدی ده میراحمدی^{1*}، یوسف اسمعیلی²

1- فارغ التحصیل کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، واحد سمنان، دانشگاه آزاد اسلامی، سمنان، ایران
2- فارغ التحصیل کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، واحد خمینی شهر، دانشگاه آزاد اسلامی، اصفهان، ایران
*تهران، 1393673817، nima.adma@gmail.com

اطلاعات مقاله	چکیده
مقاله پژوهشی کامل دریافت: 13 آبان 1397 پذیرش: 25 آذر 1397 ارائه در سایت: 10 بهمن 1397	نظر به اهمیت بررسی دقیق ضربه قوچ ¹ در شبکه های لوله کشی و خطوط انتقال مایعات در تحقیق حاضر دو پارامتر قطر و سرعت سیال در یک خط لوله، به روش آزمایشگاهی و شبیه سازی توسط نرم افزار هم ² مورد بررسی قرار گرفت. در این تحقیق بر روی شش نوع لوله با جنس های مختلفی که شامل برنجی، فولادی، پنج لایه، مسی و PVC و با فرض بر اینکه علت ایجاد ضربه قوچ بسته شدن سریع شیر می باشد، آزمایش انجام شد. آزمایشات نشان دادند که زمان بسته شدن شیر یکی دیگر از عوامل مهم در این پدیده می باشد. با انجام آزمایش در دو حالت آرام بسته شدن و سریع بسته شدن شیر آب نتایج نشان دادند هر چه مدت زمان بسته شدن شیر طولانی تر باشد اثر ضربه قوچ کمتر شده و موج های حاصل زودتر میرا می شوند. همچنین با بررسی بر روی قطر لوله ها نتایج بدست آمده حاکی از آن است افزایش قطر لوله منجر به افزایش دبی شده و به دنبال خود سرعت سیال در خط لوله بیشتر می شود و اثر ضربه قوچ نیز با افزایش قطر شدیدتر می گردد. این پدیده نشان میدهد تأثیر افزایش سرعت سیال نسبت به اثر قطر بیشتر است.
کلیدواژگان ضربه قوچ روش تجربی نرم افزار هم قطر لوله سرعت سیال	

Investigation of effective parameters (pipe diameter and fluid velocity) on the Simulation of water hammer phenomenon in water pipeline

Nima Asadi Dehmirahmadi^{1*}, Yosef Esmaeili²

1- Department of Mechanical Engineering, **Islamic Azad University**, Semnan, Iran.
2- Department of Mechanical Engineering, **Islamic Azad University**, Isfahan, Iran
* P.O.B 1393673817 Tehran, nima.adma@gmail.com

Article Information

Original Research Paper
Received 4 November 2018
Accepted 16 December 2018
Available Online 30 January 2019

Keywords

Water hammer
Empirical method
Hammer software
Pipe diameter
Velocity

ABSTRACT

Due to the importance of water hammer in pipe network and pipe containing liquids in this paper, the diameter of pipe and the velocity of fluid were considered experimentally in laboratory and simulated the problem in HAMMER software. In this study, the tests were carried out with six different types of materials (Brass, Carbon Steel, Copper, Five layer and PVC). It was assumed that valve which causes water hammer was closed fast. Also, how valve closing, is another important issue for this phenomenon. The tests in two modes slow and fast closing valve results showed if it takes more time to close, water hammer is less and the waves would fade faster. Also by examining the results indicate that the diameter of the pipes increasing pipe's diameter, increases the mess flow and fluid's velocity therefore effect of water hammer increases. This phenomenon shows that effect of increasing fluid velocity is more powerful than increasing pipe diameter.

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Nima Asadi Dehmirahmadi, Yosef Esmaeili, Investigation of effective parameters (pipe diameter and fluid velocity) on the Simulation of water hammer phenomenon in water pipeline, *Journal of Mechanical Engineering and Vibration*, Vol. 9, No. 4, pp. 64-71, 2018 (In Persian)

1- مقدمه



شکل 1 شماتیک دستگاه تست ضربه قوچ

در این شبیه سازی ها سعی شده است تا طول لوله تقریباً 3 متر بوده و در حالتی که شیر سریع بسته شود، زمان بسته شدن 0/1 ثانیه منظور و در حالی که شیر به صورت آهسته بسته شود، مدت زمان تقریبی 1/6 ثانیه مورد نیاز باشد. تمامی ابعاد و اندازه های مورد نیاز دیگر دقیقاً با ابعاد واقعی دستگاه یکسان می باشد.

جدول 1 مشخصات آزمایش های انجام شده

ردیف	جنس	سایز لوله	طول لوله
مرحله 1	برنجی	0/75	3
مرحله 2	فولادی	0/75	2/86
مرحله 3	پنج لایه	16	2/80
مرحله 4	مسی	16	3
مرحله 5	PVC	25	3
مرحله 6	PVC	32	3

2- روش انجام آزمایش

ابتدا کلیه شیرهای کنترل جریان را در حالت بسته قرار داده و پمپ روشن می شود. پس از آن شیر مجاور پمپ را باز کرده تا آب به داخل مخزن ذخیره آب در قبل از لوله آزمایش جریان یابد. پس از آنکه ارتفاع آب درون این مخزن در حالت پایا قرار گرفت، شیر مربوط به مخزن را باز کرده و به سیال اجازه جریان یافتن می دهیم. پس از آنکه حالت پایایی در دستگاه آزمایش ایجاد شد، شیر مربوط به مخزن موج را بسته و مقدار ارتفاع استاتیک در آن را پس از رفع تمامی نوسانات سیال آب می خوانیم (h_s). سپس شیر مخزن را باز کرده و پس از توقف نوسانات h_v را یادداشت می کنیم. برای مطالعه ضربه قوچ و تغییر ارتفاع آب درون

پدیده ضربه قوچ زمانی رخ می دهد که حرکت سیال در یک خط لوله مجبور شود به طور ناگهانی متوقف و یا تغییر جهت دهد. این تغییر ناگهانی در حرکت که می تواند به دلیل بسته شدن دریچه، نارسایی پمپ، یا آسیب خط لوله غیرمنتظره باشد، باعث انتشار موج فشار در امتداد خط لوله با سرعت بالا می گردد [1]. به بیان دیگر، ضربه قوچی آب که در نتیجه تغییرات دبی یا سرعت رخ می دهد، مقدار معینی نیرو ایجاد می کند که به صورت موج با سرعت ثابت در خط لوله جریان، به طرف بالا دست یا پایین دست، حرکت می نماید. این موج در مسیر حرکت خود به تدریج مستهلک می گردد و پس از مدتی که از رفت و برگشت موج سپری شد، این سیستم ناپایدار یا زودگذر حالت پایدار دیگری می رسد که قابل پیش بینی می باشد [2]. با وجود این که در حال حاضر مکانیزم تشکیل ضربه قوچ کاملاً شناخته شده، اما به علت وسعت و گستردگی ابعاد مسئله ضربه قوچ و وجود شرایط گوناگون مکانی و زمانی در این فرآیند، دامنه تحقیقات در این زمینه ادامه داشته و هنوز دنیای وسیعی از مجهولات و مشکلات ناشی از ضربه قوچ در برابر محققین قرار دارد که کوشش برای حل و فصل آنها میتواند زمینه مناسبی را برای تحقیقات ایجاد نماید. [3]

1- بیان موضوع

در این پژوهش ابتدا توسط دستگاه تست ضربه قوچ، شش لوله مختلف از نظر قطر و جنس مورد بررسی قرار گرفت. سپس با شبیه سازی دستگاه در نرم افزار هم نتایج را در نرم افزار بررسی شد.

شکل 1 شماتیک دستگاه آزمایش را نشان می دهد. در این دستگاه از یک مخزن (سمت چپ) برای تأمین هد و دبی مورد نیاز در ابتدای لوله تحت آزمایش استفاده شده است. خروجی مخزن نشان داده شده به لوله مورد آزمایش و پس از آن به سرج تانک می رسد. با بستن سریع شیر، میتوان تغییر ارتفاع در لوله سرج تانک را یادداشت و برای مقایسه نتایج بکار برد.

¹ Water hammer

² Hammer

$$dH = \pm \frac{a}{g} dV = \pm \frac{a}{gA} dQ = \pm BdQ \quad (6)$$

4-2- مراحل شبیه سازی توسط نرم افزار همر

در این قسمت به مدل سازی آزمایش ها با استفاده از نرم افزار همر پرداخته شده است. این مشخصات برای مدل سازی ضربه قوچ توسط نرم افزار استفاده شده است: قطر مخزن آب برابر با 30 سانتیمتر و شکل آن به صورت استوانه ای در نظر گرفته شده است. قطر سرچ تانک برابر با 32/72 میلیمتر در نظر گرفته شده است. ارتفاع سیال در مخزن ذخیره برابر با همان مقدار 78 سانتی متر و ثابت که در آزمایشگاه مشاهده شده است منظور می شود.

یکی دیگر از مواردی که برای مطالعه ضربه قوچ در این نرم افزار مورد نیاز است، مدول الاستیسیته و ضریب پواسون لوله و سیال می باشد. با مراجعه به کتب و سایت های مختلف، این مقادیر برای لوله های مورد آزمایش استخراج و در نرم افزار وارد شدند.

برای محاسبه سرعت موج داخل سیال از داده های نرم افزار مربوط به آب در دمای 20 درجه سلسیوس و فشار تقریبی 1 بار استفاده شده است. با داشتن جنس، ضخامت، طول و مشخصات الاستیکی لوله ها می توان سرعت موج را در محیط محاسبه و بر لوله های مختلف اعمال کرد. جنس دیگر لوله های دستگاه آزمایش، بجز لوله در مسیر اصلی (مورد آزمایش) برابر با گالوانیزه با قطر نیم اینچ منظور شده است.

این نرم افزار قادر است تا تأثیر عمر لوله ها را بر آنالیز مسئله وارد کند. در این میان لازم است تا مشخصات دقیق دیگری از مسئله برای نرم افزار تعریف شود. از آنجایی که برخی از این مشخصات در دسترس نیستند، لذا فرض شده است که کلیه لوله ها و تجهیزات نو و تازه باشند. به این معنا که رسوب و زبری سطح آنها مقادیر استاندارد خود را خواهد داشت.

شکل 2 نمایی از مدل منظور شده در نرم افزار را نشان می دهد. همانطور که در این مدل مشخص است، جریان توسط پمپ از مخزن R-1 مکش شده و پس از عبور از شیر کنترل جریان، به مخزن T-3 میریزد. در این مخزن، سطح آب همواره مقدار مذکور در آزمایش منظور شده است. پس از آن، آب از لوله آزمایش که همان P-26 است گذشته و وارد شیر کنترل جریان TCV-2 شده و به مخزن R-1 باز می گردد. در این حین، مخزن سرچ تانک در بعد از محل آزمایش قرار داده شده است. سعی شده است تا مدل سازی بسیار نزدیک به دستگاه آزمایش انجام پذیرد هر چند که قسمتی که پمپ در آن قرار گرفته است مورد

سرچ تانک، ابتدا شیر مخزن موج را سریع بسته و همزمان شروع به ثبت نوسانات می کنیم.

3- شبیه سازی عددی

4-1- معادلات حاکم در نرم افزار

برای محاسبات و حل عددی نیاز به معادلاتی است تا رفتار سیستم را بتوان با آنها مدل سازی کرد. از آنجا که قابلیت های مختلفی در نرم افزار گردهم آمده است، از معادلات بسیار زیادی نیز استفاده می شود. به همین دلیل ذکر تمامی معادلات حاکم بر رفتار سیستم مورد نظر بسیار طولانی می باشد. اما در ادامه به بیان روابط اصلی و معادلات کلی حاکم بر رفتار سیستم پرداخته شده است. در این نرم افزار امکان محاسبه افت فشار با روابط مختلفی همانند رابطه ویسباخ داریسی، مانینگ و هایزن ویلیامز وجود دارد.

معادله داریسی ویسباخ¹ به صورت زیر می باشد:

$$h_L = f \frac{L V^2}{D 2g} = \frac{8fLQ^2}{gD^5\pi^2} \quad (1)$$

معادله هایزن ویلیامز² نیز می تواند برای محاسبه افت فشار طبق رابطه زیر بکار گرفته شود:

$$h_L = \frac{c_f L}{c^{1.852} D^{4.87}} Q^{1.852}. \quad (2)$$

معادله مانینگ³ نیز به صورت زیر است.

$$h_L = \frac{c_f L (nQ)^2}{D^{5.33}} \quad (3)$$

بقای جرم در حالت پایا طبق رابطه زیر عنوان می شود.

$$\sum_{pipes} Q_i - U = 0 \quad (4)$$

بقای انرژی در حالت کلی و پایا به صورت زیر است:

$$Z_1 + \frac{P_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} + \sum h_p = Z_2 + \frac{P_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g} + \sum h_L + \sum h \quad (5)$$

روابط متعدد دیگری به عنوان روابط کمکی مطرح و قابل استفاده هستند. برای مثال از رابطه ژکوفسکی که B مشخصه امیدانس می باشد به صورت زیر استفاده می شود. در این رابطه تغییرات هد به دی از طریق ضریب امیدانس مرتبط شده است.

¹ Darcy-Weisbach equation

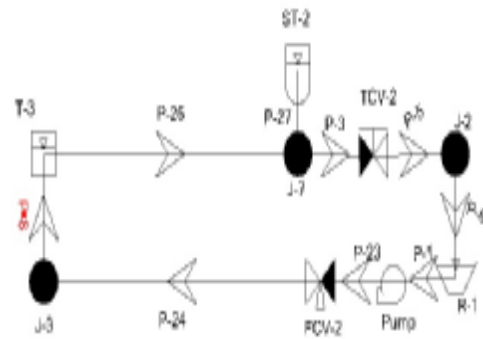
² Hazen-Williams equation

³ Manning equation

جدول 3 تغییرات هد استاتیک در سرچ تانک از زمان بسته شدن شیر برای آزمایش مرحله 1

بسته شدن سریع		بسته شدن آهسته	
ارتفاع (سانتی متر)	زمان (ثانیه)	ارتفاع (سانتی متر)	زمان (ثانیه)
19	0	19	0
90	3/8	90/8	6
71/8	6/8	71	6
84/2	9/9	84/2	10
75	13/3	75/4	13
81/4	16/7	81/4	18
76/4	17/9	76/8	20
80/2	23/1	80	22
77/6	26/7	77/8	26
79/4	30/1	79/4	30
78	33/3	78/2	34
79	36	78/8	36
78/2	39/1	78/6	39
78/8	42/7	78/6	46
78/4	45/8		
78/8	49/4		
78/6	53/7		
78/6	55		

نیاز نبوده و در دستگاه آزمایش واقعی صرفاً جهت حفظ سطح آب داخل مخزن اصلی مورد استفاده قرار می گیرد.



شکل 2 شماتیک مدل اعمال شده در نرم افزار هم

4- بررسی نتایج

1-5- بررسی نتایج آزمایشات

برای تعیین سرعت اولیه ابتدا شیر مخزن ستون موج را باز گذاشته شیر مخزن ستون موج را باز می گذاریم و زمان آب خروجی از لوله برنجی در یک مخزن موج تا 7 لیتر اندازه می گیریم تا دبی آب عبوری از لوله مشخص شود (محاسبه دبی به روش مخزنی).

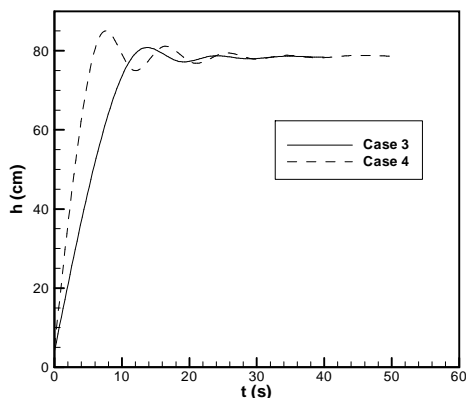
جدول 3 نتایج مربوط به بسته شدن آهسته و سریع شیر را برای آزمایش اول نشان می دهد. همانطور که مشخص است حالت آهسته بسته شدن نوسانات در حدود 14 نوسان تمام شده است و آب در مدت زمان 46 ثانیه از بستن شیر، موج میرا شده و دامنه نوسانات عملاً صفر می شود. ولی برای حالت بسته شدن سریع شیر نتایج نشان می دهد که جریان پس از 18 نوسان به حالت پایدار رسیده است. همچنین آب در مدت زمان تقریبی 54 ثانیه از بستن شیر، موج میرا شده و دامنه نوسانات عملاً صفر می شود.

جدول 2 نتایج مربوط به حالت پایای آزمایش های مختلف

ردیف	V (lit)	T (s)	Q=V/t (m ³ /s)	D (mm)	u=Q/A (m/s)
مرحله 1	6	37/8	0/00016	20	0/50551
مرحله 2	6	42	0/00014	21	0/41266
مرحله 3	3	98	0/00003	11/98	0/27171
مرحله 4	6	50/5	0/00012	14/02	0/77001
مرحله 5	6	57/1	0/00011	15/95	0/52617
مرحله 6	9	34/3	0/00026	20	0/83064

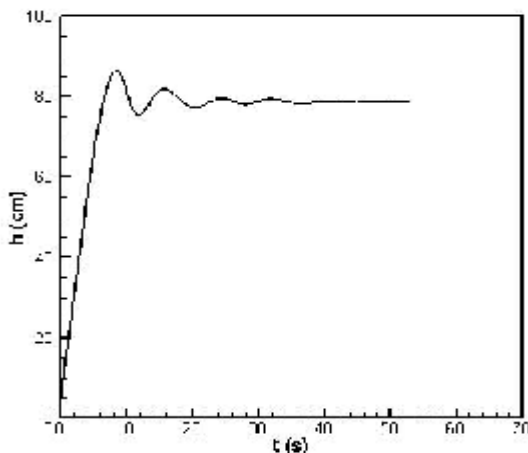
تغییرات ارتفاع سیال در لوله بر حسب زمان همانند جدول 3 در شکل 3 برای آزمایش اول و برای دو حالت بسته شدن آهسته و بسته شدن سریع نشان داده شده است. مشخص است که بسته شدن سریع شیر منجر به پاسخ سریعتر سیستم شده و اندکی ارتفاع آب درون سرچ تانک افزایش یافته است. همچنین برای بسته شدن آهسته، جریان سریعتر میرا شده ولی برای بسته شدن سریع، نیاز به زمان بیشتری برای میرا شدن انرژی موج درون سیستم می باشد.

مس، عکس العمل قوی تری نسبت به لوله پنج لایه ایجاد شده و مشاهده می شود. از این دسته می توان به افزایش هد در ابتدای بسته شدن شیر و همچنین افزایش تعداد نوسانات و در نتیجه افزایش زمان لازم برای پایدار شدن سیال و ارتفاع آن اشاره کرد.



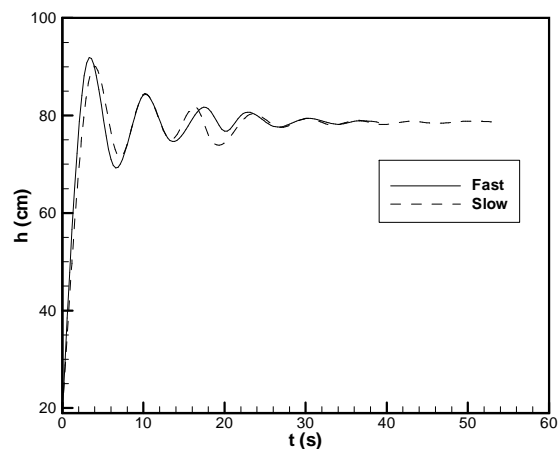
شکل 5 مقایسه آزمایش مرحله 3 و مرحله 4

نتایج مربوط به آزمایش پنجم در شکل 6 ترسیم شده است. در این آزمایش در مقایسه آزمایشات قبل افزایش ارتفاع استاتیک و تعداد نوسانات داخل سرچ تانک و زمان لازم برای پایدار شدن جریان مشاهده می شود. علت این امر را می توان به افزایش قطر لوله اصلی و در نتیجه افزایش سرعت موج و سرعت جریان در داخل لوله نام برد و لذا رسیدن به چنین نتایجی پیش بینی می شود.

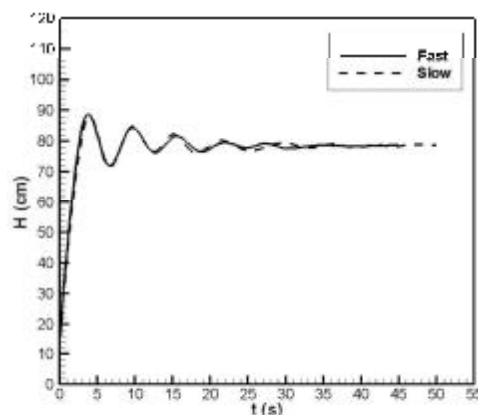


شکل 6 تغییرات هد استاتیک از زمان بسته شدن شیر برای آزمایش مرحله 5

نتایج آزمایش ششم که در آن قطر لوله اندکی بیشتر از آزمایش قبل است نیز در شکل 7 ترسیم شده است. افزایش



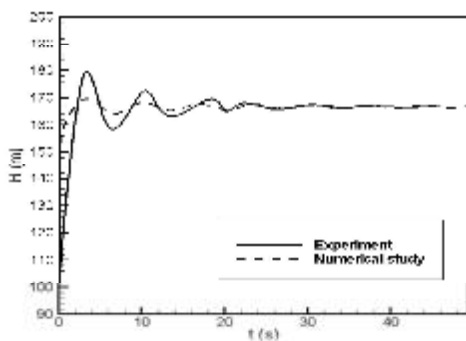
شکل 3 تغییرات هد استاتیک در سرچ تانک از زمان بسته شدن شیر برای آزمایش مرحله 1- بسته شدن آهسته و سریع شیر



شکل 4 تغییرات هد استاتیک در سرچ تانک از زمان بسته شدن شیر برای آزمایش مرحله 2- بسته شدن آهسته و سریع شیر

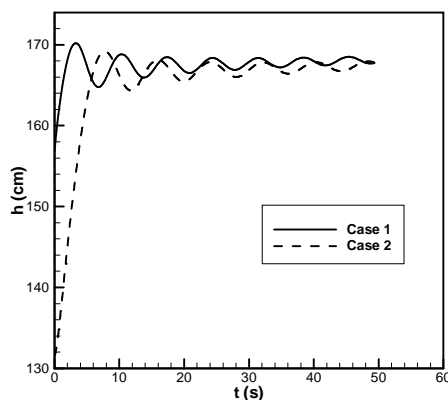
این نتایج برای آزمایش دوم در شکل 4 به نمایش در آمده است. همانند آزمایش اول، رفتاری مشابه دیده می شود. به عبارتی دیگر بسته شدن سریع شیر منجر به پاسخ سریعتر سیستم شده و اندکی ارتفاع آب درون سرچ تانک را افزایش داده است. همچنین برای بسته شدن آهسته، جریان سریعتر میرا شده ولی برای بسته شدن سریع، نیاز به زمان بیشتری برای میرا شدن انرژی موج درون سیستم می باشد.

در آزمایش سوم جنس لوله از نوع پنج لایه بوده و لوله های پنج لایه دارای سرعت موج کمتری نسبت به لوله های دیگر می باشند و در نتیجه انتظار می رود که تأثیر ضربه قوچ نیز کمتر باشد. در آزمایش چهارم به دلیل تغییر جنس این نوع لوله به



شکل 8 بررسی تغییرات در دو حالت آزمایش و شبیه سازی نرم افزار برای آزمایش مرحله 1

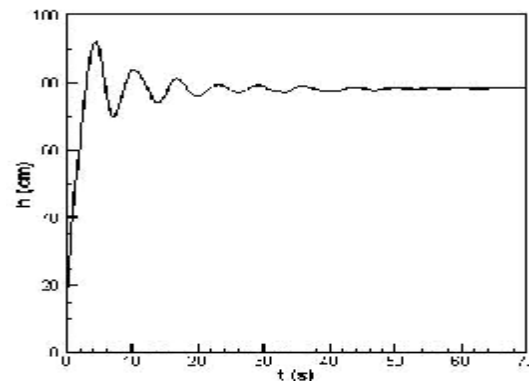
تغییرات ارتفاع در سرچ تانک برای آزمایش اول و دوم در شکل 9 ذکر شده است. برای لوله آزمایش دوم مشخص است که ارتفاع کمتری از آب درون سرچ تانک قرار گرفته است و این به معنای کاهش ضربه قوچ در این لوله (با توجه به ضخامت، قطر و جنس آن) می باشد. تغییر ارتفاع لوله دوم نیز همانند لوله آزمایش اول بعد از مدتی از بین رفته و ارتفاع سیال همانند سطح مربوط به تانک تغذیه می شود.



شکل 9 تغییرات ارتفاع آب در سرچ تانک برای آزمایش مرحله 1 و مرحله 2

شکل 10 نشان می دهد که لوله مسی همانند لوله های فولادی و برنجی رفتار کرده و نوسانات ارتفاع آب داخل سرچ تانک تا میرا شدن کامل آن ادامه می یابد. هرچند که مدت زمان بیشتری طول می کشد تا موجهای مربوط به لوله مسی میراشده و از بین بروند. تفاوت بین این زمان هم به جنس لوله ها و

بسیار بیشتری را در ارتفاع موج در ابتدای لوله سرچ تانک به همراه افزایش زیاد تعداد نوسانات جریان تا زمان لازم برای میرا شدن جریان می توان نتیجه گرفت. تقریباً تعداد 10 نوسان مشاهده می شود در حالیکه برای قطر کوچکتر در آزمایش قبلی تنها 6 نوسان و برای قطر کوچکتر از آن نیز تعداد تقریبی 3 نوسان مشاهده می شود.



شکل 7 تغییرات هد استاتیک از زمان بسته شدن شیر برای آزمایش مرحله 6

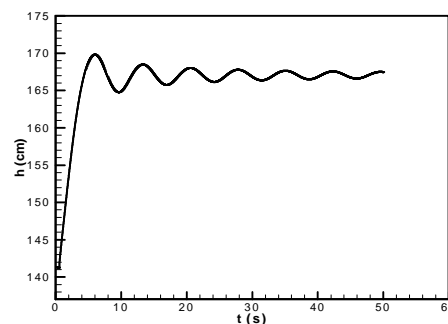
5- بررسی نتایج نرم افزار

مقایسه بین نتایج تجربی و عددی در شکل 8 نشان داده شده است. از آنجا که عدم قطعیت نتایج تجربی یک جزء جداناپذیر از نتایج است و همچنین نتایج عددی دور از خطا نیست، می توان دریافت که نتایج تجربی و عددی همخوانی خوبی با یکدیگر دارند. لازم به ذکر است که با کاهش زمان بسته شدن شیر می توان ضربه قوچ بسیار قوی تری را مدل کرد. به عبارتی دیگر در آزمایشهای تجربی سعی شده است تا زمان بسته شدن شیر 0/1 ثانیه باشد و از آنجاییکه دقت زمان سنس نیز 0/1 ثانیه است، مشخص می شود که در واقعیت میتوان بین 0 تا 0/2 ثانیه زمان بسته شدن شیر را در نظر گرفت و این دو عدد می توانند بر نتایج حل عددی تأثیر بسزایی داشته باشند.

6- جمع بندی و نتیجه بندی

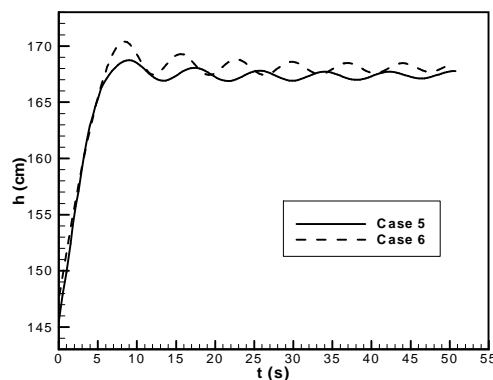
در این پژوهش بر روی پدیده ضربه قوچ به دو روش آزمایشگاهی و شبیه سازی نرم افزاری تحقیق شد. جمع بندی نتایج این پژوهش نشان داد که با بسته شدن شیر، سرعت سیال در لوله صفر شده و یک موج در مسیر خط لوله شکل می گیرد که با حرکت رفت و برگشتی در طول خط لوله به مرور میرا می شود. در ابتدای بستن شیر، فشار استاتیک تا حد زیادی افزایش یافته و در پایان آزمایش به مقدار نهایی خود که از مقدار اولیه کمتر است می رسد. سرعت حرکت سیال در ابتدای بستن شیر مقدار قابل توجهی بوده و پس از طی زمان با میرا شدن موج، سرعت به مقدار قابل توجهی افت کرده و به مقدار بسیار ناچیز و صفر می رسد. در این تحقیق قطر لوله را برای بازه 11/98 میلی متر تا 21 میلی متر مورد بررسی قرار گرفت که نتایج نشان دادند افزایش قطر لوله منجر به افزایش دبی شده و به دنبال خود سرعت سیال در خط لوله بیشتر می شود. اثر ضربه قوچ قوی نیز با افزایش قطر شدیدتر می گردد. این پدیده نشان می دهد تأثیر افزایش سرعت سیال نسبت به اثر قطر بیشتر است. از دیگر عواملی که بر این پدیده دخیل هستند، زمان باز و بسته شدن شیر بوده طوریکه هر چه شیر سریعتر بسته شود، ضربه قوچ قویتری نیز بوجود خواهد آمد. در حالی که شیر سریع بسته شود، سرعت موج بیشتر بوده و در نتیجه ارتفاع بیشتری را می تواند درون سرج تانک ببیند. در نتیجه فشار ایجاد شده ناشی از آن بیشتر از حالتی که است که شیر آهسته بسته شود. لذا سرعت بستن شیر یکی از عوامل مهم در کنترل ضربه قوچ بوده و در مکان هایی که دبی سیال و هد آن زیاد باشد، از تجهیزات مربوط به کاهش سرعت بستن شیر به منظور افزایش زمان بسته شدن آن استفاده می کنند. با بسته شدن آهسته شیر، جریان سریعتر میرا می شود. ولی بسته شدن سریع، نیاز به زمان بیشتری برای میرا شدن انرژی موج درون سیستم دارد. در قطرهای مساوی لوله های پنج لایه و پی وی سی شدت ضربه قوچ مقدار کمتری در مقایسه با لوله های برنجی، مسی و فولادی دارد. هرچه مدول الاستیسیته لوله بیشتر باشد، مقاومت لوله در برابر فشارهای داخلی بیشتر شده و اتلاف انرژی کمتری رخ می دهد. به عبارتی دیگر، سرعت موج در سیال بیشتر شده و در نتیجه تغییرات ارتفاع آب درون سرج تانک نیز افزایش می یابد. ضخامت لوله نیز از دیگر پارامترهایی است که بر سرعت موج و در نتیجه تغییرات ارتفاع آب درون سرج تانک تأثیر می گذارد. در حالت کلی با افزایش ضخامت، لوله تغییر شکل

ضخامت آنها برمی گردد. هرچه مدول الاستیسیته لوله بیشتر باشد، مقاومت لوله در برابر فشارهای داخلی بیشتر شده و اتلاف انرژی کمتری رخ می دهد. به عبارتی دیگر، سرعت موج در سیال بیشتر شده و در نتیجه تغییرات ارتفاع آب درون سرج تانک نیز افزایش می یابد. ضخامت لوله نیز از دیگر پارامترهایی است که بر سرعت موج و در نتیجه تغییرات ارتفاع آب درون سرج تانک تأثیر می گذارد. در حالت کلی با افزایش ضخامت، لوله تغییر شکل کمتری در مقابل افزایش فشار ناگهانی داشته و در نتیجه اضمحلال انرژی کمتری رخ می دهد. به همین دلیل موجهای قویتری در لوله ایجاد شده و منجر به افزایش ارتفاع زیاد آب درون سرج تانک می شوند.



شکل 10 تغییرات ارتفاع آب در سرج تانک برای آزمایش مرحله 4

تغییر ارتفاع در سرج تانک در شکل 11 برای هندسه پنجم و ششم ترسیم شده است. نتایج نشان می دهند که افزایش قطر لوله منجر به افزایش دبی شده و به دنبال خود سرعت سیال در خط لوله بیشتر می شود. اثر ضربه قوچ قوی نیز با افزایش قطر شدیدتر می گردد.



شکل 11 تغییرات ارتفاع آب در سرج تانک مربوط به آزمایش های مرحله 5 و مرحله 6

کمتری در مقابل افزایش فشار ناگهانی داشته و در نتیجه اضمحلال انرژی کمتری رخ می‌دهد. به همین دلیل موجهای قوی تری در لوله ایجاد شده و منجر به افزایش ارتفاع زیاد آب درون سرچ تانک می‌شوند.

7- مراجع

- [1] Chen. T, "Optimal boundary control for water hammer suppression in fluid transmission pipelines" , State Key Laboratory of Industrial Control Technology and Institute of Cyber-Systems & Control, Zhejiang University, 2014
- [2] Shawn Batterton, : Water Hammer: An Analysis of Plumbing Systems, Intrusion, and Pump Operation", Master Thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University
- [3] H. Mousavi Jahromi " Hidrolic simulation of water hammer in pipeline with different materials, Chamran University, Ahwaz,Iran,2007 (In Persian)
- [4] Tan Wee Choon, " Investigation of Water Hammer Effect Through Pipeline System", international journal on advanced science Engineering information Technology, 2012 (In Persian)
- [5] M.H. Afshar "optimization of pipeline system with pumps against water hammer" Ab va Fazelab Publication No.64,2008 (In Persian)
- [6] S. Aghakhani " investigation of effective parameters of water hammer in pipes with concrete body" Mechanical Engineering Publication No.78 (In Persian)
- [7] M. Najmaei "Water Hammer" Iran Science and Industry University,1996 (In Persian)