

کالیبراسیون پارامترهای با اثرات دینامیکی در مدل سازی شبکه های خطوط لوله با تحلیل معکوس جریان گذرا در حوزه فرکانس

محمد هادی رنگین کمان^۱، علی حقیقی^۲، حسین محمد ولی سامانی^۳

۱- دانشجوی دکترای عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه شهید چمران اهواز

۲- دانشیار گروه عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه شهید چمران اهواز
(نویسنده مسئول) a.haghighi@scu.ac.ir

۳- استاد گروه عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه شهید چمران اهواز

(دریافت ۹۴/۳/۱ پذیرش ۹۵/۲/۵)

چکیده

بروز جریان های گذرا به دلیل شرایط بهره برداری در شبکه های آبرسانی امری اجتناب ناپذیر است. بنابراین تحلیل شبکه های آبرسانی برای جریان گذرا، جهت افزایش اعتمادپذیری سیستم امری ضروری است. از طرفی، دقت یک تحلیل به میزان زیادی وابسته به پارامترهای مختلف ورودی به مدل از قبیل زبری جدار لوله ها، اثرات نوسانی ضریب افت غیرمادگار و سرعت موج در لوله ها است. از آنجا که تعیین قطعی این پارامترها در عمل امکان پذیر نیست، این مسئله معمولاً از طریق کالیبراسیون سیستم مورد مطالعه و عمدتاً با روش های سعی و خطا و قضاوت مهندسی انجام می شود. خطوط لوله دارای پیچیدگی های ذاتی در تحلیل هیدرولیکی هستند. از سوی دیگر تعداد و اثرگذاری متقابل پارامترهای دینامیکی در این شبکه ها قابل توجه بوده و تشخیص صریح نقش هر یک در پاسخ های سیستم بسیار دشوار به نظر می رسد. از این رو برای کالیبراسیون شبکه های خطوط لوله تحت فشار تحت جریان های گذرا نیاز به استفاده از روش ها و مدل های سیستماتیک تر است. در این تحقیق با استفاده از تحلیل معکوس جریان گذرا در حوزه فرکانس، به چگونگی تخمین این پارامترها پرداخته شد. روش حل مسئله کالیبراسیون به صورت معکوس بر پایه یک سری اندازه گیری ها و محاسبات پایه گذاری شد، به گونه ای که در آن سعی شد تا تابع هدف با پیدا کردن پاسخ بهینه به حداقل مقدار خود برسد. روش ارائه شده با استفاده از یک مدل آزمایشگاهی مرجع مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج به دست آمده نشان می دهد که استفاده از این روش علاوه بر اینکه نتایج رضایت بخشی در پی دارد، در عمل ساده بوده و از سرعت بالاتری نسبت به روش معکوس تحلیل جریان گذرا در حوزه زمان برخوردار است.

واژه های کلیدی: کالیبراسیون، شبکه خطوط لوله، تحلیل معکوس، جریان گذرا، حوزه فرکانس

۱- مقدمه

معادلات، به منظور رسیدن به پاسخ های صحیح و قابل قبول، نیاز به اطلاعات اولیه دقیق از قبیل زبری جدار لوله، اثرات نوسانی افت اصطکاک گذرا و سرعت انتشار موج در لوله ها می باشد. عدم قطعیت در تعیین این پارامترها می تواند به میزان زیادی بر نتایج به دست آمده تأثیر بگذارد که به منظور بررسی بیشتر می توان به پژوهش حقیقی و کرامت در سال ۲۰۱۲، مراجعه نمود که در آن با استفاده از تئوری فازی، تأثیر عدم قطعیت پارامترهای ورودی بر نتایج تحلیل جریان گذرا در خطوط لوله بررسی شده است (Haghighi & Keramat 2012).

در سال های اخیر مدل های متنوعی به منظور کالیبراسیون و تعیین نشت در شبکه خطوط لوله بر پایه تحلیل معکوس جریان

جریان های گذرای که در سیستم های آبرسانی به وسیله عوامل مختلفی چون مانور شیرها و یا عملکرد پمپ ها ایجاد می شوند، می توانند منجر به بروز فشارهای ضربه قوچ و در نهایت شکستگی لوله ها و اتصالات، افزایش نشت و ورود آب های آلوده و تحمیل هزینه های بهره برداری و زیست محیطی هنگفت به سیستم شوند. با توجه به اینکه ایجاد جریان گذرا در یک سیستم آبرسانی اجتناب ناپذیر است، مدل سازی و تحلیل سیستم تحت جریان های گذرا نیز ضروری است. به این منظور، از حل عددی معادلات دیفرانسیل جزئی حاکم بر خطوط لوله شامل معادلات یک بعدی مونتوم و پیوستگی در حالت گذرا استفاده می شود. فارغ از روش حل

برنامه‌ریزی درجه دو ترتیبی^۵ به‌عنوان حل‌کننده مسئله استفاده شد. SQP یک روش کلاسیک ریاضی بر پایه محاسبات شیب^۶ است که برای شروع محاسبات نیازمند به حدس اولیه است (Shamloo & Haghghi 2009).

حقیقی در سال ۱۳۸۹، با استفاده از تحلیل معکوس جریان‌گذرا با استفاده از خطوط مشخصه به کالیبراسیون مقادیر زبری لوله، اثر نوسانی اصطکاک گذرا و سرعت موج در خطوط لوله پرداخت. در مقاله مذکور به‌منظور حل مسئله بهینه‌سازی غیر خطی از الگوریتم ژنتیک استفاده شده است (Haghghi 2010).

در طول سال‌های اخیر، روش تحلیل معکوس توسط محققان زیادی بررسی و اصلاح شده است که در کلیه کارهای انجام شده، از حل معادلات جریان‌گذرا در حوزه زمان استفاده شده است. در روش‌های حوزه زمان به‌منظور حل معادلات حاکم باید فضای حل از نظر مکانی و زمانی گسسته‌سازی شود. این گسسته‌سازی‌ها به‌منظور حفظ پایداری حل عددی دارای محدودیت‌های خاصی هستند که این امر می‌تواند بر دقت نتایج تأثیرگذار باشد. مسئله دیگری که در خصوص گسسته‌سازی وجود دارد، ایجاد گره‌های محاسباتی در فضای حل است. از آنجایی که معادلات باید برای کلیه این گره‌ها حل شوند و از طرفی در طراحی یک سیستم فقط مقادیر فشار در گره‌های اصلی کافی است، وجود گره‌های محاسباتی باعث افزایش بار محاسبات و زمان انجام تحلیل به‌خصوص در شبکه‌های بزرگ خواهد شد. این امر هنگامی می‌تواند بسیار مشکل‌ساز باشد که مدل هیدرولیکی در حل معکوس، جهت کالیبراسیون و یا تعیین نشت استفاده شود زیرا در این هنگام ممکن است بسته به مسئله، نیاز به صدها بار اجرای مدل طی فرایند بهینه‌سازی باشد. بنابراین افزایش سرعت مدل‌سازی در افزایش سرعت عملیات کالیبراسیون و قابلیت تکرار چندباره آن بسیار مؤثر است. پس می‌توان به جای حل معادلات در حوزه زمان از حوزه فرکانس بهره برد. روش‌های حوزه فرکانس با توجه به اینکه از حل تحلیلی معادلات حاکم در حوزه فرکانس استفاده می‌کنند، برای محاسبه مقادیر هد و دبی در ابتدا یا انتهای لوله نیازی به گسسته‌سازی مکانی ندارند. بنابراین دیگر هیچ گره محاسباتی در طول لوله‌ها ایجاد نخواهد شد و فرایند حل مستقیم خواهد بود. این

گذرا در حوزه زمان توسعه داده شد (Ligget & Chen 1994; Vitkovsky et al. 2000; Kapelan et al. 2002, 2003, 2004; Jung & Karney 2008; Shamloo & Haghghi 2009, 2010; Haghghi & Ramos 2012).

در سال ۱۹۹۴، به‌منظور تخمین دقیق ضرایب اصطکاک و نیل به پاسخ‌های قابل اعتماد در روش‌های نشت‌یابی، ضرایب افت ماندگار لوله‌ها با استفاده از تحلیل معکوس جریان‌گذرا محاسبه شد. در این روش، با تعریف یک تابع هدف با معیار کمینه‌سازی، اختلاف مربعات مقادیر محاسباتی و اندازه‌گیری فشار در نقاط حساس شبکه و در قالب یک مسئله بهینه‌سازی غیر خطی، با استفاده از لونیبرگ مارکوورت^۱ به تعیین مجهولات مسئله پرداخته شد (Ligget & Chen 1994).

در سال ۲۰۰۰، روشی به‌منظور نشت‌یابی و کالیبراسیون شبکه‌های آبرسانی بر پایه تحلیل معکوس جریان‌گذرا و روش بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک^۲ ارائه شده است. تنها تفاوت این کار با تحقیق قبلی جایگزینی روش GA به جای روش LM در حل مسئله معکوس بوده است (Vitkovsky et al. 2000).

در پژوهش‌هایی در سال ۲۰۰۲ و ۲۰۰۳ با استفاده از روش حل معکوس جریان‌گذرا در خطوط لوله و استفاده از یک برنامه بهینه‌سازی هیبریدی^۳، به تعیین همزمان ضرایب افت و نشت پرداخته شده است (Kapelan et al. 2003; 2004). روش پیشنهادی این محققان در ادامه و جهت ارتقاء دو روش قبل توسعه داده شد. با ترکیب روش‌های LM و GA یک روش بهینه‌سازی هیبریدی ارائه شد که در دو مرحله ابتدا محدوده نقطه بهینه مطلق با اجرای GA محاسبه می‌شد و پس از آن LM در فضای محدودتری که از GA به‌دست آمده بود به‌دنبال جواب دقیق‌تر می‌گشت. با این کار، علاوه بر اینکه از سرعت کم GA در رسیدن به نقطه بهینه مطلق کاسته می‌شد، مشکل محلی بودن روش LM نیز حل شد (Kapelan et al. 2003; 2004).

شاملو و حقیقی در سال ۲۰۰۹، به‌منظور کالیبراسیون ضرایب افت ماندگار و نشت در یک سیستم تک لوله روشی جدید با نام تحلیل معکوس جریان‌گذرای عقب‌گرد^۴ توسعه دادند. این روش بر پایه روش معکوس بوده و به‌منظور تحلیل جریان‌گذرا در آن از روش خطوط مشخصه عقب‌گرد استفاده شده است. در این مطالعه از

¹ Levenberg-Marquardt (LM)

² Genetic Algorithms (GA)

³ Hybrid optimization

⁴ Inverse Backward Transient Analysis (IBTA)

⁵ Sequential Quadratic Programming (SQP)

⁶ Gradient-based Method

مبتنی بر یک حالت اولیه یا پایدار است و عملگر * بیانگر کانولوشن است. روش توسعه معادلات جریان گذرا در حوزه فرکانس و استفاده از آن در تحقیقات متعدد به طور کامل توضیح داده شده است (Wylie & Streeter 1993). به طور خلاصه می توان گفت که در مرحله اول با جایگزین نمودن روابط $H=(h+H_0)$ و $Q=(q+Q_0)$ ، که در آنها زیر نویس "0" نشان دهنده مقدار متغیر در شرایط اولیه یا حالت پایدار، است و متغیرهای h و q به ترتیب میزان تغییرات لحظه ای هد، و میزان تغییرات لحظه ای دبی نسبت به حالت پایدار یا شرایط اولیه می باشند، در معادلات ۱ و ۲ و خطی نمودن عبارت افت در معادله ۲، معادلات ۳ و ۴ که روابط خطی حاکم بر جریان گذرا در حوزه زمان هستند، به دست می آیند.

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{a_0^2}{gA_0} \frac{\partial q}{\partial x} = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial h}{\partial x} + \frac{1}{gA_0} \frac{\partial q}{\partial t} + \frac{f_0|Q_0|}{gD_0A_0^2} q + \frac{16v}{gD_0^2A_0} \left(\frac{\partial q}{\partial t} * W_0 \right) (t) = 0 \quad (4)$$

سیس در مرحله دوم از تمام جملات معادلات ۳ و ۴ تبدیل فوریه گرفته می شود که معادلات ۵ و ۶ به دست می آید

$$i\omega \hat{h} + \frac{a_0^2}{gA_0} \frac{d\hat{q}}{dx} = 0 \quad (5)$$

$$\frac{d\hat{h}}{dx} + \left(\frac{i\omega}{gA_0} + \frac{f_0|Q_0|}{gD_0A_0^2} + \frac{i\omega \hat{W}016v}{2D_0^2A_0} \right) \hat{q} = 0 \quad (6)$$

معادلات ۵ و ۶ معادلات جریان گذرا در حوزه فرکانس هستند که در آن $i = \sqrt{-1}$ ، ω فرکانس زاویه ای و علامت " ^ " نشان دهنده مقدار متغیر در حوزه فرکانس است. حل این دو معادله برای یک لوله به طول l ، برای فرکانس ω ، به قرار زیر است (Chaudhry 2014)

$$\hat{q}_D = (\cosh \mu l) \hat{q}_U - \frac{1}{Z} (\sinh \mu l) \hat{h}_U \quad (7)$$

$$\hat{h}_D = -Z (\sinh \mu l) \hat{q}_U + (\cosh \mu l) \hat{h}_U \quad (8)$$

که در آن

اندیس U نشان دهنده مقدار متغیر در بالادست لوله و اندیس D به معنی مقدار متغیر در پایین دست لوله است و مقادیر μ ثابت

امر می تواند به مقدار زیادی از محاسبات اضافی که در حوزه زمان انجام می شد، بکاهد. در پژوهشی در سال ۲۰۱۰ به میزان تأثیر استفاده از حوزه فرکانس بر سرعت محاسبات نسبت به حوزه زمان پرداخته شده است (Covas & Ramos 2001; Kim 2010).

علاوه بر این نتایج تحلیل جریان گذرا در حوزه فرکانس مزایای بی شماری دارد که از آن جمله می توان به انعکاس واضح عوارض موجود در شبکه (نشت، گرفتگی، انشعاب، اثرات فرکانسی اصطکاک و غیره)، مقاومت بالای سیگنال در مقابل اغتشاشات و حاکم بودن خاصیت جمع آثار قوا نام برد. بنابراین در دهه اخیر استفاده از تحلیل در حوزه فرکانس در حل مسائل مختلف هیدرولیکی رشد روز افزونی داشته است. استفاده از تحلیل در حوزه فرکانس در مسائل کارگاهی و آزمایشگاهی همانند مشابه آن در حوزه زمان، برای رسیدن به نتایج با دقت مناسب نیاز به کالیبراسیون دارد.

در تحقیق حاضر نحوه کالیبراسیون شبکه های خط لوله با استفاده از تحلیل معکوس جریان گذرا در حوزه فرکانس بیان شد. پس از آن با استفاده از یک مدل فیزیکی مرجع آزمایشگاهی، روش ارائه شده مورد آزمایش و بررسی قرار گرفت.

۲- معادلات حاکم

معادلات پیوستگی و مونتوم حاکم بر جریان گذرا در خطوط لوله تحت فشار با در نظر گرفتن اثرات اصطکاک غیرماندگار به صورت زیر است (Vitkovsky et al. 2011)

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{a_0^2}{gA_0} \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial H}{\partial x} + \frac{1}{gA_0} \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{f_0|Q|}{2gD_0A_0^2} + \frac{16v}{gD_0^2A_0} \left(\frac{\partial Q}{\partial t} * W \right) (t) = 0 \quad (2)$$

که در آن

H هد، a سرعت موج، g شتاب جاذبه، D قطر لوله، A سطح مقطع، ρ چگالی سیال، v ویسکوزیته سینماتیکی سیال، W تابع وزنی اصطکاک غیر ماندگار، x فاصله در طول لوله، t زمان می باشد. زیر نویس 0 نیز در بعضی از متغیرها بیان گر آن است که آن متغیر

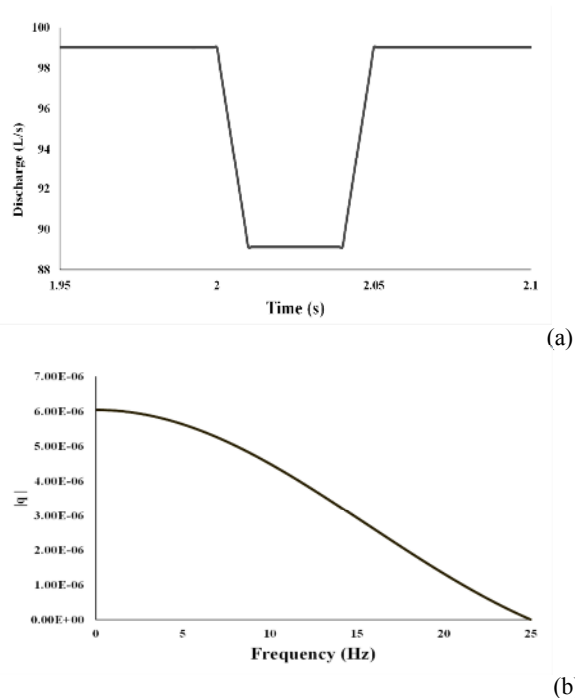


Fig. 1. Hypothetical stimulation a) in the time domain and b) in the frequency domain
 شکل ۱- نمایش تحریک فرضی در (a) حوزه زمان و (b) حوزه فرکانس

حال هدف از تحلیل جریان گذرا در حوزه فرکانس محاسبه پاسخ فرکانسی سیستم مورد مطالعه نسبت به یک تحریک مشخص (به عنوان مثال شکل ۱- b) است. به این ترتیب که پاسخ آن سیستم برای تک تک این موج‌های نوسانی موجود در سیگنال تحریک با استفاده از روابط ۷ و ۸ محاسبه می‌شود. بعد از آن، مجموعه پاسخ‌های به دست آمده از آن سیستم برای هر یک از موج‌های تحریک در مقابل فرکانس آن موج رسم می‌شود که به آن نمودار پاسخ فرکانسی^۳ سیستم گفته می‌شود. FRD یک سیستم در حقیقت طیفی است که دامنه نوسانات فشار را به ازای هر فرکانس نشان می‌دهد و با تبدیل فوریه معکوس گرفتن از آن می‌توان به نمودار فشار زمان دست یافت. در واقع حوزه فرکانس نمایش دیگری از جریان گذرا می‌باشد که با توجه به اینکه می‌تواند اثر عوارض موجود در یک سیستم نظیر نشت، گرفتگی و انشعاب را با وضوح بالاتری نسبت به حوزه زمان بیان کند در دهه اخیر مورد توجه خاص پژوهشگران مختلف قرار گرفته است.

انتشار^۱، امپدانس مشخصه^۲، R_S بخش اصطکاک ماندگار و R_U بخش اصطکاک غیر ماندگار به ترتیب به صورت زیر هستند

$$\mu = \frac{i\omega}{a_0} \sqrt{(1 + R_S + R_U)} \quad (9)$$

$$Z = \frac{a_0}{gA_0} \sqrt{(1 + R_S + R_U)} \quad (10)$$

$$R_S = \begin{cases} \frac{32\nu}{i\omega D_0^2} & \text{for laminar flow} \\ \frac{f_0 |Q_0|}{i\omega D_0 A_0} & \text{for turbulent flow} \end{cases} \quad (11)$$

$$R_U = \frac{v16\hat{W}_0}{D_0^2} \quad (12)$$

با استفاده از روابط ۷ و ۸ به راحتی می‌توان بر اساس شرایط بالادست لوله، مقادیر هد و دبی را در حوزه فرکانس، برای هر نقطه دلخواه از لوله و به ازای فرکانس مد نظر به طور مستقیم محاسبه کرد. در بحث جریان گذرا، یک سیگنال در حوزه زمان که معمولاً شامل تغییرات دبی یا فشار در مقابل زمان است، در حوزه فرکانس به مجموعه‌ای از موج‌های نوسانی با فرکانس‌ها و دامنه‌های ثابت تبدیل می‌شود. رسم مقادیر دامنه نوسان این امواج در مقابل فرکانس آن‌ها، نمودار سیگنال مورد نظر در حوزه فرکانس را به دست می‌دهد. به عنوان یک مثال مرتبط با این تحقیق فرض شود که، شکل (۱- a) تغییرات ناگهانی دبی مصرفی را در یکی از گره‌های یک شبکه آبرسانی نشان می‌دهد. نمایش این سیگنال در حوزه فرکانس که از تبدیل فوریه این سیگنال به دست آمده در شکل (۱- b) نشان داده شده است.

شکل (۱- b) نشان می‌دهد که سیگنال مد نظر تشکیل یافته از حدود ۱۶۳۹ موج نوسانی با فرکانس‌ها و دامنه‌های ثابت است که فرکانس‌ها بین ۰ تا ۲۰ هرتز و دامنه‌های آن بین ۰ تا $10^{-6} \times 6$ متغیر است.

¹ Propagation constant

² Characteristic impedance

³ Frequency Respsns Diagram (FRD)

۳- روش تحلیل شبکه در حوزه فرکانس

پژوهشگران زیادی در مورد تحلیل شبکه در حوزه فرکانس، روش‌های مختلفی ارائه کرده‌اند (Vitkovsky et al. 2011; Wylie & Streeter 2011; Chaudhry 2014; Kim 2007, 2008; Zecchin et al. 2009) روش ویتکفسکی و همکاران در سال ۲۰۱۱ بر اساس روش ماتریس انتقال توسعه داده شده و روشی سیستماتیک است که قابلیت تحلیل شبکه با هر شکل دلخواه را داراست. روش تحلیل شبکه در این روش در چهار گام خلاصه می‌شود: (۱) نوشتن معادله پیوستگی در گره‌ها، (۲) نوشتن معادلات حاکم بر جریان گذرا (روابط γ و β) برای کلیه لوله‌ها، (۳) تشکیل دستگاه معادلات کل و (۴) حل دستگاه معادلات چند مجهولی. در این مقاله به منظور تحلیل شبکه در حوزه فرکانس بر پایه روش ویتکفسکی و همکاران در سال ۲۰۱۱، یک برنامه کامپیوتری که توانایی تحلیل هر شبکه با شکل دلخواه همراه با در نظر گرفتن اصطکاک غیرماندگار را داراست، توسعه داده شد که از این برنامه به منظور توسعه روش کالیبراسیون در حوزه فرکانس استفاده شد.

۴- روش تحقیق

همانطور که در بخش‌های بالا گفته شد، برای آن که بتوان از آنالیز جریان گذرا در یک سیستم آبرسانی چه در حوزه زمان و چه در حوزه فرکانس جواب مطمئن دریافت کرد داده‌های ورودی به مدل عددی باید تا حد ممکن دقیق باشند. اگرچه داده‌های ورودی مثل ضریب زبری و سرعت موج برای شرایط مختلف از مراجع گوناگون قابل دستیابی هستند اما این مقادیر در عمل و در شرایط کارگاهی و بهره‌برداری نیاز به تعدیل دارند. در این تحقیق با بهره‌گیری از آنالیز معکوس جریان گذرا در حوزه فرکانس، ضرایب α ، β و γ که به ترتیب ضرایب اصلاحی زبری جداره لوله، جمله اصطکاک غیر ماندگار و سرعت انتشار موج هستند، محاسبه شدند. روش حل مسئله کالیبراسیون به صورت معکوس بر پایه یکسری اندازه‌گیری‌ها و محاسبات پایه‌گذاری شده است، به گونه‌ای که در آن سعی می‌شود تا تابع هدف که تابعی با ورودی متغیرهای مجهول (در اینجا α ، β و γ) است و خروجی آن مجذور اختلافات فشار محاسباتی و مشاهداتی در نقطه شاهد است با پیدا کردن بهینه‌ترین پاسخ به حداقل مقدار خود برسد. به طور کلی گام‌های اصلی کالیبراسیون با

استفاده از تحلیل جریان گذرا به روش معکوس در حوزه فرکانس را می‌توان به صورت ساده، به قرار زیر بیان نمود:

گام اول: در یکی از گره‌های شبکه آبرسانی با تغییر سریع میزان مصرف، یک جریان گذرا ایجاد می‌شود و نوسانات فشار ناشی از این جریان گذرا در گره‌های شاهد نسبت به زمان اندازه‌گیری می‌شوند.

گام دوم: نوسانات فشار اندازه‌گیری شده در گام اول با استفاده از روش تبدیل فوریه سریع^۱ به حوزه فرکانس منتقل می‌شوند و به این ترتیب پاسخ فرکانسی مشاهداتی به دست می‌آید.

گام سوم: مدل عددی تحلیل جریان گذرا در حوزه فرکانس به صورت تابعی از ضرایب مجهول اصلاحی (α ، β ، γ) برای شبکه توسعه داده می‌شود.

گام چهارم: یک مسئله بهینه‌سازی غیر خطی که در آن تابع هدف برابر با مجموع مربعات اختلاف بین مقادیر پاسخ فرکانسی اندازه‌گیری و محاسبه شده مطابق معادله ۱۳ می‌باشد، تعریف می‌شود

$$C = \sqrt{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M (|h_{m_{ij}}| - |h_{n_{ij}}|)^2} \quad (13)$$

که در آن

$|h_{m_{ij}}|$ پاسخ فرکانسی اندازه‌گیری شده برای گره شاهد i ام در فرکانس j ام است (به دست آمده از گام دوم)، $|h_{n_{ij}}|$ پاسخ فرکانسی محاسبه شده برای گره شاهد i ام در فرکانس j ام (به دست آمده از گام سوم)، M تعداد فرکانس‌های موجود در پاسخ فرکانسی، N تعداد گره‌های شاهد در شبکه و C مقدار تابع هدف می‌باشد. قابل ذکر است ظاهر شدن علامت قدر مطلق در رابطه ۱۳ به دلیل این است که مقادیر h موهومی هستند و برای محاسبه دامنه نوسانات از عملگر قدر مطلق استفاده می‌گردد.

گام پنجم: با استفاده از یک الگوریتم بهینه‌ساز ضرایب مجهول اصلاحی (α ، β و γ) به گونه‌ای محاسبه می‌شود که تابع هدف (رابطه ۱۳) کمینه‌سازی شود. دلیل استفاده از الگوریتم بهینه‌ساز جهت حل مسائل کالیبراسیون به روش معکوس، آن است که در این مسائل به علت پیچیدگی روابط حاکم و همچنین بیشتر بودن تعداد مجهولات از تعداد معادلات حاکم، امکان حل آنها به روش مستقیم

¹ Fast Fourier Transform (FFT)

مختلف لوله‌ها در دسترس است اما مقادیر به دست آمده از این جداول مربوط به حالت آزمایشگاهی و ایده‌آل بوده و بنابراین استفاده از آنها در عمل و حالت‌های کارگاهی که سیستم آبرسانی مدت‌ها در حال بهره‌برداری بوده، می‌تواند خطای زیادی وارد محاسبات کند. بنابراین در این مرحله سیستم آبرسانی باید نسبت به پارامتر ε کالیبره شود. به این منظور متغیر اصلاحی α به صورت ضریب ε در معادله ۱۴ به صورت زیر وارد می‌شود

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left(\frac{\alpha \times \varepsilon}{3.7} + \frac{2.51}{\text{Re} \sqrt{f}} \right) \quad (15)$$

مقدار α برای هر لوله از شبکه مقدار متفاوتی خواهد بود و در حقیقت می‌توان گفت که این ضریب اصلاحی، برداری است که بُعد آن به اندازه تعداد لوله‌ها است.

۵-۲- اصطکاک غیرماندگار

علاوه بر ضرایب افت معمول در جریان‌های ماندگار و روند شناخته شده افت انرژی، یک منبع دیگر با ماهیت نوسانی و وابسته به زمان در جریان‌های گذرا وجود دارد که حاکم بر میرایی و شکل‌گیری سیگنال‌های نوسانات فشار و دبی در این جریان‌ها می‌باشد. میزان اثرگذاری این پدیده غیرماندگار، به مشخصه‌های سیال، جریان و عمدتاً به شدت نوسانات وابسته است. تا به امروز مدل‌سازی پدیده افت انرژی غیرماندگار، تنها با استفاده از روش‌های تجربی قابل انجام است (Haghighi 2009).

در این تحقیق، به منظور مدل‌سازی اصطکاک غیرماندگار از روش انتگرال کانولوشن و تابع وزنی وردی^۱ و برون^۲ ۱۹۹۶ (تابع وزنی برای لوله‌های صاف در حالت آشفته) استفاده شده است که به این ترتیب معادله ۱۲ به صورت زیر به دست می‌آید (Vitkovsky et al. 2003)

$$R_U = \frac{2i\omega}{gA} \left(\frac{i\omega D^2}{4v} + \frac{1}{C^*} \right)^{-\frac{1}{2}} \quad (16)$$

که در آن

C^* ضریب زوال برشی^۳ است که این ضریب برای جریان‌های

امکان‌پذیر نیست و باید از روش‌های بهینه‌سازی برای حل مسئله استفاده شود. در این تحقیق نیز به منظور حل مسئله از الگوریتم ژنتیک استفاده می‌شود.

توضیح ساده کالیبراسیون به روش معکوس به این قرار است که بعد از ایجاد یک جریان گذرا در سیستم، پاسخ فرکانسی مشاهداتی آن سیستم در نقاط شاهد به دست می‌آیند. بعد از آن، با بهره‌گیری از یک الگوریتم بهینه‌ساز در هر سعی، مقادیری برای پارامترهای مجهول (α ، β و γ) تخمین زده می‌شوند، این مقادیر تخمین زده شده به مدل عددی تحلیل جریان گذرا داده می‌شوند و به وسیله آن پاسخ فرکانسی محاسباتی به دست می‌آید. پاسخ فرکانسی محاسباتی با مشاهداتی مقایسه می‌شوند و در صورتی که این دو پاسخ بر هم منطبق شوند و یا به بیان دیگر تابع هدف به صفر رسیده باشد پارامترهای تخمین زده شده به عنوان پاسخ در نظر گرفته می‌شوند. در غیر این صورت الگوریتم تخمین جدیدی برای پارامترهای مجهول ارائه می‌نماید و تا رسیدن به شرایطی که پاسخ فرکانسی مشاهداتی و محاسباتی برهم منطبق شوند، ادامه می‌یابد.

۵- در نظر گرفتن ضرایب اصلاحی در مدل عددی تحلیل جریان گذرا

همانطور که در گام سوم روش ارائه شده در بخش قبل گفته شد، مدل عددی تحلیل جریان گذرا در حوزه فرکانس باید به صورت تابعی از ضرایب اصلاحی مجهول (α ، β و γ) توسعه داده شود. به منظور در نظر گرفتن این ضرایب در مدل عددی به قرار زیر عمل می‌شود

۵-۱- اصطکاک ماندگار

در حالت آشفته مقدار f_0 در رابطه $R_S = \frac{f_0 |Q_0|}{j\omega D_0 A_0}$ بر اساس شرایط جریان پایدار با استفاده از معادله کلبروک قابل محاسبه است

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left(\frac{\varepsilon}{3.7} + \frac{2.51}{\text{Re} \sqrt{f}} \right) \quad (14)$$

که در آن

ε زبری جداره لوله و بقیه پارامترها همانند قبل می‌باشند. مقدار ε بر اساس جداول تهیه شده مبتنی بر نتایج آزمایشگاهی برای انواع

¹ Vardy

² Brown

³ Shear decay coefficient

در کلیه لوله‌ها یکسان فرض می‌شود و فقط یک ضریب اصلاحی سرعت برای کل شبکه در نظر گرفته می‌شود.

۶- به‌کارگیری روش

در این بخش به‌منظور ارزیابی روش ارائه شده از یک سیستم آزمایشگاهی آبرسانی حلقوی، ساخته شده در آزمایشگاه منابع آب و هیدرولیک دانشکده عمران دانشگاه صنعتی لیسبون (IST)^۲ استفاده شد (Covas & Ramos 2001) (شکل ۲).

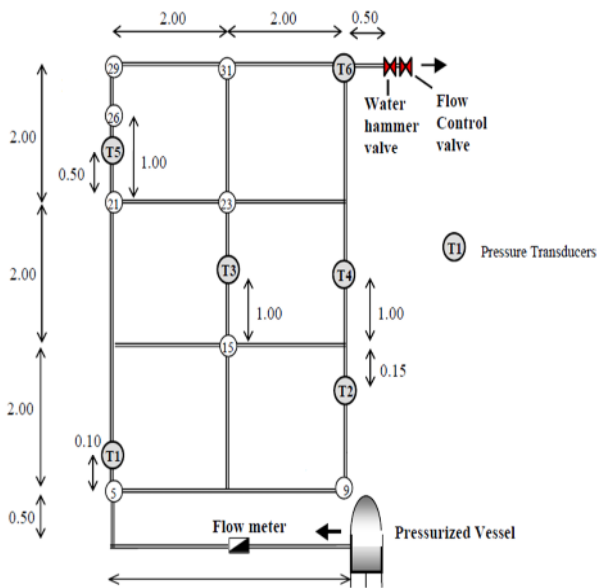


Fig.2. Experimental Model adapted from Ref. (Covas & Ramos 2001)

شکل ۲- مدل آزمایشگاهی براساس سیستم ارائه شده توسط Covas & Ramos 2001

هندسه این شبکه تشکیل شده است از شش حلقه مربعی شکل با ابعاد 2×2 m، یک مخزن تحت فشار جهت تغذیه سیستم با هد ثابت ۲۶ متر، یک شیر کنترل جریان خروجی و یک شیر ایجاد جریان گذرا که در انتهای سیستم تعبیه شده‌اند. همچنین جنس لوله‌های سیستم PVC شفاف با فشار اسمی 10 kg/m² (PN10) بوده که توسط چفت و بست‌های گسترده در طول و در محل گره‌ها و سایر اتصالات به‌طور کامل مهار شده‌اند تا از هر گونه حرکت طولی آنها در حین نوسانات جریان گذرا اجتناب شود. قطر داخلی

لایه‌ای 0.00476 است. اما برای جریان آشفته، به عدد رینولدز جریان متوسط، وابسته است و به‌صورت زیر محاسبه می‌شود

$$C^* = \frac{7.41}{Re^k}, \quad k = \log_{10} \left(\frac{14.3}{Re^{0.05}} \right) \quad (17)$$

اما از آنجا که مدل ارائه شده، آزمایشگاهی است، برای استفاده از آن نیاز به کالیبراسیون می‌باشد. به این منظور ضریب اصلاحی β به‌صورت زیر در معادله ۱۶ وارد می‌شود و به همین ترتیب در مدل عددی قرار می‌گیرد.

$$R'_U = \beta \times R_U \quad (18)$$

ضریب اصلاحی β نیز چون α ، برای هر کدام از لوله‌ها متغیر است و در حقیقت برداری است که درایه‌های آن به تعداد لوله‌ها است.

۵-۳- سرعت انتشار موج

سرعت انتشار موج را می‌توان با استفاده از رابطه ۱۹ که با توسعه معادله پیوستگی در کنار معادله تنش و کرنش در مقطع لوله به‌دست آمده، محاسبه نمود (Chaudhry 2014)

$$\alpha_0 = \sqrt{\frac{K/\rho}{1 + (k/E)\Psi}} \quad (19)$$

همانطور که رابطه ۱۹ نشان می‌دهد، سرعت اولیه انتشار موج α_0 به عواملی چون ضریب بالک^۱ K ، ضریب الاستیسیته E ، جرم مخصوص ρ و همچنین به خواص الاستیک لوله و رفتار سازه‌ای آن وابسته است که در این جا با پارامتر بدون بعد Ψ نشان داده شده است که مقدار آن از مراجع گوناگون قابل استخراج است. به‌منظور کالیبراسیون سرعت موج در اینجا از ضریب اصلاحی γ به‌صورت زیر استفاده می‌شود و به همین ترتیب در مدل عددی قرار می‌گیرد

$$a' = \gamma \alpha_0 \quad (20)$$

با توجه به اینکه جنس تمام لوله‌ها یکسان است، سرعت انتشار موج

² Instituto Superior Técnico (IST), Technical University of Lisbon

¹ Bulk Modulus

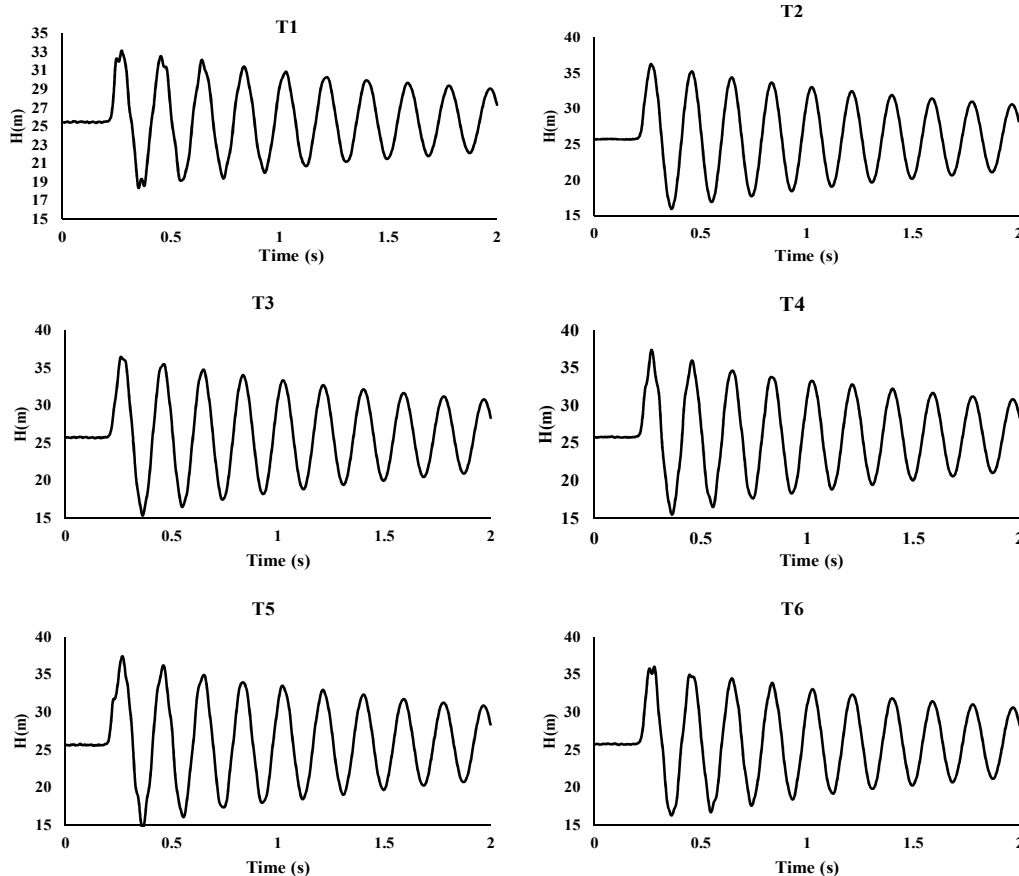


Fig. 3. Pressure variations versus time related to reference points T1 to T6

شکل ۳- نمودار تغییرات فشار در حوزه زمان مربوط به گره‌های شاهد T1 تا T6

خروجی از مخزن بالادست، مقدار دبی جریان اولیه و ماندگار تغذیه شده در سیستم را گزارش می‌دهد. در خصوص اندازه‌گیری دبی جریان ماندگار در خروجی نیز مخزن کوچکی حاوی یک سرریز مثلثی در انتهای سیستم در نظر گرفته شده است.

گام اول: در شرایط اولیه آزمایش با تنظیمات شیر کنترل جریان در پایین دست سیستم، دبی خروجی ماندگار برابر ۱ لیتر در ثانیه اندازه‌گیری شد. سپس با بستن شیر تولید جریان گذرا در مدت ۰/۰۸ ثانیه، جریان گذرا در سیستم تولید و منتشر می‌شد. شش سایت اندازه‌گیری T1 تا T6 در این آزمایش مجهز به مبدل‌های اندازه‌گیری و قادر به نمونه‌برداری از نوسانات فشار بودند. فرکانس نمونه‌برداری در این آزمایش ۶۰۰ هرتز بود و طول تاریخچه زمانی داده‌های برداشت شده ۹/۵ ثانیه بود. شکل ۳ تغییرات ناشی از این تحریک را در گره‌های شاهد تا زمان ۲ ثانیه نشان می‌دهد.

لوله‌ها یکسان و برابر $D=45\text{mm}$ ، ضخامت جداره نیز برابر $e = 2/4\text{mm}$ و همچنین مقدار زبری مطلق نیز برابر $\varepsilon = 1 \times 10^{-4}\text{m}$ می‌باشد. با توجه به جنس لوله، مشخصات سیستم و داده‌های اندازه‌گیری شده، سرعت انتشار موج در لوله‌ها نیز در حدود $a = 475\text{m/s}$ تخمین زده شده است.

در انتهای پایین دست سیستم دو شیر تعبیه شد که عبارت‌اند از یک شیر دریچه‌ای^۱ به منظور تنظیم دبی خروجی و یک شیر توپی^۲ بلافاصله در بالادست شیر تنظیم به منظور تولید جریان گذرا در شبکه که بهره‌برداری از هر دو شیر بطور دستی انجام می‌شود. در این آزمایش شش مبدل T1 تا T6 (با توجه به نام‌گذاری اولیه) قابلیت اندازه‌گیری نوسانات فشار در شش نقطه از شبکه را دارا هستند. بر این اساس در واقع شش سایت اندازه‌گیری در این آزمایش در نظر گرفته می‌شود. همچنین یک جریان‌سنج الکترومگنتیک^۳ نیز در لوله

¹ Gate valve

² Ball valve

³ Electromagnetic flow meter

گام چهارم و پنجم: یک تابع هدف مطابق با رابطه ۱۳ تشکیل می‌شود که در آن مقادیر به دست آمده در گام دوم به عنوان پاسخ فرکانسی مشاهداتی در نظر گرفته می‌شود و پاسخ فرکانسی محاسباتی، از مدل عددی تحلیل جریان (گام سوم) که تابعی از مقادیر مجهول است به دست می‌آید. در این حالت به منظور دستیابی به مقادیر مجهول یا همان ضرایب اصلاحی لازم است با استفاده از یک الگوریتم بهینه‌ساز (در اینجا الگوریتم ژنتیک) مقادیر مجهول چنان محاسبه شوند که تابع هدف به کمترین مقدار خود برسد. قبل از اجرای الگوریتم بهینه‌ساز برای حل مسئله، نیاز به مشخص نمودن فضای جستجو برای الگوریتم بهینه‌ساز است. برای تعیین

گام دوم: در این گام تحریک ایجاد شده و تغییرات فشار در شش نقطه اندازه‌گیری (نتایج گام ۱) با استفاده از FFT به حوزه فرکانس تبدیل شدند.

گام سوم: مدل عددی تحلیل جریان گذرا در حوزه فرکانس به صورت تابعی از مقادیر مجهول توسعه داده شد. شکل ۴ پاسخ فرکانسی مشاهداتی (به دست آمده از گام دوم) و محاسباتی بر اساس مقادیر اصلاح نشده زیری و سرعت انتشار موج را در نقاط شاهد T1 و T6 ناشی از این تحریک نشان می‌دهد.

از شکل ۴ به وضوح می‌توان نتیجه گرفت که انجام کالیبراسیون در کارهای عملی امری بسیار ضروری است.

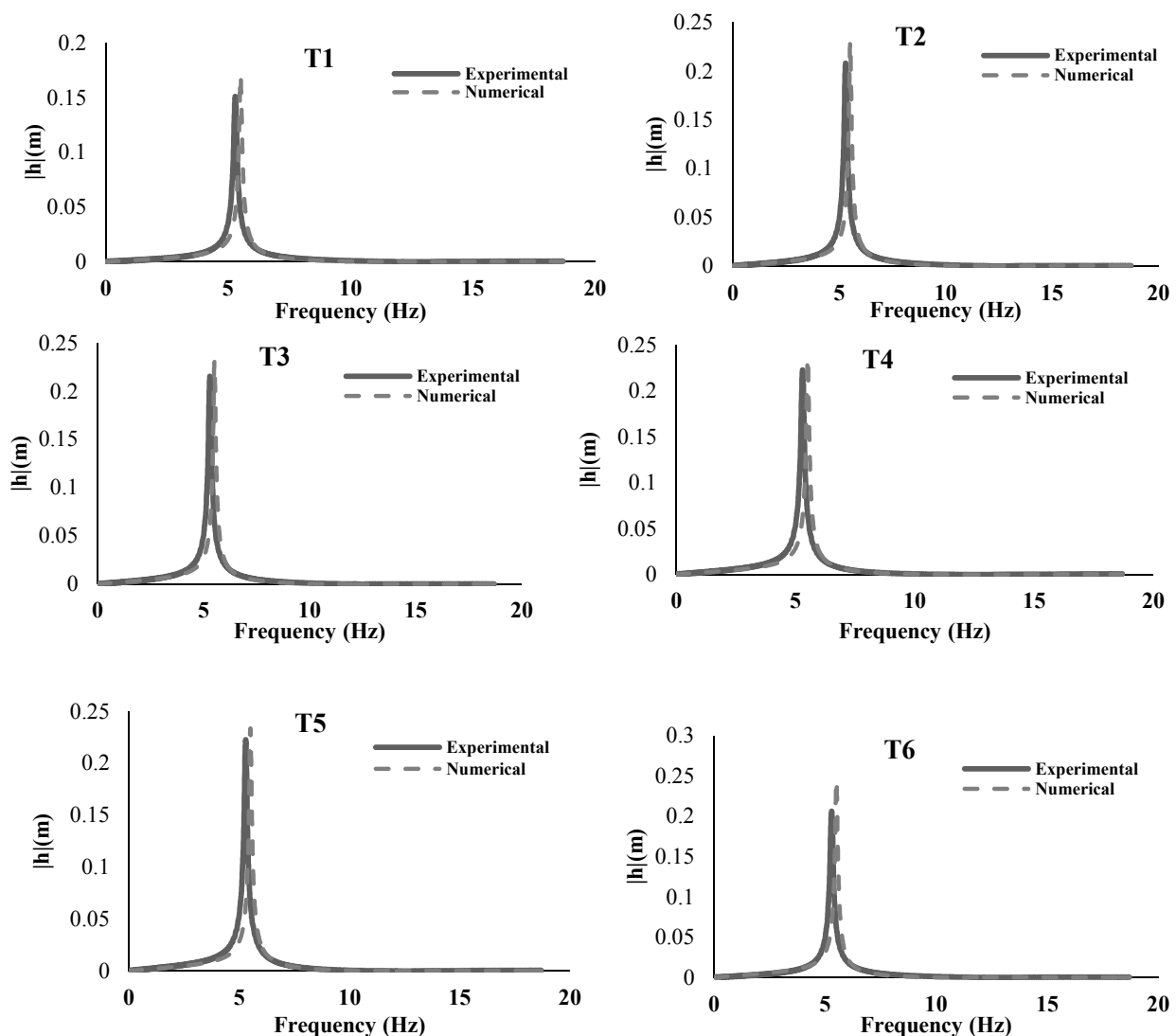


Fig. 4. Numerical and experimental frequencies of reference points T1 to T6

شکل ۴- پاسخ فرکانسی محاسباتی و اندازه‌گیری شده مربوط به نقاط شاهد T1 و T6

عددی و همچنین خطاهای اندازه‌گیری است. اما با توجه به شکل ۶ که پاسخ فرکانسی آزمایشگاهی و محاسباتی کالیبره شده را در مقایسه با هم نشان می‌دهد، می‌توان به این نتیجه پی برد که درحقیقت بهینه‌سازی توانسته است که این ۵۱ متغیر را طوری تعیین کند که بهترین شرایط ممکن برای تحلیل عددی سیستم را فراهم آورد و با تعدیل داده‌های ورودی نتایج را به میزان زیادی تدقیق نماید. این نتایج نشان می‌دهد که روش کالیبراسیون ارائه شده در حوزه فرکانس به خوبی برای شبکه‌های آبرسانی قابل اعمال است. جدول ۱ مقدار اختلاف بین نتایج محاسباتی کالیبره شده در مقایسه با پاسخ فرکانسی مشاهداتی در نقاط اندازه‌گیری را نشان می‌دهد.

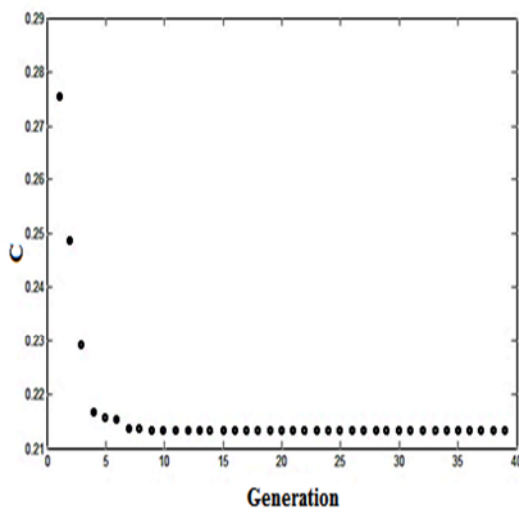


Fig. 5. Optimization trend

شکل ۵- روند بهینه‌سازی

جدول ۱- دقت مدل عددی تحلیل جریان گذرا در حوزه فرکانس در نقاط اندازه‌گیری

Table 1. Accuracy of the numerical model of transient flow analysis versus frequency for the points calculated

Reference node No.	T1	T2	T3	T4	T5	T6
Max. Error percent	0.99	0.96	1.18	1.40	1.48	2.55

به منظور استفاده از تحلیل جریان گذرا در حوزه فرکانس، جهت حل مسائل عملی هیدرولیک، اولین قدم انجام کالیبراسیون مدل عددی است. کالیبراسیون در حوزه فرکانس به دو طریق در بهبود سرعت محاسبات تأثیر گذار است: (۱) تأثیر بر سرعت مدل هیدرولیکی با حذف محاسبات اضافی و (۲) افزایش سرعت

فضای جستجو باید محدوده امکان پذیری که هر یک از متغیرها می‌توانند داشته باشند، مطابق با شرایط مسئله و قضاوت مهندسی مشخص شود. در این مسئله میزان دامنه تغییرات پارامترهای تصمیم (ضرایب اصلاحی α , β و γ) به ترتیب بین ۰/۵ تا ۲، ۰/۹ تا ۱/۱ و ۰/۵ تا ۱/۵ در نظر گرفته شدند که این به معنی تغییرات زبری مطلق بین $0.5 \times 10^{-4} \text{ m}$ تا $2 \times 10^{-4} \text{ m}$ ، تغییرات ضریب اصطکاک غیر ماندگار بین ۰/۹ تا ۱/۱ و سرعت موج بین ۲۳۷/۵ تا ۷۱۲/۵ متر بر ثانیه است. در این مسئله با توجه به اینکه شبکه دارای ۲۵ لوله بود، تعداد متغیرهای تصمیم‌گیری یا به عبارت دیگر ضرایب اصلاحی ۵۱ عدد بودند که به ترتیب ۲۵ متغیر مربوط به α ، ۲۵ متغیر مربوط به β و یک متغیر مربوط به γ بود. بنابراین هر کروموزوم در الگوریتم ژنتیک به کار گرفته شده باید دارای ۵۱ ژن باشد. در اینجا به منظور بهینه‌سازی این تابع هدف، از الگوریتم ژنتیک حقیقی با تولید ۴۰ کروموزوم به عنوان جمعیت اولیه و ۲۰ کروموزوم به عنوان جمعیت نسل‌های تکاملی بعدی استفاده شد. تعیین میزان جمعیت اولیه وابسته به شرایط مسئله و تابع هدف است و باید طوری انتخاب شوند که علاوه بر اینکه جواب‌های به دست آمده دقت مناسبی داشته باشند، الگوریتم هم از سرعت خوبی برخوردار باشد. این کار معمولاً با انجام چند آنالیز حساسیت با تعداد جمعیت‌های متفاوت صورت می‌گیرد. همچنین تبادل ژنی در نظر گرفته شده از نوع یکنواخت^۱ بوده و ضریب جهش ژنی به طور خطی از ۰/۰۵ برای اولین نسل تا ۰/۰۱ برای آخرین نسل متغیر بود. استفاده از تبادل ژنی به منظور جلوگیری از افتادن الگوریتم در دام نقاط بهینه محلی است.

۷- نتایج و بحث

بعد از انجام مراحل کالیبراسیون، تشکیل تابع هدف و استفاده از الگوریتم ژنتیک حقیقی که برنامه کامپیوتری آن به منظور استفاده در این تحقیق توسعه داده شد، مقادیر ضرایب اصلاحی به منظور کالیبراسیون محاسبه شد. شکل ۵ روند کمینه‌سازی تابع هدف را بعد از تولید ۳۹ نسل نشان می‌دهد. همانطور که در این شکل مشخص است، الگوریتم بهینه‌ساز نتوانسته است که تابع هدف را به صفر برساند که این امر طبیعی بوده و ناشی از عدم قطعیت‌ها در مدل

^۱ Uniform Cross Over Method

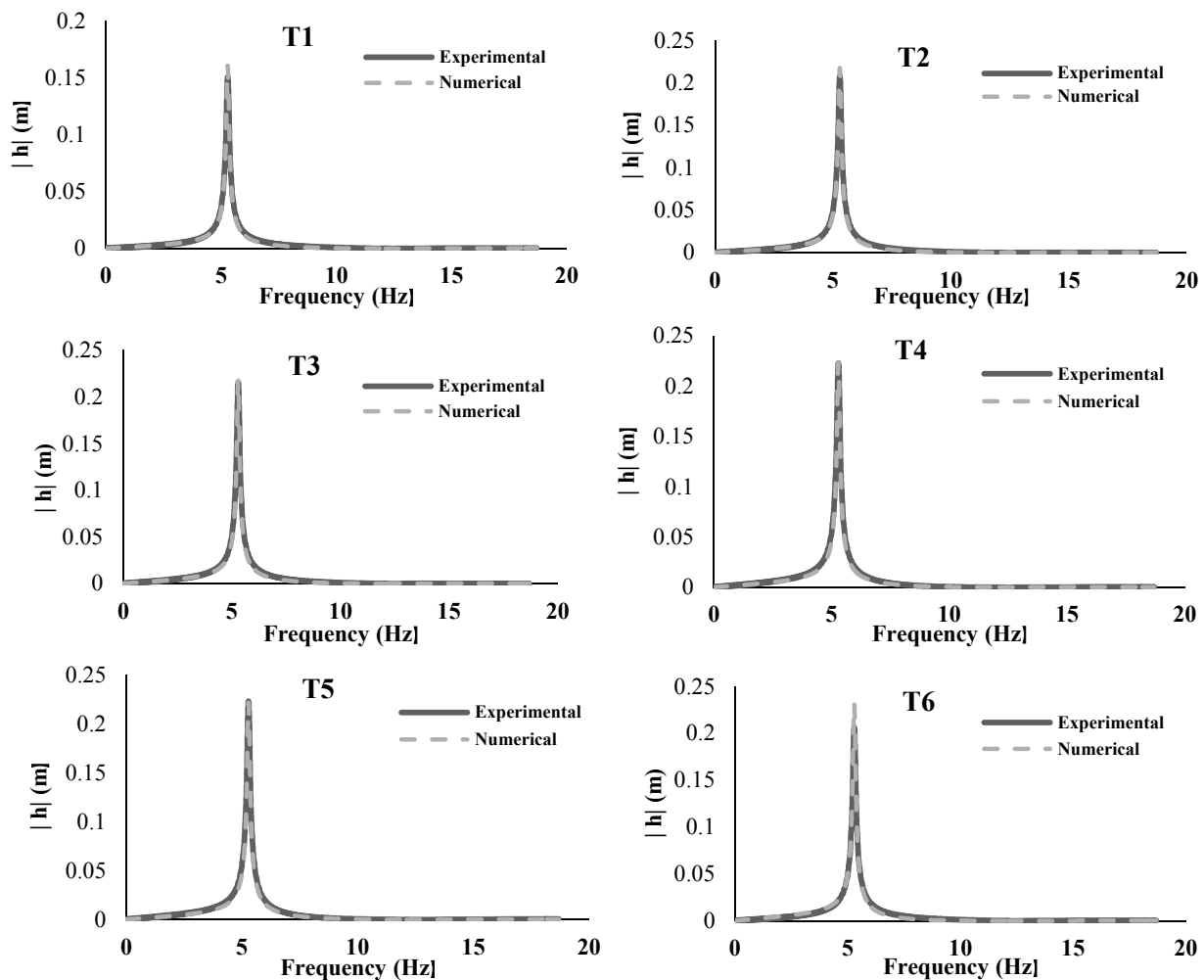


Fig. 6. Calibrated numerical and experimental frequencies of reference points T1 to T6

شکل ۶- پاسخ فرکانس محاسباتی کالیبراسیون شده و مشاهداتی در نقاط شاهد T1 تا T6

۸- نتیجه‌گیری

در این مقاله معادلات جریان گذرا در حوزه فرکانس و روش‌های تحلیل سیستم‌های هیدرولیکی با بهره‌گیری از این معادلات بیان شد و بر آن اساس یک مدل عددی تحلیل جریان در حوزه فرکانس با قابلیت مدل‌سازی اثر اصطکاک غیرماندگار توسعه داده شد. دقت تحلیل جریان گذرا در حوزه فرکانس همانند تحلیل جریان گذرا در حوزه زمان، وابسته به داده‌های ورودی به مدل عددی مثل ضریب زبری جداره لوله و سرعت موج است. علاوه بر آن عبارت اصطکاک غیرماندگار که بر اساس مدل‌های آزمایشگاهی به دست آمده می‌تواند در ایجاد خطا مؤثر باشد. بنابراین می‌توان گفت عوامل ایجاد عدم قطعیت در تحلیل جریان گذرا در حوزه فرکانس عبارت اند از، تابع وزنی در عبارت اصطکاک غیر ماندگار، ضریب

همگرایی تابع هدف با بیان دقیق‌تر از ماهیت جریان گذرا. با مقایسه‌ای که بین حوزه زمان و فرکانس انجام شد، مشخص شد که در حوزه زمان تقریباً بعد از تولید تعداد ۴۵ نسل، الگوریتم بهینه‌ساز توانسته است به همگرایی برسد در صورتی که در حوزه فرکانس این مقدار به ۱۰ نسل کاهش یافت. در خصوص زمان کالیبراسیون، حوزه فرکانس توانست تقریباً ۵ برابر سریع‌تر از حوزه زمان عمل کند که این افزایش سرعت ناشی از عدم نیاز حوزه فرکانس به گسسته‌سازی زمانی و مکانی محیط حل می‌باشد. بحث سرعت بالای کالیبراسیون مدل در حوزه فرکانس در کنار قابلیت‌های خاص حوزه فرکانس در تعیین عوارض موجود در سیستم‌های آبرسانی می‌تواند روش تحلیل جریان گذرا را به یکی از سریع‌ترین روش‌ها در حل مسائل هیدرولیکی تبدیل نماید.

پیوستگی و معادله خطی شده مومنتوم به دست می آیند، آسان تر آن است که از مدل کانولوشن برای مدل سازی اصطکاک غیر ماندگار استفاده شود، در حالی که در حوزه زمان به منظور مدل سازی اصطکاک غیرماندگار معمولاً از روش کانولوشن به دلیل بالا بودن حجم محاسبات استفاده نمی شود و به جای آن، روش مبتنی بر شتاب لحظه ای ترجیح داده می شود که این امر دو ضریب اصلاحی یکی برای شتاب جابجایی و دیگری برای شتاب محلی به کالیبراسیون اضافه می نماید و به همان نسبت با توجه به تغییر معادلات، ضرایب اصلاحی اصطکاک ماندگار و سرعت موج نیز می تواند تحت تأثیر قرار گیرد. در این مقاله مقایسه کالیبراسیون مدل در حوزه زمان با حوزه فرکانس و اینکه کدام یک از آنها ارجح تر هستند، انجام نشد زیرا هدف بهبود روش های تحلیل در حوزه فرکانس به منظور بهره گیری در مسائل عملی بود که در این تحقیق محقق شد.

۹- قدردانی

به این وسیله از اساتید محترم Helena Ramos و Didia Covas اعضای هیئت علمی دانشگاه صنعتی لیسبون (IST) به دلیل همکاری در ارسال اطلاعات مربوط به مدل هیدرولیکی مورد استفاده در این تحقیق قدردانی می شود.

زبری جداره لوله ها و سرعت موج. بنابراین به منظور استفاده از تحلیل جریان گذرا در حوزه فرکانس برای حل مسائل عملی هیدرولیک، نیاز به کالیبراسیون مدل عددی است. به منظور کالیبراسیون و کاهش عدم قطعیت ها، در این تحقیق یک روش پنج مرحله ای بر مبنای تحلیل معکوس جریان گذرا در حوزه فرکانس پیشنهاد شد. با به کارگیری این روش برای یک مثال آزمایشگاهی مرجع مشخص شد که روش پیشنهادی به طور چشمگیری می تواند بر تعدیل داده های ورودی به مدل و در پی آن افزایش دقت مدل عددی تأثیر گذرا باشد. علاوه بر آن، با توجه به خاصیت حوزه فرکانس در کاهش میزان محاسبات و همچنین بیان واضح تری از ماهیت جریان گذرا، کالیبراسیون در حوزه فرکانس در مقایسه با حوزه زمان بسیار سریع تر خواهد بود. اگرچه تأثیر استفاده از حوزه فرکانس در امر کالیبراسیون بسیار چشمگیر است اما باید به این نکته توجه نمود که از ضرایب اصلاحی به دست آمده در کالیبراسیون حوزه فرکانس فقط می توان در حوزه فرکانس استفاده کرد و استفاده از آنها در حوزه زمان ممکن است خطا در محاسبات را ایجاد نماید به دلیل آنکه (۱) معادلات حوزه فرکانس خطی سازی شده اند و بنابراین نتایج به دست آمده از آن را باید با احتیاط بیشتری در یک مدل های حوزه زمان که معمولاً غیر خطی هستند به کار برد و (۲) در حوزه فرکانس چون معادلات از تبدیل فوریه گرفتن معادله

References

- Chaudhry, M.H., 2014, *Applied hydraulic transients*, 3rd Ed., Springer New York Heidelberg Dordrecht London. ISBN 978-1-4614-8538-4 (eBook)
- Covas, D. & Ramos, H., 2001, "Hydraulic transients used for leakage detection in water distribution systems", *In: Proceedings of the 4th Conference on Water Pipeline Systems: Managing Pipeline Assets in an Evolving Market*, York, UK
- Haghighi, A. & Keramat, A., 2012, "A fuzzy approach for considering uncertainty in transient analysis of pipe networks", *Journal of Hydroinformatics*, 14 (4), 1024-1035.
- Haghighi, A. & Ramos, H.M., 2012, "Transient detection of leakage freshwater and friction factor calibration in drinking networks using central force optimization", *Water Resource Management*, 26, 2347-2363.
- Haghighi, A., 2010, "Multi criteria calibration of pipelines under unsteady flows", *Journal of Hydraulic*, 5(1), 71-80.
- Haghighi, A., 2009, "Development of leak detection and calibration methods in pipelines based on inverse transient modeling", PhD Thesis, K.N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran. (In Persian)
- Jung, B.S. & Karney, B.W., 2008, "Systematic exploration of pipeline network calibration using transients", *Journal of Hydraulic Research*, 46(1), 129-137.

- Kapelan, Z.S., Savic, D.A. & Walters, G.A., 2002, "Hybrid GA for calibration of water distribution models", *In: Proc. EWRI*, Roanoke, VA.
- 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.
- Kapelan, Z.S., Savic, D.A. & Walters, G.A., 2004, "Incorporation of prior information on parameters in inverse transient analysis for leak detection and roughness calibration", *Urban Water Journal*, 1 (2), 129-143.
- Kim, S., 2007, "Impedance matrix method for transient analysis of complicated pipe networks", *Journal of Hydraulic Research*, 45(6), 818-828.
- Kim, S. H., 2008, "Address-oriented impedance matrix method for generic calibration of heterogeneous pipe network systems", *Journal of Hydraulic Engineering*, 134(1), 66-75.
- Kim, S.H., 2010, "Dynamic memory computation of impedance matrix method", *Journal of Hydraulic Engineering*, 137 (1), 122-128.
- Liggett, J.A. & Chen, L. C., 1994, "Inverse transient analysis in pipe networks", *Journal of Hydraulic Engineering*, 120 (8), 934-950.
- Shamloo, H. & Haghighi, A., 2009, "Leak detection in pipelines by inverse backward transient analysis", *Journal of Hydraulic Research*, 47(3), 311-318.
- Shamloo, H. & Haghighi, A., 2010, "Optimum leak detection and calibration of pipe networks by inverse transient analysis", *Journal of Hydraulic Research*, 48(3), 371-376.
- Vítkovský, J. P., Lee, P.J., Zecchin, A.C., Simpson, A.R. & Lambert, M.F., 2011, "Head-and flow-based formulations for frequency domain analysis of fluid transients in arbitrary pipe networks", *Journal of Hydraulic Engineering*, 137(5), 556-568.
- Vitkovsky, J.P., Lambert, M.F., Simpson, A.R. & Bergant, A., 2003, "Steady-oscillatory flow solution including unsteady friction in : Pumps", Cebrera E., and Cebrera, E. Jr., A.A. (Eds.): *Electromechanical devices and systems applied to urban water management*, Balkema Publishers, Lisse.
- Vitkovsky, J.P., Simpson, A.R. & Lambert, M., 2000, "Leak detection and calibration using transients and genetic algorithms", *Journal of Water Resources Planning and Management*, 126 (4), 262-265.
- Wylie, E.B. & Streeter, V.L., 1993, *Fluid transients in systems*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, USA.
- Zecchin, A. C., Simpson, A. R., Lambert, M. F., White, L. B. & Vítkovský, J. P., 2009, "Transient modeling of arbitrary pipe networks by a Laplace-domain admittance matrix", *Journal of Engineering Mechanics*, 135(6), 538-547.