

## واسنجی چندمعیاره خطوط لوله برای جریان‌های گذرا

علی حقیقی

استادیار، گروه عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه شهید چمران اهواز

اهواز، دانشگاه شهید چمران

a.haghighi@scu.ac.ir

**چکیده-** دو معادله دیفرانسیل مشتقات جزئی بقای جرم و بقای مومتم برای توصیف رفتار جریان گذرا در لوله‌ها به کار می‌رود و برای تحلیل آنها از روش خطوط مشخصه استفاده می‌شود. این نوع مدل‌سازی چند پارامتر غیرقطعی دارد که باید به‌طور دقیق تعیین شوند؛ مانند زبری جدار لوله، اثر نوسانی ضریب افت گذرا و سرعت انتشار موج. در این تحقیق به معرفی روشی برای واسنجی پارامترهای بالا پرداخته می‌شود. با بستن شیر انتهایی در خط لوله، جریان گذرا تولید شده و سپس نوسانهای فشار فقط در محل شیر اندازه‌گیری می‌شود. همچنین نوعی مدل عددی تحلیل جریان غیرماندگار در خط لوله توسعه داده می‌شود که در آن ضرایب تعدیلی برای اصلاح زبری لوله، عبارت‌های شتاب محلی و جابه‌جایی در مدل افت گذرا و سرعت موج تعریف شده است. این ضرایب در واقع متغیرهای تصمیم‌گیری نوعی مسأله برنامه‌ریزی غیرخطی برای هیدرولیک جریان هستند. تابع هدف عبارت است از مجموع مربعات اختلاف بین مقادیر اندازه‌گیری و محاسبه شده فشار در محل شیر انتهایی. با به‌کارگیری الگوریتم ژنتیک ساده، تابع هدف را کمینه‌سازی کرده و ضرایب تعدیل بهینه به دست آمده‌اند. قابلیت روش پیشنهادی با تحلیل یک مدل آزمایشگاهی مرجع، صحت‌سنجی و ارزیابی شده است. نتایج رضایت‌بخش بوده و نشان‌دهنده توانمندی و سهولت به‌کارگیری این روش است.

**کلید واژگان:** واسنجی، خطوط لوله، جریان گذرا، خطوط مشخصه.

### ۱- مقدمه

سازه و سیال برخی از مشکلات حاصل است. در مدل‌سازی جریان گذرا، معادلات دیفرانسیل جزئی پیوستگی و مومتم به روش عددی خطوط مشخصه، منقطع‌سازی و تحلیل می‌شوند. در این کار عدم قطعیت زیادی در تخمین پارامترهای ضریب زبری لوله، مدل‌سازی افت اصطکاک و سرعت انتشار موج وجود دارد. برای خطوط لوله در دست بهره‌برداری و فرسوده،

جریان‌های گذرا در خطوط لوله بر اثر باز یا بسته شدن شیرهای کنترل، توقف یا راه‌اندازی پمپ‌ها یا هر عامل دیگری که سبب تغییر ناگهانی در شرایط ماندگار جریان شود، به‌وجود می‌آیند. ایجاد جریان گذرا در بسیاری از موارد نامطلوب محسوب می‌شود. ایجاد فشارهای مخرب ضربه قوچ، کاویتاسیون و جدایی ستون سیال و اندرکنش

عدم قطعیتها بسیار بالاتر است. لذا ضروری است که در تمامی مدل‌سازی‌های جریان گذرا، پیش از هرچیز به افزایش دقت مشخصه‌های نام برده پرداخته شود. در سالهای اخیر روشهای متنوعی برای واسنجی خطوط لوله بر پایه مدل‌سازی جریان گذرا توسعه داده شده که در آنها از ویژگیهای انتشار موج استفاده می‌شود (Liggett and Chen 1994). بر اثر رفت و برگشت موج در لوله، سیگنال‌های نوسان فشار در تمامی نقاط حاوی اطلاعات فراوانی از کل مسیر در هر دو حوزه زمان و مکان است. ارزشمندی این اطلاعات با شدت جریان تولید شده رابطه‌ای مستقیم دارد. بر این اساس با مطالعه سیگنال نوسان جریان گذرا فقط در یک نقطه از لوله می‌توان به نقشه‌برداری از کل مسیر پرداخت. برای این منظور روشهایی توسعه داده شده که در آنها با مدل‌سازی عددی جریان و مقایسه نتایج محاسبات با نتایج مشاهدات، به واسنجی و در مواردی شناسایی نشت در خطوط لوله پرداخته شده است.

Liggett and Chen در سال ۱۹۹۴ مطالعات وسیعی را در زمینه توسعه نظری روشهای واسنجی خطوط لوله در شبکه‌های آبرسانی بر اساس تعریف و تحلیل معکوس جریان گذرا ارائه کردند. در آن تحقیق منظور از واسنجی، تعیین ضرایب افت ماندگار و نشت در سیستم بود. در روش نام برده شده، با تعریف تابع هدف با معیار کمینه‌سازی مرجع اختلاف میان مقادیر محاسبه و مشاهده شده فشار در نقاطی از سیستم آبرسانی، به تعیین مجهولات مسأله پرداخته می‌شود. مسأله بهینه‌سازی غیرخطی در آن تحقیق، با استفاده از روش لونیبرگ مارکوورت<sup>۱</sup> (LM) حل شده است. Vitkovsky و دیگران در سال ۲۰۰۰ با بهره‌گیری از کار پیشین، تحقیقی را برای

واسنجی ضرایب افت ماندگار و تعیین نشت در شبکه‌های توزیع آب بر پایه تحلیل معکوس جریان گذرا و روش بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک<sup>۲</sup> (GA) ارائه کردند.

Kapelan و دیگران در سال ۲۰۰۳ مقاله‌ای را با موضوع شناسایی نشت و واسنجی ضرایب افت ماندگار در خطوط لوله با تعریف نوعی مسأله برنامه‌ریزی غیرخطی مخلوط ارائه کردند. روش آنان در ادامه و برای ارتقای روشهای پیشین بود؛ با این تفاوت که از روش بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک در کنار روش لونیبرگ مارکوورت به صورت مخلوط استفاده کردند. شاملو و حقیقی در سال ۲۰۰۹ روشی را با عنوان تحلیل عقب‌گرد جریان گذرا در خطوط لوله توسعه دادند که در آن به تعیین نشت و واسنجی ضرایب افت ماندگار پرداخته شده بود. در کار آنان از روش برنامه‌ریزی دنباله‌وار درجه دو<sup>۳</sup> (SQP) برای حل مسأله استفاده شده بود. مقالات متعدد دیگری را نیز می‌توان نام برد که فقط به افزایش دقت مدل شبیه‌سازی افت اصطکاک گذرا در خطوط لوله پرداخته‌اند. (Zielke 1968; Vardy et al. 1993; Brunone et al. 1995; Bergant et al. 2001)

تحقیق حاضر نیز در چارچوب روشهای تحلیل معکوس جریان گذرا، به توسعه روشی برای واسنجی چندمعیاره خطوط لوله می‌پردازد و در آن به افزایش دقت ضرایب افت ماندگار، مدل اصطکاک گذرا و سرعت انتشار موج به صورت همزمان می‌پردازد.

## ۲- معادلات حاکم

معادلات بقای جرم و مومتم در خطوط لوله، رفتار جریان را توصیف می‌کنند. این معادلات با در نظر گرفتن حجم کنترل و با به‌کارگیری نظریه انتقالی رینولدز قابل استخراج

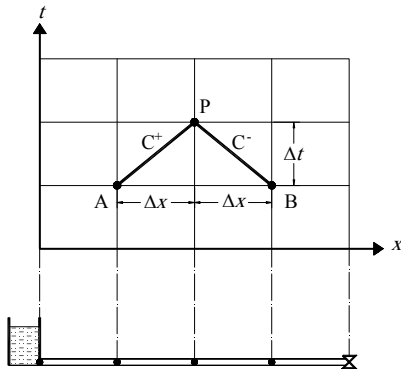
2. Genetic Algorithms (GA)

3. Sequential Quadratic Programming (SQP)

1. Levenberg-Marquardt (LM)

$$Q_P - Q_A + \frac{gA}{a}(H_P - H_A) + R \int_A^P Q|Q| dt = 0 \quad (۳)$$

$$Q_P - Q_B - \frac{gA}{a}(H_P - H_B) + R \int_B^P Q|Q| dt = 0 \quad (۴)$$



شکل ۱ شبکه بندی خطوط مشخصه

در این معادلات  $Q_P$  و  $Q_B$ ،  $Q_A$  به ترتیب دبی لحظه‌ای جریان و  $H_P$  و  $H_B$ ،  $H_A$  به ترتیب هد پیزومتریک لحظه‌ای در نقاط  $P$  و  $B$ ،  $A$  (شکل ۱) بوده و همچنین  $R = f/2DA$  می‌باشد. معادله (۳) در امتداد خطوط مشخصه مثبت  $C^+$  و معادله (۴) در امتداد خطوط مشخصه منفی  $C^-$  معتبر است. با منقطع‌سازی طولی لوله با گامهای مکانی  $\Delta x$ ، گامهای زمانی تحلیل مسأله نیز برابر  $\Delta t = \Delta x/a$  خواهد بود. این بدان معنی است که عدد کورانت  $^3(CN = a\Delta t/\Delta x)$  در محاسبات عددی حاضر برابر واحد است. اکنون با تعریف شرایط اولیه جریان و همچنین شرایط مرزی مسأله مورد نظر، از جمله مخزن در بالادست، شیر در پایین‌دست، تقاطع‌ها و غیره، می‌توان به تحلیل جریان گذرا در خطوط لوله پرداخت (Chaudhry 1987; Wylie and Streeter 1993).

بوده و در بسیاری از مراجع مانند Chaudhry(1987) و Wylie and Streeter (1993) جزئیات آن را می‌توان یافت.

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{a^2}{gA} \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (۱)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + gA \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{fQ|Q|}{2DA} = 0 \quad (۲)$$

در این روابط  $H=H(x,t)$  هد پیزومتریک لحظه‌ای،  $Q=Q(x,t)$  دبی لحظه‌ای جریان،  $a$  سرعت انتشار موج در لوله،  $A$  سطح مقطع لوله،  $D$  قطر لوله،  $g$  شتاب ثقل،  $f$  ضریب افت انرژی - که می‌تواند ماندگار، شبه‌ماندگار و یا غیرماندگار در نظر گرفته شود-  $x$  فاصله مکانی و  $t$  زمان است. در این میان برخی پارامترها وابسته به خصوصیات فیزیکی سیستم و سیال هستند، مانند سرعت انتشار موج و ضریب افت که یکی از مهمترین پارامترها بوده و در بسیاری از موارد با عدم قطعیت‌های بالایی در تخمین روبه‌رو هستند.

### ۳- روش تحلیل معادلات حاکم

معادلات حاکم بر جریان‌های گذرا در خطوط لوله پیش‌تر معرفی شد. همان‌طور که دیده می‌شود، این معادلات، دیفرانسیل جزئی، شبه‌خطی<sup>۱</sup> و از نوع هذلولی<sup>۲</sup> هستند (Chaudhry 1987). رایج‌ترین روش عددی برای تحلیل این معادلات، روش خطوط مشخصه است که در آن دو معادله حاکم به صورت خطی با یکدیگر ترکیب شده و به دو معادله دیفرانسیل کامل تبدیل می‌شوند. از معادلات به‌دست آمده در صفحه مختصات  $x-t$  (شکل ۱) و در جهت شیب‌های  $\pm 1/a$  انتگرال‌گیری و بر اساس آن معادلات زیر حاصل می‌شود:

## ۳-۱- عبارت افت اصطکاک

عبارت  $R \int Q|Q|dt$  را می‌توان بحث برانگیزترین عبارت در تحلیل جریان گذرا در خطوط لوله دانست که اعتمادپذیری نتایج را به‌طور معناداری تحت تأثیر قرار می‌دهد. این موضوع به‌ویژه در لوله‌های در دست بهره‌برداری اهمیت ویژه‌ای دارد.

مدلسازی پدیده افت انرژی در جریانهای گذرا از دو دیدگاه مورد بحث است. نخست روش تقریب عبارت  $R \int Q|Q|dt$  و دوم تخمین ضرایب افت. عبارت افت اصطکاک در معادلات مشخصه را می‌توان به‌صورت صریح یا ضمنی تقریب زد. همچنین ضریب افت در رابطه داری وایسباخ  $f$  و در نتیجه ضریب  $R$  را نیز می‌توان به‌صورت ماندگار، شبه ماندگار یا گذرا مدلسازی کرد. هر یک از روشها و ملاحظات ذکر شده، تابعی از شرایط مسأله و شدت نوسانهای جریان گذرا است.

## تقریب زدن عبارت افت اصطکاک

با توجه به ماهیت فیزیکی مسأله می‌توان گفت عبارت  $R \int Q|Q|dt$  افت انرژی در حدفاصله نقاط  $A$  تا  $P$  (یا  $B$  تا  $P$ ) در مدت زمان  $\Delta t$  و طول  $\Delta x$  را نشان می‌دهد. لذا برای شبیه‌سازی دقیق‌تر پدیده افت اصطکاک با در نظر گرفتن تغییرات دبی نسبت به زمان، نوعی تقریب عمومی برای عبارت افت انرژی به‌صورت زیر توسعه داده می‌شود (Chaudhry 1987):

$$R \int_A^P Q|Q|dt = R[Q_A + \theta(Q_P - Q_A)]Q_A|\Delta t \quad (5)$$

پارامتر  $\theta$  میزان صریح یا ضمنی بودن معادله را نشان می‌دهد و از صفر تا یک متغیر است. مدلسازی‌های متنوع نشان می‌دهد که مقدار 0.85 نتایج دقیق‌تری را به‌دست می‌دهد (Karney and Mcinnis 1992). بر این اساس در تحقیق حاضر برای مدلسازی خطوط لوله از این مقدار استفاده شد.

## تخمین ضریب افت در جریان‌های گذرا

برای جریان‌های با تغییرات سریع و نوسانهای شدید، آزمایشها نشان می‌دهد که میزان استهلاک سیگنال (تاریخچه زمانی) نوسانهای فشار در لوله بیشتر از مقدار حاصل از مدلسازی با استفاده از رابطه داری وایسباخ و اعمال ضریب افت ماندگار یا شبه‌ماندگار است (Wylie and Streeter, 1993). لذا امروز روشن است که علاوه بر ضرایب افت معمول در جریان‌های ماندگار و روند شناخته شده افت انرژی، منبع دیگری با ماهیت نوسانی و وابسته به زمان در جریانهای گذرا وجود دارد که بر میرایی و شکل‌گیری سیگنال‌های نوسانهای فشار و دبی در این جریانها مؤثر است. میزان اثرگذاری این پدیده غیرماندگار به مشخصه‌های سیال و جریان و بیشتر به شدت نوسانها وابسته است. تا امروز مدلسازی پدیده افت انرژی گذرا فقط با استفاده از روشهای تجربی قابل انجام بوده است. یکی از مشهورترین روشهایی که برای این منظور معرفی شده مدل پیشنهادی (Zielke 1968) و Brunone (1991) است که بر اساس مدلسازی نرخ تولید و استهلاک انرژی تلاطم در جریانهای گذرا توسعه داده شده است.

به‌طور کلی روند مدلسازی پدیده افت اصطکاک گذرا چنین است که با تعریف ضریبی به‌عنوان ضریب افت اصطکاک غیرماندگار  $f_u$  علاوه بر ضریب افت شبه‌ماندگار  $f_q$  ضریب افت کلی لحظه‌ای  $f$  به‌شکل زیر در نظر گرفته می‌شود (Wylie and Streeter, 1993):

$$f = f_q + f_u \quad (6)$$

در این رابطه  $f_q$  ضریب افت شبه‌ماندگار از معادله کبروک به‌دست می‌آید و  $f_u$  در تحقیق حاضر با استفاده از مدل برونون تخمین زده می‌شود. کمبود دقت در محاسبه هر یک از اجزای ضریب افت می‌تواند نتایج تحلیل جریان را با افت قابل توجهی در دقت روبه‌رو سازد.

ضریب استهلاک برشی واردی و بروان  $C^*$  (Bergant et al. 2001) با استفاده از روابط زیر به دست می آید.

$$k = \frac{\sqrt{C^*}}{2} \quad (11)$$

$$C^* = \begin{cases} 0.0476 & \text{Re} \leq 2000 \\ \frac{7.41}{\text{Re}^{\log(14.3/\text{Re}^{0.05})}} & \text{Re} > 2000 \end{cases} \quad (12)$$

در رابطه (۱۲) همان طور که دیده می شود، مدل برونون بر اساس دو جمله شتاب محلی  $\partial Q / \partial t$  و شتاب جابه جایی  $\partial Q / \partial x$ ، شبیه سازی اثر نوسانی افت اصطکاک غیرماندگار را انجام می دهد. از آنجا که این مدل روشی تجربی محسوب می شود، می توان گفت که نقش هر یک از این شتابها در مسائل مختلف (بسته به مشخصه های سیال و لوله) می تواند متفاوت باشد. دومین بخش واسنجی در این تحقیق، تعیین دقیق دو جمله مزبور در تخمین ضریب افت گذرا است. لذا دو ضریب اصلاحی  $\beta$  و  $\gamma$  در مدل برونون اعمال می شود که با استفاده از روش پیشنهادی قابل تعیین هستند. لذا معادله (۹) در این تحقیق به شکل زیر بازنویسی شده و در مدل سازی وارد می شود:

$$f_u = \frac{kD}{Q|Q|} \left( \beta \frac{\partial Q}{\partial t} + \gamma \text{sign}(Q) \left| \frac{\partial Q}{\partial x} \right| \right) \quad (13)$$

به منظور تحلیل جریان گذرا در تحقیق حاضر معادله (۱۳) با تقریب ساده تفاضل محدود در کنار معادلات مشخصه مثبت و منفی (۳) و (۴) در هر گام زمانی حل می شود. این تقریب تفاضل محدود مطابق رابطه زیر برای خطوط مثبت AP در نظر گرفته می شود:

$$f_u = \frac{kD}{[Q_A + \theta(Q_P - Q_A)]|Q_A|} \times \dots \quad (14)$$

$$\dots \left( \beta \frac{Q_P - Q_A}{\Delta t} + \gamma \text{sign}(Q_{P-\Delta t}) \left| \frac{Q_{P-\Delta t} - Q_A}{\Delta x} \right| \right)$$

در این معادله برای پیشگیری از پیدایش عبارتهای غیرخطی در معادلات و در نتیجه پیچیده و زمان بر شدن

بر اساس فرض رابطه (۶)، معادله افت دارسی وایسباخ در مورد جریانهای گذرا نیز قابل استفاده بوده و لذا داریم:

$$R = R_q + R_u \quad (7)$$

نخستین گام در واسنجی خط لوله، افزایش دقت ضریب افت شبه ماندگار است که این کار با افزایش دقت ضریب زبری جدار لوله امکان پذیر است. در این تحقیق رابطه کلبروک حاکم بر ضریب افت شبه ماندگار به شکل زیر بازنویسی می شود:

$$\frac{1}{\sqrt{f_q}} = -2 \log \left( \frac{\alpha \varepsilon / D}{3.7} + \frac{2.51}{\text{Re} \sqrt{f_q}} \right) \quad (8)$$

که در آن  $\varepsilon$  زبری متوسط جدار لوله،  $\text{Re} = VD/\nu$  عدد رینولدز،  $V$  سرعت جریان و  $\nu$  لزجت سینماتیکی<sup>۱</sup> سیال است. در این رابطه ضریب اصلاحی  $\alpha$  که برای زبری جدار لوله اعمال شده، به روشی که معرفی خواهد شد، به طور دقیق به دست می آید.

افت اصطکاک غیرماندگار در تحقیق حاضر بر اساس مدل برونون تخمین زده می شود که به گواهی بسیاری از کارهای پیشین (Vardy et al. 1993; Brunone et al. 2004; Ramos et al. 2004; Bergant et al. 2001; 1995) یکی از قوی ترین و دقیق ترین روشها است. این مدل سپس توسط Bergant et al. (2001) مورد بازنگری و اصلاح مختصری قرار گرفته و به شکل معادله دیفرانسیل زیر ارائه شده است:

$$f_u = \frac{kD}{Q|Q|} \left( \frac{\partial Q}{\partial t} + \text{sign}(Q) \left| \frac{\partial Q}{\partial x} \right| \right) \quad (9)$$

که در این رابطه:

$$\text{sign}(Q) = \begin{cases} +1 & Q \geq 0 \\ -1 & Q < 0 \end{cases} \quad (10)$$

$k$  ضریب استهلاک برونون<sup>۲</sup> است که بر اساس داده های آزمایشگاهی برای شرایط مختلف جریان یا بر اساس

1. Kinematics Viscosity

2. Brunone's Decay Coefficient

قطعیتهای محاسباتی منجر شده و قابلیت اطمینان روش تحلیل را افزایش می‌دهد. برای واسنجی مقدار تخمینی سرعت موج در اینجا یک ضریب اصلاحی  $\omega$  (با دامنه تغییر کم) در سرعت موج اعمال و به شکل زیر در معادلات حاکم جایگزین می‌شود:

$$a = \omega a_0 \quad (18)$$

#### ۴- روش تحقیق

ایده اصلی در تحقیق حاضر، تعدیل پارامترهای اساسی در مدل‌سازی جریانهای غیرماندگار است. در هر مسأله بسته به ویژگیهای خط لوله و شدت جریان گذرای تولید شده، خطاهای ناشی از مدل‌سازی متغیر است. به‌عنوان مثال مقدار متوسط زبری جدار لوله با توجه به جنس آن، جزو اطلاعاتی است که توسط کارخانه سازنده یا با شبیه‌سازی جریان ماندگار با دقت خوبی قابل تعیین است. اما کارکرد همین ضریب در جریانهای غیرماندگار با استفاده از رابطه ماندگار داری و ایسباخ، موجب ایجاد مقداری خطا در محاسبات می‌شود. این موضوع برای سایر عبارتهای تجربی مانند وابستگی افت اصطکاک غیرماندگار به شتابهای محلی و لحظه‌ای جریان نیز وجود دارد. در این تحقیق معادلات رایج مورد استفاده به‌شکل اولیه خودشان پذیرفته می‌شوند. سپس چهار ضریب اصلاحی برای افزایش دقت مدل‌سازی جریان گذرا در خطوط لوله تعریف و در معادلات حاکم اعمال می‌شود. این ضرایب عبارتند از  $\alpha$ ،  $\beta$  و  $\gamma$  به‌ترتیب برای اصلاح ضریب زبری، جمله شتاب محلی و جابه‌جایی در مدل افت گذرا و همچنین ضریب  $\omega$  برای اصلاح سرعت انتشار موج. این ضرایب در واقع مجهولات مسأله واسنجی بوده و لازم است به‌دست آیند. به این منظور از روش حل زیر استفاده می‌شود:

روند تحلیل، از منقطع‌سازی صریح در دیفرانسیل مکانی استفاده شده و در عمل نتایج خوبی نیز به‌دست آمده است:

$$f_u = \frac{kD}{[Q_B + \theta(Q_P - Q_B)]Q_B} \times \dots \quad (15)$$

$$\dots \left( \beta \frac{Q_P - Q_B}{\Delta t} + \gamma \text{sign}(Q_{P-\Delta t}) \left| \frac{Q_{P-\Delta t} - Q_B}{\Delta x} \right| \right)$$

برای خطوط منفی BP این معادله به‌طور مشابه قابل توسعه است.

#### ۳-۲- سرعت انتشار موج

تخمین سرعت انتشار موج اولیه  $a_0$  در خطوط لوله، به آگاهی از ضریب بالک<sup>۱</sup>  $K_b$ ، جرم مخصوص سیال  $\rho$ ، ضریب الاستیسیته<sup>۲</sup>  $E$  و ضریب پواسون لوله  $\nu$ ، ضخامت جدار  $e$ ، قطر لوله  $D$  و وضعیت مهاری خط لوله نیازمند است. با توسعه معادله پیوستگی در کنار معادله تنش و کرنش (قانون هوک) در مقطع لوله، سرعت انتشار موج در لوله‌های با جدار نازک از رابطه زیر به‌دست می‌آید (Chaudhry 1987):

$$a_0 = \sqrt{\frac{K_b / \rho}{1 + (K/E)\psi}} \quad (16)$$

در این رابطه،  $\psi$  پارامتر بدون بعدی است که به خواص الاستیک لوله و رفتار سازه‌ای آن وابسته است. مقدار  $\psi$  در شرایط مختلف تعیین شده و از مراجع مختلفی قابل استخراج است. به‌عنوان نمونه در لوله‌های الاستیک جدار نازک که در طول به‌خوبی مهار شده باشند، از رابطه زیر به‌دست می‌آید:

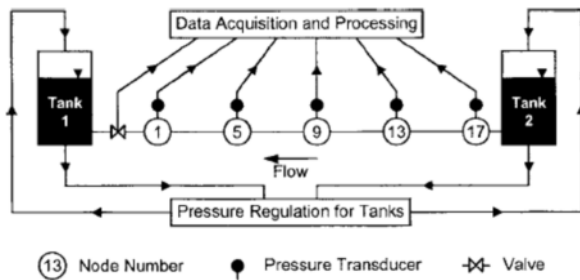
$$\psi = \frac{D}{e} (1 - \nu^2) \quad (17)$$

بررسی جامع و دقیق موارد گفته شده برای تخمین سرعت انتشار موج در لوله‌ها، به کاهش خطاهای محتمل و عدم

1. Bulk Modulus  
2. Elasticity

## ۵- به کارگیری روش

در این بخش برای ارزیابی روش پیشنهادی، از اطلاعات یک مدل آزمایشگاهی دانشگاه آدلاید استرالیا (Bergant et al. 2001) مطابق شکل ۲ استفاده می‌شود.



شکل ۲ مدل آزمایشگاهی دانشگاه آدلاید استرالیا

این مدل برای مطالعه اثرهای متفاوت دینامیکی جریان‌های گذرا مانند جدایی ستون مایع، اندرکنش آب و سازه، واسنجی ضرایب افت و نشست‌یابی توسعه داده شده و در بسیاری از مقالات مورد توجه قرار گرفته است (شاملو و حقیقی، ۱۳۸۷). سیستم شامل لوله‌ای مسی به طول  $L=37.23\text{m}$  قطر  $D=22.1\text{mm}$  و ضخامت جدار برابر  $e=1.63\text{mm}$  است. یک مخزن در بالادست با هد ثابت  $H_{T1}=31.7\text{m}$  و یک مخزن در پایین‌دست با هد  $H_{T2}=32\text{m}$  (در این آزمایش) در نظر گرفته شده است. در طول لوله چند فشارسنج برای اندازه‌گیری نوسانهای فشار در جریان گذرا تعبیه شده است. در این مطالعه فقط از داده‌های فشار سنج شماره یک در نزدیکی شیر انتهایی استفاده می‌شود.

در ابتدا شیر باز بوده و جریان آشفته‌ای با سرعت  $V_0=0.3\text{m/s}$  برقرار است. دمای متوسط آب در طول آزمایش برابر  $T_w=15^\circ\text{C}$  گزارش شده است. سپس جریان گذرا با بستن شیر انتهایی در مدت زمان  $t_e=0.009\text{s}$  تولید شده و نوسانهای فشار در گره یک اندازه‌گیری می‌شود. (گره یک در کنار بالادست شیر قرار دارد). سیگنال اندازه‌گیری شده در شکل ۴ نشان داده شده است.

۱- ابتدا جریان گذرا با بستن شیر انتهایی خط لوله تولید و نوسانهای فشار فقط در محل شیر اندازه‌گیری می‌شود.

۲- مدل عددی تحلیل جریان گذرا در خط لوله توسعه داده می‌شود که در واقع تابعی از ضرایب مجهول اصلاحی است.

۳- نوعی مسأله برنامه ریزی غیرخطی تعریف می‌شود که در آن تابع هدف عبارت است از مجموع مربعات اختلاف بین مقادیر اندازه‌گیری و محاسبه شده برای نوسانهای فشار در محل شیر انتهایی (رابطه ۱۹). متغیرهای تصمیم‌گیری نیز شامل ضرایب اصلاحی است.

۴- با استفاده از روش بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک تابع هدف مذکور کمینه‌سازی شده و ضرایب اصلاحی تعیین می‌شود.

$$C(\alpha, \beta, \gamma, \omega) = \sqrt{\sum_{j=1}^m (Hv_j - Hv'_j)^2} \quad (19)$$

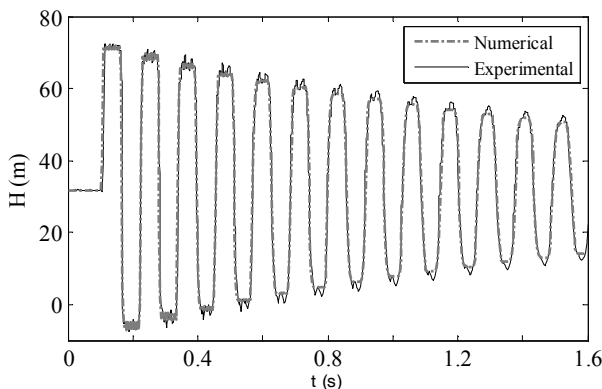
در این رابطه  $C$  تابع هدف،  $Hv_j$  و  $Hv'_j$  به ترتیب مقادیر محاسبه و مشاهده شده فشار در محل شیر و  $m$  تعداد داده‌های اندازه‌گیری شده برای نوسانهای فشار است. نخست بر اساس مشخصه‌های معلوم خط لوله و برداشت مهندسی، مقادیر اولیه ضریب زبری و سرعت موج تعیین می‌شود. تخمین سرعت موج را بر اساس دوره تناوب نظری سیگنال اندازه‌گیری شده، برابر  $4L/a$  با دقت بالاتری می‌توان انجام داد. سپس برای متغیرهای تصمیم‌گیری مسأله، محدوده‌ای منطقی در نظر گرفته شده و به الگوریتم بهینه‌سازی معرفی می‌شود. در این تحقیق از شکل ساده الگوریتم ژنتیک بر اساس مدل باینری (Haupt, 2004) استفاده می‌شود.

بهترین شرایط ممکن را برای شبیه‌سازی عددی جریان گذرا پیش رو قرار می‌دهد.

در پایان ضریب تصحیح زبری جدار لوله برابر  $\alpha = 1.19$ ، جمله شتاب محلی در مدل افت گذرا برابر  $\beta = 1.07$ ، شتاب جابه‌جایی برابر  $\gamma = 1.09$  و سرعت موج برابر  $\omega = 0.98$  به دست می‌آید که البته این مقادیر فقط برای خط لوله مورد آزمایش معتبر است.

بر این اساس زبری جدار لوله برابر  $\varepsilon = 1.8 \text{ mm}$  و سرعت موج برابر  $a = 1292 \text{ m/s}$  در شرایط جدید تعیین می‌شوند.

شکل ۴ سیگنال نوسانهای فشار محاسبه و اندازه‌گیری شده را در محل شیر انتهایی خط لوله پس از اعمال ضرایب اصلاح شده نشان می‌دهد.

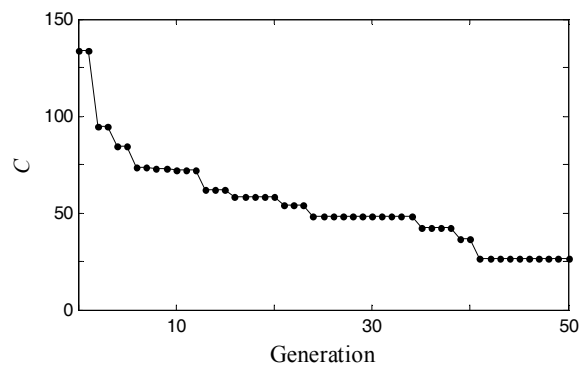


شکل ۴ نوسانات فشار محاسباتی و اندازه‌گیری شده پس از واسنجی

از این شکل می‌توان نتیجه گرفت، مدل عددی به‌خوبی می‌تواند به شبیه‌سازی جریان گذرا در لوله تحت آزمایش بپردازد. مقادیر اولیه‌ای که برای ضریب زبری، سرعت موج و شکل متعارف رابطه برونون در شروع محاسبات استفاده شد، در واقع نتایج واسنجی‌های قبلی بوده است (Bergant et al. 2001) که در این تحقیق دارای دقت بیشتری شدند.

در شروع واسنجی بر اساس اطلاعاتی که از مرجع آزمایش در دست است، ضریب زبری جدار لوله برابر  $\varepsilon = 1.5 \text{ mm}$  و سرعت موج برابر  $a = 1319 \text{ m/s}$  به مدل معرفی شد. سپس تابع هدف، بر اساس مقادیر اندازه‌گیری شده نوسانهای فشار در محل شیر و مدل ریاضی توسعه داده شده تشکیل می‌شود.

در الگوریتم ژنتیک، حدود تغییرات متغیرهای تصمیم‌گیری مسأله برای تمامی پارامترها ( $\alpha$ ،  $\beta$ ،  $\gamma$  و  $\omega$ ) بین  $0/5$  تا  $1/5$  در نظر گرفته شد. در اینجا الگوریتم ژنتیک با تولید ۴۰ کروموزوم به‌عنوان جمعیت اولیه و ۲۰ کروموزوم به‌عنوان جمعیت نسل‌های تکاملی شروع به کار می‌کند. تبادل ژنی در نظر گرفته شده از نوع یکنواخت و ضریب جهش ژنی به‌صورت خطی از  $0/05$  در اولین نسل تا  $0/01$  در آخرین نسل متغیر در نظر گرفته شده است. شکل ۳ روند کمینه‌سازی تابع هدف را تا ۵۰ نسل نشان می‌دهد.



شکل ۳ روند کمینه‌سازی تابع هدف در پی نسل‌های متوالی الگوریتم ژنتیک

اگرچه به‌طور نظری کمینه مطلق تابع هدف معرفی شده برابر صفر است، اما محدودیتها، عدم قطعیت در مدل‌سازی و خطاهای اندازه‌گیری و محاسباتی، اجازه دست‌یابی به مقدار صفر را نمی‌دهند. در واقع واسنجی،



دار تابع هدف در نسل ابتدایی شکل ۳ نشان دهنده میزان واسنجی اولیه است. همان‌طور که دیده می‌شود در نسل‌های متعدد، الگوریتم ژنتیک مطابق روش پیشنهادی، مقدار تابع هدف (معرف کیفیت واسنجی) تا حد بسیار زیادی بهبود یافته است. در واقع روش پیشنهادی به‌خوبی توانسته عدم قطعیت‌های مدل‌سازی را کاهش دهد، به‌نحوی که سیگنال‌های محاسبه و مشاهده شده نوسانهای فشار در نقطه اندازه‌گیری، با دقت بالایی بر یکدیگر منطبق شده‌اند. با وجود این برای اطمینان بیشتر لازم است فشارهای محاسبه شده با داده‌های اندازه‌گیری شده در سایر نقاط خط لوله نیز مقایسه شوند که متأسفانه به دلیل در دسترس نبودن اطلاعات، به این موضوع پرداخته نشد. در پایان می‌توان گفت که یکی از ویژگیهای روش پیشنهادی، امکان واسنجی همزمان چهار ضریب اصلاحی است. به‌عنوان زمینه‌ای برای ادامه تحقیق، می‌توان شناسایی نشت را نیز به آن افزود.

#### ۷- فهرست علائم

$A$	سطح مقطع لوله
$a$	سرعت انتشار موج در لوله
$C$	تابع هدف
$D$	قطر لوله
$E$	ضریب الاستیسیته
$f$	ضریب افت
$g$	شتاب ثقل
$H$	هد پیرومتریک لحظه‌ای
$k$	ضریب استهلاک برونون
$L$	طول لوله
$m$	تعداد داده‌های اندازه‌گیری شده
$Q$	دبی لحظه‌ای جریان
$R$	ضریب مقاومت
$V$	سرعت جریان

مطابق شکل ۳ مقدار تابع هدف که در واقع مجموع مربعات اختلاف بین مقادیر محاسبه و مشاهده شده است، در گام اول در حدود 130 به‌دست آمده که ناشی از نتایج واسنجی‌های قبلی است. روش پیشنهادی، دقت مدل‌سازی را تا ۲۷ برای تابع هدف بهبود بخشید. این بهبود، ناشی از به‌کارگیری ضرایب تعدیل معرفی شده است.

#### ۶- نتیجه‌گیری

در این تحقیق عدم قطعیت‌های مهم در مدل‌سازی جریانهای گذرا در خطوط لوله معرفی شد که عبارتند از: ضریب زبری جدار لوله، عبارت‌های شتاب محلی و جابه‌جایی در مدل‌سازی افت اصطکاک گذرا و همچنین سرعت انتشار موج. برای کاهش این عدم قطعیت‌ها، ضرایب تعدیل  $\alpha, \beta, \gamma$  و  $\omega$  در معادلات حاکم اعمال شد که در روند نوعی مسأله معکوس واسنجی می‌شوند. به این منظور جریان گذرا با بستن شیر انتهایی در خط لوله ایجاد و نوسانهای فشار فقط در محل شیر اندازه‌گیری می‌شوند. در کنار این آزمایش، مدل عددی تحلیل جریان نیز به‌صورت تابعی از ضرایب تعدیل نام برده توسعه داده می‌شود. سپس مسأله برنامه‌ریزی غیرخطی واسنجی خط لوله تعریف شد که در آن تابع هدف عبارت است از مجموع مربعات اختلاف بین مقادیر محاسباتی و اندازه‌گیری شده نوسانهای فشار در محل شیر انتهایی. متغیرهای تصمیم‌گیری عبارتند از ضرایب تعدیل. مسأله برنامه‌ریزی توسعه داده شده به روش الگوریتم ژنتیک حل می‌شود. برای ارزیابی روش، از اطلاعات مدل آزمایشگاهی خط لوله دانشگاه آدلاید استرالیا استفاده شد. این مدل پیش از این نیز در مطالعات متعددی مورد واسنجی قرار گرفته که نتایج آنها به عنوان مقادیر اولیه در تحقیق حاضر استفاده شد.

Chaudhry, M.H. (1987)., *Applied hydraulic transients*, 2<sup>nd</sup> edition, Litton Educational/Van Nostrand Reinhold, New York.

Haupt, R.L., Haupt, S.E. (2004). *Practical Genetic algorithms*, 2<sup>nd</sup> edition, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey.

Kapelan, Z.S., Savic, D.A., Walters, G.A., (2003). "A hybrid inverse transient model for leakage detection and roughness calibration in pipe networks." *J. Hydraulic Res.* 41(5), pp. 481-492.

Karney, B.W., Mcinnis, D., (1992). "Efficient calculation of transient flow in simple pipe networks." *J. Hydraulic Engng.* 118(7), pp. 1014-1031.

Liggett, J.A., Chen, L.C. (1994). "Inverse transient analysis in pipe networks." *J. Hydraulic Engng.* 120(8), pp. 934-954.

Ramos, H., Borga, A., Covas, D., Loureiro, D. (2004)., "Surge damping analysis in pipe systems: modeling and experiments." *J. Hydraulic Res.* 42(4), pp. 413-425.

Shamloo, H., Haghghi, A. (2009)., "Leak detection in pipelines by inverse backward transient analysis." *J. Hydraulic Res.* 47(3), 311-318.

Vardy, A.E., Hwang, K.L., Brown, J.M.B. (1993)., "A weighting function model of transient turbulent pipe flow." *J. Hydraulic Res.* 31(4), pp. 533-548.

Vitkovsky, J., Simpson, A., Lambert, M., (2000)., "Leak detection and calibration using transient and genetic algorithms." *J. Water Resource Planning and Management* 126 (4), pp. 262-265.

Wylie, E.B., Streeter, V.L. (1993). *Fluid Transient in Systems*. Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ.

Zielke, W. (1968)., "Frequency dependent friction in transient pipe flow." *J. Basic Engng.* 90(1), pp. 109-115.

$CN$	عدد کورانت
$C^*$	ضریب استهلاک برشی
$f_q$	ضریب افت شبه‌ماندگار
$f_u$	ضریب افت غیرماندگار
$Hv$	فشار محاسبه شده در محل شیر
$Hv'$	فشار مشاهده شده در محل شیر
$K_b$	ضریب بالک
Re	عدد رینولدز
$t_c$	زمان بستن شیر
$T_w$	دمای آب
$\varepsilon$	زبری لوله
$\psi$	ضریب مهارى خط لوله
$\rho$	جرم مخصوص سیال
$v$	لزجت سینماتیکی
$v$	ضریب پواسون لوله
$\omega, \gamma, \beta, \alpha$	ضرایب واستنجی
$\Delta t$	گام زمانی محاسبات
$\Delta x$	گام مکانی محاسبات

## ۸- منابع

شاملو، ح.، حقیقی، ع. (۱۳۸۷). شناسایی نشت در خطوط لوله بر پایه مدل‌سازی معکوس جریان گذرا و برنامه‌ریزی غیرخطی مختلط اعداد صحیح و حقیقی. مجله انجمن هیدرولیک ایران، دوره سوم، شماره دوم، ص ۴۲-۲۷

Bergant, A., Simpson, A., Vitkovsky. J., (2001). "Developments in unsteady pipe flow friction modeling." *J. Hydraulic Res.* 39(3), pp. 249-257.

Brunone, B. Golia, U.M., Greco, M., (1991). "Some remarks on the momentum equation for fast transients." *International Meeting on Hydraulic Transients with Column Separation, 9th Round Table, IAHR, Valencia, Spain*, pp. 140-148.

Brunone, B., Golia, U.M., Greco, M. (1995)., "Effects of two-dimensionality on pipe transients modelling." *J. Hydraulic Engng.* 121(12), 906-912.