

بهینه‌یابی تکاملی تعداد و ظرفیت مخازن ضربه‌گیر و قطر لوله‌ها در یک خط انتقال

غلامرضا طالب‌زاده سروستانی^۱ محسن ناصری^۲ کیوان اصغری^۳

(دریافت ۸۵ / ۲ / ۲۴ پذیرش ۸۵ / ۶ / ۲۸)

چکیده

یکی از مهم‌ترین معیارهای حفاظت سازه‌ای در طراحی خطوط انتقال آب، کنترل اثرات ناماندگاری جریان (ضربه قوچ) بر خطوط لوله است. این اثرات با استفاده از ادواتی همچون مخازن هوا، مخازن ضربه‌گیر، شیرهای فشارشکن و یک‌طرفه و ... کنترل می‌شود. اغلب در مدل‌های شبیه‌سازی جریان ناماندگار، موقعیتهای بحرانی و فشارهای ایجاد شده در مسیر خط انتقال ردیابی شده و بر این اساس مکان‌یابی بهینه تأسیسات کنترلی انجام می‌شود. از میان روشهای بهینه‌یابی تکاملی، الگوریتم ژنتیک به عنوان یک روش عمومی با قابلیت بهینه‌یابی مناسب در مسائل گوناگون به کار گرفته شده است. در این مقاله برای اولین بار، الگوریتم ژنتیک به عنوان یک مدل بهینه‌ساز غیرخطی در کنار یک برنامه شبیه‌ساز جریان ناماندگار به منظور بهینه‌یابی تعداد و ظرفیت مخازن ضربه‌گیر در یک خط انتقال به کار گرفته شده است.

واژه‌های کلیدی: بهینه‌یابی تکاملی، الگوریتم ژنتیک، جریان ناماندگار، مخازن ضربه‌گیر، بهینه‌سازی قطر.

Evolutionary Optimization for the Number and Capacity of Surge Tanks and Pipeline Diameters in a Transmission Line

Gholam Reza Talebzadeh Sarvestani¹

Mohssen Nasser²

Keivan Asghari³

(Received May 14, 2006 Accepted Sep. 19, 2006)

Abstract

Controlling the unsteady effects of fluid flow (water hammer) is one of the most important monitoring factors for structural protection of transmission pipelines. These effects are controlled by surge tanks, air chambers, pressure relief valves, and check valves. Generally, the critical points are detected by simulating the unsteady flow of the fluid, and accordingly, optimum positioning of the control devices is decided. Among the search methods, Genetic Algorithm (GA) is an effective and robust method to solve highly complex optimization problems. Here, for the first time, GA coupled with an unsteady flow simulator is used to optimize the number and capacity of surge tanks in a pipeline system. In addition, the pipeline diameters are optimized for their best performance.

Keywords: Evolutionary Optimization, Genetic Algorithm (GA), Unsteady Flow, Surge Tanks, Diameter Optimization.

1- MSc Graduate of Water Resources Engineering, Dept. of Civil Engineering, Isfahan University of Technology
2- Ph.D. Student of Water and Environmental Engineering, Dept. of Civil Engineering, Shiraz University, mm_nasser@yahoo.com
3- Assistant Prof., Dept. of Civil Engineering, Isfahan University of Technology

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد مهندسی آب، دانشگاه صنعتی اصفهان
۲- دانشجوی دکتری آب و محیط زیست، دانشگاه شیراز، mm_nasser@yahoo.com
۳- استادیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان

۳، ۴، ۵ و ۶]. در زمینه برنامه‌ریزی غیرخطی نیز می‌توان به کارهای خر و همکاران^{۱۳} در سال ۱۹۸۰ و فوجیوارا^{۱۴} و کانگ^{۱۵} در سال ۱۹۹۰ اشاره کرد [۷ و ۸].

با این حال ضعفهای موجود در روشهای کلاسیک باعث روی آوردن بسیاری از محققین به روشهای ابتکاری نظیر الگوریتم‌های تکاملی^{۱۶} شده است. از جمله این روشهای جدید که اغلب با الگوبرداری از پدیده‌های طبیعی ابداع شده‌اند، می‌توان به جستجوی تطبیقی^{۱۷}، الگوریتم ژنتیک^{۱۸} و شبیه‌سازی تسلیم^{۱۹} اشاره کرد. در زمینه به کارگیری الگوریتم ژنتیک می‌توان اختصاراً به کارهای تانگ^{۲۰} و کارنی^{۲۱} در سال ۱۹۹۶ اشاره کرد که به منظور استفاده در مسئله کالیبراسیون مدل‌های هیدرولیکی شبکه‌های توزیع به کار گرفته شد. سیمپسون^{۲۲} و وو^{۲۳} در سال ۱۹۹۷ از مدل کامپیوتری الحاقی به منظور شبیه‌سازی جریان ناماندگار (ضربه قوچ) در شبکه‌های توزیع آب و همین‌طور ویتکوفسکی و همکاران^{۲۴} نیز در سال ۱۹۹۹ جهت بررسی مقادیر نشت و تغییرات ضریب اصطکاک در لوله‌های مستعمل استفاده کردند [۹، ۱۰ و ۱۱].

۲- طرح مسئله

در یک سیستم انتقال آب با تقاضای دبی مشخص، با تغییر اندازه قطر لوله‌ها، به دلیل تغییر افت هد اصطکاک، هد مورد نیاز برای پمپاژ آب نیز تغییر می‌کند. همچنین تغییر قطر باعث تغییر سرعت جریان در لوله‌های سیستم می‌شود. این دو پارامتر همان گونه که از معادلات ضربه قوچ (رابطه ۱) فهمیده می‌شود، مقادیر به دست آمده برای فشار و سرعت، در فرآیند روندیابی جریان ناماندگار را تحت تأثیر قرار می‌دهند. با توجه به این نکات به نظر می‌رسد که تعیین اندازه بهینه قطر لوله‌های به کار رفته در یک سیستم انتقال آب به گونه‌ای که در هنگام وقوع جریان ناماندگار، فشارهای متعادل‌تری تولید شود از اهمیت زیادی برخوردار است. معادلات پیوستگی و اندازه حرکت جریان (معادلات ضربه قوچ) به صورت دستگاه معادلات زیر می‌باشند

در دهه‌های اخیر تحقیقات بسیاری بر روی سیستم‌های توزیع و انتقال آب در دو دسته جریان ماندگار و ناماندگار انجام شده است. اگرچه تا چندی پیش تحقیقات انجام گرفته در این زمینه، به دلیل پیچیده بودن جریان ماندگار و ناماندگار و ناشناخته بودن آن اندک بود، لکن همزمان و با توجه به اهمیت توجیه اقتصادی پروژه‌ها، بهینه‌سازی این سیستم‌ها نیز مورد توجه قرار گرفته و مقالات بسیاری توسط محققین مختلف در زمینه روشها و تکنیک‌های طراحی و بهره‌برداری بهینه ارائه شده است. لازم به ذکر است که به دلیل پیچیدگی مدل‌سازی جریان ناماندگار، معمولاً شبکه‌های توزیع و خطوط انتقال جهت حالات پایدار مورد مطالعه قرار گرفته و نهایتاً کنترل ناماندگاری انجام می‌گیرد. در این تحقیق برای نخستین بار، این فرآیند مستقیماً با استفاده از شبیه‌سازی جریان ناماندگار مورد بهینه‌یابی قرار گرفته است.

مثل هر مسئله با متغیرهای متعدد، شبکه‌های توزیع نیز بی‌نهایت جواب دارد که از نظر فنی و طراحی می‌تواند مورد قبول باشد؛ لکن یافتن جواب اقتصادی مطلق، کاری مشکل و شاید غیرممکن می‌باشد. محققین بر روی روشی که با استفاده از آن بتوان برای یک شبکه، قطرهای بهینه را در حالت جریان پایدار پیدا کرد، سالها کار کرده‌اند و روشهای مختلفی جهت بهینه‌کردن شبکه‌های توزیع آب ارائه داده‌اند. این روشها بر مدل‌سازی ریاضی و تکنیک‌های برنامه‌نویسی خطی^۱، غیرخطی^۲ و پویا^۳ متکی است. اولین کار در این زمینه با استفاده از مدل‌سازی ریاضی لای^۴ و شاکه^۵ در سال ۱۹۶۷ انجام شد که روش آنها مبتنی بر برنامه‌ریزی خطی بود [۱]. در زمینه برنامه‌ریزی خطی می‌توان به کارهای ژاکوبی^۶ در سال ۱۹۶۸، لام^۷ در سال ۱۹۷۳ و دب^۸ در سال ۱۹۷۳ نیز اشاره کرد. راسموسن^۹ در سال ۱۹۷۶ یک روش ابتکاری برای حل معادلات حاکم بر سیستم‌های آبرسانی را به کار گرفت. آلپرویتز^{۱۰} و شامیر^{۱۱} در سال ۱۹۷۷ از روشی به نام گرادیان خطی^{۱۲} به منظور طراحی بهینه شبکه‌های حلقوی استفاده نمودند [۲].

¹³ Kher et al.

¹⁴ Fujiwara

¹⁵ Khang

¹⁶ Survival Algorithms

¹⁷ Harmonic Search

¹⁸ Genetic Algorithm

¹⁹ Simulated Annealing

²⁰ Tang

²¹ Karney

²² Simpson

²³ Wu

²⁴ Vitkovsky et al.

¹ Linear Programming

² Nonlinear Programming

³ Dynamic Programming

⁴ Lai

⁵ Schaake

⁶ Jacoby

⁷ Lam

⁸ Deb

⁹ Rasmusen

¹⁰ Alprovits

¹¹ Shamir

¹² Linear Programming Gradient

$$\Delta t = \min \left(\frac{L_i}{N_{\min} (V_i + a_i)} \right) \quad (2)$$

$$N_i = \frac{L_i}{\Delta t (V_i + a_i)} \quad (3)$$

$$\Delta s_i = \frac{L_i}{N_i} \quad (4)$$

که در آنها:

L_i ، طول لوله؛ V_i ، سرعت جریان ماندگار؛ a_i ، سرعت موج فشار؛ N_i ، تعداد تقسیمات؛ Δs_i ، گام مکانی لوله؛ i ؛ Δt کمترین گام زمانی محاسباتی؛ و N_{\min} ، حداقل تعداد تقسیمات در لوله‌های سیستم است. مقادیر به دست آمده از روابط بالا در صورتی قابل قبول می‌باشند که معیار همگرایی محاسبات ارضا گردد. این معیار که به شرط کورانت نیز معروف است در رابطه زیر آورده شده است

$$Cr_i = a_i \frac{\Delta t}{\Delta s_i} \leq 1.0 \quad (5)$$

که در آن Cr_i عدد کورانت در هر لوله می‌باشد.

شبیه‌سازی فشار و سرعت در سیستم از لحظه توقف پمپاژ و از پمپ‌ها آغاز شده و در هر گام زمانی، تا مخزن ذخیره پایین دست ادامه پیدا می‌کند و سپس با افزوده شدن گام زمانی تکرار می‌گردد. در پایان هر گام زمانی، مقادیر فشار در خط لوله کنترل گردیده و کمترین فشار به وجود آمده مشخص می‌شود. لازم به ذکر است که این الگوریتم تحلیل جریان ناماندگار در سیستم را بر اساس روش مشخصه‌ها و با تقریب روی خط مکانی انجام می‌دهد.

پایان تحلیل جریان ناماندگار در برنامه بر اساس دو معیار صورت می‌گیرد. یکی کمترین فشار ایجاد شده در خط لوله و دیگری حداکثر زمان اعلام شده در فایل ورودی برنامه شبیه‌سازی. در صورتی که در نقطه‌ای از خط لوله، فشار آب کمتر از فشار بخار آن گردد، معیار اول اعمال گردیده و برنامه با اعلام وقوع جدایی ستون آب، زمان و مکان وقوع آن را در فایل خروجی نوشته و به تحلیل سیستم پایان می‌دهد. در غیر این صورت، معیار دوم تعیین کننده زمان پایان تحلیل است.

۳-۲- الگوریتم بهینه‌یاب

برنامه بهینه‌یاب نوشته شده در این مقاله بر مبنای الگوریتم ژنتیک ساده می‌باشد که توسط میخایلوویچ^۱ در سال ۱۹۹۲ ارائه شد [۱۲]. این الگوریتم از رشته‌های با اعداد اعشاری استفاده می‌کند. در این الگوریتم از سه عملگر پیوند، جهش و گزینش استفاده شده و احتمال اثر عملگر پیوند ۰/۸۵ و در مورد جهش، ۰/۱۵ در نظر گرفته شده

¹ Michalewicz

$$a^2 \frac{dV}{ds} + \frac{1}{\rho} \frac{dp}{dt} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{dV}{dt} + \frac{1}{\rho} \frac{dp}{ds} + g \frac{dZ}{ds} + \frac{f}{2D} V|V| = 0$$

که در آن p و V به ترتیب فشار و سرعت جریان سیال؛ a ، سرعت گسترش موج در سیال؛ ρ ، چگالی سیال؛ Z ، بیانگر تراز هر نقطه از مسیر نسبت به تراز مبنا؛ D ، قطر لوله؛ f ، ضریب اصطکاک لوله؛ و s و t ، مشخصه‌های مکانی و زمانی می‌باشند. مسئله دیگری که در این تحقیق به آن پرداخته شد این بود که در صورت استفاده از مخازن ضربه‌گیر در یک خط انتقال آب به منظور جلوگیری از پدیده جدایی ستون آب، این مخازن در چه موقعیتهایی در طول خط و به چه تعداد و حجمی مورد نیاز می‌باشند.

۳- الگوریتم‌های شبیه‌ساز و بهینه‌یاب

۳-۱- الگوریتم شبیه‌سازی

به منظور شبیه‌سازی ضربه کوچ ناشی از توقف پمپ‌ها، از یک برنامه رایانه‌ای استفاده شد که شبیه‌سازی جریان را بر اساس روش مشخصه‌ها انجام می‌داد. این برنامه روندیابی سرعت و فشار در خط لوله، زمان اتفاق افتادن جدایی ستون آب از لحظه توقف پمپاژ و کمترین فشار تولید شده در سیستم را تعیین می‌کرد. لازم به ذکر است که این برنامه با زبان BORLAND C++ نوشته شده بود.

این الگوریتم نخست مشخصات هندسی و هیدرولیکی بخشهای مختلف خط انتقال نظیر پمپ‌ها، لوله‌ها، مخازن، تجهیزات کنترل و ... را از فایل ورودی خوانده و تحلیل سیستم در حالت ماندگار را انجام داده و سپس دبی جریان، سرعت و فشار در لوله‌ها را تعیین می‌کند. پس از تحلیل جریان ماندگار، تحلیل جریان ناماندگار در سیستم آغاز شده و بدین منظور ابتدا با استفاده از داده‌های اولیه و اطلاعات به دست آمده از تحلیل سیستم در حالت ماندگار، پارامترهای اولیه مورد نیاز در تحلیل جریان ناماندگار تعیین می‌گردد. این پارامترها شامل تعداد تقسیمات هر لوله، گامهای مکانی و زمانی محاسبات، زمان پیمودن خط لوله توسط موج فشار و ... می‌باشد.

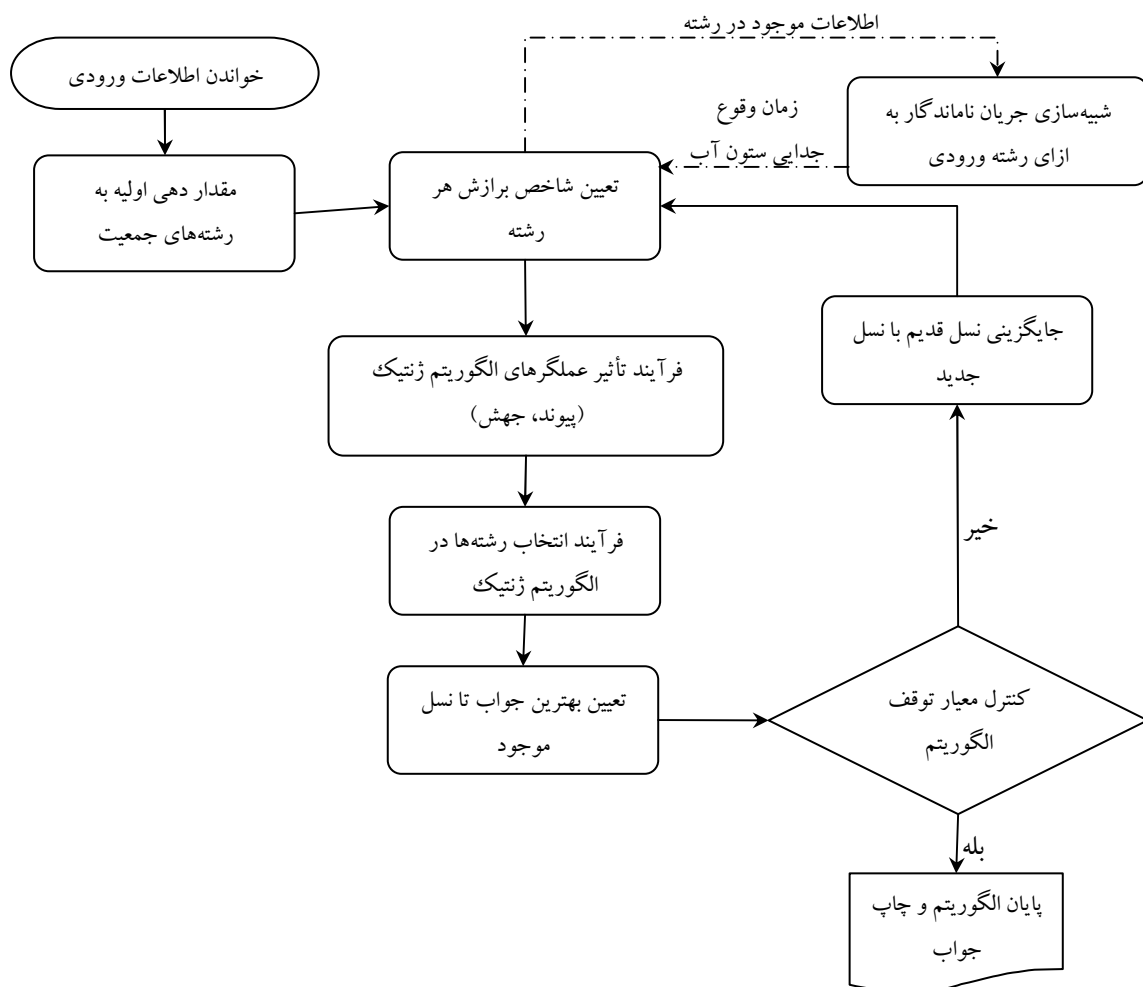
به منظور تعیین تعداد تقسیمات هر لوله، نخست تعداد تقسیمات در کوتاه‌ترین لوله از طریق فایل ورودی به برنامه داده می‌شود. آنگاه برنامه با به کار بردن این پارامتر و با استفاده از طول، سرعت جریان ماندگار و سرعت موج فشار در هر لوله، گام زمانی مناسب جهت انجام محاسبات را از رابطه ۲، تعداد تقسیمات هر لوله را از رابطه ۳ و گام مکانی در هر لوله را از رابطه ۴ به دست می‌آورد.

لوله در برنامه شبیه ساز مشخص می‌گردد.

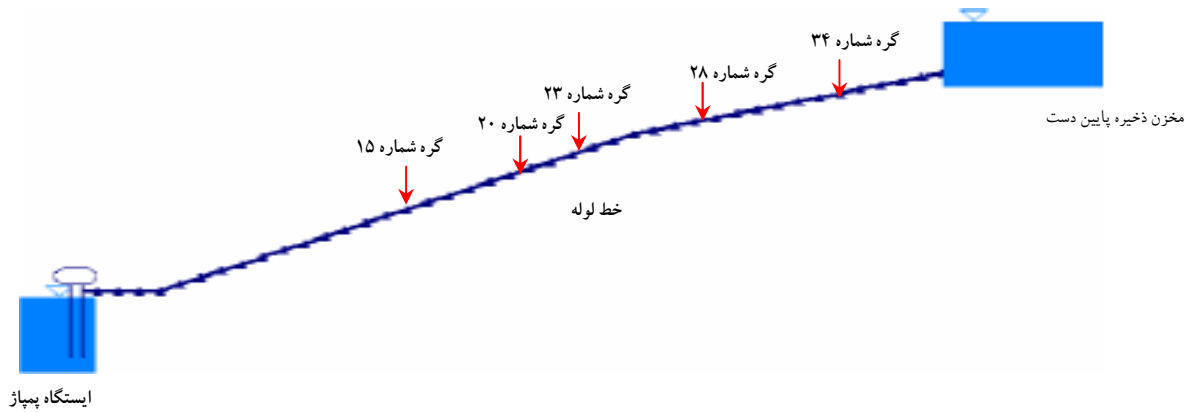
۴- مشخصات سیستم

خط انتقال آب شامل ایستگاه پمپاژ در بالادست، خطوط لوله‌ای متشکل از چند لوله با قطرهای مختلف که به صورت سری به هم متصل شده‌اند و مخزن ذخیره آب در پایین دست است (شکل ۲). ایستگاه پمپاژ شامل پمپ‌هایی از نوع Ingersoll-Dresser می‌باشد که به منظور تأمین دبی ۷۸۰ لیتر بر ثانیه استفاده شده و تعداد آنها در روند بهینه‌سازی خط لوله مسیر، تعیین می‌گردد. سرعت دورانی هر پمپ در حالت پایدار ۱۷۷۵ دور بر دقیقه و ممان اینرسی قطعات متحرک آن ۲۰ کیلوگرم - مترمربع است. تراز مبنای سطح آب در چاهک واقع در محل ایستگاه پمپاژ ۱۲۰/۰ متر است. داده‌های منحنی مشخصه هر پمپ در جدول ۱ نشان داده شده است.

است. تعداد رشته‌های جمعیت در مراحل که تعداد متغیرهای تصمیم، کم است ۱۰۰ و در غیر این صورت ۱۵۰ می‌باشد. نکته مهم در پیوند دو الگوریتم شبیه‌ساز و ژنتیک، نحوه تعیین برازندگی رشته‌های جواب در الگوریتم ژنتیک است. تابعی با نام تابع برآورد برازندگی، تعیین برازندگی هر رشته را به عهده دارد. نحوه کار این تابع بدین صورت است که رشته مورد نظر را به الگوریتم شبیه‌ساز انتقال داده و پس از شبیه‌سازی سیستم، پارامترهایی نظیر حداقل فشار ایجاد شده و حداکثر زمان تحلیل (از لحظه توقف پمپاژ تا وقوع حباب‌زایی) را برمی‌گرداند. ترکیبی از این دو پارامتر و دیگر مشخصه‌های رشته مورد نظر، به عنوان معیار برازندگی آن رشته در نظر گرفته می‌شود. در شکل ۱ مراحل انجام بهینه‌یابی توسط الگوریتم بهینه‌یاب در یک فلوچارت نمایش داده شده است. لازم به ذکر است که در مرحله تعیین موقعیت بهینه مخازن، شماره‌گره‌ی که مخزن در آن قرار می‌گیرد به عنوان یک ژن در رشته‌های الگوریتم گنجانده می‌شود که این شماره‌گره با توجه به تقسیمات



شکل ۱- روال بهینه‌یابی توسط الگوریتم ژنتیک



شکل ۲- سیستم انتقال آب مورد بررسی

جدول ۱- داده های منحنی مشخصه پمپ

۲۸۳/۹	۲۵۲/۴	۱۸۹/۳	۱۲۶/۲	۶۳/۱	۰/۰	دبی (لیتر بر ثانیه)
۰/۰۰	۲۰/۵۷	۳۱/۵۵	۳۶/۸۸	۳۸/۸۶	۳۹/۳۲	هد (متر)
۵۹/۶۵۶	۷۲/۳۳۳	۶۸/۶۰۴	۵۸/۱۶۵	۴۳/۲۵۱	۳۷/۲۸۵	توان (کیلو وات)

جدول ۲- مشخصات خط لوله

شماره لوله	طول (متر)	قطر (متر)	شیب (درصد)	ضریب اصطکاک	سرعت موج (متر بر ثانیه)
۱	۶۱۰/۰	۰/۸	۰/۰۰	۰/۰۱۳	۱۰۹۴/۲
۲	۴۸۳۰/۰	۰/۸	۱/۸۰	۰/۰۱۳	۱۰۹۴/۲
۳	۳۲۲۰/۰	۰/۸	۱/۰۴	۰/۰۱۳	۱۰۶۲/۵

ناماندار و الگوریتم ژنتیک، بهینه‌یابی قطرها را در حالتی که سیستم دچار پدیده جدایی ستون آب شد انجام داده و نتایج به دست آمده با نتایج ناشی از بهینه‌یابی لوله‌ها در جریان ماندگار مقایسه شد. در این مرحله، هدف به حداقل رساندن تعداد پمپ‌های مورد نیاز، هزینه لوله‌ها و در عین حال افزایش زمان وقوع جریان ناماندار از لحظه توقف پمپاژ بود. با توجه به این هدف و قیدهای مسئله، تابع برازندگی تعریف شده در الگوریتم ژنتیک در این حالت به صورت زیر می‌باشد

$$\text{Fitness} = 100 + \frac{200}{\text{cost}} - 200\Delta Q - N_{pa} \cdot N_{st} + 2T_s \quad (۶)$$

که در آن:

cost، مجموع هزینه لوله‌های سیستم (هزینه واحد طول لوله‌ها فرضی می‌باشد)؛ ΔQ ، قدر مطلق اختلاف دبی مورد نیاز و دبی محاسبه شده از هر رشته؛ N_{pa} ، تعداد پمپ‌های موازی؛ N_{st} ، تعداد طبقات هر پمپ؛ و T_s زمان وقوع پدیده جدایی ستون آب از لحظه

مسیر انتقال آب از سه قطعه با شیب متفاوت تشکیل شده است و خط لوله مناسب از طریق بهینه‌یابی به دست خواهد آمد. مشخصات مسیر در جدول ۲ درج شده است. تراز آب در مخزن پایین دست ۲۵۶/۰ متر است و فرض می‌شود که در هنگام وقوع جریان ناماندار ثابت می‌ماند. همچنین تراز محل اتصال لوله به مخزن نسبت به سطح مینا، ۲۴۷/۰ متر است. لازم به ذکر است که مدل تحلیل جریان ناماندار استفاده شده، مأخوذ از کتاب "هیدرولیک سیستم‌های توزیع نوشته لاروک و همکاران" در سال ۲۰۰۰ می‌باشد [۱۳]. ساختار هندسی مثال حل شده نیز در شکل ۲ ارائه گردیده است.

۱-۴- تعیین مشخصات بهینه سیستم انتقال

به منظور بررسی تأثیر قطر لوله‌های سیستم بر فشارهای ایجاد شده در حالت جریان ناماندار، با ترکیب الگوریتم شبیه‌ساز جریان

¹ Larock et al.

اختلافی برابر با ۰/۳۰۷ ثانیه نسبت به مقدار به دست آمده برای جواب بهینه در حالت ناماندگار (۵/۴۸۲ ثانیه) بوده و تفاوت ناچیزی می‌باشد. بنابراین جواب بهینه به دست آمده در حالت ماندگار، به عنوان خط لوله مناسب این مسئله در مراحل بعدی بهینه‌سازی استفاده شد (ملاحظات اجرایی مؤید این انتخاب بود).

نتایج به دست آمده گویای یک خط انتقال آب متشکل از یک ایستگاه پمپاژ شامل چهار پمپ پنج طبقه موازی، یک خط لوله متشکل از چند لوله که به صورت سری به هم متصل شده‌اند و بالاخره مخزن ذخیره آب در بالادست خط انتقال بود.

با توجه به اینکه در این تحقیق، جلوگیری از پدید آمدن جدایی ستون آب را مد نظر قرار داده بودیم، جریان ناماندگار ناشی از خاموشی پمپ‌ها که باعث این پدیده می‌شد، به عنوان اساس ادامه روند، برگزیده شد. شکل ۱ گویای ارتباط و چگونگی اتصال الگوریتم بهینه‌یاب و مدل شبیه‌ساز جریان ناماندگار می‌باشد.

۴-۲- تعیین تعداد بهینه مخازن ضربه‌گیر

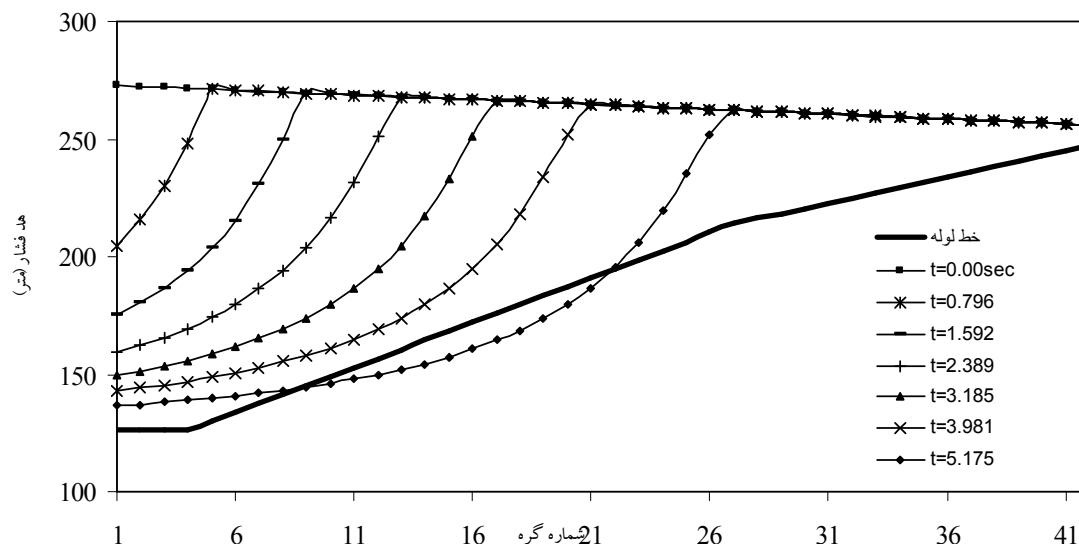
به منظور کنترل پدیده حباب‌زایی یا جدایی ستون آب، نخست باید نقاطی را در خط لوله شناسایی کرد که این پدیده در مراحل اولیه ناماندگاری جریان در آنها رخ می‌دهد و سپس با نصب دستگاههای مناسب، از رخداد آن جلوگیری نمود. شکل ۳، منحنیهای فشار را در زمانهای مختلف از هنگام توقف پمپاژ نشان می‌دهد. بالاترین منحنی، منحنی فشار در حالت پایدار (پیش از توقف پمپاژ) می‌باشد و پایین‌ترین منحنی، حالتی را نشان می‌دهد که در آن سیستم دچار جدایی ستون آب شده است (ثانیه ۵/۱۷۵). زمان مذکور هنگامی است که در آن هد فشار پیرومتریک در یکی از گره‌های سیستم از منفی ۱۰ متر آب کمتر شده است، اگرچه بسته به میزان اینرسی پمپ‌ها و هد فشار ایجاد شده توسط آنها، ممکن است پمپ‌ها متوقف نشده و جریان همچنان در لوله برقرار باشد. در این حالت به دلیل تغییر ماهیت جریان، معادلات حاکم بر آن تغییر نموده و روندیابی فشار و سرعت جریان متوقف می‌شود.

توقف پمپاژ می‌باشد. این مدت زمان در صورتی که سیستم دچار پدیده حباب‌زایی شود، از لحظه توقف پمپاژ تا لحظه ایجاد حباب‌زایی در نظر گرفته می‌شود و در غیر این صورت برابر با حداکثر زمان تحلیل است که در فایل ورودی به برنامه داده شده است.

همان‌گونه که مشاهده می‌شود قید مسئله (ΔQ) نیز به همراه پارامترهای تابع هدف (N_{st} و N_{pa} , $cost$, T_s) در تابع برازندگی الگوریتم ژنتیک وارد شده است. در رابطه ۶، ΔQ تأمین‌کننده این محدودیت است که دبی در خط لوله بهینه شده با دبی مورد نیاز برابر باشد. این رابطه به گونه‌ای نوشته شده است تا با حداکثر شدن T_s و حداقل شدن N_{st} و N_{pa} , $cost$ ، تابع برازندگی حداکثر شود و کمترین تعداد و بهترین ترکیب پمپ‌های سری و موازی نیز به دست آید. نکته مهم دیگر انتخاب ضرایب مناسب برای متغیرهای مسئله می‌باشد. در تابع برازندگی ضرایب متغیرهای با اهمیت یکسان به گونه‌ای انتخاب شده است که جملات مربوطه از یک مرتبه یکسان برخوردار گردند (لگاریتم اعشاری این جملات در محدوده دو عدد طبیعی متوالی قرار گیرد). عدد ثابت ۱۰۰ در این رابطه به منظور جلوگیری از منفی شدن تابع برازندگی به ازای رشته‌هایی از جمعیت، اضافه شده است. رشته مورد استفاده در الگوریتم ژنتیک در این حالت یک رشته شش‌خانه‌ای بود (به تعداد قطرهای در دسترس) که در هر خانه آن طول مورد نظر از یک قطر قرار می‌گرفت. در جدول ۳ نتیجه به دست آمده از این تحلیل به همراه نتایج به دست آمده از بهینه‌یابی در حالت ماندگار به منظور مقایسه آورده شده است. مشاهده می‌شود که هر شش اندازه موجود در جواب بهینه ارائه شده، موجود می‌باشند. با این حال، هزینه خط لوله در حالت ناماندگار به مقدار ۸/۲ درصد بیشتر می‌باشد. از طرفی اگر از جواب بهینه به دست آمده برای حالت ماندگار استفاده نموده و سیستم را مورد تحلیل ناماندگاری قرار دهیم، مشاهده می‌شود که حداکثر زمان به دست آمده از لحظه توقف پمپاژ تا لحظه ایجاد پدیده حباب‌زایی برابر با ۵/۱۷۵ ثانیه می‌باشد که دارای

جدول ۳- مقایسه جواب بهینه اندازه لوله‌های سیستم در جریان ماندگار و ناماندگار

اندازه قطر (متر)	طول لوله در جریان ماندگار (متر)	طول لوله در جریان ناماندگار (متر)
۰/۵	-	۹۲۷/۰
۰/۶	-	۵۸۰/۰
۰/۷	-	۱۷۱۳/۰
۰/۸	۸۶۶۰/۰	۲۴۹۶/۰
۰/۹	-	۲۳۳۴/۰
۱/۰	-	۶۱۰/۰
هزینه خط لوله (ریال)	۵۰۱۴۱۴۰۰۰	۵۴۲۰۵۹۲۰۰۰
زمان اجرای برنامه شبیه‌ساز (ثانیه)	۵/۱۷۵	۵/۴۸۲



شکل ۳- تغییرات هد فشار در سیستم تا زمان وقوع جدایی ستون آب

یا قطر مخزن صرفه جویی کنیم، به تعداد بیشتری مخزن جهت کنترل سیستم نیاز خواهیم داشت (جدولهای ۴ و ۵).

اطلاعات جدول ۴ مربوط به حالتی است که به غیر از تعداد مخازن و تراز آب آنها، دیگر مشخصات سیستم (از جمله قطر مخازن ضربه گیر معادل ۲ متر می باشد) ثابت فرض شده است. همان گونه که ملاحظه می شود کمترین ارتفاع ممکن سطح آب مخزن از محور لوله ۵/۲ متر می باشد که در این حالت تعداد مخازن بهینه مورد نیاز برای مقابله با پدیده حباب زایی، ۷ عدد می باشد. ارتفاعهای بالاتر از ۱۵/۰ متر تأثیری در تعداد مخازن مورد نیاز نداشته و پنج مخزن برای کنترل فشارهای منفی سیستم کافی خواهد بود.

به همین ترتیب با ثابت نگاه داشتن تراز آب در مخازن ضربه گیر (معادل ۸ متر)، تأثیر قطر مخزن بر تعداد بهینه مورد نیاز بررسی شد (جدول ۵). در این مورد نیز مشاهده شد که اگر از مخازنی با قطر ۰/۴ متر و با ارتفاع ۸/۰ متر استفاده می کردیم، ۷ مخزن برای کنترل سیستم نیاز می شد. حداکثر قطر مفید نیز ۰/۸ متر بود که به ازای آن باید ۵ مخزن با ارتفاع ۸/۰ متر در طول خط لوله (موقعیت های بهینه) نصب می گردید.

دو فاکتور اساسی در طراحی مخازن ضربه گیر، قطر مخازن و عمق آب است. در این قسمت به تعیین همزمان تعداد، موقعیت، قطر و عمق آب بهینه مخازن پرداخته شده است. در تعیین برازندگی رشته های الگوریتم ژنتیک در این مرحله علاوه بر زمان شبیه سازی، تعداد مخازن، قطر هر مخزن و ارتفاع آنها نیز لحاظ شد. فرم ریاضی تابع برازندگی به صورت زیر می باشد

$$Fitness = T_s + \frac{2}{N_s} + \frac{1}{\sum I H_s} + \frac{1}{\sum I D_s} \quad (7)$$

که در آن:

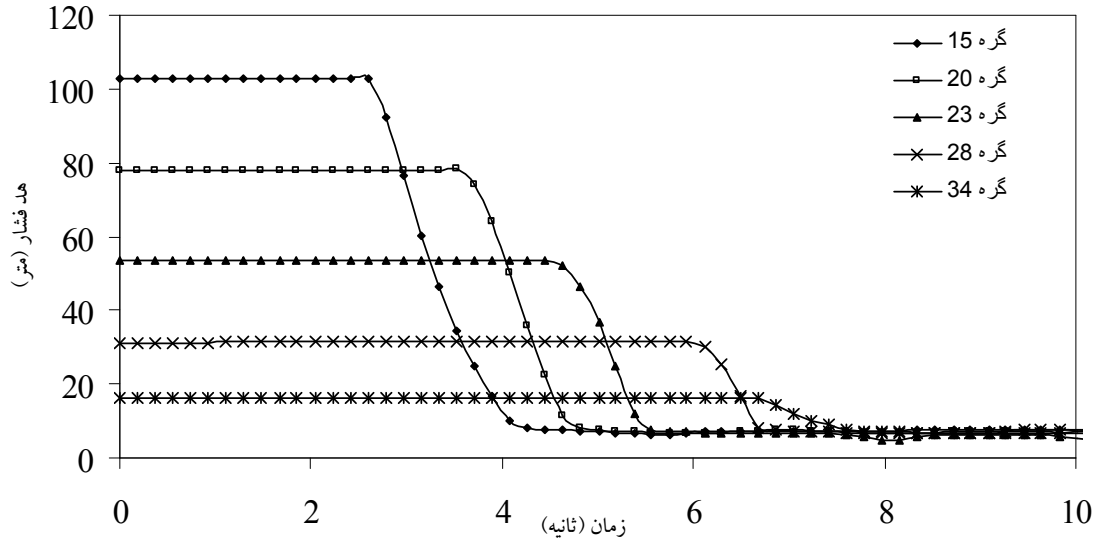
H_s و D_s به ترتیب عمق آب و قطر در هر مخزن است. ضریب عددی هر متغیر در این معادله به نحوی در نظر گرفته شد که اهمیت آن متغیر را به الگوریتم بهینه یاب دیکته می کرد. لازم به ذکر است، از آنجا که هزینه مخازن تابعی از تعداد، قطر و ارتفاع آنها می باشد از هزینه ریالی به صورت مستقیم در رابطه فوق استفاده نشده است. تعداد بهینه مخازن ضربه گیر در یک سیستم انتقال علاوه بر اینکه به مشخصات نسبی و هیدرولیکی طرح مرتبط است، به اندازه و حجم هر مخزن نیز بستگی دارد. بدین معنی که هر چه در ارتفاع و

جدول ۴- حداقل مخازن مورد نیاز در محدوده های ارتفاعی مختلف

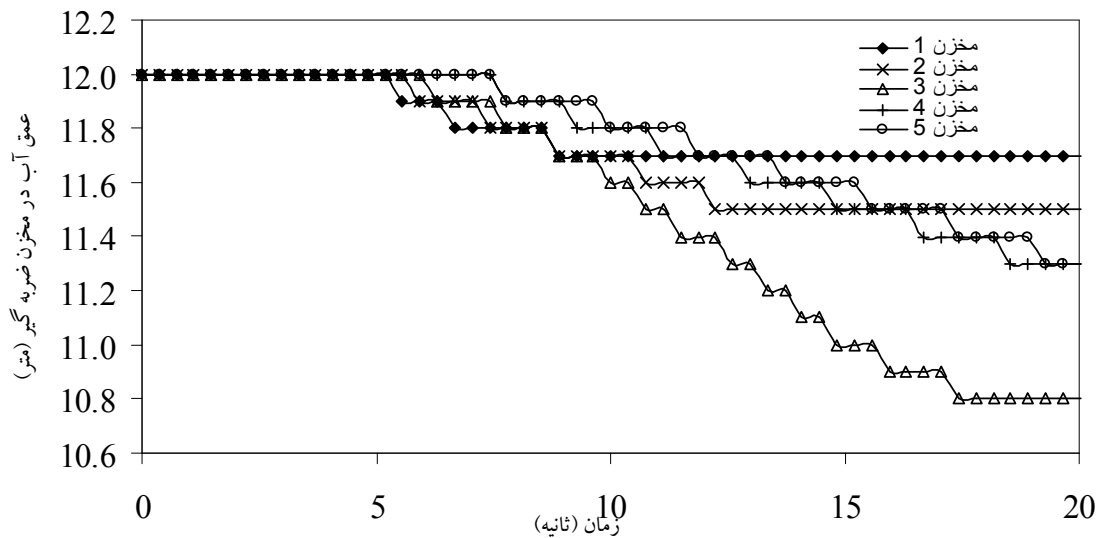
عمق آب در مخازن ضربه گیر (متر)	۳/۰-۴/۰	۴/۰-۱۵/۰	۱۵/۰ و بیشتر
تعداد بهینه مخازن	۷	۶	۵

جدول ۵- حداقل مخازن مورد نیاز در محدوده قطرهای مختلف

قطر مخازن ضربه‌گیر (متر)	۰/۴-۰/۸	۰/۸-۲/۰	۲/۰ و بیشتر
تعداد بهینه مخازن	۷	۶	۵



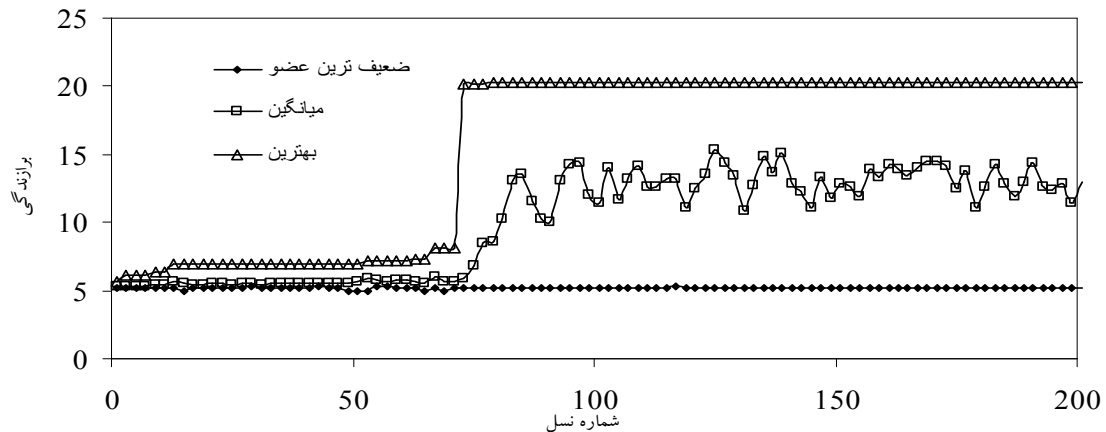
شکل ۴- تغییرات فشار در محل مخازن ضربه‌گیر



شکل ۵- روند کاهش عمق آب در مخازن ضربه‌گیر

می‌شود، در هنگام توقف پمپاژ، افت هد در سیستم شدید بوده و به عنوان مثال در این پنج گره، در مدت زمانی حدود ۱/۵ ثانیه، هد فشار به هد آب در مخازن ضربه‌گیر کاهش می‌یابد.

شکل ۴ تغییرات هد را در گره‌هایی که به عنوان موقعیتهای بهینه نصب مخزن ضربه‌گیر شناخته شده‌اند و شکل ۵ نحوه تغییر عمق آب را در مخازن مذکور نشان می‌دهد. همان گونه که در شکل ۴ مشاهده



شکل ۶- روند تکامل بهترین، میانگین و تغییرات بدترین عضوهای جمعیت در بهترین مدل ایجاد شده

۵- پیشنهادها

الگوریتم ژنتیک به عنوان ابزاری نیرومند در جهت تخمین و برآورد مشخصات دقیق مخزن (مخازن) هوا در جهت کاهش اثرات نامناسب جریان ناماندگار، مؤثر می‌باشد به شرطی که به طور مستقیم جریان ناماندگار را هدف قرار دهد. حال پیشنهاد می‌گردد، به منظور کنترل فشارهای نامطلوب (منفی یا مثبت) در خطوط لوله، که در هنگام ایجاد ضربه قوچ پدید می‌آیند، علاوه بر مخازن ضربه‌گیر، مخزن هوا و تجهیزات دیگری نظیر شیرهای فشارشکن، شیرهای ورود هوا، یک طرفه و غیره نیز به کار روند. بهینه‌یابی آنها از منظر تعداد، خصوصیت و مکان به کارگیری هر کدام می‌تواند کاربردی و راهگشا باشد. بررسی و بهینه نمودن اثر قطر لوله‌ها بر پدیده ناماندگاری در یک خط انتقال آب، نیز به عنوان موضوعی دیگر در جهت درک بهتر جریان ناماندگار، می‌تواند مورد مطالعه و تحقیق واقع شود. به علاوه با توجه به روابط پیچیده بین ادوات کنترلی، مناسب است که همگی در یک برنامه جامع جهت حصول به جواب بهینه نهایی اعمال گردند.

به دلیل وجود مخزن ضربه‌گیر در این گره‌ها، فشار آنها تثبیت شده و از پدیده جدایی ستون آب جلوگیری می‌گردد. در گره متصل به مخزن ۱ از شکل ۴، هد اولیه برابر با ۱۰۰ متر و در $1/48$ ثانیه بعد برابر با $10/1$ متر بود. بنابراین آهنگ کاهش فشار در این مدت زمان به طور متوسط برابر با $60/7$ متر بر ثانیه قرار داشت. این در حالی است که مخزن ضربه‌گیر مانع از کاهش بیشتر فشار در این گره می‌شد. در گره‌هایی که هد فشار آنها در حالت پایدار بزرگ می‌باشد، سرعت زیاد کاهش فشار می‌تواند خطرناک بوده و به خط لوله آسیب وارد کند. در صورت عدم وجود مخزن ضربه‌گیر، آهنگ کاهش فشار شدیدتر بوده و ممکن است باعث شکست لوله گردد. با وجود این، شکل ۵ نشان می‌دهد که کاهش عمق آب در مخازن به تدریج و با آهنگ کمی صورت گرفت و یا چنان که در این شکل دیده می‌شود حتی در مواقعی متوقف شده و سپس دوباره جریان از مخزن به خط لوله برقرار می‌شد. شکل ۶ بیانگر مسیر دستیابی به جواب بهینه مسئله در این مرحله می‌باشد.

۶- مراجع

- ۱- بیجاری، م. (۱۳۷۰). "تعیین قطر اقتصادی لوله‌ها در شبکه‌های توزیع آب." م. آب و فاضلاب، ۵، ۹-۱۸.
- 2- Jacoby, L. S. (1968). "Design of optimal hydraulic networks." *J. Hydr. Div.*, ASCE, 94(HY3), 641-661.
- 3- Lam, C. F. (1973). "Discrete gradient optimization of water systems." *J. Hydr. Div.*, ASCE, 99(HY6), 863-872.
- 4- Deb, A. K. (1973). "Least cost design of water main system in series." *J. Envir. Eng.*, ASCE, 99(EE3), 405-409.
- 5- Rasmusen, H. J. (1976). "Simplified optimization of water supply systems." *J. Envir. Eng.*, ASCE, 102(EE2), 313-327.
- 6- Alprovis, E., and Shamir, U. (1977). "Design of water distribution systems." *J. Water Resour. Res.*, 13(6), 885-900.

- 7- Kher, L. K., Agarwal, S. K., and Khanna, P. (1980). "Nonlinear optimization of water supply systems." *J. Envir. Eng.*, ASCE, 105(EE4), 781-784.
- 8- Fujiwara, O., and Khang, D. B. (1990). "A two-phase decomposition method for optimal design of looped water distribution networks." *J. Water Resour. Res.*, 26(4), 539-549.
- 9- Tang, K. W., and Karney, B. (1996). "Genetically engineered hydraulic pipe network models." <<http://www.cerca.umontreal.ca/cfd2ke/abstracts/124.pdf>> (2003, May).
- 10- Simpson, A. R., and Wu, Z. Y. (1997). "Computer modeling of hydraulic transients in pipe." Proc., Networks and the Associated Design Criteria, *MODSIM 97, International Congress on Modeling and Simulation*, Modeling and Simulation Society of Australia, Hobart, Tasmania, Australia.
- 11- Vitkovsky, J. P., Simpson, A. R., and Lambert, M. F. (1999). "Leak detection and calibration of water distribution systems using transients and genetic algorithms." *Water Distribution Systems Conference*, Div. of Water Resour. Plng. and Mgmt., ASCE, Tempe, Arizona.
- 12- Michalewicz, Z. (1992). *Genetic algorithms data structure evolution programs*, 1st Ed., Springer-Verlay, Berlin, Heidelberg.
- 13- Larock, B. E., Jeppson, R. W., and Watters, G. Z. (2000). *Hydraulics of pipeline systems*, 1st Ed., CRC Press.