

Leak Detection in Viscoelastic Pipeline Using Inverse Transient Analysis

M. Rahmanshahi¹, M. Fathi-Moghadam², A. Haghghi³

1. PhD Graduated of Hydraulic Structures, Faculty of Water Science Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran (Corresponding Author) mostafarahmanshahi@gmail.com
2. Prof. of Hydraulic Structures, Faculty of Water Science Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran
3. Assoc. Prof. of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran

(Received June 9, 2017 Accepted Sep. 26, 2017)

To cite this article :

Rahmanshahi, M., Fathi-Moghadam, M. Haghghi, A., 2018, "Leak detection in viscoelastic pipeline using inverse transient analysis" Journal of Water and Wastewater, 29 (5), 85-97.

Doi: 10.22093/wwj.2017. 88886.2425 (In Persian)

Abstract

Leakage in water transmission systems and distribution networks in addition to waste of water and energy, can cause a declined water quality due to exposure to contaminants at low pressure conditions as well as damages to roads, buildings, and infrastructures. Therefore and due to its negative impacts on economics, environmental, and social safety, determination and control of leakage is one of the most important and complex topics in water supply systems engineering. The current research investigated transient-based techniques for leak detection in Polyethylene water pipe systems. For this purpose, firstly an inverse transient analysis (ITA) tool was developed, and then for testing and validating this model, extensive experiments were carried out at Hydraulic Laboratory of Shahid Chamran University of Ahvaz to collect the necessary data. A selected set of data corresponding to two leak locations with different sizes was used to assess the ITA method. Results indicated that the leak location can be accurately pinpointed using a sample size equal to one period ($T=4L/a$) of the collected pressure in ITA. The error for estimation of the location for a significant leak was between 0.17% and 2.17% of the pipe length. Also, using two periods ($2T$) of the pressure signal, the uncertainties in leak quantity estimation were satisfactory, as less than 23% of the real leak quantity. Additionally, the comparison between the observed data and the numerical results in different conditions indicated that the hydraulic model estimated the transient pressure accurately by just incorporating the pipe wall viscoelasticity into the model.

Keywords: Leak Detection, Inverse Transient Analysis, Time Domain, Viscoelastic Pipeline.



نشت یابی در خطوط لوله ویسکوالاستیک با استفاده از حل معکوس جریان گذرا

مصطفی رحمانشاهی^۱، منوچهر فتحی مقدم^۲، علی حقیقی^۳

۱- دانش‌آموخته دکترای سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران
(نویسنده مسئول) mostafarahmanshahi@gmail.com

۲- استاد گروه سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران
۳- دانشیار گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران

(دریافت ۹۶۳/۱۹ پذیرش ۹۶۷/۴)

برای ارجاع به این مقاله به صورت زیر اقدام فرمایید:

رحمانشاهی، م.، فتحی مقدم، م.، حقیقی، ع.، ۱۳۹۷، "نشت‌یابی در خطوط لوله ویسکوالاستیک با استفاده از حل معکوس جریان گذرا"
مجله آب و فاضلاب، ۲۹ (۵)، ۸۵-۹۷. Doi: 10.22093/wwj.2017. 88886.2425

چکیده

نشت در سیستم‌های انتقال و شبکه‌های توزیع، علاوه بر هدررفت آب و انرژی، موجب کاهش کیفیت آب به دلیل تماس با آلاینده‌ها در شرایط کم‌فشار می‌شود. جاده‌ها بناها و زیرساخت‌ها نیز در اثر نشت زیان می‌بینند. بنابراین، تعیین و کنترل نشت به دلیل تأثیرات منفی اقتصادی، محیط‌زیستی، ایمنی و اجتماعی آن، یکی از مباحث مهم و پیچیده در مهندسی سیستم‌های آبرسانی است. در این پژوهش به ارزیابی و تشخیص نشت بر پایه جریان گذرا در خطوط لوله پلی اتیلن پرداخته شد. برای این منظور در ابتدا یک مدل حل معکوس جریان گذرا توسعه داده شد و سپس برای ارزیابی این مدل، یک مدل آزمایشگاهی برای برداشت داده‌های مورد نیاز نشت‌های شبیه‌سازی شده در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه شهید چمران اهواز ساخته شد و مجموعه‌ای از داده‌های نشت در دو مکان و با اندازه‌های مختلف برای ارزیابی روش حل معکوس مورد استفاده قرار گرفت. نتایج نشان داد که با استفاده از یک سیکل $(T=4L/a)$ از سیگنال فشار برداشت شده در مدل حل معکوس، مکان نشت برای نشت‌های قابل توجه، با خطای بین ۱۷٪ تا ۲/۱۷ درصد طول لوله قابل تشخیص است. همچنین با استفاده از دو سیکل $(2T)$ از سیگنال فشار، اندازه نشت با خطای قابل قبولی کمتر از ۲۳ درصد اندازه واقعی نشت قابل تشخیص است. علاوه بر این، مقایسه داده‌های آزمایشگاهی با نتایج مدل هیدرولیکی در شرایط مختلف نشان می‌دهد که مدل عددی، تنها با اضافه کردن اثرات ویسکوالاستیک دیواره لوله، فشار گذار را با دقت خوبی توصیف می‌کند.

واژه‌های کلیدی: نشت‌یابی، تحلیل معکوس جریان گذرا، حوزه زمان، خطوط لوله ویسکوالاستیک

۱- مقدمه

ساخت و بهره‌برداری نامناسب و خوردگی لوله‌ها تشدید می‌شود. تلفات آب از منبع تا مصرف‌کنندگان، ۱۵ تا ۴۰ درصد از کل تأمین آب است، و در بعضی موارد تا ۸۰ درصد هم گزارش شده است (Maksimovic et al., 2001). در نتیجه، کنترل و کاهش نشت و مدیریت تقاضا برای مدیران و تصمیم‌گیرندگان صنعت آب شهری، دارای اولویت است. بنابراین در بسیاری از کشورها، شرکت‌های آبرسانی در حال بررسی و تشخیص مشکلات و به دنبال آن راه

در دهه‌های اخیر، تغییرات شرایط اقلیمی، دمای زیاد و خشکسالی، رشد جمعیت و در نتیجه افزایش تقاضای خانگی و صنعتی مصرف آب، منجر به کمبود و محدودیت آب در بسیاری از کشورها، از جمله ایران شده است. در حوزه مسائل مرتبط با مدیریت آب در آبرسانی شهری، افزایش غیرقابل اجتناب سن زیرساخت‌های خطوط لوله، منجر به افزایش نامطلوب مقدار نشت و ترکیب‌دهی می‌شود. این فرایند با افزایش فشار بهره‌برداری، طراحی ناکافی،



حل‌های مناسب برای نگهداری و مدیریت بهتر سیستم‌های آبرسانی هستند (Ghazali, 2012).

در سال‌های اخیر استفاده از لوله‌های پلیمری از جمله پلی‌اتیلن (PE) و پی‌وی‌سی (PVC) بنا به برتری‌های فنی و اقتصادی که نسبت به سایر لوله‌ها از جمله لوله‌های فولادی، چدنی، بتنی و آزیست دارند، روز به روز بیشتر شده است. این موضوع لزوم شناخت رفتار سازه‌ای و عملکرد هیدرولیکی لوله‌های پلیمری را بیش از پیش ضروری می‌سازد. روش مدل‌سازی لوله‌های پلیمری برای تحلیل جریان‌های گذرا، چند تفاوت اساسی با لوله‌های غیرپلیمری دارد. این تفاوت‌ها عمدتاً به اندرکنش نوسانات سیال با مشخصات سازه‌ای جداره لوله مربوط می‌شوند. پلیمرها به‌طور کلی رفتار مکانیکی ویسکوالاستیک از خود نشان می‌دهند. این موضوع بر روی شدت، شکل‌گیری و میرایی نوسانات فشار در جریان‌های گذرا اثر می‌گذارد.

روش‌های رایج تشخیص و مکان‌یابی نشت علاوه بر نیاز به نیروی کار زیاد، اغلب دارای خطای زیاد می‌باشند. روش‌های معمول نشت‌یابی مورد استفاده در صنعت آب، استفاده از تجهیزات صوتی و یا دیگر روش‌های جایگزین مانند روش گاز ردیاب و دمانگاری است. این روش‌ها اکثراً برای مساحت‌های محدود به‌کار رفته و در سیستم‌های لوله طولانی کارایی ندارند. علاوه‌براین، اگرچه استفاده از تجهیزات صوتی برای تشخیص نشت در لوله‌های فلزی رضایت‌بخش است، کارایی این روش در لوله‌های پلیمری تاکنون به اثبات نرسیده است (Hunaidi et al., 1998).

نیاز ضروری و مداوم به روش‌های نو و مؤثرتر نشت‌یابی، منجر به مطالعات زیادی در زمینه روش‌های نشت‌یابی بر پایه جریان‌گذرا، در ۲۰ سال اخیر شده است. در این روش سیگنال فشار تولیدشده در حین جریان‌گذرا، تا میرایی کامل در طول سیستم تحت فشار لوله‌ها در طی فرایند رفت و برگشتی، حامل اطلاعاتی در رابطه با مشخصات سیستم لوله می‌باشد. شناخت این ویژگی‌ها به تشخیص مکان و مشخصات پدیده‌های احتمالی سیستم لوله‌ها کمک می‌کند. بنابراین این روش یک روش بالقوه برای نشت‌یابی است. تاکنون روش‌های مختلفی بر اساس تحلیل فرکانسی و زمانی سیگنال‌های فشار گذرا بررسی شده است از جمله: تحلیل زمانی موج بازتابی از نشت (Brnone, 1999)، تحلیل موجک و فرکانسی

روش‌های رایج تشخیص و مکان‌یابی نشت علاوه بر نیاز به نیروی کار زیاد، اغلب دارای خطای زیاد می‌باشند. روش‌های معمول نشت‌یابی مورد استفاده در صنعت آب، استفاده از تجهیزات صوتی و یا دیگر روش‌های جایگزین مانند روش گاز ردیاب و دمانگاری است. این روش‌ها اکثراً برای مساحت‌های محدود به‌کار رفته و در سیستم‌های لوله طولانی کارایی ندارند. علاوه‌براین، اگرچه استفاده از تجهیزات صوتی برای تشخیص نشت در لوله‌های فلزی رضایت‌بخش است، کارایی این روش در لوله‌های پلیمری تاکنون به اثبات نرسیده است (Hunaidi et al., 1998).

۲- معادلات حاکم

معادلات حاکم بر جریان گذرا در مجاری بسته شامل معادلات بقای جرم و اندازه حرکت، با فرض یک حجم کنترل و استفاده از قضیه انتقال رینولدز برای یک جزء دیفرانسیل از حرکت سیال و همچنین با در نظر گرفتن دو ترم دینامیکی افت غیرماندگار و اثرات ویسکوالاستیک دیواره لوله، به شکل دو معادله دیفرانسیل جزئی

¹ Inverse Transient Analysis (ITA)

² Particle Swarm Optimization (PSO)



معادله ۵ مدل اصلاح شده آن توسط ویتکوفسکی و همکاران در سال ۲۰۰۰ ارائه شده است (Vitkovsk et al., 2000). در این مدل اثرات نوسانات افت اصطکاکی غیرماندگار بر اساس شتاب محلی لحظه‌ای و شتاب انتقالی لحظه‌ای شبیه‌سازی می‌شود

$$h_{fu} = \frac{k'}{gA} \left(\frac{\partial Q}{\partial t} + a \text{SGN}(Q) \left| \frac{\partial Q}{\partial x} \right| \right) \quad (5)$$

که در آن k' ضریب زوال افت اصطکاکی برنون و عملگر $\text{SGN}(Q)$ تابع علامت می‌باشد. پارامتر مشتق زمانی کرنش تأخیری نمی‌تواند مستقیماً محاسبه شده و نیازمند گسسته‌سازی عددی بیشتر است. برای توصیف رفتار رئولوژیکی^۴ دیواره لوله، مدل مکانیکی تعمیم یافته کلون-ویت^۵ (معادله ۶) جامد ویسکوالاستیک (شکل ۱) (Aklonis et al., 1972) با معادلات هیدرولیکی ترکیب شده است.

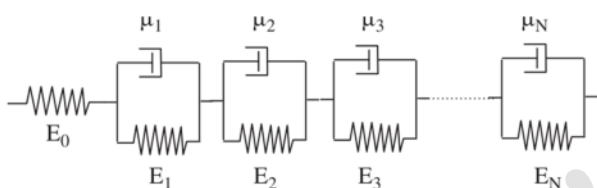


Fig. 1. Generalized Kelvin-Voigt model

شکل ۱- مدل تعمیم یافته کلون-ویت

$$J(t) = J_0 + \sum_{k=1}^N J_k (1 - e^{-t/\tau_k}) \quad (6)$$

که در این معادله $J(t)$ تابع خزش تطابقی، J_0 خزش تطابقی فنر اول، که به صورت $J_0 = 1/E_0$ تعریف می‌شود و E مدول الاستیسیته دینامیکی دیواره لوله است. برای هر المان k ام مدول کلون-ویت، J_k خزش فنر است که به صورت $J_k = 1/E_k$ تعریف می‌شود و E_k مدول الاستیسیته فنر است، و $\tau_k = \eta_k / E_k$ زمان تأخیر میراگر با η_k به‌عنوان ویسکوزیته میراگر است. پارامترهای k' در عبارت افت غیرماندگار و J_k و τ_k در عبارت

(۱) و (۲) قابل استخراج هستند (Evangelista et al., 2015, Soares et al., 2008)

$$\frac{dH}{dt} + \frac{a^2}{gA} \frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{2a^2}{g} \frac{d\varepsilon_r}{dt} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial H}{\partial x} + \frac{1}{gA} \frac{dQ}{dt} + (h_{fs} + h_{fu}) = 0 \quad (2)$$

که در این معادلات

H ارتفاع فشاری پیزومتریک در هر لحظه، Q دبی لحظه‌ای، a سرعت موج فشاری، g شتاب ثقل، A مساحت مقطع لوله، ε_r مؤلفه تأخیری کرنش، h_{fs} افت اصطکاکی حالت ماندگار، h_{fu} افت اصطکاکی غیرماندگار، x مختصات در راستای محور لوله و t زمان می‌باشند. این دستگاه معادلات دیفرانسیل با استفاده از روش خطوط مشخصه حل شده و برای تکمیل محاسبات در هر گام زمانی، معادلات شرایط مرزی بالادست (مخزن با فشار ثابت) و پایین دست (شیر تولید ضربه کوچ) در نظر گرفته شد.

برای شبیه‌سازی افت ماندگار روش‌های مختلفی مورد استفاده قرار می‌گیرند. در این پژوهش این افت به صورت شبه‌ماندگار از روابط صریح هیگن پوازی^۱ (معادله ۳) برای شرایط جریان لایه‌ای ($Re < 2000$) و رابطه بلازیوس^۲ (معادله ۴) برای جریان آشسته ($Re > 4000$) استفاده شده است. همچنین برای پیوستگی تابع افت در شرایط بینابینی ($2000 \leq Re \leq 4000$) یک رابطه خطی تعریف شده است (Axworthy, 1997, Covas, 2003)

$$f_s = 64 / Re \quad (3)$$

$$f_s = 0.316 Re^{-0.25} \quad (4)$$

که در این معادلات $Re = VD/\nu$ عدد بدون بعد رینولدز، V سرعت متوسط جریان و ν ویسکوزیته سینماتیک سیال است.

تاکنون روابط مختلفی برای تخمین افت غیرماندگار در منابع علمی پیشنهاد شده است. بر اساس نتایج پژوهشگران، مدل پیشنهادی برنون^۳ بر دیگر روش‌ها برتری دارد (Covas, 2003). در

¹ Hagen-Poiseuille

² Blasius

³ Brunone

⁴ Rheological

⁵ Generalized Kelvin-Voigt



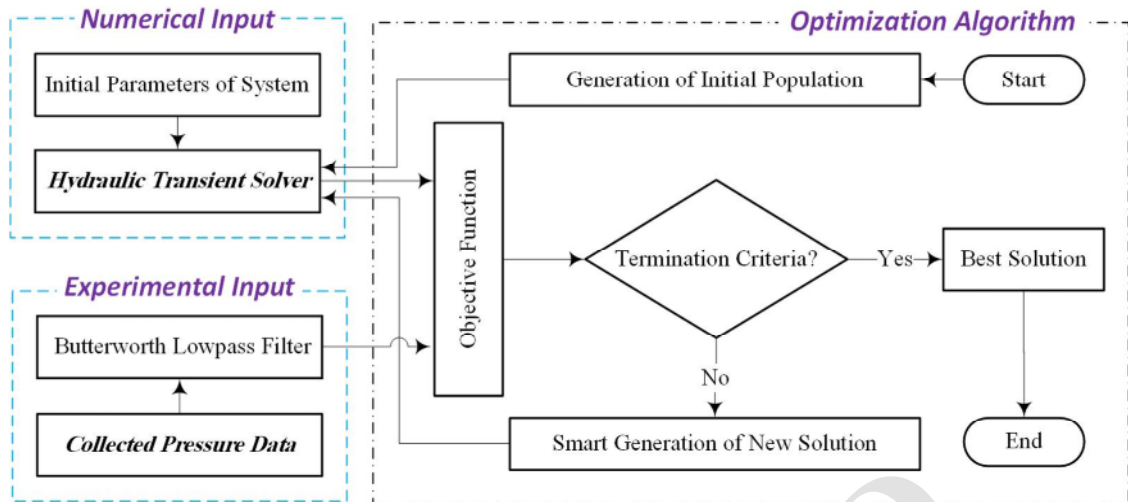


Fig. 2. Flowchart of Invers Transient Analysis Method

شکل ۲- روندنمای روش تحلیل معکوس جریان گذرا

$$\text{Min}_p \text{ OF}(p) = \frac{1}{M} [q^* - q(p)]^T [q^* - q(p)] = \frac{\sum_{i=1}^M [q_i^* - q_i(p)]^2}{M} \quad (\text{V})$$

که در آن

OF(p) تابع هدف، p بردار پارامترها با N متغیر (N تعداد متغیرهای تصمیم‌گیری)، q(p) بردار نتایج مدل عددی به ازای بردار پارامترهای p، q* نتایج مدل آزمایشگاهی، و M تعداد نمونه برداری فشار است.

داده‌های اندازه‌گیری مورد استفاده در مدل حل معکوس، مقدار فشار در پشت شیر تولید ضربه قوچ و پارامترهای مجهول مسئله شامل ضریب افت اصطکاکی غیر دائمی k'، مکان و اندازه نشت، و ضرایب خزش J_k می‌باشند. معمولاً سیگنال‌های فشار اندازه‌گیری شده در مدل فیزیکی به علت شرایط محیطی دارای مقداری نویز با فرکانس بالا می‌باشند. برای این منظور اطلاعات فشار اندازه‌گیری شده در ابتدا از فیلتر پایین‌گذر باترورث^۱ عبور داده شده و سپس در مدل حل معکوس فراخوانی می‌شوند.

۴- تجهیزات و مدل آزمایشگاهی

اکثر پژوهش‌های قبلی به صورت عددی و یا در سیستم‌های لوله الاستیک صورت گرفته است. لذا با توجه به هدف این پژوهش برای کالیبراسیون ضرایب مجهول مدل، از یک مدل فیزیکی در

خزش تطابقی به عنوان مجهولات مسئله، با استفاده از حل معکوس جریان گذرا به دست می‌آیند. در مدل حل معکوس، مقادیر k' و J_k در محدوده معمول این پارامترها به ترتیب ۰/۰۱ تا ۰/۵ برای k' و ۰/۱ × ۱۰^{-۱۰} pa^{-۱} تا ۲ × ۱۰^{-۱۰} pa^{-۱} برای J_k در نظر گرفته شده است. همچنین مقادیر τ_k برای لوله‌های پلی‌اتیلن با دانسیته بالا به ترتیب ۰/۰۵، ۰/۵ و ۱/۵ (برای سه المان کلونین ویت) در نظر گرفته می‌شود.

۳- حل معکوس جریان گذرا

در سال‌های اخیر حل معکوس جریان گذرا با هدف کالیبراسیون و تشخیص نشت در خطوط انتقال سیال و شبکه‌های توزیع آب به کار برده شده است (Liggett and Chen, 1994, Nash and Karney 1999). این روش با استفاده از اطلاعات فشار برداشت شده از جریان گذرا، به تخمین پارامترهای مجهول سیستم می‌پردازد. شناسایی پارامترهای مجهول یک مسئله بهینه‌سازی است که در آن رفتار سیستم با استفاده از یک مدل عددی جریان گذرا شبیه‌سازی شده و تفاوت بین مقادیر اندازه‌گیری شده و محاسباتی با استفاده از مدل بهینه‌ساز کمینه می‌شود. روندنمای کلی روش حل معکوس جریان گذرا مطابق شکل ۲ است.

روش بهینه‌سازی مورد استفاده در این پژوهش، الگوریتم ژنتیک (GA) و تابع هدف مورد استفاده در مدل بهینه‌ساز، مطابق معادله ۷ متوسط حداقل مجذور مربعات خطا (LSE) است

¹ Butterworth Lowpass Filter



مجموع مقدار فشار قرائت شده از فشارسنج روی مخزن (TR1) و ارتفاع آب داخل مخزن، به عنوان شرط مرزی بالادست به مدل معرفی شد. مقدار ارتفاع آب داخل مخزن معمولاً در حدود ۱ متر نگه داشته می‌شد و تغییرات آن در حین جریان گذرا کمتر از ۱ سانتی‌متر بود. در شکل ۳ شماتیک مدل آزمایشگاهی و تجهیزات آن و نمایی از چند بخش از مدل آزمایشگاهی نمایش داده شده است.

روش آزمایش در این پژوهش به این شکل بود که پس از برقراری جریان ماندگار مورد نظر و ثابت نگه داشتن فشار بالادست مخزن روی فشار مورد نظر، در ابتدا دبی نشت و دبی انتهایی سیستم با روش حجمی اندازه‌گیری شد، سپس با بستن سریع شیر ربع‌گرد پایین دست، جریان گذرا در سیستم تولید شد و با استفاده از فشارسنج^۳ های ۱۶ بار (با دقت ۰/۳ درصد در بازه اندازه‌گیری ۰ تا ۱۶ بار)، سیگنال‌های تغییرات فشار جریان گذرا در قسمت‌های مورد نظر اندازه‌گیری شد. این فشارسنج‌ها توسط سیم‌های رابط به دستگاه مبدل آنالوگ به دیجیتال (دیتالوگر^۴) و از آنجا به سیستم کامپیوتری متصل می‌باشند.

۵- نتایج و بحث

در این قسمت با استفاده از اطلاعات برداشت شده از نشت شبیه‌سازی شده شماره ۲ در مدل آزمایشگاهی، دقت مدل عددی با شرایط مختلف شامل: (۱) مدل جریان گذرای کلاسیک، (۲) مدل کلاسیک با وجود افت غیرماندگار، (۳) مدل کلاسیک با وجود هر دو پدیده دینامیکی افت غیرماندگار و اثرات ویسکوالاستیک دیواره لوله، و (۴) مدل کلاسیک به همراه اثرات ویسکوالاستیک، در پیش‌بینی پاسخ سیستم به جریان گذرای تولیدشده، مورد بررسی قرار گرفت. سیستم لوله با طول ۱۵۸ متر در مدل عددی به ۵۴ قسمت (۵۵ گره محاسباتی) با طول ۲/۹۳ متر تقسیم شد. نشت مورد استفاده در این قسمت، نشت با قطر ۶ میلی‌متر با دبی نشت ۰/۵۷۳ لیتر بر ثانیه و دبی انتهای خط لوله ۱/۰۲ لیتر بر ثانیه و با فاصله ۱۱۷/۴ متر از مخزن بالادست می‌باشد. در پژوهش حاضر در مدل جریان گذرا از اطلاعات فشارسنج ۱ (TR1) برای شرط مرزی بالادست و از اطلاعات فشارسنج ۴ (TR4) برای ارزیابی

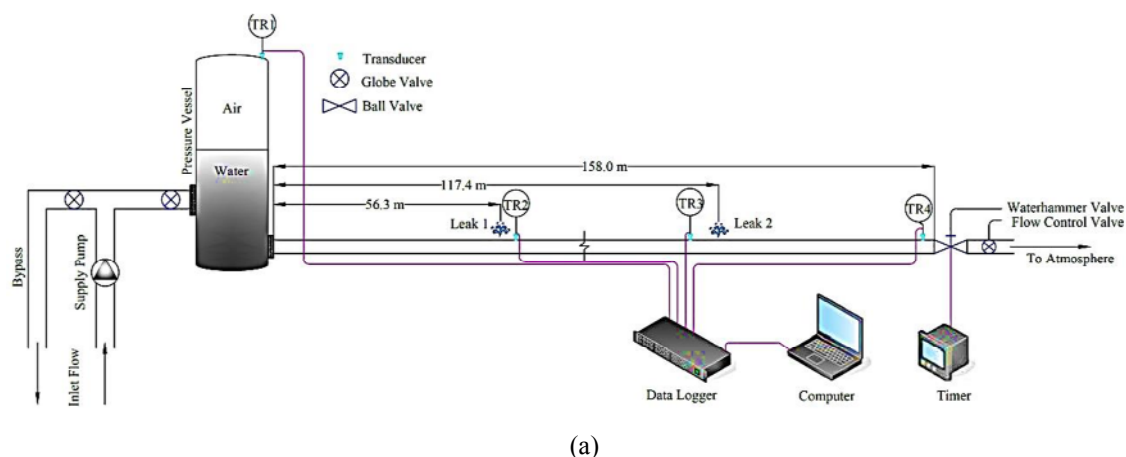
آزمایشگاه هیدرولیک دانشکده مهندسی علوم آب دانشگاه شهید چمران اهواز که به همین منظور طراحی و ساخته شده بود، استفاده شد. این سیستم جریان گذرا شامل یک مخزن تحت فشار با حجم ۶۰۰ لیتر، لوله‌های از جنس پلی‌اتیلن با دانسیته بالا (HDPE) استاندارد ۶۳ با PE100 (با طول، قطر داخلی و ضخامت به ترتیب ۱۵۸ متر، ۵/۰۵ سانتی‌متر و ۶/۵ میلی‌متر)، شیر تولید ضربه‌چوچ و شیر تنظیم جریان بود. در این سیستم، خط لوله در طول مسیر به صورت افزایشی حول یک قاب فلزی ۱/۵ × ۶ متری به صورت بیضوی حلقه شد و برای ثابت نگه داشتن آن از بست‌های فلزی با روکش پلاستیک استفاده شد. اختلاف ارتفاع ابتدا (مخزن بالادست) و پایین دست (شیر تولید ضربه‌چوچ) ۰/۶۵ متر بوده، که در مدل عددی این تغییر ارتفاع لحاظ شده است. سیستم توسط یک پمپ تغذیه به مخزن آزمایشگاه متصل است که دبی مورد نیاز خط لوله را تأمین می‌کند. در این پژوهش برای تنظیم دبی از یک شیر کروی^۱ و همچنین برای تولید جریان گذرا از یک شیر ربع‌گرد^۲ استفاده شد. این نوع شیر مجهز به یک زمان‌سنج با دقت ۰/۰۰۱ ثانیه بود که زمان بستن و باز شدن آن را نشان می‌داد. همچنین دبی جریان ماندگار به صورت حجمی در انتهای خط لوله اندازه‌گیری می‌شد.

آزمایش‌های این پژوهش در محدوده دبی ۰/۸ تا ۱/۱ لیتر بر ثانیه برای اندازه‌های مختلف نشت در دو مکان مختلف (نزدیک به شیر انتهایی (Leak 2 در شکل ۳) با قطر ۲، ۳، ۴، ۵، ۶، ۷ و ۸ میلی‌متر و نزدیک به مخزن (Leak 1 در شکل ۳) با قطر ۵، ۶، ۷ و ۸ میلی‌متر) انجام شد. فشارسنج‌ها از نوع WIKI (A10) در چهار مکان مختلف روی مخزن بالادست، مجاور نشت‌ها و پشت شیر تولید جریان گذرا نصب شده و سیگنال‌های فشار جریان ماندگار و گذرا در این مکان‌ها با نرخ نمونه‌برداری ۱۰۰۰ Hz برداشت شد. برای جلوگیری از تولید فشارهای منفی در سیستم و پدیده جدایی ستون سیال، فشار مخزن بالادست سیستم در شرایط ماندگار با استفاده از کمپرسور باد روی فشار معادل ۴۴ متر آب تنظیم شد و این فشار در طی جریان گذرا ثابت ماند. در حین آزمایش با توجه به بسته شدن شیر انتهایی سیستم، مقدار دبی ورودی به مخزن کم شد تا افزایش دبی باعث تغییرات زیاد ارتفاع فشاری مخزن نشود.

³ Transducer
⁴ Data Logger

¹ Glob valve
² Ball Valve





(a)



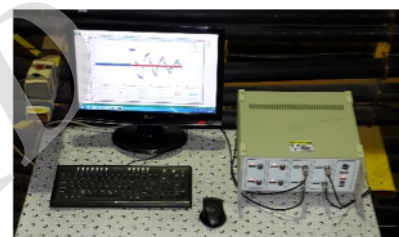
(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

Fig. 3. Experimental Facility, a) 2D schematic of transient Model, b) pipeline, c) Pressure vessel, d) Simulated leak, e) Downstream Valves, and f) Data acquisition system (Data logger and Computer)

شکل ۳- تجهیزات آزمایشگاهی، (a) نمای دو بعدی مدل جریان گذرا، (b) خط لوله، (c) مخزن تحت فشار، (d) نشت شبیه‌سازی شده، (e) شیرهای پایین دست، (f) سیستم برداشت داده‌ها (دیتالاگر و کامپیوتر)

مقدار سیگنال فشار آزمایشگاهی و عددی به یک حد مطلوب همگرا شده و تغییر معنی‌داری حاصل نشود. معمولاً در این پژوهش پس از ۱۰۰ گام، مدل به همگرایی می‌رسید و محاسبات متوقف می‌شد. برای محاسبه مکان و اندازه نشت از معادلات ۸ و ۹ و برای مقدار محاسبه خطای مکان و اندازه نشت از معادلات ۱۰ و ۱۱ استفاده شد

$$X(m) = \frac{\sum(L_i A_{Lefi})}{\sum A_{Lefi}} \quad (8)$$

$$A_{Lef} = \frac{\sum(A_{Lefi})}{\sum A_{Lef}(\text{true})} \quad (9)$$

$$\varepsilon_{loc} = |X - X_{\text{true}}| / L \quad (10)$$

تابع هدف در مدل حل معکوس استفاده شد. همچنین اطلاعات دو فشارسنج دیگر که در مجاور نشت‌های شبیه‌سازی شده می‌باشند، برای محاسبه مساحت مؤثر نشت‌ها به کار رفته است. فرایند تشخیص نشت در مدل حل معکوس در این پژوهش به این صورت بود که مدل در ابتدا با فرض دو گره کاندید نشت، اجرا می‌شد و در صورتی که مقدار و فاصله دو نشت کاندید قابل توجه بود، تعداد گره‌های کاندید نشت یک واحد بیشتر می‌شد، ولی اگر مقدار یکی از نشت‌های کاندید صفر بود، یا دو نشت کاندید در مجاورت هم قرار می‌گرفتند، محاسبات متوقف می‌شد. در این پژوهش نماینده نشت، مساحت مؤثر نشت (A_{Lef}) است، در مدل حل معکوس، تغییر مساحت و مکان نشت تا زمانی ادامه می‌یابد که در نهایت اختلاف



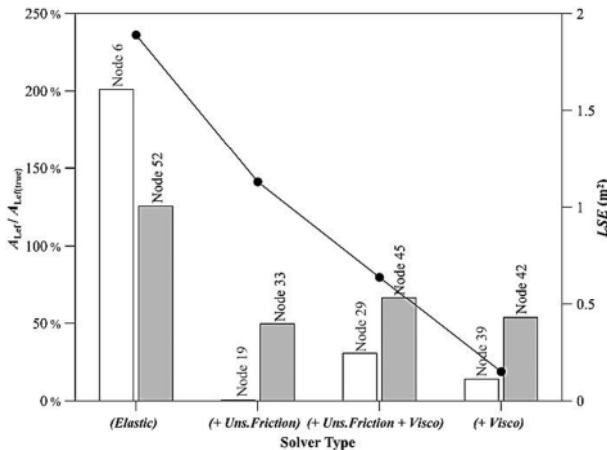


Fig. 4. Comparison of leak size and location at different hydraulic models

شکل ۴- مقایسه اندازه و مکان نشت در مدل های هیدرولیکی مختلف

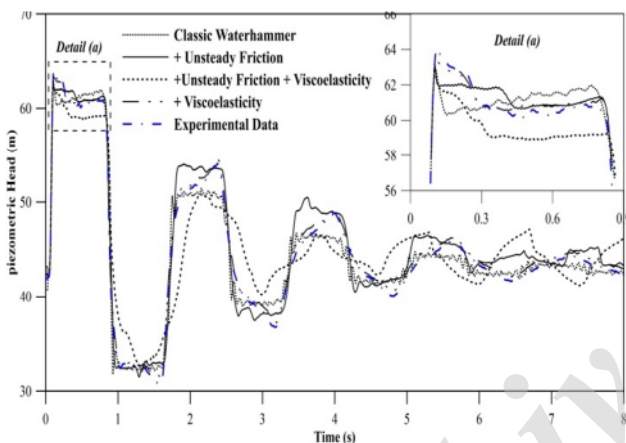


Fig. 5. Time variation of the piezometric head during the transient in different hydraulic models at downstream end of the pipeline

شکل ۵- تغییرات زمانی ارتفاع پیزومتریک در حین جریان گذرا در مدل های هیدرولیکی مختلف در انتهای خط لوله

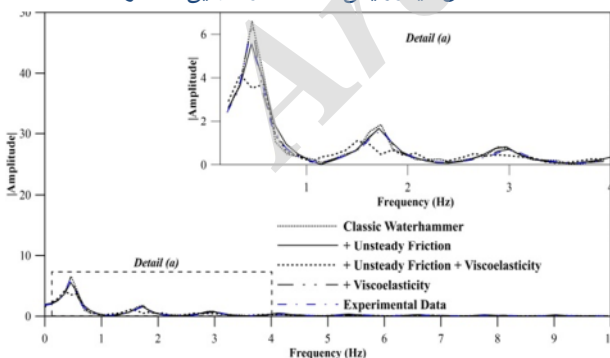


Fig. 6. Comparing system response in different hydraulic models for the frequency domain

شکل ۶- مقایسه پاسخ سیستم در مدل های هیدرولیکی مختلف در حوزه فرکانس

$$\varepsilon_{\text{size}} = \left| \frac{A_{\text{Lef}} - A_{\text{Lef}(\text{true})}}{A_{\text{Lef}(\text{true})}} \right| \quad (11)$$

در این معادلات X و A_{Lef} به ترتیب مکان و اندازه مؤثر نشت می باشند که از میانگین وزنی مکان و اندازه دو نشت کاندید به دست می آیند. L_i و $A_{\text{Lef}i}$ به ترتیب مکان و مساحت مؤثر نشت کاندید i ، X_{true} و $A_{\text{Lef}(\text{true})}$ به ترتیب مکان و اندازه واقعی نشت، و ε_{loc} و $\varepsilon_{\text{size}}$ به ترتیب خطای تخمین مکان و اندازه نشت می باشند.

در شکل ۴ نتایج شبیه سازی مدل حل معکوس برای تشخیص نشت در شرایط مختلف مدل هیدرولیکی جریان گذرا نمایش داده شده و در شکل ۵ سیگنال پاسخ سیستم در شرایط مختلف چهارگانه مدل عددی با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده است. در این پژوهش ضریب افت ماندگار با استفاده از روابط صریح ۳ و ۴ در شرایط ماندگار و ضرایب افت غیرماندگار (k') و خزش (J_k) و همچنین مشخصات نشت (مکان و مساحت مؤثر نشت) به صورت همزمان با استفاده از شرایط غیرماندگار کالیبره شد. نتایج این بررسی نشان می دهد که حتی با اضافه کردن پدیده دینامیکی افت غیرماندگار، مدل های معمول (کلاسیک) شبیه سازی جریان گذرا (ضربه قوچ) قادر به پیش بینی پاسخ سیستم های لوله پلیمری مانند پلی اتیلن و پی وی سی نمی باشند و برای تدقیق این مدل ها باید اثرات ویسکوالاستیک دیواره لوله به مدل اضافه شود. از طرفی مطابق شکل ۵ و شکل ۶ که در آن با استفاده از تبدیل فوریه سریع (FFT) پاسخ سیستم در حوزه فرکانس استخراج شده است، اضافه کردن اثرات ویسکوالاستیک دیواره لوله به تنهایی قادر به شبیه سازی رفتار سیستم های پلیمری بوده و برخلاف انتظار، اضافه کردن همزمان افت غیرماندگار و اثرات ویسکوالاستیک مطابق شکل ۶ باعث افت دامنه، تغییر فاز سیگنال و در نتیجه ایجاد خطا در مدل می شود. با توجه به تجربی بودن معادلات افت غیرماندگار، ممکن است این روابط مناسب لوله های با خواص ویسکوالاستیک نباشند و یا اضافه کردن این پدیده به مدل حل معکوس باعث افزایش اندازه مسئله (پیچیده تر شدن روند همگرایی حل معکوس) و کاهش دقت جواب ارائه شده باشد. بنابراین در ادامه این پژوهش در مدل هیدرولیکی از افت غیرماندگار صرف نظر شده است.

¹ Fast Fourier Transform

سیکل $T/2$ ($T=4L/a$)، یک سیکل T ، دو سیکل $2T$ و سه سیکل $3T$ در تکرارهای مختلف نمایش داده شده است. مکان واقعی نشت در این مثال بین گره ۴۱ و ۴۲ در فاصله $117/3$ متری از بالادست خط لوله می‌باشد. علی‌رغم تفاوت مقادیر متغیرهای مسئله در اجراهای مختلف، روش حل معکوس جریان گذرا با دقت قابل قبولی قادر به تشخیص مکان و اندازه نشت می‌باشد. همچنین در شکل ۸ a و b مقادیر خطای تشخیص مکان و اندازه نشت در اجراهای شکل ۷ نمایش داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که در این روش استفاده از اندازه سیگنال نیم و یک برابر دوره تناوب سیستم، مکان نشت را با دقت بیشتری مشخص می‌کند و برای برآورد اندازه نشت بهتر است از دو یا سه برابر دوره تناوب سیستم استفاده شود. بنابراین با توجه به این‌که در نیم و یک سیکل اول

در این قسمت هدف بررسی اثر اندازه سیگنال مورد استفاده در حل معکوس بر دقت تشخیص مکان و اندازه نشت می‌باشد. همچنین با توجه به ماهیت فراکوشی و انتخاب تصادفی الگوریتم مورد استفاده در حل معکوس، در هر اجرای مدل نتایج یکسانی برای متغیرهای تصمیم‌گیری حاصل نشده، لذا برای هر اندازه از سیگنال مورد استفاده، اجرای مدل ۴ بار تکرار شده است و اثر تکرار بر دقت نتایج بررسی شده است. در این قسمت نیز از نشت ۶ میلی‌متر با خصوصیات تشریح شده در قسمت قبل استفاده شده است. بر اساس نتایج حاصل شده از گام قبلی، از افت غیرماندگار صرف‌نظر شده و پارامترهای مجهول مسئله شامل نشت و ضرایب تابع خزش به صورت هم‌زمان کالیبره شده است. مطابق شکل ۷ نتایج اجراهای مختلف مدل در اندازه‌های نیم

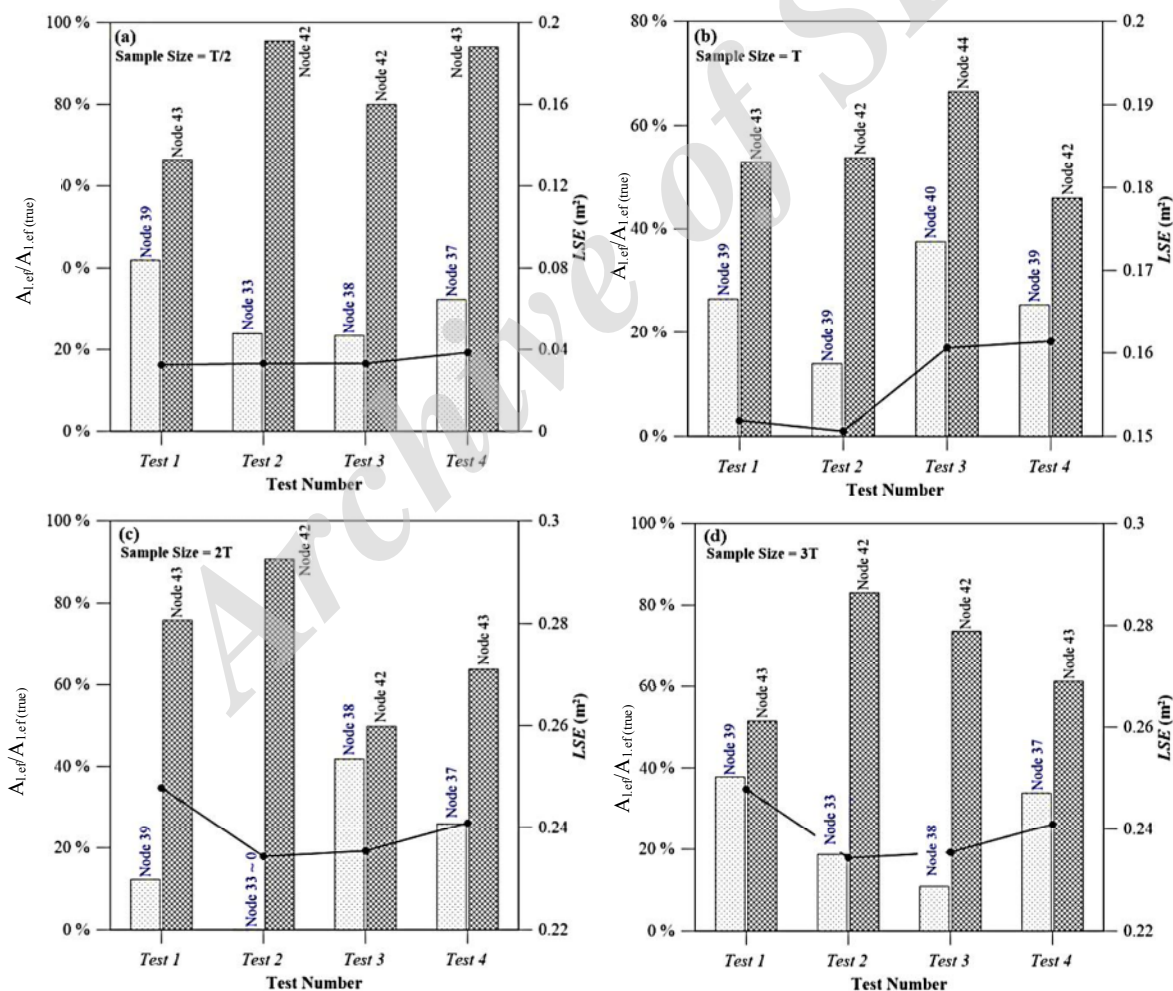


Fig. 7. The effect of sample size used at inverse analysis on detection of leak location and size
 شکل ۷- اثر اندازه سیگنال مورد استفاده در حل معکوس بر تشخیص مکان و اندازه نشت

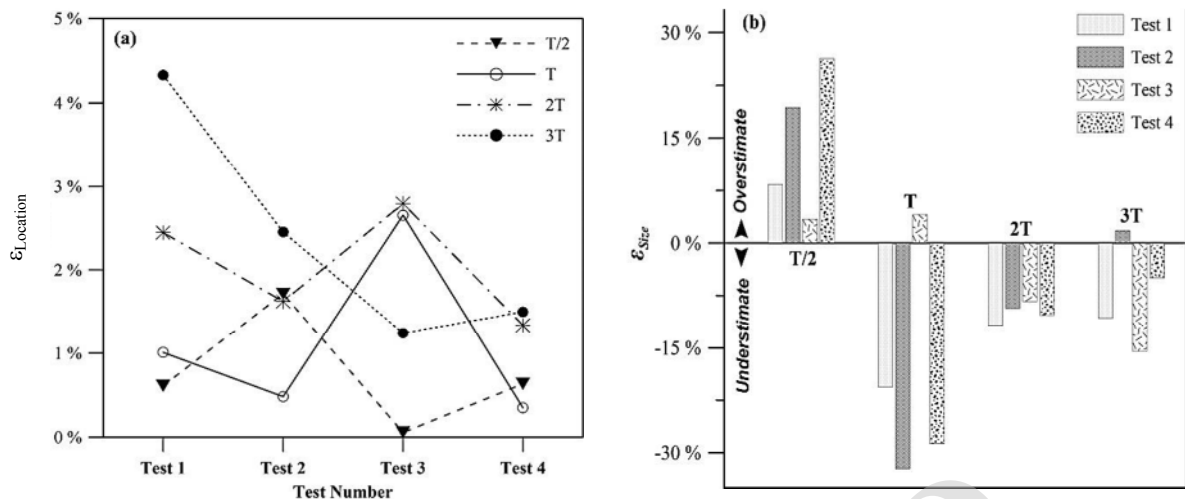


Fig. 8. Leak location and size errors at different sample sizes used in inverse analysis
شکل ۸- خطای تشخیص مکان و اندازه نشت در طول‌های مختلف سیگنال مورد استفاده در حل معکوس

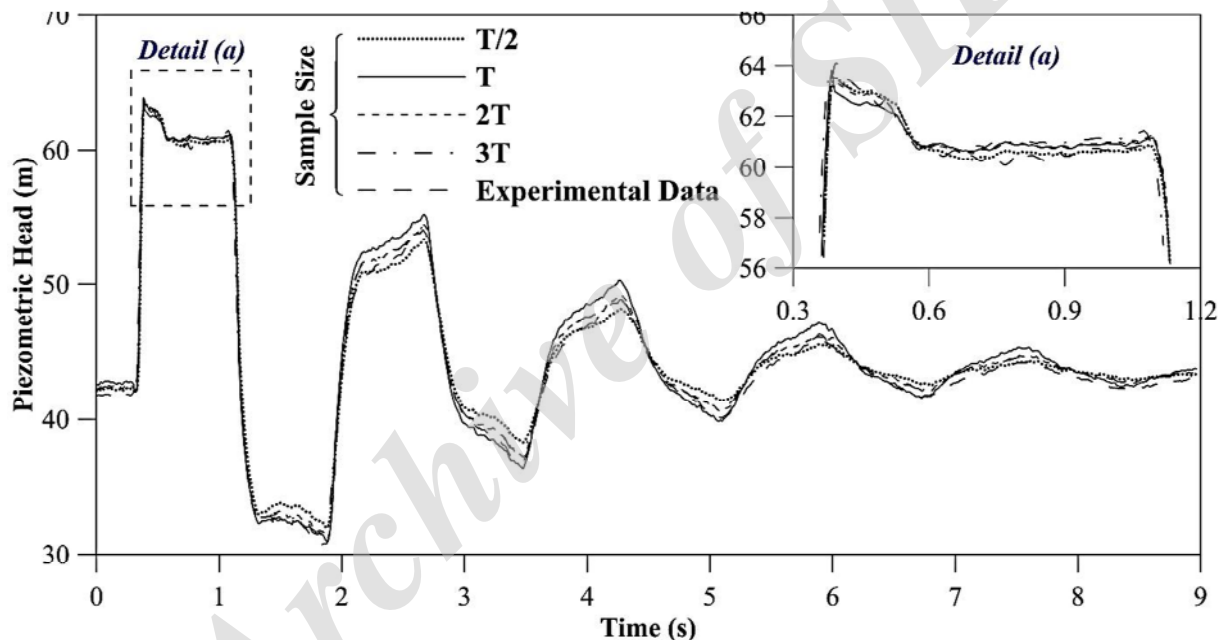


Fig. 9. Variation of pressure signal at TR4 using different sample size used in inverse analysis
شکل ۹- تغییرات سیگنال فشار در TR4 با استفاده از اندازه سیگنال‌های مختلف در حل معکوس

کوچک‌تر ($T/2$, T) در محدوده‌های مدل‌سازی به سیگنال واقعی نزدیک‌تر می‌باشند. در شکل ۱۰ مقادیر تابع خزش (a) و ضرایب خزش (b) نمایش داده شده است. در ادامه با توجه به تحلیل صورت گرفته در گام‌های قبلی نسبت به نوع مدل هیدرولیکی و اندازه سیگنال مورد استفاده در تشخیص مشخصات نشت در مدل حل معکوس، به بررسی دقت مدل تشخیص مشخصات ۱۱ نشت شبیه‌سازی شده در مدل فیزیکی در دو مکان مختلف پرداخته شده است. اطلاعات نشت‌های

سیگنال فشار اثرات بازتاب موج ناشی از نشت مشهودتر است، می‌توان استدلال کرد که دقت برآورد مکان نشت بیشتر متأثر از شدت بازتاب موج فشاری بوده و دقت تشخیص اندازه نشت به مقدار میرایی قله‌های حداکثر و حداقل سیگنال بستگی دارد. همچنین در شکل ۹ سیگنال فشار پشت شیر آزمایشگاهی با نتایج یکی از مدل‌سازی‌های $T/2$, T , $2T$ و $3T$ مقایسه شده است. مطابق شکل با افزایش اندازه سیگنال مدل‌سازی، شکل کلی سیگنال به سیگنال واقعی نزدیک‌تر شده، اگرچه مقادیر

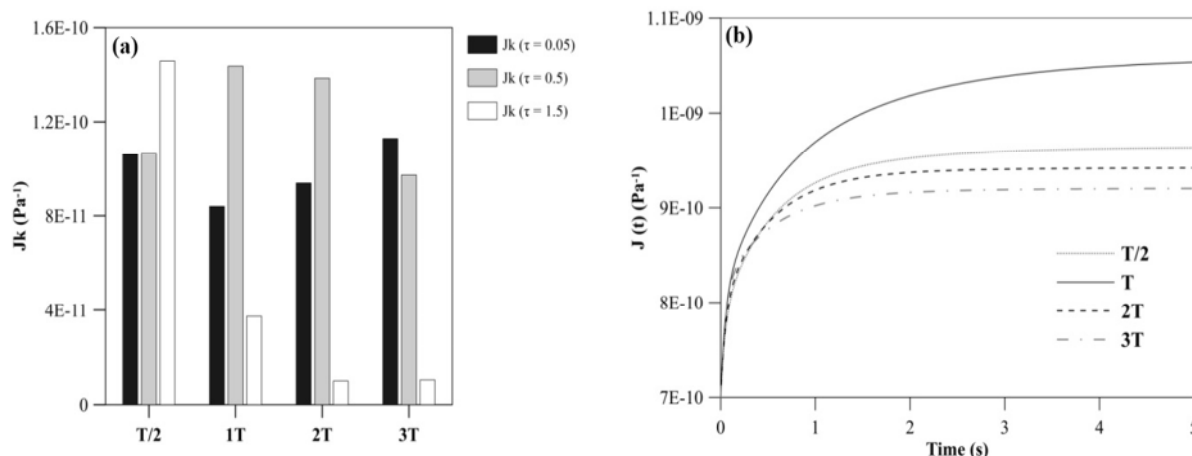


Fig. 10. a) Optimal creep coefficients, b) Best creep functions

شکل ۱۰-ا) ضرایب خزش بهینه، ب) بهترین توابع خزش

استفاده از دو سیکل (2T) اندازه نشت را با خطای کمتر از ۲۳ درصد تشخیص می‌دهد. قابل ذکر است که مقدار سرعت موج فشاری در نشت‌های مختلف بین ۴۰۰/۲۷ تا ۴۰۵/۸۳ تخمین زده شده است.

شبیه‌سازی شده در سمت چپ و مقدار خطای برآورد مشخصات نشت در سمت راست جدول ۱ ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که در صورت استفاده از یک سیکل (T)، روش حل معکوس جریان گذرا نشت‌های قابل توجه ($A_{effective} > 10^{-5}$) را با خطای مکانی بین ۰/۱۷ تا ۲/۱۷ درصد (حداکثر ۳/۴۳ متر در مدل) و با

جدول ۱- ارزیابی مکان و اندازه نشت با استفاده از روش حل معکوس جریان گذرا

Table 1. Assessment of the leak location and size by ITA method

Leak's Characteristics				Error of Leak Size and Location					
Leak	$X_{true}(m)$	$Q_L (l/s)$	$Q (l/s)$	$A_{Leak}(m^2)$	Sample Size	$A_{Leak} (%)$	$\epsilon_{Size} (%)$	$X(m)$	$\epsilon_{Loc} (%)$
Leak 1	56.3	0.442	0.909	1.520E-5	T	82	18	56.57	0.17
					2T	86	14	55.49	0.51
		0.558	1.004	1.907E-5	T	76	24	58.58	1.45
					2T	93	7	57.75	0.92
		0.755	1.071	2.605E-5	T	73	27	58.53	1.41
					2T	77	23	57.52	0.78
0.978	0.905	3.376E-5	T	76	24	59.02	1.72		
			2T	103	3	60.87	2.89		
Leak 2	117.4	0.041	1.003	0.141E-5	T				
					2T				Leak not detectable
		0.076	0.846	0.261E-5	T				
					2T				Leak not detectable
		0.234	1.000	0.813E-5	T	176	76	133.02	9.89
					2T	215	115	112.04	3.39
		0.342	1.071	1.185E-5	T	75	25	120.83	2.17
					2T	96	4	106.61	6.83
		0.573	1.019	1.991E-5	T	68	32	118.16	0.48
					2T	92	8	121.81	2.79
0.782	1.100	2.731E-5	T	87	13	118.29	0.57		
			2T	87	13	113.54	2.44		
1.017	0.850	3.550E-5	T	83	17	118.13	0.46		
			2T	109	9	108.68	5.52		



۶- نتیجه‌گیری

نتایج مناسب‌تری ارائه می‌دهد. همچنین با توجه به ماهیت الگوریتم‌های فراکاوشی (در این پژوهش الگوریتم ژنتیک) به‌کار رفته در حل این‌گونه مسائل، اجراهای مختلف مدل حل معکوس، نتایج متفاوتی از متغیرهای تصمیم‌گیری ارائه می‌دهد ولی با این وجود جز در نشت‌های کوچک، دقت مدل در تشخیص مکان و اندازه نشت مناسب است. علی‌رغم کارایی، سرعت و صرفه اقتصادی این روش در تشخیص مشخصات نشت، برای موفقیت این روش در هر سیستم لوله، نیاز به توصیف دقیق مشخصات سیستم لوله و شرایط مرزی داخلی به مدل عددی و همچنین برداشت اطلاعات جریان گذرا مناسب است.

نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که مدل‌های عددی کلاسیک ضربه‌قوج قادر به شبیه‌سازی رفتار خطوط لوله پلیمری نبوده و نیاز به در نظر گرفتن اثرات ویسکوالاستیک در این مدل‌ها می‌باشد. مقایسه نتایج مدل عددی با نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهد که تنها با لحاظ کردن اثرات ویسکوالاستیک، مدل قادر به شبیه‌سازی رفتار سیستم‌های لوله پلیمری با دقت مناسب می‌باشد و اضافه کردن هم-زمان افت غیرماندگار و اثرات ویسکوالاستیک دیواره لوله باعث بروز خطا می‌شود. نتایج بررسی تشخیص نشت نشان می‌دهد که به‌طور کلی برای تشخیص مکان نشت استفاده از یک سیکل و برای تشخیص اندازه نشت استفاده از دو سیکل در روش حل معکوس،

References

- Aklonis, J. J., MacKnight, W. J. & Shen, M. 1972. *Introduction to polymer viscoelasticity*, Wiley-Interscience-John Wiley & Sons, Inc.
- Axworthy, D. H. 1997. Water distribution networks modelling: From steady-state to waterhammer. PhD, University of Toronto, Toronto, Canada.
- Brunone, B. & Ferrante, M. 2001. Detecting leaks in pressurized pipes by means of transients. *Journal of Hydraulic Research*, 39(5), 539-547.
- Covas, D. 2003. Inverse transient analysis for leak detection and calibration of water pipe systems modeling special dynamic effects. PhD Thesis, University of Imperial College, London, UK.
- Covas, D., Ramos, H., Graham, N. & Maksimovic, C. 2005a. Application of hydraulic transients for leak detection in water supply systems. *Water Sci. Technol. Water Supply*, 4(5-6), 365-374.
- Covas, D., Ramos, H., Young, A., Graham, N. & Maksimovic, C. 2005b. Uncertainties of leak detection by means of hydraulic transients: From the lab to the field. *Proc., 8th Int. Conf. on Computing and Control for the Water Industry (CCWI 2005)*, Univ. of Exeter, Exeter, UK, 143-148.
- Evangelista, S., Leopardi, A., Pignatelli, R. & Marinis, G. 2015. Hydraulic transients in viscoelastic branched pipelines. *Journal of Hydraulic Engineering*, 141(8), 1-9.
- Ferrante, M. & Capponi, C. 2017. Viscoelastic models for the simulation of transients in polymeric pipes. *Journal of Hydraulic Research*, 55(5), 599-611.
- Ghazali, M. F. 2012. Leak detection using instantaneous frequency analysis. PhD Thesis, University of Sheffield, UK.
- Hunaidi, O., Chu, W., Wang, A. & Guan, W. 1998. Effectiveness of leak detection methods for plastic water distribution pipes. *Workshop on Advancing the State of our Distribution Systems - The Practical Benefits of Research*, AWWA Dist. System Symposium, Pub. AWWA, Austin, Texas.
- Kapelan, Z., Savic, D. & Walters, G. 2003. A hybrid inverse transient model for leakage detection and roughness calibration in pipe networks. *Journal of Hydraulic Research*, 41(5), 481-492.
- Liggett, J. A. & Chen, L. C. 1994. Inverse transient analysis in pipe networks. *Journal of Hydraulic Engineering*, 120(8), 934-955.



- Maksimovic, C., Ivetic, M., Prodanovic, D., Pavlovic, D., Jacimovic, N., Milicevic, M., et al. 2001. Elements of sustainability in water distribution systems-case study Laktasi. *Int. Conf. and Workshop Sustainability of Water and Environmental Systems Rehabilitation*, Banja Luka, 24-26 September 2001, 186-195.
- Nash, G. A. & Karney, B. 1999. Efficient inverse transient analysis in series pipe systems. *Journal of Hydraulic Engineering*, 125(7), 761-764.
- Ranginkaman, M. H. 2017. Leak detection and calibration of pipelines using inverse transient analysis in frequency domain. PhD, Shahid Chamran University, Ahvaz, Iran, 229 p. (In Persian)
- Ranginkaman, M., Haghghi, A. & Vali Samani, H. 2016. Inverse frequency response analysis for pipelines leak detection using the particle swarm optimization. *International Journal of Optimization in Civil Engineering*, 6 (1), 1-12.
- Shamloo, H. & Haghghi, A. 2010. Optimum leak detection and calibration of pipe networks by inverse transient analysis. *Journal of Hydraulic Research*, 48(3), 371-376.
- Soares, A., Covas, K., Fernanda, D. & Reis, L. 2008. Analysis of PVC pipe-wall viscoelasticity during water hammer. *Journal of Hydraulic Engineering*, 134(9), 1389-1394.
- Vitkovsky, J. P., Lambert, M. F. & Simpson, A. R. 2000. Advances in unsteady friction modelling in transient pipe flow. *Proc., 8th Int. Conf. on Pressure Surges-Safe Design and Operation of Industrial Pipe Systems*, A. Anderson, Ed., BHR Group, Suffolk, U.K., 471-498.
- Vitkovsky, J. P., Lambert, M. F., Simpson, A. R. & Liggett, J. A. 2007. Experimental observation and analysis of inverse transients for pipeline leak detection. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 133(6), 519-530.

