

Journal of Water and Wastewater, Vol. 32, No.2, pp: 28-41

The Detection of Air Valves Location and Size in Long Water Pipelines

H. Fahraji-Azad¹, M. Ghaeini-Hessaroeeyeh², E. Fadaei-Kermani³

1. MSc Graduate, Dept. of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran
2. Assoc. Prof., Dept. of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran
(Corresponding Author) mghaeini@uk.ac.ir
3. PhD Graduate, Dept. of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran

(Received Feb. 8, 2020 Accepted Sep. 29, 2020)

To cite this article:

Fahraji-Azad, H., Ghaeini-Hessaroeeyeh, M., Fadaei-Kermani, E. 2021. "The detection of air valves location and size in long water pipelines" Journal of Water and Wastewater, 32(2), 28-41.
Doi: 10.22093/wwj.2020.218909.2987. (In Persian)

Abstract

Condensed air in the water stream causes serious problems such as head drop, localized pressure increases high noise generation, shaking in the pipes, as well as the loss of pumps in the system will be transmitted. To remove air from the system, air valves should be used. In this research, the hydraulic properties of air flow contained in the water pipes is studied, then a program is developed for providing the optimal solution regarding the size and position of the valves in the right place by using MATLAB software. The general method is to examine all the tube parts at the failure location by the direct search algorithm and find the lowest gradient and calculate the initial discharge rate of the line as following: First, the minimum amount of air intake in the water pipeline will occur. Second, the air outlet speed of the system will be optimal. To enhance the applicability of the proposed method, the model was developed in the GUI environment. Finally, for the verification and evaluation of the results, an identical model of water pipeline using Valmatic software and the present developed software has been analyzed.

Keywords: Air Valve, Water Transmission Pipeline, MATLAB Software, GUI Environment, Valmatic Software.



مجله آب و فاضلاب، دوره 32، شماره 2، صفحه: 28-41

مکان‌یابی و تعیین اندازه شیرآلات هوا در خطوط لوله انتقال آب طویل

حسن فهرجی آزاد^۱، مهناز قائینی حصاروئی^۲، احسان فدائی کرمانی^۳

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، بخش مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران
 ۲- دانشیار، بخش مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران
 (نویسنده مسئول) mghaeini@uk.ac.ir
 ۳- دانش‌آموخته دکترا، بخش مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران

(دریافت ۹۸/۱۱/۱۹ پذیرش ۹۹/۷/۸)

برای ارجاع به این مقاله به صورت زیر اقدام بفرمایید:

فهرجی آزاد، ح.، قائینی حصاروئی، م.، فدائی کرمانی، ا.، ۱۴۰۰، "مکان‌یابی و تعیین اندازه شیرآلات هوا در خطوط لوله انتقال آب طویل" مجله آب و فاضلاب، ۳۲(۲)، ۴۱-۲۸. Doi: 10.22093/wwj.2020.218909.2987

چکیده

هوای محبوس شده در لوله‌های انتقال آب باعث بروز مشکلاتی جدی از قبیل افت هد، افزایش فشار موضعی، تولید صدای زیاد، لرزش در لوله‌ها و همچنین استهلاک پمپ‌ها می‌شود. معمولاً برای خروج هوا از سیستم باید از شیرهای هوا استفاده کرد. در این پژوهش راهکاری بهینه در خصوص تعیین اندازه و مکان مناسب قرارگیری شیرهای هوا در خطوط انتقال از طریق برنامه‌ای توسعه داده شده در نرم‌افزار MATLAB، ارائه می‌شود. در این روش آب‌اندازی اولیه خط به گونه‌ای محاسبه شد که اولاً کمترین مقدار محبوس‌شدگی هوا در خط لوله آب رخ دهد و ثانیاً سرعت خروج هوا از سیستم بهینه باشد. روش ارائه شده برای قسمتی از خط لوله پروژه انتقال آب به شهرهای شمالی استان کرمان پیاده‌سازی شد. برای افزایش قابلیت کاربردی روش ارائه شده، برنامه پیشنهادی در محیط GUI توسعه داده شده که این امکان فراهم می‌شود که اندازه و مکان بهینه شیرهای هوا به صورت گرافیکی نمایش داده شود و نتایج به دست آمده ارائه شود. در نهایت برای صحت‌سنجی نتایج حاصل، از نرم‌افزار Valmatic که نرم‌افزاری مطرح در طراحی خطوط انتقال است استفاده شد. نتایج نشان داد که روش ارائه شده دارای دقت و قابلیت مطلوبی در زمینه محاسبات و طراحی شیرآلات هوا است.

واژه‌های کلیدی: شیر هوا، خطوط انتقال آب، نرم‌افزار MATLAB، GUI، نرم‌افزار Valmatic

۱- مقدمه

حباب‌های متحرک کوچک و بزرگ در امتداد خط یا به شکل تجمع توده‌های هوا در نقاط خط‌الراس لوله ظاهر می‌شود (Vasconcelos and Wright, 2008).

عدم توجه به هوای محبوس در خطوط انتقال خصوصاً با فرض اینکه این توده‌ها توسط پمپ رانده خواهد شد، اغلب مهندسی

خطوط انتقال آب در مسیرهای طولانی خود با توجه به طبیعت زمین از فراز و نشیب‌هایی خواهد گذشت، که در نتیجه آن در طول خط لوله شکست‌های قائمی پدید خواهد آمد. به‌علت مکش‌های کوتاه‌مدت در این شکست‌ها و همچنین آزاد شدن هوای محلول در آب ناشی از پدیده کاویتاسیون، هوای ایجاد شده به صورت



آب باعث بروز اختلالاتی خواهد شد. هوای محبوس شده در جریان آب می‌تواند منجر به وقوع مشکلات عدیده‌ای در سیستم انتقال آب شود که از آن جمله می‌توان به افت هد، افزایش فشار موضعی، تولید صدای زیاد، لرزش در لوله‌ها و همچنین استهلاک پمپ‌ها اشاره کرد.

با توجه به اهمیت این موضوع، مطالعات و پژوهش‌های متعددی پیرامون این مسئله انجام شده است. بیانچی و همکاران در سال ۲۰۰۷، در پژوهش خود معادله‌های عملی برای اندازه شیرهای هوا را بررسی کردند. در پژوهش ایشان بر اساس ملاحظات تئوری، دو معادله عملی برای اندازه شیرهای هوا در زمان پر کردن یک لوله با آب محاسبه شد (Bianchi et al., 2007).

مک‌فرسون در سال ۲۰۰۹، پژوهش‌های گسترده‌ای پیرامون محل و اندازه شیرهای هوا انجام داد. یافته‌های او نشان داد که اگر شیرهای هوا به‌طور نامناسبی اندازه‌گذاری و یا جایگذاری شوند، می‌توانند باعث کاهش ظرفیت سیستم شده و حتی منجر به وقوع یک فاجعه شوند. بنابراین شیرهای هوا نیازمند سیستم طراحی جامع خط لوله و نیز بخش پایش دقیق با انعطاف‌پذیری بالا در طی عملکرد خود هستند (McPherson et al., 2009).

برگانت و همکاران در سال ۲۰۱۲، در خصوص رفتار دینامیکی شیرهای هوا در خطوط لوله قطور و طویل پژوهش‌هایی انجام دادند. روش تعیین عملکرد دینامیکی شیرهای هوا شامل اندازه‌گیری پاسخ آنها به شتاب منفی جریانی بود که در شیر قرار می‌گرفت. در این روش، رفتار شیر هوا در ادامه رخدادهایی مانند آغاز به کار سیستم، ارتعاش پمپ و شکستگی لوله شبیه‌سازی و بررسی شد (Bergant et al., 2012).

در پژوهش وو و همکاران در سال ۲۰۱۵، اندازه شیرهای هوا در خطوط انتقال آب بررسی شد. در این پژوهش انواع شیرهای هوا و نیز اثرات ضربه قوچ در خطوط انتقال بررسی شد. در نهایت نتایج شبیه‌سازی شیر هوا نشان داد که بسته شدن دو مرحله‌ای شیر هوا نه تنها فشار منفی بلکه فشار مثبت را نسبت به یک مرحله بسته شدن شیر هوا کاهش می‌دهد (Wu et al., 2015).

رمضانی و همکاران در سال ۲۰۱۶ در خصوص مدیریت هوای مؤثر در خط لوله‌های آب پژوهش‌هایی انجام دادند. نتایج نشان داد که هوا می‌تواند در سیستم‌های آبی و زهکشی تحت یک سری شرایط به دام افتد و اگر چنین هوایی به درستی مدیریت نشود،

طراح را با کاهش بازدهی سیستم‌های آب‌رسانی و یا حتی توقف کامل سیستم مواجه می‌کند. توده‌های هوا مشابه هر مانع فیزیکی باعث افزایش افت هد، افزایش کارکرد پمپ و مصرف انرژی می‌شوند. عدم کنترل مناسب آن سبب باقی ماندن این توده‌های هوا در خطوط انتقال و مقاومت در برابر جریان آب، ایجاد تنش ناهمگن و افت هد ناخواسته می‌شود و باعث آسیب‌های جدی به لوله و اتصالات می‌شود که در نتیجه هزینه‌های مالی برای تعمیر و تعویض زود هنگام لوله و اتصالات را در پی خواهد داشت (De Aquino et al., 2018).

پژوهش‌های انجام شده نشان داده است که کارکرد مانند سیستم‌های آب‌رسانی همراه با ۱۵ تا ۲۰ درصد هوای محبوس شده در خطوط انتقال است. هوای محبوس شده می‌تواند بیش از ۳۰ درصد یک سیستم خط انتقال را اشغال کند، همچنین علت بسیاری از شکست لوله‌ها و هزینه‌های گزاف تعمیرات آنها مربوط به عدم کنترل مناسب هوا است (Balutto, 1996).

برای کنترل هوا در خطوط انتقال آب از روش‌هایی مانند اجتناب از شیب‌های منفی در طراحی خط پروژه، خاک‌برداری اضافی در برخی نواحی برای حذف نقاط فراز طبیعی زمین و به‌دنبال آن حذف تغییر شیب‌ها، همچنین افزایش سرعت جریان آب برای راندن توده‌های هوا در نقاط فراز خط می‌توان استفاده کرد. در حالی که با استفاده از انواع مختلف شیرهای هوا، در خطوط انتقال نیازی به صرف هزینه‌های گزاف برای خاک‌برداری و افزایش سرعت جریان نیست و با نصب شیرهای هوا بر روی خط می‌توان ضمن بهبود بازدهی جریان، مصرف انرژی و هزینه‌های نگهداری را نیز کاهش داد. البته این به دنبال طراحی و اجرای سنجیده خطوط انتقال و داشتن دانش و اطلاعاتی در خصوص طراحی خط پروژه و تعیین موقعیت و اندازه مناسب شیرهای هوا است. تجربه نشان داده است که دیدگاه معمول مهندسين طراح که شامل قرارگیری شیرهای هوا در نقاط فراز خط لوله، برای کنترل هوا است، کافی نیست. همچنین انتخاب اندازه و موقعیت مناسب شیر هوا، بدون توجه به ارزیابی مشخصه‌های سیستم و دینامیک طراحی شیر هوای انتخاب شده، نه تنها مشکلات مربوط به هوا را حل نخواهد کرد بلکه می‌تواند پدیده‌های مخربی چون ضربه قوچ را تشدید کند (Zhou et al., 2011).

وجود هوا در جریان آب به دلایل مختلف در لوله‌های انتقال



شیرهای هوا در خطوط انتقال آب استفاده کند، مسئله مهم به شمار می‌آید. به همین منظور در این پژوهش برنامه‌ای در محیط نرم‌افزار MATLAB توسعه داده شده است تا محاسبات با دقت بیشتری انجام شود.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- توسعه نرم‌افزار

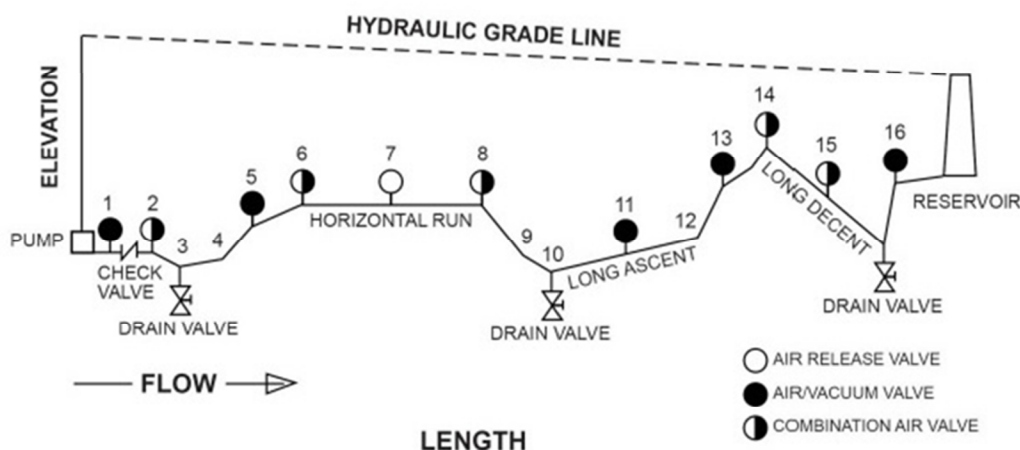
به منظور در اختیار داشتن یک قاعده کلی برای انتخاب موقعیت مناسب شیرهای هوا از انواع مختلف، اغلب سازندگان اقدام به ارائه یک خط لوله فرضی می‌کنند و با توجه به آن موقعیت مناسب و نصب شیرهای هوا را نشان می‌دهند. یکی از پروفیل‌های نمونه، توسط انجمن مطالعات آبی ایالات متحده آمریکا در سال ۲۰۰۱ در شکل ۱ ارائه شده است (AWWA, 2001).

همان‌گونه که در شکل ۱ ملاحظه می‌شود در شرایط مختلف از تغییرات شیب و طول لوله‌ها، شیرهای هوای متفاوتی با مشخصات

می‌تواند باعث خسارت‌های عملیاتی قابل توجهی شود (Ramezani et al., 2015).

در پژوهش لیو و همکاران در سال ۲۰۱۹، مشخصات و رژیم جریان در شیرهای هوا در خطوط لوله با توجه به تغییرات فشار بررسی شد (Liu et al., 2019).

در این پژوهش با استفاده از روابط و دستورالعمل‌های آیین‌نامه‌های معتبر که بر اساس مدل‌های آزمایشگاهی و پژوهش‌های گسترده استوار هستند، راهکاری عملی برای تعیین موقعیت مکانی و اندازه شیرهای هوا و همچنین دبی مورد نیاز برای آب‌اندازی اولیه ارائه شود. از آنجایی که اکثر نرم‌افزارهای موجود برای تحلیل اندازه و موقعیت مکانی شیرهای هوا در طول خطوط انتقال آب از روابط، آیین‌نامه‌ها و دستورالعمل‌های قدیمی استفاده می‌کنند، بنابراین دقت محاسبات تقریبی بوده و باعث غیراقتصادی شدن طرح خواهد شد. در نتیجه لزوم توسعه برنامه‌ای جامع و با دقت زیاد که از روابط به روز برای محاسبه اندازه و موقعیت مکانی



NO.	Description	Recommended Types	NO.	Description	Recommended Types
1	Pump Discharge	Air/Vacuum for Pumps	9	Decr. Downslope	No Valve Required
2	Incr. Downslope	Combination	10	Low Point	No Valve Required
3	Low Point	No Valve Required	11	Long Ascent	Air/Vac or Combination
4	Incr. Upslope	No Valve Required	12	Incr. Upslope	No Valve Required
5	Decr. Upslope	Air/Vac or Combination	13	Decr. Upslope	Air/Vac or Combination
6	Beg. Horiz.	Combination	14	High Point	Combination
7	Horizontal	Air Rel or Combination	15	Long Descent	Air Rel or Combination
8	End Horiz.	Combination	16	Decr. Upslope	Air/Vac or Combination

Fig. 1. The proper location of air valves in long water pipelines (AWWA, 2001)

شکل ۱- مکان مناسب برای نصب شیرهای هوا در خط انتقال آب (AWWA, 2001)



معمولاً در طول‌هایی از لوله با شیب مثبت طویل با فواصل ۶۰۰ متر و در محل شکست دو شیب مثبت است. معادله پیشنهادی برای تعیین اندازه شیر هوای ورود هوا به شرح زیر است (AWWA, 2001)

$$A_{\text{air-vaccum}} = \frac{1.318S^{0.54}R^{0.63}CA_p}{k_{vr}\sqrt{9273.6P_c/\gamma_{\text{air}}}} \quad (2)$$

که در آن

PC، بیشترین فشار مجاز شیر تخلیه برحسب پوند بر اینچ مربع، از معادله زیر تعیین می‌شود

$$P_c = \left(\frac{2E}{1-\nu^2}\right) \left(\frac{T}{ID}\right)^3 \left(\frac{F_o}{N}\right) \quad (3)$$

که در آن

$A_{\text{air-vaccum}}$ سطح مقطع شیر هوای موردنیاز برحسب فوت مربع، S شیب خط لوله، ID قطر داخلی لوله، T ضخامت لوله، R شعاع هیدرولیکی، A_p سطح مقطع لوله برحسب فوت مربع، K_{vr} ضریب مکش شیر هوا معادل ۰/۶، F_o فاکتور دوپهنگی لوله، γ_{air} چگالی هوا معادل ۰/۰۷۵ پوند بر فوت مکعب است.

شیرهای ترکیبی در مواقعی استفاده می‌شوند که احتمال خروج و ورود هوا در نقطه‌ای از خط لوله وجود داشته باشد. معمولاً موقعیت مکانی این نوع شیرها در طول‌هایی از لوله با شیب منفی طویل با فواصل ۶۰۰ متر، در بالای خط الراس‌های با یک شیب مثبت و یک شیب منفی و یا افقی و یا در خط الراس یک شیب افقی با یک شیب منفی، پیشنهاد می‌شود (AWWA, 2001).

۲-۳- محاسبه دبی ماکسیمم هنگام آب‌اندازی اولیه خط

برای عملکرد بهینه سیستم خط انتقال آب، هنگام آب‌اندازی اولیه، هوای محبوس در سیستم باید در کوتاه‌ترین زمان ممکن خارج شود که این امر با پرکردن خط بر اساس دبی پر لوله محقق خواهد شد. در هنگام پرکردن لوله با دبی پر در شیب‌های مثبت، جریان به‌صورت متغیر سریع یا تدریجی خواهد بود و احتمال حبس شدن هوا وجود نخواهد داشت (Zhou and Liu, 2013).

مختلف باید نصب شود. البته مشخص است که چنین روشی صرفاً به‌عنوان یک روش تقریبی برای تعیین محل‌های مناسب نصب شیر هوا بوده و نمی‌تواند جایگزین روش‌ها، توصیه‌های کلی و جامع برای موضوع، در شرایط سیستم‌های تأمین آب پیچیده شود. انواع شیرهای مختلف پیشنهاد شده توسط (AWWA, 2001) شامل شیرهای تخلیه هوا^۱، شیرهای ورود هوا (خلاشکن)^۲ و شیرهای ترکیبی^۳ است که در بخش‌های مختلف خط لوله با توجه به شرایط هیدرولیکی و توپوگرافی قرار می‌گیرند.

۲-۲- تعیین اندازه و موقعیت شیرهای هوا

به‌طور کلی شیرهای هوا شامل شیرهای تخلیه هوا، شیرهای ورود هوا و شیرهای ترکیبی هستند. با توجه به شرایط و پیچیدگی‌های ایجاد هوا در خطوط انتقال آب طویل، روش پیشنهادی در این پژوهش برای انتخاب اندازه و موقعیت بهینه شیرهای هوا ارائه شد. شیر تخلیه هوا، زمانی استفاده می‌شود که احتمال تله افتادن هوا در خط لوله وجود دارد. این احتمال هنگام پر شدن اولیه خط، بیشترین مقدار است. این شیرها زمانی استفاده می‌شوند که وضعیت شیب خط لوله به‌صورت افقی بوده و فواصل قرارگیری آنها نیز ۶۰۰ متر در نظر گرفته خواهد شد. معادله پیشنهادی برای اندازه شیر هوای تخلیه به شرح زیر است (USDA, 2009)

$$A_{\text{air-release}} = \frac{V_f A_p}{k_{ar}\sqrt{9273.6P_{\text{maa}}/\gamma_{\text{air}}}} \quad (1)$$

که در آن

$A_{\text{air-release}}$ سطح مقطع شیر هوای موردنیاز برحسب فوت مربع، V_f سرعت جریان برحسب فوت بر ثانیه، A_p سطح مقطع لوله برحسب فوت مربع، K_{ar} ضریب تخلیه شیر هوا معادل ۰/۶، P_{maa} بیشترین فشار مجاز شیر تخلیه برحسب پوند بر اینچ مربع، γ_{air} چگالی هوا معادل ۰/۰۷۵ پوند بر فوت مکعب است.

شیرهای ورود هوا زمانی استفاده می‌شوند که شیرهای تخلیه آب در خط‌القورها باز شده و احتمال کم‌انشار جانبی لوله تحت اثر خلأزایی به‌وجود آید. موقعیت مکانی این نوع شیرها

¹ Air release

² Air vaccum

³ Air combination



به منظور به دست آوردن تراز دبی ماکسیمم در مقاطع دایره‌ای شکل با استفاده از معادله مانینگ، ابتدا پارامترهای قطر لوله، ضریب زبری و شیب لوله ثابت در نظر گرفته می‌شود. (با توجه به پروژه بررسی شده در این پژوهش، به ترتیب معادل ۱/۸ متر، ۰/۰۱۷ و ۰/۱) سپس پارامتر عمق سیال در لوله به صورت متغیر و به تناسب از ۰ تا ۱۰۰ درصد در نظر گرفته شد و دبی معادل آن طبق معادله مانینگ محاسبه شد. در جدول ۱ خلاصه نتایج محاسبات برای تعیین دبی حداکثر آمده است.

در صورتی که از این دبی به دست آمده برای آب‌اندازی اولیه استفاده شود، وضعیت نیمه پر بودن سایر مقاطع لوله در سایر شیب‌های منفی نیز تضمین می‌شود. بنابراین احتمال به تله افتادن هوا به دلیل پر شدن تدریجی لوله از خط‌القعرها به سمت بالای لوله دیگر وجود نخواهد داشت و هوای رانده شده توسط شیرهای تعبیه شده تخلیه خواهد شد. برای محاسبه دبی حداکثر در ۰/۹۳ قطر لوله از معادله زیر که از معادله مانینگ استخراج شده است استفاده می‌شود

$$Q_{\max \text{ in } 0.93 \text{ pipe diameter}} = \frac{0.3351}{n} ID^{2.6} S^{0.5} \quad (7)$$

که در آن

S کمترین شیب منفی موجود در خط لوله، ID قطر داخلی لوله بر حسب متر، n ضریب زبری مانینگ است.

۲-۴- مراحل پیاده‌سازی مدل

بر اساس معادلات بیان شده باید مکان، اندازه و همچنین دبی حداکثر که باعث بهینه شدن خروج هوا از سیستم هنگام آب‌اندازی اولیه خواهد شد محاسبه شود. از آنجایی که محاسبات مذکور با روش‌های معمولی بسیار زمان‌بر و پیچیده خواهد شد، بنابراین در این پژوهش با استفاده از نرم‌افزار MATLAB برنامه‌ای توسعه داده شد و به منظور راحت‌تر بودن محاسبات برای کاربر، برنامه مذکور در محیط GUI^۱ نیز ارائه شد. مراحل گام‌به‌گام پیاده‌سازی مدل تحت نرم‌افزار MATLAB به شرح زیر است:

گام ۱: انتخاب پارامترهای هیدرولیکی و هندسه مقطع شامل قطر

در شیب‌های منفی که جریان به صورت نرمال است، احتمال به دام افتادن هوا وجود دارد که به تبع باعث افزایش فشار و کاهش هد خواهد شد. برای رفع این مسئله باید به جای دبی پر هنگام آب‌اندازی اولیه، از دبی حداکثر در کمترین شیب منفی که به دلیل ترم غیرخطی شعاع هیدرولیکی در معادله مانینگ در ۰/۹۳ قطر داخلی لوله اتفاق می‌افتد استفاده کرد. نحوه به دست آوردن تراز دبی حداکثر به این صورت است که هندسه مقطع لوله پر شده توسط جریان در ترازهای مختلف محاسبه شد و سپس در معادله مانینگ قرار گرفت. نتایج نشان داد که دبی حداکثر در ۰/۹۳ قطر داخلی لوله به دست می‌آید.

مساحت و محیط تر شده یک مقطع دایره‌ای از معادلات زیر قابل محاسبه است

$$y = \frac{D}{2} (1 - \cos \frac{\phi}{2}) \quad (4)$$

$$A = \frac{D^2}{8} (\phi - \sin \phi) \quad (5)$$

$$P = D \frac{\phi}{2} \quad (6)$$

که در آنها

y عمق سیال موجود در لوله، A سطح مقطع جریان، P محیط تر شده مقطع و ϕ زاویه نشان داده شده در شکل ۲ است.

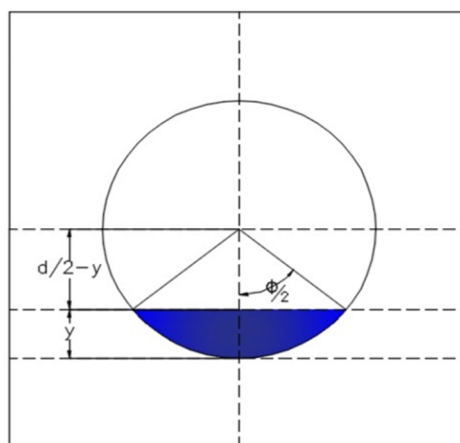


Fig. 2. The cross section of circular pipe
شکل ۲- هندسه مقطع لوله دایره‌ای

¹ Graphical User Interface (GUI)



جدول ۱- محاسبه تراز دبی حداکثر در مقاطع دایره‌ای

Table 1. The results of maximum flow rate calculation for circular pipe

Slope of pipeline	Manning coefficient	Pipe diameter (m)	y (m)	Φ (radian)	Area (m ²)	P (m)	Flow rate (m ³ /s)
0.100	0.017	1.800	0.010	0.401	0.004	0.361	0.004
0.100	0.017	1.800	0.020	0.568	0.012	0.511	0.019
0.100	0.017	1.800	0.030	0.696	0.022	0.627	0.045
0.100	0.017	1.800	0.040	0.805	0.034	0.725	0.083
0.100	0.017	1.800	0.050	0.902	0.048	0.812	0.133
....
0.100	0.017	1.800	0.330	2.448	0.732	2.203	6.537
0.100	0.017	1.800	0.340	2.490	0.763	2.241	6.919
0.100	0.017	1.800	0.350	2.532	0.794	2.279	7.309
0.100	0.017	1.800	0.360	2.574	0.825	2.317	7.706
0.100	0.017	1.800	0.370	2.616	0.856	2.354	8.111
....
0.100	0.017	1.800	0.750	4.189	2.047	3.770	25.347
0.100	0.017	1.800	0.760	4.235	2.075	3.812	25.735
0.100	0.017	1.800	0.770	4.282	2.103	3.854	26.112
0.100	0.017	1.800	0.780	4.330	2.130	3.897	26.477
0.100	0.017	1.800	0.790	4.379	2.156	3.941	26.830
....
0.100	0.017	1.800	0.930	5.212	2.466	4.691	29.887
0.100	0.017	1.800	0.931	5.220	2.468	4.698	29.890
0.100	0.017	1.800	0.932	5.228	2.470	4.705	29.893
0.100	0.017	1.800	0.933	5.236	2.471	4.712	29.895
0.100	0.017	1.800	0.934	5.244	2.473	4.720	29.897
0.100	0.017	1.800	0.935	5.252	2.475	4.727	29.899
0.100	0.017	1.800	0.936	5.260	2.476	4.734	29.900
0.100	0.017	1.800	0.937	5.268	2.478	4.742	29.901
0.100	0.017	1.800	0.938	5.277	2.479	4.749	29.901
0.100	0.017	1.800	0.939	5.285	2.481	4.756	29.901
0.100	0.017	1.800	0.940	5.293	2.482	4.764	29.900
0.100	0.017	1.800	0.950	5.381	2.497	4.843	29.868
0.100	0.017	1.800	0.960	5.478	2.511	4.930	29.781
0.100	0.017	1.800	0.970	5.587	2.522	5.028	29.624
0.100	0.017	1.800	0.980	5.716	2.533	5.144	29.373
0.100	0.017	1.800	0.990	5.883	2.540	5.294	28.963
0.100	0.017	1.800	1.000	6.283	2.545	5.655	27.797



در صورتی که شیب کلی لوله منفی باشد و طول لوله از ۶۰۰ متر بیشتر شود، هر ۶۰۰ متر به تناسب یک شیر هوای ترکیبی در طول لوله قرار می‌گیرد.

در صورتی که شیب کلی لوله صفر باشد و طول لوله از ۶۰۰ متر بیشتر شود، هر ۶۰۰ متر به تناسب یک شیر هوای تخلیه در طول لوله قرار می‌گیرد.

گام ۵: محاسبه اندازه شیرهای هوا از معادلات ۱ تا ۳.

گام ۶: محاسبه دبی ماکسیمم خط برای آب‌اندازی اولیه.

گام ۷: محاسبه امکان وقوع ضربه قوچ و سائز شیر فشارشکن با استفاده از معادلات ۹ و ۱۰

$$\Delta H = \frac{a \times \Delta v}{g} \quad (9)$$

که در آن

مقدار ΔH حداکثر تغییر فشار ناشی از ضربه قوچ بر حسب متر، a سرعت انتشار موج فشاری بر حسب متر بر ثانیه، Δv تغییر ناگهانی سرعت و g شتاب گرانش بر حسب متر بر مجذور ثانیه است. بسته به نوع لوله سرعت انتشار موج بین ۸۰۰ تا ۱۲۰۰ متر بر ثانیه متفاوت است ولی در لوله‌های پلاستیکی این سرعت بسیار کمتر بوده و در حدود ۳۰۰ تا ۵۰۰ متر بر ثانیه متغیر است.

برای محاسبه سرعت انتشار موج فشاری می‌توان از معادله ۱۰ استفاده کرد. این معادله با فرض وجود قید سرتاسری روی لوله استنتاج شده است (Traudt et al., 2016)

$$a = \frac{\sqrt{\frac{K}{\rho}}}{\sqrt{1 + \frac{K}{E} \frac{ID}{e} (1-9)^2}} \quad (10)$$

که در آن

a سرعت انتشار موج فشاری بر حسب متر بر ثانیه، K مدول بالک سیال بر حسب نیوتن بر متر مربع، ρ چگالی سیال بر حسب کیلوگرم بر متر مکعب، E مدول الاستیسیته لوله بر حسب نیوتن بر متر مربع، e ضخامت لوله بر حسب میلی‌متر، ID قطر داخلی لوله بر حسب میلی‌متر و θ ضریب پواسون لوله است.

لوله، ضخامت لوله، ضریب زبری مانینگ، سرعت سیال، فشار ماکسیمم خط، فشار کاری خط، فشار قابل تحمل لوله و ضریب اطمینان که توسط طراح و جداول کارخانه سازنده لوله ارائه می‌شوند.

گام ۲: ورود اطلاعات شکست‌های موجود در خط لوله به صورت تراز ایستگاه Z و موقعیت ایستگاه X .

گام ۳: محاسبه شیب قطعه سمت راست (S_1) و سمت چپ (S_0) هر ایستگاه از معادله زیر

$$S_0 = \frac{Z_1 - Z_0}{X_1 - X_0}, \quad S_1 = \frac{Z_2 - Z_1}{X_2 - X_1} \quad (8)$$

گام ۴: محاسبه موقعیت مکانی شیرها طبق شرایط زیر:

در صورتی که شیب سمت چپ محل شکست لوله صفر ($S_0=0$) و شیب سمت راست منفی باشد ($S_1 < 0$) در محل شکست شیر هوای ترکیبی قرار خواهد گرفت.

در صورتی که شیب سمت چپ محل شکست لوله مثبت باشد ($S_0 > 0$) و شیب سمت راست صفر باشد ($S_1=0$) در محل شکست شیر هوای ترکیبی قرار خواهد گرفت.

در صورتی که شیب سمت چپ محل شکست لوله منفی ($S_0 < 0$) و شیب سمت راست نیز منفی باشد ($S_1 < 0$) در محل شکست نیازی به شیر هوا نیست.

در صورتی که شیب سمت چپ محل شکست لوله مثبت ($S_0 > 0$) و شیب سمت راست نیز مثبت باشد ($S_1 > 0$) و همچنین شیب سمت راست از شیب سمت چپ کمتر باشد ($S_1 < S_0$) در محل شکست شیر ورود هوا قرار خواهد گرفت.

در صورتی که شیب سمت چپ محل شکست لوله مثبت ($S_0 > 0$) و شیب سمت راست نیز مثبت باشد ($S_1 > 0$) و همچنین شیب سمت راست بیشتر از چپ باشد ($S_1 > S_0$) در محل شکست نیازی به شیر هوا نیست.

در صورتی که شیب سمت چپ محل شکست لوله مثبت ($S_0 > 0$) و شیب سمت راست منفی باشد ($S_1 < 0$) در محل شکست شیر هوای ترکیبی قرار خواهد گرفت.

در صورتی که شیب کلی لوله مثبت باشد و طول لوله از ۶۰۰ متر بیشتر شود، هر ۶۰۰ متر به تناسب یک شیر هوای ورود هوا در طول لوله قرار می‌گیرد.



پس از انجام محاسبات برای هر ایستگاه، آنالیز هیدرولیکی شیرهای هوا انجام شده و گزارش گرافیکی در خصوص اندازه و مکان شیرهای مورد نیاز ارائه می‌شود (شکل ۳). شایان ذکر است که پس از انجام آنالیز شیرهای هوا توسط نرم‌افزار Valmatic گزارش متنی در خصوص اندازه هر شیر نیز ارائه می‌شود.

۲-۶- بررسی نتایج مدل پیشنهادی بر مبنای ضوابط نشریه ۱۱۷

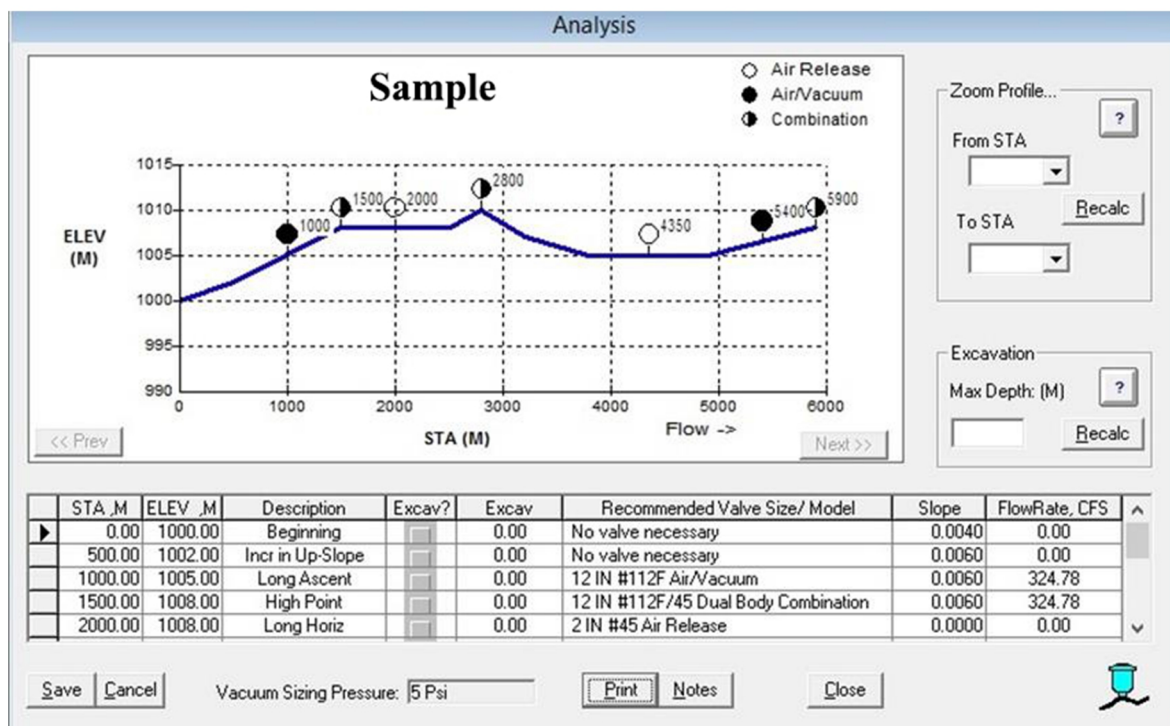
نشریه ۱۱۷ معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی ریاست جمهوری، پیرامون ضوابط طراحی سامانه‌های انتقال و توزیع آب شهری و روستایی است. این نشریه به‌عنوان راهنما و دستورالعملی برای طراحی سامانه‌های انتقال و توزیع آب برای دستگاه‌های اجرایی، مشاوران و پیمانکاران به شمار می‌آید. در فصل ششم این نشریه ضوابط و ملاحظات فنی تجهیزات استفاده شده در خطوط انتقال بررسی شده است.

بند ۶-۴-۲-۱-۳ این نشریه به‌صورت اختصاصی به ضوابط طراحی شیرهای هوا اشاره دارد (IRIVSPS, 2013).

۲-۵- مقایسه نتایج مدل پیشنهادی با نتایج مدل‌سازی با نرم‌افزار Valmatic

به‌منظور طراحی شیرهای هوا در خطوط انتقال سیالات برخی از تولیدکنندگان شیرهای هوا نرم‌افزارهایی برای محاسبات اندازه و گاهی اوقات موقعیت شیر هوا ارائه کرده‌اند. یکی از مطرح‌ترین نرم‌افزارهای موجود در این زمینه که توسط اکثر شرکت‌های مشاوره و طراحی استفاده می‌شود و موقعیت مکانی و اندازه شیرهای هوا را محاسبه و گزارش می‌کند، نرم‌افزار Valmatic است (Lemont and Valparaiso, 2003) و توسط شرکت Valmatic یکی از شرکت‌های سازنده شیرهای هوا در آمریکا توسعه داده شده است.

در ادامه این پژوهش به‌منظور مقایسه نتایج حاصل از این مدل، مسئله برنامه توسعه داده شده، مجدداً با نرم‌افزار Valmatic نیز مدل‌سازی شد و نتایج با یکدیگر مقایسه شد. مراحل انجام مدل‌سازی در نرم‌افزار Valmatic به این صورت است که در ابتدا ورودی‌های مربوطه از قبیل قطر لوله، ضخامت لوله، دبی سیستم، ضریب اطمینان، ایستگاه‌ها و رقوم آنها به نرم‌افزار معرفی می‌شوند.



شکل ۳- پروفیل طولی و مدل شیر هوای مورد نیاز برای هر ایستگاه توسط نرم‌افزار Valmatic



هیدرولیکی خط لوله و نیز اطلاعات مربوط به مختصات شکست‌های پروفیل خط لوله، در جداول ۲ و ۳ ارائه شده است (Engineers, 2015).

پس از معرفی و وارد کردن اطلاعات هیدرولیکی و هندسی خط لوله به نرم‌افزار تهیه شده، اندازه و موقعیت بهینه شیرالات هوا در خط لوله تعیین می‌شود. همان‌گونه که اشاره شد، به‌منظور این که برنامه نوشته شده به راحتی قابلیت استفاده توسط هر نوع کاربر را داشته باشد، بنابراین برنامه مذکور در محیط GUI نیز ارائه شده است.

در شکل ۴ معرفی مشخصات خط لوله و نیز نتایج آنالیز شیرهای هوا در محیط نرم‌افزار نشان داده شده است.

در این پژوهش، نتایج حاصل از مدل پیشنهادی با ضوابط فنی ذکر شده در این نشریه نیز مقایسه و ارزیابی شده است تا الزامات بیان شده در این نشریه نیز در طراحی مدنظر قرار گرفته باشد.

۳- نتایج و بحث

روش معرفی شده در این پژوهش برای قسمتی از خط لوله پروژه خط انتقال آب به شهرهای شمالی استان کرمان پیاده‌سازی شد. برای بررسی کاربرد برنامه توسعه داده شده توسط نرم‌افزار MATLAB، مشخصات هندسی و هیدرولیکی خط لوله موردنظر مربوط به قسمتی از پروژه خط انتقال آب به شهرهای شمالی استان کرمان، برای نرم‌افزار فراخوانی شد. مشخصات هندسی و

جدول ۲- مشخصات هندسی و هیدرولیکی خط لوله

Table 2. The geometric and hydraulic properties of pipeline

Manning coefficient	Pipe design flow velocity	Pipe working pressure	Pipe maximum pressure	Design flow rate	Pipe thickness	Inner pipe diameter
0.017	1 m/s	16 bar	33 bar	3 m ³ /s	14.27 mm	1800 mm

جدول ۳- مختصات شکست‌های پروفیل خط لوله

Table 3. The pipeline longitudinal profile coordinates

5900	4900	3800	3200	2800	2500	1500	500	0	Distance (m)
1008	1005	1005	1007	1010	1008	1008	1002	1000	Elevation (m)

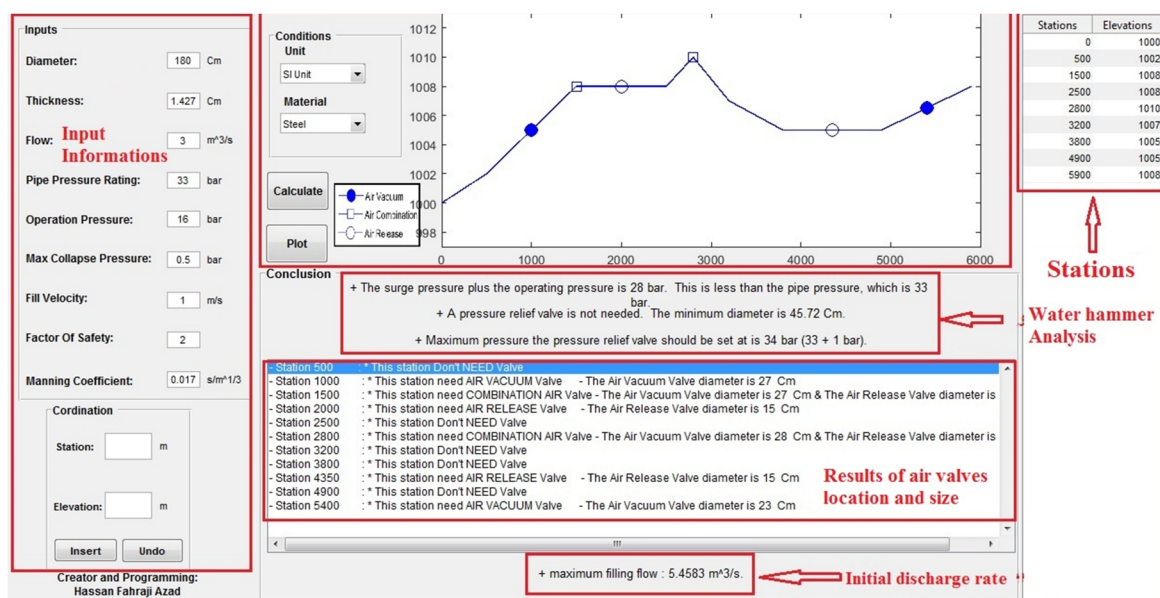


Fig. 4. Results of air valves analysis according to the MATLAB- GUI software

شکل ۴- نتایج آنالیز شیرهای هوا توسط نرم‌افزار MATLAB- GUI



اندازه شیرهای هوای موردنیاز در خط لوله، دبی موردنیاز برای آب‌اندازی اولیه خط به‌گونه‌ای که کمترین مقدار حبس شدگی هوا و کوتاهترین زمان ممکن برای خروج هوا در خط رخ دهد به مقدار ۵/۴۵ مترمکعب بر ثانیه محاسبه و گزارش شد. شایان ذکر است که از آنجایی که دبی طراحی بعد از بهره‌برداری خط که سیستم به‌صورت نرمال کار خواهد برابر ۳ مترمکعب بر ثانیه است، بنابراین این ظرفیت مازاد قطعاً باید در ایستگاه پمپاژ دیده شده و تأمین شود تا بتوان از مشکلات ناشی از هوای محبوس جلوگیری به عمل آورد.

در نهایت به‌منظور ارزیابی نتایج حاصل از مدل ارائه شده، نتایج آنالیز شیرهای هوا توسط نرم‌افزار Valmatic و برنامه توسعه شده توسط نرم‌افزار MATLAB مقایسه شد. در جدول ۵ گزارش نتایج حاصل از هر دو روش ارائه شده است.

روابط استفاده شده برای تعیین اندازه شیرهای هوا در نرم‌افزار Valmatic روابطی قدیمی و تقریبی هستند و در روابط استفاده شده، تنها شیب خط لوله و قطر لوله ملاک محاسبه اندازه شیر هوا است. در صورتی که پارامترهایی از قبیل فشار خط، سرعت سیال، چگالی هوا مطابق پیشنهاد USDA نیز به طرز چشمگیری بر اندازه واقعی شیرهای هوا مؤثرند که در نرم‌افزار Valmatic لحاظ نمی‌شوند (Association, 2001).

همچنین دبی حالت ماکسیمم در نرم‌افزار Valmatic محاسبه نشده است و در نتیجه دبی آب‌اندازی اولیه خط پیشنهاد نمی‌شود. در صورتی که در روش پیشنهادی در این پژوهش، دبی آب‌اندازی اولیه خط لوله، به‌گونه‌ای محاسبه و پیشنهاد می‌شود که کمترین احتمال به تله افتادن هوا و خروج سریع‌تر هوا فراهم آید.

با توجه به نتایج، مدل شیرهای هوا در هر دو آنالیز انجام شده در موقعیت‌های مکانی خط انتقال با توجه به مختصات شکست لوله یکسان است. سائز شیرهای ترکیبی و ورود هوا همان‌گونه که از قبل پیش‌بینی شده بود به‌دلیل معادله‌های حاکم بر دو نرم‌افزار و با توجه به دقت کمتر این روابط در نرم‌افزار Valmatic دو اینچ بیشتر از برنامه MATLAB محاسبه شد، که نیازی به این اندازه نبوده و باعث غیراقتصادی شدن طرح خواهد شد. بنابراین محاسبات و طراحی بر مبنای مدل پیشنهادی در این پژوهش، باعث اقتصادی شدن طرح نیز می‌شود.

در نهایت به‌منظور کنترل و رعایت ملزومات طراحی قید شده

خلاصه نتایج حاصل از تحلیل مدل عددی برای تعیین موقعیت مکانی و نیز اندازه شیرهای هوای تحلیل شده توسط برنامه توسعه داده شده، در جدول ۴ ارائه شده است. با توجه به نتایج، در طول مسیر خط لوله نوع و اندازه شیرهای هوا و نیز لزوم تعبیه شیرها مشخص شده است.

جدول ۴- خلاصه نتایج آنالیز شیرهای هوا توسط برنامه

Table 4. The results of air valves analysis

Air valve location (m)	Type of air valve	Size of air valve (in)
0	-	-
500	-	-
1000	Vaccum	10
1500	Combination	10
2000	Release	6
2500	-	-
2800	Combination	10
3200	-	-
3800	-	-
4350	Release	6
4900	-	-
5400	Vaccum	10

- : No need for air valve

با توجه به جدول ۴ همان‌گونه که مشاهده می‌شود، در طول‌های صفر، ۵۰۰، ۲۵۰۰، ۳۲۰۰، ۳۸۰۰ و ۴۹۰۰ متری نیازی به تعبیه شیر هوا نیست، همچنین در فاصله طولی ۱۰۰۰ متر، شیر ورود هوا با قطر ۱۰ اینچ، در فاصله ۱۵۰۰ متر، شیر ترکیبی هوا با قطر ۱۰ اینچ، در فاصله ۲۰۰۰ متر، شیر تخلیه هوا با قطر ۶ اینچ، در فاصله ۲۸۰۰ متر، شیر ترکیبی هوا با قطر ۱۰ اینچ، در فاصله ۴۳۵۰ متر، شیر تخلیه هوا با قطر ۶ اینچ باید به‌کار برده شود. با توجه به نتایج مدل عددی، در فاصله ۵۴۰۰ متر، شیر ورود هوا با قطر ۹ اینچ پیشنهاد شد. شایان ذکر است که این اندازه بهینه برای شیر ورود هوا است که توسط برنامه طراحی شده است، ولی با توجه به شرایط موجود و اندازه شیرهای تولیدی کارخانه‌ها، شیر با قطر ۱۰ اینچ جایگزین شده است و به عنوان تصمیم‌گیری نهایی انتخاب شد. در برنامه مذکور علاوه بر تحلیل مربوط به موقعیت مکانی و



جدول ۵- مقایسه نتایج آنالیز شیرهای هوا توسط برنامه MATLAB و نرم افزار Valmatic

Table 5. Results of air valves analysis according to the MATLAB- GUI and Valmatic software

Air valve station (m)	Valmatic software		MATLAB software	
	Air valve type	Size (in)	Air valve type	Size (in)
0	-	-	-	-
500	-	-	-	-
1000	Air/Vaccum	12	Air/Vaccum	10
1500	Air/Combination	12	Air/Combination	10
2000	Air/Release	2	Air/Release	6
2500	-	-	-	-
2800	Air/Combination	12	Air/Combination	10
3200	-	-	-	-
3800	-	-	-	-
4350	Air/Release	2	Air/Release	6
4900	-	-	-	-
5400	Air/Vaccum	10	Air/Vaccum	10

- : No need for air valve

جدول ۶- راهنمای تعیین شیر تخلیه هوا

Table 6. Guide to determining the diameter of the air valve

Air valve diameter (mm)	Main pipeline diameter (mm)
80	<250
100	250-600
150	600-900
200	900-1200
250 or more	1400-1800

۲-۱-۳- نشریه ۱۱۷ و نیز جدول ۶ ارائه شده در خصوص راهنمای تعیین قطر شیر هوا، توصیه شده است که حداقل قطر انتخابی برای شیرهای هوای ترکیبی در صورتی که قطر لوله اصلی ۱۴۰۰ تا ۱۸۰۰ میلی متر باشد، باید حداقل ۲۵۰ میلی متر انتخاب شود. در محاسبات انجام شده توسط نرم افزار توسعه داده شده در این پژوهش، این موضوع رعایت شده است و قطر شیرهای هوای ترکیبی حداقل ۱۰ اینچ معادل ۲۵۴ میلی متر است که نشان می دهد نتایج با ضوابط نشریه ۱۱۷ مطابقت دارد.

در نشریه ۱۱۷، نتایج حاصل از مدل پیشنهادی با ضوابط طراحی شیرهای هوا، موضوع بند ۶-۴-۲، مقایسه و ارزیابی شده است. بر مبنای توصیه این نشریه، نصب شیر هوا در نقاط مرتفع مسیر خط انتقال باید انجام شود.

همچنین در نقاطی از خطوط انتقال آب که امکان تجمع هوا وجود دارد، باید شیر تخلیه هوا تعبیه شود. با توجه به نتایج و همان گونه که در شکل ۴ نیز ارائه شده است، این موضوع در مدل توسعه داده شده در نظر گرفته شده است. از طرف دیگر بر اساس بند ۶-۴-



۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش موضوع هوای محبوس و تأثیرات منفی آن در خطوط انتقال آب طویل بررسی شد. با توجه به پژوهش‌های انجام شده، روشی برای مکان‌یابی و تعیین اندازه شیرآلات هوا در خطوط لوله انتقال آب ارائه شد. در روش پیشنهادی محاسبات مربوط به اندازه و موقعیت مکانی شیرهای هوا بر اساس روابط USDA انجام می‌شود و همچنین روشی جدید برای تعیین میزان دبی آب‌اندازی اولیه خط انتقال آب طویل به‌گونه‌ای که سیستم از لحاظ مقدار حبس شدگی هوا و زمان خروج هوا دارای عملکرد بهینه باشد ارائه می‌شود. سپس برنامه‌ای تحت نرم‌افزار MATLAB توسعه داده شد، که با دریافت اطلاعات هندسی و هیدرولیکی خط لوله نسبت به محاسبه اندازه، موقعیت مکانی و دبی آب‌اندازی اولیه خط اقدام می‌کند. در این برنامه با اتخاذ نگاه کاربردی، محاسبات هیدرولیکی جریان در هر قسمت از پروفیل طولی مسیر انجام شده و نتایج در قالب نمودارها و گراف‌های عملی ارائه شد. نتایج حاوی موقعیت مناسب نصب شیرهای هوا در شرایط مرزی مختلف و اندازه پیشنهادی آنها برای خروج هوای محبوس است. در برنامه

پیشنهادی مقاطع بحرانی برای تجمع هوا که نصب شیرهای هوا در آن ضروری است، شناسایی شده و مشخصات شیرها پیشنهاد شد. به این ترتیب با به‌کارگیری نتایج این برنامه می‌توان شرایط هیدرولیکی جریان را پیش‌بینی کرد و با شناسایی نقاط بحرانی تجمع هوا، شیرهای نوع مناسب را پیشنهاد کرد تا از اثرات نامطلوب تجمع هوا در خطوط لوله آب اجتناب کرد. در نهایت به منظور ارزیابی نرم‌افزار توسعه داده شده مذکور، اقدام به مدل‌سازی مسئله خط انتقال لوله با نرم‌افزار Valmatic که از مشهورترین نرم‌افزارها برای طراحی شیرهای هوا است، شد. نتایج نشان داد که ضمن مکان‌یابی مناسب شیرهای هوا در خط لوله، استفاده از برنامه توسعه داده شده در این پژوهش منجر به تعیین اندازه بهینه شیرآلات هوا و در نتیجه صرفه‌جویی اقتصادی خواهد شد.

۵- قدردانی

از بخش مهندسی عمران دانشگاه شهید باهنر کرمان برای فراهم کردن بستر انجام این پژوهش قدردانی به عمل می‌آید.

References

- AWWA. 2001. *Rehabilitation of water mains: M28*, American Water Works Association, APHA Publication, Washington DC, USA.
- Balutto, A. 1996. Air valve technology reviewed, introducing controlled air transferred technology. VENT-O-MAT, <http://internationalvalve.com>
- Bergant, A., Kruisbrink, A. & Arregui de la Cruz, F. 2012. Dynamic behaviour of air valves in a large-scale pipeline apparatus. *Strojniški vestnik. Journal of Mechanical Engineering*, 58(4), 225-237.
- Bianchi, A., Mambretti, S. & Pianta, P. 2007. Practical formulas for the dimensioning of air valves. *Journal of Hydraulic Engineering*, 133(10), 1177-1180.
- De Aquino, G. A., De Lucca, Y. D. F. L. & Dalfré Filho, J. G. 2018. The importance of experimental tests on air valves for proper choice in a water supply project. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 40(8), 1-9.
- Islamic Republic of Iran Vice Presidency for Strategic Planning and Supervision (IRIVSPSPS). 2013. *Guidelines for design of urban and rural water supply and distribution systems, Report No. 117-3 (First- Revision)*, Islamic Republic of Iran Vice Presidency for Strategic Planning and Supervision Press. (In Persian)
- Liu, H., Zhu, Y., Pei, S., Savić, D., Fu, G., Zhang, C., et al., 2019. Flow regime identification for air valves failure evaluation in water pipelines using pressure data. *Water Research*, 165, 115002.
- Lemont, I. L. & Valparaiso, I. N. 2003. *Val-Matic valve and manufacturing corp.* Commercial and Industrial Software in Elmhurst Pub., Illinois, USA.



- Mahab Ghods Consulting Engineers, 2015. Water transmission project of Kerman northern cities. Tehran, Iran. (In Persian)
- McPherson, D.L. 2009. Air valve sizing and location: a prospective. *In Pipelines 2009: Infrastructure's Hidden Assets*, 905-919.
- Ramezani, L., Karney, B. & Malekpour, A. 2015. The challenge of air valves: a selective critical literature review. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 141(10), 04015017.
- Traudt, T., Bombardieri, C. & Manfletti, C. 2016. Influences on water-hammer wave shape: an experimental study. *CEAS Space Journal*, 8, 215-227.
- USDA, 2009. *Structural Engineering National Engineering Handbook*, Structural Design of Flexible Conduits, USDA Press, US.
- Vasconcelos, J. G. & Wright, S. J. 2008. Rapid flow startup in filled horizontal pipelines. *Journal of Hydraulic Engineering*, 134, 984-992.
- Wu, Y., Xu, Y. & Wang, C. 2015. Research on air valve of water supply pipelines. *Procedia Engineering*, 119, 884-891.
- Zhou, L. & Liu, D. 2013. Experimental investigation of entrapped air pocket in a partially full water pipe. *Journal of Hydraulic Research*, 51, 469-474.
- Zhou, L., Liu, D., Karney, B. & Zhang, Q. 2011. Influence of entrapped air pockets on hydraulic transients in water pipelines. *Journal of Hydraulic Engineering*, 137, 1686-1692.

