

واسنجی چند شاخصی شبکه خطوط لوله‌ی آبرسانی تحت جریان غیر ماندگار

سعید سرکمریان^{۱*}، علی حقیقی^۲، آرش ادیب^۳

چکیده

جهت ارزیابی عملکرد یک شبکه‌ی آبرسانی لازم است تا هیدرولیک جریان‌های ماندگار و غیر ماندگار در آن با دقت بالا شبیه‌سازی شوند. به این منظور، از شبیه‌های ریاضی استفاده می‌شود. واسنجی فراسنج‌های با اثرگذاری پویا همچون ضرایب افت شبه‌ماندگار، افت غیر ماندگار و سرعت موج در سامانه‌های پیچیده کار دشواری است و غالباً از روش‌های مبتنی بر تحلیل معکوس جریان به این منظور استفاده می‌شود. در این تحقیق شبیه ریاضی تحلیل هیدرولیک جریان غیر ماندگار در خطوط لوله با حل عددی معادله‌های حاکم با استفاده از روش خطوط مشخصه توسعه داده می‌شود. در این شبیه به هریک از جمله‌های افت ماندگار، شتاب لحظه‌ای و محلی در افت غیر ماندگار و سرعت موج یک ضریب اصلاحی اختصاص داده می‌شود. سپس یک مسئله بهینه‌سازی غیر خطی باهدف کمینه‌سازی اختلاف مربعات نوسان‌های فشار محاسباتی و اندازه‌گیری شده در نقاط شاهد توسعه داده می‌شود. متغیرهای تصمیم‌گیری در این مسئله ضرایب اصلاحی فراسنج‌های تحت واسنجی هستند. در این مقاله شبیه پیشنهادی در خصوص یک شبکه‌ی آزمایشگاهی در دانشگاه صنعتی لیسبون ارزیابی شد. با تعریف الگوریتم ژنتیک به‌عنوان کمینه‌ساز تابع هدف، پس از طی ۳۰ نسل میزان خطا از ۱۴۰ متر به ۹۲/۱۵ متر کاهش یافت. نتایج به‌دست‌آمده، افزایش دقت شبیه‌سازی را به اندازه ۳۳٪ نشان دادند.

کلمات کلیدی: تحلیل معکوس، جریان غیر ماندگار، واسنجی، ضرایب اصلاحی، بهینه‌سازی

^۱ دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی، گروه عمران، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران.

تلفن: ۰۹۱۶۳۴۶۲۳۷۱ ; Email: Saeid.sarkamaryan@gmail.com

^۲ دانشیار، دانشکده مهندسی، گروه عمران، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران.

^۳ استاد، دانشکده مهندسی، گروه عمران، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران.

مقدمه

شبکه‌ی لوله‌های آبرسانی از مهم‌ترین زیرساخت‌ها در هر کشوری محسوب می‌شوند. جهت توسعه، بهره‌برداری و اشکالیابی خطوط لوله لازم است که به شبیه‌سازی ریاضی آن‌ها پرداخت. امروزه روش‌های بسیاری جهت طراحی و مدیریت عملکرد شبکه‌های آبرسانی توسعه یافته و در حال رشد هستند که همگی بر پایه‌ی شبیه‌سازی ریاضی هیدرولیک جریان در خطوط لوله بنا نهاده شده‌اند. لذا، اعتمادپذیری همه این روش‌ها پیش از هر چیز به دقت شبیه ریاضی و درجه‌ی اطمینان فرایند واسنجی شبیه‌های مورد استفاده وابسته است.

جریان سیال در خطوط لوله‌ی تحت فشار بر اساس ثبات یا تغییر مشخصات جریان (سرعت و فشار) و سیال نسبت به زمان به ماندگار و غیر ماندگار (گذرا) تقسیم می‌شود. جریان غیر ماندگار بر اثر تغییر در شرایط مرزی جریان، همچون باز یا بسته شدن ناگهانی شیر یا توقف و راه‌اندازی تلمبه‌ها ایجاد می‌شود. در نتیجه‌ی این امر، امواج فشاری در طول لوله‌ها شبکه منتشر شده و به‌طور دوره‌ای سبب افزایش و کاهش فشار در سامانه می‌گردند. بر اثر رفت و برگشت موج در لوله‌ها، سیگنال‌های نوسان-های فشار در نقاط مختلف شبکه حاوی اطلاعات فراوانی از کل سامانه در هر دو حوزه زمان و مکان خواهند بود. از این اطلاعات می‌توان در ارزیابی شرایط موجود سامانه، و تخمین فراسنج‌های اثرگذار پویا، استفاده کرد. این مهم منوط به شبیه‌سازی ریاضی با دقت بالای سامانه است (کواس و همکاران ۲۰۰۴).

از مهم‌ترین فراسنج‌هایی که نقش تعیین‌کننده‌ی را در شکل‌گیری و میرایی نوسانات فشار در سامانه ایفا می‌کنند و ممکن است خطای قابل توجهی را به نتایج وارد سازند، می‌توان به زبری موجود در خطوط لوله، شبیه تخمین افت غیر ماندگار و میزان سرعت انتشار موج اشاره نمود (دایلی و همکاران، ۱۹۵۵). در این تحقیق روشی بر پایه‌ی تحلیل معکوس جریان گذرا^۱ (ITA) و بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک^۲ (GA) جهت واسنجی همزمان و چند شاخصه فراسنج‌های شبکه با اثرگذاری پویا در جریان‌های غیر ماندگار معرفی می‌شود.

تاکنون مطالعات بسیاری درباره‌ی تخمین فراسنج-های مؤثر در تحلیل شبکه‌های آبرسانی صورت گرفته است که تمرکز اکثر آن‌ها بر واسنجی میزان ضریب افت کارمایه ماندگار در سامانه بوده است. در خصوص جریان‌های غیر ماندگار عمدتاً روش‌هایی بر مبنای سعی و خطا پیشنهاد شده‌اند.

دایلی و همکاران (۱۹۵۵) برای تخمین اصطکاک غیر ماندگار، سرعت متوسط لحظه‌ای و شتاب محلی جریان از یک ضریب تناسب تجربی استفاده کردند. شبیه‌ای که بوسیله‌ی آن‌ها ارائه شد، در واقع پایه‌ی بسیاری از مطالعات بعدی در خصوص شبیه‌سازی افت غیر ماندگار در لوله‌ها تحت فشار گردید.

زیک (۱۹۶۸) بر اساس تغییرات ناگهانی مشخصات جریان یک بعدی درون لوله روشی عددی را برای محاسبه افت‌های اصطکاک برای جریان‌های گذرای آرام ارائه داد. در این روش جمله‌ی مربوط به افت اصطکاک به سرعت میانگین لحظه‌ای جریان و تغییرات سرعت در گذشته وابسته بود. شبیه توسعه داده شده تطابق خوبی را بین نتایج محاسباتی و آزمایشگاهی نشان می‌داد.

برونون و همکاران (۱۹۹۱) برای محاسبه‌ی افت اصطکاک غیر ماندگار تغییراتی را در شبیه دایلی و همکاران (۱۹۵۵) به وجود آوردند. در واقع شبیه پیشنهادی را با افزودن جمله شتاب جابه‌جایی تصحیح نمودند. مزیت مهم این روش، کاربرد آسان آن در محاسبات عددی بود.

لیجت و چن (۱۹۹۴) مطالعات وسیعی را در خصوص توسعه‌ی تئوری روش‌های واسنجی خطوط لوله در شبکه‌های آبرسانی بر اساس روش ITA ارائه نمودند. این محققین با تأکید بر ضرورت تخمین دقیق ضرایب اصطکاک جهت رسیدن به پاسخ‌های قابل اعتماد در تحلیل سامانه، ضرایب افت ماندگار لوله‌ها را به‌عنوان مجهول معرفی کردند. در این روش با تعریف یک تابع هدف با معیار کمینه‌سازی اختلاف میان مقادیر محاسباتی و اندازه‌گیری شده‌ی فشار در نقاط حساس شبکه در قالب یک مسئله‌ی بهینه‌سازی غیرخطی، به تعیین مجهولات مسئله پرداخته شد. در مجموع می‌توان چنین عنوان کرد که این مقاله نخستین روش نظام‌مند در شبکه‌های آبرسانی است که به ارائه روش واسنجی خطوط لوله در سامانه‌های پیچیده آبرسانی پرداخته

¹ inverse transient analysis

² genetic algorithm

فشارسنجی لحظه‌ای) و $Q = Q(x, t)$ بده لحظه‌ای هستند. به منظور حل این معادله‌ها از روش عددی خطوط مشخصه^۱ (MOC) استفاده می‌شود. در روش مزبور معادله‌های حاکم به صورت خطی با هم ترکیب و پس از انتگرال‌گیری دو معادله‌ی مشخصه مثبت و منفی تحت عنوان معادله‌های مشخصه به دست می‌آیند. در شبکه‌ی خطوط لوله پس از منقطع سازی هر کدام از خطوط لوله، در هریک از گره‌ها معادله‌های مشخصه توسعه داده می‌شوند. شبیه‌سازی شرایط مرزی و اولیه در کنار معادله‌های مشخصه برای تحلیل تمام شبکه به کار گرفته می‌شود (چادری، ۲۰۱۴).

شبیه‌سازی افت اصطکاک

افت اصطکاک را می‌توان بحث برانگیزترین عبارت در تحلیل جریان گذرا در خطوط لوله دانست که اعتمادپذیری نتایج را به طور معناداری تحت تأثیر قرار می‌دهد. برای جریان‌های با تغییرات سریع و نوسان‌های شدید شبیه‌سازی پدیده‌ی افت اصطکاک از دو قسمت تشکیل می‌شود. بخش اول افت شبه ماندگار (f_q) که از معادله‌ی کلبروک-واپت به دست می‌آید و بخش دوم با ماهیت نوسانی و وابسته به زمان که در میرایی نوسان‌های فشار مؤثر است با عنوان افت اصطکاک غیر ماندگار (f_u) شناخته می‌شود:

$$f = f_q + f_u \quad (۳)$$

کمبود دقت در محاسبه هریک از اجزای ضریب افت می‌تواند نتایج تحلیل جریان را با خطای قابل توجهی روبرو کند، لذا، نخستین گام در واسنجی خطوط لوله، افزایش دقت ضریب افت شبه ماندگار است که این کار با افزایش دقت ضریب زبری جدار لوله انجام می‌شود. بدین ترتیب معادله کلبروک-واپت به صورت رابطه‌ی شماره (۴) نوشته می‌شود:

$\frac{1}{\sqrt{f_q}} = -2 \log \left(\frac{\alpha \times \varepsilon / D}{3.7} + \frac{2.51}{Re \sqrt{f_q}} \right) \quad (۴)$
--

است. سایر روش‌هایی که در سال‌های بعد به منظور واسنجی ضرایب افت ماندگار و گاهی اندازه‌ی نشت در خطوط لوله معرفی شدند، الگویی تکمیلی از کار این محققین هستند. از جمله این مطالعات می‌توان به مقاله‌های زیر اشاره کرد: ویتکوسکی و همکاران (۲۰۰۰)، کاپلان و همکاران (۲۰۰۳)، کواس و همکاران (۲۰۰۴)، ویتکوسکی و همکاران (۲۰۰۷)، جانگ و کارنی (۲۰۰۸)، شاملو و حقیقی (۲۰۱۰)، حقیقی و راموس (۲۰۱۲)، هانگ و همکاران (۲۰۱۵).

در تحقیق حاضر اندیشه واسنجی چند شاخصه‌ی جریان‌های غیر ماندگار در خصوص شبکه‌ی توزیع آب (شبکه‌ی آبرسانی) توسعه داده شده و با اعمال آن بر یک شبیه‌آزمایشگاهی ارزیابی می‌گردد. دلیل انتخاب شبکه‌های آبرسانی را می‌توان چنین عنوان کرد که در آن‌ها، به دلیل وجود انشعاب‌ها، متعلقات و تجهیزات گسترده، انتظار شبیه‌سازی بسیار دقیق و قطعی جریان بعید به نظر می‌رسد. این موضوع اهمیت واسنجی هرچه دقیق‌تر شبیه‌های جریان غیر ماندگار را در این نوع سازه‌ها بیشتر نشان می‌دهد.

مواد و روش‌ها

معادله‌های حاکم

معادله‌های بقای جرم و اندازه حرکت که به شکل دیفرانسیل جزئی هستند جریان‌های حالت گذرا در مجاری بسته را توصیف می‌کنند. این معادله‌ها با فرض یک حجم کنترل و استفاده از قضیه انتقالی رینولدز برای یک جزء دیفرانسیل از حرکت سیال قابل استخراج هستند. بر این اساس معادله‌های پیوستگی و اندازه حرکت حاکم بر جریان‌های گذرا در خطوط لوله تحت فشار به ترتیب عبارتند از:

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

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

در روابط بالا، x (مختصات در راستای محور لوله)، t (زمان)، a (سرعت موج)، D قطر لوله، A (مساحت لوله)، g (شتاب گرانش)، f (ضریب اصطکاک داریسی-وایسباخ) که می‌تواند به صورت ماندگار، شبه ماندگار و یا غیر ماندگار در نظر گرفته شود، $H = H(x, t)$ (بارآبی

¹ method of characteristic

جمله‌ی شتاب محلی و شتاب جابه‌جایی در تخمین ضریب افت غیر ماندگار است. بدین ترتیب دو ضریب اصلاحی β و γ در شبیه‌برونون اعمال می‌شود. در رابطه‌ی فوق β ضریب اصلاحی جمله شتاب محلی و γ ضریب اصلاحی جمله شتاب جابه‌جایی است.

سرعت انتشار موج

$$a = \sqrt{\frac{K_b/\rho}{1 + (K/E)(\psi D/e)}} \quad (9)$$

تابع هدف

تابع هدفی با معیار کمینه‌سازی اختلاف مربعات مقادیر مشاهداتی در محل‌های اندازه‌گیری و محاسبه شده بوسیله‌ی شبیه‌تعریف می‌شود. در این تابع هدف ضرایب اصلاحی به‌عنوان متغیرهای تصمیم‌گیری در نظر گرفته می‌شوند:

$$C(\alpha, \beta, \gamma, \omega) = \sqrt{\sum_{i=1}^{M_s} \sum_{j=1}^N (H_{ij} - H'_{ij})^2} \quad (11)$$

در رابطه‌ی فوق، C تابع هدف واسنجی، H'_{ij} و H_{ij} به ترتیب مقادیر محاسبه شده و مقادیر مشاهده شده بارآبی فشار هستند. M_s تعداد مکان‌های اندازه‌گیری و N تعداد گام‌های زمانی هستند.

روش اجرای تحقیق

همان‌طور که پیش‌تر بیان شد از روش ITA به منظور دستیابی به ضرایب مجهول استفاده می‌شود. چارچوب کلی این روش در چند گام خلاصه می‌شود که عبارتند از:

(۱) ایجاد جریان گذرا در سامانه که این کار بوسیله‌ی یک شیر مهار در قسمتی از شبکه صورت می‌گیرد.

(۲) فشارهای ناشی از حالت گذرای، در نقاطی از سامانه تحت عنوان مکان‌های اندازه‌گیری^۱ نمونه برداری می‌شوند. جایگاه‌های اندازه‌گیری بهتر است در نقاطی که فشار بیشترین حساسیت را نسبت به فراسنج‌های مجهول

در رابطه‌ی فوق ε میزان زبری جدار لوله و Re عدد رینولدز هستند. ضریب اصلاحی α برای زبری متوسط جدار لوله در نظر گرفته شده است.

دقیق‌ترین و کاربردی‌ترین شبیه‌تخمین افت اصطکاک غیر ماندگار، به پیشنهاد بسیاری از محققان از جمله برونون و همکاران (۱۹۹۵) و برگانت و همکاران (۲۰۰۱) شبیه‌پیشنهادی برونون است. این شبیه‌اثرات نوسانی افت اصطکاک غیر ماندگار بر اساس شتاب محلی لحظه‌ای $\frac{\partial Q}{\partial t}$ و شتاب انتقالی لحظه‌ای $\frac{\partial Q}{\partial x}$ شبیه‌سازی و به صورت رابطه شماره (۵) ارائه می‌نماید:

$$f_u = \frac{kDA}{Q|Q|} \left(\beta \times \frac{\partial Q}{\partial t} + \gamma \times a \times \text{sign}(Q) \left| \frac{\partial Q}{\partial x} \right| \right) \quad (5)$$

در رابطه‌ی فوق k ضریب اصطکاک برونون، A سطح مقطع لوله و a میزان سرعت موج در خط لوله هستند. عملگر sign به شکل زیر معرفی می‌شود:

$$\text{sign}(Q) = \begin{cases} +1 & Q \geq 0 \\ -1 & Q < 0 \end{cases} \quad (6)$$

ضریب اصطکاک برونون k را می‌توان به روش سعی و خطا در آزمایشگاه یا به روش تحلیلی و با استفاده از ضریب استهلاک برشی C^* معرفی شده بوسیله‌ی واردی و برون (۱۹۹۶) تخمین زد:

$$k = \frac{\sqrt{C^*}}{2} \quad (7)$$

که در این معادله، ضریب استهلاک برشی C^* برابر است با:

$$C^* = \begin{cases} 0.0476 & Re \leq 2000 \\ \frac{7.41}{Re^{\log(14.3/(Re^{0.05}))}} & Re > 2000 \end{cases} \quad (8)$$

از آنجا که شبیه‌برونون به‌عنوان یک روش تجربی محسوب می‌شود، می‌توان گفت که نقش هریک از این شتاب‌ها بسته به مشخصه‌های سیال و لوله می‌تواند متفاوت باشد. لذا دومین بخش واسنجی مربوط به دو

¹ measurement site

آزمایشگاهی حاصل کار تحقیقاتی کواس و راموس (۲۰۰۱) است. شبکه‌ی آزمایشگاهی مطابق شکل (۱) از شش حلقه مربعی که هر حلقه به صورت ۲ در ۲ متر مربع تشکیل شده است. منبع تغذیه‌کننده به صورت تحت فشار و با بارآبی حدودی ۲۶ متر است. خطوط لوله به کار رفته دارای جنس پی‌وی‌سی با قطر داخلی ۴۵ میلی‌متر و میزان ضخامت جداره ۲/۴ میلی‌متر است. خطوط لوله در چندین نقطه در طول خود به صورت محکم مهارهای طولی و جانبی شده‌اند. در انتهای شبکه دو نوع شیر وجود دارد. شیر اول که در انتهای پایین دست قرار دارد، شیر دروازه‌ای^۲ است که به منظور مهار جریان قرار داده شده است و جریان از آن به اتمسفر تخلیه می‌شود. شیر دوم، شیر حبابی^۳ است که در بالادست شیر دروازه‌ای قرار داده شده و به منظور تولید حالت گذرا در شبکه تعبیه شده است.

دارد در نظر گرفته شوند. از مقادیر اندازه‌گیری شده به‌عنوان داده‌های شاهد در حل معکوس سامانه استفاده شوند.

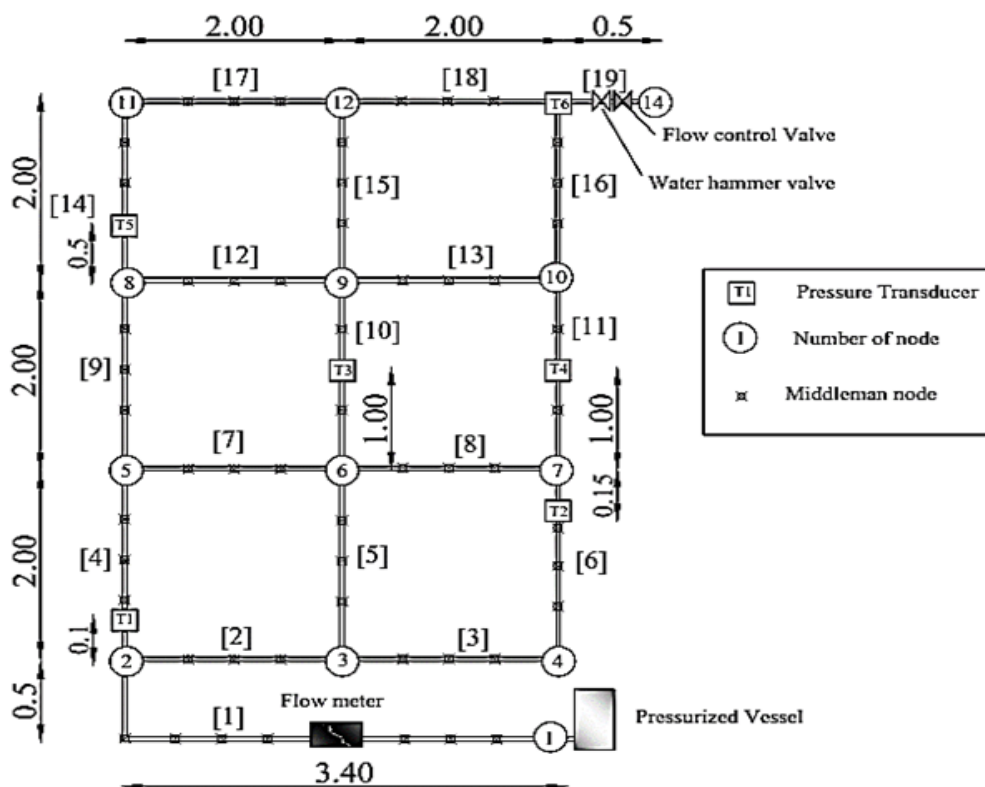
(۳) به منظور تحلیل جریان گذرا، شبکه لوله‌ها به همراه شرایط مرزی بوسیله‌ی روش خطوط مشخصه به صورت تابعی از فراسنج‌های مجهول (ضرایب معرفی شده) شبیه می‌شوند.

(۴) یک مسئله برنامه‌ریزی غیرخطی به گونه‌ای تعریف می‌شود که تابع هدف آن اختلاف بین مقادیر محاسباتی و مشاهده‌شده فشار در سامانه است.

(۵) به منظور حل تابع هدف باید با استفاده از یک الگوریتم بهینه‌سازی همچون الگوریتم ژنتیک فراسنج‌های نامعلوم یک سامانه را تا سازگاری مناسب نتایج آن با داده‌های مشاهداتی بهبود بخشید و تنظیم کرد.

مطالعه‌ی شبکه آزمایشگاهی

جهت ارزیابی روش پیشنهادی از یک شبیه آزمایشگاهی معتبر مربوط به دانشگاه صنعتی لیسبون^۱ استفاده شده است (شکل شماره ۱). این شبکه



شکل ۱- پیکربندی شبکه‌ی دانشگاه صنعتی لیسبون (کواس و راموس، ۲۰۰۱)

جدول ۱- مشخصات اجزای شبکه‌ی دانشگاه صنعتی

لیسبون				
سرعت	موج	زبری	طول	قطر
(m/s)	(m)	(m)	(m)	(mm)
۴۷۵	۰/۰۰۰۱	۳/۹	۴۵	۱
۴۷۵	۰/۰۰۰۱	۲	۴۵	۲
۴۷۵	۰/۰۰۰۱	۲	۴۵	۳
۴۷۵	۰/۰۰۰۱	۲	۴۵	۴
۴۷۵	۰/۰۰۰۱	۲	۴۵	۵
۴۷۵	۰/۰۰۰۱	۲	۴۵	۶
۴۷۵	۰/۰۰۰۱	۲	۴۵	۷
۴۷۵	۰/۰۰۰۱	۲	۴۵	۸
۴۷۵	۰/۰۰۰۱	۲	۴۵	۹
۴۷۵	۰/۰۰۰۱	۲	۴۵	۱۰
۴۷۵	۰/۰۰۰۱	۲	۴۵	۱۱
۴۷۵	۰/۰۰۰۱	۲	۴۵	۱۲
۴۷۵	۰/۰۰۰۱	۲	۴۵	۱۳
۴۷۵	۰/۰۰۰۱	۲	۴۵	۱۴
۴۷۵	۰/۰۰۰۱	۲	۴۵	۱۵
۴۷۵	۰/۰۰۰۱	۲	۴۵	۱۶
۴۷۵	۰/۰۰۰۱	۲	۴۵	۱۷
۴۷۵	۰/۰۰۰۱	۲	۴۵	۱۸
۴۷۵	۰/۰۰۰۱	۰/۵	۴۵	۱۹

به منظور ایجاد حالت گذرا در سامانه، شیر انتهایی (شیر حبایی) در مدت زمان ۰/۰۸ ثانیه به طور کامل بسته می‌شود. برداشت داده‌های فشار از شش محل (T1, T2, ..., T6) در شبکه انجام می‌گردد.

تحلیل جریان در حالت ماندگار اجازه‌ی تخمین میزان زبری خطوط لوله را بر اساس رابطه کلبروک-وایت می‌دهد. میزان زبری تخمین زده شده با در نظر گرفتن میزان افت‌های جزئی حدود ۰/۰۰۰۱ متر تعیین شده است. از طرفی با آزمایش‌های انجام شده در یک تک لوله

¹ gate valve

³ ball valve

میزان سرعت موج تقریباً برابر با ۴۷۵ متر بر ثانیه به‌دست آمده است. سایر مشخصات شبکه در جدول شماره (۱) ارائه شده‌اند.

نتایج و بحث

در روش عددی خطوط مشخصه به کار گرفته شده با منقطع سازی طولی خطوط لوله با گام‌های مکانی ثابت ۰/۵ متر، گام زمانی تحلیل مسئله برابر با $\Delta t = \Delta x/a$ خواهد بود. این بدان معنی است که عدد کورانت $C_N = a\Delta t/\Delta x$ در محاسبات عددی حاضر برابر با یک است. نتایج به‌دست آمده از شبیه در مقایسه با داده‌های اندازه‌گیری قبل از واسنجی فراسنج‌ها در مبدل‌های (T1, T4, T5, T6) در شکل شماره (۲) نشان داده شده‌اند.

به منظور واسنجی و تعیین ضرایب تصحیح، حل تابع هدف بیان شده بوسیله‌ی الگوریتم ژنتیک انجام گرفته است. الگوریتم ژنتیک استفاده شده از نوع پیوسته^۲ بوده و شامل مراحل معیار تولید جمعیت اولیه، محاسبه‌ی مقدار تابع هدف نظیر هر کروموزوم^۴، انتخاب طبیعی والدین (به روش تورنومنت^۵)، تبادل ژنی^۶ و تولید فرزندان (به روش یکنواخت^۷) و جهش ژنی^۸ می‌شود. در الگوریتم ژنتیک به کار رفته، حدود تغییرات متغیرهای تصمیم‌گیری مسئله برای تمامی فراسنج‌ها ($\alpha, \beta, \gamma, \omega$) بین ۰/۵ تا ۱/۵ در نظر گرفته شده‌اند. در روند بهینه‌سازی از ۸۰ کروموزوم به‌عنوان جمعیت اولیه و ۴۰ کروموزوم به‌عنوان جمعیت نسل‌های تکاملی استفاده شده است. تبادل ژنی به صورت یکنواخت و جهش ژنی به صورت خطی از ۰/۰۵ در اولین نسل تا ۰/۰۱ در نسل انتهایی در نظر گرفته شده است. شکل شماره (۳)، روند کمینه‌سازی تابع هدف را تا ۳۰ نسل نشان می‌دهد. تعداد

² transducers

³ real genetic algorithm

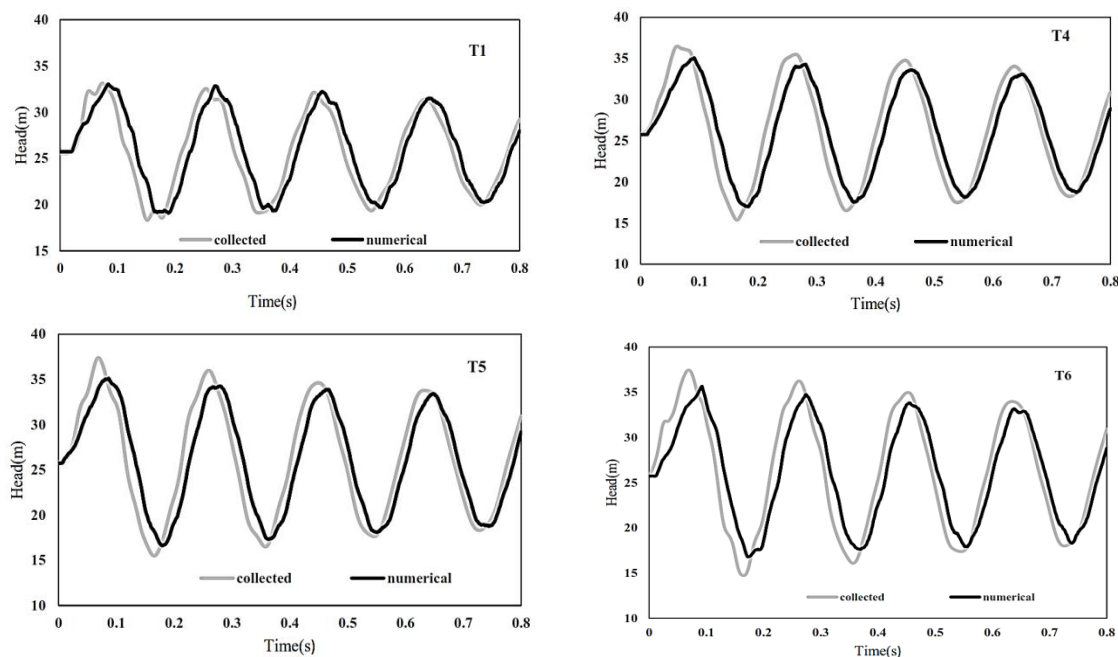
⁴ chromosome

⁵ tournament

⁶ crossover

⁷ uniform crossover

⁸ mutation

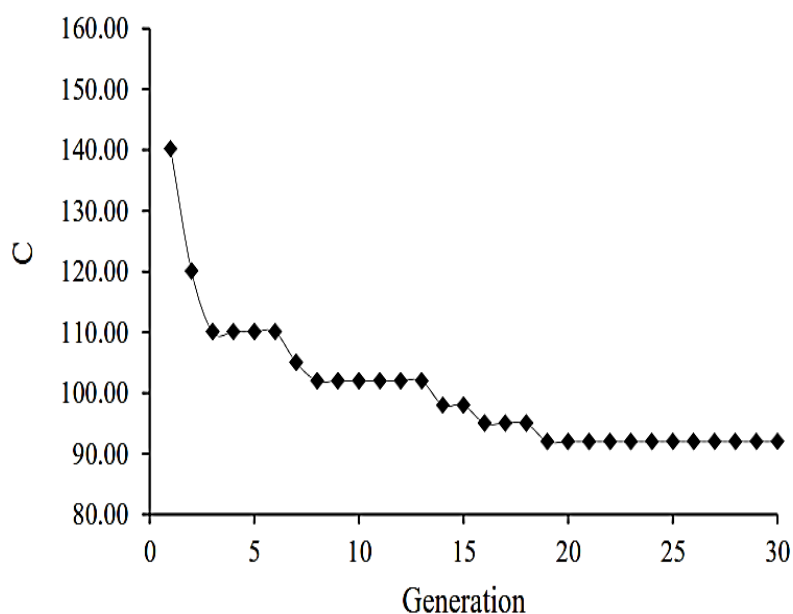


شکل ۲- مقایسه‌ی نتایج شبیه با مقادیر اندازه‌گیری شده پیش از واسنجی ضرایب در مبدل‌های T1, T3, T4, T5

کاهش یافته است. اگرچه باید میزان کمینه مطلق تابع هدف صفر باشد، اما وجود محدودیت‌های شبیه‌سازی و خطاهای اندازه‌گیری امکان دستیابی به مقدار صفر را نمی‌دهد. با این حال واسنجی، بهترین شرایط ممکن را برای شبیه‌سازی عددی به وجود می‌آورد و نتایج شبیه‌سازی را به مقادیر اندازه‌گیری شده نزدیک‌تر می‌نماید.

ارزیابی‌ها برای رسیدن به همگرایی برابر با ۱۲۴۰ مرتبه است. رایانه به کار گرفته شده دارای پردازشگر با مشخصات Cpu core i7 و Ram 8 Gb است. زمان همگرایی و رسیدن به جواب مسئله در حدود ۱۲۰ دقیقه به طول انجامیده است.

مطابق شکل (۳)، مقدار تابع هدف از ۱۴۰ در ابتدا به ۹۲/۱۵ در ۳۰ امین تولید نسل در الگوریتم ژنتیک



شکل ۳- بهینه‌سازی تابع هدف با استفاده از الگوریتم ژنتیک به منظور یافتن ضرایب واسنجی سامانه

جدول ۲- ضرایب تصحیح به دست آمده پس از اعمال بهینه سازی

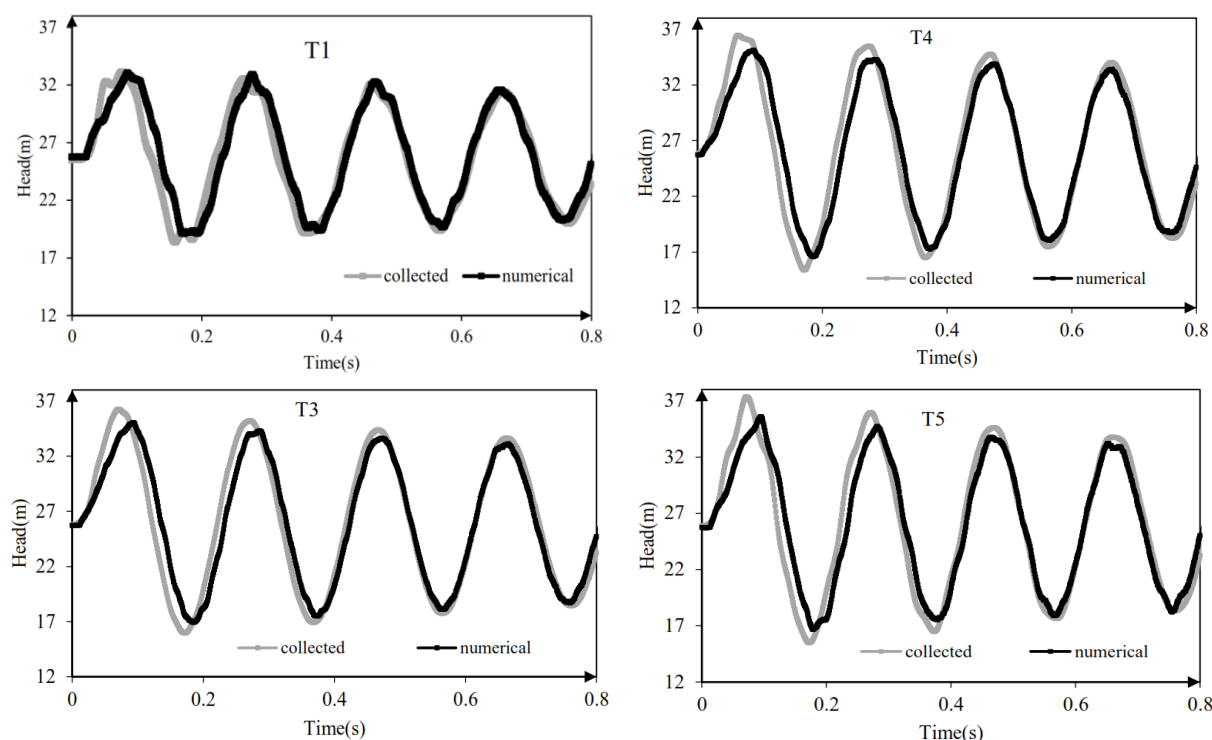
شماره ی لوله	ضریب α	ضریب β	ضریب γ	ضریب ω
۱	۰/۹۱۱۹۵۴	۱/۳۲۵۵۰۹	۱/۲۴۸۶۴۱	۰/۹۹۷۹۱۶
۲	۱/۲۱۸۹۵۴	۱/۰۸۴۰۷۸	۱/۱۰۰۰۷۵	۰/۹۹۷۹۱۶
۳	۱/۱۹۵۹۳۸	۱/۱۲۸۹۸۲	۱/۲۱۹۳۰۹	۰/۹۹۷۹۱۶
۴	۱/۱۶۱۲۸۵	۱/۰۰۴۶۰۶	۰/۹۷۸۰۳۹	۰/۹۹۷۹۱۶
۵	۱/۱۶۴۴۷۱	۱/۰۳۷۲۱۴	۱/۱۴۴۸۵۵	۰/۹۹۷۹۱۶
۶	۱/۱۴۹۴۱۳	۱/۰۱۷۶۲۶	۱/۲۸۸۷۹	۰/۹۹۷۹۱۶
۷	۱/۱۹۲۸۹۹	۱/۰۷۶۳۷۱	۱/۰۲۰۱۰۸	۰/۹۹۷۹۱۶
۸	۱/۰۶۲۵۰۲	۱/۱۹۵۶۹۵	۱/۰۲۸۰۱۸	۰/۹۹۷۹۱۶
۹	۱/۲۷۲۸۷۸	۱/۳۰۱۲۸۵	۱/۱۶۷۸۷۹	۰/۹۹۷۹۱۶
۱۰	۱/۳۰۳۵۰۲	۱/۲۳۷۲۳۲	۱/۲۲۷۷۹۴	۰/۹۹۷۹۱۶
۱۱	۱/۲۳۹۸۳۶	۱/۰۷۳۴۷۲	۱/۲۳۰۹۲۳	۰/۹۹۷۹۱۶
۱۲	۱/۰۹۵۶۶۳	۰/۹۶۱۷۴۸	۱/۳۱۲۹۴۱	۰/۹۹۷۹۱۶
۱۳	۱/۰۹۱۹۷۶	۰/۹۲۵۲۷۵	۱/۳۷۰۳۰۵	۰/۹۹۷۹۱۶
۱۴	۱/۱۹۵۸۴۳	۱/۳۸۳۵۶	۱/۰۷۶۳۴۴	۰/۹۹۷۹۱۶
۱۵	۱/۹۲۴۷۰۸	۱/۰۹۴۱۷۲	۱/۲۳۵۲۵۱	۰/۹۹۷۹۱۶
۱۶	۱/۲۱۷۶۰۵	۱/۱۵۴۷۱۲	۰/۹۰۱۰۳۳	۰/۹۹۷۹۱۶
۱۷	۱/۱۵۳۸۵۱	۱/۲۷۴۴۱	۱/۰۰۵۹۱۹	۰/۹۹۷۹۱۶
۱۸	۱/۱۵۶۱۹۲	۰/۸۹۲۸۲	۱/۱۸۳۷۳۸	۰/۹۹۷۹۱۶
۱۹	۱/۱۹۲۱۱۸	۱/۰۹۹۶۹۲	۱/۱۶۷۸۱۴	۰/۹۹۷۹۱۶

پس از واسنجی، برای تأمین اعتبار شبیه و سنجش دقت آن، از صحت سنجی استفاده می شود. اطلاعات استفاده شده در صحت سنجی متفاوت با واسنجی هستند. به همین منظور، از داده های فشار به دست آمده از مبدل های T2 و T6 استفاده شده اند. در شکل شماره ی (۵) مقادیر فشار مشاهداتی و محاسباتی مربوط به مبدل های T2 و T6 نشان داده شده اند. معیار میانگین مجذور مربعات خطا ($RMSE^1$) برای سنجش اختلاف داده های مشاهداتی و محاسباتی در صحت سنجی در نظر گرفته شده است که مقدار آن برابر با ۲/۰۶ متر است.

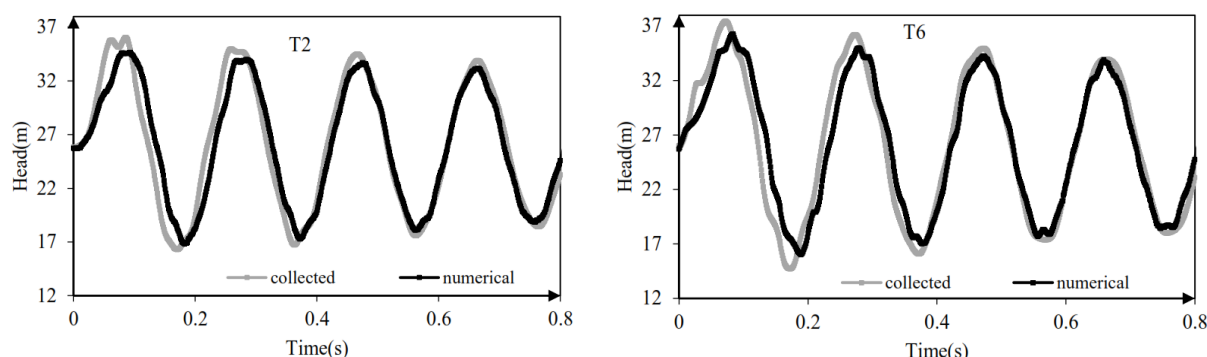
ضرایب تصحیح به دست آمده برای تمامی لوله ها در شبکه در جدول شماره (۲) ارائه شده اند. با توجه به یکسان بودن مشخصات خطوط لوله به کار گرفته شده در این آزمایش مقدار ضریب اصلاحی ω برای تمامی لوله ها یکسان در نظر گرفته شده است. این ضریب در حالت کلی (شبکه های واقعی توزیع آب) باید متغیر در نظر گرفته شود.

در شکل شماره (۴)، نتایج نوسان های فشار ناشی به دست آمده از شبیه در مقایسه با مقادیر اندازه گیری شده پس از واسنجی ضرایب تصحیح در مبدل های (T1، T3، T4 و T5) نشان داده شده اند.

¹ root mean square error



شکل ۴- مقایسه نتایج شبیه با مقادیر اندازه‌گیری شده پس از واسنجی ضرایب در مبدل‌های T1, T4, T3, T5



شکل ۵- مقایسه‌ی نتایج شبیه با مقادیر اندازه‌گیری شده در مرحله‌ی صحت سنجی در مبدل‌های T2, T6

ماندگار و سرعت انتشار موج. برای هر کدام از فراسنج‌های عنوان شده ضریبی تحت عنوان ضریب اصلاحی تعریف شد که در معادله‌های حاکم بر جریان گذرا شامل معادله‌های پیوستگی و اندازه‌حرکت ترتیب اثر داده شد. نحوه‌ی دستیابی به این ضرایب از طریق حل معکوس مسئله انجام شد. به منظور ارزیابی روش پیشنهاد شده شبیه آزمایشگاهی به کار گرفته شد. در نهایت، پس از حل معکوس مسئله با توجه به اطلاعات مشاهداتی موجود، این ضرایب به‌دست آمدند.

نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر، روش شبیه‌سازی بر پایه‌ی تحلیل معکوس جریان گذرا به سبب برتری و قدرتمند بودن این روش در شناسایی تغییرات در ساختار سامانه همچون میزان زبری لوله‌ها انتخاب شد. پس از آن مهم‌ترین فراسنج‌هایی که نقش مهمی را در شکل‌گیری و میرایی نوسان‌های فشار دارند معرفی شدند. این فراسنج‌ها عبارت بودند از ضریب زبری خطوط لوله، جمله‌ی شتاب محلی، شتاب جابه‌جایی در شبیه‌سازی افت غیر

- 5) Covas, D., & Ramos, H. 2001. Hydraulic transients used for leakage detection in water distribution systems. In 4th International Conference on Water Pipeline Systems.
- 6) Covas, D., Ramos, H., Brunone, B., & Young, A. 2004. Leak detection in water trunk mains using transient pressure signals: Field tests in Scottish water. In *International conference on pressure surges*.
- 7) Daily, J. W., Hankey Jr, W. L., Olive, R. W., & Jordaan Jr, J. M. 1955. Resistance coefficients for accelerated and decelerated flows through smooth tubes and orifices. Massachusetts inst of tech Cambridge, (No. 55-SA-78).
- 8) Haghghi, A., & Ramos, H. M. 2012. Detection of leakage freshwater and friction factor calibration in drinking networks using central force optimization. *Water resources management*, 26(8), 2347-2363.
- 9) Huang, Y. C., Lin, C. C., & Yeh, H. D. 2015. An optimization approach to leak detection in pipe networks using simulated annealing. *Water Resources Management*, 29(11), 4185-4201.
- 10) Jung, B., & Karney, B. 2008. Systematic exploration of pipeline network calibration using transients. *Journal of Hydraulic Research*, 46(sup1), 129-137.
- 11) Kapelan, Z. S., Savic, D. A., & Walters, G. A. 2003. A hybrid inverse transient model for leakage detection and roughness calibration in pipe networks. *Journal of Hydraulic Research*, 41(5), 481-492.
- 12) Liggett, J. A., & Chen, L.-C. 1994. Inverse transient analysis in pipe networks. *Journal of hydraulic engineering*, 120(8), 934-955.
- 13) 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.
- 14) Vardy, A., & Brown, J. 1996. On turbulent, unsteady, smooth-pipe friction. In BHR group conference series publication (Vol. 19, pp. 289-312).

پیش از واسنجی، با توجه به تخمین اطلاعات ورودی، شروع شبیه‌سازی با یک میزان خطا همراه خواهد بود. در روند حل عددی مسئله با انتقال خطا در گام‌های زمانی متوالی، این میزان خطا ممکن است که در گام‌های زمانی طولانی‌تر بسیار افزایش یابد. این امر موجب کاهش اعتمادپذیری به نتایج می‌شود و بر سیاست‌های بهره‌برداری بهینه از شبکه‌های توزیع آب شهری تأثیر منفی خواهد گذاشت. به منظور رفع این مشکل لازم است تا شبیه عددی نسبت به فراسنج‌های غیر قطعی واسنجی شود. در واسنجی صورت گرفته با وجود اینکه میزان اختلاف موجود بین مقادیر محاسباتی و مشاهداتی به صفر نرسیده، ولی این میزان اختلاف به اندازه ۳۳ درصد کاهش پیدا کرده است. اگرچه این میزان کاهش اختلاف چندان محسوس نیست اما این نکته را باید در نظر گرفت که تفاوت میان نتایج به دست آمده قبل و بعد از واسنجی در صورتی که شرایط سامانه به شرایط واقعی‌تر نزدیک شود بیشتر خواهد شد. به مفهوم دیگر اگر زمان بهره‌برداری از شبکه و تعداد شرایط مرزی (تعداد خط لوله، انشعاب‌ها، تلمبه و غیره) افزایش پیدا کند، در این صورت نیز تأثیر واسنجی بیشتر نمایان خواهد شد.

منابع

- 1) Bergant, A., Ross Simpson, A., & Vitkovsk, J. 2001. Developments in unsteady pipe flow friction modelling. *Journal of Hydraulic Research*, 39(3), 249-257.
- 2) Brunone, B., Golia, U. M., & Greco, M. 1991. Modelling of fast transients by numerical methods. In Proc. Int. Conf. on Hydr. Transients With Water Column Separation (pp. 273-280).
- 3) Brunone, B., Golia, U. M., & Greco, M. 1995. Effects of two-dimensionality on pipe transients modeling. *Journal of Hydraulic Engineering*, 121(12), 906-912.
- 4) Chaudhry, M. H. 2014. *Applied Hydraulic Transients* (p. 503). Springer New York.

- 15) Vítkovský, J. P., Simpson, A. R., & Lambert, M. F. 2000. Leak detection and calibration using transients and genetic algorithms. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 126(4), 262-265.
- 16) Vítkovský, 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.
- 17) Zielke, W. 1968. Frequency-dependent friction in transient pipe flow. *Journal of Fluids Engineering*, 90(1), 109-115.

