

شناسایی نشت در خطوط لوله بر پایه مدل سازی معکوس جریان گذرا و برنامه ریزی غیرخطی مختلط اعداد صحیح و حقیقی

حمید شاملو^{۱*}، علی حقیقی^۲

۱- استادیار دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

۲- دانشجوی دکترای عمران- هیدرولیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

* تهران، خیابان ولیعصر، دانشکده عمران دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

hshamloo@yahoo.com

چکیده- به منظور شناسایی نشت در خطوط لوله، جریان گذرا با بستن شیر انتهایی در مدت زمانی مشخص برقرار شده و سپس نوسانهای فشار تنها در محل شیر و پس از بسته شدن کامل، نمونه برداری می شوند. برای حذف اغتشاشهای نامطلوب و سایر عدم قطعیت های ناشی از شبیه سازی شیر، مدل ریاضی تحلیل جریان گذرا با به کارگیری ساختار جدیدی از روش خطوط مشخصه (MOC) به صورت مستقل از نوع شیر، زمان و روش بسته شدن آن توسعه داده می شود. بر اساس مقادیر نمونه برداری شده و با به کارگیری مدل عددی مذکور، مشخصه های جریان شامل نوسانهای فشار و دبی در سراسر لوله با تحلیل عقب گرد جریان از شیر انتها تا مخزن بالادست قابل محاسبه است. در این شرایط مقادیر محاسباتی بلندای (هد) مخزن، تابعی از پارامترهای مجهول نشت، شامل متغیرهای صحیح تعداد و محل نشت (با توجه به گسسته سازی خطوط مشخصه) و همچنین متغیرهای حقیقی اندازه نشت ها خواهند بود. به منظور شناسایی پارامترهای نشت، تابع هدفی با معیار کمینه سازی اختلاف مربعات مقادیر محاسباتی و مشاهداتی هد مخزن تشکیل داده شده و با کمینه سازی آن و تعیین متغیرهای مختلط تصمیم گیری، پارامترهای نشت در خط لوله تعیین می شود. در تحقیق حاضر برای حل این مسأله معکوس برنامه ریزی غیرخطی با پارامترهای مجهول مختلط صحیح و حقیقی (MINLP)، نوعی روش بهینه سازی بر پایه الگوریتم ژنتیک (GA) توسعه داده شده است. توانمندی روش با استفاده از یک مثال عملی و دو مثال تئوری نشان داده شده که نتایج، حاکی از کاربرد آسان و اعتمادپذیری قابل قبول روش پیشنهادی است.

کلید واژگان: نشت، جریان گذرا، برنامه ریزی غیرخطی مختلط، الگوریتم ژنتیک.

۱- مقدمه

و خوردگی اجزا، کارگذاری و نصب غیرفنی، ایجاد انشعابهای غیر مجاز، ضربه های ناشی از ساخت و سازها و وقوع پدیده ضربه قوچ، رانشها و نشستهای زمین ایجاد

تلفات نشت به عنوان یکی از مهم ترین معضلات شرکتهای بهره برداری از خطوط لوله، به علل مختلفی مانند استهلاک

نیاز است. همچنین لازم است ذکر شود که پیچیدگی و حجم محاسبات در این روشها قابل توجه است. با وجود این در روشهای تحلیل معکوس جریان گذرا امکان مدل سازی جریان با دقت بالا و همچنین توسعه روشهای نشت یابی برای سیستم های پیچیده تری مانند شبکه های آبرسانی وجود دارد.

روش استهلاک جریان گذرا^۳ (Wang et al., 2002; Nixon and Ghidaoui, 2007) نیز یکی دیگر از روشهای حوزه زمان است که در آن بر اساس سهم استهلاک سیگنال نوسانات جریان گذرا ناشی از نشت در مقایسه با اصطکاک، شناسایی نشت انجام می شود. در این روش معادلات دیفرانسیلی جریان گذرا ساده سازی و خطی سازی می شوند. سپس با استفاده از سری های فوریه، نوعی حل تقریبی برای آنها ارائه می شود. روش یاد شده از دید تئوری بسیار قوی است، اما از آنجا که ساده سازی های بسیاری در آن اعمال می شود، کاربرد آن در عمل محدود است، زیرا این روش فقط برای یک لوله و یک نشت فرمول بندی شده و در آن امکان مدل سازی دقیق خطوط لوله ای با شرایط مرزی مختلف وجود ندارد.

از میان روشهای حوزه زمان می توان به روشهای مبتنی بر انعکاس موج ناشی از نشت در حوزه زمان^۴ (Jonsson, 1995; Brunone, 1999) اشاره کرد. در این روشها بر اساس مطالعه روند تغییرات فشار در طول سیگنالهای اندازه گیری شده در خط لوله و تحقیق در خصوص شکستگی ها و تغییرات ناگهانی سیگنال و زمان وقوع آنها، در باره محل و اندازه نشت قضاوت می شود. به کارگیری این روشها، با وجود سادگی، محدود به سیستم های ساده بوده و نیازمند جریانهای گذرای بسیار شدیدی است که با استفاده از بسته شدن سریع شیر حاصل می شوند. بدیهی است که در هنگام تولید جریانهای بسیار شدید، امواج ضربه قوچ،

می شود. نشت آب از خطوط لوله به محیط، از یک سو سبب هرز رفتن بخش عظیمی از سرمایه های کشور شده و از سوی دیگر نشت معکوس آلودگی از محل شکستگی ها به درون خطوط لوله در مواقع افت فشار، خطرهای بهداشتی و زیست محیطی جبران ناپذیری را در پی دارد. نشت از لوله ها سبب آب شستگی در محیط پیرامون آنها می شود تا جایی که ممکن است علاوه بر گسترش خرابی در خطوط لوله، به تأسیسات زیرزمینی دیگری مانند خطوط فاضلاب و گاز، زیرسازی جاده ها و پی ساختمانها نیز صدمه جدی وارد نماید. از این رو توسعه روشهای نشت یابی در سالهای اخیر به عنوان یکی از حوزه های ویژه در مهندسی هیدرولیک مطرح شده است. روشهای نشت یابی بر پایه مدل های ریاضی^۱ با توجه به شیوه مدل سازی جریان، به دو دسته: مدل های جریان ماندگار و مدل های جریان گذرا تقسیم بندی می شوند که شیوه مدل سازی گذرا - به آن دلیل که شامل اطلاعات جامع تری از خط لوله هم در حوزه زمان و هم در حوزه مکان است - بیشتر مورد توجه قرار گرفته است. روشهای مبتنی بر مدل سازی جریان گذرا به دو گروه روشهای حوزه زمان و در حوزه فرکانس دسته بندی می شوند. سابقه روشهای قابل توجه در نشت یابی خطوط لوله، تنها به حدود دو دهه اخیر باز می گردد. از مهمترین روشهای حوزه زمان می توان به روشهای بر پایه تحلیل معکوس جریان گذرا^۲ (Nash and Karney 1999; Pudar and Liggett, 1992; Liggett and Chen, 1994; Vitkovsky et al., 2000 and 2003) اشاره کرد. در این روشها، مدل عددی تحلیل جریان در خط لوله با نوعی روش بهینه سازی در قالب یک مسأله برنامه ریزی ریاضی ترکیب می شود. بر همین اساس حجم بالایی از اطلاعات برای مدل سازی دقیق خط لوله و اجزای آن در این روشها مورد

3. Transient Damping Method
4. Time Domain Reflectometry Techniques

1. Model Based Techniques
2. Inverse Transient Methods

است بسته شدن شیر ناگهانی باشد که این سبب ایجاد فشارهای ضربه قوچ شده و در لوله‌های در دست بهره‌برداری^۳ و معمولاً فرسوده، آثار نامطلوبی بر جا خواهد گذاشت.

در تحقیق حاضر روشی بر پایه مدل‌سازی معکوس جریان گذرا در خطوط لوله با استفاده از روش خطوط مشخصه (MOC)^۴ در حوزه زمان، تعریف مسأله برنامه‌ریزی غیرخطی مختلط اعداد صحیح و حقیقی (MINLP)^۵ و بهینه‌سازی با استفاده از الگوریتم ژنتیک (GA)^۶ ارائه شده است. پارامترهای مجهول نشت شامل متغیرهای صحیح تعداد و محل نشت (با توجه به گسسته‌سازی خطوط مشخصه) و همچنین متغیرهای حقیقی اندازه نشت‌ها است.

۲- معادلات حاکم

جریان گذرا در خط لوله با بستن شیر کنترل انتهایی برقرار می‌شود که البته شرایط و شدت نوسانها به سرعت بسته شدن شیر وابسته و لذا قابل کنترل است. معادلات بقای جرم و اندازه حرکت در خطوط لوله، شرایط جریان گذرا را توصیف می‌کنند که این معادلات معمولاً به نام پیوستگی و مومتم شناخته می‌شوند. شکل معمول معادلات پیوستگی و مومتم پس از ساده‌سازی‌ها به قرار زیر است (Chaudhry, 1987):

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{a^2}{gA} \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + gA \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{fQ|Q|}{2DA} = 0 \quad (2)$$

در روابط فوق $H = H(x, t)$ بلندای لحظه‌ای پیزومتریک، $Q = Q(x, t)$ دبی لحظه‌ای جریان، a سرعت انتشار موج

کاویتاسیون و افزایش تأثیر عدم قطعیتها در مدل‌سازی ایجاد خواهد شد. لذا نمی‌توان این روشها را در کاربردهای عملی چندان قابل توسعه دانست. روش دیگری که سالها پیش در حوزه زمان معرفی شده روش بالانس حجمی^۱ (Liou, 1994) است. این روش بسیار ساده بوده و با برقراری اصل تعادل حجمی در خط لوله بر اساس روابط پیوستگی به شناسایی نشت در خط لوله می‌پردازد. این روش اگرچه بسیار ساده معرفی شده، اما نیازمند داده‌های اندازه‌گیری گسترده‌ای شامل نوسانهای فشار و دبی در نقاط مختلف خط لوله است که این روش در مقایسه با سایر روشها چندان مطلوب و کاربردی به نظر نمی‌رسد. در کنار روشهای مذکور در حوزه زمان چندین روش نیز در حوزه فرکانس و بر پایه تحلیل پاسخ فرکانسی جریان گذرا^۲ در سالهای اخیر معرفی شده است؛

(Mpesha et al., 2001 and 2002; Kim, 2005; Lee et)

al., 2005; Covas et al., 2005; Lee et al., 2007) هر یک از روشهای مذکور از منظر حجم اطلاعات مورد نیاز، روشهای مدل‌سازی جریان، سازگاری و سادگی کاربرد در پروژه‌های عملی قابل مقایسه و بحث است. به‌طور کلی روشهای حوزه فرکانس در مقایسه با روشهای حوزه زمان از نظر تئوری ساده‌تر بوده و زمان و حجم محاسباتی کمتری دارند. از طرفی پاسخ فرکانسی سیستم با خطی‌سازی معادلات پیوستگی و مومتم و اعمال ضریب افت ثابت به دست می‌آید که این، باعث افزایش مسائل عدم قطعیت نتایج می‌شود. کاربرد روشهای فرکانسی تا به امروز بسیار محدود و فقط در سیستم‌های ساده قابل اجرا بوده و به انواع خاصی از شیرآلات با روشهای عملکرد ویژه وابسته هستند. شرایط مورد نیاز برای اجرای این روشها نیز از موارد مورد انتقاد محسوب می‌شود، زیرا برای دست یابی به فرکانسهای بالا لازم

3. Real Life Pipes

4. Method of Characteristics

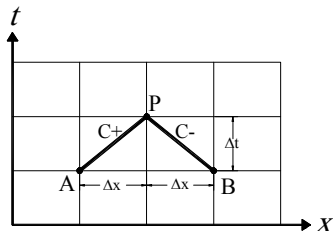
5. Mixed Integer Nonlinear Programming

6. Genetic Algorithms

1. Volume Balance Methods

2. Impulse Response Method

ضریب افت داری ویسباخ در لوله های در حال بهره‌برداری در حدود ۰/۰۱۵ تا ۰/۰۳ متغیر است (Mpesha et al., 2001, 2002).



شکل ۱ شبکه خطوط مشخصه مستقیم

۴- مدل سازی نشست در لوله

با توجه به ساختار منقطع سازی حل عددی جریان گذرا، در تحقیق حاضر اثر نشست در خط لوله بر روی گره‌های خطوط مشخصه بارگذاری می‌شود. اثر نشست تابعی از شکل روزنه نشست، مشخصات جریان گذرا، رقوم قرار گیری روزنه نشست و سطح آب زیرزمینی برای لوله های کار شده در زیر خاک در شهرهای ساحلی است. دبی خروجی از نشست را می‌توان با استفاده از رابطه روزنه مدل سازی کرد:

$$Q_L = Ae\sqrt{2g(H_L - Z_L)} \quad (11)$$

که در آن Q_L دبی نشست، $Ae = C_d A_L$ سطح مقطع مؤثر نشست، C_d ضریب دبی، A_L سطح مقطع معادل و H_L بلندی پیزومتریک لحظه‌ای جریان در محل روزنه نشست و Z_L رقوم ارتفاعی محل نشست نسبت به سطح مبنای محاسباتی است. معادله (۱۱) در کنار دو معادله مشخصه خطوط مثبت و منفی در گره‌های شامل نشست قرار گرفته و با حل همزمان این معادلات، مجهولات جریان در گره شامل نشست در هر گام زمانی تعیین می‌شود.

در لوله، A سطح مقطع لوله، D قطر لوله، g شتاب ثقل، f ضریب افت، x فاصله مکانی و t زمان است. در ادامه، برخی از پارامترهای فوق و عدم قطعیت‌هایی که در تخمین هر یک وجود دارد، بررسی می‌شوند.

۳- تحلیل مستقیم معادلات

با به‌کارگیری روش خطوط مشخصه برای حل معادلات دیفرانسیل جزئی پیوستگی و مومتم حاکم بر جریان گذرا و ترکیب خطی دو معادله مذکور، دو معادله دیفرانسیل کامل نتیجه می‌شود. با انتگرال‌گیری از معادلات به دست آمده در جهت خطوط مثبت AP با شیب $+1/a$ و خطوط منفی BP با شیب $-1/a$ مطابق شکل ۱، دو معادله صریح^۱ زیر به دست می‌آید (Chaudhry, 1987):

$$Q_P - Q_A + \frac{gA}{a}(H_P - H_A) + R \int_A^P Q|Q|dt = 0 \quad (3)$$

$$Q_P - Q_B + \frac{gA}{a}(H_P - H_B) + R \int_B^P Q|Q|dt = 0 \quad (4)$$

در معادلات فوق Q_A, Q_B, Q_P دبی لحظه‌ای جریان و H_A, H_B, H_P بلندای پیزومتریک لحظه‌ای جریان به ترتیب در نقاط A, B, P (شکل ۱) و $R = f/(2DA)$ ضریب مقاومت لوله است. معادله (۳) در امتداد خطوط مشخصه مثبت C^+ و معادله (۴) در امتداد خطوط مشخصه منفی C^- معتبر است. با منقطع سازی طولی لوله تحت مطالعه با گامهای مکانی Δx ، گامهای زمانی تحلیل مسأله نیز برابر $\Delta t = \Delta x/a$ خواهد بود. بسته به دقت مورد نیاز، تخمین ضریب افت f و در نتیجه ضریب R نیز می‌تواند بصورت ماندگار، شبه ماندگار^۲ و غیرماندگار در مدل‌سازی وارد شود. اهمیت و اثر ضریب افت در نتایج، تابعی از شرایط جریان و شدت نوسانهای جریان گذرا است. در هر حال به‌طور معمول

1. Explicit
2. Quasi-Steady

۵- معرفی روش تحلیل عقب گرد جریان

در مقاله حاضر روش نشت‌یابی مبتنی بر خصوصیات جریان گذرا و ماهیت رفت و برگشتی موج در طول لوله توسعه داده می‌شود. لذا ارتقای سطح دقت نتایج حاصل از مدل‌سازی و کاهش عدم قطعیت‌های مؤثر در آن، از مهمترین اهداف این روش محسوب می‌شود. علاوه بر مدل‌سازی پدیده افت اصطکاکی در لوله، مدل‌سازی رفتار شیر و اعمال شرایط اولیه نیز یکی از مهمترین عدم قطعیت‌های مدل‌سازی محسوب می‌شوند. مدل‌سازی عددی شیر مولد جریان گذرا، به‌ویژه در لوله‌های در حال بهره‌برداری (که معمولاً حاوی شیرهای فرسوده با بهره‌برداری دستی هستند) یکی از مهمترین منابع بروز خطا و غیرقطعی بودن نتایج حاصل از تحلیل جریان گذرا است. به‌عنوان مهمترین علل آن می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- ۱- مشخصه‌های هیدرولیکی شیر به‌شدت به شکل برقراری جریان در هندسه داخلی شیر وابسته است (Wylie and Streeter, 1993) و الگوی شکل‌گیری جریان در شیر بسیار پیچیده بوده و مدل‌های تئوری در این زمینه به‌ویژه برای شیرهای فرسوده با بهره‌برداری دستی ضعیف است (White, 2002).
- ۲- بر اساس نوع و عمر شیر، مدت زمان و روش بستن آن، مقداری اغتشاش و نوسانات با دامنه کوتاه در مدت بسته شدن شیر به‌وجود می‌آید که مدل‌سازی عددی این پدیده دشوار است.

۳- ضرایب افت در طول شیر معمولاً به‌طور آزمایشگاهی و برای گروهی از شیرهای خاص و نو معرفی شده است، حال آنکه در مطالعات نشت‌یابی با شیرهای فرسوده و با هندسه داخلی ناشناخته‌ای رو به رو هستیم. همچنین در جریان‌های گذرا مقدار این ضرایب افت، با زمان و میزان بازشدگی شیر تغییر می‌کند.

۴- به‌طور کلی ضرایب افت تخمین زده شده برای شیر وابسته به مشخصات هندسی و فیزیکی شیر است و با گذشت عمر، دچار تغییر می‌شوند. به‌طور کلی ضرایب افت پیشنهاد شده در مراجع برای مدل‌سازی شیر، عدم قطعیتی در حدود $\pm 50\%$ دارند (White, 2002).

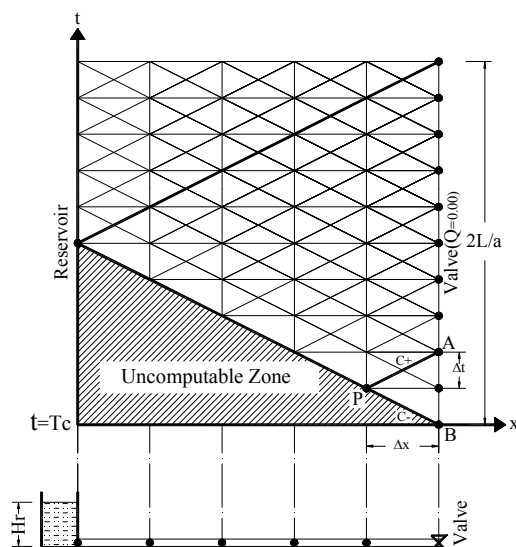
۵- در روش‌های عملی موجود برای مدل‌سازی شیر در جریان‌های گذرا (Chaudhry, 1987; Wylie and Streeter, 1993) برقراری جریان در شیر با استفاده از رابطه ماندگار روزنه مدل‌سازی می‌شود که این مسأله عدم قطعیت‌های ویژه خود را به نتایج تحمیل می‌کند.

۶- روش بستن شیر می‌تواند خطی، غیرخطی، نمایی، نوسانی و مانند آن فرض شود. اما در بستن دستی شیرهای فرسوده در لوله‌های در دست بهره‌برداری، هیچ یک از فرض‌های مذکور قطعی نیست. همچنین آهنگ بسته شدن شیر پارامتری بسیار غیر قطعی در شبیه‌سازی محسوب می‌شود که در مدل‌سازی‌های عددی معمولاً آن را یکنواخت در نظر می‌گیرند.

لذا می‌توان نتیجه گرفت که مدل‌سازی شیر مولد جریان گذرا بسیار غیرقطعی بوده و لذا نتایج تحلیل عددی و در نتیجه اعتبار روش‌های نشت‌یابی را به شدت تحت تأثیر قرار می‌دهد. یکی دیگر از عدم قطعیت‌های مهم در مدل‌سازی جریان گذرا، اعمال شرایط اولیه حاکم بر خط لوله است. در این تحقیق منظور از شرایط اولیه، شرایط جریان ماندگار قبل از انجام آزمایش نشت‌یابی و بستن شیر است. اعمال این شرایط اولیه شامل معرفی دبی ماندگار و مقدار فشار در گره‌های خطوط مشخصه نیز، به پدیدار شدن عدم قطعیت‌های دیگری منجر می‌شود.

بر اساس موارد یاد شده در زمینه نگرانی‌های ناشی از اثر عدم قطعیت‌ها در مدل‌سازی عددی، در ادامه روش جدیدی برای تحلیل جریان گذرا در خطوط لوله، بر پایه معادلات خطوط مشخصه و مقادیر نمونه برداری شده

مقایسه مقادیر محاسباتی مخزن با مقادیر مشاهداتی آن می‌تواند به عنوان معیار مناسبی برای شناسایی نشت در خط لوله مورد استفاده قرار گیرد که در ادامه به آن پرداخته می‌شود. اما نکته قابل توجه در این روش، مستقل‌سازی نتایج تحلیل از نوع شیر، روش و آهنگ بستن و سایر عدم قطعیت‌های ناشی از آن است، زیرا محاسبات جریان از زمانی آغاز می‌شود که شیر کاملاً بسته شده و نیازی به شبیه‌سازی رفتار آن وجود ندارد. همچنین همان‌طور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، یک منطقه جزئی غیرقابل محاسبه با طول زمانی حداکثر L/a نیز در شبکه خطوط مشخصه وجود دارد که خوشبختانه شرایط اولیه جریان نیز در این ناحیه قرار گرفته و به بیان دیگر شرایط اولیه نیز مانند شیر در محاسبات وارد نمی‌شود. از طرفی همچنین به دلیل عدم نیاز به مدل‌سازی شیر و اعمال شرایط اولیه، روش پیشنهادی قابلیت کاربرد از هر لحظه‌ای پس از بسته شدن کامل شیر را دارد که می‌توان با در نظر گرفتن یک مدت زمان مشخص پس از بسته شدن کامل شیر -که تمامی اغتشاشات بر روی سیگنال اندازه‌گیری حذف می‌شوند- محاسبات را انجام داد.



شکل ۲ شبکه خطوط مشخصه تحلیل عقب گرد

نوسانهای فشار در محل شیر انتهایی، توسعه داده می‌شود. همان‌طور که پیشتر ذکر شد مدل‌سازی عددی شیر و همچنین اعمال شرایط اولیه، از مهمترین پارامترهای غیرقطعی در تحلیل جریان گذرا است. به‌منظور حذف کامل این دو پارامتر از محاسبات، پس از ایجاد جریان گذرا در خط لوله با بستن شیر انتهایی، نوسانهای فشار در محل شیر پس از بسته شدن کامل آن نمونه برداری شده و در محاسبات مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این شرایط، گره محل شیر مانند نقطه‌ای کور^۱ در خط لوله رفتار می‌کند، زیرا دبی‌های لحظه‌ای جریان در آن محل، پس از بسته شدن کامل شیر برابر صفر است. در نتیجه شرایط مرزی مدل در انتهای خط لوله شامل تاریخچه زمانی نوسانهای فشار و دبی پس از بسته شدن کامل شیر معین است (به‌عنوان مثال در نقاط A و B در شکل ۲).

اکنون با به‌کارگیری روش خطوط مشخصه با تعریف خطوط نیمه‌ضمنی^۲ مثبت AP و خطوط منفی صریح BP می‌توان به تعیین مشخصه‌های جریان در لوله پرداخت (شکل ۲). در نتیجه دو مشخصه مجهول دبی و فشار در نقطه P با استفاده از معادلات خطوط مشخصه (۳) و (۴) و در صورت وجود نشت با شرکت رابطه روزنه (۱۱) به‌دست می‌آیند. سپس محاسبات جریان با جاروب عقب گرد لوله، ابتدا در هر گره در طول محور زمان و سپس در طول محور مکان قابل انجام است. در نهایت و برای یک بازه زمانی محاسباتی مشخص T_S (با توجه به طول زمانی مقادیر نمونه برداری شده) تعداد K سری محاسباتی مخزن در بالادست محاسبه می‌شود که K عبارت است از:

$$K = \frac{T_S - 2L/a}{\Delta t} \quad (12)$$

1. Dead-End
2. Semi-Implicit

۶- معرفی روش نشت یابی

با توجه به مطالبی که مطرح شد اکنون می توان به تشریح روش نشت یابی در خطوط لوله پرداخت. روش شناسایی نشت در این تحقیق بر پایه تعریف و تحلیل مسأله معکوس از خط لوله توسعه داده می شود. در این مسأله معکوس، مقادیر معلوم شامل مشخصات فیزیکی و هندسی خط لوله و مقادیر اندازه گیری فشار فقط در نقطه شیر انتهایی بوده و مجهولات عبارتند از پارامترهای مختلط نشت شامل متغیرهای صحیح تعداد و محل نشتی ها (با توجه به مقطع سازی خطوط مشخصه) و همچنین متغیرهای حقیقی اندازه نشت ها. اجزا و مراحل روش شناسایی نشت در این تحقیق به شرح زیر است:

۱- ایجاد جریان گذرا در خط لوله با بستن شیر انتهایی در مدت زمان مشخص. مدت زمان بستن شیر لازم است به اندازه کافی طولانی اختیار شود تا از وقوع موجهای نامطلوب مثبت و منفی ضربه قوچ و همچنین افزایش عدم قطعیت های ناشی از مدل سازی افت اصطکاک اجتناب شود.

۲- تاریخچه زمانی نوسانهای فشار فقط در محل شیر و پس از بسته شدن کامل آن برداشت می شود.

۳- مدل عددی جریان به صورت تابعی از پارامترهای مختلط مجهول نشت تشکیل داده می شود، به طوری که بلندای پیزومتریک در هر نقطه از خط لوله و همچنین مخزن بالادست (در تحلیل عقب گرد جریان) متناسب با پارامترهای نشت تعیین شود. به عنوان مثال برای بلندای مخزن بالادست داریم $Hr = \phi(nl, xl, Ae)$ که nl تعداد، xl محل و Ae مساحت نشت ها است.

۴- تابع هدفی با معیار کمینه سازی مقادیر محاسباتی و مشاهداتی بلندای پیزومتریک فقط در یک نقطه از خط لوله توسعه داده می شود که این تابع هدف متناسب با نوع تحلیل جریان انتخابی به یکی از دو شکل زیر است:

• برای تحلیل مستقیم جریان شامل مدل سازی شیر و اعمال شرایط اولیه:

$$C = \sqrt{\sum_{i=1}^n (Hv_i - Hv'_i)^2} \quad (13)$$

• برای تحلیل عقب گرد جریان مستقل از مدل سازی شیر و شرایط اولیه:

$$C = \sqrt{\sum_{i=1}^K (Hr_i - Hr'_i)^2} \quad (14)$$

که در این روابط Hv_i و Hv'_i به ترتیب مقادیر محاسباتی و مشاهداتی بلندای پیزومتریک در محل شیر انتهایی، Hr_i و Hr'_i به ترتیب مقادیر محاسباتی و مشاهداتی هد مخزن و n طول مقادیر اندازه گیری شده است. در تحقیق حاضر تابع هدف (۱۴) پیشنهاد می شود، زیرا به دلیل حذف شیر و شرایط اولیه از مدل سازی، به طور حتم نتایج حاصل از تحلیل جریان و سپس نشت یابی خط لوله، از درجه اعتبار بالاتری برخوردار خواهد بود.

۵- با توجه به نوع تابع هدف غیر خطی پیشنهاد شده و همچنین پارامترهای مجهول مختلط صحیح و حقیقی نشت - که متغیرهای تصمیم گیری در این مسأله به شمار می روند - می توان گفت با نوعی مسأله برنامه ریزی غیرخطی مختلط (MINLP) روبه رو هستیم. این نوع مسائل، جزو پیچیده ترین مسائل بهینه سازی محسوب می شوند. لذا لازم است که از ابزار بهینه سازی قوی مناسبی نیز در کنار معادلات جریان و مسأله برنامه ریزی تشریح شده استفاده شود. به این منظور در تحقیق حاضر روشی بر پایه الگوریتم ژنتیک برای کمینه سازی تابع هدف توسعه داده شده است. در نهایت مقدار کمینه تابع هدف برابر صفر، زمانی حاصل می شود که متغیرهای مجهول نشت به درستی یافته شوند.

۷- الگوریتم ژنتیک پیشنهادی

در تعریف کلی می‌توان گفت که الگوریتم ژنتیک (GA) نوعی روش بهینه‌سازی الهام گرفته از تکامل تدریجی و تصادفی در طبیعت است. کاربرد این روش در مسائل برنامه‌ریزی و بهینه‌سازی پیچیده به دلیل سادگی پیاده‌سازی و کاربرد آن بسیار مورد توجه مهندسان قرار گرفته است که می‌توان به مسائل MINLP اشاره کرد که جزو پیچیده‌ترین مسائل بهینه‌سازی به‌شمار می‌روند. روشهای ریاضی و کلاسیک گسترده‌ای در این زمینه وجود ندارد و همان تعداد محدود نیز بیشتر برای مسائل خطی کاربرد دارند. با پیروی از اصول کلی حاکم بر الگوریتم‌های ژنتیکی، الگوریتم بهینه‌سازی MINLP مناسبی برای حل مسأله معکوس نشت‌یابی در این تحقیق توسعه داده شده است. متغیرهای تصمیم‌گیری در مسأله نشت‌یابی، شامل متغیرهای صحیح تعداد و محل نشت و همچنین متغیرهای حقیقی مساحت نشت می‌شود که حدود پایین مساحت و محل نشت برابر صفر، حدود بالای مساحت نشت بر اساس یک فرض منطقی و به‌صورت درصدی از مساحت خط لوله و حد بالای متغیر محل نشت، برابر طول خط لوله فرض می‌شود. تعداد نشت و در نتیجه تعداد متغیرهای تصمیم‌گیری نیز جزو مجهولات مسأله است که این بر پیچیدگی مسأله MINLP حاضر می‌افزاید. به منظور برطرف کردن این مشکل در ابتدا فرض می‌شود که تعداد نشت در خط لوله برابر $nl \geq 2$ باشد.

تفاوت اصلی الگوریتم ژنتیک توسعه داده شده در این تحقیق نسبت به روشهای متداول، تعریف ساختار جدید کروموزومها^۱ و روش کدبرداری^۲ مختلط از آنها است. مجموعه متغیرهای تصمیم‌گیری کروموزوم نامیده می‌شود

که در آن هر متغیر تصمیم‌گیری با تعداد مشخصی ژن^۳ (بیت) با استفاده از اعداد باینری 0 و 1 تعریف می‌شود. کروموزومهای مختلط در مسأله نشت‌یابی را می‌توان به شکل زیر نشان داد:

$$\text{Chromosome} = \left[\overbrace{Ae_1, Ae_2, \dots, Ae_{nl}}^{\text{Leaks' Area}}, \overbrace{xl_1, xl_2, \dots, xl_{nl}}^{\text{Leaks' Location}} \right] =$$

$$\left[\overbrace{10011011}^{Ae_1}, \overbrace{\dots 1010011010}^{Ae_{nl}}, \overbrace{\dots 011}^{xl_1}, \overbrace{\dots 011}^{xl_{nl}} \right]$$

در طی فرایند کمینه‌سازی تابع هدف، از متغیرهای مساحت نشت به‌صورت پیوسته و از مقادیر محل نشت به‌صورت گسسته کدبرداری می‌شود. جزئیات کدبرداری از کروموزومها را می‌توان در مراجع مرتبط مانند Haupt (1998) یافت. نکته قابل توجه آنکه طول ژنهای معرف متغیرهای تصمیم‌گیری حقیقی مساحت نشت Ae با توجه به دقت مورد نیاز و طول ژنهای معرف متغیرهای صحیح محل نشت xl با توجه به تعداد گره‌های خطوط مشخصه در طول خط لوله تعیین می‌شود. به‌عنوان مثال اگر خط لوله‌ای شامل 8 گره خطوط مشخصه باشد، طول ژنهای xl برابر 3 در نظر گرفته می‌شود زیرا $2^3 = 8$ حالت محتمل است. در این روش گره‌های مخزن و شیر آنها از دامنه انتخاب کنار گذاشته می‌شوند. فرایند کمینه‌سازی تابع هدف با تولید جمعیت اولیه^۴، کدبرداری مختلط کروموزومها، تحلیل عددی جریان گذرا در خط لوله و محاسبه تابع هدف، تولید نسل^۵ با اعمال تبادل ژنی^۶ و جهش ژنی^۷ در الگوریتم ژنتیک دنبال می‌شود. مراحل به‌کارگیری الگوریتم یاد شده برای شناسایی پارامترهای نشت در خط لوله به شرح زیر است:

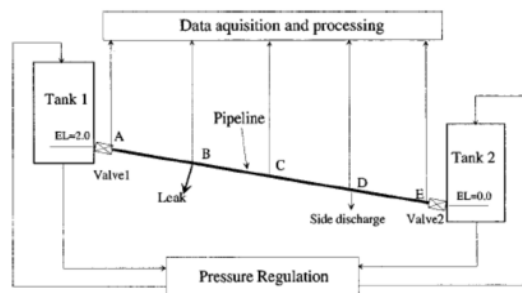
۱- ابتدا فرض می‌شود تعداد نشت در لوله برابر $nl \geq 2$ است.

3. Gen
4. Initial Population
5. Generation
6. Cross Over Operation
7. Mutation

1. Chromosome
2. Decoding

انتهایی خط لوله و یک شیر تنظیم دبی جانبی^۱ نیز در نقطه D نصب شده است. یک روزنه با تخلیه جانبی دبی برای مدل سازی نشت با مساحت مؤثر $C_d A_L = 5 \times 10^{-7} m^2$ در نقطه B قرار داده شده که فاصله این نقطه تا مخزن بالادست برابر $xl = L/4$ است. برای اطلاعات بیشتر می‌توانید به مقاله Vitkovsky et al. (2001) مراجعه کنید.

خصوصیات جریان در خط لوله به قرار زیر است: سرعت انتشار موج $a = 1320 m/s$ ، بلندای مخزن نخست $Hr_1 = 23.6 m$ ، بلندای مخزن دوم $Hr_2 = 22.8 m$ ، سرعت جریان ماندگار ابتدایی در خط لوله $V_0 = 0.567 m/s$ ، ضخامت جدار لوله برابر $e = 1.63 mm$ و دمای آب برابر $15.4^\circ C$.



شکل ۳ مدل آزمایشگاهی روپین (Vitkovsky et al. 2001)

برای انجام آزمایش، شیرهای تنظیم در نقاط A، D و E و همچنین نشت در نقطه B باز گذاشته شد تا جریان ماندگار برقرار شود. سپس شیر تنظیم در گره D برای ایجاد جریان گذرا بسته شده و در مدت برقراری جریان گذرا، نوسانهای فشار در گره های A تا D اندازه‌گیری می‌شود. در روش نشت‌یابی حاضر، فقط به داده‌های اندازه‌گیری در یک نقطه از خط لوله و پس از بسته شدن کامل شیر نیاز است که بدین منظور نوسانهای فشار در

۲- تابع هدف با استفاده از الگوریتم ژنتیک مختلط کمینه‌سازی می‌شود. (مقدار کمینه مطلق این تابع برابر صفر است)

۳- پارامترهای نشت به تعداد nl مساحت و nl محل نشت به دست آورده می‌شوند. چنانچه حداقل یکی از دو حالت زیر اتفاق بیافتد، روند نشت‌یابی به پایان رسیده و نتایج گام دو معتبر است.

الف- مساحت یک نشت برابر صفر شود.

ب- موقعیت دو نشت بر هم منطبق شود.

۴- چنانچه شرایط گام سوم تأمین نشود، با افزودن یک مقدار صحیح (حداقل برابر یک) به تعداد نشت در گام یک، بهینه‌سازی گام دو تا تأمین شرایط گام سه تکرار می‌شود.

در نهایت پارامترهای نشت با کمترین مقدار تابع هدف حاصل می‌شوند. کل فرایند یاد شده را می‌توان در یک گام و با تعداد نشت زیاد انجام داد یا با فرض دو نشت شروع کرد و گام به گام، روند شناسایی نشت را دنبال و بررسی کرد.

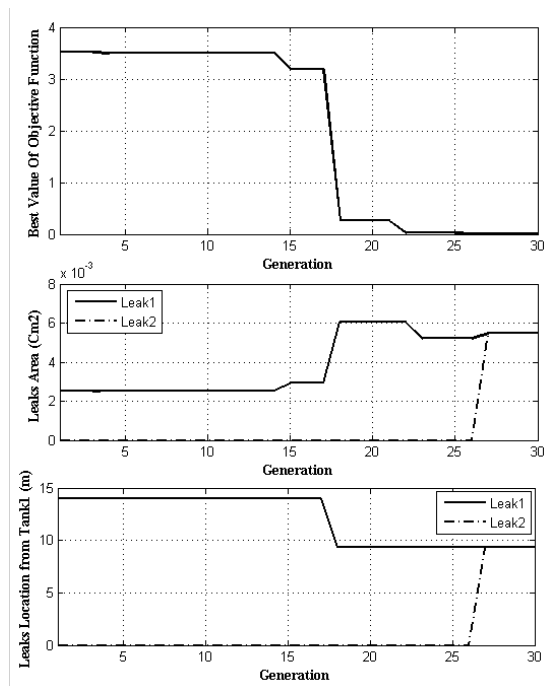
۸- صحت‌سنجی آزمایشگاهی

صحت‌سنجی آزمایشگاهی روش حاضر بر اساس سیستم تک لوله بر پا شده در آزمایشگاه هیدرولیک روپین در دانشگاه آدلاید استرالیا^۱ انجام می‌شود که این مدل آزمایشگاهی اساس بسیاری از تحقیقات در زمینه جریانهای گذرا و روشهای نشت‌یابی بوده است. این سیستم شامل لوله‌ای مستقیم به طول $L = 37.2 m$ از جنس مس است. قطر داخلی لوله $D = 22 mm$ بوده و این لوله بین دو مخزن تحت فشار مطابق شکل ۳ قرار گرفته است. در مجموع پنج فشارسنج در نقاط A تا E در نظر گرفته شده است. همچنین دو شیر کنترل در نقاط

2. Side-Discharge Valve

1. Robin Hydraulics Laboratory at the Univ. of Adelaide.

یک مقدار همگرا شده‌اند و این بدان معنا است که خط لوله فقط حاوی یک نشت است.



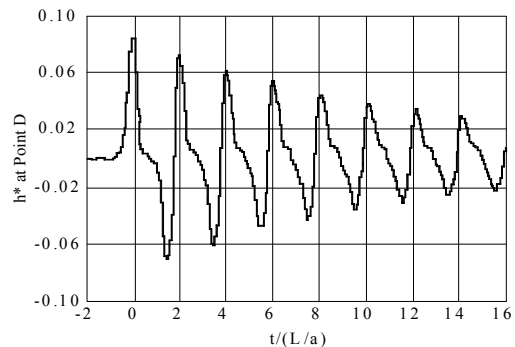
شکل ۵ فرایند بهینه‌سازی و تعیین پارامترهای نشت در روش حاضر برای مدل آزمایشگاهی

محل نشت به‌طور دقیق در فاصله $x_l = 9.3m$ نسبت به مخزن نخست و مساحت نشت نیز برابر $Ae_l = 0.0054cm^2$ به‌دست آمده است. مساحت نشت نسبت به مقدار دقیق آن در آزمایش با 8% خطا همراه است که این خطا با توجه به عواملی مانند عدم قطعیت‌های مدل‌سازی آزمایشگاهی، اندازه‌گیری‌ها، مدل‌سازی عددی، فرایند بهینه‌سازی و مانند آن قابل توجیه است.

۹- مثالهای تئوری

در این بخش به‌منظور نشان دادن توانایی روش پیشنهادی در شناسایی نشت خطوط لوله در شرایط مختلف، دو مثال

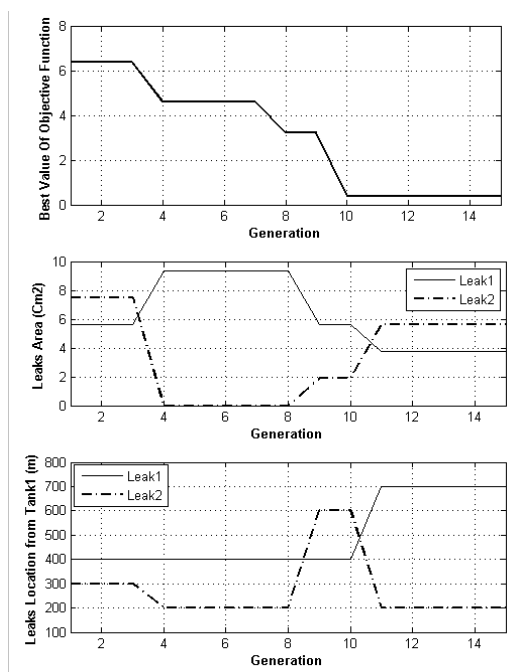
نقطه D (محل نصب شیر) واقع در فاصله سه چهارم طول لوله نسبت به مخزن یک، در این صحت‌سنجی مورد استفاده قرار خواهند گرفت. نوسانهای اندازه‌گیری شده فشار در گره D مطابق شکل ۴ است.



شکل ۴ نوسانهای فشار اندازه‌گیری شده در نقطه D

منظور از h^* در شکل ۴ نوسانهای بدون بعد بلندای پیرومتریک است که از رابطه $h_j^* = (H_j - H_0) / Hr_1$ به‌دست می‌آید. در این رابطه H_0 و H_j به ترتیب بلندای لحظه‌ای و ماندگار جریان در گره D است. مدل عددی این خط لوله نیز با در نظر گرفتن $\Delta x = 4.65m$ و $\Delta t = 0.00352s$ و به‌صورت تابعی از پارامترهای نشت توسعه داده شد. با توجه به ساختار تعریف این مدل آزمایشگاهی به ناچار می‌توان از تابع هدف رابطه (۱۳) استفاده کرد که در آن به کمینه‌سازی مقادیر محاسباتی و مشاهداتی بلندای نقطه D پرداخته می‌شود. در ابتدای کار بدون آگاهی از پارامترهای مجهول نشت فرض می‌شود که دو نشت در لوله وجود داشته باشد. لذا متغیرهای تصمیم‌گیری شامل دو متغیر صحیح محل نشت و دو متغیر حقیقی اندازه نشت است. پس از اجرای روش با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی تشریح شده، پس از تولید 27 نسل در الگوریتم ژنتیک پاسخهای مسأله همگرا شد و مقدار نهایی تابع هدف برابر 0.0025 به‌دست آمد. در شکل ۵ ملاحظه می‌شود که محل دو نشت فرض شده به

• گام نخست: تعداد نشت‌ها در لوله مشخص نیست، لذا می‌توان با فرض تعداد نشت بیش از دو محاسبه را شروع کرد. در این گام فرض می‌شود که لوله حاوی دو نشت است. لذا متغیرهای تصمیم‌گیری، دو متغیر صحیح برای تعداد محل نشت و دو متغیر حقیقی برای مساحت نشت‌ها است. نتایج کمینه‌سازی تابع هدف در این گام مطابق شکل ۶ است. مطابق این شکل مقدار کمینه تابع هدف پس از ۱۵ نسل و برابر ۰.۳۶ به دست می‌آید.



شکل ۶ فرایند بهینه‌سازی و تعیین پارامترهای نشت در روش ما برای مثال ۱ گام نخست

• گام دوم: از گام نخست نمی‌توان نتیجه‌گیری کرد که تعداد نشت‌ها در خط لوله برابر دو یا بیشتر است. لذا در گام دوم با فرض سه نشت در خط لوله، محاسبات نشت‌یابی بار دیگر تکرار می‌شود. شکل ۷ نتایج فرایند بهینه‌سازی در این گام را پس از ۵۰ نسل نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل ملاحظه می‌شود یکی از سه نشت فرضی، در نهایت مساحتی برابر صفر دارند که این

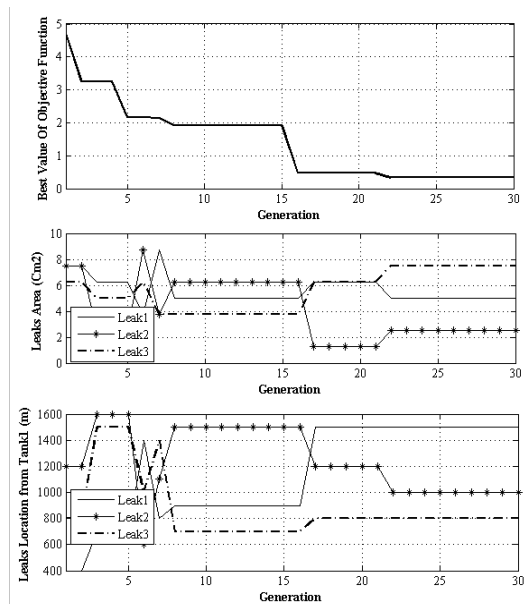
تئوری شامل سیستم‌های مخزن، لوله و شیر با نشت‌های فرضی تعریف می‌شود. در ابتدا با بستن شیر و ایجاد جریان گذرا و تحلیل جریان به روش مستقیم خطوط مشخصه، به نمونه‌برداری از نوسانهای فشار با فرکانس f_s پس از بسته شدن کامل شیر و فقط در محل شیر پرداخته می‌شود. با کمینه‌سازی تابع هدف (۱۴) بر اساس تعریف مسأله معکوس خطوط با به‌کارگیری روش تحلیل عقب‌گرد جریان گذرای مستقل از مدل‌سازی شیر و با اعمال شرایط اولیه به تعیین پارامترهای نشت پرداخته می‌شود. در هر دو مثال به منظور جلوگیری از وقوع فشارهای نامطلوب مثبت و منفی ضربه قوچ و کاهش عدم قطعیت‌های مدل‌سازی مانند افت اصطکاک غیرماندگار، جریان گذرای ملایم با بستن شیر در مدت زمان $T_c = 16L/a$ ثانیه ایجاد می‌شود. مشخصات الگوریتم ژنتیک مورد استفاده در این دو مثال به قرار زیر است: جمعیت اولیه شامل ۸۰ کروموزوم، جمعیت هر نسل برابر ۲۰ کروموزوم، تبادل ژنی از نوع یکنواخت، ضریب جهش ژنی متغیر خطی از ۰.۵ در جمعیت اولیه تا ۰.۰۰۱ در آخرین نسل، حداکثر تولید نسل برابر ۵۰۰.

مثال ۱- لوله شامل دو نشت

در این مثال هدف تعیین نشت در لوله‌ای افقی به طول $L = 900m$ ، قطر $D = 500mm$ ، ضریب افت $f = 0.02$ ، سرعت انتشار موج $a = 1000m/s$ و با ارتفاع مخزن بالادست برابر $Hr = 25m$ است. در این لوله دو نشت در فواصل $xl_1 = 200m$ و $xl_2 = 700m$ نسبت به مخزن بالادست، با سطح مقطع معادل و مؤثر $Ae_1 = 5.25cm^2$ و $Ae_2 = 3.5cm^2$ قرار دارند. پس از ایجاد جریان گذرا، نمونه‌برداری از نوسانهای فشار با فرکانس پایین $f_s = 10Hz$ و در مدت زمان $T_s = 60s$ انجام شده است. حل این مثال در دو گام به شرح زیر انجام می‌شود:

$xl_4 = 1400m$ و $xl_3 = 1200m$ ، $xl_2 = 800m$ نسبت به مخزن با سطح مقطع معادل و موثر $Ae_3 = 3.75cm^2$ ، $Ae_2 = 1.3cm^2$ ، $Ae_1 = 3.2cm^2$ و $Ae_4 = 4.9cm^2$ قرار دارند. پس از ایجاد جریان گذرا، نمونه برداری از نوسانهای فشار با فرکانس $f_s = 10Hz$ و در مدت زمان $T_s = 60s$ انجام شده است. در نشت یابی این مسأله فرض آن است که ضریب افت طولی لوله نیز نامشخص است و لذا این ضریب نیز به عنوان یکی دیگر از متغیرهای حقیقی مجهول به سایر متغیرهای تصمیم گیری مسأله (پارامترهای نشت) افزوده می شود. حل این مثال نیز در سه گام به شرح زیر دنبال می شود.

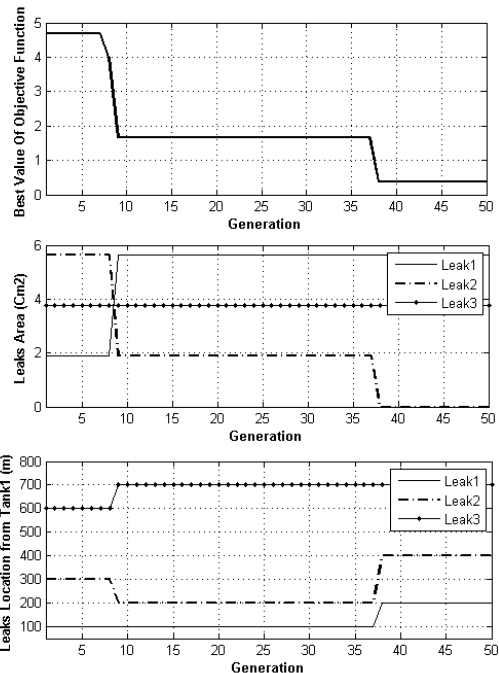
• گام نخست: در این گام روش پیشنهادی با فرض وجود سه نشت دنبال می شود. نتایج حاصل در این گام مطابق شکل ۸ است. مقدار تابع هدف پس از ۳۰ نسل برابر ۰.۳۸ و مقدار ضریب افت برابر ۰.۰۲۹۴ به دست آمده است.



شکل ۷ فرایند بهینه سازی و تعیین پارامترهای نشت در روش

حاضر برای مثال ۲ گام نخست

به آن معنا است که در لوله فقط دو نشت وجود دارد و نتایج گام قبل معتبر است. در این گام نشت های یک و سه پاسخ مسأله است که مقادیر آنها با جدول ۱ مطابقت دارد.



شکل ۷ فرایند بهینه سازی و تعیین پارامترهای نشت در روش حاضر برای مثال ۱ گام دوم

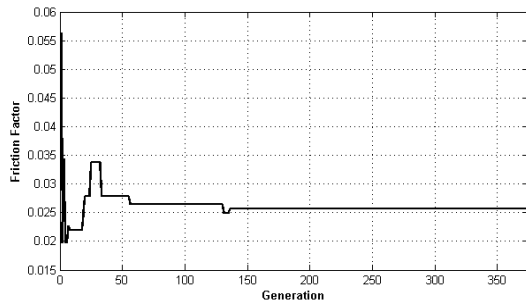
جدول ۱ نتایج فرایند نشت یابی در مثال ۱

خطای مساحت %	مساحت نشت (Cm2)	خطای موقعیت %	موقعیت نشت (متر) از مخزن بالادست)
6.67%	3.75	0.00%	700
7.2%	5.63	0.00%	200

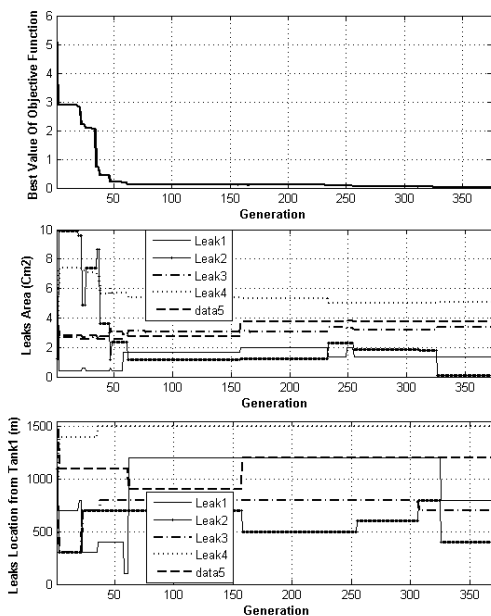
مثال ۲- کالیبره کردن و نشت یابی همزمان

در این مثال هدف تعیین نشت در لوله ای افقی به طول $L = 1700m$ ، قطر $D = 400mm$ ، ضریب افت $f = 0.025$ ، سرعت انتشار موج $a = 1000m/s$ و ارتفاع مخزن بالادست برابر $Hr = 30m$ است. در این لوله چهار نشت در فواصل $xl_1 = 700m$

می‌دهند. تابع هدف در نهایت پس از 375 نسل برابر 0.02 و مقدار ضریب افت برابر 0.0256 به دست می‌آید.



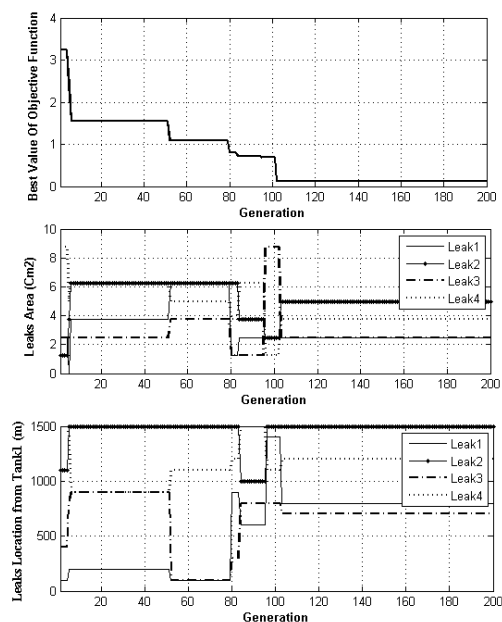
شکل ۹ فرایند بهینه‌سازی و کالیبره کردن خط لوله برای ضریب افت در گام سوم



شکل ۱۰ فرایند بهینه‌سازی و تعیین پارامترهای نشت در روش حاضر برای مثال ۲ گام سوم

با بررسی شکل ۱۰ ملاحظه می‌شود که یکی از پنج نشت فرضی مساحت نشتی برابر صفر دارد که این به معنای وجود چهار نشت در خط لوله است. نتایج بهینه‌سازی در جدول ۲ ملاحظه می‌شود.

گام دوم: همان‌طور که در نتایج به دست آمده از گام قبل مشاهده می‌شود نمی‌توان در خصوص پارامترهای نشت با اطمینان اظهار نظر کرد. لذا روش نشت‌یابی، بار دیگر و این بار با فرض چهار نشت به کار گرفته می‌شود. شکل ۸ روند تکاملی الگوریتم ژنتیک را در گام دوم نشان می‌دهد. حداقل مقدار تابع هدف پس از 200 نسل برابر 0.12 و مقدار ضریب افت برابر 0.0261 به دست آمده است.



شکل ۸ فرایند بهینه‌سازی و تعیین پارامترهای نشت در روش حاضر برای مثال ۲ گام دوم

گام سوم: هر چند مقدار تابع هدف در گام دوم به مقدار کمتری نسبت به گام نخست رسید، اما همچنان با توجه به اینکه هیچ یک از متغیرهای مساحت نشت برابر صفر یا متغیرهای محل نشت تکراری به دست نیامد و از این گام نیز به‌طور قطعی نمی‌توان نتیجه‌گیری کرد، لذا گام سوم با فرض پنج نشت در خط لوله دنبال می‌شود. شکل‌های ۹ و ۱۰ نتایج به کارگیری روش نشت‌یابی در گام سوم را نشان

با بررسی مثالها ملاحظه می‌شود که روش حاضر به خوبی می‌تواند به تعیین پارامترهای نشت در خطوط لوله بزرگ مقیاس با تعداد نشت زیاد و حتی فرکانس نمونه‌برداری پایین بپردازد. در این مقاله به دو عدم قطعیت مهم و تأثیرگذار در نتایج تحلیل عددی به‌طور خاص پرداخته شد. با معرفی روش جدید تحلیل عقب‌گرد جریان گذرا، مدل عددی مستقل از نوع شیر، روش و مدت زمان بستن آن و همچنین بدون نیاز به تعریف شرایط اولیه توسعه داده شد. با توجه به عدم نیاز به تجهیزات پیشرفته‌ای برای انجام آزمایش (مانند شیرهای الکترونیکی خاص یا فشارسنجهای پیشرفته با فرکانس بالا)، این روش از دید کاربردی بودن، مناسب و کم هزینه ارزیابی می‌شود. البته برای قضاوت دقیق‌تر در این خصوص، به انجام آزمایشهای عملی نیاز است. همچنین با استفاده از این روش امکان کالیبره کردن خط لوله برای ضریب زبری، همزمان با نشت‌یابی وجود دارد. با توجه به این موضوع که روش تحلیل جریان در حوزه زمان و با استفاده از روش بسیار معمول و توسعه یافته خطوط مشخصه انجام می‌شود می‌توان گفت که روش پیشنهادی، برای خطوط لوله پیچیده‌تر و همچنین شبکه‌های آبرسانی نیز قابل توسعه است. در کنار نکات مثبت روش، لازم است به محدودیت‌هایی مانند حجم بالای محاسباتی روش و همچنین فرض اعمال نشت بر روی گره‌های خطوط مشخصه اشاره کرد که این مسأله امکان تعیین دقیق محل نشت را در خطوط لوله در دست بهره‌برداری با کمی دشواری روبه‌رو می‌سازد؛ هرچند با نمونه‌برداری از مقادیر فشار با فرکانس بالا می‌توان این محدودیت را تا حد زیادی برطرف ساخت. به بیان دیگر هر چه فرکانس نمونه‌برداری از نوسانهای فشار در محل شیر انتها بزرگتر انتخاب شود، امکان تحلیل جریان و حل مسأله با شبکه‌بندی ریزتری وجود دارد که این بدان معنا است که

همچنین ملاحظه می‌شود که درصد خطای ضریب افت برابر 2.4% است. همچنین فرایند تکامل کالیبره کردن خط لوله به‌طور همزمان با نشت‌یابی در گام سوم در شکل ۹ قابل ملاحظه می‌باشد.

جدول ۲ نتایج فرایند نشت‌یابی در مثال ۲

خطای (متر از مخزن بالادست)	خطای موقعیت %	مساحت نشت (Cm ²)	خطای موقعیت %
700	0.00%	3.36	5.00%
800	0.00%	1.29	0.77%
1200	0.00%	3.75	0.00%
1500	0.00%	5.08	3.67%

بنابراین ملاحظه می‌شود که روش به خوبی توانایی شناسایی نشت و کالیبره کردن خطوط لوله با تعداد نشت زیاد و فرکانس نمونه‌برداری پایین را دارد، به طوری که تعداد و محل نشت بدون هیچ خطایی محاسبه شده و مساحت نشت و ضریب افت داخلی خط لوله نیز با درصد خطای قابل قبولی تعیین می‌شود. این درصد خطا در مثالهای تئوری بیشتر به فرکانس نمونه‌برداری پایین در نظر گرفته شده باز می‌گردد. بدیهی است که هرچه فرکانس برداشت داده‌های فشار بیشتر باشد، نتایج نیز از دقت بالاتری برخوردار خواهند بود. همچنین می‌توان این مثال را از همان ابتدا با فرض تعداد نشت زیاد (برای مثال پنج یا شش نشت) فقط در یک گام تحلیل کرد.

۱۰- نتیجه‌گیری

در این مقاله روشی برای شناسایی نشت در خطوط لوله بر پایه مدل‌سازی معکوس جریان گذرا، تعریف یک مسأله برنامه‌ریزی غیرخطی مختلط و به‌کارگیری الگوریتم ژنتیک معرفی شد. صحت‌سنجی روش و قابلیت کاربرد آن با حل یک مثال عملی و دو مثال تئوری نشان داده شد.

Δt گام زمانی
 Δx گام مکانی

متغیر محل نشت و لذا اندازه آن، با دقت بیشتری قابل شناسایی است.

۱۳- منابع

Brunone, B. (1999). Transient test-based technique for leak detection in outfall pipes. *Journal of Water Resource Planning and Management*, ASCE. 125(5) pp.302–306.

Chaudhry, M. H. (1987). *Applied hydraulic transients*, 2nd Ed., Litton Educational/Van Nostrand Reinhold Co., New York.

Covas, D., Ramos, H., and Almeida, A.B. (2005). Standing wave difference method for leak detection in pipeline systems. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE. 131(12) pp.1106–1116.

Haupt, S.L., and Haupt, S.E. (1998). *Practical genetic algorithms*, 1st Ed., A Wiley., Interscience Publication.

Jonsson, L. (1995). Leak detection in pipelines using hydraulic transients. Laboratory measurements. Report, University of Lund, Lund, Sweden.

Kim, S.H. (2005). Extensive development of leak detection algorithm by impulse response method. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE. 131(3) pp. 201–208.

Liggett, J.A., and Chen, L.C. (1994). Inverse transient analysis in pipe networks. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE. 120(8) pp. 934-954.

Lee, P.J., Vítkovský, J.P., Lambert, M.F., Simpson, A.R., and Liggett, J.A. (2005). Frequency domain analysis for detecting pipeline leaks. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE. 131(7) pp. 596–604.

Lee, P.J., Lambert, M.F., Simpson, A.R., Vítkovský, J.P., and Liggett, J.A. (2007). Experimental verification of the frequency response method for pipeline leak detection.

۱۲- فهرست علائم

A	سطح مقطع لوله
A_e	سطح مقطع مؤثر نشت
$(A_e)_i$	سطح مقطع مؤثر نشت در گره i
A_L	سطح مقطع ظاهری نشت
a	سرعت موج
C	مقدار تابع هدف
C_d	ضریب دبی
D	قطر لوله
f	ضریب افت داری ویسباخ
fr_s	فرکانس نمونه برداری
g	شتاب ثقل
H, H_A, H_B, H_P	بلندای پیژومتریک لحظه‌ای جریان
H_L	بلندای پیژومتریک در محل نشت
Hr	بلندای پیژومتریک محاسباتی مخزن
Hr'	بلندای پیژومتریک مشاهده‌ای مخزن
Hv_i	بلندای پیژومتریک محاسباتی در محل شیر
Hv'_i	بلندای پیژومتریک مشاهده‌ای در محل شیر
h_j^*	نوسانهای بدون بعد هد
K	تعداد سر محاسباتی مخزن
L	طول لوله
n	طول گسسته زمان مدل‌سازی جریان گذرا
Q, Q_A, Q_B, Q_P	دبی لحظه‌ای جریان
Q_L	دبی نشت
t	زمان
T_C	مدت زمان بسته شدن شیر
T_S	مدت زمان نمونه برداری از نوسانهای فشار
x	فاصله مکانی در طول لوله
x_l	فاصله نشت نسبت به مخزن بالادست
Z_L	رقوم نقطه نشت نسبت به سطح مبنا

- Nixon, W., and Ghidaoui, M.S. (2007). Numerical sensitivity study of unsteady friction in simple systems with external flows. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*. 133(7) pp. 736–749.
- Pudar, R.S., and Liggett, J.A. (1992). Leaks in pipe networks. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*. 118(7) pp. 1031–1046.
- Vitkovsky, J. P., Simpson, A. R., and Lambert, M. F. (2000). Leak detection, calibration using transients genetic algorithms. *Journal of Water Resource Planning and Management, ASCE*. 126 (4) pp. 262–265.
- Vitkovsky J.P; Liggett J.A; Simpson A.R, and Lambert M.F (2003). Optimal measurement site locations for inverse transient analysis in pipe networks. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*. 129(6) pp. 480–492.
- Wang, X.J., Lambert, M.F., Simpson, A.R., Liggett, J.A., and Vitkovsky, J.P. (2002). Leak detection in pipelines using the damping of fluid transients. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*. 128(7) pp. 697–711.
- White, F.M. (2002). *Fluid mechanics*. 5th Ed., McGraw-Hill, New York.
- Wylie, E.B., and Streeter, V.L. (1993). *Fluid transient in systems*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, N.J.
- Journal of Hydraulic Research, IAHR*. 44 pp. 693–707.
- Liou, C. P., Brockway, C. G., and Miller, R. B. (1992). Pipeline variable uncertainties and their effect on leak detectability. 1992 API Pipeline Cybernetics Symposium. American Petroleum Institute, pp. 127–149.
- Mpesha, W., Chaudhry, M. H., and Gassman, S. L. (2002). Leak detection in pipes by frequency response method using a step excitation. *Journal of Hydraulic Research, IAHR*. 40(1) pp. 55–62.
- Mpesha, W., Gassman, S. L., and Chaudhry, M. H. (2001). Leak detection in pipes by frequency response method. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*. 127(2) pp. 134–147.
- Nash, G. A., Karney, B. W. (1999). Efficient inverse transient analysis in serie pipe systems. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*. 125 (7) pp. 761–764.
- Nicholas, R.E., 1990. Leak detection in pipelines in unsteady flow. Winter Annual Meeting of ASME, Nov 25-30 1990, 102 pp. 23-25.