

# Analyzing the Key Factors Affecting Transient Pressures Occurring During Pipe Filling Using a Numerical Approach


Samane Aghaei<sup>1</sup>, Mehdi Hamidi<sup>2\*</sup>, Ahmad Malekpour<sup>3</sup>

1- M.Sc. Student, Water Eng. and Hydraulic Structures, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran.

2- Associate Professor, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran.

3- Managing Director and Founder of "Innovative Hydraulic group Inc.", Toronto, Canada.

\* [hamidi@nit.ac.ir](mailto:hamidi@nit.ac.ir)

Received: 8 December 2021, Accepted: 16 March 2022  J. Hydraul. Homepage: [www.jhyd.iha.ir](http://www.jhyd.iha.ir)

## Abstract

**Introduction:** It is common practice to partially drain pipelines for inspection and repair. If not adequately controlled, refilling the pipeline can expose them to significant transient pressures that can compromise the integrity of the pipeline and associated connections. So far, the effects of using bypasses in pipelines during pipeline filling have not been systematically studied. This research has investigated the key factors affecting filling hydraulics using a numerical investigation. For this purpose, a numerical model for calculating the filling hydraulics is proposed. The model uses the method of characteristics to solve the water hammer equations and utilizes the discrete gas cavity model (DGCM) to handle column separation. The model is validated with the experiment and the numerical model presented in the literature. Extensive numerical exploration shows that the lack of a safe filling protocol and the absence or inadequate sizing of the required hydro-mechanical equipment can result in significant water hammer pressures. The results also conclude that it is impossible to control transient pressures during filling without a properly sized bypass and air valve.

**Methodology:** Extensive numerical exploration with a hypothetical water pipe system is performed to analyze the key factors affecting the transient pressures induced during filling. The pipeline has an undulating profile with a diameter, length, and acoustic wave speed of 0.9 m, 15900 m, and 1000 m/s, respectively. The pipeline is supplied by a reservoir with a constant water depth of 5m located at the upstream end of the pipeline. The last 1600m of the pipeline is assumed to be empty, and an air valve at the end of this section allows for air management during filling. A bypass line at the upstream end of the empty zone is equipped with a flow control valve to control the filling flow rate. Several numerical analyses are conducted with different sizes of the air valve, bypass line, and opening times of the flow control valve, and the maximum and minimum pressure heads induced during filling are recorded.

**Results and Discussion:** The analysis of the numerical results shows that when the flow control valve opens, the empty pipeline fills with a flow rate that depends on the size of the bypass and the opening time of the valve. The rapid opening of a large bypass results in significant positive and negative water hammer pressures in the system. The water column front in the empty pipe acts as a piston and pushes the air out of the system through the air valve. If the outlet opening of the air valve is large enough, the air pressure in the empty

pipe does not increase significantly; otherwise, higher air pressures will build up, which can slow down the filling water column. When the last air escapes from the system, the water column is arrested, and significant water hammer pressures develop. The magnitude of the resulting water hammer pressure depends on the speed at which the water column hits the end of the pipe and the pipe acoustic wave speed. Numerical investigations show that the intensity of the induced water hammer pressures rests on the diameters of the air valve outlet orifice and the bypass, and the opening time of the flow control valve. For this particular case study, the bypass line diameter = 0.2 m, the orifice diameter of the air valve = 1.5 cm, and the opening time of the control valve = 40 s can control the maximum and minimum pressures within the acceptable range without unduly prolonging the filling time.

**Conclusion:** The proposed model can be successfully used to analyze the filling hydraulics and design a safe filling protocol. The main findings of this study are as follow:

- Without a proper filling protocol, the resulting transient pressures can be severe enough to rupture the pipeline
- Without a bypass, it is impossible to control negative pressures
- The opening rate of the flow control valve could play an essential role in controlling negative pressures
- Reducing the diameter of the air valve's outlet orifice reduces the resulting transient pressures and prolongs the filling
- An optimal filling protocol can be obtained by an iterative procedure in which the bypass and air valve diameters and the opening time of the flow control valve are determined.

**Keywords:** Filling, Air pocket Entrapment, Bypass, Transient Flow, Column Separation.



© 2022 Iranian Hydraulic Association, Tehran, Iran.  
This is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0 license)  
(<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

# بررسی عوامل تاثیرگذار بر روی فشارهای ناشی از پرکردن خطوط لوله با استفاده از مدل عددی

سمانه آقایی<sup>۱</sup>، مهدی حمیدی\*<sup>۲</sup>، احمد ملک پور<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد رشته آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران.

۲- دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران.

۳- مدیر عامل و موسس گروه هیدرولیکی نوآور، تورنتو، کانادا.

\* hamidi@nit.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۰/۰۹/۱۷، پذیرش: ۱۴۰۰/۱۲/۲۵ و بگاه نشریه هیدرولیک: www.jhyd.iha.ir

**چکیده:** تعمیرات در خطوط لوله امری اجتناب ناپذیر است. جهت انجام تعمیرات در بخشی از خطوط لوله، نیاز به قطع جریان و سپس پرکردن مجدد آن است. نحوه پرکردن لوله بسیار مهم بوده و عدم وجود یک دستورالعمل بهره‌برداري مناسب می‌تواند منجر به تخریب خط لوله گردد. تاکنون اثرات استفاده از کنارگذر در حین پرکردن خط لوله مورد مطالعه سیستماتیک قرار نگرفته است. در این مقاله یک مدل ریاضی یک بعدی الاستیک جهت مدل‌سازی فرآیند پرکردن خطوط لوله معرفی شده است. پس از صحت‌سنجی، این مدل به‌عنوان ابزاری جهت شناسایی عوامل موثر بر فرآیند پرکردن لوله استفاده شده است. با استفاده از مدل معرفی شده، اثرات هیدرولیکی کنارگذر در حین پرکردن یک خط لوله طویل دارای فراز و نشیب فرضی، قابل‌تعمیم به خطوط لوله واقعی، بررسی شده است. مدل مذکور قابلیت شبیه‌سازی جریان گذرای ایجاد شده در زمان پرکردن لوله را داشته و قادر است که جدایی ستون آب را مدل‌سازی نماید. حل عددی معادلات توسط روش مشخصه و جدایی ستون آب توسط روش حفره گاز منقطع انجام شده است. نتایج حاصل از مدل‌سازی نشان می‌دهند که نبود یک برنامه بهره‌برداري دقیق و عدم وجود تجهیزات هیدرومکانیکال با ابعاد مناسب می‌تواند منجر به ایجاد فشارهای مثبت و منفی مخرب در خط لوله گردد. نتایج حاصل از این مقاله نشان می‌دهد که طراحی مناسب قطر روزنه خروج هوا به همراه یک کنارگذر با ابعاد مناسب و همچنین بازکردن شیر کنترل در زمان مناسب باعث می‌شود که حداکثر و حداقل فشارهای گذرا در محدوده قابل‌قبولی باقی بماند و پرکردن در سریع‌ترین زمان ممکن انجام شود.

**کلیدواژگان:** پرکردن خطوط لوله، بسته‌های محبوس، کنارگذر، جریان گذرا، جدایی ستون.

## ۱- مقدمه

موجود در خط است (Vasconcelos and Wright, 2008). خطوط انتقال آب برای یک تعمیر، نگهداری و یا بهره‌برداري موفق نیاز به درنظر گرفتن اثرگذاری بسته‌های محبوس دارند. در طول فرآیند پرکردن خط لوله، بسته‌های هوا به‌سرعت فشرده می‌شوند و نوسان‌های فشاری ایجاد می‌کنند (Fuertes-Miquel et al., 2019). امواج فشاری سنگین بوجود آمده ناشی از برهمکنش ستون آب و هوا منجر به تخریب یا ترکیدن لوله می‌شود. از سوی دیگر، باتوجه به اینکه جریان در حین پرکردن خط لوله گذرا است، مشکلات ناشی از وجود هوا نیز به طرز

نگهداری و یا تعمیر خط لوله ممکن است نیاز به قطع جریان و تخلیه بخشی از لوله داشته باشد. لذا جهت راه اندازی دوباره خط لوله، ناحیه‌های تخلیه شده می‌بایست دوباره پر شوند. پر و خالی شدن خطوط لوله، بخش جدایی‌ناپذیر از بهره‌برداري، کنترل و مدیریت آنها هستند. این عملیات به صورت دوره‌ای برای تعمیر و یا تمیز کردن خط، توسط کارکنان فنی بهره‌برداري انجام می‌شود. یک نگرانی معمول در طول چنین عملیاتی، آسیب به شبکه‌های آب ناشی از برهمکنش آب ورودی و هوای

بررسی کردند. نتایج آنها نشان داد که با بزرگ‌تر شدن طول بسته هوا دامنه و طول نوسانهای فشاری بیشتر خواهد شد.

در میان راهکارهای مدیریت بهینه هوا، متداول‌ترین روش، استفاده از شیرهای تخلیه هوا است. شیرهای هوا به‌طور پرهیزناپذیر نقش پیچیده‌ای در خطوط لوله ایفا می‌کنند. نکته‌ای که باید در نظر داشت این است که در صورت طراحی نادرست شیرهای هوا، خرابی‌های فاجعه‌آمیزی به‌بار خواهد آمد (Ramezani et al., 2015). یکی از فراسنجه‌های موثر در طراحی شیرهای هوا، انتخاب اندازه مناسب برای روزنه خروج هوا است. در سال‌های اخیر تاثیر اندازه روزنه‌های خروج هوا بر هیدرولیک جریان طی فرآیند پر شدن سریع خط لوله بررسی شده است. Zhou et al. (2002) به صورت آزمایشگاهی و تحلیلی فشارهای بوجود آمده ناشی از پرکردن سریع یک خط لوله افقی مجهز به یک مخزن در بالادست و یک روزنه هوا در انتهای خط لوله را بررسی کردند. نتایج آنها نشان داد که نوسانات فشار به ابعاد روزنه وابسته است. آنها دریافتند هنگامی که اندازه روزنه کوچک است، مقداری هوا همواره در لوله باقی مانده و به دلیل وجود ویژگی بالشتکی آن، فشار ضربه قوچ تعدیل شده اما با بزرگ‌تر شدن ابعاد روزنه، بسته هوا به‌طور کامل و به سرعت از شیر هوا خارج شده و فشار ضربه قوچ چیره می‌شود. Malekpour and Karney (2019) اثرگذارای شیرهای هوا بر هیدرولیک جریان را در هنگام پر شدن سریع خطوط لوله مورد بررسی قرار دادند و نتایج آنها نشان داد که هوای وارد شده به خط لوله باعث بوجود آمدن پدیده‌ای همانند جدایی ستون آب شده و منجر به فشارهای ناپایدار ثانویه می‌شود. علاوه بر امکان رخداد جدایی ستون آب در هنگام ورود هوا، در لوله‌های دارای فراز و نشیب زیاد نیز امکان رخداد این پدیده وجود دارد. از آن‌جا که جدایی ستون ممکن است هیدرولیک جریان را دستخوش تغییرپذیری‌های زیادی کند، یک روش دقیق برای ارزیابی پدیده جداسازی ستون‌ها در حین پرکردن خطوط لوله نیاز است (Liou and Hunt, 1996; Malekpour and Karney, 2014, 2011, 2019). از دیگر عامل‌های موثر بر هیدرولیک جریان در هنگام پر شدن

قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد (Abreu et al., 1999; Staff, 2001). بنابراین در هنگام بررسی جریان‌های گذرا، در نظر گرفتن بسته‌های هوا در خطوط لوله امری ضروری است و پدیده پرکردن خط لوله نیز از این امر مستثنی نیست. به‌طور کلی مدل‌سازی در خطوط لوله که حاوی بسته‌های هوا هستند به دو صورت انجام می‌گیرد. در برخی مدل‌ها تراکم‌پذیری مایع در نظر گرفته نشده و ستون آب به صورت صلب مدل‌سازی می‌شود (Cabrera et al., 1992; Coronado-Hernández et al., 2019; Jönsson, 1985; Martin, 1976; Vasconcelos and Leite, 2012). در حالی که در پاره‌ای دیگر از مدل‌ها فرض می‌شود مایع درون خط لوله تراکم پذیر بوده، لوله نیز قابلیت تغییر شکل داشته و مدل‌سازی به صورت کشسان انجام می‌شود (Zhou et al., 2011a, 2013; Malekpour and Karney, 2014; Wang et al., 2017; Maddahian et al., 2021). نتایج حاصل از مدل‌های ستون صلب در کسر خلاهای بزرگ هوا، با نتایج به‌دست آمده از مدل‌های کشسان همخوانی بسیار خوبی دارد. اما در کسر خلاهای کوچک‌تر هوا، مدل‌های ستون صلب اضافه فشار بیشتری را برآورد می‌کنند. این در حالی است که در خطوط لوله طویل و دارای فراز و نشیب<sup>۳</sup> به‌طور عمده کسر خلاهای کوچک هوا وجود دارد که جهت رسیدن به دقت کافی می‌بایست از مدل‌های کشسان استفاده شود (Malekpour and Karney, 2014; Zhou et al., 2013).

در صورت وجود بسته‌های هوا در خطوط لوله باید مدیریت صحیحی در راستای کاهش اثرگذارای منفی ناشی از آنها انجام گیرد. جهت کاهش خطرهای ناشی از وجود بسته‌های هوا در خط، موضوعی که باید به آن پرداخته شود، چگونگی بهینه خروج بسته‌های هوا از خط است. حذف ناقص هوا از لوله باعث افزایش اُفت فشار و کاهش ظرفیت انتقال می‌شود. همچنین ممکن است جریان‌های متناوب ناشی از تخلیه انفجاری بسته‌های محبوس را نیز بوجود آورد (Falvey, 1980). (Daneshfaraz et al. (2020). با استفاده از یک مدل دوبعدی نوسان‌های فشاری درون یک بسته هوا در حین پر شدن یک خط لوله ۳۵ متری را

1 Transient  
2 Void Fraction  
3 Undulating

جمله عامل‌های موثر بر پرکردن خطوط لوله خالی که تاکنون نیز به آن پرداخته نشده است، افزون بر زمان باز شدن شیر کنترل و طراحی روزنه خروج هوا با ابعاد مناسب، استفاده از کنارگذر<sup>۱</sup> در خط لوله است.

دقت مدل معرفی شده با مدل عددی ستون صلب Coronado-Hernández et al. (2019) مقایسه شده است. افزون بر این، مقایسه مدل پیشنهادی با نتایج آزمایشگاهی Coronado-Hernández et al. (2019) نیز ارائه شده است.

## ۲- پیشینه نظری

### ۲-۱- فرضیات حاکم

فرضیه‌های مسئله شامل موارد زیر است (Zhou et al., 2011a):

- برای مدل‌سازی بسته هوا از مدل ریاضی یک بعدی استفاده شده است.
- فصل مشترک هوا و آب عمود بر خط مرکزی لوله است (یعنی بسته هوا به شکل استوانه‌ای باقی می‌ماند).
- ضریب اصطکاک تابعی از جنس لوله است و در طول لوله ثابت است.
- سیال درون لوله تراکم‌پذیر فرض می‌شود.
- در فاز هوا، هوا در شرایط جریان بدون تغییر آنتروپی از میان شیر به لوله وارد و یا از آن خارج می‌شود.
- جرم هوای درون لوله از قانون همدمای پیروی می‌کند، هوای وارد شده در مجاورت شیر باقی می‌ماند تا امکان خروج آن نیز فراهم باشد.
- سیال در ابتدای امر و در بالادست شیر کنترل ساکن است.

### ۲-۲- معادله‌های حاکم

معادله‌های دیفرانسیل جزئی زیر جریان گذرا را در خطوط لوله تحت فشار حاکم می‌کند و به عنوان معادله‌های ضربه‌قوج شناخته می‌شود. (Chaudhry, 1979).

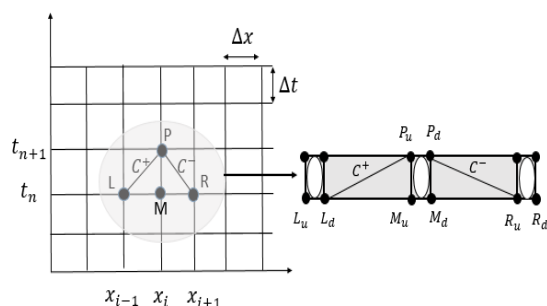
$$\frac{\partial v}{\partial t} + g \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{f}{2D} |v|v = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{a^2}{g} \frac{\partial v}{\partial x} = 0 \quad (2)$$

خط لوله می‌توان به نرخ پرکردن خط لوله اشاره کرد (Lescovich, 1972; Martin, 1976; Ramezani et al., 2015). نرخ پرکردن خط لوله به شدت به زمان باز شدن شیر کنترل در خط لوله وابسته است. موضوع پیدا کردن زمان بازشدگی شیر بسیار مورد اهمیت است که کمتر نیز به آن پرداخته شده است. برای بررسی عامل‌های هیدرولیکی موثر در زمینه پرکردن خط لوله، به مدل‌های عددی دقیقی نیاز است. تاکنون مطالعات عددی و آزمایشگاهی بر روی خطوط لوله بسیار ساده تک لوله‌ای افقی، به‌طور عمده کوتاه، که مجهز به یک شیر هوا در انتهای خط هستند انجام گرفته است (Maddahian et al., 2021; Lee, 2005; Vasconcelos and Wright, 2008; Zhou et al., 2002). گرچه این مدل‌های ساده به درک فیزیک مسئله بسیار کمک می‌کند اما نتایج حاصل از آنها قابل تعمیم به خطوط لوله واقعی نیستند.

بررسی‌های توصیف شده پیشین نشان می‌دهد که یافتن راهکارهای عملی برای مهار فشارهای نامطلوب حاصله از وجود بسته‌های هوا در حین پرکردن خطوط لوله امری ضروری است. محاسبه‌های سه‌بعدی گرچه نتایج دقیقی از فشارهای گذرا در حین پرکردن خط لوله را ارائه می‌دهند، اما هزینه محاسبه‌ای بسیار زیادی را به دنبال دارند (Martins et al., 2017; Zhou et al., 2011b, 2018). از دیگر مسئله‌های مدل‌های سه‌بعدی اعمال شرایط مرزی مختلف است، که در این مدل‌ها امکان مدل‌سازی شرایط مرزی پیچیده فراهم نیست. افزون بر این، با توجه به اینکه مدل‌سازی پرکردن خطوط لوله فرآیندی آزمون و خطایی است، در عمل برای خطوط لوله طویل استفاده از مدل‌های سه‌بعدی امکان‌پذیر نیست. لذا مدل‌سازی فشارهای گذرا توسط مدل‌های یک‌بعدی انجام می‌شود.

در این پژوهش برای بررسی نحوه تاثیر گذاری فراسنجه‌های موثر بر هیدرولیک جریان در حین پرکردن خطوط لوله، یک مدل یک‌بعدی پیشنهاد شده است. با استفاده از مدل پیشنهادی هر یک از عامل‌ها تاثیر گذار بر هیدرولیک فرآیند پرکردن یک خط لوله طویل فرضی، قابل تعمیم به خطوط لوله واقعی، بررسی شده است. از



**Fig. 1** schematic of computational cells in the method of characteristics

شکل ۱ شمایی از سلول‌های محاسبه‌ای در روش مشخصه

برای گسسته کردن معادله‌های حاکم، شکل ۱ در نظر گرفته شده است که نشان‌دهنده بسته گاز موجود در سلول محاسبه‌ای است. چهار مجهول ارتفاع پیزومتریک، حجم بسته گاز، و دبی جریان در دو طرف بسته گاز در گام زمانی کنونی و در نقطه P را می‌توان با حل همزمان معادله‌های زیر که به ترتیب معادله‌ها مشخصه مثبت و منفی، بقای جرم در بسته گاز و معادله حالت گاز هستند محاسبه کرد.

$$C^+ : H_{Pu} = H_{Pd} = C_1 - C_2 Q_{Pu} \quad (3)$$

$$C^- : H_{Pd} = C_3 + C_4 Q_{Pd} \quad (4)$$

$$(\nabla_P)_{t+\Delta t} = (\nabla_P)_t + \left[ \psi(Q_{Pd} - Q_{Pu})_{t+\Delta t} + (1-\psi)(Q_{Pd} - Q_{Pu})_t \right] \times \Delta t \quad (5)$$

$$(\nabla_P)_{t+\Delta t} = \frac{P_0^* \alpha_0 \nabla_R}{\rho g (H_{Pd} - Z_{Pd} - H_V)} \quad (6)$$

که در آنها فراسنجه‌های مورد بحث اینگونه تعریف می‌شوند.

$$C_1 = H_{Ld} + \frac{a}{gA} Q_{Ld}$$

$$C_2 = \frac{a}{gA} + \frac{f \Delta x}{2gA^2} |Q_{Ld}|$$

$$C_3 = H_{Ru} - \frac{a}{g} Q_{Ru}$$

$$C_4 = \frac{a}{gA} + \frac{f \Delta x}{2gA^2} |Q_{Ru}|$$

در معادله‌های بالا  $v$  سرعت سیال،  $H$  هد پیزومتریک،  $D$  قطر لوله،  $a$  سرعت موج،  $g$  شتاب گرانش،  $f$  ضریب اصطکاک دارسی ویسباخ و  $x$  و  $t$  متغیرهای مستقل فاصله و زمان هستند.

معادله‌های ۱ و ۲ تا هنگامی معتبر هستند که فشار از فشار بخار سیال بالاتر باشد. در صورت افت فشار به فشار بخار جدایش ستون سیال رخ خواهد داد. روش‌های مختلفی برای محاسبه جداسازی ستون وجود دارد که در میان آنها مدل حفره گاز گسسته<sup>۱</sup> رایج‌ترین روشی است که به طور گسترده در تحقیقات و کارهای مهندسی استفاده می‌شود. در مدل حفره گاز گسسته، بسته‌های گاز کوچکی ( $10^{-7} m^3$ ) در گره‌های محاسبه‌ای قرار داده می‌شوند و امکان محاسبه همزمان جریان کائیتاسیون و ضربه قوچ را فراهم می‌کنند (Simpson and Bergant, 1994).

هنگامی که فشار زیاد است، بسته‌های گاز کوچک و صلب باقی می‌مانند تا سیگنال‌های فشاری با سرعت صوتی لوله در سراسر لوله منتشر شوند. اما هنگامی که فشار به فشار بخار کاهش یابد، حفره‌های گاز منبسط می‌شوند و فشار را در فشار بخار ثابت نگه می‌دارند که به موجب آن انتشار موجی صورت نمی‌گیرد. در مدل پیشنهادی از مدل حفره گاز گسسته به دلیل دقت و آسانگری اجرا برای محاسبه جداسازی ستون استفاده می‌شود.

## ۲-۳- پیاده‌سازی عددی

روش مشخصه یک روش کارآمد برای حل معادله‌های ضربه‌قوچ است و در این پژوهش استفاده شده است.

همان‌طور که در شکل ۱ نشان داده شده است، در این روش، دامنه محاسبه‌ای به سلول‌های محاسبه‌ای متعدد با افزایش‌های یکسان مکانی  $\Delta x$  و زمانی  $\Delta t$  گسسته می‌شود. فراسنجه‌های جریان، از جمله نرخ جریان و فشار در یک نقطه معین (P) در گام زمانی جاری، را می‌توان با استفاده از حل همزمان معادله‌های مشخصه مثبت و منفی محاسبه کرد (Malekpour and Karney, 2014; Wylei and Streeter, 1978).

$$B_B = \frac{C_4}{B^2}$$

در مواردی با حجم گاز زیاد و فشار بسیار کم یا حجم بسیار کم اما فشار زیاد،  $|B_B| \ll 1$  بوده و معادله‌های ۸ یا ۹ ممکن است به دلیل محاسبه اشتباه رادیکال، نتایج نادرستی ارائه دهند. نتایج مناسب در چنین مواردی را می‌توان از طریق خطی سازی معادله‌های اصلی به دست آورد (Wylei and Streeter 1978):

$$H_{Pd} - Z_{Pd} - H_V = \quad \text{if} \quad B_1 \leq 0 \quad (10)$$

$$-2B_1 - \frac{B_4}{2B_1}$$

$$H_{Pd} - Z_{Pd} - H_V = \quad \text{if} \quad B_1 > 0 \quad (11)$$

$$\frac{B_4}{2B_1}$$

با محاسبه  $H_{Pd}$  و قراردادن آن در معادله‌های ۳، ۴ و ۵، میزان‌های  $Q_{Pu}$ ،  $Q_{Pd}$  و  $\nabla_P$  قابل محاسبه است.

### ۲-۳-۱- شرایط مرزی بسته هوا، شیر هوا و شیر کنترل

به منظور حفاظت خط لوله در مقابل فشار منفی از شیرهای هوای در بخش‌های مرتفع خط لوله و یا در بخش‌هایی که هوای موجود در لوله باید تخلیه شود استفاده می‌شود. هنگامی که فشار در لوله از فشار جو کمتر باشد، شیر هوا باز شده و هوا وارد خط لوله می‌شود. هنگامی که فشار از فشار جو بیشتر باشد روزه خروجی شیر هوا وارد عمل شده و سبب خروج هوا از لوله می‌شود. در این پژوهش شیر کنترل، بسته هوا (لوله خالی) و شیر هوا به‌عنوان شرط مرزی پایین دست در نظر گرفته شده است.

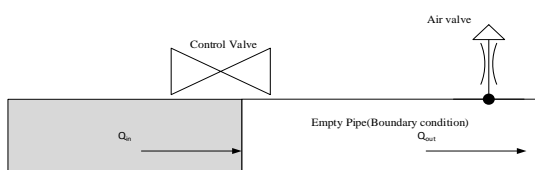


Fig 2 schematic of the boundary condition

شکل ۲ شمایی از شرایط مرزی

با در نظر گرفتن شکل ۲ معادله‌های زیر را که به ترتیب

در معادله‌های بالا  $Q_{Pu}$  و  $Q_{Pd}$  دبی جریان در بالادست و پایین دست بسته گاز در نقطه  $P$ ،  $H_{Pu} = H_{Pd}$  ارتفاع پیزومتريک در بالادست و پایین دست بسته گاز در نقطه  $P$ ،  $Z_{Pu} = Z_{Pd}$  تراز لوله در بالادست و پایین دست بسته گاز در نقطه  $P$ ،  $Q_{Ld}$  دبی جریان در پایین دست بسته گاز در نقطه  $L$ ،  $H_{Ld}$  ارتفاع پیزومتريک در پایین دست بسته گاز در نقطه  $L$ ،  $Q_{Ru}$  دبی جریان در بالادست بسته گاز در نقطه  $R$ ،  $H_{Ru}$  ارتفاع پیزومتريک در بالادست بسته گاز در نقطه  $R$ ،  $A$  گستره مقطع عرضی لوله،  $\rho$  چگالی آب،  $g$  شتاب گرانش،  $\nabla_P$  حجم بسته گاز در نقطه  $P$ ، هد فشار بخار گیج،  $P_0^*$  فشار مرجع،  $\alpha_0$  کسر خلا اولیه،  $\nabla_R$  حجم سلول محاسبه‌ای،  $\psi$  فاکتور وزنی زمان،  $t$  گام زمانی قبلی،  $t+\Delta t$  گام زمانی کنونی است.

با جایگذاری معادله‌های ۳، ۴ و ۶ در معادله ۵، معادله‌های زیر به دست می‌آید (Wylei and Streeter 1978).

$$(H_{pd} - Z_{pd} - H_V)^2 + 2B_1(H_{pd} - Z_{pd} - H_V) - B_4 = 0 \quad (7)$$

$$B_4 = 0$$

حل تحلیلی معادله فوق به صورت زیر است:

$$H_{Pd} - Z_{Pd} - H_V = \quad \text{if} \quad B_1 \leq 0 \quad (8)$$

$$-B_1 \left( 1 + \sqrt{1 + B_B} \right)$$

$$H_{Pd} - Z_{Pd} - H_V = \quad \text{if} \quad B_1 > 0 \quad (9)$$

$$-B_1 \left( 1 - \sqrt{1 + B_B} \right)$$

که در آنها فراسنجه‌های مورد بحث این گونه تعریف می‌شوند.

$$B_1 = B_2 C_4 C_2 B_V + 0.5(Z_{Pd} + H_V) - B_2(C_2 C_3 + C_4 C_1)$$

$$B_2 = \frac{0.5}{C_2 + C_4}$$

$$B_V = \frac{(\nabla_P)_t}{\psi \Delta t} + \frac{1 - \psi}{\psi} (Q_{Pd} - Q_{Pu})$$

$$B_4 = \frac{P_0^* \alpha_0 \nabla_R B_2 C_4 C_2}{0.5 \rho g \psi \Delta t}$$

ترتیب) بوجود می‌آید.

$$\dot{m} = C_{in} A_{in} \sqrt{\frac{7P_0 \rho_0}{\left[ \left( \frac{P_{air}}{P_0} \right)^{1.4286} - \left( \frac{P_{air}}{P_0} \right)^{1.714} \right]}} \quad \begin{matrix} P_0 > P_{air} \\ > 0.53P_0 \end{matrix} \quad (17)$$

$$\dot{m} = C_{in} A_{in} \frac{0.686}{\sqrt{RT}} P_0 \quad P_{air} < 0.53P_0 \quad (18)$$

$$\dot{m} = C_{out} A_{out} \sqrt{\frac{7}{RT} \left[ \left( \frac{P_0}{P_{air}} \right)^{1.4286} - \left( \frac{P_0}{P_{air}} \right)^{1.714} \right]} \quad \begin{matrix} \frac{P_0}{0.53} > P_{air} \\ > P_0 \end{matrix} \quad (19)$$

$$\dot{m} = C_{out} A_{out} \frac{0.686}{\sqrt{RT}} P_{air} \quad P_{air} > \frac{P_0}{0.53} \quad (20)$$

$C_{in}$  ضریب تخلیه خروجی شیر،  $A_{in}$  گستره ورودی بازشدگی شیر،  $\rho_0$  چگالی جرمی هوا،  $C_{out}$  ضریب تخلیه خروجی شیر و  $A_{out}$  گستره خروجی بازشدگی شیر است (Wylei and Streeter 1978). با حل همزمان معادله‌ها ۱۵ و ۱۶ دبی و فشار بسته هوا در مرز قابل محاسبه است. در این پژوهش از روش نیوتن رافسون برای حل معادله‌ها استفاده شده است. هنگامی که فشار و دبی بسته هوا محاسبه شد، به کمک معادله مشخصه مثبت (معادله ۳) ارتفاع پیزومتریک در مرز نیز محاسبه می‌شود.

### ۳- درستی سنجی مدل

در این پژوهش از داده‌های آزمایشگاهی و مدل عددی ستون صلب Coronado-Hernández et al. (2019) برای درستی سنجی مدل پیشنهادی استفاده شده است. مدل ارائه شده یک مدل ساده، متشکل از یک لوله افقی، یک مخزن در بالادست لوله، یک شیر هوا و یک بسته هوا در انتهای خط لوله است. فراسنجه‌های مورد استفاده در مدل آزمایشگاهی شامل قطر لوله  $D=0.063$  m، طول کل خط  $L_T=3.88$  m، طول بسته هوا  $L_a=0.96$  m، ضریب اصطکاک داریسی ویسباخ  $f=0.018$ ، قطر شیر هوا  $3/175$  میلی‌متر است. درستی سنجی در ارتفاع‌های مختلف آب در مخزن که معادل فشارهای  $0.5$ ،  $0.75$  و  $1/25$  بار می‌باشد انجام شده و به ترتیب به نام مدل‌های ۱ تا ۳ نامگذاری شده است.

با تحت فشار قرار دادن سریع بسته هوای موجود در انتهای خط لوله، جریان گذرا در لوله ایجاد می‌شود.

معادله حالت هوا، معادله پیوستگی در لوله در حال پر شدن و معادله انرژی در شیر کنترل می‌باشند به صورت زیر می‌توان نوشت:

$$P_{air} (\nabla_a)_{t+\Delta t} = \left[ m_t + 0.5\Delta t (\dot{m}_t + \dot{m}_{t+\Delta t}) \right] RT \quad (12)$$

$$(\nabla_a)_{t+\Delta t} = (\nabla_a)_t + 0.5\Delta t [Q_{in} + Q_{out}] \quad (13)$$

$$H_p - Z = \kappa_v \frac{Q_{in}^2}{2gA_v^2} + \frac{P_{air} - P_{atm}}{\rho g} \quad (14)$$

$$\frac{P_{air} - P_{atm}}{\rho g}$$

با ترکیب معادله‌ها ۱۲، ۱۳، ۱۴ و معادله مشخصه مثبت (معادله ۳)، معادله‌ها زیر حاصل می‌شود:

$$P_{air} [(\nabla_a)_t + 0.5\Delta t (Q_{in} + Q_{out})] = \left[ m_t + 0.5\Delta t (\dot{m}_t + \dot{m}_{t+\Delta t}) \right] RT \quad (15)$$

$$\frac{(C_1 - Q_{in})}{C_2 - Z_B} - Z = \kappa_v \frac{Q_{in}^2}{2gA_v^2} + \frac{(P_{air} - P_{atm})}{\rho g} \quad (16)$$

در معادله‌های فوق  $P_{air}$  فشار بسته هوا درون لوله،  $\nabla_a$  حجم بسته هوا،  $m$  جرم بسته هوا،  $R$  ثابت گاز،  $T$  دمای مطلق،  $Q_{in}$  دبی ورودی به مرز،  $Q_{out}$  دبی خروجی از مرز،  $\dot{m}$  نرخ جرم جریان ورودی یا خروجی هوا از بسته هوا،  $P_{atm}$  فشار جو،  $Z$  تراز شیر کنترل و  $\kappa_v$  ضریب افت هد شیر کنترل که با درونیابی بدست می‌آید (Chaudhry, 1979).

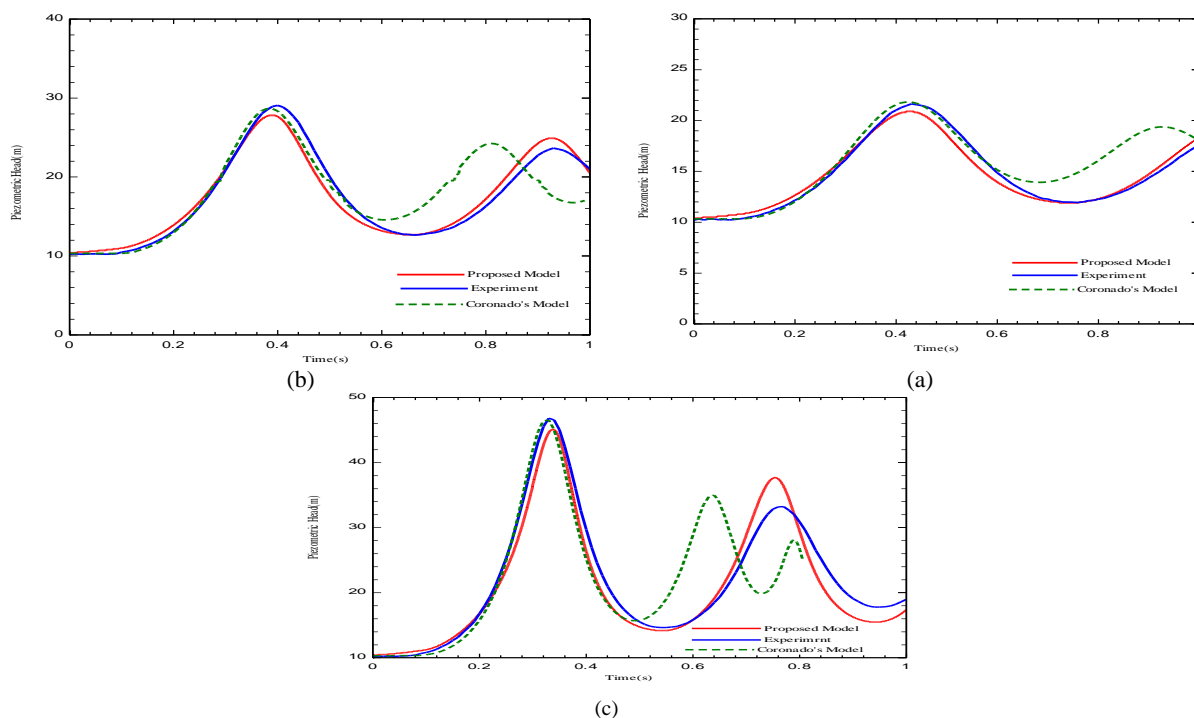
معادله‌های شیر هوا شامل دو بخش ورودی و خروجی است که این دو بخش مربوط به خروج هوا از خط و ورود هوا به درون خط است. با توجه به شرایط جریان در ورودی و خروجی چهار حالت جریان ورودی مادون صوت<sup>۱</sup>، جریان ورودی بحرانی<sup>۲</sup>، جریان خروجی مادون صوت<sup>۳</sup> و جریان خروجی بحرانی<sup>۴</sup> (معادله‌های ۱۷-۲۱) به

1 Subsonic Air Flow In  
2 Critical Flow In  
3 Subsonic Air Flow Out  
4 Critical Flow Out



پیشنهادی در شکل ۳ (a-c به ترتیب) ارائه شده است (Coronado-Hernández et al., 2019).

مقایسه تاریخچه زمانی فشار هوای محبوس بدست آمده از نتایج آزمایشگاهی، مدل ستون صلب یکبعدی و مدل



**Fig. 3** Comparison of the current Model, experimental data, and Numerical Model (a) case1, upstream pressure = 0.5 bar, (b) case2, upstream pressure = 0.75 bar and (c) case3, upstream pressure = 1.25 bar

شکل ۳ مقایسه بین مدل پیشنهادی و داده‌های عددی و آزمایشگاهی، مدل (a)، مدل (b) و مدل (c)

این امر در واقعیت امکان‌پذیر نیست (Malekpour and Karney, 2014). مدل‌های ستون صلب برای لوله‌های کوتاه کاربرد بیشتری دارد. در مدل ارائه شده کسر خلا بسته هوا در حدود ۰.۲۵/طول کل لوله نیز ۳/۸۸ متر است و همین بزرگ بودن کسر خلا بسته هوا و کوتاه بودن طول لوله منجر به سازگاری مدل یکبعدی صلب و کشسان در سیکل اول شده‌است. مدل‌های کشسان (مدل پیشنهادی) توانایی بسیار خوبی در مدل‌سازی احجام بزرگ و کوچک بسته‌های هوا دارند و نسبت به مدل‌های صلب نتایج دقیق‌تری را ارائه می‌دهند. درصد خطای مدل پیشنهادی با نتایج آزمایشگاهی در چرخه نخست برای مدل‌های ۱ تا ۳ کمتر از ۶٪ است. این سازگاری بالای نتایج مدل عددی پیشنهادی با نتایج آزمایشگاهی، نشان‌دهنده دقیق بودن مدل عددی پیشنهادی است. در شکل ۳ مشاهده می‌شود که در چرخه دوم مقدار فشار محاسبه شده توسط مدل پیشنهادی از میزان آزمایشگاهی کمی بیشتر است که علت‌های مختلفی برای توضیح این

همان‌گونه که ملاحظه می‌گردد تاریخچه زمانی فشار هوای محبوس در مدل پیشنهادی سازگاری بسیار خوبی با نتایج آزمایشگاهی به ویژه در چرخه نخست دارد. از آنجایی که در طراحی خطوط لوله بیشترین فشار در معیارهای طراحی خط دارای اهمیت ویژه‌ای است، مدل پیشنهادی در بیشترین فشار که همان نخستین چرخه محاسبه‌ای است از دقت بسیار بالایی برخوردار است. افزون بر درستی سنجی مدل پیشنهادی با نتایج آزمایشگاهی، مدل پیشنهادی با مدل ستون صلب Coronado-Hernández et al. نیز مقایسه شده‌است. همان‌طور که در بخش‌های پیشین بیان شد، مدل ستون صلب اضافه فشار بیشتری را برآورد کند و هنگامی که کسر خلا بسته هوا کوچک باشد مناسب نیستند (Zhou et al., 2011a). علت دقیق نبودن مدل ستون صلب نسبت به مدل کشسان (مدل پیشنهادی) این است که در مدل ستون صلب ویژگی کشسان آب و لوله در نظر گرفته نمی‌شود و فرض می‌شود که سرعت انتشار امواج فشاری بی‌نهایت است که

در بالادست با ارتفاع ثابت ۵ متر آب و با تراز ۱۱۰۰ متر از سطح دریا، یک خط لوله دارای فراز و نشیب با طول کلی ۱۵۹۰۰ متر و متشکل از ۱۳ لوله سری است. آخرین لوله این خط با تراز ۸۵۰ متر از سطح دریا خالی است و می‌بایست دوباره پر شود. بدین منظور یک شیر کنترل جریان در بالادست این لوله و روی یک کنارگذر تعبیه شده است. یک شیر هوا نیز به منظور کنترل بهینه هوا در انتهای لوله خالی پیش‌بینی شده است. طول لوله‌های  $L_1$  تا  $L_{13}$  به ترتیب برابر با ۱۰۰۰، ۱۴۰۰، ۹۰۰، ۲۰۰۰، ۱۳۰۰، ۸۰۰، ۱۴۰۰، ۵۰۰، ۲۰۰۰، ۱۱۰۰، ۹۰۰ و ۱۶۰۰ متر است. قطر، ضریب دارسی و ایسباخ و سرعت موج در همه لوله‌ها ثابت و به ترتیب برابر با ۰/۹ متر، ۰/۱۸ و ۱۰۰۰ متر بر ثانیه است. شیر کنترل دارای قطر ۰/۹ متر است و قطر روزه‌های ورودی و خروجی شیر هوا یکسان و برابر ۰/۱۵ متر در نظر گرفته شده است.

برابر شکل ۴ طول کل ستون آب  $L_w=14300$  متر و طول لوله‌ای که می‌بایست پر شود  $L_a=1600$  متر است و به دلیل خالی بودن این لوله فشار جو در آن وجود دارد. برای یافتن فراسنجه‌های کلیدی در مدل ارائه شده، دو معیار فشار بیشینه و کمینه در نظر گرفته شده است. آستانه فشار بیشینه در حدود ۲۵٪ فشار حالت ایستایی (معادل ۱۱۶۰ متر آب) در نظر گرفته شده است. پروفیل خط جریان نیز جهت شناسایی فشارهای منفی ترسیم شده است.

خطوط لوله با کامپیوتری با ویژگی‌های Lenovo ThinkPad E540 با پردازشگر Intel(R) Core(TM) i7-4702MQ CPU و 8GB RAM جهت اجرای کد فرتن برای مدل‌سازی خط لوله پیشنهادی استفاده شده است. زمان محاسبه‌ای برای مدل‌سازی‌های ۲۰۰۰، ۳۰۰۰ و ۴۰۰۰ ثانیه به ترتیب برابر با ۸۳/۵۶، ۱۲۲/۲۳ و ۱۶۰/۵۶ ثانیه است.

اختلاف وجود دارد. از جمله این علت‌ها این است که در مدل محاسبه‌ای، هوا به صورت یک پارچه فرض می‌شود در حالیکه در واقعیت بسته هوا در طی جریان گذرا به بسته‌های کوچک شکسته می‌شود (Zhou et al., 2002). دلیل دیگر این است که در مدل محاسبه‌ای مرز مشترک آب و هوا عمودی فرض شده است که صحت این فرض در مشاهده‌های آزمایشگاهی قابل تایید نیست. از علت‌های دیگر می‌توان به این نکته اشاره نمود که مدل یک بعدی ارائه شده قادر به مدل‌سازی انتقال حرارت بین دو فاز آب و هوا نیست که این امر در واقعیت وجود دارد. افزون بر این اثرات اصطکاک در مدل محاسبه‌ای ارائه شده به صورت ثابت در نظر گرفته شده است اما در موارد مشاهده شده آزمایشگاهی جریان گذرا سبب افزایش نیروی اصطکاک شده و قادر است استهلاك انرژی را تشدید نماید (Malekpour and Karney, 2019). با این وجود اثر جریان گذرا بر افزایش استهلاك فشار تنها در لوله‌های با قطرهای کوچک و در مقیاس آزمایشگاهی شایان ملاحظه است (Duan et al., 2012). به‌طور کلی در مدل‌های یک‌بعدی صلب و کشسان نتایج حاصل از فشار کمی بالاتر از میزان‌های آزمایشگاهی است که این نشان‌دهنده محافظه‌کار بودن مدل‌های یک بعدی است.

#### ۴- روش تحقیق

جهت انجام بررسی‌ها عددی از یک خط لوله طویل فرضی که به صورت ثقیلی کار می‌کند استفاده شده است. شکل ۴ پیکربندی خط لوله مورد استفاده در این بررسی را نشان می‌دهد. گرچه خط لوله پیشنهادی در شکل ۴ فرضی می‌باشد اما درجه عمومیت آن به حدی است که می‌تواند نماینده خوبی برای بخشی از یک خط لوله واقعی که برای انجام عملیات تعمیر و مرمت از دیگر بخش‌های آن مجزا شده است باشد. این خط لوله شامل یک مخزن

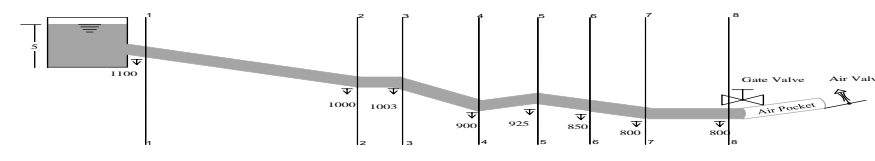


Fig. 4 Schematic of the hypothetical pipe system utilized in the numerical exploration

شکل ۴ شمایی از مسئله مورد بررسی

## ۵- نتایج عددی و بحث

بررسی‌های عددی گسترده نشان می‌دهد که هیدرولیک پرکردن در خطوط لوله به عامل‌های مختلفی مانند قطر شیر کنترل (که فرض می‌شود برابر با قطر کنارگذر است)، قطر روزنه خروجی شیر هوا و زمان بازشدن شیر کنترل جریان بستگی دارد.

به دنبال بازشدن سریع شیر کنترل، آب به درون لوله خالی نفوذ می‌کند و یک ستون آب متحرک ایجاد می‌کند که مانند یک پیستون برای فشار دادن هوای داخل لوله عمل می‌کند. اگر قطر روزنه خروجی شیر هوا بزرگ باشد، هوا بدون افزایش فشار زیاد از لوله خارج می‌شود. اختلاف فشار قابل توجه بوجود آمده در دو سمت شیر کنترل باعث می‌شود که ستون آب شتاب گرفته و در حالی که به سمت جلو حرکت می‌کند سرعت آن نیز افزایش پیدا کند. پس از این که ستون آب به طول معینی رسید، نیروی اصطکاک لوله غالب می‌شود و باعث می‌شود که ستون آب در حال پر شدن با سرعت ثابت حرکت کند. در نهایت هنگامی که هوا به کل از لوله خارج شد، ستون آب در انتهای خط لوله متوقف شده و فشارهای ضربه قوچ شایان توجهی بوجود می‌آید.

امواج القاشده ضربه قوچی در سراسر خط لوله منتشر می‌شود و کل خط لوله را تحت تاثیر قرار می‌دهد. انعکاس فشارهای ضربه قوچی منجر به ایجاد فشارهای منفی شایان توجهی می‌شود که به بالادست منتشر شده و در قسمت‌هایی از لوله شرایط خلا را بوجود می‌آورد. شایان ذکر است که انعکاس فشار ضربه قوچی در انتهای لوله تنها عامل ایجاد فشارهای منفی نیست. بدون فاصله پس از بازشدن شیر کنترل، یک موج کاهنده فشار<sup>۱</sup> در بالادست شیر ایجاد شده و در سراسر لوله منتشر می‌شود. این موج کاهنده فشار نیز می‌تواند به قدری شدید باشد که فشارهای منفی را در بخش‌هایی از لوله بوجود آورد. برای درک بهتر بحث یادشده، شکل a5 و b5 ترسیم شده است که پاسخ‌های ناپایدار خط لوله ناشی از بازکردن سریع شیر کنترل را نشان می‌دهد. در این حالت قطر شیر کنترل و قطر نازل خروجی شیر هوا به ترتیب برابر با ۰/۱۵ و ۰/۹

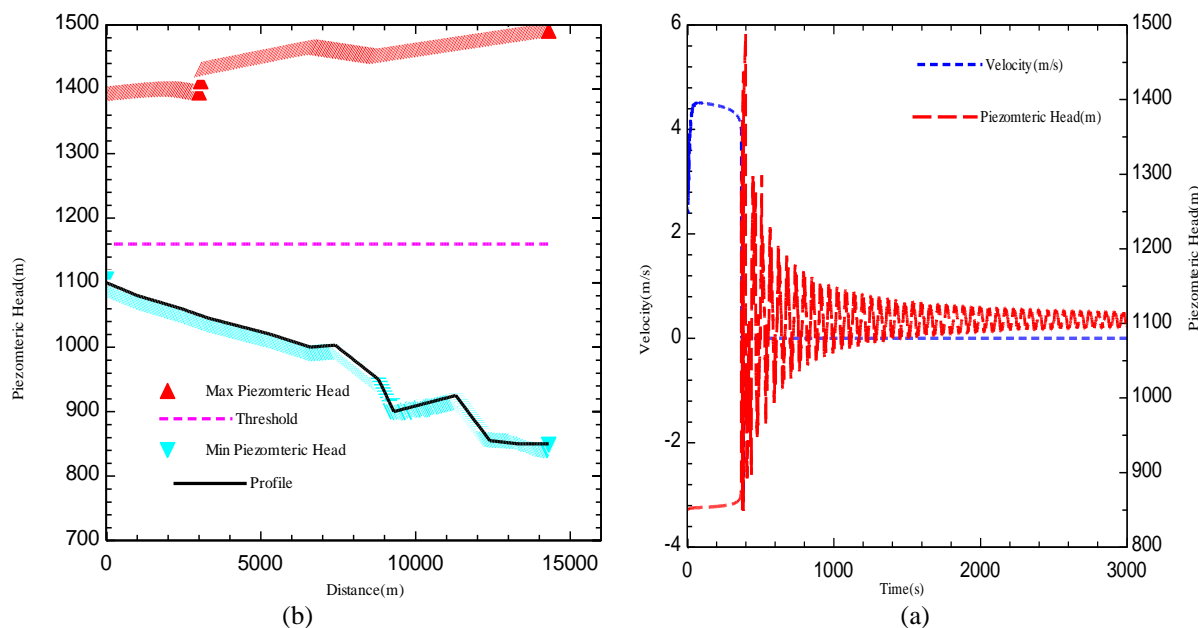
متر است.

شکل a5 تاریخچه زمانی سرعت پرشدن و ارتفاع پیژومتریک تولید شده در شیر را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، پس از بازشدن شیر، سرعت پرشدن به ۴/۵ متر بر ثانیه افزایش یافته و تا حدودی ثابت می‌ماند تا ستون آب به انتهای خط برسد.

توقف ستون آب فشارهای ضربه قوچی شایان توجهی را در سراسر خط لوله ایجاد می‌کند که ارتفاع پیژومتریک را به حدود ۱۵۰۰ متر در محل شیر کنترل افزایش می‌دهد. شکل b5 بیشینه و کمینه ارتفاع پیژومتریک را در سراسر لوله نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، بیشینه ارتفاع پیژومتریک بسیار بالاتر از خط آستانه است. همچنین مشاهده می‌شود که در کل خط فشار خلا بوجود آمده است.

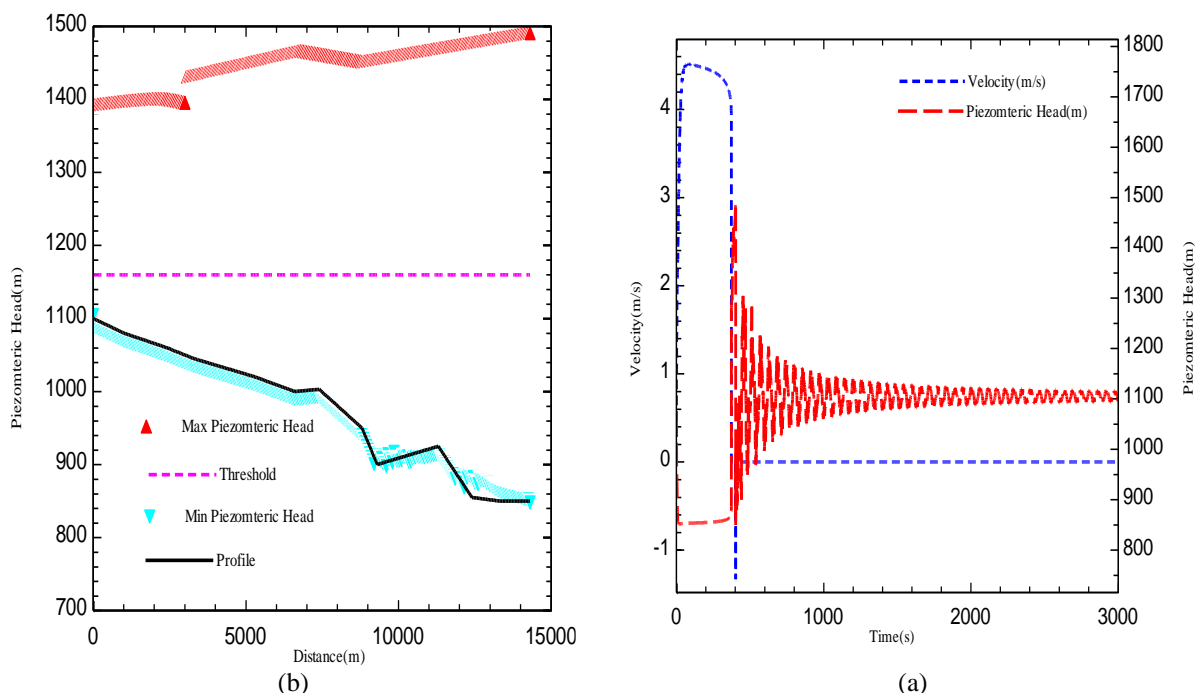
افزایش زمان بازشدن شیر کنترل جریان می‌تواند شدت فشار منفی را کاهش دهد و می‌تواند به عنوان یک راهکار برای کنترل فشارهای ناپایدار در حین پرکردن استفاده شود. هنگامی که شیر کنترل به تدریج باز می‌شود، امواج کاهنده فشار به سمت مخزن حرکت می‌کنند. امواج کاهنده فشار در مخزن منعکس شده و به عنوان یک سری امواج مثبت به سمت شیر کنترل حرکت می‌کنند. امواج مثبت القا شده، در حین رسیدن به شیر کنترل، از شدت امواج کاهنده فشار که در محل شیر کنترل در حال تشکیل شدن است می‌کاهد. بنابراین، زمان بازشدن بیشتر از  $\frac{2L}{a}$  تضمین می‌کند که امواج منعکس شده در مخزن پیش از بازشدن کامل شیر کنترل به محل شیر رسیده و در نتیجه شدت امواج منفی را کاهش می‌دهد. هرچه زمان بازشدن شیر کنترل بیشتر باشد، فشارهای منفی نیز کمتر می‌شوند.

برای بررسی عددی تاثیرات زمان بازشدن شیر کنترل، دو شبیه‌سازی با زمان‌های ۲۰ و ۴۰ ثانیه انجام شده است که نتایج آنها در شکل‌های ۶ و ۷ نمایش داده شده است. قطر نازل خروجی شیر هوا و قطر شیر کنترل به ترتیب برابر با ۰/۹ و ۰/۱۵ متر در نظر گرفته شده است. مشاهده می‌شود که زمان بازشدن شیر کنترل، در این مورد، بر شدت فشارهای منفی در سرتاسر خط لوله تاثیر بسزایی نمی‌گذارد.



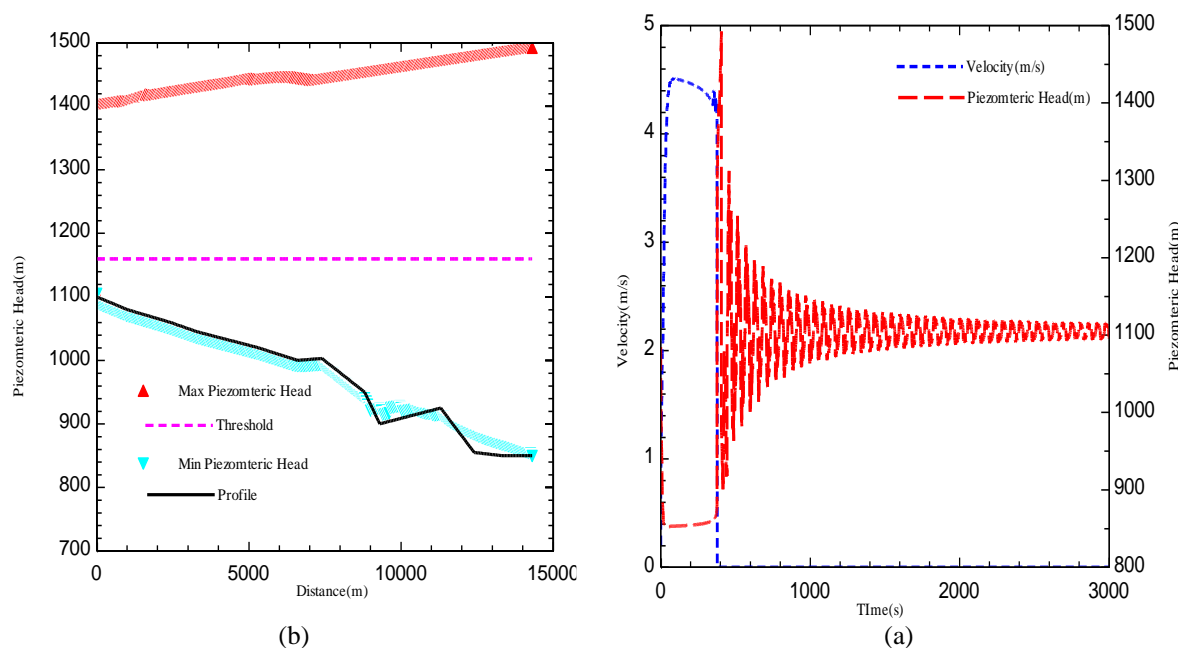
**Fig. 5** Transient responses of the system for valve diam. = 0.9 m, AV's nozzle diam. = 0.15m and valve opening time = 0 s; (a) velocity and piezometric head time history at the valve location (b) Max. and min. piezometric head envelopes developed across the pipe.

شکل ۵ پاسخ گذرای خط لوله برای قطر شیر کنترل ۰/۹ متر و برای قطر روزه خروج هوا ۰/۱۵ متر و زمان باز شدن شیر کنترل ۰ ثانیه؛ (a) تاریخچه زمانی سرعت و ارتفاع پیزومتریک در محل شیر کنترل (b) بیشینه و کمینه ارتفاع پیزومتریک توسعه یافته شده در سراسر لوله



**Fig. 6** Transient response of the system for valve diam. = 0.9 m, AV's nozzle diam. = 0.15m and valve opening time = 20 s; (a) velocity and piezometric head time history at the valve location (b) Max. and min. piezometric head envelopes developed across the pipe

شکل ۶ پاسخ گذرای خط لوله برای قطر شیر کنترل ۰/۹ متر، قطر نازل خروج هوا ۰/۱۵ متر و زمان باز شدن شیر کنترل ۲۰ ثانیه. (a) تاریخچه زمانی ارتفاع پیزومتریک و سرعت در محل شیر کنترل، (b) بیشینه و کمینه ارتفاع پیزومتریک توسعه یافته در کل لوله



**Fig. 7** Transient response of the system for valve diam. = 0.9 m, AV's nozzle diam. = 0.15m and valve opening time = 40 s; (a) velocity and piezometric head time history at the valve location (b) Max. and min. piezometric head envelopes developed across the pipe.

شکل ۷ پاسخ گذرای خط لوله برای قطر شیر کنترل ۰/۹ متر، قطر نازل خروج هوا ۰/۱۵ متر و زمان بازشدن شیر کنترل ۴۰ ثانیه. (a) تاریخچه زمانی ارتفاع پیزومتریک و سرعت در محل شیر کنترل، (b) بیشینه و کمینه ارتفاع پیزومتریک توسعه یافته در کل لوله

زمان بازشدن شیر کنترل تاثیر شایان توجهی بر هیدرولیک پرکردن ندارد.

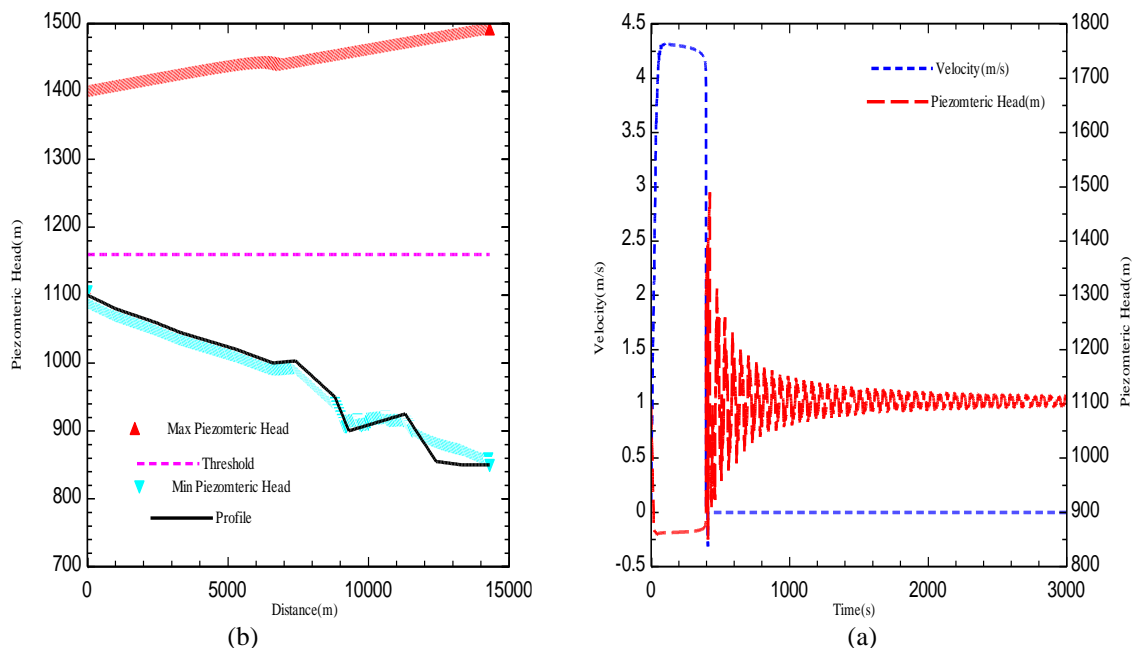
شدت فشار ضربه قوچی را می‌توان با کاهش سرعت برخورد ستون متحرک به انتهای لوله کاهش داد. یک روش برای کاهش سرعت ستون آب، کاهش سرعت جریان در حال پر شدن است که با تولید هدررفت انرژی بیشتر در شیر کنترل جریان قابل دستیابی می‌باشد. یک خط کنارگذر با قطر کمتر از قطر شیر کنترل، امکان استفاده از اندازه کوچک‌تر شیر کنترل را فراهم می‌کند که به موجب آن می‌توان افت فشار را به میزان شایان توجهی افزایش داد.

شکل‌های ۸ و ۹ پاسخ‌های ناپایدار خطوط لوله برای قطر خط کنارگذر به ترتیب ۰/۶ و ۰/۲ را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که با تعبیه کنارگذر به منظور کاهش قطر شیر کنترل جریان، فشارهای مثبت و منفی به طرز قابل توجهی کاهش پیدا می‌کند. شکل ۹ نشان می‌دهد که اندازه کنارگذر ۰/۲ متر می‌تواند فشارهای منفی را از حدود نیمی از لوله حذف کرده و به طرز قابل ملاحظه‌ای بیشترین فشار را در سراسر خط لوله کاهش دهد.

همان‌طور که پیشتر بیان شد، زمان بازشدن شیر کنترل تنها دلیل کاهش فشارهای منفی در خط لوله نیست. فشارهای منفی همچنین می‌تواند هنگامی رخ دهد که امواج فشاری مثبت القاشده به خط لوله در انتهای لوله در همان انتهای لوله منعکس شود. این نتیجه‌گیری بیان می‌کند که فشارهای منفی را می‌توان با کاهش امواج فشاری مثبت ضربه قوچی کنترل کرد.

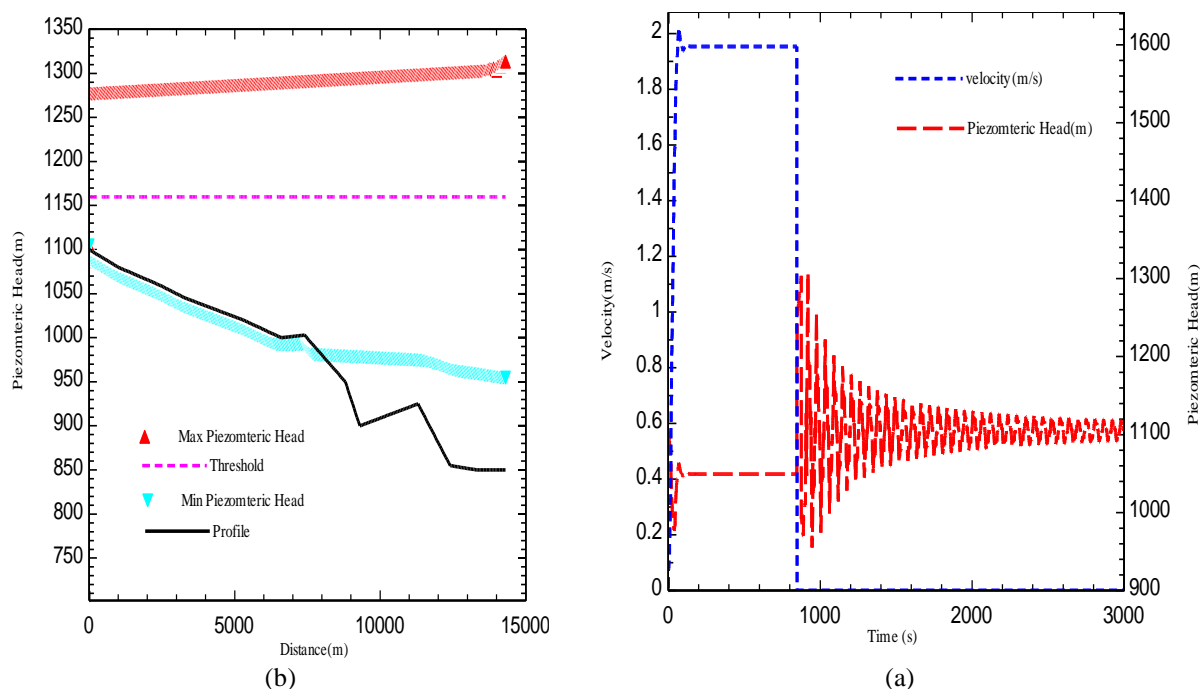
در جدول‌های ۱-۳،  $PIR$  نرخ افزایش فشار،  $PRR$  نرخ کاهش فشار،  $T_0$  زمان باز کردن شیر پایین دست،  $d_B$  قطر کنارگذر،  $d_0$  قطر خروجی روزنه در شیر هوا،  $T_{Ex}$  زمان خروج بسته هوا از خط لوله،  $\Delta H$  امواج فشاری ضربه قوچی که برابر با اختلاف بیشترین فشار و کمترین فشار در خط لوله است، می‌باشد. در جدول‌های ۱-۳، بیشترین و کمترین ارتفاع پیزومتریک در مرز پایین دست و در محل شیر کنترل رخ داده است.

جدول ۱ اطلاعات کلیدی مرتبط با شکل‌های ۵، ۶ و ۷ را نشان می‌دهد. نشانه منفی در جدول ۱ نشان می‌دهد که ارتفاع پیزومتریک در محل شیر کنترل کمتر از تراز شیر کنترل است. نتایج جدول ۱ همچنین نشان می‌دهد که



**Fig. 8** Transient responses of the system for valve diam. = 0.6 m, AV's nozzle diam. =0.15m and valve opening time = 40 s; (a) velocity and piezometric head time history at the valve location (b) Max. and min. piezometric head envelopes developed across the pipe.

شکل ۸ پاسخ گذرای خط لوله برای قطر شیر کنترل ۰/۶ متر، قطر نازل خروج هوا ۰/۱۵ متر و زمان باز شدن شیر کنترل ۴۰ ثانیه. (a) تاریخچه زمانی ارتفاع پیزومتریک و سرعت در محل شیر کنترل، (b) بیشینه و کمینه ارتفاع پیزومتریک توسعه یافته در کل لوله



**Fig. 9** Transient responses of the system for valve diam. = 0.2 m, AV's nozzle diam. =0.15m and valve opening time = 40 s; (a) velocity and piezometric head time history at the valve location (b) Max. and min. piezometric head envelopes developed across the pipe

شکل ۹ پاسخ گذرای خط لوله برای قطر شیر کنترل ۰/۲ متر، قطر نازل خروج هوا ۰/۱۵ متر و زمان باز شدن شیر کنترل ۴۰ ثانیه. (a) تاریخچه زمانی ارتفاع پیزومتریک و سرعت در محل شیر کنترل، (b) بیشینه و کمینه ارتفاع پیزومتریک توسعه یافته در کل لوله

جدول ۱ فراسنجه‌های هیدرولیکی موثر در زمان‌های مختلف باز شدن شیر کنترل

Table 1 Key hydraulic parameters for different valve opening time

To(s)	db(m)	do(m)	T <sub>Ex</sub> (s)	PIR(%)*	PRR(%)**	ΔH(m)
0	-	0.15	383	256.1	-3.92	650.2
20	-	0.15	373	256.3	-0.72	642.6
40	-	0.15	377	257	-0.16	642.8

$$PIR = \frac{\left(\frac{P}{\gamma}\right)_{Max} - (Elevation)_{Bypass}}{(H)_{Static}} \quad * \text{ Pressure Increase Rate}$$

$$PRR = \frac{\left(\frac{P}{\gamma}\right)_{Min} - (Elevation)_{Bypass}}{(H)_{Static}} \quad ** \text{ Pressure Reduction Rate}$$

جدول ۲ نتایج هیدرولیکی کلیدی در قطرهای مختلف کنارگ

Table 2 Key hydraulic results for different sizes of the bypass

To (s)	db(m)	do(m)	T <sub>Ex</sub> (s)	PIR(%)	PRR(%)	ΔH(m)
40	-	0.15	377	256.8	-0.16	642.8
40	0.6	0.15	395.5	256.88	-0.32	643
40	0.2	0.15	846.9	185.32	41.92	358.5

کاهش پیدا می‌کند. روزنه خروج هوا با قطر کوچک‌تر، خروج هوا را محدود کرده و باعث می‌شود هوا فشرده شده و به فشار بیشتری دست یابد. افزایش فشار هوا، گرادیان هیدرولیکی در دو طرف شیر را کاهش داده و منجر به کاهش سرعت ستون آب می‌شود.

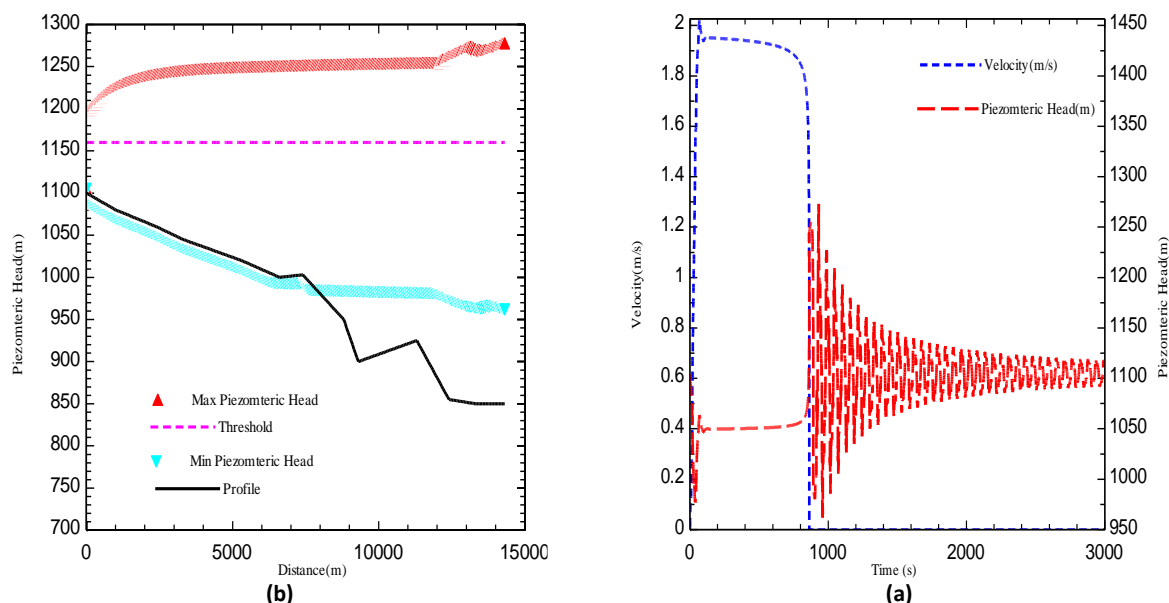
شکل‌های ۱۰ و ۱۱ به ترتیب پاسخ‌های ناپایدار خط لوله را برای قطر نازل خروج هوای ۰/۰۸ و ۰/۰۱۵ متر نشان می‌دهد.

شکل‌های ۱۰ و ۱۱ نشان می‌دهد که قطر ۰/۰۱۵ متر برای نازل خروج هوا فشارهای منفی را از خط لوله حذف می‌کند و ارتفاع پیزومتریک بیشینه را نیز در پایین خط آستانه حفظ می‌کند. شکل ۱۱a دونه نوسان فشار را با بسامدهای مختلف نشان می‌دهد. پیش از ۲۵۵۴/۵ ثانیه، هوا هنوز در خط لوله وجود دارد و به دلیل انبساط و انقباض‌های پی در پی ناشی از وجود هوا در خطوط لوله، نوسانات با بسامد کمتری رخ می‌دهد. هنگامی که آخرین بسته هوا در زمان ۲۵۵۴/۵ ثانیه از خط لوله خارج می‌شود، ستون آب با سرعت کمتری به انتهای لوله برخورد می‌کند و فشارهای ضربه قوچی با نوسان‌های بالا و دامنه کم ایجاد می‌شود.

جدول ۲ اطلاعات کلیدی مرتبط با شکل‌های ۷، ۸ و ۹ را نشان می‌دهد. همان‌طور که در جدول ۲ مشاهده می‌شود با کاهش قطر کنار گذر از ۰/۶ متر به ۰/۲ متر، کمینه ارتفاع پیزومتریک در مرز پایین دست افزایش چشمگیری پیدا می‌کند. با کاهش قطر کنارگذر به ۰/۲ متر، نرخ کاهش فشار به میزان ۴۲/۲۴٪ افزایش پیدا کرده و نرخ افزایش فشار نیز ۷۱/۵۶٪ کاهش می‌یابد. با افزایش نرخ کاهش فشار و کاهش نرخ افزایش فشار، امواج فشاری ضربه قوچی نیز حدود ۴۴٪ کاهش پیدا می‌کند.

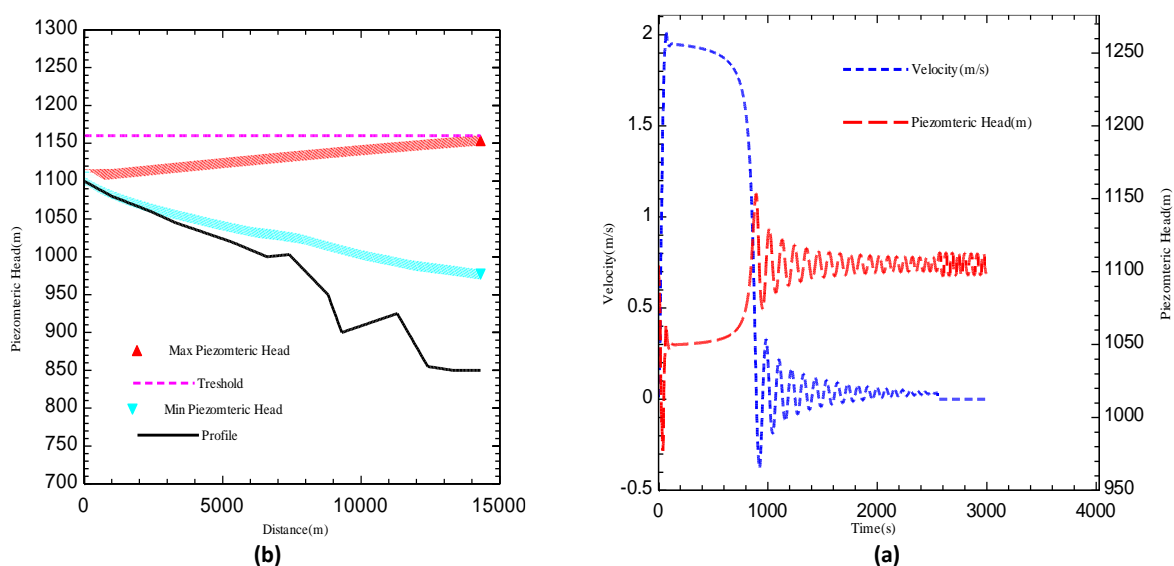
لازم به یادآوری است که فشار زیاد در بالادست شیر، ستون آب را با نیروی قابل توجهی به حرکت درمی‌آورد، حتی هنگامی که از یک کنارگذر با قطر کوچک جهت افزایش افت انرژی در خط لوله استفاده می‌شود. همان‌طور که در شکل ۹b مشاهده می‌شود، در قسمت‌های نزدیک مخزن ارتفاع پیزومتریک پایین‌تر از پروفیل لوله است و فشار منفی در خط لوله وجود دارد. برای حذف فشار منفی در قسمت بالایی خط لوله، در صورتی که کاهش بیشتر قطر کنارگذر مقدر نباشد باید اقدام‌های دیگری صورت گیرد.

کاهش قطر روزنه خروج هوا می‌تواند سرعت ستون آب را کاهش دهد و در نتیجه امواج فشاری ضربه قوچی نیز



**Fig. 10** Transient responses of the system for valve diam. = 0.2 m, AV's nozzle diam. = 0.08 m and valve opening time = 40 s; (a) velocity and piezometric head time history at the valve location (b) Max. and min. piezometric head envelopes developed across the pipe.

شکل ۱۰ پاسخ گذرای خط لوله برای قطر شیر کنترل ۰/۲ متر، قطر نازل خروج هوا ۰/۰۸ متر و زمان باز شدن شیر کنترل ۴۰ ثانیه. (a) تاریخچه زمانی ارتفاع پیزومتریک و سرعت در محل شیر کنترل، (b) بیشینه و کمینه ارتفاع پیزومتریک توسعه یافته در کل لوله



**Fig. 11** Transient responses of the system for valve diam. = 0.2 m, AV's nozzle diam. = 0.015 m and valve opening time = 40 s; (a) velocity and piezometric head time history at the valve location (b) Max. and min. piezometric head envelopes developed across the pipe.

شکل ۱۱ پاسخ گذرای خط لوله برای قطر شیر کنترل ۰/۲ متر، قطر نازل خروج هوا ۰/۰۱۵ متر و زمان باز شدن شیر کنترل ۴۰ ثانیه. (a) تاریخچه زمانی ارتفاع پیزومتریک و سرعت در محل شیر کنترل، (b) بیشینه و کمینه ارتفاع پیزومتریک توسعه یافته در کل لوله

کاهش فشار ۶/۲۸٪ افزایش می‌یابد. همان‌طور که انتظار می‌رود با کاهش قطر نازل خروج هوا، امواج فشاری ضربه قوچی حدود ۴۴٪ کاهش می‌یابد.

جدول ۳ نتایج کلیدی مرتبط با شکل‌های ۹، ۱۰ و ۱۱ را خلاصه کرده و نشان می‌دهد هنگامی که اندازه نازل خروج هوا از ۰/۰۸ متر به ۰/۰۱۵ متر کاهش پیدا می‌کند، نرخ افزایش فشار در شیر کنترل ۴۹/۷۲٪ کاهش یافته و نرخ



جدول ۳ نتایج هیدرولیکی کلیدی در قطرهای مختلف نازل خروج هوا  
**Table 3** Key hydraulic parameters for different sizes of the air valve's nozzle's diameter

To(s)	dB(m)	do(m)	T <sub>Ex</sub> (s)	PIR(%)	PRR(%)	(ΔH(m)
40	0.2	0.15	846.9	185.2	41.92	358.5
40	0.2	0.08	819.4	171.08	44.56	316.3
40	0.2	0.015	2554.5	121.36	50.84	176.3

### ۶- نتیجه گیری

چگونگی پرکردن لوله بسیار مهم بوده و نبود یک دستورکار بهره‌برداری مناسب می‌تواند منجر به تخریب خط لوله گردد. افزون براین جهت اعمال یک دستورکار بهره‌برداری نیاز است که اندازه، نوع و محل تجهیزات هیدرومکانیکال در زمان مطالعات تعیین شود. این‌گونه اطلاعات به‌طور معمول براساس انجام بررسی‌های هیدرولیکی دقیق بر روی سناریوهای مختلف بهره‌برداری قابل حصول بوده که متأسفانه در زمان بررسی‌ها و طراحی از آن صرف‌نظر می‌گردد. هدف این پژوهش یافتن برخی عامل‌های موثر بر هیدرولیک لوله‌های در حال پر شدن است. برای این منظور، یک مدل عددی برای محاسبه هیدرولیک لوله‌های در حال پرشدن پیشنهاد شده‌است. دقت مدل پیشنهادی با داده‌های عددی و آزمایشگاهی درستی‌سنجی شده‌است. همان‌طور که در بخش‌های پیشین بیان شد، مدل یک بعدی برای محاسبه فشارهای گذرای حاصل پرکردن خطوط لوله، دقت بالایی داشته است و نسبت به مدل‌های سه‌بعدی موجود به لحاظ عملی برتری دارد. در مدل‌های یک‌بعدی زمان محاسبه‌ها بسیار کوتاه بوده و هزینه محاسبه‌ای کمتری را دارند. علاوه بر این در مدل‌های یک‌بعدی امکان مدل‌سازی شرایط مرزی پیچیده فراهم بوده و همچنین برای مدل‌سازی پرکردن خطوط لوله که نیاز به آزمون و خطا دارد، بسیار مناسب است. مدل پیشنهادی یک مدل یک‌بعدی کشسان است که از روش مشخصه برای حل معادله‌های ضربه قوچی و همچنین از مدل حفره گاز منقطع برای شبیه‌سازی رفتار جدایی ستون استفاده کرده‌است. جریان دوفازی در ناحیه در حال پر شدن از طریق یک شرط مرزی به خط لوله اعمال شده است. با استفاده از مدل‌سازی یک خط لوله طویل فرضی(اما

- مشابه با واقعیت) نتایج زیر حاصل شده‌است:
- مدل پیشنهادی می‌تواند به‌خوبی در تجزیه و تحلیل هیدرولیک پرکردن خطوط لوله و در طراحی ایمن فرآیند پرکردن کمک کند.
  - بدون در نظر گرفتن یک دستورکار مناسب برای پرکردن خطوط لوله، فشارهای ناپایدار حاصل می‌تواند منجر به گسیختگی خط لوله شوند.
  - بدون در نظر گرفتن یک کنارگذر مناسب، کنترل فشارهای منفی در خط غیر ممکن است.
  - نرخ بازشدن شیر کنترل جریان ممکن است نقش مهمی در کنترل فشارهای بیشینه و کمینه القایی داشته باشد.
  - کاهش قطر روزنه خروج هوا فشارهای ناپایدار حاصل را به میزان شایان توجهی کاهش می‌دهد ولی در عین حال زمان پرشدن را طولانی می‌کند.
  - یک دستورکار بهینه را می‌توان از طریق یک روش تکراری به‌دست آورد که در آن قطر کنارگذر و قطر روزنه خروج هوا و همچنین زمان بازشدن شیر کنترل جریان را می‌توان به‌گونه‌ای تعیین کرد که بیشترین کمترین فشارهای ناپایدار در محدوده قابل قبول باقی بماند و پرکردن در سریع‌ترین زمان ممکن انجام شود.

### ۷- فهرست و نشانه‌ها

$v$	سرعت سیال ( $ms^{-1}$ )
$H$	ارتفاع پیژومتریک (m)
$g$	شتاب گرانش ( $ms^{-2}$ )
$f$	ضریب اصطکاک دارسی ویسباخ (-)
$a$	سرعت موج ( $ms^{-1}$ )
$t$	زمان (s)

$T_{Ex}$	زمان خروج بسته هوا از خط لوله (s)	$Q$	دبی جریان ( $m^3s^{-1}$ )
$d_B$	قطر کنارگذر (m)	$\Delta t$	گام زمانی (s)
$d_O$	قطر خروجی روزنه در شیر هوا (m)	$\Delta x$	دامنه محاسبه‌ای (m)
		$A$	گستره لوله ( $m^2$ )
		$\forall_P$	حجم بسته گاز در نقطه $P$ ( $m^3$ )
		$\psi$	عامل وزنی زمان (-)
		$P_0^*$	فشار مرجع (pa)
		$\alpha_0$	کسر خلا اولیه (-)
		$\forall_R$	حجم سلول محاسبه‌ای ( $m^3$ )
		$\rho$	چگالی آب ( $kgm^{-3}$ )
		$m$	جرم هوا (kg)
		$R$	ثابت گاز ( $jk^{-1}mol^{-1}$ )
		$T$	دمای مطلق (k)
		$\kappa_v$	ضریب افت بار شیر (-)
		$P_{atm}$	فشار جو (pa)
		$Z$	تراز شیر کنترل (m)
		$Q_{in}$	دبی ورودی به مرز ( $m^3s^{-1}$ )
		$Q_{out}$	دبی خروجی از مرز ( $m^3s^{-1}$ )
		$\rho_0$	چگالی هوا ( $kgm^{-3}$ )
		$P_{air}$	فشار هوا (pa)
		$A_{in}$	گستره ورودی بازشدگی شیر هوا ( $m^2$ )
		$C_{in}$	ضریب تخلیه ورودی شیر هوا (-)
		$A_{out}$	گستره خروجی بازشدگی شیر هوا ( $m^2$ )
		$C_{out}$	ضریب تخلیه خروجی شیر هوا (-)
		$L_w$	طول ستون آب (m)
		$L_a$	طول بسته هوا (m)
		$\left(\frac{P}{\gamma}\right)_{Max}$	بیشینه ارتفاع پیزومتریک (m)
		$\left(\frac{P}{\gamma}\right)_{Min}$	کمینه ارتفاع پیزومتریک (m)
		$(H)_{Static}$	ارتفاع ایستایی خط لوله (m)
		$PIR$	نرخ افزایش فشار (%)
		$PRR$	نرخ کاهش فشار (%)
		$T_o$	زمان بازکردن شیر کنترل (s)

### ۸- منابع

Abreu, J., Cabrera, E., Izquierdo, J. and García-Serra, J. (1999). Flow Modeling in Pressurized Systems Revisited. *Journal of Hydraulic Engineering*. 125(11), 1154–1169.

Cabrera, E., Abreu, J., Pérez, R. and Vela, A. (1992). Influence of Liquid Length Variation in Hydraulic Transients. *Journal of Hydraulic Engineering*. 118(12), 1639–1650.

Chaudhry, M.H. (1979). *Applied hydraulic transients*. Springer, 583p.

Coronado-Hernández, Ó.E., Besharat, M., Fuertes-Miquel, V.S. and Ramos, H.M. (2019). Effect of a Commercial Air Valve on the Rapid Filling of a Single Pipeline: A Numerical and Experimental Analysis, *Water*. 11(9), 1814.

Daneshfaraz, R., Dastgiri, S., Ali Nejad, B. and Besharat, M. (2020). Investigation of the Behavior 2D of Trapped Air in the Water Conveyance Systems During Rapid Filling or Emptying Process, *J. of Water and Wastewater*. 31(4), 156–171. (In Persian)

Duan, H.-F., Ghidaoui, M.S., Lee, P.J. and Tung, Y.K. (2012). Relevance of Unsteady Friction to Pipe Size and Length in Pipe Fluid Transients. *Journal of Hydraulic Engineering*. 138(2), 154–166.

Falvey, H.T. (1980). *Air-Water Flow in Hydraulic Structures*. Engineering Monograph No. 41, United States Department of the Interior, Water and Power Resources Service, 143p.

Fuertes-Miquel, V.S., Coronado-Hernández, O.E., Mora-Meliá, D. and Iglesias-Rey, P.L. (2019). Hydraulic modeling during filling and emptying processes in pressurized pipelines: a literature review. *Urban Water Journal*. 16(4), 299–311.

Jönsson, L. (1985). Maximum transient pressures in a conduit with check valve and air entrainment. *Proc. Int. Conf. on the Hydraulics of pumping stations*, 55–76.

Lee, N.H. (2005). *Effect of Pressurization and Expulsion of Entrapped Air in Pipelines*, PhD Thesis, University of Georgia, 149p.

- Simpson, A.R. and Bergant, A. (1994). Numerical Comparison of Pipe-Column-Separation Models. *Journal of Hydraulic Engineering*. 120(3), 361–377.
- Staff, A. (2001). Air Release, Air/Vacuum Valves and Combination Air Valves (M51). American Water Works Association.
- Vasconcelos, J.G. and Leite, G.M. (2012). Pressure Surges Following Sudden Air Pocket Entrapment in Storm-Water Tunnels. *Journal of Hydraulic Engineering*. 138(12), 1081–1089.
- Vasconcelos, J.G. and Wright, S.J. (2008). Rapid Flow Startup in Filled Horizontal Pipelines. *Journal of Hydraulic Engineering*. 134(7), 984–992.
- Wang, L., Wang, F., Karney, B. and Malekpour, A. (2017). Numerical investigation of rapid filling in bypass pipelines. *Journal of Hydraulic Research*. 55(5), 647–656.
- Wylei, E.B. and Streeter, V.L. (1978). *Fluid Transients in Systems*, McGraw-Hill International Book Co., 401 p.
- Zhou, F., Hicks, F.E., and Steffler, P.M. (2002). Transient Flow in a Rapidly Filling Horizontal Pipe Containing Trapped Air. *Journal of Hydraulic Engineering*. 128(6), 625–634.
- Zhou, L., Cao, Y., Karney, B., Vasconcelos, J.G., Liu, D. and Wang, P. (2021). Unsteady friction in transient vertical-pipe flow with trapped air. *Journal of Hydraulic Research*. 59(5), 820–834.
- Zhou, L., Liu, D., and Karney, B. (2013). Investigation of Hydraulic Transients of Two Entrapped Air Pockets in a Water Pipeline. *Journal of Hydraulic Engineering*. 139(9), 949–959.
- Zhou, L., Liu, D., Karney, B. and Zhang, Q. (2011a). Influence of Entrapped Air Pockets on Hydraulic Transients in Water Pipelines. *Journal of Hydraulic Engineering*. 137(12), 1686–1692.
- Zhou, L., Liu, D. and Ou, C. (2011b). Simulation of Flow Transients in a Water Filling Pipe Containing Entrapped Air Pocket with VOF Model. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*. 5(1), 127–140.
- Zhou, L., Wang, H., Karney, B., Liu, D., Wang, P. and Guo, S. (2018). Dynamic Behavior of Entrapped Air Pocket in a Water Filling Pipeline. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*. 144(8), 04018045.
- Lescovich, J.E. (1972). Locating and Sizing Air-Release Valves. *Journal of the American Water Works Association*. 64(7), 457–461.
- Liou, C.P. and Hunt, W.A. (1996). Filling of pipelines with undulating elevation profiles, *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*. 122(10), 534–539.
- Maddahian, R., Shaygan, F. and Bucur, D.M. (2021). Developing a 1D-3D model to investigate the effect of entrapped air on pressure surge during the rapid filling of a pipe. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Earth Environ. Sci.* 774, 012069.
- Malekpour, A. and Karney, B. (2014). Understanding of the Risks of High Pressures Following Rapid Pressurization in Pipelines Containing Entrapped Air Pockets: A Novel Energy Auditing Approach. Volume 4: Production Pipelines and Flowlines; Project Management; Facilities Integrity Management; Operations and Maintenance; Pipelining in Northern and Offshore Environments; Strain-Based Design; Standards and Regulations, American Society of Mechanical Engineers, 1–10, <https://doi.org/10.1115/IPC2014-33616>.
- Malekpour, A. and Karney, B.W. (2011). Rapid Filling Analysis of Pipelines with Undulating Profiles by the Method of Characteristics. *ISRN Applied Mathematics*, 2011, 1–16.
- Malekpour, A. and Karney, B.W. (2019). Complex interactions of water, air and its controlled removal during pipeline filling operations. *Fluid Mechanics research International Journal*. 3(1), 4–15.
- Martin, C.S. (1976). Entrapped air in pipelines, *Proceedings of the 2nd International Conference on Pressure Surges*, London.
- Martins, N.M.C., Delgado, J.N., Ramos, H.M. and Covas, D.I.C. (2017). Maximum transient pressures in a rapidly filling pipeline with entrapped air using a CFD model. *Journal of Hydraulic Research*. 55(4), 506–519.
- Lee, N.H. (2005). Effect of pressurization and expulsion of entrapped air in pipelines. PhD Thesis, Georgia Institute of Technology.
- Ramezani, L., Karney, B. and Malekpour, A. (2015). The Challenge of Air Valves: A Selective Critical Literature Review. *Journal of Water Resources Planning and Management*. 141(10), 04015017.

