

Investigation of the Behavior 2D of Trapped Air in the Water Conveyance Systems During Rapid Filling or Emptying Process

R. Daneshfaraz¹, S. Dastgiri², B. Ali Nejad³, M. Besharat⁴

1. Prof., Dept. of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Maraghe University, Maragheh, Iran
(Corresponding Author) daneshfaraz@yahoo.com
2. MSc Student in Civil and Hydraulic Structures, Faculty of Engineering, Maragheh University, Maragheh, Iran
3. Assist. Prof., Dept. of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Maragheh University, Maragheh, Iran
4. PhD, Instituto Superior Tecnico, University of Lisbon, Portugal

(Received Nov. 30, 2019 Accepted Feb. 12, 2020)

To cite this article:

Daneshfaraz, R., Dastgiri, S., Ali Nejad, B., Besharat, M. 2020. "Investigation of the behavior 2D of trapped air in the water conveyance systems during rapid filling or emptying process" Journal of Water and Wastewater, 31(4),156-171. Doi: 10.22093/wwj.2020.209875.2908. (In Persian)

Abstract

The trapped air in the water conveyance systems may cause the obstruction of flow, corrosion and adverse effect on the performance of valves and pumps. This study is part of the Abbas Abad Dam Drinking Water Transmission Line using Ansys Fluent Software, The behavior of air entrapped during the filling and discharging process and the effect of its existence on pressure changes were studied. Entrapped air was simulated at 0.5, 2, 3 m lengths and inlet pressures of 1.2456, 1.7456 and 2.2456 atmospheres for a 35-meter-long metal pipe with a discharge valve embedded in its outlet end. The effects of pressure-time changes were investigated in two ways: a) pressure changes in the pipe and drain valve and b) pressure changes inside the entrapped air. The results showed that the pressure changes in both cases were due to the large fluctuations in confined air and that the fluctuations continued until the drain valve was fully opened and the longer the confined air length was, the greater the amplitude and length of the created fluctuations. Modeling with similar boundary conditions without the presence of air indicates no pressure fluctuations. The results of the verification confirm the research results. Besides the Palau et al, 2019 results, calculation of relative error, RMSE and NRMSE were used in order to validate the numerical model results.

Keywords: Trapped Air, Two Phase Flow, Sudden Discharge, Abbas Abad Dam Transmission Line.

مجله آب و فاضلاب، دوره ۳۱، شماره ۴، صفحه: ۱۷۱-۱۵۶

بررسی رفتار دوبعدی هوای محبوس در خطوط انتقال طی فرایند پرشدن و تخلیه ناگهانی با روش عددی

رسول دانشفراز^۱، سعید دستگیری^۲، بابک علی نژاد^۳، محسن بشارت^۴

- ۱- استاده، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه مراغه، مراغه، ایران
(نویسنده مسئول) daneshfaraz@yahoo.com
۲- دانشجوی کارشناسی ارشد عمران آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه مراغه، مراغه، ایران
۳- استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه مراغه، مراغه، ایران
۴- دکترای سازه‌های هیدرولیکی، دانشگاه لیسبون، پرتغال

(دریافت ۹۸/۹/۹ پذیرش ۹۸/۱۱/۲۳)

برای ارجاع به این مقاله به صورت زیر اقدام فرمایید:

دانشفراز، ر.، دستگیری، س.، علی نژاد، ب.، بشارت، م.، ۱۳۹۹، "بررسی رفتار دوبعدی هوای محبوس در خطوط انتقال طی فرایند پرشدن و تخلیه ناگهانی با روش عددی" مجله آب و فاضلاب، ۳۱(۴)، ۱۷۱-۱۵۶.
Doi: 10.22093/wwj.2020.197239.2908

چکیده

هوای محبوس در سیستم لوله‌های انتقال آب می‌تواند باعث انسداد جریان، ایجاد خوردگی، تأثیر منفی بر عملکرد شیرآلات و پمپ‌ها شود. بنابراین در این پژوهش بخشی از خط انتقال آب شرب سد عباس‌آباد با استفاده از نرم‌افزار انسیس فلونت، رفتار هوای محبوس طی فرایند پرشدن و تخلیه ناگهانی و بررسی تأثیر وجود آن بر تغییرات فشار بررسی شد. هوای محبوس با طول‌های ۰/۵، ۲، ۳ متر و فشار ورودی برابر ۱/۲۴۵۶، ۱/۷۴۵۶ و ۲/۲۴۵۶ اتمسفر برای لوله‌ای به طول ۳۵ متر از نوع فلزی که شیر تخلیه در منتهی‌الیه خروجی آن تعبیه شده بود شبیه‌سازی شد. تأثیر تغییرات فشار-زمان به دو شیوه (۱) تغییرات فشار در بدنه لوله و شیر تخلیه و (۲) تغییرات فشار داخل هوای محبوس بررسی شد. نتایج نشان داد که تغییرات فشار در هر دو حالت به دلیل وجود هوای محبوس با نوسانات بسیار زیادی توأم بود و این نوسانات تا باز شدن کامل شیر تخلیه ادامه داشت و هر اندازه طول هوای محبوس بزرگ‌تر باشد دامنه و طول نوسانات ایجاد شده بیشتر خواهد بود. مدل‌سازی با شرایط مرزی مشابه و بدون حضور هوا نشان‌دهنده عدم وجود نوسانات فشاری است. برای صحت‌سنجی نتایج مدل عددی، از نتایج (Palau et al., 2019) و محاسبه درصد خطای نسبی و شاخص‌های RMSE, NRMSE استفاده شد.

واژه‌های کلیدی: هوای محبوس، جریان دو فازی، تخلیه ناگهانی، خط انتقال سد عباس‌آباد

۱- مقدمه

سیستم می‌شود و این موضوع می‌تواند حتی باعث ترکیدگی لوله شود. از عوامل تأثیرگذار بر ایجاد هوای محبوس مجاری خالی، ورودی آزاد جریان به لوله‌ها و تونل‌ها، سرعت زیاد جریان ورودی و ایجاد فشار منفی در اثر جدایی ستون آب اشاره می‌شود. حضور حباب هوا در سیستم‌های لوله‌ای یک مشکل کاربردی است که به علت فقدان دانش طراحی، عملی و خرابی تجهیزات اتفاق می‌افتد.

یکی از موارد بسیار مهم در خطوط انتقال آب، بررسی رفتار هوای محبوس است. این هوا می‌تواند باعث انسداد جریان، ایجاد خوردگی، تأثیر منفی بر عملکرد شیرآلات و پمپ‌ها شود. تا زمانی که جریان تحت فشار نباشد آسیب چندانی به خطوط وارد نمی‌کند ولی به محض افزایش فشار و پر شدن کامل مقطع باید این هوا تخلیه شود که عدم خروج آن موجب تجمع و ایجاد فشار در

باعث شکست لوله شود (Abreu et al., 1999, Gorman et al., 2018, Izquierdo et al., 1999, Zhou and Liu, 2013). مقابل، فرایند تخلیه با گسترش یک حباب هوا که فشار زیر اتمسفر را ایجاد می‌کند که این پدیده، می‌تواند باعث خم شدن لوله شود (Coronado-Hernández et al., 2017, Fuertes-Miquel et al., 2019). همچنین فرایندهای پر کردن و تخلیه توسط چندین پژوهشگر با استفاده از مدل‌های اینرسی به شرح زیر بررسی شد: ۱- تحلیل نفوذ جابه‌جایی هوا در طول فرایند پر شدن (Zhou et al., 2013) - ۲ محاسبه فرایند پر کردن با نادیده گرفتن کشش سطحی لوله و آب (Izquierdo et al., 1999) - ۳ بررسی فرایند پر کردن لوله با توجه به تأثیر محل تخلیه (Wang et al., 2016) - ۴ محاسبه افت فشار زیر اتمسفر در فرایند تخلیه لوله آب (Coronado-Hernández et al., 2017).

با توجه به مدل‌های CFD، برخی از برنامه‌های کاربردی مانند تجزیه و تحلیل پر شدن لوله با حباب‌های هوا ارائه شده است (Zhou et al., 2011) همچنین نشان دادن حداکثر مقدار افزایش فشار طی فرایند پر شدن سریع در یک لوله توسط (Martins et al., 2017). بررسی شد. با افزایش درصد هوای داخل سیستم، فشار ابتدا تا حدی افزایش می‌یابد و بعد از آن با ادامه افزایش درصد هوا، فشار شروع به کاهش یافتن می‌کند. همچنین فشارهای بیشینه در هوای حدود ۱۸/۶ درصد اتفاق می‌افتد (Zhou et al., 2011). در شرایط جریان گذر رفتار خطوط انتقال آب بر اساس مشخصات آنها تغییر می‌کند.

در خطوط انتقال آب بوکان و پیرانشهر فشار با یک فشارسنج حساس و سریع اندازه‌گیری شد. شبیه‌سازی با استفاده از نرم‌افزار بنتلی‌همر^۲ انجام شد. افت اصطکاک با روش‌های مختلف محاسبه شد. نتایج نشان داد که روش ناپایدار ویتکوفسکی در مقایسه با سایر روش‌ها، حداقل خطا را دارد (Khosfetrat et al., 2018).

در این پژوهش، کاربرد مدل فلوئنت^۳ برای شبیه‌سازی فرایند پر شدن و تخلیه ناگهانی در یک لوله نشان داده شده است. این پژوهش به واسطه شبیه‌سازی‌های مختلف عددی، امکان مقایسه و بررسی رفتار پارامتر فشار را با حضور هوای محبوس و بدون حضور هوای محبوس در خط انتقال لوله را با طول‌های مختلف

به این دلیل وجود حباب هوا ممکن است به پیامدهای زیان‌آور منجر شود (Besharat et al., 2016). این مسئله در اکثر موارد در شبکه‌های توزیع آب، سیستم‌های آتش‌نشانی، زهکشی و فاضلاب سیستم‌ها، تونل‌ها، سیفون‌ها و شبکه‌های آب شهری رخ می‌دهد (Laanearu et al., 2012). هوا می‌تواند به علت افت فشار یا غوطه‌ور شدن ناکافی در یک خط انتقال ظاهر شود. پر کردن سیستم‌های لوله نیز منبع دیگر تجمع هوا است. در طول این فرایند، اگر هوا به طور کامل تخلیه نشود، حجم هوا در پایین دست انباشته می‌شود. این هوا در یک خط لوله وارد شده می‌تواند باعث مشکلات مختلفی از جمله ظاهر شدن فشار زیر اتمسفر، اختلال در رژیم جریان، کاهش کارایی پمپ و توربین، خستگی یا شکست لوله، تغییرات در خواص هیدرولیکی مایع و آلودگی محیط زیست شود (Escarameia, 2007, Laanearu et al., 2012, Ramezani et al., 2016).

تأثیر حباب هوا بر کاهش فشار مایعات در خطوط انتقال توسط اسکارامیا بررسی شد (Escarameia, 2007). استفاده از مدل‌های دو بعدی و سه بعدی برای بررسی موارد پر شدن سریع خطوط انتقال توسط ژو و همکاران انجام شد (Zhou et al., 2011). همچنین جنبه‌های مختلف هوای محبوس در فرایند پر شدن خط انتقال از آب با استفاده از مدل ۳ بعدی در دینامیک سیالات محاسباتی^۱ توسط مارتینز و همکاران انجام شد (Martins et al., 2017).

طبق مشاهدات، هوای محبوس در لوله‌ها بسیار خطرناک و خسارت آن در اکثر موارد شدید است. جریان گذر در سیستم‌های خطوط انتقال آب می‌تواند با استفاده از مدل‌های جریان مختلف بسته به نوع رفتار، سیر تحول، نحوه پیدایش، پیچیدگی محاسبات و شرایط مرزی بررسی شود. به این ترتیب، دو گروه از مدل‌های جریان شناسایی می‌شوند: ۱- مدل‌های اینرسی که با در نظر گرفتن اینرسی آب برای تحلیل وضعیت جریان گذر در سیستم استفاده می‌شود (Abreu et al., 1999) - ۲- مدل‌های CFD که می‌توانند پدیده‌های دو بعدی و سه بعدی را تحلیل کنند. فرایند پر کردن خط لوله با فشرده‌سازی حباب هوا نشان داد که باعث تولید نقاط بیشینه فشار مطلق می‌شود که می‌تواند با توجه به رده مقاومت فشاری لوله،

² Bentley Hammer

³ Fluent Model

¹ Computational Fluid Dynamics (CFD)

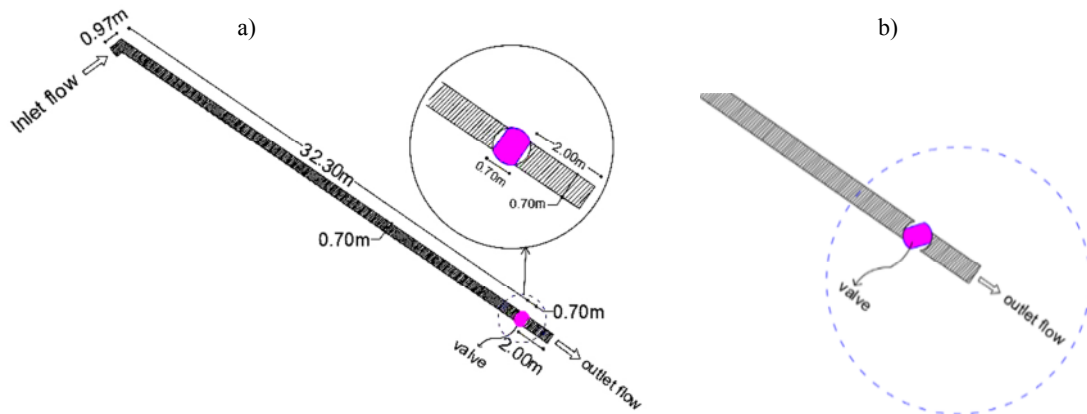


Fig. 1. a) Geometric properties of the simulated tube b) Valve rotation

شکل ۱- a) مشخصات هندسی لوله شبیه‌سازی شده (b) نحوه چرخش شیر

چنانچه اشاره شد هدف پژوهش حاضر بررسی رفتار هوای محبوس طی فرایند پر شدن و تخلیه ناگهانی بخشی از خط انتقال سد عباس‌آباد به شهرستان بانه با روش عددی بود. بنابراین شبیه‌سازی لوله فلزی با قطر خارجی ۷۰۰ میلی‌متر و طول ۳۵ متر با در نظر گرفتن شیر تخلیه در منتهی‌الیه خروجی لوله انجام شد. شکل ۱ بیانگر مشخصات هندسه مدل شبیه‌سازی است که قسمت هاشورزده با رنگ سیاه، معرف بخش لوله و رنگ بنفش نشان‌دهنده شیر تخلیه است. در ابتدای شبیه‌سازی شیر تخلیه در حالت بسته (عمود بر مسیر جریان) قرار دارد و با گذشت زمان شیر تخلیه باز (در راستای مسیر جریان) است.

چرخش شیر تخلیه با تعریف فایل UDF^۳ قابل انجام بود که با کدنویسی و به‌دست آوردن سرعت زاویه‌ای انجام شد. سطوح هندسه به سه دسته شامل بدنه اصلی لوله، شیر تخلیه و قسمت انتهایی لوله پس از شیر تخلیه و برای هر ۳ سطح فاز مایع انتخاب شد. برای محاسبه سرعت زاویه‌ای از معادله ۲ استفاده شد

$$\omega = \frac{\theta}{t} \quad (2)$$

که در آن

θ معرف زاویه دوران بر حسب رادیان و t زمان چرخش بر حسب ثانیه است. در این پژوهش برای تخلیه ناگهانی زمان $t=0.3$ s و زاویه چرخش $\theta = \frac{\pi}{2}$ رادیان در نظر گرفته شد.

ارائه شده است. وجه تمایز این پژوهش با مطالعات مشابه قبلی بررسی موضوع از دو جنبه هم‌زمان پر شدن و تخلیه ناگهانی است. بررسی تأثیر ابعاد هوای محبوس ایجاد شده در سیستم و تغییرات فشار اولیه ورودی بر این فرایند، استفاده از داده‌های واقعی یک پروژه خط انتقال به ندرت در پژوهش‌های قبلی دیده می‌شود.

۲- مواد و روش‌ها

حل دقیق معادلات ناویراستوکس^۱ به‌جز در موارد محدود، اغلب ممکن نیست، بنابراین در بسیاری از پدیده‌های هیدرولیکی، حل عددی معادلات ناویراستوکس توسط پژوهشگران بررسی می‌شود (Daneshfaraz et al., 2018). در این پژوهش از نرم‌افزار آنسیس فلوئنت^۲ برای شبیه‌سازی و گسسته‌سازی میدان حل استفاده شد. شکل کلی معادلات ناویر استوکس برای راستاهای x ، y و z به‌صورت زیر است (Daneshfaraz, 2013)

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = -\frac{\partial P}{\partial x} + \mu \left(u \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + v \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + w \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) + \rho g_x \quad (1)$$

$$\rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) = -\frac{\partial P}{\partial y} + \mu \left(u \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + v \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + w \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) + \rho g_y$$

$$\rho \left(\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = -\frac{\partial P}{\partial z} + \mu \left(u \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + v \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + w \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) + \rho g_z$$

¹ Navir-Stokes Equation

² Ansys Fluent

³ User Defined Function (UDF)

بر اساس طراحی پروژه انتقال آب سد عباس آباد دبی ورودی خط لوله برابر ۵۱۲ لیتر در ثانیه با فشار ورودی خط انتقال پس از حوضچه آرامش ۱ الی ۲ بار است. برای محاسبه فشار ورودی در شبیه سازی با استفاده از معادله هیزن ویلیامز، افت فشار محاسبه شد

$$h_f = 1.212 \times 10^{10} \times L \times \left(\frac{Q}{C}\right)^{1.852} \times D^{-4.87} \quad (3)$$

که در آن

L طول بر حسب متر، Q دبی بر حسب لیتر بر ثانیه، h_f مقدار افت انرژی بر حسب متر، C ضریب زبری (برای لوله های فولادی برابر ۱۱۰ است) و D قطر داخلی لوله بر حسب میلی متر است.

در شکل ۳ مش بندی مثلثی با سطح ۰/۰۳ متر و مش بندی لایه مرزی در دیواره ها نشان داده شده است. در این پژوهش قطر خارجی لوله فولادی مسیر خط انتقال ۷۰۰ و قطر داخلی ۶۷۰ میلی متر بود. همچنین برای محاسبه شرایط مرزی از چهار نقطه زیر استفاده شد:

نقطه ابتدای خط انتقال (A)

نقطه ابتدای هندسه شبیه سازی (B)

نقطه انتهای هندسه شبیه سازی (C)

نقطه انتهای خط انتقال (D)

فاصله بین نقطه A و B برابر ۸۱۰۰ متر، نقطه B تا C برابر ۳۵ متر (طول لوله شبیه سازی)، نقطه C و D برابر ۳۵۰۰ متر بود. فشار ورودی در ابتدای خط انتقال برابر ۱ bar در نظر گرفته شد. بنابراین برای به دست آوردن فشار در نقطه B مقدار افت فشار بین نقطه A

برای بیشتر شدن دقت شبیه سازی مش بندی مستطیلی برای لایه های مرزی در دیواره ها و مش مثلثی برای سایر قسمت های مدل استفاده شد. سایز مش بندی مثلثی با سطح ۰/۰۳ متر مربع برای هر سلول مش و تعداد ۱۲ لایه مرزی در دیواره ها انتخاب شد (Besharat et al., 2018, Palau et al., 2019). برای مشخص شدن دقت و تأثیر مش بندی، ۵ نوع سایز بررسی شد که نتایج آن مطابق جدول ۱ ارائه شده است.

نمودار تغییرات فشار- زمان برای مش بندی با سطح ۰/۰۳، ۰/۰۶ و ۰/۰۹ متر مربع در شکل ۲ ارائه شده است. با دقت در این نمودار ملاحظه می شود که کوچک شدن سطح مش ها، یعنی مش ۰/۰۳ تغییرات و نوسانات بسیار جزئی تری نسبت به مش سطح ۰/۰۹ را نشان می دهد.

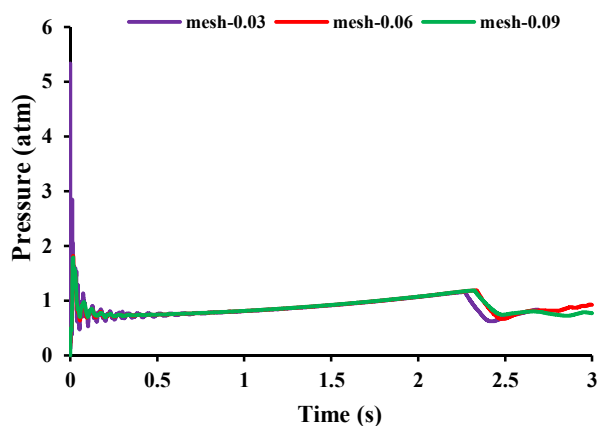


Fig. 2. Pressure variations time of the tests performed for mesh sizes of 0.03, 0.06 and 0.09

شکل ۲- تغییرات فشار- زمان آزمون های انجام شده برای سایز مش های ۰/۰۳، ۰/۰۶، ۰/۰۹

جدول ۱- مشخصات آزمون های انجام شده برای بررسی دقت و تأثیر مش بندی

Table 1. Characteristics of tests performed to evaluate the accuracy and effectiveness of milling

The mesh size for the surface of each cell	Description
0.3	The simulation was accompanied by an error message due to the large size of the mesh and the lack of convergence of results
0.03	The simulation was performed and solved with convergence of results
0.003	Simulation in several stages was accompanied by an error message that the results could not be converged due to the large number of meshes
0.06	The simulation was performed without error message and the solution was associated with convergence of results
0.09	The simulation was performed without error message and the solution was associated with convergence of results

جدول ۲- مشخصات آزمون‌های انجام شده
Table 2. Specifications of tests performed

Test number	Test specifications								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
The length of the trapped air (M)	3	3	3	2	2	2	0.5	0.5	0.5
Input pressure (atm)	1.2456	1.7456	2.2456	1.2456	1.7456	2.2456	1.2456	1.7456	2.2456

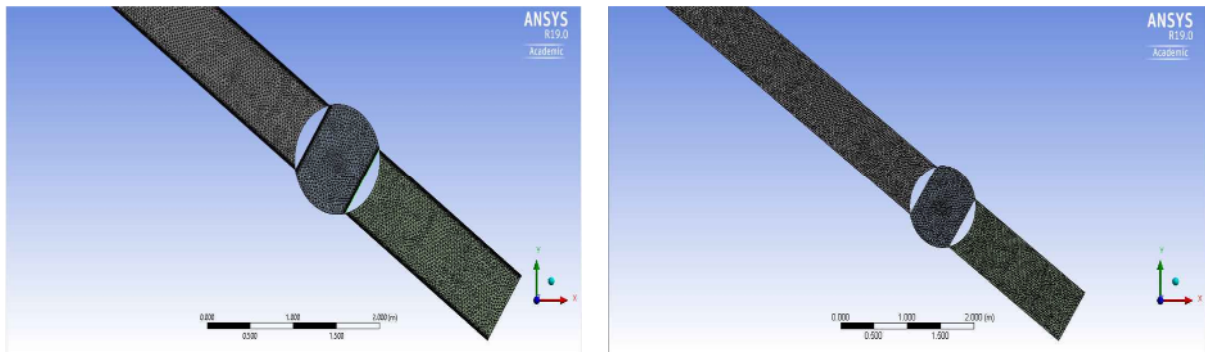


Fig. 3. a) Triangular meshing with a surface of 0.03 m, b) Boundary layer meshing on the walls
 شکل ۳- (a) مش بندی مثلثی با سطح ۰/۰۳ متر، (b) مش بندی لایه مرزی در دیواره‌ها

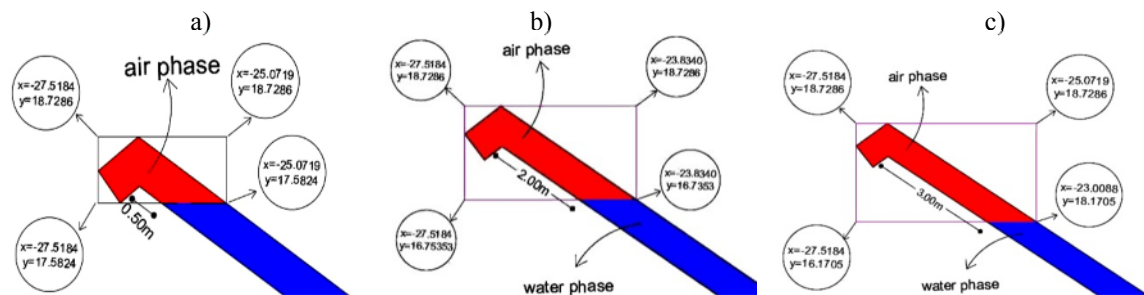


Fig. 4. Four-phase coordinates of the air phase, a) 3 m air length, b) 2 m air length, c) 0.5 m air length
 شکل ۴- مختصات چهار گوشه فاز هوا، (a) طول هوای ۳ متر، (b) طول هوای ۲ متر، (c) طول هوای ۰/۵ متر

در این شبیه‌سازی، از نسخه دانشگاهی^۱ و ورژن شماره ۱۹ نرم‌افزار انسیس فلوئنت و برای حل معادلات مرتبط بین فشار، سرعت و چگالی از حل کننده مبتنی بر فشار گذرا^۲ استفاده شد و برای حل هم‌زمان معادلات فشار- سرعت، مدل PISO^۳ تعیین و گسسته‌سازی با استفاده از روش حجم محدود^۴ انجام شد. مدل چند فاز برای گسسته‌سازی به همراه مدل آشفتگی $k-\epsilon$ realizable استفاده شد. از گزینه enhanced wall treatment اعمال محاسبات

و B با استفاده از معادله ۳ مقدار ۲۹/۲۳۵ متر محاسبه شد. برای بقیه نقاط نیز مقدار افت فشار از معادله انرژی محاسبه و همچنین مشخصات شرایط مرزی و طول هوای فرض شده در ۹ آزمون در جدول ۲ ارائه شد

$$\frac{p_1}{\rho g} + z_1 + \frac{v_1^2}{2g} = \frac{p_2}{\rho g} + z_2 + \frac{v_2^2}{2g} + h_f \quad (4)$$

موقعیت قرارگیری فاز هوا در طول‌های ۰/۵، ۲، و ۳ متر با استفاده از مختصات ۴ گوشه فاز هوا تعیین شده است. در شکل ۴ مختصات محل قرارگیری فاز هوا مدل شبیه‌سازی شده، نشان داده شده است.

¹ Academic
² Transient pressure-based
³ Pressure-Implicit with Spilitting of Operators (PISO)
⁴ Volume of Fluid (VOF)

برای بررسی دقت صحت‌سنجی، درصد خطای نسبی از معادله ۵ محاسبه شد

$$\Sigma Er = \frac{X_B - X_S}{X_B} \times 100 \quad (5)$$

که در آن

X_B داده‌های واقعی در این پژوهش و X_S داده‌های صحت‌سنجی است. همچنین شاخص‌های RMSE, NRMSE جزء شاخص‌های آماری برای محاسبه جذر میانگین مربع خطای نرمال شده و مجذور میانگین مربعات است، معادله ۶ و ۷ ارتباط این دو شاخص را نشان می‌دهند

$$NRMSE = \frac{RMSE}{X_{max} - X_{min}} \quad (6)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \hat{x}_i)^2} \quad (7)$$

نتایج درصد خطای نسبی و شاخص‌های RMSE, NRMSE در جدول ۳ ارائه شده است.

۳- نتایج و بحث

در این پژوهش ۹ آزمون مطابق جدول ۲ انجام و کانتورهای حجمی فاز هوا و آب شبیه‌سازی شد. در این کانتورهای رنگ قرمز معرف فاز هوا و رنگ آبی، فاز آب است با گذشت زمان و باز شدن تدریجی شیر تخلیه فاز آب تخلیه و کل حجم لوله را فاز هوا فرا می‌گیرد. به‌عنوان نمونه به ترتیب کانتورهای فاز حجمی هوا و فشار برای آزمون ۱ در شکل ۶ ارائه شده است.

نزدیک به دیواره‌ها و مدل PRESTO برای گسسته‌سازی فشار استفاده شد (Besharat et al., 2018). همچنین گام زمانی برای شبیه‌سازی‌های فوق برابر ۰/۰۰۱ ثانیه در نظر گرفته شد.

۱-۲- صحت‌سنجی

صحت‌سنجی بر اساس مطالعه (Palau et al., 2019) برای مدل ۲ بعدی به‌منظور شبیه‌سازی فشار اتمسفر با هوای محبوس در یک لوله تخلیه انجام شد. در این پژوهش یک لوله به طول مستقیم افقی ۴/۱۶ متر و ۰/۲ متر مسیر قائم که شیر تخلیه‌ای در انتهای آن با ۱۲ درصد بازشدگی با طول هوای محبوس ۰/۲۰۵ متر در نظر گرفته شد.

آزمون شماره ۱ به‌دلیل مشخص نبودن زمان بازشدگی شیر تخلیه، برای زمان‌های ۰/۸، ۰/۲۵، ۰/۱۵، ۰/۱۲، ۰/۱ و ۰/۱ ثانیه شبیه‌سازی شده و نتایج تغییرات فشار- زمان با نتایج پژوهش در شکل ۵ نشان داده شده است.

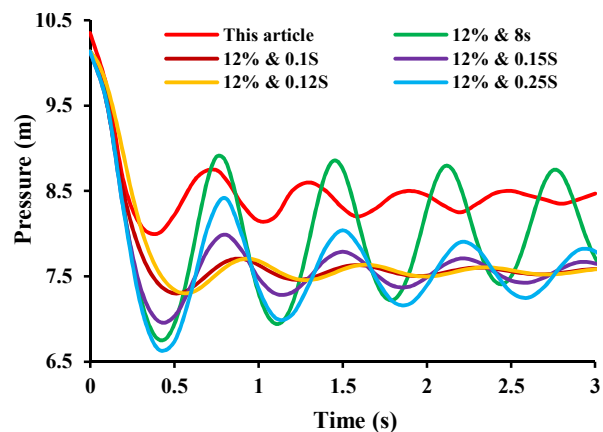


Fig. 5. Test validation No. 1
 شکل ۵- صحت‌سنجی تست شماره ۱

جدول ۳- مشخصات درصد خطای نسبی و شاخص‌های RMSE, NRMSE آزمون‌های انجام شده صحت‌سنجی

Table 3. Relative error percentage characteristics and RMSE and NRMSE indicators of validation tests

Test title	Relative error percentage	RMSE	NRMSE
12% Openness in 0.8 seconds	5.49	0.72	0.408
12% Openness in 0.1 seconds	9.81	0.82	0.71
12% Openness in 0.15 seconds	9.48	0.845	0.786
12% Openness in 0.12 seconds	8.75	0.82	0.499
12% Openness in 0.25 seconds	9.67	0.908	0.697

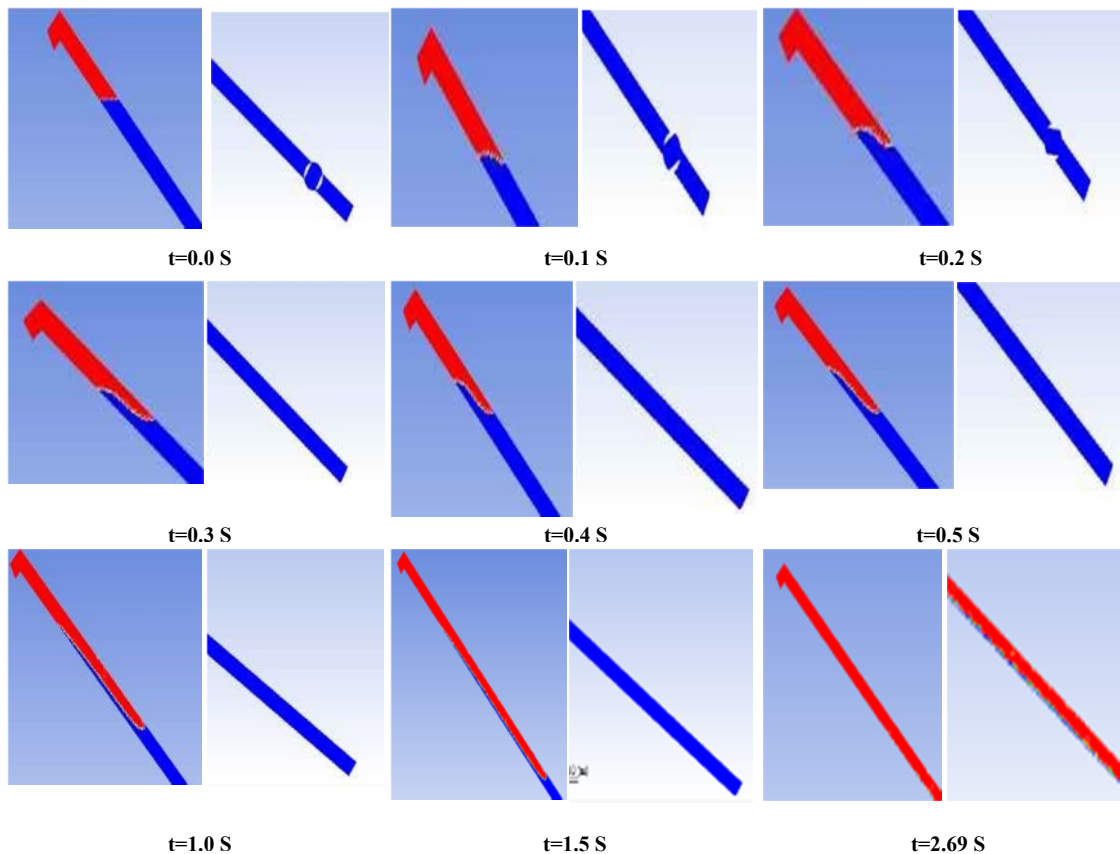


Fig. 6. Volume Air Phase Contours Test No. 1

شکل ۶- کانتورهای فاز حجمی هوا آزمون شماره ۱

در نقطه F هوا در سطح لوله توسعه می‌یابد و جایگزین فاز آب شده است. از نقطه F تا G مربوط به جایگزین شدن هوا با آب چسبیده به دیواره لوله است و در نقطه B حجم آب و هوا برابر هستند. نمودار تغییرات فشار- زمان آزمون ۱ به دو صورت ارائه شده است. ۱- تغییرات فشار در بدنه و شیر تخلیه ۲- تغییرات فشار داخل هوای محبوس. این نمودارها نشان می‌دهد که بر اثر برقراری جریان در خط انتقال، فشار به شدت افزایش می‌یابد و به دلیل بسته بودن شیر تخلیه و وجود هوای محبوس، تا زمان بازشدگی شیر (۳/۰ ثانیه)، فشار کاهش با نوسانات همراه است. در هر دو نمودار نوسانات فشاری به وضوح دیده شد اما این نوسانات در حالت داخل هوای محبوس بسیار مشهودتر بود. در هر دو حالت مشاهده شد که فشار نسبت به زمان میراگشته و کاهش یافت. در مقایسه حالت a با حالت b مشاهده شد که دامنه و طول تغییرات بسیار بزرگتری در حالت a نسبت به حالت b اتفاق افتاد. پس از این مرحله در بدنه لوله و شیر، فشار سیر صعودی را تا زمان تخلیه آب دهانه خروجی

کانتورهای فشار نشان‌دهنده مقدار عددی پارامتر فشار توسط رنگ‌های ایجاد شده در سمت چپ این کانتورها است که امکان بررسی نقطه‌ای پارامتر فشار را فراهم می‌کند. با دقت در کانتورهای فشار مشخص است که در مسیر جریان، مقدار فشار با گذشت زمان افزایش می‌یابد و به سمت پایین دست جریان توسعه می‌یابد (شکل ۷).

نمودار تغییرات حجمی فاز هوا، آب زمان برای آزمون ۱ در شکل ۸ ارائه شده است. این نمودار نشان می‌دهد که حجم کلی فاز هوا و آب موجود در مقطع لوله برابر ۱ واحد در نظر گرفته شده است و حجم هوا و آب موجود در نقطه شروع لوله، به ترتیب برابر ۰/۱۵ و ۰/۸۵ است.

در این شکل فاز آب از نقطه A شروع شده و با گذشت زمان و تخلیه آب به دلیل باز شدن شیر تخلیه، در نقطه C آب از دهانه خروجی لوله تخلیه شده و از نقطه C تا D مربوط به تخلیه کامل آب چسبیده به دیواره لوله‌ها است. فاز هوا از نقطه E شروع می‌شود و

۱/۷۴۵۶ و ۲/۲۴۵۶ اتمسفر انجام شد و نشان داد در صورتی که شبیه‌سازی بدون حضور هوا انجام شود، نمودارهای فشار، رفتار متفاوتی خواهند داشت و نوسانات فشار وجود نخواهد داشت. شکل ۱۰ تغییرات حجمی فاز هوا، آب-زمان و فشار-زمان را نشان می‌دهد.

طی می‌کند و برخلاف آن در داخل هوای محبوس، کاهش فشار به صورت خطی تا زمان تخلیه ادامه می‌یابد. پس از آن به دلیل تخلیه آب در دهانه خروجی تا زمان تخلیه کامل آب چسبیده به دیواره لوله، فشار در هر دو نمودار کاهش پیدا می‌کند (شکل ۹).
 آزمون‌های عدم حضور هوا با فشار ورودی ۱/۲۴۵۶،

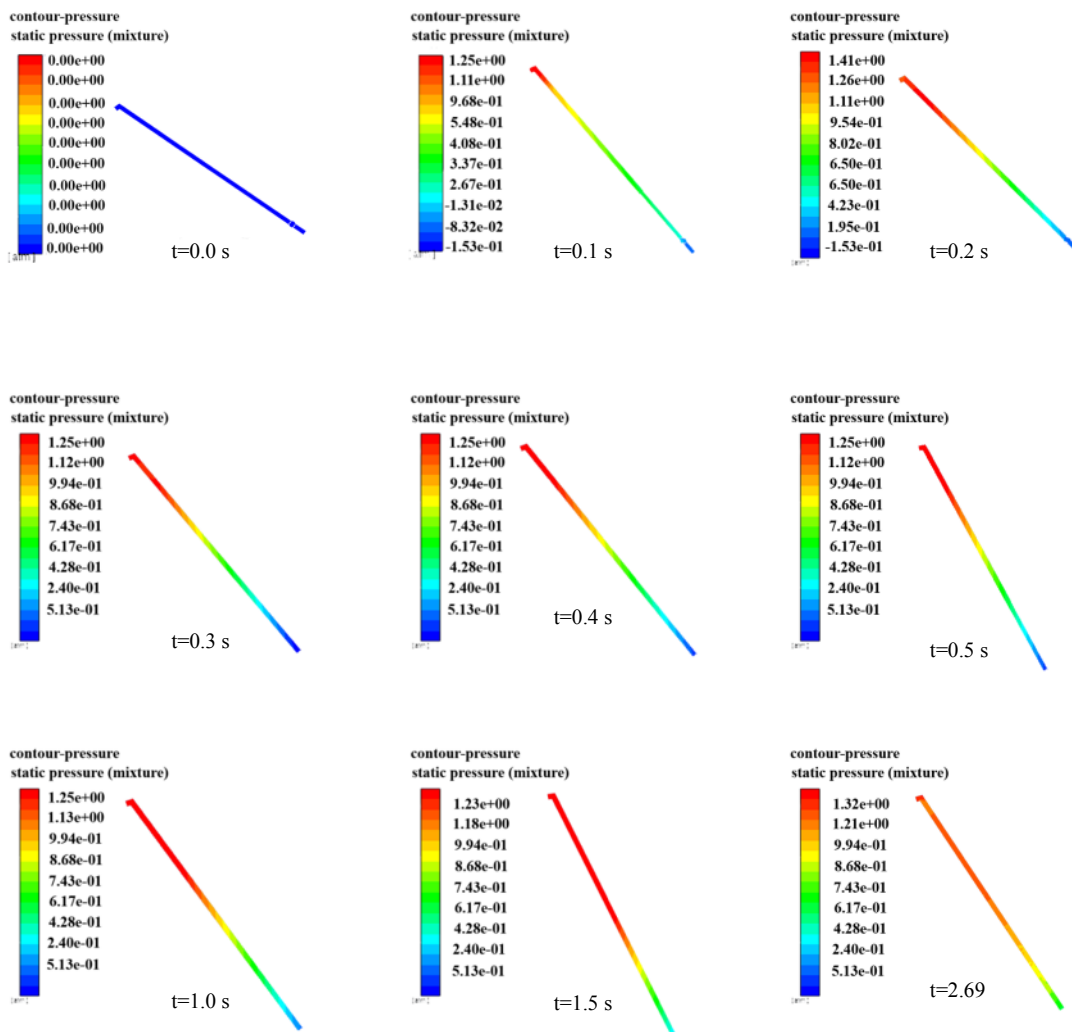


Fig. 7. Test pressure gauges No. 1
 شکل ۷- کانتورهای فشار آزمون شماره ۱

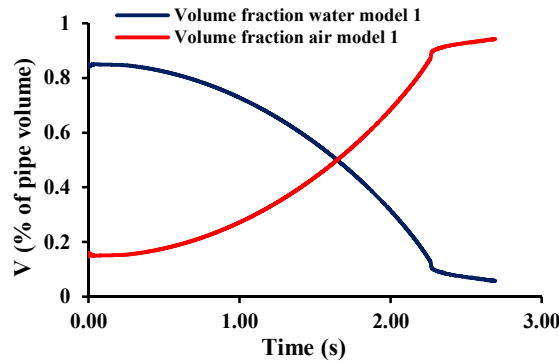


Fig. 8. Volume chart of air phase - time test No. 1

شکل ۸ - نمودار حجمی فاز هوا- زمان آزمون شماره ۱

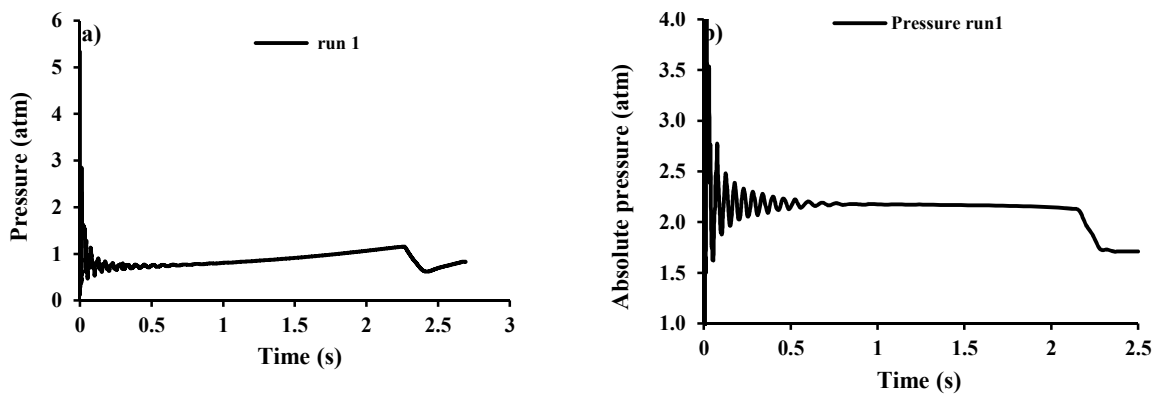


Fig. 9. a) Indoor Air Pressure Changes Test No. 1 b) Pressure Changes in Body and Drain Valve

شکل ۹- (a) تغییرات فشار در بدنه و شیر تخلیه (b) تغییرات فشار داخل هوای محبوس آزمون شماره ۱

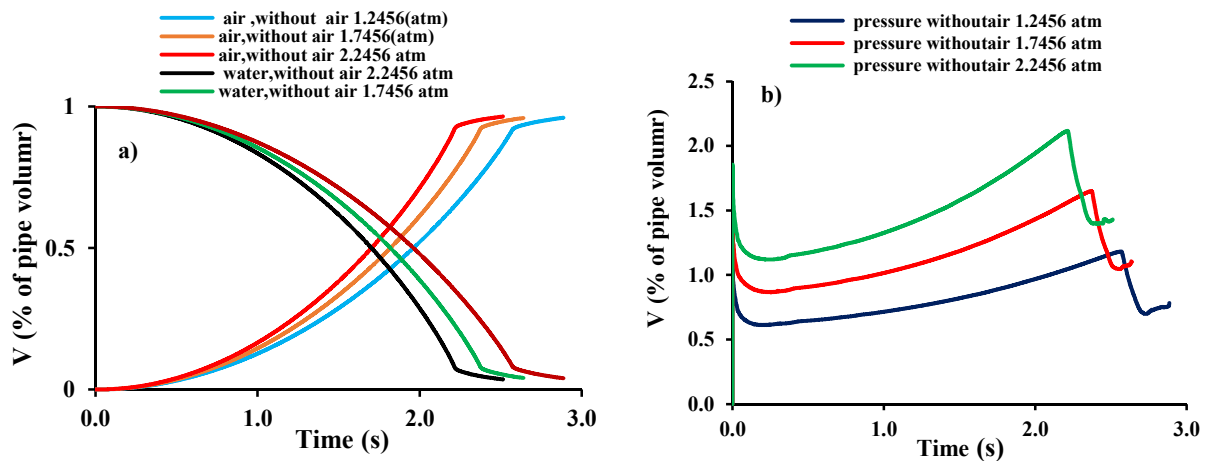


Fig. 10. a) Volume changes of climate phase - time of non-air tests for inlet pressure 1/2456, 1/7456 and 2/2456 atmospheres b) pressure-time changes of no trapped air test

شکل ۱۰- (a) تغییرات حجمی فاز آب و هوا- زمان آزمون‌های عدم حضور هوا برای فشار ورودی ۱/۲۴۵۶، ۱/۷۴۵۶ و ۲/۲۴۵۶ اتمسفر (b) تغییرات فشار- زمان آزمون‌های عدم حضور هوای محبوس

این اختلاف که هر اندازه طول هوای محبوس بیشتر، نوسانات فشاری دارای طول و دامنه بزرگتری هستند و هر اندازه فشار و طول هوای محبوس بیشتر باشد زمان فرایند تخلیه آب در لوله، کمتر است.

مشاهده شد که نمودار تغییرات فشار- زمان در حالت عدم حضور هوا نیز رفتاری شبیه به سایر مدل‌ها داشت با این اختلاف که در این نمودار هیچ نوسانات فشاری دیده نشد و بدیهی است که زمان تخلیه نیز بیشتر خواهد بود.

۲- طول هوای محبوس ثابت و فشار ورودی متغیر باشد. طول هوای محبوس به ترتیب برابر ۲، ۰/۵ و ۳ متر بود. نمودارهای تغییرات فشار- زمان در شکل ۱۲ و ۱۳ ارائه شده است. این نمودارها به دو شیوه استخراج و بررسی شد و ۱- تغییرات فشار در بدنه لوله و شیر تخلیه ۲- تغییرات فشار در داخل هوای محبوس که بیان می‌کنند به دلیل متغیر بودن فشار ورودی نمودارها از هم فاصله می‌گیرند و هر اندازه فشار ورودی بیشتر، نمودار فشار از لحاظ عددی بزرگتر است و زمان فرایند تخلیه کمتر است. نوسانات

شکل ۱۰-a تغییرات فاز حجمی آب، هوا- زمان را نشان می‌دهد که بر اثر عدم وجود هوا نمودار از عدد ۱ برای فاز آب و عدد صفر برای فاز هوا شروع و متناسب با فشار ورودی، زمان تخلیه متفاوت است. هر چه فشار ورودی بیشتر باشد زمان تخلیه کمتر خواهد بود. در شکل ۱۰-b مشاهده شد که در صورت عدم حضور هوا، تغییرات فشار در ابتدا، زیاد شد و به دلیل بسته بودن شیر تخلیه کاهش فشار داشت و پس از آن، فشار به صورت صعودی افزایش یافت و پس از آن در زمان تخلیه کامل آب، به منظور تخلیه آب چسبیده به دیوار، فشار کاهش یافت.

نتایج آزمون‌های ۱ تا ۹ به دو روش دسته‌بندی شد:

۱- فشار ورودی ثابت و طول هوای محبوس متغیر باشد: فشار ورودی آزمون‌های انجام شده به ترتیب برابر ۱/۲۴۵۶، ۱/۷۴۵۶ و ۲/۲۴۵۶ اتمسفر است. تغییرات فشار- زمان در شکل ۱۰ و ۱۱ ارائه و به دو روش استخراج شد: الف) تغییرات فشار در بدنه لوله و شیر تخلیه (ب) فشار در داخل هوای محبوس. به دلیل ثابت بودن فشار ورودی نمودارها در هر دو حالت بر روی هم قرار گرفت با

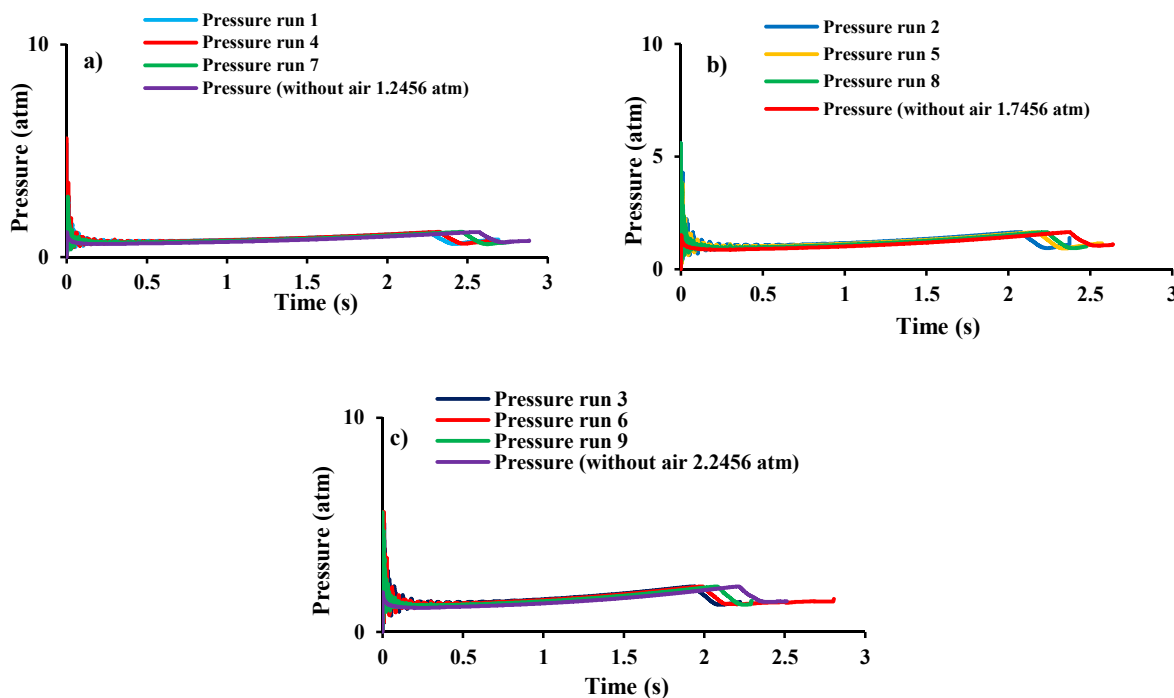


Fig. 11. Pressure-time diagram a) test number 7,4,1 and no air pressure 1.2456 b) test number 8,5,2 and no air pressure 1.7456 c) test number 9,6,3 and no air pressure 2.2456

شکل ۱۱- نمودار فشار- زمان (a) آزمون شماره ۷،۴،۱ و عدم حضور هوا فشار ۱/۲۴۵۶ (b) آزمون شماره ۸،۵،۲ و عدم حضور هوا فشار ۱/۷۴۵۶ (c) آزمون شماره ۹،۶،۳ و عدم حضور هوا فشار ۲/۲۴۵۶

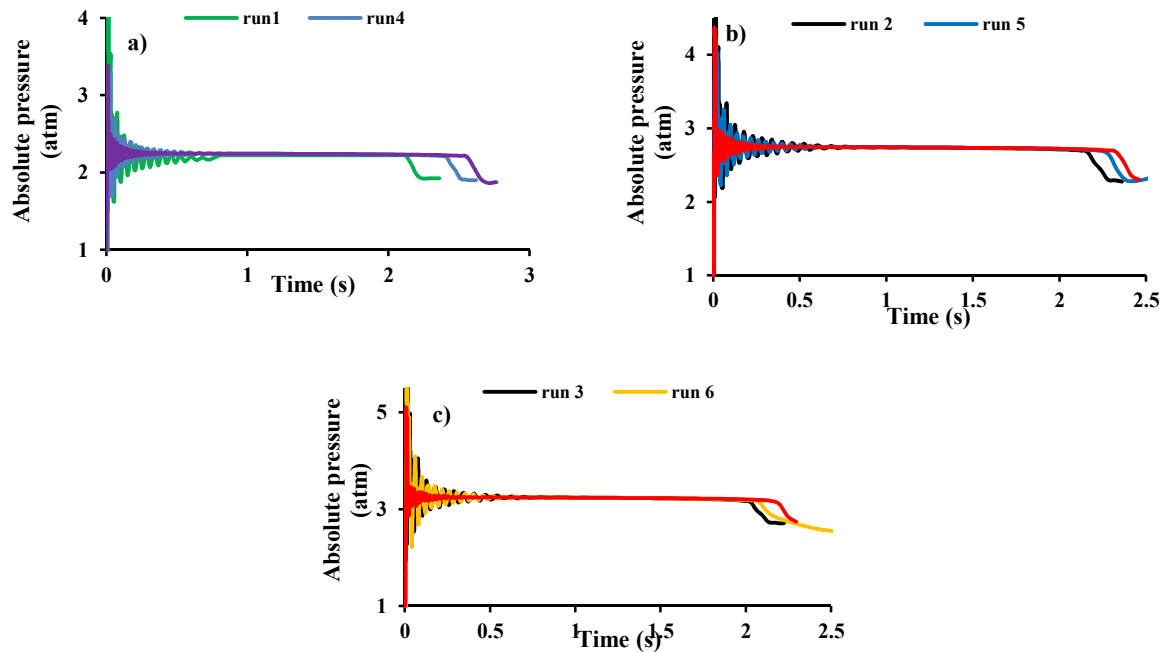


Fig. 12. Pressure-time diagram inside confined air a) test No. 7,4,1 and no air pressure 1.2456 b) test No. 8,5,2 and no air pressure 1.7456 c) test No. 9,6,3 and the absence of air pressure 2.2456

شکل ۱۲- نمودار فشار- زمان در داخل هوای محبوس (a) آزمون شماره ۷،۴،۱ و عدم حضور هوا فشار ۱/۲۴۵۶ (b) آزمون شماره ۸،۵،۲ و عدم حضور هوا فشار ۱/۷۴۵۶ (c) آزمون شماره ۹،۶،۳ و عدم حضور هوا فشار ۲/۲۴۵۶

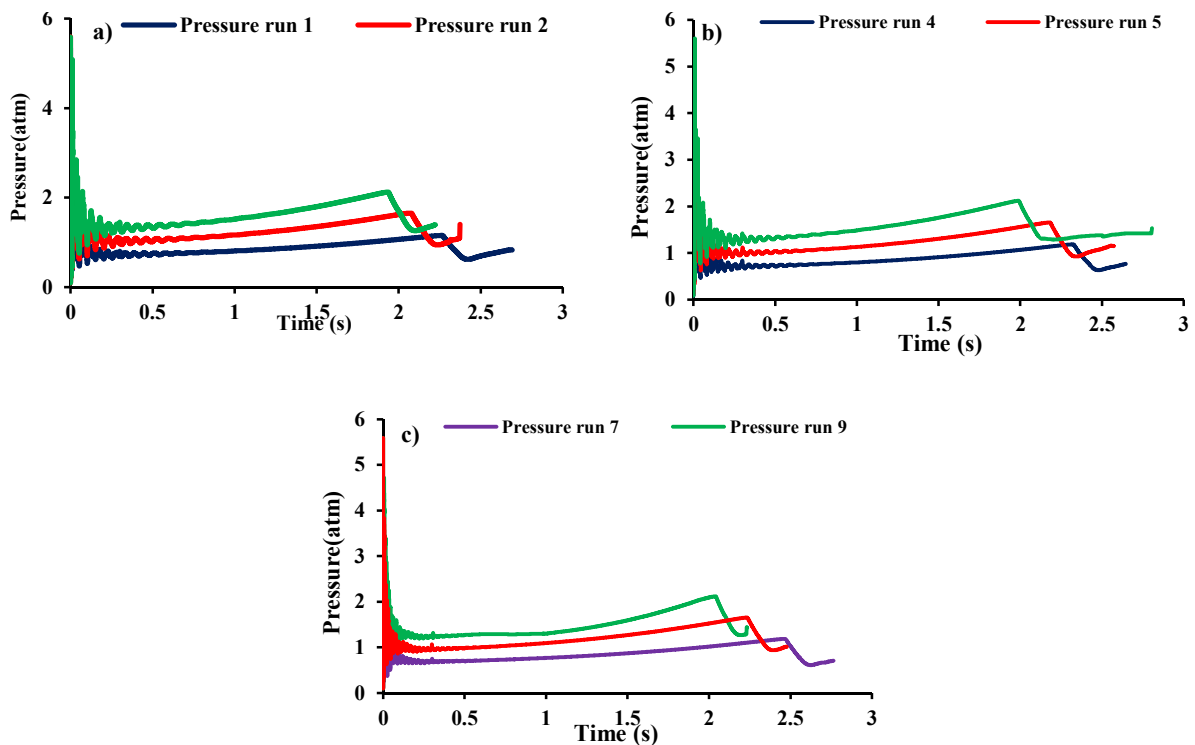


Fig. 13. Pressure-time diagram of the pipe and drain valve a) test number 3,2,1 b) test number 6,5,4 c) test number 9,8,7

شکل ۱۳- نمودار فشار- زمان در بدنه لوله و شیر تخلیه (a) آزمون شماره ۳،۲،۱ (b) آزمون شماره ۶،۵،۴ (c) آزمون شماره ۹،۸،۷

نوسان همراه بود که به دلیل وجود هوای محبوس است. این کاهش فشار تا زمان $t=0.5s$ به دلیل جبران کاهش فشار ناشی از بسته بودن شیر تخلیه ادامه یافت و پس از این مرحله فشار در سیستم تا زمان تخلیه آب دهانه خروجی به صورت خطی ادامه داشت و همان گونه که در جدول ۴ مشاهده می شود در بازه زمانی $t=0.5s$ تا $t=2.12s$ اختلاف فشار قابل توجهی دیده نشد. پس از این زمان فشار به دلیل باز بودن مسیر خروجی کاهش یافت در زمان $t=2.36s$ فشار به $1/92$ اتمسفر می رسد که نسبت به فشار اولیه ایجاد شده در سیستم، $51/51$ درصد کاهش فشار را نشان می دهد. مقایسه و تحلیل آزمون شماره ۱ و ۳ نشان داد که با توجه به ثابت بودن طول هوای محبوس و متغیر بودن فشار ورودی، به ازای افزایش ۱ اتمسفر فشار ورودی، فشار پس از برقراری جریان در زمان $t=0.0s$ به ترتیب برابر $3/96$ و $5/63$ اتمسفر است که $29/66$ درصد افزایش فشار ناشی از تغییر فشار ورودی را نشان می دهد. نکته قابل توجه آنکه در زمان $t=0.3s$ (زمان بازشدگی شیر تخلیه) اختلاف بین فشار ایجاد شده در آزمون ۱ و ۳ برابر ۱

فشاری به دلیل ثابت بودن طول هوای محبوس تقریباً هم سان خواهد بود. این مورد در نمودارهای تغییرات فشار داخل هوای محبوس بسیار مشهود است و هر اندازه طول هوای محبوس بزرگتر باشد نوسانات دامنه بزرگتر و طول بزرگتری را نشان خواهد داد. در شکل ۱۴، نمودار فشار- زمان داخل هوای محبوس نشان داده شده است. در جدول ۴ نتایج نمودارهای تغییرات فشار- زمان در هوای داخل هوای محبوس به تفکیک زمان ارائه شده است. تحلیل این جدول به عنوان نمونه در آزمون شماره ۱ که فشار ورودی $1/2456$ اتمسفر و طول هوای محبوس ۳ متر است، نشان داد که فشار در زمان $t=0.0s$ مقدار ۲۹ درصد افزایش نسبت به فشار ورودی داشت که ناشی از بسته بودن شیر تخلیه و برقراری جریان در لوله است. به دلیل باز شدن تدریجی شیر تخلیه و وجود هوای محبوس فشار در سیستم کاهش یافته و در زمان $t=0.3s$ فشار به $2/21$ اتمسفر رسیده که نسبت به فشار اولیه ایجاد شده در سیستم $44/19$ درصد کاهش فشار را نشان می دهد. نکته قابل توجه اینکه از زمان برقراری جریان در لوله تا باز شدن شیر تخلیه این کاهش فشار با

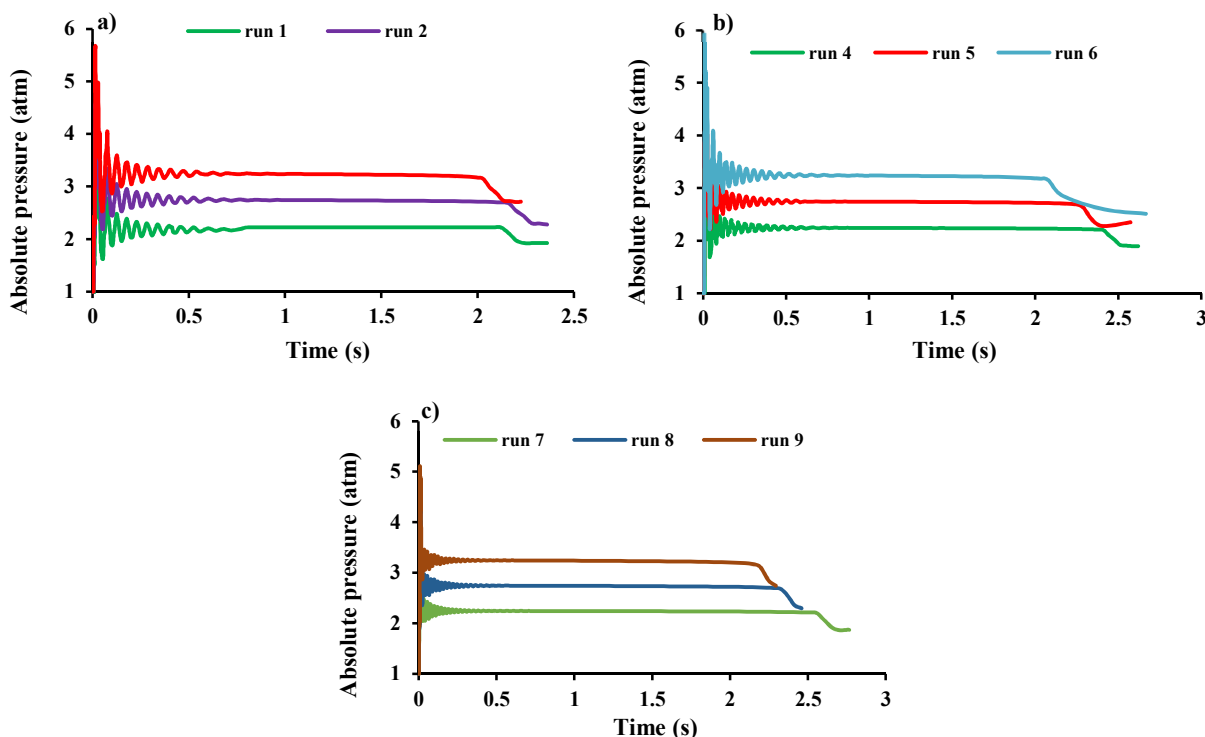


Fig. 14. Pressure-time diagram inside the entrapped air a) test number 3,2,1
 b) test number 6,5,4 c) test number 9,8,7

شکل ۱۴- نمودار فشار- زمان در داخل هوای محبوس (a) آزمون شماره ۳،۲،۱
 (b) آزمون شماره ۶،۵،۴ (c) آزمون شماره ۹،۸،۷

جدول ۴- نتایج نمودارهای فشار- زمان در داخل هوای محبوس به تفکیک آزمون‌ها

Table 4. Results of pressure – time diagrams in confined air by test separation

Test number	Input pressure (atm)	The length of the trapped air (M)	Pressure T=0.0 S (atm)	Pressure T=0.3 S (atm)	Pressure T=0.5 S (atm)	Pressure T=0.8 S (atm)	The outlet discharge period in pipe(s) the pressure at discharge time (atm)	The complete discharge period of walls (s) the pressure at complete discharge time(atm)
1	1.2456	3	3.96	2.21	2.14	2.22	2.12 2.11	2.36 1.92
2	1.7456	3	4.53	2.82	2.72	2.74	2.16 2.72	2.34 2.27
3	2.2456	3	5.63	3.22	3.19	3.23	2 3.17	2.22 2.71
4	1.2456	2	3.38	2.27	2.22	2.24	2.41 2.2	2.62 1.89
5	1.7456	2	4.22	2.8	2.77	2.72	2.25 2.68	2.57 2.35
6	2.2456	2	5.9	3.32	3.26	3.23	2.07 3.15	2.4 2.51
7	1.2456	0.5	3.36	2.25	2.24	2.24	2.25 2.2	2.75 1.87
8	1.7456	0.5	4.28	2.73	2.73	2.73	2.36 2.54	2.45 2.3
9	2.2456	0.5	5.09	3.24	3.24	3.24	2.14 3.17	2.29 2.724

ورودی (۱/۷۴۵۶ اتمسفر) و متفاوت بودن طول هوای محبوس (به ترتیب ۲، ۳ و ۵/۰ متر) موارد زیر اشاره می‌شود. در زمان $t=0.0s$ فشار پس از برقراری جریان در هر ۳ آزمون، به ترتیب فشار ایجاد شده برابر ۴/۵۳، ۴/۲۲ و ۴/۲۸ اتمسفر بود که حدوداً ۵۷/۳۴ درصد افزایش فشار نسبت به فشار ورودی که ناشی از بسته بودن شیر تخلیه است را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که به دلیل ثابت بودن فشار ورودی در این آزمون‌ها نمودارها بر روی هم قرار گرفته و تنها در زمان $t=0.3s$ ، مقدار فشار به ترتیب ۲/۸۲، ۲/۸ و ۲/۷۳ اتمسفر کاهش پیدا می‌کند که نسبت به مقدار فشار ایجاد شده در زمان $t=0.0s$ ، مقدار ۳۵/۹۴ درصد کاهش فشار در سیستم ایجاد می‌شود که به دلیل باز شدن تدریجی شیر تخلیه و وجود هوای محبوس در لوله است. نکته بسیار مهم اینکه هر اندازه طول هوای محبوس بزرگتر باشد دامنه و طول نوسانات فشاری ایجاد شده بزرگتر خواهد بود این مورد به خوبی در شکل ۱۲ نمایان است. از $t=0.3s$ تا زمان تخلیه آب خروجی دهانه لوله، نمودار به صورت خطی عمل کرد که علت باز شدن شیر تخلیه است. به دلیل ثابت بودن فشار، ورودی نمودارها بر روی هم قرار گرفت و هر اندازه طول هوای محبوس بیشتر باشد زمان تخلیه کمتر خواهد بود.

اتمسفر است. از زمان $t=0.3s$ تا تخلیه آب دهانه خروجی، فشار به صورت خطی عمل می‌کند و ۳۳/۴۴ درصد اختلاف بین آزمون شماره ۱ و ۳ را نشان می‌دهد. به عبارت دیگر با افزایش ۱ اتمسفر فشار ورودی، معادل ۳۳/۴۴ درصد اختلاف فشار در سیستم در فاصله زمانی باز شدن شیر تخلیه تا تخلیه آب دهانه خروجی لوله ایجاد می‌شود. مقایسه آزمون ۴ و ۵ نیز بیان می‌کند که با افزایش ۰/۵ اتمسفری فشار ورودی، فشار در زمان $t=0.0s$ از مقدار ۳/۳۸ در آزمون ۴ به ۴/۲۲ اتمسفر در آزمون ۵ می‌رسد که ۱۹/۹۱ درصد افزایش فشار را به دلیل بسته بودن شیر تخلیه نشان می‌دهد. در بازه زمانی $t=0.3s$ تقریباً معادل همان تغییر فشار ورودی (۰/۵ اتمسفر) با هم اختلاف دارند و کاهش فشار در سیستم مشاهده می‌شود. در فاصله زمانی بازشدگی شیر تخلیه تا تخلیه آب دهانه خروجی لوله، نمودار فشار- زمان به صورت خطی بوده و نکته قابل توجه آنکه در این دو آزمون به دلیل ثابت بودن طول هوای محبوس، تنها تحت تأثیر فشار ورودی خود را نشان داده و همان تأثیر نوسان فشاری ناشی از حضور هوای محبوس نیز در این آزمون‌ها دیده می‌شود. از مقایسه آزمون‌های ۲، ۵ و ۸ با توجه به ثابت بودن فشار

۴- نتیجه گیری

یکی از اهداف مهم این پژوهش نشان دادن چگونگی رفتار هوای محبوس در یک خط انتقال واقعی یا پروژه در حال احداث بود. نتایج نشان داد که با حضور هوای محبوس تغییرات اساسی در نمودار تغییرات فشار- زمان رخ داده و در اثر وجود هوای محبوس نوسانات فشار در سیستم ایجاد می شود. در دید ابتدایی به نظر می رسد در یک خط انتقال، اگر جریان برقرار و شیر تخلیه بسته باشد فشار به شدت زیاد می شود و پس از باز شدن شیر تخلیه فشار فروکش می کند. اما نتایج این پژوهش نشان داد در صورتی که هوای محبوس در خط انتقال وجود داشته پس از برقراری جریان در این خط انتقال، فشار به شدت زیاد خواهد شد و به دلیل حضور هوای محبوس، فشار کاهش پیدا کرده و نوسانات فشاری تا زمان باز شدن کامل شیر تخلیه در سیستم ایجاد و پس از باز شدن شیر تخلیه، نمودار فشار- زمان در داخل هوای محبوس به صورت خطی تا تخلیه مایع داخل لوله ادامه خواهد یافت.

با دقت در نتایج، به وضوح اختلاف نمودار فشار- زمان در حالت عدم حضور هوای محبوس و در صورت وجود هوای محبوس مشاهده و مشخص شد، هر اندازه طول هوای محبوس بیشتر باشد، نوسانات فشاری دارای طول و دامنه بزرگتری هستند. همچنین نتایج نشان داد که دو عامل بسیار تأثیرگذار بر نمودار تغییرات فشار در برابر زمان، طول هوای محبوس و فشار ورودی در سیستم است. به عبارت دیگر با دقت در شکل ۱۱ و ۱۲ ملاحظه شد که هر اندازه طول هوای محبوس ابعاد بزرگتری داشته باشد، نمودار فشار- زمان دارای نوسانات بزرگتری از لحاظ طول و دامنه خواهد بود و هر اندازه به طور هم زمان فشار ورودی و طول هوای محبوس بزرگتر باشد طول و دامنه این نوسانات بزرگتر خواهد بود.

بدیهی است که مطابق نتایج به دست آمده یکی دیگر از پارامترهای تأثیرگذار بر این روند، زمان بازشدگی شیر تخلیه است. یعنی هر اندازه این زمان بیشتر باشد زمان زیادتری برای میرایی نوسانات به وجود آمده ایجاد و همراه با مایع در داخل لوله جابه جا می شود.

زمانی که طول هوای محبوس ثابت باشد نوسانات به پیروی از فشار ورودی وارده به سیستم، خود را نشان می دهد و به عبارت دیگر زمانی که طول هوای محبوس ۳ متر باشد و هر اندازه فشار ورودی بیشتر شود، نمودار فشار- زمان نیز به همان اندازه از لحاظ عددی بزرگتر خواهد بود و این مورد به خوبی در منطبق کردن این نمودارها خود را نشان می دهد.

یکی از پارامترهای مؤثر در طول نوسانات فشار- زمان، زمان بازشدگی شیر تخلیه است که با هم رابطه مستقیم دارند و به ازای زمان بیشتر بازشدگی طول نوسانات فشار بیشتر خواهد بود. وجود نوسانات باعث ایجاد اختلال در عملکرد هیدرولیکی در خط انتقال و عملکرد شیرآلات شد. اصلی ترین عامل تأثیرگذار در دامنه نوسانات فشاری، طول هوای محبوس بود و نوسانات فشار با طول هوای محبوس ارتباط مستقیم داشت.

برای توسعه این پژوهش پیشنهاد می شود با اضافه کردن زمان های بازشدگی مختلف شیر تخلیه برای فشارهای متفاوت و یا طول های هوای متفاوت و یا پیش بینی چندین حباب هوای محبوس اثرات آن ارزیابی شود.

۵- قدردانی

نویسندگان از تمام کسانی که در مدت انجام پژوهش، ما را یاری فرمودند، تشکر می کنند.

References

- Abreu, J., Cabrera, E., Izquierdo, J. & García-Serra, J. 1999. Flow modeling in pressurized systems revisited. *Journal of Hydraulic Engineering*, 125, 1154-1169.
- Besharat, M., Coronado-Hernández, O. E., Fuertes-Miquel, V. S., Viseu, M. T. & Ramos, H. M. 2018. Backflow air and pressure analysis in emptying a pipeline containing an entrapped air pocket. *Urban Water Journal*, 15, 769-779.
- Besharat, M., Tarinejad, R. & Ramos, H. M. 2016. The effect of water hammer on a confined air pocket towards flow energy storage system. *Journal of Water Supply: Research and Technology-AQUA*, 65, 116-126.

- Coronado-Hernández, O. E., Fuertes-Miquel, V. S., Besharat, M. & Ramos, H. M. 2017. Experimental and numerical analysis of a water emptying pipeline using different air valves, *Water*, 9(2), 98.
- Daneshfaraz, R. 2013. 3-D Investigation of velocity profile and pressure distribution in bends with different diversion angle. *Journal of Civil Engineering and Science*, 2, 234-240.
- Daneshfaraz, R., Rezazadehjoudi, A. & Abraham, J. 2018. Numerical investigation on the effect of sudden contraction on flow behavior in a 90-degree bend. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 22, 603-612.
- Escarameia, M. 2007. Investigating hydraulic removal of air from water pipelines. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Water Management*, Thomas Telford Ltd., 25-34.
- Fuertes-Miquel, V. S., Coronado-Hernández, O. E., Iglesias-Rey, P. L. & Mora-Meliá, D. 2019. Transient phenomena during the emptying process of a single pipe with water-air interaction. *Journal of Hydraulic Research*, 57, 318-326.
- Gorman, J. M., Sparrow, E. M., Smith, C., Ghosh, A., Abraham, J., Daneshfaraz, R., et al. 2018. In-bend pressure drop and post-bend heat transfer for a bend with a partial blockage at its inlet. *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications*, 73, 743-767.
- Izquierdo, J., Fuertes, V., Cabrera, E., Iglesias, P. & Garcia-Serra, J. 1999. Pipeline start-up with entrapped air. *Journal of Hydraulic Research*, 37, 579-590.
- Khosfetrat, A., Daneshfaraz, R. & Behmanesh, J. 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 Persian)
- Laanearu, J., Annus, I., Koppel, T., Bergant, A., Vučković, S., Hou, Q., et al. 2012. Emptying of large-scale pipeline by pressurized air. *Journal of Hydraulic Engineering*, 138, 1090-1100.
- Martins, N. M., Delgado, J. N., Ramos, H. M. & Covas, D. I. 2017. Maximum transient pressures in a rapidly filling pipeline with entrapped air using a CFD model. *Journal of Hydraulic Research*, 55, 506-519.
- Palau, C. V., Balbastre, I., Manzano, J., Azevedo, B. M. & Bomfim, G. V. 2019. Numerical analysis of woltman meter accuracy under flow perturbations. *Water*, 11(12), 2622.
- Ramezani, L., Karney, B. & Malekpour, A. 2016. Encouraging effective air management in water pipelines: A critical review. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 142, 04016055.
- Wang, H., Zhou, L., Liu, D., Karney, B., Wang, P., Xia, L., et al. 2016. CFD approach for column separation in water pipelines. *Journal of Hydraulic Engineering*, 142, 04016036.
- Zhou, L., Liu, D.-Y. & Ou, C.-Q. 2011. Simulation of flow transients in a water filling pipe containing entrapped air pocket with VOF model. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, 5, 127-140.
- Zhou, L. & Liu, D. 2013. Experimental investigation of entrapped air pocket in a partially full water pipe. *Journal of Hydraulic Research*, 51, 469-474.

