

Making a Smart Pressure Reducing Valve for Reducing Pressure Fluctuation Caused by Water Hammer in Water Distribution Network Using Input-Output Feedback Linearization

M. Torshizi¹, A. Nasirian², H. Eliasi³, N. Moosavian⁴

1. MSc. Student of Water Resources Management, Dept. of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Birjand, Birjand, Iran
2. Assist. Prof., Dept. of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Birjand, Birjand, Iran
(Corresponding Author) a.nasirian@birjand.ac.ir
3. Assist. Prof., Dept. of Power Engineering, Faculty of Electrical Engineering and Computer, University of Birjand, Birjand, Iran
4. Postdoctoral., Dept. of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of British Columbia, Vancouver, Canada

(Received Feb. 25, 2022 Accepted June 13, 2022)

To cite this article:

Torshizi, M., Nasirian, A., Eliasi, H., Moosavian, N. 2022. "Making a smart pressure reducing valve for reducing pressure fluctuation caused by water hammer in water distribution network using input-output feedback linearization" Journal of Water and Wastewater, 33(3), 126-138.
Doi:10.22093/wwj.2022.331433.3242. (In Persian)

Abstract

Using pressure reducing valves to reduce the pressure in water distribution systems to the minimum of required value is one of the most effective ways for leakage reduction. Valve opening/closing, switching a pump on/off and water consumption fluctuation by a large consumer cause transient flows. Interference between transient flow and a PRV with constant needle-valve setting may intensify pressure waves in WDS. Applying smart PRVs can limit pressure fluctuation. In this research, Input-output feedback linearization method has been used for smart PRV control. The results of this method have been compared with PRV with CNVS and proportional-integral-derivative controller. A theoretical network taken from references was used to evaluate the proposed methods. Network demands include normal consumers and an industrial large consumer. Water hammer caused by consumption variations, PRV with CNVS operation, IOFL method and PID controllers were modeled in Simulink. PRV outlet head fluctuation in PRV with CNVS is 18 to 28 m in PID controller and in IOFL method are 26 to 28 m. Also, the results showed that the IOFL method has smoother and less fluctuation than PID. Root-mean-square error for PRV outlet head in CNVS, PID controller and IOFL is 1.6, 0.32 and 0.28, respectively. Therefore, IOFL method has less error and better performance than PID. Also, this method has simpler computational operations by converting nonlinear system equations to linear equations.

Keywords: Water Distribution Network, Pressure Reducing Valve, Water Hammer, PID Controller, Feedback Linearization.



مجله آب و فاضلاب، دوره ۳۳، شماره ۳، صفحه: ۱۳۸-۱۲۶

هوشمندسازی شیر فشارشکن برای کاهش نوسان فشار ناشی از چکش آبی در شبکه توزیع آب با استفاده از خطی سازی ورودی - خروجی با بازخورد

مطهره ترشیزی^۱، علی نصیریان^۲، حسین الیاسی^۳، ناصر موسویان^۴

- ۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مدیریت منابع آب، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران
 ۲- استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران
 (نویسنده مسئول) a.nasirian@birjand.ac.ir
 ۳- استادیار، گروه مهندسی قدرت، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران
 ۴- پسا دکترا، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه بریتیش کلمبیا، ونکوور، کانادا

(دریافت ۱۴۰۰/۱۲/۶ پذیرش ۱۴۰۱/۳/۲۳)

برای ارجاع به این مقاله به صورت زیر اقدام فرمایید:

ترشیزی، م.، نصیریان، ع.، الیاسی، ح.، موسویان، ن.، ۱۴۰۱، "هوشمندسازی شیر فشارشکن برای کاهش نوسان فشار ناشی از چکش آبی در شبکه توزیع آب با استفاده از خطی سازی ورودی - خروجی با بازخورد" مجله آب و فاضلاب، ۳۳(۳)، ۱۳۸-۱۲۶. Doi:10.22093/wwj.2022.331433.3242

چکیده

استفاده از شیرهای فشارشکن به منظور کاهش فشار سیستم‌های توزیع آب به حداقل مقدار موردنیاز، یکی از مؤثرترین راه‌ها برای کاهش نشت است. باز و بسته شدن شیرها، روشن و خاموش شدن پمپ و نوسان مصرف آب توسط یک مصرف کننده بزرگ، باعث به وجود آمدن جریان‌های گذرا می‌شود. تقابل بین جریان گذرا و یک شیر فشارشکن با تنظیم شیر سوزنی ثابت، ممکن است موجب تشدید امواج فشاری در سیستم توزیع آب شود. استفاده از شیرهای فشارشکن هوشمند می‌تواند نوسان فشار را محدود کند. در این پژوهش، خطی سازی ورودی - خروجی با بازخورد برای کنترل هوشمند شیر فشارشکن استفاده شد. نتایج این روش با نتایج استفاده از شیر فشارشکن با CNVS و کنترل کننده PID مقایسه شد. برای ارزیابی روش‌های پیشنهادی، یک شبکه نظری برگرفته شده از مراجع، استفاده شد. مصارف شبکه شامل مشترکین عادی و یک مصرف کننده بزرگ صنعتی بود. جریان چکش آبی ناشی از تغییرات مصرف، عملکرد شیر فشارشکن با CNVS، روش IOFL و کنترل کننده PID در نرم افزار سیمولینک مدل سازی شد. نوسان هد در محل خروج شیر فشارشکن در CNVS از ۱۸ تا ۲۸ متر، در کنترل کننده PID و روش IOFL، ۲۶ تا ۲۸ متر بود. همچنین نتایج نشان داد که روش IOFL، نوسانات ملایم تر و کمتری نسبت به PID دارد. خطای جذر میانگین مربعات هد در محل خروج شیر با CNVS، کنترل کننده PID و IOFL به ترتیب برابر ۱/۶، ۰/۳۲ و ۰/۲۸ بود. بنابراین، روش IOFL، خطای کمتر و عملکرد بهتری نسبت به PID داشت. همچنین این روش با تبدیل معادلات غیر خطی سیستم به معادلات خطی، عملیات محاسباتی ساده تری داشت.

واژه‌های کلیدی: شبکه توزیع آب، شیر فشارشکن، چکش آبی، کنترل کننده PID، خطی سازی بازخورد



۱- مقدمه

شیر فشارشکن^۱ به صورت گسترده برای کنترل فشار و کاهش نشت در شبکه‌های توزیع آب^۲ استفاده و معمولاً در ورودی یک شبکه مجزا^۳ نصب می‌شود. در مواردی شیرهای فشارشکن ممکن است درون یک شبکه توزیع آب قرار گیرند (Fontana et al., 2018). شبکه مجزا نواحی هستند که از طریق یک مخزن یا شیر فشارشکن آبرسانی می‌شود. یک شیر فشارشکن با فشار ثابت خروجی^۴، یک شیر معمولی است که فشار زیاد در محل ورود شیر را بدون توجه به مقدار جریان، به فشار کمتر و ثابت در محل خروج شیر تنظیم می‌کند (AbdelMeguid et al., 2011). شیر فشارشکن، یک شیر پیلوت^۵ و یک شیر سوزنی^۶ دارد که شیر پیلوت فشار در محل خروج شیر را تنظیم می‌کند و شیر سوزنی برای کنترل سرعت یا باز و بسته شدن دریچه شیر است (Li et al., 2009). مصارف شبکه طی یک شبانه‌روز، نوسان دارد که این تغییر مصارف باعث تغییر در مقدار افت هد در لوله‌ها می‌شود. برای تأمین بهینه فشار در شبکه باید تنظیم شیر پیلوت را متناسب با مصارف شبکه تغییر داد.

با پیشرفت تجهیزات الکترونیکی، می‌توان از کنترل‌کننده‌های الکترونیکی برای کنترل فشار تنظیمی شیر فشارشکن استفاده کرد. مهم‌ترین این کنترلرها، کنترل‌کننده تنظیمی مبتنی بر زمان^۷، کنترل‌کننده مبتنی بر جریان^۸ و کنترل‌کننده مبتنی بر گرید کنترل از راه دور^۹ است (Moslehi et al., 2020). کنترل‌کننده تنظیمی مبتنی بر زمان از یک کنترلر الکترونیکی که به شیر فشارشکن متصل است، تشکیل شده و تنظیم آن به صورتی است که فشار تنظیمی^{۱۰} شیر در روز و شب متفاوت است و تغییر می‌کند. کنترل‌کننده مبتنی بر جریان، فشار در محل خروج شیر را طبق جریان ورودی به شبکه تنظیم می‌کند، به گونه‌ای که برای این تنظیم از ارتباط بین جریان و افت هد در شبکه استفاده می‌کند (Trow, 2011). استفاده از کنترل

هم‌زمان از راه دور^{۱۱} برای شیرهای کنترل فشار، باعث کنترل بهینه فشار و نشت و تأمین فشار ثابت در گره بحرانی می‌شود (Giustolisi et al., 2017). برای کاهش نشت و تأمین فشار لازم در گره‌های بحرانی شبکه از مدیریت فشار مبتنی بر تحلیل استاتیکی استفاده می‌شود. برای جلوگیری از نوسانات فشاری ناشی از جریان‌های گذرا، رفتار دینامیکی شبکه مورد توجه قرار می‌گیرد (Li et al., 2009).

در شبکه‌هایی که نوسان شدید و ناگهانی مصرف وجود دارد، ممکن است شیر فشارشکن با واکنش نامناسب نسبت به نوسانات فشار ناشی از به وجود آمدن جریان‌های گذرا، موجب تشدید امواج فشاری ناشی از پدیده چکش آبی^{۱۲} شود. به این منظور برخی از پژوهش‌ها بر روی تنظیم هوشمند عملکرد شیر سوزنی متمرکز شده‌اند، یعنی برای کنترل سرعت باز و بسته شدن دریچه شیر فشارشکن از روش‌های هوشمند استفاده کردند. در این حالت، شیر پیلوت فشار تنظیمی خروجی را در مقدار معینی تثبیت می‌کند. در روش‌های هوشمند، شیر سوزنی حذف شده و یک شیر با کنترل الکترونیکی جایگزین آن می‌شود. این شیر هوشمند با تنظیم دبی ورودی و خروجی از محفظه کنترلی^{۱۳} شیر فشارشکن متناسب با امواج فشاری ناشی از پدیده چکش آبی، سعی در کاهش نوسانات فشار شبکه دارد.

اولین پژوهش در این زمینه، توسط پرسکات و یولانیکی در سال ۲۰۰۸ به انجام رسید. در این پژوهش از کنترل‌کننده PID^{۱۴} به عنوان روشی هوشمند برای کنترل سرعت دریچه شیر استفاده شد. نتایج به دست آمده، عملکرد مناسب این نوع کنترل‌کننده را در کاهش نوسانات فشار ناشی از جریان چکش آبی نشان می‌دهد (Prescott and Ulanicki, 2008).

در پژوهش لی و همکاران در سال ۲۰۰۹ از روش PID و طرحی برای متناسب‌سازی فشار تنظیمی خروجی با دبی برای کنترل هوشمند سرعت دریچه شیر استفاده شد (Li et al., 2009). هوشمندسازی شبکه برای مدیریت فشار با استفاده از شیرهای

¹ Pressure Reducing Valve (PRV)

² Water Distribution Network (WDN)

³ Districted Metered Area (DMA)

⁴ Fixed Outlet PRVs

⁵ Pilot Valve

⁶ Needle Valve

⁷ Time-Modulated PRVs

⁸ Flow-Modulated PRVs

⁹ Remote Node-Based Modulation PRVs

¹⁰ Set-Point

¹¹ Remotely Real-Time Control

¹² Water Hammer

¹³ Contol Space

¹⁴ Proportional-Integral-Derivative (PID)



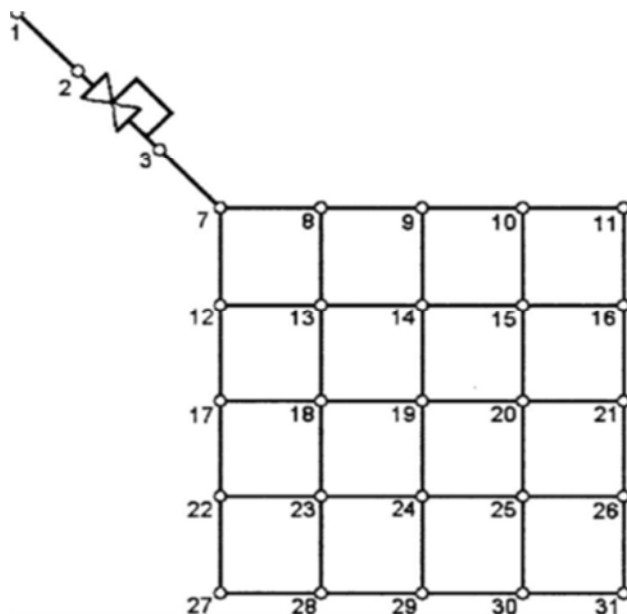


Fig. 1. Theoretical network (Prescott and Ulanicki, 2008)
شکل ۱- شبکه نظری (Prescott and Ulanicki, 2008)

نظر گرفتن یک مصرف‌کننده بزرگ صنعتی برای یک شبکه نظری مدل‌سازی شد. سپس نوسانات فشار در محل خروجی شیر فشارشکن با در نظر گرفتن روش IOFL تحلیل شد. نتایج شبیه‌سازی این پژوهش با نتایج سایر مراجع که در این شبکه از شیر فشارشکن با تنظیم شیر سوزنی ثابت^۲ و کنترل‌کننده PID استفاده شده است، مقایسه شد.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- شبکه بررسی شده و تعیین مصارف

شبکه استفاده شده در این پژوهش، یک شبکه نظری طبق شکل ۱ با ۲۵ گره (گره شماره ۷ تا ۳۱) بود که مصرف و نشت و نیز یک گره منبع با هد ثابت (گره شماره ۱) داشت. این شبکه با یک شیر فشارشکن که در ورودی شبکه قرار داشت، آبرسانی شد و تمامی لوله‌های آن مشابه بود. مشخصات شبکه مطابق با پژوهش پرسکات و یولانیکی در جدول ۱ ارائه شده است (Prescott and Ulanicki, 2008). مصارف شبکه نیز کاملاً منطبق با پژوهش پرسکات و یولانیکی در سال ۲۰۰۸ شبیه‌سازی شد، تا امکان مقایسه و

فشارشکن، با تنظیم شیر پیلوت و یا شیر سوزنی موضوع بسیاری از پژوهش‌ها بوده است. ترشیزی و همکاران در پژوهشی به بررسی مروری انواع روش‌های کنترل فشار و مزایا و معایب آن پرداختند و روش‌های کنترل فشار در ۵ دسته: کنترل کلاسیک، کنترل پیشرفته، کنترل بهینه، کنترل هم‌زمان و کنترل بدون مدل دسته‌بندی کردند (Torshizi et al., 2021).

در پژوهش سلطانی اصل و فغفور مغربی از مدیریت هوشمند فشار برای کاهش نشت در شبکه‌های آبرسانی منطقه سرافرازان مشهد استفاده شد. در این پژوهش، اثر کاهش فشار بر نشت در یک شبکه به‌ویژه در زمان حداقل مصرف بررسی شد. نتایج به‌دست آمده نشان داد که در این روش علاوه بر کاهش نشت شبانه، فشار نیز به‌صورت یکنواخت‌تر توزیع می‌شود (Soltani Asl and Faghfour Maghrebi, 2008).

در این پژوهش هدف اصلی، کنترل نوسانات هد در محل خروجی شیر فشارشکن با روش خطی‌سازی ورودی-خروجی با بازخورد^۱ بود. این نوسانات فشار ناشی از جریان چکش آبی به‌علت نوسان شدید مصارف در شبکه بود. برای این هدف، ابتدا جریان چکش آبی با استفاده از تغییر مصارف گره‌ای در هر بازه زمانی و در

² Constant Needle-Valve Setting (CNVS)

¹ Input-Output Feedback Linearization (IOFL)



جدول ۱- مشخصات شبکه (Prescott and Ulanicki, 2008)

Table 1. Characteristics of the network (Prescott and Ulanicki, 2008)

Every pipe length (m)	200	Source node head(m)	50
Junctions elevation (m)	0	h_{set} (m)	27
Pipe diameter (mm)	150	α_{open} (m ² /s)	1.1×10^{-6}
Pipe roughness (mm)	0.5	α_{close} (m ² /s)	10×10^{-6}
Wave speed (m ² /s)	1200		

جدول ۲- مصارف شبکه (Prescott and Ulanicki, 2008)

Table 2. Network demands (Prescott and Ulanicki, 2008)

Demand of each house	Averaged demand intensity (L/s)	Average time between demands (s)	Average time demand (s)
	0.1	300 s	15 s
Large industrial consumer			
0-100 s	100-105 s	105-300 s	300-305 s
0	Increase to 8 L/s linearly	8 L/s	0

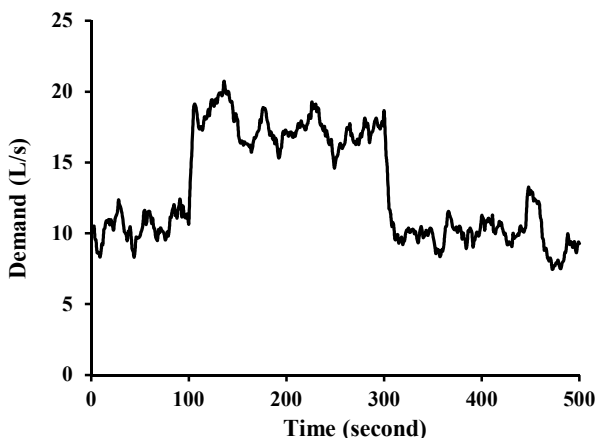


Fig. 2. Network demand fluctuation according to time

شکل ۲- نوسان مصارف شبکه با زمان

leakage نشت بر حسب لیتر بر ثانیه و p فشار گره بر حسب متر است. میانگین مصارف رسم شده در شکل ۲، تقریباً ۱۰ لیتر بر ثانیه است.

۲-۲- تحلیل پایدار شبکه

هد و جریان در زمان $t=0$ معادل با تحلیل شبکه در حالت استاتیک یا پایدار بود که برای محاسبه آن از نرم افزار EPANET استفاده شد. با توجه به اینکه میانگین مصارف شبکه برای ۲۰۰۰ خانه ۱۰

صحت سنجی با این پژوهش فراهم شود. در این شبکه از هر کدام از گره‌های ۷ تا ۳۱، مصارف ۸۰ خانه برداشت شد. همچنین یک مصرف‌کننده بزرگ صنعتی در گره شماره ۲۳ بود. مشخصات مصارف شبکه در جدول ۲ نشان داده شده است.

مصرف ۲۰۰۰ خانه به صورت تصادفی و با توزیع نرمال در مدت زمان ۵۰۰ ثانیه ایجاد شد. با این کار، ماتریس مصارف شامل ۵۰۰ سطر و ۲۰۰۰ ستون ایجاد شد. با جمع مصارف ۸۰ خانه در هر گره، ماتریس مصارف گره‌ها شامل ۵۰۰ سطر و ۲۵ ستون ایجاد شد. بر این اساس مصارف هر گره در هر بازه زمانی ۱ ثانیه‌ای مشخص شد. همچنین نوسان مصرف هر گره در بازه زمانی ۵۰۰ ثانیه‌ای منحصر به فرد بود. جمع مصارف ۲۵ گره، مصارف کل شبکه را ایجاد کرد که در شکل ۲ نشان داده شده است. در این پژوهش، مصارف با فشار تغییر نکرد. همچنین در گره‌های شبکه نشت متناسب با فشار متغیر بود. برای محاسبه نشت در گره‌های ۷ تا ۳۱ از معادله ۱ استفاده شد (Prescott and Ulanicki, 2008)

$$\text{leakage} = 0.01p^{0.5} \quad (1)$$

که در آن



سرعت، H هد پیزومتریک و $V|V|$ ترم غیرخطی اصطکاک است (Moosavian and Lence, 2020).

در این پژوهش، هدگره‌ها و جریان لوله‌های شبکه از حل ماتریسی معادلات MOC، بر اساس دومین الگوریتم صریح^۲ در پژوهش موسویان و لنس در سال ۲۰۲۰ محاسبه شد. برای نوشتن معادلات جریان چکش آبی به فرم ماتریسی، ابتدا معادلات ۳ و ۴ به فرم تفاضل محدود نوشته شد و از ماتریس‌هایی به نام ماتریس انتشار که توپولوژی شبکه را نشان می‌دهد، استفاده شد (Moosavian and Lence, 2020).

در این پژوهش همان طور که در بخش ۲-۲ گفته شد، برای تعیین هد و جریان در زمان $t=0$ از تحلیل پایدار استفاده شد. برای محاسبه هد و جریان در زمان‌های بعدی، از تحلیل چکش آبی استفاده شد. در تحلیل چکش آبی مصارف هر گره در هر بازه زمانی غیر از $t=0$ ، از ماتریس مصارف گره‌ها استخراج شد. با توجه به اینکه طول هر لوله به دو قسمت مساوی تقسیم شد و سرعت موج ۱۲۰۰ متر بر مجذور ثانیه بود، بازه زمانی تحلیل چکش آبی $\frac{1}{12}$ ثانیه بود. بنابراین باید از مصارف ایجاد شده، درون‌یابی برای مدت زمان $\frac{1}{12}$ ثانیه انجام داد.

در محاسبه هد در محل ورود شیر به دلیل کوتاه بودن طول لوله بین گره ۱ و ۲ (۲۰۰ متر) به‌طور مشابه پژوهش لی و همکاران در سال ۲۰۰۹ از رابطه استاتیکی استفاده شد (Li et al., 2009).

۲-۴- معادله شیر فشارشکن

شکل شماتیک شیر فشارشکن به‌همراه شیر پیلوت و شیر سوزنی در شکل ۳ نشان داده شده است. پرسکات و یولانیکي در سال ۲۰۰۳ برای تعیین رفتار دینامیکی شیر فشارشکن مدل و معادلاتی را ارائه دادند و در چهار دسته: ۱- مدل کامل پدیده‌شناسی^۳، ۲- مدل ساده پدیده‌شناسی^۴، ۳- مدل رفتاری^۵، ۴- مدل خطی^۶ طبقه‌بندی کردند. از بین این مدل‌ها، مدل رفتاری نسبت به مدل پدیده‌شناسی آسان‌تر است و نتایج مناسب و کاربردی دارد (Prescott and Ulanicki, 2003) در این پژوهش از مدل رفتاری که ساده‌تر و کاربردی است،

لیتر بر ثانیه بود، متوسط مصرف برای ۸۰ خانه که معادل یک گره بود، ۰/۴ لیتر بر ثانیه بود. پس از اختصاص این متوسط مصرف به هر گره و مشخصات شبکه، تحلیل پایدار شبکه انجام شد.

۲-۳- جریان چکش آبی

دو نوع جریان برای توصیف حرکت مایعات در لوله‌های آب وجود دارد: جریان پایدار و جریان گذرا. از جریان پایدار برای محاسبه پارامترهای شبکه در حالت استاتیکی استفاده می‌شود. جریان چکش آبی یک نمونه از جریان گذرا است. در جریان چکش آبی تغییرات سرعت سریع است و این تغییرات سریع در لوله‌ها باعث ایجاد موج فشاری می‌شود (Kodura, 2016). معادله ۲ سرعت موج فشاری را نشان می‌دهد

$$a = \frac{\sqrt{\frac{k}{\rho}}}{\sqrt{1 + \frac{Dk}{tE}(\phi)}} \quad (2)$$

که در آن

a سرعت موج، k مدول بالک آب، ρ چگالی آب، D قطر لوله، E مدول یانگ لوله، t ضخامت دیواره لوله و ϕ نسبت پواسون است. برای تحلیل جریان چکش آبی از معادلات دیفرانسیلی جزئی پیوستگی و مومنتوم استفاده می‌شود. روش مشخصات^۱ عمومی‌ترین روش برای حل معادلات جریان چکش آبی است و پس از اختصاص ضریب لاگرانژ، این معادلات به شکل معادله دیفرانسیل معمولی و معادلات ۳ و ۴ نشان داده می‌شود

$$\frac{g}{a} \frac{dH}{dt} + \frac{dV}{dt} + \frac{f}{2D} V|V| = 0 \quad \frac{dx}{dt} = +a \quad (3)$$

$$-\frac{g}{a} \frac{dH}{dt} + \frac{dV}{dt} + \frac{f}{2D} V|V| = 0 \quad \frac{dx}{dt} = -a \quad (4)$$

معادله ۳ در راستای جهت C^+ (ورود جریان به گره) و معادله ۴ در راستای جهت C^- (خروج جریان از گره) محور مشخصات صدق می‌کند. که در آنها

g شتاب گرانشی زمین، a سرعت موج فشاری، f ضریب اصطکاک داری-ویسباخ که به‌طور تقریبی ثابت در نظر گرفته می‌شود، V

¹ Method of Characteristics (MOC)

² Explicit Method

³ Full Phenomenological Model

⁴ Simplified Phenomenological Model

⁵ Behavioral Model

⁶ Linear Model



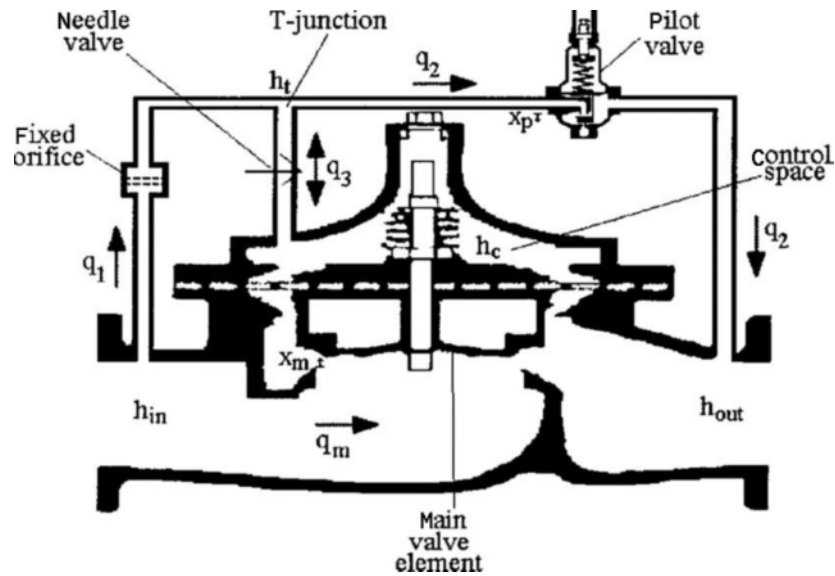


Fig. 3. Pressure reducing valve (Prescott and Ulanicki, 2003)
شکل ۳- شیر فشارشکن (Prescott and Ulanicki, 2003)

محاسبه جریان شیر سوزنی ارائه شده است. این جریان بستگی به مثبت یا منفی بودن \dot{x}_m دارد

(A)

$$C_v = 0.021 - 0.0296e^{-51.1x_m} + 0.0109e^{-261x_m} - 0.0032e^{-683.2x_m} + 0.0009e^{-399.5x_m}$$

این معادله، چگونگی محاسبه ظرفیت شیر را نشان می‌دهد. ظرفیت شیر تابعی از میزان باز شدگی شیر است و بر اساس آزمایش از طریق افت فشار جریان هنگام عبور از دریچه شیر به دست می‌آید (Prescott and Ulanicki, 2003). همچنین واحد آن $m^{2.5}/s$ است (AbdelMeguid et al., 2011)

$$A_{cs} = \frac{1}{3700(0.02732 - x_m)} \quad (9)$$

در این معادله، چگونگی محاسبه مساحت محفظه کنترلی نشان داده شده که این معادله نیز تابعی از میزان باز شدگی شیر است (Prescott and Ulanicki, 2003).

با توجه به معادلات ۵ تا ۹، معادلات شیر فشارشکن، دینامیک غیر خطی دارد. یکی از ابزارهای مفید در طراحی کنترل‌کننده برای سیستم‌های غیر خطی IOFL است که به کمک آن می‌توان یک نگاشت خطی بین ورودی و خروجی سیستم ایجاد کرد. سپس، برای سیستم خطی شده یک کنترل‌کننده طراحی کرد. در بخش بعدی

استفاده شد که معادلات آن به صورت زیر است

$$q_m = C_v(x_m)\sqrt{h_{in} - h_{out}} \quad (5)$$

که در آن

q_m جریان شیر، $C_v(x_m)$ ظرفیت شیر، h_{in} و h_{out} به ترتیب هد در محل ورود و خروج شیر است

$$\dot{x}_m = \frac{q_3}{A_{cs}(x_m)} \quad (6)$$

این معادله، میزان تغییر باز شدگی دریچه شیر نسبت به زمان را نشان می‌دهد که این تغییر با \dot{x}_m نشان داده شده و q_3 جریان شیر سوزنی یا سیگنال کنترل است که به محفظه کنترلی شیر وارد یا خارج می‌شود و $A_{cs}(x_m)$ مساحت محفظه کنترلی است

$$q_3 = \begin{cases} \alpha_{open}(h_{set} - h_{out}) & \text{if } \dot{x}_m \geq 0 \\ \alpha_{close}(h_{set} - h_{out}) & \text{if } \dot{x}_m < 0 \end{cases} \quad (7)$$

که در آن

h_{set} فشار تنظیمی شیر پیلوت، α_{open} ضریب تنظیم شیر سوزنی هنگام باز شدن دریچه شیر و α_{close} ضریب تنظیم شیر سوزنی هنگام بسته شدن دریچه شیر است. در این معادله، چگونگی



اگر $L_g L_f h(x)$ برای همه x ها مخالف صفر باشد، قانون کنترلی به صورت معادله ۱۵ نوشته می شود

$$u = \frac{1}{L_g L_f h(x)} (-L_f^2 h(x) + v) \quad (15)$$

به طور مشابه با قرار دادن معادله ۱۵ در معادله ۱۴، سیستم خطی شده به فرم معادله ۱۶ بیان می شود

$$\dot{y} = v \quad (16)$$

به صورت کلی، اگر γ کوچکترین عدد صحیح باشد، به گونه ای که $L_g L_f^i h = 0$ و $i = 0, \dots, \gamma - 2$ و $L_g L_f^{\gamma-1} h$ مخالف صفر باشد، آنگاه قانون کنترلی بازخورد خطی ساز به شکل معادله ۱۷ بیان خواهد شد

$$u = \frac{1}{L_g L_f^{\gamma-1} h} (-L_f^\gamma h + v) \quad (17)$$

و در نتیجه فرم کلی سیستم خطی شده به صورت معادله ۱۸ خواهد بود

$$y^\gamma = v \quad (18)$$

که در آن

به γ درجه نسبی سیستم گفته می شود (Khalil, 2017). در این پژوهش، سیستم بررسی شده تک ورودی - تک خروجی بوده و درجه نسبی ۱ دارد. خروجی سیستم، هد در محل خروج شیر فشارشکن است که با توجه به معادله ۵، معادله آن به صورت زیر نوشته می شود

$$h_{out} = h_{in} - \left(\frac{q_m}{C_v}\right)^2 \quad (19)$$

معادله ۲۰، مشتق خروجی سیستم را نشان می دهد که $\frac{dh_{in}}{dt}$ مشتق هد در محل ورود شیر نسبت به زمان، \dot{q}_m مشتق جریان شیر نسبت به زمان و \dot{C}_v مشتق ظرفیت شیر نسبت به زمان است

روش IOFL توضیح داده شده است.

۲-۵- روش IOFL

به منظور پیاده سازی روش IOFL برای یک سیستم تک ورودی - تک خروجی، دینامیک سیستم را به صورت زیر در نظر می گیریم

$$\dot{x} = f(x) + g(x)u \quad y = h(x) \quad (10)$$

که در آن

x بردار حالت سیستم و y خروجی سیستم است. $f(x)$ و $g(x)$ توابع غیر خطی هستند. برای تبدیل سیستم غیر خطی به خطی از خروجی سیستم مشتق گرفته شده و این روند تا جایی ادامه دارد که ورودی سیستم یعنی u ظاهر شود. مشتق اول خروجی سیستم به فرم معادله ۱۱ قابل نمایش است

$$\dot{y} = \frac{\partial h}{\partial x} f(x) + \frac{\partial h}{\partial x} g(x)u = L_f h(x) + L_g h(x)u \quad (11)$$

که در آن

$L_f h(x)$ و $L_g h(x)$ مشتق لی^۱ نام دارد. اگر $L_g h(x)$ برای همه x های غیر صفر، مخالف صفر باشد، قانون کنترلی بازخورد به شکل زیر طراحی می شود

$$u = \frac{1}{L_g h} (-L_f h + v) \quad (12)$$

با قرار دادن معادله ۱۲ در معادله ۱۱ یک سیستم خطی به شکل زیر ایجاد می شود

$$\dot{y} = v \quad (13)$$

اما اگر در معادله ۱۱، $L_g h(x)$ صفر باشد، u ظاهر نمی شود. بنابراین باید مجدد از معادله ۱۱ به صورت زیر مشتق گرفته شود

$$\dot{y} = L_f^2 h(x) + (L_g L_f h)(x)u \quad (14)$$

که در آن

¹ Lie Derivative



در صورتی که $v = \alpha e$ در نظر گرفته شود، طوری که $\alpha > 0$ باشد، معادله ۲۸ به صورت معادله ۲۹ که یک معادله دینامیکی پایدار است، نشان داده می‌شود. حل این معادله، میزان خطا را نشان می‌دهد که به صورت نمایی به سمت صفر کاهش می‌یابد

$$\dot{e} + \alpha e = 0 \rightarrow e(t) = A \exp(-\alpha t) \quad (29)$$

که در آن

هرچه مقدار α بزرگتر باشد، نوسانات سریع‌تر به مقدار مطلوب خود می‌رسد، اما باید توجه کرد که این مقدار نباید از یک حدی بیشتر باشد چون باعث ناپایداری می‌شود.

شیبه‌سازی شبکه هنگام پدیده چکش آبی به همراه شیر فشارشکن و معادلات لازم در روش IOFL در سیمولینک^۱ MATLAB مدل‌سازی شد. شکل ۴ بلوک دیگرام این شیبه‌سازی در سیمولینک را نشان می‌دهد. در این شکل معادلات لازم برای تحلیل جریان چکش آبی شبکه در بلوک network، معادلات شیر فشارشکن و معادلات IOFL در بلوک شیر فشارشکن و معادله لازم برای محاسبه هد در محل ورود شیر فشارشکن در بلوک hin مدل‌سازی شده است.

۳- نتایج و بحث

در این قسمت، ابتدا به تحلیل نتایج روش‌های شیر فشارشکن با CNVS و PID که در پژوهش پرسکات و یولانیکس در سال ۲۰۰۸ انجام شده است (Prescott and Ulanicki, 2008)، پرداخته شد. سپس، تحلیل نتایج روش IOFL بررسی شد. در انتها روش پیشنهادی این پژوهش با روش‌های شیر فشارشکن با CNVS و PID مقایسه شد.

۳-۱- کنترل معمولی شیر فشارشکن با CNVS

نوسانات ناشی از مصرف مشترکین با میانگین حدود ۱۰ لیتر بر ثانیه، دارای نوساناتی در حدود ± 2 لیتر بر ثانیه بود. از ثانیه ۱۰۰ تا ثانیه ۳۰۰ مقدار ثابت ۸ لیتر بر ثانیه برای مصرف‌کننده بزرگ صنعتی به مصرف شبکه افزوده شد. رسیدن به حداکثر و یا قطع

$$\frac{dh_{out}}{dt} = \frac{dh_{in}}{dt} - 2 \times \left(\frac{q_m}{C_v}\right) \times \frac{\dot{q}_m \times C_v - q_m \times \dot{C}_v}{C_v^2} \quad (20)$$

با مقایسه دو معادله ۱۱ و ۲۰، $L_g h(x)u$ و $L_f h(x)$ به صورت معادلات ۲۱ و ۲۲ نوشته می‌شود

$$L_f h(x) = \frac{dh_{in}}{dt} - \frac{2 \times q_m}{C_v^2} \times \dot{q}_m \quad (21)$$

$$L_g h(x)u = \frac{2 \times q_m^2}{C_v^3} \times \dot{C}_v \quad (22)$$

$$\dot{C}_v = \frac{dC_v}{dt} = \frac{dC_v}{dx_m} \times \dot{x}_m \quad (23)$$

با توجه به معادله ۶ و جای‌گذاری معادله ۲۳ در معادله ۲۲، معادله نهایی ۲۲ به صورت معادله ۲۴ نوشته می‌شود

$$L_g h(x)u = \frac{2 \times q_m^2}{C_v^3} \times \frac{dC_v}{dx_m} \times \frac{u}{A_{cs}} \quad (24)$$

که در آن

q_3 سیگنال کنترلی یا همان ورودی سیستم است که در این جا با u نشان داده شده است

$$L_g h(x) = \frac{2 \times q_m^2}{C_v^3} \times \frac{dC_v}{dx_m} \times \frac{1}{A_{cs}} \quad (25)$$

با توجه به اینکه ۷ برابر یک و معادله ۲۵ مخالف صفر است، قانون کنترلی سیستم به صورت معادله ۱۲ طراحی می‌شود. به منظور اینکه خروجی سیستم فشار تنظیمی مطلوب را دنبال کند، خطا به صورت معادله ۲۶ نشان داده می‌شود. با مشتق‌گیری از خطا و استفاده از معادله ۱۳، دینامیک خطا به صورت معادله ۲۸ به دست می‌آید

$$e = h_s - h_{out} \quad (26)$$

$$\dot{e} = -\dot{h}_{out} \quad (27)$$

$$\dot{e} = -v \quad (28)$$

¹ Simulink



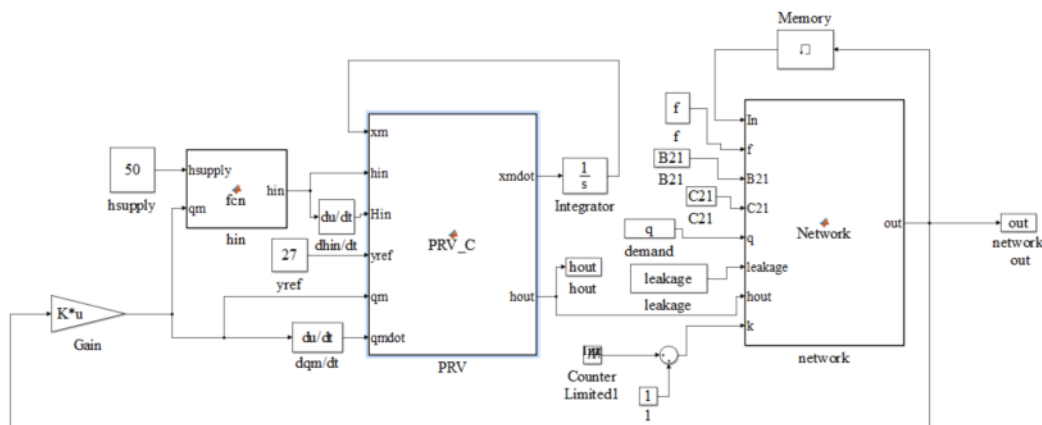


Fig. 4. IOFL diagram block in Simulink
شکل ۴- بلوک دیگرام روش IOFL در سیمولینک

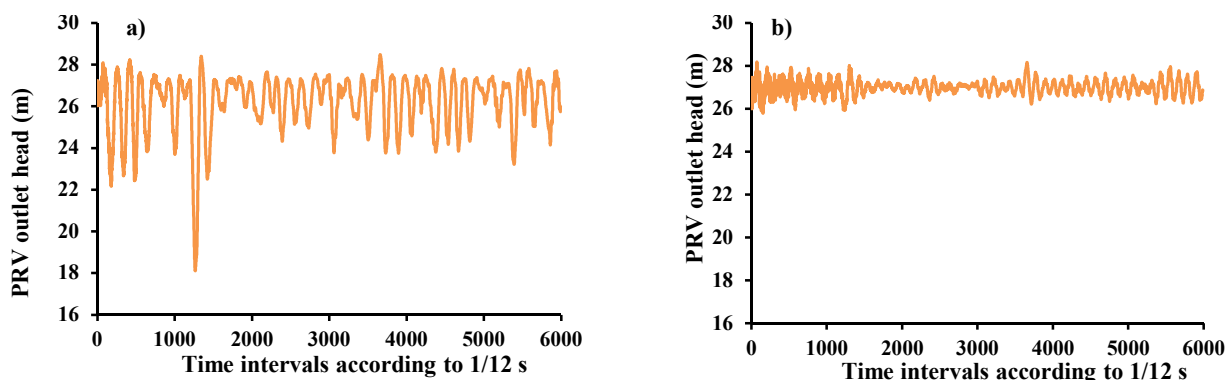


Fig. 5. PRV outlet head with a) CNVS and b) PID control
شکل ۵- هد در محل خروج شیر فشارشکن با (a) تنظیم سوزنی ثابت و (b) کنترل کننده PID

محل خروج شیر فشارشکن نسبت به فشار تنظیمی بیشتر از افزایش فشار بود و در زمان شروع برداشت مصرف کننده صنعتی به علت زمان بردن تنظیم بازشدگی، افت حدود ۹ متری فشار نسبت به فشار تنظیمی ملاحظه شد. برای صحت سنجی نتایج مربوط به کنترل شیر فشارشکن با CNVS، شکل ۵- a با پژوهش پرسکات و یولانیکی در سال ۲۰۰۸ مقایسه شد (Prescott and Ulanicki, 2008) که با مقایسه این دو شکل، بازه تغییرات هد و نوسانات منطبق است.

۲-۳- کنترل شیر فشارشکن با کنترل کننده PID

در ادامه تحلیل شبکه با استفاده از کنترل کننده PID انجام شد. پارامترهای کنترلی روش PID در این پژوهش با انجام آزمون سعی و خطا تعیین شد. بر این اساس مقدار $k_p = 2 \times$

برداشت آب این مصرف کننده در شبکه، ۵ ثانیه بود. در واقع چنین شرایط مصرفی که علاوه بر نوسانات ناشی از مصرف مشترکین، یک مصرف کننده بزرگ نیز وجود دارد، شرایط دشواری را برای مدیریت شبکه ایجاد می کند. بازه های زمانی تحلیل شبکه $\Delta t = \frac{1}{12}$ ثانیه بود و در این بازه های زمانی، مصارف به صورت درون یابی محاسبه شد. بر این اساس در تحلیل های انجام شده، نتایج در بازه های زمانی نمونه برداری $\frac{1}{12}$ ثانیه درج شد.

شکل ۵- a، تغییرات فشار در محل خروج شیر فشارشکن را نشان می دهد. در این نمودار مشاهده می شود که فشار در بازه ۲۸ تا ۲۳ متر نوسان کرد و یک بار در حدود بازه ۱۲۰۰ متناظر با ۱۰۰ ثانیه به مقدار ۱۸ متر نیز رسید. همان گونه که بیان شد، فشار تنظیمی شیر پیلوت ۲۷ متر بود. با توجه به اینکه ضریب تنظیم شیر سوزنی برای باز شدن کمتر از ضریب بسته شدن بود، افت فشار در



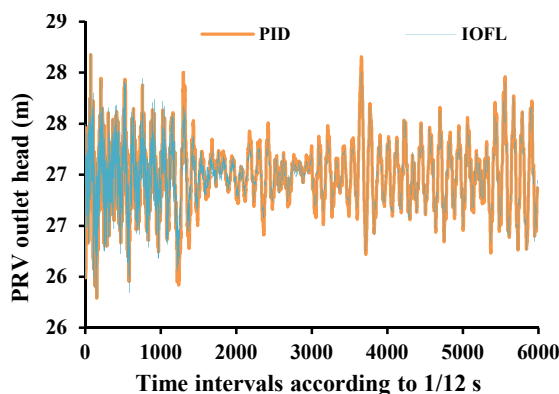


Fig. 6. PRV outlet head by PID controller and IOFL
شکل ۶- هد در محل خروج شیر فشارشکن با کنترل کننده
IOFL و PID

CNVS فشار تقریباً از ۵ تا ۳۰ متر تغییر کرد که افت فشاری شدید نیز هنگام ورود مصرف کننده بزرگ مشاهده شد. در صورتی که با استفاده از کنترل هوشمند در شکل ۷-ب، فشار بین ۱۵ تا ۳۰ متر در حال نوسان بود. برای بررسی خطا بین دو روش هوشمند PID و IOFL، خطای جذر میانگین مربعات^۱ در جدول ۳ محاسبه شد که با توجه به آن روش شیر فشارشکن با CNVS دارای خطای ۴، روش PID دارای خطای ۳/۲۵، روش IOFL با خطای ۳/۲۲ دارای کمترین خطا بود. همچنین با توجه به شکل ۸، جریان شیر فشارشکن حدوداً از ۹ تا ۲۳ لیتر بر ثانیه، ناشی از مصارف و نشت تغییر کرد.

¹ Root-Mean-Square Error (RMSE)

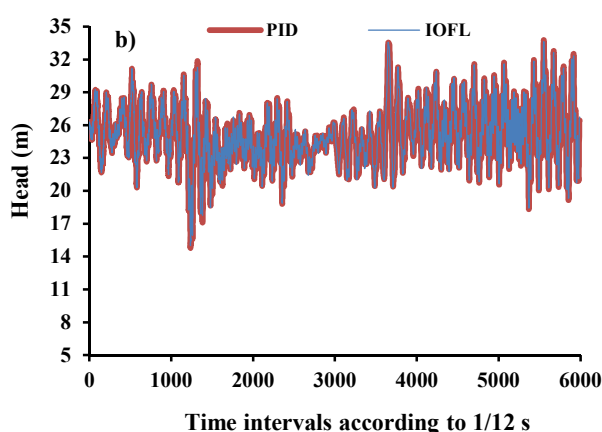
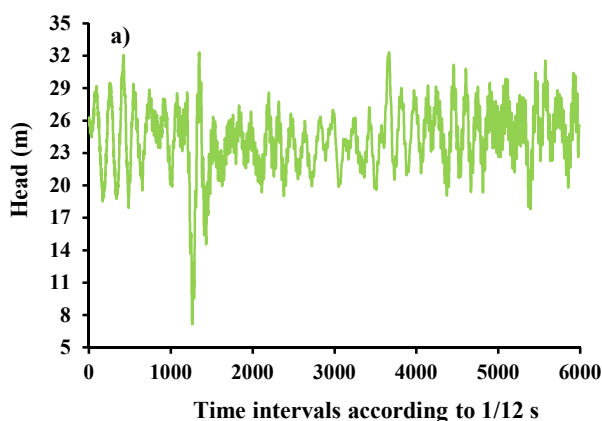


Fig. 7. Head for a junction in network with a) CNVS and b) smart control

شکل ۷- هد برای گره داخل شبکه برای کنترل با (a) CNVS و (b) کنترل هوشمند

و $k_i = 2 \times 10^{-11}$ ، $k_d = 0$ ، 10^{-5} به دست آمد. شکل ۵-ب، نوسانات فشار در محل خروج شیر فشارشکن با کنترل کننده PID و شکل ۶ این نوسانات را در بازه ۵/۲۵ تا ۵/۲۸ متر نشان می دهد. بیشترین نوسان نیز در بازه زمانی ۱۲۰۰ و ۳۶۰۰ که مربوط به زمان ۱۰۰ و ۳۰۰ ثانیه بود، مشاهده شد که مربوط به زمان باز و بسته شدن مصرف کننده بزرگ صنعتی بود.

بر اساس نتایج به دست آمده، روش کنترل کننده PID توانست نوسانات فشار را محدود کند. برای صحت سنجی نتایج مربوط به کنترل کننده PID، شکل ۵-ب با پژوهش پرسکات و یولانیکی در سال ۲۰۰۸ مقایسه شد (Prescott and Ulanicki, 2008) که با مقایسه این دو شکل، بازه تغییرات هد و نوسانات منطبق است.

۳-۳- کنترل شیر با روش IOFL و مقایسه نتایج این پژوهش با مراجع

در معادله ۲۹، نیاز به تعیین پارامتر α بود که با سعی و خطا $\alpha = ۸/۷$ تعیین شد. در شکل ۶ نمودار هد در محل خروج شیر در دو روش IOFL و PID با هم مقایسه و برای مقایسه دقیق تر بازه محورهای عمودی بزرگتر شد. طبق این شکل با استفاده از IOFL، نوسانات ملایم تر و کمتر از نوسانات در روش PID بود.

همچنین در شکل های ۷ و ۸ به ترتیب هد فشاری برای یک گره داخل شبکه و جریان شیر فشارشکن رسم شده است. با توجه به شکل ۷-ا برای گره داخل شبکه، در روش شیر فشارشکن با



۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، از روش IOFL به‌عنوان روشی جدید برای کاهش نوسانات هد در محل خروج شیر فشارشکن یا به‌عبارتی نزدیک کردن هد به فشار تنظیمی در شبکه توزیع آب استفاده شد. کنترل هوشمند برای یک شبکه نظری و دارای یک شیر فشارشکن برگرفته از مراجع، مدل‌سازی شد. به این صورت که ابتدا برای گره‌ها مصارف به‌صورت تصادفی ایجاد و با اختصاص متوسط مصرف و نشت به گره‌ها تحلیل پایدار در EPANET انجام شد. پس از تحلیل جریان چکش آبی، کنترل شیر فشارشکن با روش IOFL در سیمولینک شبیه‌سازی و برای مقایسه با نتیجه مراجع، کنترل با CNVS و PID نیز شبیه‌سازی شد. در نهایت، با مقایسه RMSE و متوسط خطای مطلق اندازه‌گیری، مناسب‌ترین روش تعیین شد. روش IOFL نسبت به روش PID، خطای کمتری داشت، همچنین با استفاده از این روش، معادلات غیرخطی سیستم به معادلات خطی تبدیل شده که این خود باعث ساده‌سازی شد.

به‌طور کلی با بررسی نتایج، روش‌های هوشمند نسبت به استفاده از شیر فشارشکن با CNVS، می‌توانند نوسانات فشار ناشی از چکش آبی را به‌طور قابل ملاحظه‌ای کاهش دهند.

پدیده چکش آبی در زمانی که نوسان سریع دبی در لوله‌ها اتفاق می‌افتد، ایجاد می‌شود. این پدیده می‌تواند در شبکه در اثر قطع و وصل جریان توسط یک مصرف‌کننده بزرگ نیز اتفاق افتد. همچنین در زمان بستن لوله‌ها برای تعمیرات و خاموش و روشن شدن پمپ‌های اصلی نیز این پدیده رخ می‌دهد. در چنین شرایطی هوشمندسازی شیرهای فشارشکن می‌تواند با کاهش نوسان فشار، مخاطرات ایجاد چکش آبی در شبکه را کاهش دهد.

References

- AbdelMeguid, H., Skworcow, P. & Ulanicki, B. 2011. Mathematical modelling of a hydraulic controller for PRV flow modulation. *Journal of Hydroinformatics*, 13(3), 374-389.
- Fontana, N., Giugni, M., Glielmo, L., Marini, G. & Verrilli, F. 2018. Real-time control of a PRV in water distribution networks for pressure regulation: theoretical framework and laboratory experiments. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 144(1), 04017075.
- Giustolisi, O., Ugarelli, R. M., Berardi, L., Laucelli, D. B. & Simone, A. 2017. Strategies for the electric regulation of pressure control valves. *Journal of Hydroinformatics*, 19(5), 621-639.
- Khalil, H. 2017. *Nonlinear Systems*. Prentice Hall Pub., NJ., USA.

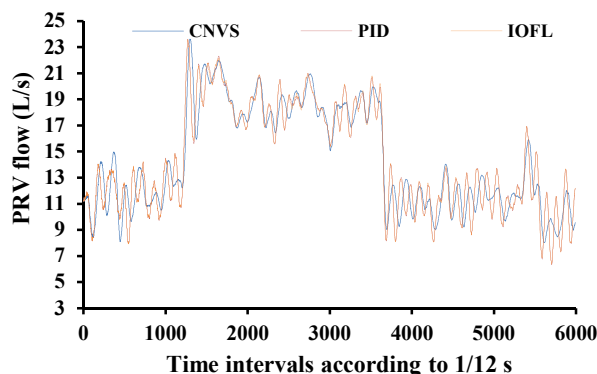


Fig. 8. PRV flow

شکل ۸- جریان شیر فشارشکن

جدول ۳- RMSE برای هد در گره داخل شبکه

Table 3. RMSE error for head in junction within network

Error value	Control method		
	CNVS	PID	IOFL
	4	3.25	3.22

۳-۴- مقایسه روش‌ها

از مقدار متوسط خطای مطلق اندازه‌گیری^۱ و RMSE برای مقایسه بین سه روش: شیر فشارشکن با CNVS، IOFL و PID استفاده شد. متوسط خطای مطلق اندازه‌گیری بر اساس متوسط مجموع قدرمطلق خطا بین خروجی مطلوب (فشار تنظیمی شیر پیلوت) و فشار در محل خروج شیر محاسبه شد. در جدول ۴، MAE و RMSE نشان داده شده که طبق این جدول، روش IOFL، خطای کمتری دارد.

جدول ۴- مقدار خطا در سه روش

Table 4. Error values in three methods

Method	CNVS	IOFL	PID controller
MAE	1.05	0.22	0.25
RMSE	1.6	0.28	0.32

¹ Mean Absolute Error (MAE)



- Kodura, A. 2016. An analysis of the impact of valve closure time on the course of water hammer. *Archives of Hydro-Engineering and Environmental Mechanics*, 63(1), 35-45.
- Li, P., Prempain, E., Postlethwaite, I. & Ulanicki, B. 2009. *A New Control Scheme for Improving the Performance of Pressure Reducing Valves in Water Distribution Networks*. IWA. UK.
- Moosavian, N. & Lence, B. 2020. Unified matrix frameworks for water hammer analysis in pipe networks. *International Journal of Civil Engineering*, 18(12), 1327-1345.
- Moslehi, I., Ghazizadeh, M. J. & Khoshghalb, E. Y. 2020. Economic analysis of pressure management in water distribution networks. *Journal of Water and Wastewater*, 31(2), 100-117. (In Persian)
- Prescott, S. L. & Ulanicki, B. 2003. Dynamic modeling of pressure reducing valves. *Journal of Hydraulic Engineering*, 129(10), 804-812.
- Prescott, S. L. & Ulanicki, B. 2008. Improved control of pressure reducing valves in water distribution networks. *Journal of Hydraulic Engineering*, 134(1), 56-65.
- Soltani Asl, M. & Faghfour Maghrebi, M. 2008. Intelligent pressure management to reduce leakage in urban water supply networks: a case study of Sarafrazan district, Mashhad. *Water and Wastewater*, 20(3), 99-104. (In Persian)
- Torshizi, M., Nasirian, A. & Eliasi, H. 2021. An overview on advanced control of pressure reducing valves in water network. *The 5th National Congress on Iranian Irrigation and Drainage*. Birjand, Iran. (In Persian)
- Trow, S. W. 2011. Intelligent Pressure Management for Monitoring and Control of Water Distribution Systems in the UK. In: Sewilam, H. *Capacity Development for Drinking Water Loss Reduction: Challenges and Experiences*. Dreesbach Verlag Pub. München, Germany. 81-91.



This work is licensed under a [Creative Commons Attribution 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

