مطالعه اثر فاصله و قطر نشت بر مشخصات هیدرولیکی امواج فشاری جریان غیرماندگار

کامران محمدی[1]، منوچهر فتحی مقدم[2*]، جواد احدیان[3] و صادق حقیقی پور[4]

۱- دانشجو دکتری سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی علوم آب دانشگاه شهید چمران اهواز.

۲*- نویسنده مسئول، استاد گروه سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی علوم آب دانشگاه شهید چمران اهواز Fathi49@gmail.com

۳- استادیار گروه سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی علوم آب دانشگاه شهید چمران اهواز.

۴- استادیار گروه مهندسی عمران، موسسه آموزش عالی جهاد دانشگاهی استان خوزستان.

تاریخ دریافت: ۹۴/۲/۱۴ تاریخ پذیرش: ۹۴/۹/۲۲

چکیده

به وجود آمدن جریان غیرماندگار در سامانه‌های انتقال آب به دلیل تغییر از یک حالت پایدار به حالت پایدار دیگر همواره اجتناب ناپذیر است. از سوی دیگر با گذشت زمان به علل گوناگون خط لوله دچار نشت و یا حتی شکستگی می‌شود. بنابراین بررسی خصوصیات جریان‌های غیرماندگار در حضور نشت از اهمیت ویژه‌ای برخوردار خواهد بود. لذا در این تحقیق جریان غیرماندگار سریع با وجود نشت در سامانه، مورد شبیه‌سازی آزمایشگاهی قرار می‌گیرد و به کمک آن تأثیر مشخصات نشت از جمله قطر و مکان نشت بر خصوصیات هیدرولیکی جریان غیرماندگار سریع مورد ارزیابی قرار خواهد گرفت. آزمایش‌ها روی یک سامانه مخزن، لوله و شیر انجام شده است که لوله آن از جنس پلی‌اتیلن به قطر ٦٣ میلی‌متر و طول ٤٧ متر است و ارتفاع استاتیکی مخزن تامین بار آب ٥ متر می‌باشد. در مجموع سه دبی، چهار قطر نشت، چهار موقعیت نشت و دو زمان بستن مورد آزمایش قرار گرفت که نتایج حاکی از آن است که امواج فشاری ناشی از بستن آنی بهتر می‌تواند وجود نشت را در سامانه نمایان سازد تا بستن کند. افت فشار در حداکثر فشاری موج اول با افزایش قطر نشت افزایش می‌یابد و شیب افت فشار ناشی از نشت در حداکثر اول برای نشت‌هایی که از مخزن دورتر هستند و یا به شیر نزدیک‌ترمی‌باشند سریع‌تر است. همچنین شیب میرایی امواج برای حالت وجود نشت با قطر بیشتر در سامانه تندتر از حالت نشت با قطر کمتر می‌باشد.

کلیدواژه‌ها: مدل آزمایشگاهی، نشت، جریان غیرماندگار سریع، امواج فشاری.

Study of Effect of Distance and Diameter of Leak on Hydraulic Properties of Unsteady Pressure Waves

K. Mohammadi[1], M. Fathi-Moghadam[2*], J. Ahadian[3] and S. Haghighipour[4]

1- Ph.D. Candidate, Faculty of Water Sciences Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Iran

2*- Corresponding Author, Professor, Faculty of Water Sciences Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Iran

3- Assistant professor, Faculty of Water Sciences Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Iran

4- Assistant professor, Institute for Higher Education ACECR, Khoozestan, Iran

Received:4 May 2015 Accepted:13 December 2015

Abstract

Having unsteady flow in water supply systems due to the change from one stable state to another stable state is inevitable. On the other hand, over time, the various causes lead to the pipeline leakage or even a pipe fracture. So, with presence of leak, investigation of characteristics of unsteady flow that is an integral part of the hydraulic system will be of particular important. In current study, the fast unsteady flow that is one of the most damaging types of flow is simulated by laboratory considering leak in pipeline and with respect to that, the impact of leakage characteristics such as size and location of the leak on the hydraulic properties of unsteady flow will be evaluated. The experiments were carried on a tank, pipes and valve system that made of 63 mm polyethylene pipe with length of 47 meters and a height of 5 m for static water head in tank. A total of 3 discharges, 4 leakage diameters, 4 leakage positions and 2 fasten time of valve

were tested that illustrate gradual valve fastening cannot show the leakage in pipeline system. Peak pressure drop in the first period of wave increases with increasing diameter and slope of the pressure drop caused by a leak in the first peak are faster for the leaks that nearer to the valve. Also, the pressure wave damping slope is steeper in the case of leakage with a greater diameter than leakage with a smaller diameter.

Keywords: Experimental model, Leakage, Rapid unsteady flow, Pressure waves.

مقدمه

تحلیل جریان‌های غیرماندگار سریع از این برای که منجر به جلوگیری از وارد شدن خسارت‌های شدید به سامانه آبرسانی می‌شود دارای اهمیت فراوان است. این خسارت‌ها سالانه هزینه‌های زیادی را در هنگام بهره‌برداری، بر سامانه‌های انتقال آب تحمیل می‌نماید. با توجه به ماهیت غیرماندگار بودن جریان، دخالت دادن عامل زمان در محاسبات غیر قابل چشم‌پوشی به نظر می‌رسد. در واقع تمام جریان‌های ناپایدار، تبدیل یا انتقال کوتاه مدت یا بلند مدت از حالت جریان پایدار به حالت پایدار دیگری هستند. لذا با توجه به موارد فوق تعیین مشخصات جریان غیرماندگار سریع از مباحث حائز اهمیت هیدرولیک خطوط انتقال آب است تا جایی که نرم‌افزارهای بسیاری به منظور تحلیل پدیده ضربه‌قوچ که یک جریان غیرماندگار سریع می‌باشد نیز تهیه شده است.

از سوی دیگر با گذشت زمان از بهره‌برداری خطوط انتقال آب، نشت آب در هر کجای یک سامانه آبرسانی نظیر تاسیسات آبگیر، سامانه انتقال، تصفیه‌خانه، مخازن ذخیره و یا شبکه توزیع ممکن است رخ دهد. از این میان شبکه توزیع معمولاً بیشترین سهم را در تلفات آب دارد، به طوری که گاهی اوقات مشاهده شده که ۴۰ تا ۵۰ درصد از آب تولیدی در شبکه توزیع تلف شده است. اما خطوط انتقال از آنجایی که همواره دارای اهمیت فراوانی می‌باشند بیشتر مورد توجه قرار می‌گیرند چرا که کوچک‌ترین مشکلی که باعث نقصان در عملکرد خط انتقال شود موجب توقف و یا ایجاد مشکل در روند آبرسانی می‌گردد. وجود نشت در خطوط انتقال آب می‌تواند تأثیر عمده‌ای بر رفتار هیدرولیکی جریان‌های میرای سریع به وجود آمده در سامانه آبرسانی داشته باشد. بنابراین بررسی و شناخت خصوصیات هیدرولیکی امواج فشاری گذرای به وجود آمده در سامانه تحت تأثیر وجود نشت در خط لوله دارای اهمیت خاصی می‌باشد. این مسئله همچنین از این دیدگاه که وقوع جریان غیرماندگار سریع چه تأثیری می‌تواند بر میزان نشت داشته باشد نیز حائز اهمیت است.

ژوکوفسکی[1] (۱۸۹۸) اولین شخصی بود که نشان داد علت بالا رفتن فشار در مسیر خطوط لوله انتقال سیالات در نتیجه تغییر سرعت و جرم سیال است. ایشان رابطه $\Delta P = -\rho c \Delta V$ را برای تعیین و محاسبه سرعت انتشار موج فشار ناشی از ضربه قوچ ارائه نمود. با توجه به تلاش و کوشش فراوان و پر ثمر آقای ژوکوفسکی در بررسی پدیده ضربه‌قوچ و نتایج سودمند این تحقیقات، مطابق نظر صاحب‌نظران عنوان بانی و پدر علم ضربه‌قوچ شایسته و برازنده ایشان است. تحقیقات بر روی پدیده ضربه قوچ ادامه یافت تا اینکه فردی ایتالیایی به نام آلیوی[2] (۱۹۱۳) به تجزیه و تحلیل جدیدی در فرآیند ضربه‌قوچ رسید و دامنه مطالعاتی قبلی را به صورت گسترده‌ای بسط و توسعه داد. فریزل[3] (۱۸۹۸) بر اساس مطالعاتی که هنگام کار در نیروگاه اوگدن انجام داده بود، تحلیلی از ضربه‌قوچ ارائه داد. وی روابطی برای سرعت موج ضربه‌قوچ و افزایش فشار حاصل از کاهش ناگهانی سرعت به دست آورد. وی همچنین اثر خط لوله‌های انشعابی، انعکاس امواج و موج‌های متوالی روی تنظیم سرعت را مورد مطالعه قرار داد. استریتر و لی[4] (۱۹۶۳) روش کاملا متفاوتی را برای کنترل پدیده ضربه‌قوچ ارائه نمود. او معادله‌هایی را همراه با در نظر گرفتن اصطکاک برای بستن شیر واقع در انتهای یک خط لوله ساده به گونه‌ای توسعه داد که حداکثر تنش به وجود آمده در لوله کمتر از تنش مجاز بوده و فشارها در تمام زمان‌ها بالاتر از مقدار فشار در شرایط پایدار قرار گیرد و پس از بستن کامل شیر جریان یکنواخت در لوله برقرار گردد. استریتر و وایلی[5] (۱۹۶۷) همچنین در دیگر مقاله خود صدمات مربوط به شیر را در سیستم لوله‌های سری، موازی، انشعابات همراه با در نظر گرفتن اصطکاک ارائه نمود. او پیشنهاد نمود تا از روش ارائه شده به منظور بهره‌برداری بهتر و همچنین در انتخاب مطمئن‌تر مواد و مصالح ساخت در سیستم‌های انتقال آب و نیروگاه‌های برقابی مورد استفاده قرار گیرد. پارکر و جانز[6] (۱۹۹۰) روش جدیدی برای جدا کردن موج رفت و برگشت برای جریان در حالت یک بعدی پیدا کردند که بر اساس تحلیل جریان به صورت غیر خطی بوده است. ولی آنها فرض کردند که موج رفت و برگشت در هنگام برخورد به صورت خطی جمع می‌شوند. لِی[7] (۱۹۹۱) یکی از اولین مطالعات جهانی را روی مسئله نشت در چندین کشور و شهر مختلف جهان انجام داد و مشخص شد که میزان نشت در نقاط مختلف جهان بسیار متفاوت است. کلمبو و کارنی[8] (۲۰۰۲) مسئله اهمیت نسبی تلفات انرژی از طریق نشت را به صورت قسمتی از

1 - Joukowski

2 - Allievi
3 - Frizell
4 - Streeter and Lai
5 - Streeter and Wylie
6 - Parker and Jones
7 - Lai
8 - Colombo and Karney

یک ارزیابی که از طرف مجلس آمریکا انجام شد بررسی نمودند. فانک و همکاران[1] (۱۹۹۹) میزان ریسک دخول مواد آلاینده به خط لوله را با ارزیابی حجم قابل دسترس آب زیرزمینی که از طریق مدت زمان جریان میرا و تحلیل حساسیت آن (حداقل فشار ضربه‌قوچ) به دست می‌آید، تشخیص دادند. کوواس و همکاران[2] (۲۰۰۳) چندین مطالعه آزمایشگاهی انجام دادند تا به بررسی کاربرد روش تحلیل معکوس جریان میرا در مشخص کردن نشت‌ها، ترکیدگی‌ها، تغییرات قطر و شاخه‌های لوله بپردازند. مینیکنی و همکاران[3] (۲۰۱۲) به بررسی رفتار موج فشاری در سامانه‌های با تغییر سطح مقطع ناگهانی لوله پرداختند. آنها در تحقیقات خود رفتار جریان ماندگار و جریان غیرماندگار در محل تغییر قطر لوله را مورد بررسی قرار دادند و نتایج را با مدل عددی بررسی نمودند. جانسون[4] (۲۰۰۱) با مطالعه بر روی یک خط لوله ۳۵۰۰ متری تأثیر وجود نشت روی جریان غیرماندگار را به منظور تعیین موقعیت نشت بررسی نمود و با توجه به چگونگی تأثیر نشت بر موج فشاری، محل نشت را مشخص کرد.

حقیقی و راموس[5] (۲۰۱۲) با استفاده از روش تحلیل معکوس جریان میرا و روش بهینه‌سازی CFO[6] به نشت‌یابی در خطوط لوله پرداختند. خیاطزاده (۱۳۷۶) برنامه کامپیوتری بر اساس مدل ریاضی هیدرولیکی برای تحلیل شبکه در حالت غیرماندگار ارائه داد. این برنامه قادر بود محاسبات را برای نقاطی که از خطوط مشخصه عبور نمی‌کند انجام دهد. نتایج این مدل با نتایج عددی مقایسه گردید و جواب‌ها قابل قبول بودند. فتحی‌مقدم و همکاران[7] (۲۰۱۳) دقت روش تفاضل‌های محدود صریح را در ارزیابی هیدرولیک جریان های میرا در سامانه انتقال آب نیروگاه‌های برقابی (مطالعه موردی سد و نیروگاه مارون) بررسی و نتایج حاکی از دقت بالای روش حل می‌باشد. حقیقی‌پور (۱۳۹۱) و همچنین تائبی (۱۳۹۱) به ترتیب به بررسی هیدرولیک جریان غیرماندگار در خط لوله‌های سری و موازی پرداختند. آنها در تحقیقات خود به این نتیجه دست یافتند که جریان غیرماندگار که با ضرایب افت ثابت و یا شبه‌ماندگار محاسبه می‌شود و در مدل‌های تجاری مورد استفاده قرار می‌گیرد، مقدار کمتری را نسبت به نیروی اصطکاک واقعی نشان می‌دهد.

با توجه به مطالب گفته شده، در این تحقیق ابتدا جریان غیرماندگار سریع در خطوط لوله‌ای که دارای نشت می‌باشد توسط مدل فیزیکی مورد بررسی قرار گرفته و سپس اثر خصوصیات نشت از جمله قطر و مکان نشت بر خصوصیات هیدرولیکی امواج فشاری جریان غیرماندگار سریع مورد بررسی قرار گرفته است.

همچنین در ادامه تحلیل روند میرایی و یا استهلاک امواج فشاری با در نظر گرفتن حضور نشت در لوله نیز ذکر شده است.

مواد و روش‌ها

مدل فیزیکی تحقیق حاضر در آزمایشگاه هیدرولیک دانشکده مهندسی علوم آب دانشگاه شهید چمران اهواز ساخته و آزمایش‌ها روی آن انجام شده است. این مدل از یک سامانه مخزن، لوله انعطاف‌پذیر و شیر قطع و وصل به منظور تولید جریان غیرماندگار شکل گرفته است که نمای کلی آن در شکل (۱- الف) نمایش داده شده است. مخزن موجود دارای ارتفاع استاتیکی ۵ متر نسبت به انشعاب گرفته شده برای لوله می‌باشد و در ابتدای خط قرار دارد. همچنین شیر قطع و وصل در انتهای خط و فاصله ۴۷ متری از مخزن نصب شده است. لوله از جنس پلی اتیلن با فشار کاری ۱۰ اتمسفر بوده و با قطر ۶۳ میلی‌متر و طول ۴۷ متر در آزمایش‌ها به کار گرفته شده است. جدول (۱) محدوده پارامترهای به کار رفته در آزمایش‌ها را نشان می‌دهد. شیرآلات از جنس فولاد می‌باشد و هم قطر با لوله در نظر گرفته شده‌اند. همچنین لوله در طول مسیر خود روی تکیه‌گاهی قرار دارد تا از کف آزمایشگاه فاصله داشته و نصب لوازم بر روی آن امکان‌پذیر شود (شکل ۱-ب).

این قسمت مهمترین بخش از مدل فیزیکی است که با توجه به محدودیت‌های موجود در آزمایشگاه به صورت دایره‌هایی هم مرکز با کمترین شعاع انحنا ۱/۵ متر روی اسکلت فلزی نصب می‌گردد. به منظور اندازه‌گیری دبی در لوله، با توجه به امکانات موجود از دستگاه دبی‌سنج اولتراسونیک UF6000 P870 استفاده شده است (شکل ۲- ب). برای اندازه‌گیری فشار دینامیکی از مبدل فشار۸ استفاده شده است (شکل ۲- الف). از این وسیله برای ثبت اختلاف فشار در لوله استفاده می‌گردد. این حسگرها توسط سیم‌های رابط به دستگاه دیتالاگر و از آنجا به سیستم کامپیوتری و نرم‌افزار پردازشگر اطلاعات مرتبط می‌گردد. لازم به ذکر است مبدل فشاری بلافاصله قبل از شیر نصب شده‌اند تا قادر باشند حداکثر فشار به وجود آمده در سامانه را که در محل شیر رخ می دهد به ثبت رسانند. همچنین لازم به ذکر است اعداد رینولدز به کار رفته در آزمایش‌ها در دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد برای دبی‌های ۲/۵، ۳/۵ و ۴/۵ لیتر بر ثانیه به ترتیب برابر ۵۹۰۰۳، ۸۲۶۰۵ و ۱۰۶۲۰۶ بوده‌اند.

1 - Funk *et al.*
2 - Covas *et al.*
3 - Meniconi *et al.*
4 - Jönsson
5 - Haghighi and Ramos
6 -Central Force Optimization
7 - Fathi-Moghadam *et al.*
8 -Transducer

جدول ۱- دامنه پارامترهای به کار رفته در آزمایش‌ها

نام متغیر	قطر لوله (mm)	طول لوله (m)	دبی (L/s)	زمان بستن شیر	قطر نشت (mm)	فاصله نشت از محل مخزن (m)
محدوده	۶۳	۴۷	۲/۵–۳/۵–۴/۵	آنی - تدریجی	۴ - ۶ – ۸ – ۱۰	۲۷ – ۳۳ – ۳۹ – ۴۵



(الف)



(ب)

شکل ۱ - نمای کلی تجهیزات آزمایشگاهی و نشت ایجاد شده در سامانه



(الف)



(ب)

شکل ۲ - مبدل فشاری و دستگاه دبی‌سنج اولتراسونیک UF6000 P870 به کار رفته در آزمایش‌ها

تحلیل ابعادی

به منظور بررسی دقیق آزمایش‌ها انجام شده، تحلیل ابعادی انجام گردیده است. عوامل موثر در این تحلیل عبارتند از:

- خصوصیات سیال: جرم مخصوص (ρ)، لزوجت (μ)
- خصوصیات جریان: سرعت متوسط جریان (V)، شتاب گرانش (g)، سرعت موج فشاری لوله (C)
- خصوصیات فیزیکی: قطر لوله (D_p)، قطر روزنه نشت (D_L)، طول لوله (L_p)، ارتفاع آب در مخزن (H)، زمان بسته شدن شیر (T_c)، فاصله نشت از ابتدای لوله (L_L)

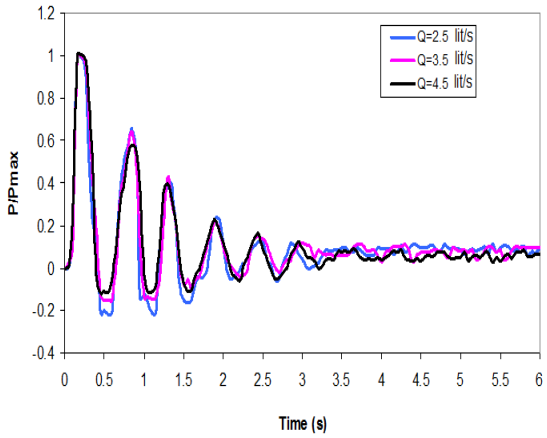
با در نظر گرفتن عامل‌های فوق داریم:

$$f(\rho,\mu,g,C,V,D_P,D_L,L_P,L_L,H,T_c)=0 \qquad (۱)$$

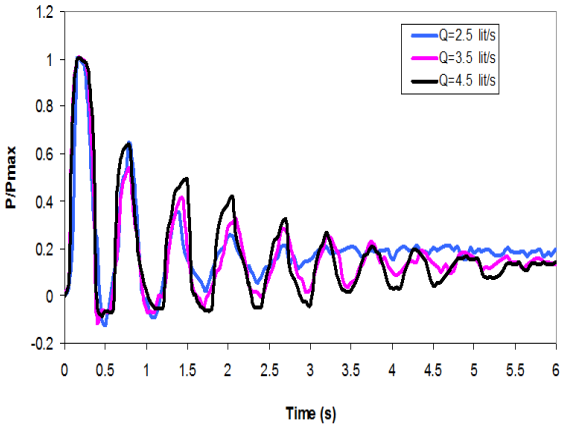
با اعمال قضیه پی باکینگهام و با درنظر گرفتن متغیرهای ρ و V و D_p به عنوان متغیرهای تکراری خواهیم داشت:

$$f(\mathrm{Re}_p,Fr_p,Ma,\frac{D_L}{D_p},\frac{L_p}{D_p},\frac{L_L}{D_p},\frac{H}{D_p},\frac{VT_c}{D_p})=0 \qquad (۲)$$

سه پارامتر ابتدایی به دست آمده به ترتیب عدد رینولدز، فرود و ماخ می باشند اما با توجه به این که در این مقاله هدف تنها بررسی عامل‌های اثرگذار نشت بر امواج فشاری جریان غیرماندگار بوده است، تنها عامل‌های D_L/D_p و L_L/D_p مورد بررسی قرار گرفته‌اند که با توجه به ثابت بودن D_p در طول آزمایش‌ها می‌توان خود عامل‌های D_L و L_L را به شکل مستقل مورد تحلیل قرار داد.



بستن کند شیر (ثانیه۰/۶ ≅ Tc)



بستن آنی شیر (ثانیه۰/۱ ≅ Tc)

شکل ۳- امواج فشاری جریان غیرماندگار برای لوله بدون نشت (امواج شاهد)

روابط حاکم

معادله‌های اساسی حاکم بر جریان‌های غیرماندگار در مجاری تحت فشار عبارتند از معادله‌های پیوستگی و ممنتوم که در ادامه به اختصار به آنها اشاره خواهد شد:

معادله مومنتوم (اندازه حرکت):

$$\frac{1}{\rho}\frac{\partial P}{\partial x}+\frac{\partial V}{\partial t}+V\frac{\partial V}{\partial x}+g\sin\theta+\frac{fV|V|}{2D}=0 \qquad (۳)$$

معادله پیوستگی:

$$\frac{\partial P}{\partial t}+V\frac{\partial P}{\partial x}+\rho c^2\frac{\partial V}{\partial x}=0 \qquad (۴)$$

در این معادله‌ها A: سطح مقطع جریان، P: فشار، ρ: جرم حجمی و یا چگالی سیال، θ: زاویه بین محور لوله و سطح مبنا، V: سرعت سیال، g: شتاب گرانش زمین، D: قطر لوله، f: ضریب اصطکاکی دارسی- ویزباخ و c: سرعت موج فشاری می‌باشند. این معادله‌ها در مدل کامپیوتری تهیه شده با روش خطوط مشخصه مورد استفاده قرار گرفته‌اند. در مورد سرعت موج فشاری می‌توان گفت موج پدیده‌ای است که موجب انتقال مومنتوم و انرژی بدون انتقال ماده می‌گردد. در نتیجه با مواد موجود در مسیر خود برخورد نموده و بر آنها نیرو و ضربه وارد می‌کند. سرعت انتشار موج فشاری در لوله‌های تحت فشار از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$c=\sqrt{\frac{\frac{K}{\rho}}{1+\frac{K}{E}\frac{D}{e}}} \qquad (۵)$$

در این رابطه، K: مدول الاستیسیته حجمی سیال، E: مدول کشسانی لوله و e: ضخامت لوله می‌باشد.

اثر نشت در خط لوله به شکل روزنه نشت، خصوصیات جریان گذرای به وجود آمده، محل نشت و ... بستگی دارد. اما در تمام مدل‌ها از معادله روزنه که توسط توریچلی ارائه شده است استفاده می گردد (شاملو و حقیقی[1]، ۲۰۰۹ و منیکینی و همکاران، ۲۰۱۲):

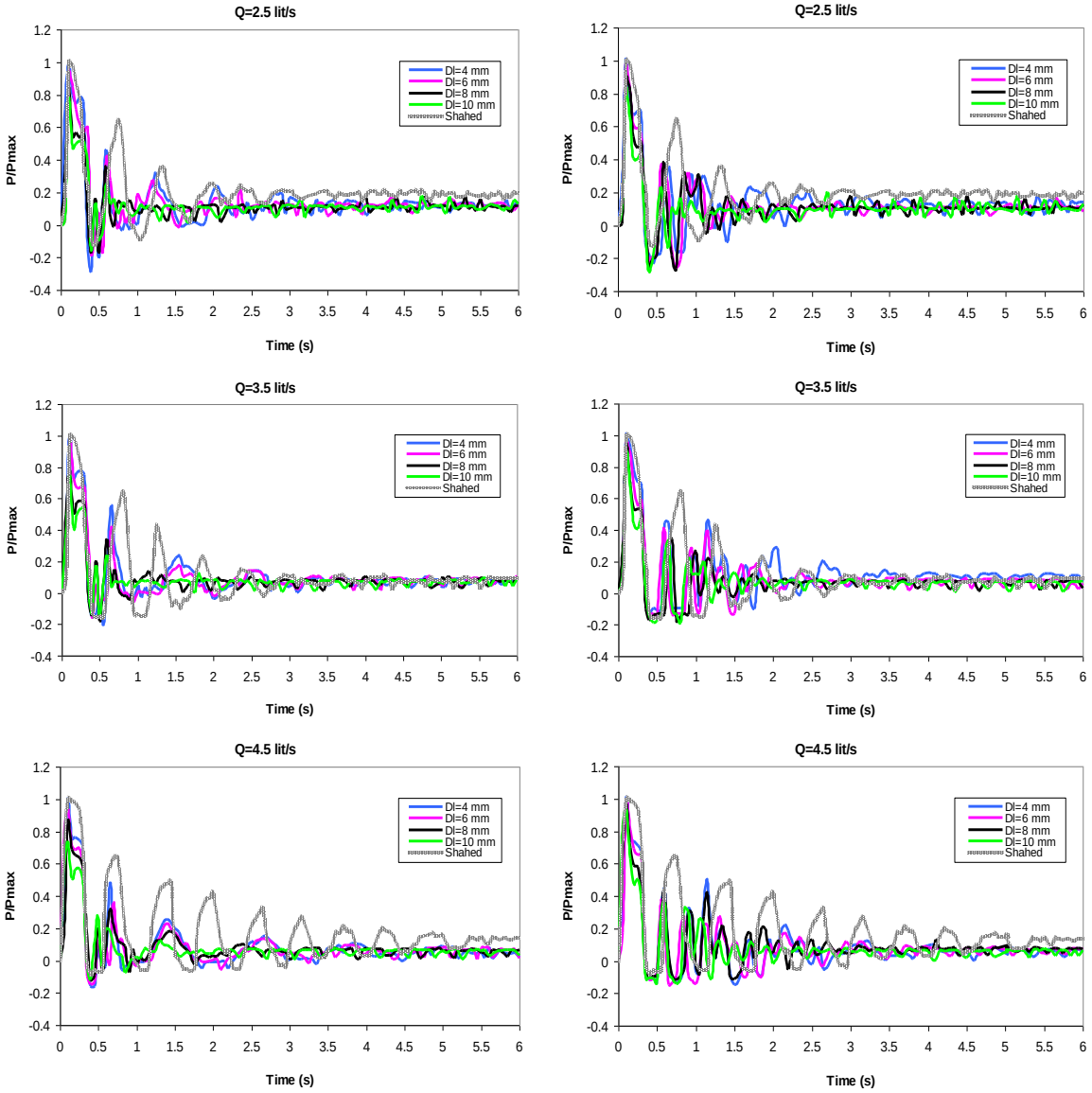
$$Q_L=A_e\sqrt{2g(H_L-Z_L)} \qquad (۶)$$

که در آن، Q_L: دبی نشت، $A_e=C_dA_L$: سطح موثر نشت، C_d: ضریب دبی، A_L: سطح ظاهری نشت، Z_L: ارتفاع از سطح افق و H_L: ارتفاع پیزومتریک لحظه ای در محل نشت می‌باشد.

نتایج و بحث

در این بخش، نتایج به دست آمده از مدل آزمایشگاهی مورد بحث و تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرد. به این صورت که شیر قطع و وصل انتهایی سامانه به دو شکل آنی و کند بسته شده و چگونگی تأثیر تغییر قطر و محل نشت بر امواج فشاری جریان غیرماندگار به وجود آمده مورد بررسی قرار می‌گیرد. همچنین چگونگی اثرپذیری روند میرایی و یا استهلاک امواج از تغییر قطر و محل نشت نیز در ادامه تجزیه و تحلیل خواهد شد.

1 - Shamloo and Haghighi



نشت در فاصله ۲۷ متر از مخزن

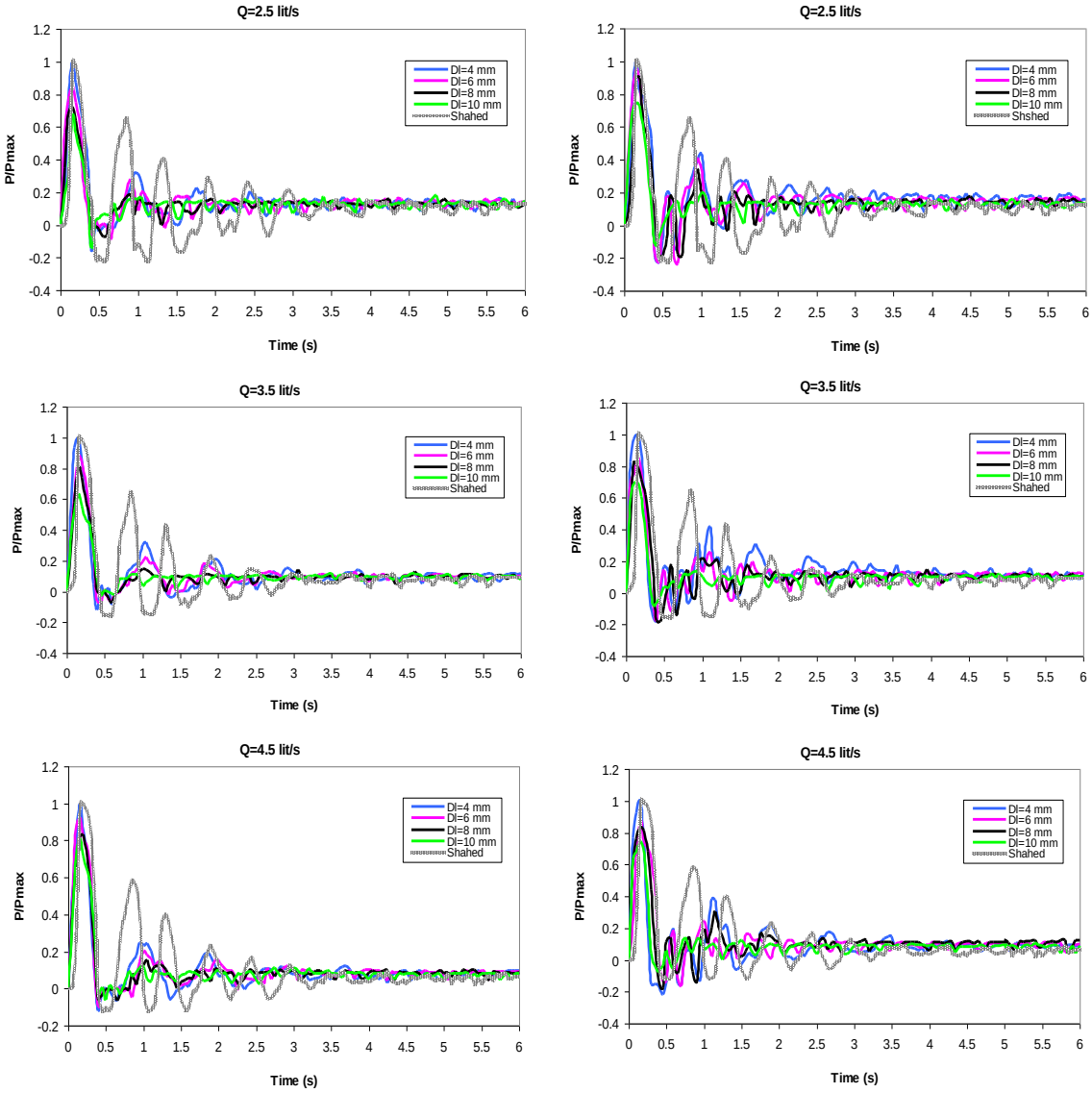
نشت در فاصله ۳۹ متر از مخزن

شکل ٤- اثر تغییر قطر نشت بر امواج فشاری جریان غیرماندگار برای بستن آنی شیر (ثانیه $T_c \cong$ ۰/۱)

امواج شاهد

به منظور انجام هر مقایسه صحیح و مطالعه دقیق پارامترهای مورد بررسی، ابتدا لازم است آزمایش‌ها شاهد انجام شود. لذا در تحقیق حاضر ابتدا بر روی لوله پلی‌اتیلن مورد بررسی، بدون وجود نشت آزمایش‌های با دبی‌های به کار رفته در آزمایش‌ها و همچنین زمان بستن شیر به صورت آنی و کند انجام شد که فشارهای ثبت شده، بی بعد و در شکل (۳) ارائه گردیده است. اکنون با در اختیار داشتن امواج شاهد می‌توان وجود نشت در سامانه و تأثیر آن بر روی امواج فشاری جریان غیرماندگار را تشخیص و مورد مطالعه قرار داد.

لازم به ذکر است وزن مخصوص سیال (آب) ۹۸۰۰ نیوتن بر متر مکعب، مدول الاستیسیته حجمی (مدول بالک) سیال ۲/۱×۱۰۹ نیوتن بر مترمربع، مدول الاستیسیته (یانگ) لوله پلی‌اتیلن ۰/۸ گیگا پاسکال می‌باشد (استریتر و وایلی، ۱۹۶۷)، لذا می‌توان با در نظر گرفتن رابطه (۵) سرعت موج فشاری در سامانه مورد آزمایش را محاسبه و با توجه به آن طول موج را محاسبه نمود. با قرار دادن مقادیر فوق‌الذکر در رابطه (۵) سرعت موج ۳۰۰ متر بر ثانیه محاسبه می‌گردد.



نشت در فاصله ۲۷ متر از مخزن

نشت در فاصله ۳۹ متر از مخزن

شکل ۵- اثر تغییر قطر نشت بر امواج فشاری جریان غیرماندگار برای بستن کند شیر (ثانیه$T_c \cong$ ۰/۶)

اثر تغییر قطر نشت

شکل‌های (۴) و (۵) نتایج حاصل از شبیه‌سازی امواج فشاری در آزمایشگاه را در حالی نشان می‌دهند که به منظور انجام مقایسه، در هر حالت تغییر قطر، فاصله نشت از ابتدا یکسان در نظر گرفته شده و اثر تغییر قطر نشت بر شکل امواج در هر شکل برای یک دبی خاص مورد بررسی قرار گرفته است. شکل (۴) اثر تغییر قطر نشت بر امواج فشاری جریان غیرماندگار برای بستن آنی شیر (ثانیه $T_c \cong$ ۰/۱) را نشان می‌دهد. در این نوع بستن شیر، زمان بستن آنقدر کم است که در هنگام بستن شیر هیچ کدام از حداکثرهای مثبت و یا منفی برگشتی امواج فشاری از مخزن از محل شیر خارج نشده و حداکثر فشار در سامانه باقی می‌ماند تا توسط افت‌های موجود در آن مستهلک گردد:

$$T_c = 0.1 < \frac{2L}{c} = \frac{2\times 47}{300} = 0.31 \text{ ثانیه} \qquad (۷)$$

در تمامی نمودارهای شکل (۴) چگونگی تأثیر اثر تغییر قطر نشت بر حداکثر اول امواج فشاری تشکیل شده به وضوح مشخص است. این اثر در حداکثرهای بعدی به دلیل برهم‌نهی امواج ثانویه حاصل از نشت و امواج اصلی انتشار یافته در سامانه به دلیل بستن

شیر و همچنین اندر کنش‌های سازه تکیه‌گاه و سیال آن‌چنان قابل تشخیص نخواهند بود.

در مورد برهم‌نهی امواج ثانویه حاصل از نشت و امواج اصلی انتشار یافته در سامانه به دلیل بستن شیر می‌توان گفت هنگامی که امواج فشاری غیرماندگار تولید شده در سامانه به محل نشت می‌رسد، چه در ناحیه مثبت موج فشاری و چه در ناحیه منفی آن به دلیل وجود روزنه نشت مقداری از فشار موج کاسته شده و افت و اعوجاجی در موج مشاهده می‌گردد. از سوی دیگر به هنگام رد شدن امواج فشاری مثبت و منفی از محل نشت، به دلیل تغییر شرایط مرزی در آن ناحیه خود به خود جریان غیرماندگاری در سامانه به وجود آمده که به شکل امواج فشاری ثانویه در سامانه پخش خواهند شد (کلمبو و همکاران[1]، ۲۰۰۹). موج فشاری ثبت شده توسط مبدل فشاری، برآیند تمامی این امواج خواهد بود که شکل بسیار پیچیده‌ای خواهد داشت و در شکل‌های ثبت شده نیز این موضوع به وضوح قابل رویت است. برخی لرزش‌های دیگر قابل مشاهده در امواج فشاری می‌تواند ناشی از اندرکنش سازه و سیال باشد و این در حالی است که نهایت تلاش به منظور مهار کردن لوله در تمامی نقاط آن در طول مسیر انجام شده است، اما به دلیل برخی محدودیت‌های اجرایی در فضای آزمایشگاه ممکن است نقایصی نیز هر چند بسیار اندک از این بابت به مدل فیزیکی وارد باشد.

بنابراین با توجه به توضیحات داده شده و ظاهر امواج که در شکل‌های (۴) و (۵) مشخص است، تأثیر قطر نشت را بر حداکثر اول امواج فشاری به دلیل نبود امواج فشاری ثانویه در سامانه و عدم تأثیرگذاری آن بر موج غیرماندگار فشاری اصلی مورد بررسی قرار خواهد گرفت. واضح است که با زیاد شدن قطر نشت، دبی خروجی از سامانه در حالت ماندگار بیشتر خواهد شد و لذا دبی و در نتیجه سرعت آب موجود در خط لوله با افزایش قطر روزنه نشت بیشتر کاهش می‌یابد. این کاهش سرعت در لوله مطابق رابطه (۸) که به رابطه ژوکوفسکی مشهور است، موجب کاهش حداکثر فشار به وجود آمده در موج فشاری غیرماندگار خواهد شد:

$$\Delta H = \frac{L\Delta V}{g\Delta t} \qquad (۸)$$

در این رابطه L: طول لوله، ΔV: اختلاف سرعت اولیه و ثانویه، Δt: زمان بستن شیر و ΔH: اختلاف بار فشاری تولیدی می‌باشد.

این مسئله در شکل‌های (۴) و (۵) قابل مشاهده است. بدین‌صورت که با افزایش قطر روزنه نشت، مقدار حداکثر فشار به وجود آمده در سامانه کاهش می‌یابد. اما نشت در تمامی شکل‌های امواج فشاری تولید شده با بستن شیر به صورت آنی (شکل ۴) خود را به شکل افت در حداکثر فشاری دوره اول نشان می‌دهد. این افت که متناسب با قطر روزنه و مقدار آب و انرژی خارج شده از سامانه است، با افزایش قطر افزایش می‌یابد. یعنی هر چقدر قطر نشت بیشتر باشد، مقدار افت فشار نیز بیشتر خواهد بود. این افت در مقدار مثبت حداکثر اول، حداکثرهای فشاری بعدی را نیز تحت تأثیر خود قرار می‌دهد. به گونه‌ای که مقدار حداکثرهای بعدی هیچ‌گاه از حداکثر به وجود آمده بعد از افت در همان دوره اول بیشتر نخواهند شد. این مسئله در قسمت مربوط به روند استهلاک امواج فشاری غیرماندگار در حضور نشت به صورت کامل مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

همچنین حداکثر دوم امواج به وجود آمده در حضور نشت هیچ‌گاه به حداکثر دوم امواج شاهد نمی‌رسد که ناشی از افت به وجود آمده در اثر نشت است و این در حالی است که حداکثرهای اول این دو موج با هم برابر بوده اند.

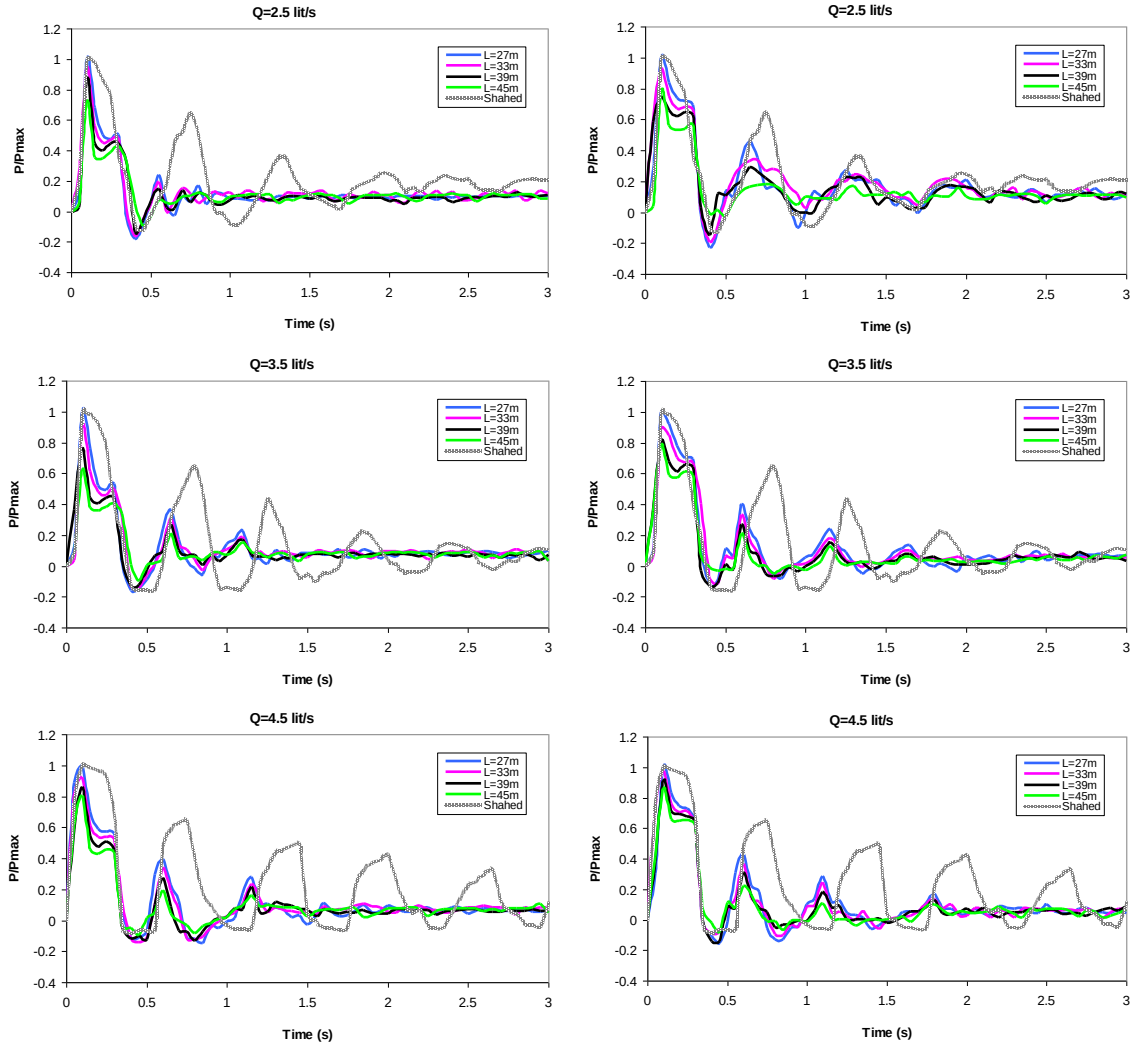
اما بررسی تأثیر به وجود آمده از تغییر در قطر نشت برای امواج فشاری ناشی از بستن کند شیر (ثانیه$Tc \cong$ ۰/۶) روندی متفاوت با حالت قبل دارد. در این حالت چون بستن شیر به صورت کند انجام می‌گیرد، حداکثرهای فشاری منفی و مثبت برگشتی به سمت شیر قبل از بسته شدن کامل شیر از سامانه خارج شده و در نتیجه فشار حداکثری در سامانه به وجود نمی‌آید. همین مسئله باعث می‌شود که بستن آنی بهتر از بستن کند بتواند نشت را نمایان سازد. شکل (۵) امواج فشاری جریان غیرماندگار ثبت شده برای بستن کند شیر در حالت وجود نشت را نشان می‌دهد.

اثر تغییر مکان نشت

چگونگی تأثیر تغییر در مکان به وجود آمدن نشت در لوله برای حالت‌های مختلف در شکل‌های (۶) و (۷) نشان داده شده‌اند. همان‌گونه که مشاهده می‌گردد درست مانند حالت قبل تأثیر در تغییر این پارامتر در حداکثر اول بسیار مشهود است و در باقی فراز و فرودهای موج به دلایلی که قبلا ذکر شد نشانه واضحی از اثر این پارامتر و تغییر در آن دیده نمی‌شود.

اثر تغییر مکان نشت بر امواج فشاری جریان غیرماندگار به این شکل است که پس از این که موج به قله خود رسید، به هنگام پایین آمدن نشت‌های با فاصله کمتر از مخزن با شیب آرام‌تر و ملایم‌تری افت می‌نمایند و سپس مقدار افت ناشی از نشت که به تثبیت رسید افت عادی موج فشاری آغاز می‌گردد. این امر به آن دلیل است که نشت‌هایی که به مخزن نزدیک‌تر هستند، از محل تولید جریان غیرماندگار یعنی شیر انتهای خط دورتر می‌باشند، لذا موج فشاری تولید شده بر اثر بستن شیر مدت زمان بیشتری را لازم دارد تا به محل نشت برسد. در نتیجه نشت‌هایی که از مخزن دورتر هستند و یا به شیر نزدیک‌ترمی‌باشند افت در آنها سریع‌تر رخ می‌دهد. به همین دلیل است که شیب افت فشار ناشی از نشت در حداکثر اول برای نشت در فاصله ۴۵ متر سریع‌تر از فاصله ۲۷ متر است.

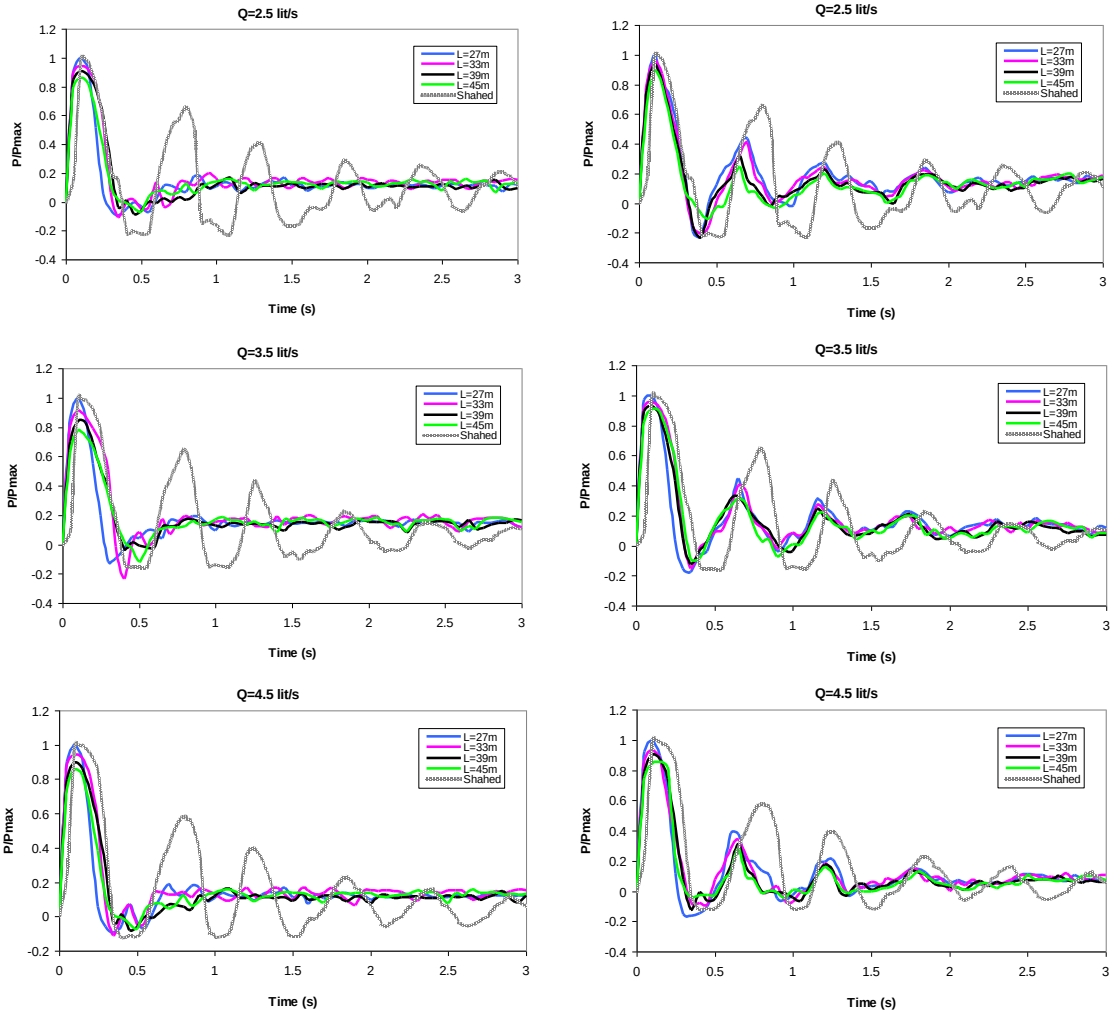
1 - Colombo *et al.*



قطر نشت معادل ۴ میلی‌متر　　قطر نشت معادل ۱۰ میلی‌متر

شکل ٦- اثر تغییر مکان نشت بر امواج فشاری جریان غیرماندگار برای بستن آنی شیر (ثانیه$T_c \cong$ ۰/۱)

البته واضح است که مقدار افت برای تمامی نمودارهای شکل (۶) برابر است چرا که قطر دهانه نشت در تمامی موارد ثابت بوده تا بتوان اثر تغییر در مکان نشت را بر روی امواج فشاری جریان غیرماندگار بررسی نمود. این موضوع را می‌توان با نگاه کردن به شکل‌های شکل (۶) به روشنی مشاهده نمود. بررسی تأثیر تغییر در مکان نشت روی امواج فشاری در حالت بستن کند شیر (ثانیه$T_c \cong$ ۰/۶) روندی متفاوت با حالت بستن آنی شیر دارد. در این حالت چون بستن شیر به صورت کند انجام می‌گیرد، حداکثرهای فشاری منفی و مثبت برگشتی به سمت شیر قبل از بسته شدن کامل شیر از سامانه خارج شده و در نتیجه فشار حداکثری در سامانه به وجود نمی‌آید. همین مسئله باعث می‌شود که بستن آنی بهتر از بستن کند بتواند نشت را نمایان سازد. شکل (۷) امواج فشاری جریان غیرماندگار ثبت شده برای بستن کند شیر در حالت وجود نشت را نشان می‌دهد که اثر نشت و تغییر مکان آن بر روی امواج قابل تشخیص نمی‌باشد.



قطر نشت معادل ٤ میلی‌متر **قطر نشت معادل ۱۰ میلی‌متر**

شکل ۷- اثر تغییر مکان نشت بر امواج فشاری جریان غیرماندگار برای بستن کند شیر ($T_c \cong$ ۰/٦ثانیه)

بررسی روند استهلاک

روند استهلاک حداکثرهای امواج فشاری برای حالت تغییر قطر نشت و تغییر در محل نشت برای بستن آنی در مقایسه با امواج شاهد در شکل‌های (۸) و (۹) آورده شده و از بررسی چگونگی روند استهلاک در امواج به وجود آمده با بستن کند شیر به این دلیل که نشت اثر واضحی روی آنها ندارد خودداری شده است. ابتداً باید گفت همان‌گونه که در امواج شاهد مشخص است روند استهلاک امواج فشاری شیب نسبتاً ملایمی دارد اما با به وجود آمدن نشت در سامانه با بستن آنی شیر این روند دست‌خوش تغییر شده و بین حداکثر اول در دوره اول و حداکثر دوره دوم تفاوت زیادی مشاهده می‌گردد و این موضوع به دلیل افت و تخلیه فشار ناشی از حضور نشت در آن محل و به وجود آمدن حداکثر دوم در دوره اول است که خود آن نیز ناشی از حضور نشت می‌باشد.

همان‌طور که در شکل (۸) مشخص است نشت‌های با قطر بزرگ‌تر باعث می‌شوند حداکثرهای کوچک‌تری به وجود بیایند و در نتیجه استهلاک آنها زودتر محقق گردد. دلیل این موضوع افت بیشتر به وجود آمده در خط لوله بر اثر نشت بزرگ‌تر است که همین افت بیشتر تحمیل شده توسط نشت به سامانه باعث می‌گردد روند میرایی امواج زودتر طی شود. روند میرایی بسیار کندتر امواج شاهد، خود گواه این موضوع است که به خوبی نشان می‌دهد دلیل به وجود آمدن میرایی بیشتر در دیگر امواج، وجود نشت در لوله است. همچنین شیب میرایی امواج برای حالت وجود نشت با قطر ۱۰ میلی‌متر در سامانه تندتر از حالت وجود نشت با قطر ۴ میلی‌متر است چرا که قطر بزرگ‌تر دهانه نشت موجب افت شدیدتری می‌گردد. همچنین در کل چه برای حالت وجود نشت در فاصله ۲۷ متری و چه برای حالت وجود نشت در فاصله ۳۹ متری روند میرایی امواج برای دبی ۴/۵ لیتر در ثانیه سریع‌تر از دبی ۲/۵ لیتر در ثانیه است. این مسئله به این دلیل است که دبی‌های بیشتر با سطع مقطع برابر لوله سرعت بیشتری تولید می‌نمایند و در نتیجه مطابق رابطه ژوکوفسکی موج فشاری قوی‌تری تولید می‌نمایند. در نتیجه در مواجه با نشت به دلیل وجود فشار بیشتر

ناشی از موج فشاری تولید شده، فشار بیشتری را آزاد می‌نمایند و بیشتر افت می‌کنند.

همچنین به نظر می‌رسد امواج فشاری به وجود آمده در حضور نشت‌های موجود در فاصله ۲۷ متری از مخزن، روند استهلاک سریع‌تری را نسبت به امواج فشاری به وجود آمده در حضور نشت‌های موجود در فاصله ۳۹ متری از مخزن طی می‌نمایند.

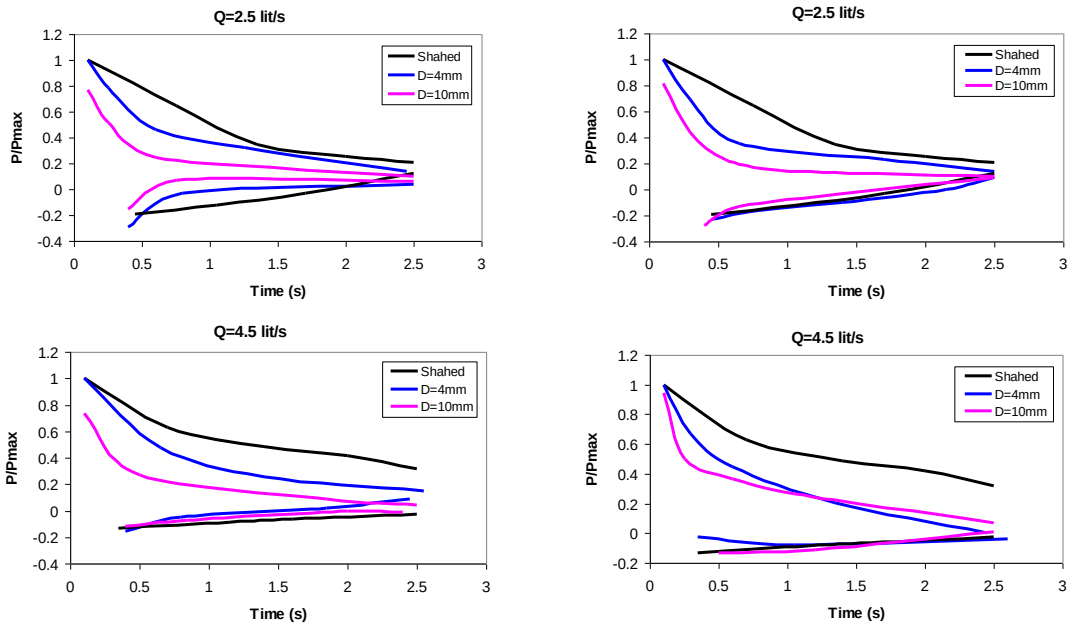
نکته قابل تامل در نمودارهای شکل (۸) و (۹) آن است که روند میرایی و استهلاک امواج ابتداً و پس از بسته شدن آنی شیر و به وجود آمدن امواج فشاری بسیار سریع است و پس از گذشت مدتی شیب استهلاک کند می شود (از حدود ۰/۷ تا ۱ ثانیه به بعد). این مسئله را می‌توان با در نظر گرفتن رابطه (۸) که توسط دیلی و همکاران ارائه شده و مربوط به اصطکاک غیرماندگار در جریان‌های غیرماندگار است (مینیکنی و همکاران، ۲۰۱۲) توجیه نمود:

$$\tau_w = \tau_{ws} + \frac{K\rho D}{4}\frac{\partial V}{\partial t} \qquad (۸)$$

از آنجایی که در ابتدای ایجاد جریان غیرماندگار سریع، تغییرات سرعت بسیار شدید است لذا مطابق رابطه (۸) عبارت $\partial V/\partial t$ در جمله غیرماندگار اصطکاک غیرماندگار نیز مقدار بزرگ‌تری را به خود اختصاص می‌دهد. همین مسئله باعث می‌شود در ابتدای تولید جریان غیرماندگار سریع به دلیل به وجود آمدن تغییرات شدید سرعت مقدار اصطکاک غیرماندگار و در نتیجه افت غیرماندگار نیز افزایش یابد. نتیجه این امر شیب تند میرایی و استهلاک موج فشاری در ابتدای به وجود آمدنش خواهد بود.

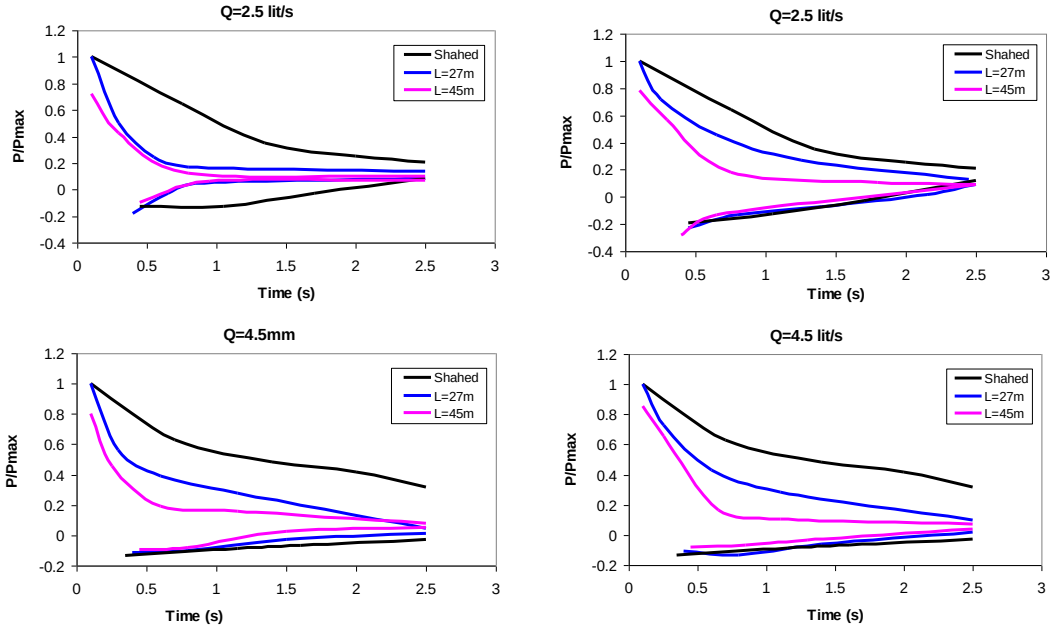
همانطور که در شکل (۸) و (۹) دیده می‌شود روند تغییر شیب برای استهلاک قسمت فشار منفی مانند قسمت فشار مثبت موج فشاری نیست. دلیل این موضوع وجود محدودیت فشار حدود ۱۰- متر آب برای فشار بخار آب است که به عنوان حداقل فشار در آزمایشگاه و شبیه‌سازی در نظر گرفته شده است. زیرا کمتر از این فشار آب به بخار تبدیل شده و خلاءزائی رخ می‌دهد که در آزمایش‌ها انجام شده در آزمایشگاه چنین موردی به وجود نیامده است. بنابراین حداقل فشار منفی تولید شده در آزمایشگاه و برابر فشار بخار آب و حدود ۱۰- متر آب است. این موضوع باعث می‌شود روند استهلاک موج فشاری برای فشار منفی روندی یکنواخت و ملایم داشته باشد.

از شکل (۹) می‌توان دریافت نشت‌هایی که در فاصله طولانی‌تری از مخزن به وجود می‌آیند (L=۴۵ متر) روند استهلاک سریع‌تری دارند. دلیل این موضوع را می‌توان به این شکل بیان کرد که در حالتی که نشت‌ها فاصله طولانی‌تری از شیر قرار دارند (به مخزن نزدیک‌تر هستند)، طی نمودن فاصله بیشتری توسط موج تا رسیدن به نشت باعث می‌شود افت امواج ناشی از اصطکاک لوله افزایش یافته و در نتیجه موج با فشار کمتری به نشت برسد. در این حالت چون فشار موجود در محل نشت کمتر می‌شود، افت ناشی از آن نیز کمتر خواهد بود. بنابراین در حالتی که نشت به شیر نزدیک‌تر است به دلیل فشار بیشتر امواج فشاری، افت ناشی از آن نیز بیشتر خواهد بود و روند میرایی سریع‌تر رخ می‌دهد.



نشت در فاصله ۲۷ متر از مخزن　　نشت در فاصله ۳۹ متر از مخزن

شکل ۸- اثر تغییر قطر نشت بر استهلاک موج فشاری جریان غیرماندگار در بستن آنی شیر (ثانیه $T_c \cong$ ./۱)



قطر نشت معادل ٤ میلی‌متر **قطر نشت معادل ۱۰ میلی‌متر**

شکل ۹- اثر تغییر مکان نشت بر استهلاک موج فشاری در بستن آنی شیر (ثانیه $T_c \cong$ ۰/۱)

جدول ۲- میزان افت فشار نسبت به فشار حداکثر در بیشینه فشاری اول (درصد) با در نظر گرفتن تغییر در قطر نشت

دبی (L/s)	نشت در فاصله ۳۹ متری از مخزن				نشت در فاصله ۲۷ متری از مخزن			
	D= ÷Mm	D= ۸ mm	D= ۶ mm	D= ۴ mm	D= ۱۰ mm	D= ۸ mm	D= ۶ mm	D= ۴ mm
۲/۵	۴۸	۴۲	۴۰	۲۶	۵۶	۵۰	۴۰	۳۳
۳/۵	۴۷	۴۰	۳۱	۲۶	۵۵	۴۶	۳۸	۳۰
۴/۵	۳۹	۳۱	۲۸	۲۴	۴۹	۳۸	۲۹	۲۶

همچنین در کل چه برای حالت وجود نشت با قطر ۴ میلی‌متر و چه برای حالت وجود نشت با قطر ۱۰ میلی‌متر روند میرایی امواج برای دبی ۴/۵ لیتر در ثانیه سریع‌تر از دبی ۲/۵ لیتر در ثانیه است. این مسئله به این دلیل است که دبی‌های بیشتر با سطح مقطع برابر لوله سرعت بیشتری تولید می‌نمایند و در نتیجه افت طولی آنها مطابق رابطه (۸) بیشتر خواهد بود.

همچنین به نظر می‌رسد امواج فشاری به وجود آمده در حضور نشت‌های موجود با قطر ۱۰ میلی‌متر، روند استهلاک سریع‌تری را نسبت به امواج فشاری به وجود آمده با قطر ۴ میلی‌متر دارا هستند. دلیل این موضوع را می‌توان بزرگ‌تر بودن قطر نشت و به تبع آن افت فشار بیشتر ذکر نمود.

بررسی چگونگی اثرگذاری قطر و محل نشت بر پارامتر فشار

همان‌گونه که در شکل‌های قبل (شکل‌های ۴، ۵، ۶ و ۷) دیده شد، با افزایش یا کاهش قطر و یا مکان نشت، تغییراتی در مقدار فشار و افت فشار ثبت شده در سامانه به وجود می‌آید. از آنجایی که مقادیر افت ناشی از نشت در بسته شدن شیر به صورت آنی قابل ملاحظه می‌باشد، لذا در ادامه مقدار اثرگذاری قطر و محل نشت بر پارامتر فشار در حالت بستن آنی شیر مورد بررسی قرار گرفته است. جدول‌های (۲) و (۳) به ترتیب بیانگر مقدار اثرگذاری تغییر در قطر و محل نشت بر پارامتر فشار ثبت شده توسط ترنسدیوسرهای فشار در مجاورت شیر انتهایی می‌باشد. همان گونه که در جدول (۲) مشخص است، چه در فاصله نشت ۲۷ متری و چه در فاصله نشت ۳۹ متری از مخزن، با افزایش قطر روزنه نشت مقدار افت فشار نیز افزایش می یابد. برای اکثریت قریب به اتفاق نتایج به دست آمده، دامنه تغییرات افت فشار در یک دبی ثابت عموماً حدود ۲۰ تا ۲۲ درصد می باشد. یعنی با ۲/۵ برابر شدن قطر نشت از ۴ میلی‌متر به ۱۰ میلی‌متر، حدود ۲۰ تا ۲۲ درصد به افت اضافه می شود. به عنوان مثال اگر برای قطر روزنه ۴ میلی‌متر که افت فشار نسبت به حداکثر فشار ۲۶ درصد می باشد، برای قطر روزنه ۱۰ میلی‌متر افت حدودی معادل ۲۶ به علاوه ۲۲ درصد یعنی ۴۸ درصد خواهیم داشت.

جدول ۳- میزان افت فشار نسبت به فشار حداکثر در بیشینه فشاری اول (درصد) با در نظر گرفتن تغییر در فاصله نشت

دبی (L/s)	نشت به قطر ۱۰ میلی‌متر				نشت به قطر ۴ میلی‌متر			
	L= ۴۵ m	L= ۳۹ m	L= ۳۳ m	L= ۲۷ m	L= ۴۵ m	L= ۳۹ m	L= ۳۳ m	L= ۲۷ m
۲/۵	۶۲	۵۸	۵۳	۵۲	۳۷	۳۲	۳۰	۲۶
۳/۵	۶۱	۵۴	۵۲	۵۰	۳۲	۳۰	۲۷	۲۲
۴/۵	۵۴	۵۰	۴۶	۴۴	۳۱	۲۷	۲۴	۲۱

البته لازم به ذکر است پدیده مورد بررسی در تحقیق حاضر پدیده‌ای آنی می باشد و همواره با مقداری عدم قطعیت و خطا مواجه است. لذا در مقادیر فوق‌الذکر باید مقداری نوسان نیز مد نظر قرار داد. همچنین همان طور که در جدول (۳) مشخص است، چه در نشت به قطر ۴ میلی‌متر و چه در نشت به قطر ۱۰ میلی‌متر، با افزایش فاصله نشت از مخزن (نزدیک شدن به شیر قطع و وصل انتهایی) مقدار افت فشار افزایش می یابد. تقریباً در تمامی نتایج به دست آمده، دامنه تغییرات افت فشار در یک دبی ثابت عموماً حدود ۱۰ درصد می باشد. یعنی با افزایش فاصه نشت از مخزن از ۲۷ متر به ۴۵ متر، حدود ۱۰ درصد به افت اضافه می شود. به عنوان مثال اگر برای محل نشت ۲۷ متر در دبی ۳/۵ لیتر درثانیه افت فشار نسبت به حداکثر فشار ۲۲ درصد باشد، برای فاصه نشت از مخزن از ۲۷ متر، افت حدودی معادل ۲۲ به علاوه ۱۰ در صد یعنی ۳۲ درصد خواهیم داشت. همچنین همان گونه که قبلاً گفته شد، پدیده مورد بررسی در تحقیق حاضر پدیده‌ای آنی می باشد و همواره با مقداری عدم قطعیت و خطا مواجه است. لذا در مقادیر فوق‌الذکر باید مقداری نوسان نیز مد نظر قرار داد.

نتیجه‌گیری

تحلیل جریان‌های غیرماندگار سریع از این برای که منجر به جلوگیری از وارد شدن خسارات شدید به سامانه آبرسانی می‌شود دارای اهمیت فراوان است. همچنین با گذشت زمان از بهره‌برداری خطوط انتقال آب، نشت آب در هر کجای یک سامانه آبرسانی ممکن است رخ دهد. لذا در این تحقیق جریان غیرماندگار سریع با وجود نشت در سامانه مورد شبیه‌سازی آزمایشگاهی قرار گرفت و به کمک آن تأثیر مشخصات نشت از جمله قطر و مکان نشت بر خصوصیات هیدرولیکی جریان غیرماندگار سریع ارزیابی شد. تحقیقات نشان داد امواج فشاری ناشی از بستن آنی شیر بهتر از بستن کند شیر می‌تواند وجود نشت در سامانه را نمایان سازد. در تمامی موارد بستن آنی شیر تأثیر پارامترهای نشت بر حداکثر اول امواج فشاری به وضوح مشخص است. این اثر در حداکثرهای بعدی به دلیل برهم‌نهی امواج ثانویه حاصل از نشت و امواج اصلی انتشار یافته در سامانه به دلیل بستن شیر و همچنین اندر کنش‌های سازه تکیه‌گاه و سیال آنچنان قابل تشخیص نیست. با زیاد شدن قطر نشت، دبی خروجی از سامانه بیشتر خواهد شد و با کاهش سرعت در لوله مطابق رابطه ژوکوفسکی حداکثر فشار به وجود آمده در موج فشاری غیرماندگار کاهش می‌یابد. افت در حداکثر فشاری دوره اول با افزایش قطر نشت افزایش می‌یابد. شیب افت فشار ناشی از نشت در حداکثر اول برای نشت‌هایی که از مخزن دورتر هستند و یا به شیر نزدیک‌ترمی‌باشند سریع‌تر است. در امواج شاهد روند استهلاک امواج فشاری شیب نسبتا ملایمی دارد اما با به وجود آمدن نشت در سامانه با بستن آنی شیر این روند دست‌خوش تغییر شده و بین حداکثر اول در دوره اول و حداکثر دوره دوم افت زیادی مشاهده می‌گردد که ناشی از حضور نشت در آن محل می‌باشد. شیب میرایی امواج برای حالت وجود نشت با قطر بیشتر در سامانه تندتر از حالت وجود نشت با قطر کمتر است چرا که قطر بزرگ‌تر دهانه نشت موجب افت‌های شدیدتری می‌گردد. همچنین در حالتی که نشت به شیر نزدیک‌تر است به دلیل فشار بیشتر امواج فشاری، افت ناشی از آن نیز بیشتر خواهد بود و روند میرایی سریع‌تر رخ می‌دهد.

منابع

۱- تائبی، ح. ۱۳۹۱. بررسی هیدرولیکی جریان‌های میرا در خطوط لوله موازی با استفاده از مدل فیزیکی و عددی. پایان‌نامه دکتری، رشته سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز.

۲- حقیقی‌پور، ص. ۱۳۹۱. بررسی هیدرولیکی جریان‌های میرا در خطوط لوله سری با استفاده از مدل فیزیکی و عددی. پایان‌نامه دکتری. رشته سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز.

۳- خیاط زاده، ع. ۱۳۷۶. مدل ریاضی هیدرولیکی تحلیل جریان در شبکه لوله ها در حالت ماندگار. پایان نامه کارشناسی ارشد، رشته سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده مهندسی، دانشگاه شهید چمران اهواز.

4- Allievi, L. 1913. *The theory of waterhammer*. Translated by American Society of Mechanic Engineers.

5- Colombo, A. F., Lee, P. and B. W. Karney. 2009. *A selective literature review of transient-based leak detection methods*. Journal of Hydro-environment Research, 2:212-227.

6- Colombo, A.F. and B.W. Karney. 2002. *Energy and costs of leaks: Toward a comprehensive picture*. Journal of Water Resources Planning and Management, ASCE, 128 (6): 441-450.

7- Covas, D., Graham, N., Maksimovic, C ., Ramos, H., Kapelan, Z., Savic, D. and G. Walters. 2003. *An assessment of the application of inverse transient analysis for leak detection: Part II – Collection and application of experimental data*. In: Proceedings of the International Conference on Advances in Water Supply Management, London, Balkema.

8- Fathi-Moghadam, M., Haghighipour, S. and H. Mohammad Vali Samani. 2013. *Design-variable optimization of hydropower tunnels and surge tanks using a genetic algorithm.* Journal of Water Resources Planning and Management, ASCE.139(2): 200-208.

9- Frizell, J. P. 1898. *Pressures resulting from changes of velocity of water in pipes*. Translated by American Society of Civil Engineering, ASCE. 39: 1–18.

10- Funk, J. E., Wood, D. J. VanVuuren, S. J. and M. Lc Chevallier. 1999. *Pathogen intrusion into water distribution systems due to transients*. 3rd American Society of Mechanic Engineering, Joint Fluids Engineering Conference, July 18-23, San Francisco.

11- Haghighi, A. and H. M. Ramos. 2012. *Detection of leakage freshwater and friction factor calibration in drinking networks using central force optimization*. Journal of Water Resource Management. 26: 2347–2363.

12- Jönsson, L. 2001. *Interaction of a hydraulic transient with a leak in a pipe flow*. 14th Australasian Fluid Mechanics Conference, Adelaide University, Adelaide, Australia.

13- Joukowski, N. E. 1898. *Memoirs of the imperial academy society of St. Petersburg.* American Water Works Association. 24: 341-424.

14- Lai, C. C. 1991. *Unaccounted for water and the economics of leak detection*. Water Supply, 9 (3, 4): 1–8.

15- Meniconi, S., Brunone, B. and M. Ferrante. 2012. *Water-hammer pressure waves interaction at cross-section changes in series in viscoelastic pipes.* Journal of Fluids and Structures, 33: 44-58.

16- Parker, K. H. and C. J. H. Jones. 1990. *Forward and backward running waves in the arteries: analysis using the method of characteristics.* Journal of Biomechanical Engineering, 112: 322–326.

17- Shamloo, H. and A. Haghighi. 2009. *Leak detection in pipelines by inverse backward transient analysis*. Journal of Hydraulic Research, 47(3): 311–318.

18- Streeter, V. L. and C. Lai. 1963. *Waterhammer analysis including fluid friction.* Translated by American Society of Civil Engineering, ASCE, 128: 1491-1524.

19- Streeter, V. L. and E. B. Wylie. 1967. *Hydraulic transients.* McGraw- Hill, New York.