

# طراحی بهینه سیستم انتقال ثقلی در مقابل ضربه قوچ ناشی از بسته شدن شیر با دو روش الگوریتم ژنتیک و بهینه‌سازی ریاضی

مریم روحانی<sup>۱</sup>

محمدهادی افشار<sup>۲</sup>

(دریافت ۹۲/۲/۵)

(پذیرش ۹۲/۱۲/۱۸)

## چکیده

طراحی بهینه سیستم انتقال از موضوعات مهمی است که امروزه صنعت آب با آن روبرو است. در این تحقیق، طراحی بهینه قطر و ضخامت لوله‌های سیستم انتقال با استفاده از دو روش الگوریتم ژنتیک و بهینه‌سازی ریاضی، برای جلوگیری از انتشار ضربه قوچ در سیستم در اثر بسته شدن شیر انجام شد. به منظور شبیه‌سازی جریان گذرا از روش خطوط مشخصه که دارای سرعت بالایی است، استفاده شد. مسئله طراحی بهینه سیستم انتقال، همان‌گونه که از طبیعت آن مشخص است، مسئله‌ای مقید بوده که حل آن نیازمند استفاده از روشهای بهینه‌سازی مقید است. با استفاده از توابع جریمه خارجی، مسئله مقید مورد نظر به مسئله‌ای نامقید تبدیل شد. تابع هدف مسئله به صورت کمینه کردن هزینه خرید و نصب لوله‌ها منظور شد. به منظور نشان دادن کارایی روش‌های ارائه شده، طراحی بهینه یک سیستم انتقال با استفاده از دو روش بهینه‌سازی ریاضی و الگوریتم ژنتیک انجام شد. مقایسه نتایج این دو روش نشان داد که جواب به‌دست آمده از روش بهینه‌سازی ریاضی اندکی بهتر از نتایج حاصل از الگوریتم ژنتیک است.

**واژه‌های کلیدی:** ضربه قوچ، شیر کنترل، مخزن آب، الگوریتم ژنتیک، بهینه‌سازی ریاضی

## Optimal Design of Gravity Pipeline Systems Using Genetic Algorithm and Mathematical Optimization

M. Rohani<sup>1</sup>

M. H. Afshar<sup>2</sup>

(Received Apr. 25, 2013 Accepted March 9, 2014)

### Abstract

In recent years, the optimal design of pipeline systems has become increasingly important in the water industry. In this study, the two methods of genetic algorithm and mathematical optimization were employed for the optimal design of pipeline systems with the objective of avoiding the water hammer effect caused by valve closure. The problem of optimal design of a pipeline system is a constrained one which should be converted to an unconstrained optimization problem using an external penalty function approach in the mathematical programming method. The quality of the optimal solution greatly depends on the value of the penalty factor that is calculated by the iterative method during the optimization procedure such that the computational effort is simultaneously minimized. The results obtained were used to compare the GA and mathematical optimization methods employed to determine their efficiency and capabilities for the problem under consideration. It was found that the mathematical optimization method exhibited a slightly better performance compared to the GA method.

**Keywords:** Water Hammer, Valve, Reservoir, Genetic Algorithm, Mathematical Optimization.

1. PhD Student of Water and Environmental Eng., Iran University of Science and Tech., Tehran (Corresponding Author) 09123162480 mrohani@iust.ac.ir  
2. Assoc. Prof., Dept. of Civil Eng., Iran University of Science and Tech., Tehran

۱- دانشجوی دکترا، گروه آب و محیط زیست، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، mrohani@iust.ac.ir ۰۹۱۲۳۱۶۲۴۸۰ (نویسنده مسئول)  
۲- دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

و کمینه استفاده نمودند [۶]. افشار و همکاران در سال ۲۰۰۵، روشی را برای بهینه‌سازی همزمان جانمایی و ابعاد و اندازه مولفه‌های شبکه‌های آب، که بر اساس قضاوت مهندسی استوار بود، ارائه دادند [۷]. ملک‌پور و همکاران در سال ۲۰۰۷ با ارائه راهکار روشن یا خاموش بودن پمپ، عملکرد سیستم انتقال آب شهر یزد در ایران را بهبود دادند. برای این منظور عملکرد هیدرولیکی کلیه اعضای سیستم برای شرایط مختلف جریان در طول دوره ۲۴ ساعته مورد ارزیابی قرار گرفت. جواب بهینه بر اساس این فرض که هر مخزن در هر روز تنها یک بار می‌تواند خاموش و روشن شود به دست آمد [۸]. خاله و همکاران در سال ۲۰۰۸، از مدل برنامه‌ریزی خطی برای طراحی بهینه سیستم آبیاری، با تابع هدف حداقل کردن هزینه ساخت و بهره‌برداری، استفاده نمودند [۹].

در این تحقیق از روش‌های برنامه‌ریزی ریاضی و الگوریتم ژنتیک به‌عنوان الگوریتم‌های بهینه‌سازی در طراحی بهینه سیستم انتقال استفاده شد. هدف از این کار مقایسه قابلیت‌های دو روش و نتایج به‌دست آمده از آنها بود.

## ۲- مدل بهینه‌سازی

مسئله طراحی بهینه سیستم انتقال با جانمایی مشخص را می‌توان به‌صورت زیر در قالب کلی مسائل بهینه‌سازی ریاضی تعریف کرد

$$\begin{aligned} \text{Min} C &= \sum f(d_i, t_i) \quad i=1, \dots, NP \\ \text{Subject to} & \\ g_i(V_i, d_i, t_i, \sigma_i, H_i) &\leq 0 \end{aligned} \quad (1)$$

که در آن

$C$  هزینه طرح،  $V_i$  سرعت در دبی طراحی لوله  $\lambda$ ام،  $d_i$  قطر لوله  $\lambda$ ام،  $t_i$  ضخامت لوله  $\lambda$ ام،  $\sigma_i$  مقدار تنش لوله  $\lambda$ ام،  $H_i$  مقدار هد در لوله  $\lambda$ ام و  $NP$  تعداد لوله‌ها در سیستم انتقال است.

## ۲-۱- تابع هدف

مجموع هزینه‌های طرح که شامل هزینه‌های خرید، اجرا و نصب لوله‌ها است، به‌عنوان تابع هدف در نظر گرفته می‌شود که باید کمینه شود. بنابراین تابع هدف به‌صورت زیر تعریف می‌شود

$$C_T = \sum L_i \times C_{P_i}(d_i, t_i) \quad (2)$$

که در آن

$C_{P_i}$  هزینه واحد طول کارگذاری لوله  $\lambda$ ام در سیستم انتقال و  $L_i$  طول لوله  $\lambda$ ام است.

ضربه قوچ پدیده‌ای است که در سیستم‌های تحت فشار انتقال سیال واقع می‌شود و بر پایه قوانین فشار، تغییرات دبی و سرعت جریان و شرایط زمانی و مکانی حرکت سیال استوار است و با ایجاد موج‌های سریع و زودگذر و میرا، موجب ایجاد اثرات زیان‌آور گوناگونی می‌شود. تغییر عملکرد یک شیر عموماً به تغییر سرعت جریان در لوله‌های انتقال سیال منجر می‌شود. این تغییر سرعت در لوله‌های انتقال، می‌تواند با تغییر اندازه حرکت سیال داخل مجرا به نیروی مخربی تبدیل شود که در صورت عدم کنترل، باعث آسیب رساندن به سیستم انتقال و بالاخص لوله‌های انتقال می‌شود.

روش خطوط مشخصه قابلیت بالایی در تحلیل جریان سیالات به خصوص زمانی که جریان یک بعدی بوده و سرعت جریان در مقایسه با سرعت امواج (اعم از امواج سطحی یا فشاری) قابل صرف نظر کردن باشد، دارد.

در سال‌های اخیر، طراحی بهینه سیستم انتقال به‌طور قابل ملاحظه‌ای مورد توجه واقع شده است. بهینه‌سازی سیستم انتقال هنگامی که به‌صورت ریاضی فرمول‌بندی شود، نمایانگر یک مسئله بهینه‌سازی غیرخطی مقید است. لانس و مایس در سال ۱۹۸۹ از یک مدل بهینه‌سازی برای طراحی سیستم توزیع آب با هدف کمینه کردن هزینه استفاده کردند و به این منظور روش برنامه‌ریزی غیرخطی را با مدل شبیه‌ساز شبکه توزیع آب ترکیب نمودند [۱]. سیمپسون و همکاران در سال ۱۹۹۴، بهینه‌سازی شبکه لوله‌ها را با هدف کمینه کردن هزینه انجام دادند و برای این منظور از روش‌های الگوریتم ژنتیک، بهینه‌سازی غیرخطی و روش جستجوی متداول استفاده کردند [۲]. ساویک و والترز در سال ۱۹۹۷، از الگوریتم ژنتیک برای طراحی بهینه سیستم توزیع آب با هدف کمینه کردن هزینه استفاده کردند و نشان دادند که الگوریتم ژنتیک در بعضی موارد نتایج بهتری نسبت به سایر روش‌های بهینه‌سازی تولید می‌کند [۳]. جانگ و کارنی در سال ۲۰۰۳ به طراحی بهینه ادوات هیدرولیکی در یک سیستم توزیع آب پرداختند و بهینه‌سازی جانمایی، اندازه و تعداد وسایل هیدرولیکی در یک خط لوله را با توجه به وجود جریان گذرا در سیستم و پدیده ضربه قوچ، با استفاده از الگوریتم ژنتیک انجام دادند و تابع هدف را به صورت کمینه کردن تفاوت میان هد بیشینه و کمینه منظور نمودند [۴]. آنها در سال ۲۰۰۴ در ادامه، با استفاده از الگوریتم‌های تکاملی ژنتیک و کوچ دسته‌جمعی پرندگان به بهینه‌سازی خطوط لوله به‌منظور پیدا کردن قطر بهینه لوله‌ها با هدف کمینه کردن هزینه پرداختند [۵]. ایشان همچنین در سال ۲۰۰۶ از الگوریتم‌های ذکر شده برای بهینه‌سازی موقعیت، ابعاد و نوع وسایل کنترل‌کننده ضربه قوچ در سیستم‌های توزیع آب با هدف کمینه کردن تفاوت میان هد بیشینه

از توابع جریمه خارجی به عنوان روشی برای تبدیل مسئله اصلی مقید به مسئله‌ای نامقید استفاده شد. مسئله نامقید حاصل با استفاده از نرم افزار عمومی DOT<sup>1</sup> و استفاده از روشهای BFGS<sup>2</sup> و جهات مزدوج (فلچر- ریوس) حل شده است [۱۰].

با در نظر گرفتن قطر و ضخامت لوله به عنوان متغیرهای تصمیم، قیود قطر و ضخامت از طریق الگوریتم بهینه سازی ارضا می شوند. سایر قیود از طریق تابع جریمه به تابع هزینه اضافه می شود. به این ترتیب تابع هدف به صورت زیر نوشته می شود که در آن برای یکسان سازی اثر قیود از شکل نرمال سازی شده آنها استفاده شد

$$\min \left\{ C_T + R \sum_{i=1}^{NP} [CSVP_{\min}^2 + CSVP_{\max}^2 + CSVV_{\max}^2 + CSV\sigma_{\max}^2] \right\} \quad (9)$$

که در آن

CSV تخلف از قیود و R ضریب جریمه است که مقدار آن در صورت تخلف از قیود، عددی بزرگ و در صورتی که قیود ارضا شوند، معادل صفر منظور می شود

$$CSVP_{\min} = \begin{cases} 1 - \frac{P_i}{P_{\min}} & \text{if } 1 - \frac{P_i}{P_{\min}} > 0 \\ 0 & \text{if } 1 - \frac{P_i}{P_{\min}} \leq 0 \end{cases}$$

$$CSVP_{\max} = \begin{cases} \frac{P_i}{P_{\max}} - 1 & \text{if } \frac{P_i}{P_{\max}} - 1 > 0 \\ 0 & \text{if } \frac{P_i}{P_{\max}} - 1 \leq 0 \end{cases}$$

$$CSVV_{\max} = \begin{cases} \frac{V_i}{V_{\max}} - 1 & \text{if } \frac{V_i}{V_{\max}} - 1 > 0 \\ 0 & \text{if } \frac{V_i}{V_{\max}} - 1 \leq 0 \end{cases}$$

$$CSV\sigma_{\max} = \begin{cases} \frac{\sigma_i}{\sigma_{\max}} - 1 & \text{if } \frac{\sigma_i}{\sigma_{\max}} - 1 > 0 \\ 0 & \text{if } \frac{\sigma_i}{\sigma_{\max}} - 1 \leq 0 \end{cases}$$

### ۳-۱-۱- تعیین ضریب جریمه

استفاده از روش تابع جریمه مستلزم معلوم بودن مقدار ضریب جریمه است. کیفیت جواب مسئله بهینه سازی بستگی زیادی به مقدار ضریب جریمه دارد. اگر ضریب جریمه کوچک باشد، ممکن است جواب مسئله یک جواب نشدنی باشد و اگر خیلی بزرگ باشد،

هزینه خرید و نصب لوله ها تابعی غیر خطی از قطر و ضخامت لوله ها است. این هزینه ها تابعی از پارامترهای متفاوت است و مقدار آن تنها با برازش داده های واقعی مشخص می شود. در این تحقیق، هزینه های مربوط به کارگذاری لوله ها به صورت تابعی از قطر و ضخامت به شکل زیر منظور شد

$$C_{P_i} = 7.37 \times (3.14 \times d_i \times t_i)^2 + 3.02 \times 0.314 \times d_i \times t_i \quad (3)$$

### ۲-۲- قیود

قیود در این مسئله به شرح زیر است:  
- قید حداکثر سرعت در دبی طراحی

$$V_i \leq V_{\max} \quad i = 1, \dots, NP \quad (4)$$

- قید حداکثر تنش لوله

$$\sigma_i \leq \sigma_{\max} \quad i = 1, \dots, NP \quad (5)$$

- قید حداکثر فشار برای جلوگیری از آسیب رساندن به تجهیزات و حداقل فشار برای جلوگیری از کاویتاسیون

$$P_{\min} \leq P_i \leq P_{\max} \quad i = 1, \dots, NP \quad (6)$$

- قید حداقل و حداکثر ضخامت و قطر لوله

$$t_{\min} \leq t_i \leq t_{\max} \quad i = 1, \dots, NP \quad (7)$$

$$d_{\min} \leq d_i \leq d_{\max} \quad i = 1, \dots, NP \quad (8)$$

### ۳- روش های حل مسئله

الگوریتم های متعددی در بهینه سازی سیستم انتقال استفاده شده است. در این تحقیق از روش های برنامه ریزی غیر خطی و همچنین الگوریتم ژنتیک، به دلیل مقایسه قابلیت های دو روش، در حل مسئله ذکر شده، استفاده شد.

### ۳-۱- روش برنامه ریزی غیر خطی

روش برنامه ریزی غیر خطی یکی از انواع روش های مورد استفاده برای حل مسائل بهینه سازی است که تابع هدف را در کنار تأمین قیود مربوطه، بهینه می کند. این روش برای حل مسائلی که قیود یا تابع هدف آنها غیر خطی است، به کار می رود. مسئله طراحی بهینه سیستم انتقال، مسئله ای مقید است که حل آن نیازمند استفاده از روش های بهینه سازی مقید است. در این تحقیق از روشی نامقید برای طراحی بهینه سیستم انتقال استفاده شد که این امر نیازمند تبدیل مسئله مقید مورد نظر به مسئله ای نامقید است. به این منظور

<sup>1</sup> Design Optimization Technologies

<sup>2</sup> Broydon-Fletcher-Goldfarb-Shanno

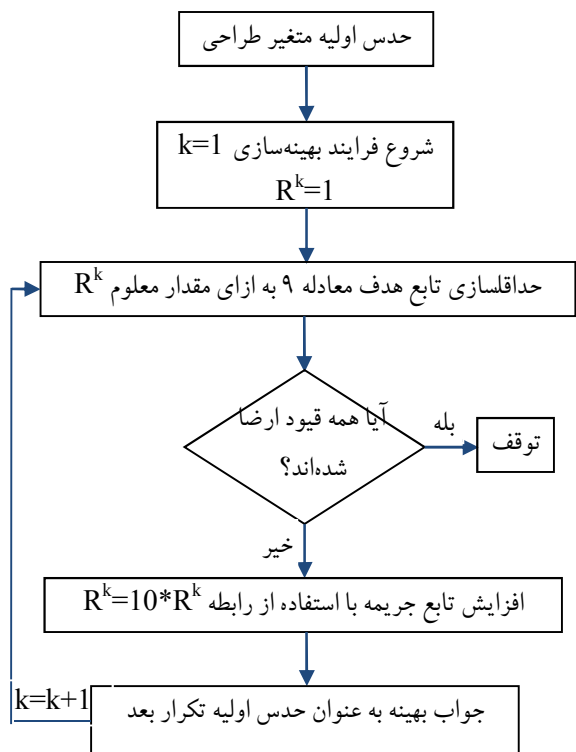
جواب به دست آمده کیفیت خوبی نخواهد داشت. روش متداول در تعیین مقدار مناسب ضریب جریمه مبتنی بر سعی و خطاست که هزینه فرایند بهینه‌سازی را افزایش خواهد داد [۱۱]. در این تحقیق از فرایندی تکراری برای تعیین مقدار ضریب جریمه استفاده شد. در این روش مقدار ضریب جریمه در حین فرایند بهینه‌سازی تعیین شده و لذا موجب افزایش هزینه‌های محاسباتی نمی‌شود. فلوجارت فرایند بهینه‌سازی با تاکید بر نحوه تعیین ضریب تابع جریمه در شکل ۱ نشان داده شده است.

### ۲-۳- روش الگوریتم ژنتیک

در این تحقیق با توجه به طبیعت متغیرهای تصمیم، از مدل بهینه‌سازی به شرح زیر استفاده شد [۱۲]:

#### ۱-۲-۳- کدگذاری متغیرهای تصمیم

با توجه به اینکه الگوریتم ژنتیک با مجموعه‌ای از پارامترهای کدگذاری شده سر و کار دارد و نه خود آنها، بنابراین لازم است که متغیرهای تصمیم به نحو مناسبی کدگذاری شوند. روش‌های مختلفی برای کدگذاری وجود دارند که می‌توان از آنها استفاده نمود. در اینجا با توجه به پیوسته بودن متغیرهای تصمیم از کدگذاری اعشاری متغیرهای پیوسته استفاده شد.



شکل ۱- فلوجارت فرایند بهینه‌سازی غیرخطی

### ۲-۲-۳- تابع برازندگی

در این مسئله هر کروموزوم (بردار متغیرهای تصمیم) معرف یک خط انتقال است و هدف مسئله، حداقل کردن هزینه آن خط انتقال است. بنابراین خط انتقالی که هزینه کمتری داشته باشد، مناسب‌تر است و باید برازندگی بیشتری داشته باشد. یک روش برای محاسبه برازندگی خط انتقال، استفاده از معکوس هزینه خط انتقال به‌عنوان برازندگی است که در این تحقیق از آن استفاده شد.

### ۳-۲-۳- نحوه اعمال جریمه

قیود ذکر شده در مسئله مقید طراحی بهینه خطوط انتقال، همان‌گونه که در روش برنامه‌ریزی غیرخطی شرح داده شد، به‌صورت تابع جریمه به تابع هدف افزوده شده تا مسئله مقید مورد نظر به مسئله‌ای نامقید تبدیل شود.

### ۴-۲-۳- نحوه انتخاب

در مدل پیشنهادی از روش چرخ‌گردان<sup>۱</sup> برای انتخاب والدین استفاده شد.

### ۵-۲-۳- ترکیب (تزیج)

برای انجام عمل ترکیب از روش ترکیب یک نقطه‌ای<sup>۲</sup> استفاده شد. احتمال مناسب برای انجام ترکیب، ۵۰ تا ۸۵ درصد بود که به معنی آن است که تنها ۵۰ تا ۸۵ درصد از جمعیت انتخاب شده با یکدیگر ترکیب می‌شوند [۱۲]. در این تحقیق از احتمال تزیج ۸۵ درصد استفاده شد.

### ۶-۲-۳- جهش

اعمال جهش<sup>۳</sup> در مدل پیشنهادی به‌صورت یک بیت در کروموزوم انجام می‌پذیرد. نحوه عمل به این‌گونه است که بر روی هر کروموزوم یک عدد تصادفی تولید می‌شود. اگر مقدار عدد تصادفی از احتمال جهش کوچک‌تر باشد، جهش بر روی یکی از بیت‌ها انجام می‌شود و در غیر این صورت انجام نمی‌شود. به این ترتیب اگر طول کروموزوم  $K$  باشد، این نوع از جهش معادل جهش یکنواخت با احتمال  $\frac{0.5}{K}$  است. یک کروموزوم به‌صورت تصادفی از میان جمعیت انتخاب می‌شود. سپس عدد تصادفی  $k$  بین ۱ و طول کروموزوم انتخاب شده و نهایتاً مقدار بیت  $k$ ام به صورت تصادفی در محدوده مقادیر مجاز انتخاب و جانشین مقدار قبلی می‌شود.

<sup>1</sup> Roulette-wheel

<sup>2</sup> One-point Crossover

<sup>3</sup> Mutation

نسل انتخاب و به نسل بعدی منتقل می‌شود. با این کار احتمال از دست دادن اطلاعات بهترین جواب وجود ندارد و سرعت همگرایی افزایش می‌یابد.

### ۳-۲-۸- معیار همگرایی

با توجه به اینکه نخبه‌گرایی باعث تکثیر بهترین جواب در نسل بعد می‌شود، معیار همگرایی<sup>۲</sup> به این صورت فرض می‌شود که بهترین جواب در تعداد مشخصی از نسل‌های بعدی ثابت مانده و یا تکرار شود. معیار همگرایی در این تحقیق به این ترتیب فرض شد که بهترین جواب در ۵۰ تکرار متوالی ثابت بماند.

### ۳-۲-۹- گام‌های مدل پیشنهادی

روش ارائه شده در این تحقیق برای دستیابی به طرح بهینه خطوط انتقال بر اساس الگوریتم ژنتیک، به صورت فلوجارت در شکل ۲ نشان داده شده است. اطلاعات ورودی شامل اطلاعات خط انتقال (تعداد لوله‌ها، تعداد گره‌ها، مقدار مصارف گرهی، تراز زمین، منشأ ایجاد ضربه قوچ و غیره) و اطلاعات ژنتیک (تعداد جمعیت<sup>۳</sup>، تعداد نسل<sup>۴</sup>، احتمال جهش و ترکیب، نحوه انتخاب، معیار همگرایی و غیره) است.

### ۴- مدل شبیه‌ساز هیدرولیکی

محاسبه سرعت و فشار جریان آب در لوله‌ها وظیفه مدل شبیه‌ساز است. کارایی طرح بستگی به دقت شبیه‌سازی هیدرولیکی شرایط جریان در خطوط انتقال دارد، بنابراین استفاده از مدل شبیه‌سازی مناسب، تأثیر بسزایی در دستیابی به طرح بهینه دارد. در این تحقیق از روش خطوط مشخصه برای شبیه‌سازی جریان استفاده شد.

### ۴-۱- روش خطوط مشخصه

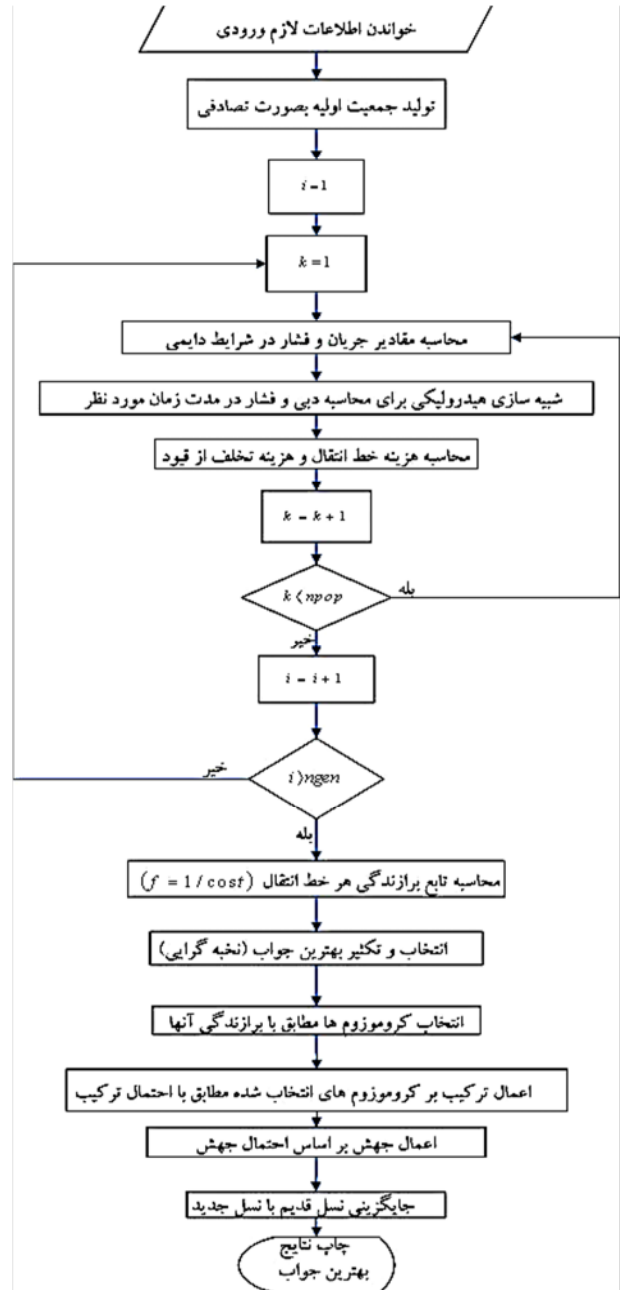
معادلات حاکم بر پدیده ضربه قوچ به شرح زیر است [۱۳]

$$L_1 = \frac{\partial Q}{\partial t} + gA \frac{\partial H}{\partial x} + RQ|Q| = 0 \quad (10)$$

$$L_2 = a^2 \frac{\partial Q}{\partial x} + gA \frac{\partial H}{\partial t} = 0 \quad (11)$$

که در آن

$R = f/(2DA)$ ،  $D$  قطر لوله،  $A$  سطح مقطع لوله،  $f$  ضریب اصطکاک لوله،  $H$  هد،  $Q$  میزان دبی،  $x$  مکان،  $t$  بیانگر زمان،  $g$



شکل ۲- فلوجارت فرایند بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک

جهش موجب گسترده شدن فضای جستجو و افزایش سرعت همگرایی می‌گردد. احتمال جهش، تعداد کروموزوم‌های جهش یافته را مشخص می‌کند. در این تحقیق از احتمال جهش ۰/۵۰ استفاده شده است.

### ۳-۲-۷- نخبه‌گرایی

در این تحقیق از قابلیت نخبه‌گرایی<sup>۱</sup> در مدل ژنتیک پیشنهادی استفاده شد. این به آن معنی است که همیشه بهترین جواب یک

<sup>۱</sup>Elitism

<sup>۲</sup> Convergence Criteria

<sup>۳</sup> Npop

<sup>۴</sup> Ngen

مقادیر مربوط به فشار و دبی در نقطه P بر اساس مقادیر معلوم فشار و دبی در نقاط A و B از روابط زیر به دست می آید [۱۳]

$$Q_P - Q_A + \frac{gA}{a}(H_P - H_A) + R\Delta t Q_A |Q_A| = 0 \quad (19)$$

$$Q_P - Q_B - \frac{gA}{a}(H_P - H_B) + R\Delta t Q_B |Q_B| = 0 \quad (20)$$

حال با ترکیب مقادیر معلوم در روابط ۱۹ و ۲۰، مجموعه روابط زیر حاصل می شوند [۱۳]

$$Q_P = C_P - C_a H_P \quad (21)$$

$$Q_P = C_n + C_a H_P \quad (22)$$

$$C_P = Q_A + \frac{gA}{a} H_A - R\Delta t Q_A |Q_A| \quad (23)$$

$$C_n = Q_B - \frac{gA}{a} H_A - R\Delta t Q_B |Q_B| \quad (24)$$

$$Q_B = 0.5(C_P + C_a) \quad (25)$$

$$C_a = \frac{gA}{a} \quad (26)$$

#### ۴-۲- شرایط مرزی شیر کنترل

کنترل جریان به وسیله شیرهای مختلفی صورت می پذیرد اما به طور کلی این شیرها از لحاظ شرایطی که برای پدیده ضربه قوچ ایجاد می نمایند به دو نوع تقسیم می شوند که عبارتند از:

- ۱- شیرهایی که به طور ناگهانی باز و بسته می شوند.
  - ۲- شیرهایی که در یک بازه زمانی ( $t_c$ ) باز و بسته می شوند.
- حال با توجه به تقسیم بندی فوق، تشریح شرایط مرزی حاکم بر گونه های مختلف این مرز در نظر گرفته می شود.

#### ۴-۲-۱- مرز شیر که به طور ناگهانی باز و بسته می شود

در این مرز با فرض بسته شدن ناگهانی شیر، سرعت جریان در اولین لحظه پس از بسته شدن صفر می شود که در واقع به دلیل همین تغییر ناگهانی سرعت است که پدیده ضربه قوچ به وجود می آید. بنابراین در مرز مربوط به این نقطه در طول زمان تحلیل، سرعت صفر فرض می شود. از آنجا که این نوع مرز، خود عامل به وجود آمدن پدیده ضربه قوچ است و هدف تحلیل، محاسبه فشار در آن است، لذا این مرز، شرایطی در مورد فشار را به سیستم حکم نمی نماید و فشار در این نقطه به وسیله تحلیل محاسبه خواهد شد و تنها شرایط اولیه فشار با توجه به مشخصات سیستم معین است.

شتاب جاذبه و  $a$  سرعت موج فشاری است. با ترکیب خطی روابط بالا، رابطه زیر به دست می آید [۱۳]

$$L = L_1 + \lambda L_2 \quad (12)$$

یا به عبارت دیگر

$$\left(\frac{\partial Q}{\partial t} + \lambda a^2 \frac{\partial Q}{\partial x}\right) + \lambda g A \left(\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{1}{\lambda} \frac{\partial H}{\partial x}\right) + R Q |Q| = 0 \quad (13)$$

حال اگر  $H = H(x, t)$  و  $Q = Q(x, t)$  باشند، آنگاه مشتقات کلی آنها به فرم زیر خواهد بود

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} \frac{dx}{dt} \quad (14)$$

$$\frac{dH}{dt} = \frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial H}{\partial x} \frac{dx}{dt} \quad (15)$$

ضریب  $\lambda$  به صورت زیر تعریف می شود

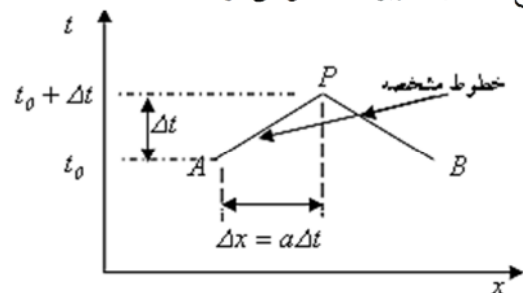
$$\frac{1}{\lambda} = \frac{dx}{dt} = \lambda a^2 \Rightarrow \lambda = \pm \frac{1}{a} \quad (16)$$

حال با استفاده از روابط ۱۴ و ۱۵، معادله ۱۳ به صورت زیر خواهد بود [۱۳]

$$\frac{dQ}{dt} + \frac{gA}{a} \frac{dH}{dt} + R Q |Q| = 0 \quad \frac{dx}{dt} = a \quad (17)$$

$$\frac{dQ}{dt} - \frac{gA}{a} \frac{dH}{dt} + R Q |Q| = 0 \quad \frac{dx}{dt} = -a \quad (18)$$

روابط  $\frac{dx}{dt} = \pm a$  نمایشگر دو دسته خطوط در دستگاه مختصات  $(x, t)$  موسوم به خطوط مشخصه است (شکل ۳). همانگونه که مشهود است، بسط معادله حاکم بر پدیده ضربه قوچ بر روی خطوط مشخصه، معادلات دیفرانسیل نسبی را به معادلات دیفرانسیل معمولی بر حسب متغیر مستقل  $t$  تبدیل خواهد کرد. این تبدیل در اثر حذف متغیر مستقل  $x$  با استفاده از روابط شیب خطوط مشخصه مندرج در روابط مربوطه حاصل می شود.



شکل ۳- نمایش خطوط مشخصه

با جایگذاری مقدار  $H_p$  از معادله خط مشخصه مثبت (رابطه (۲۱)) در رابطه (۲۹) می توان نوشت

$$Q_{P_{i,n+1}}^2 + C_v Q_{P_{i,n+1}} - C_{P_i} C_v = 0 \quad (30)$$

که در آن  $C_v = (\tau Q_{O_{i,n+1}})^2 / (C_a H_{O_{i,n+1}})$  خواهد بود. با صرف نظر کردن از علامت منفی جذرگیری، جواب معادله بالا به صورت زیر حاصل می شود

$$Q_{P_{i,n+1}} = 0.5(-C_v + \sqrt{C_v^2 + 4C_{P_i} C_v}) \quad (31)$$

حال می توان با استفاده از رابطه ۲۱ مقدار  $H_{P_{i,n+1}}$  را به دست آورد.

شایان ذکر است با استفاده از نمودارهای مندرج در شکل ۴، می توان مقادیر هد و دبی را در حالت ناپایدار برای حالات باز و بسته شدن شیر محاسبه نمود. باید توجه داشت که در  $\tau = 1$  دبی حالت پایدار، تحت هد مربوطه بر اساس رابطه ۲۷ به دست می آید.

#### ۳-۴- شرایط مرزی مخزن با سطح ثابت در بالادست

در این مرز سطح سیال با توجه به بزرگی مخزن حین به وجود آمدن پدیده ضربه قوچ ثابت می ماند. در بسیاری از موارد مانند منابع انبساط<sup>۱</sup> بزرگ، تغییرات ناچیز در سطح آب منبع به هنگام به وجود آمدن ضربه قوچ قابل صرف نظر بوده و می توان این مرز را به عنوان سطح ثابت قرار داد. این تقریب در تحلیل پدیده ضربه قوچ خطای چندانی را به وجود نمی آورد.

افت به وجود آمده در محل ورود سیال از مخزن به لوله از رابطه زیر قابل محاسبه است

$$h_e = \frac{kQ_{P_{i,1}}^2}{2gA^2} \quad (32)$$

که در آن ضریب  $k$  ضریب افت ورودی لوله است. با توجه به شکل ۵- الف رابطه زیر به دست می آید

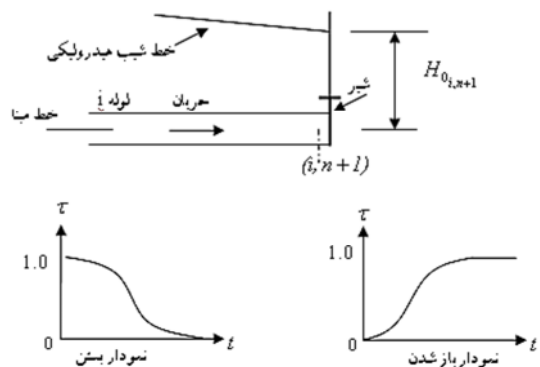
$$H_{P_{i,1}} = H_{res} - (1+k) \frac{Q_{P_{i,1}}^2}{2gA_1^2} \quad (33)$$

که در آن  $H_{res}$  ارتفاع سطح سیال نسبت به سطح مبنا است. رابطه بالا مشخصات حاکم بر مرز مخزن با سطح سیال ثابت در بالا

در شرایط پایدار جریان، دبی عبوری از شیر بر اساس رابطه زیر قابل محاسبه است

$$Q_{O_{i,n+1}} = (C_d A_v)_O \sqrt{2gH_{O_{i,n+1}}} \quad (27)$$

۲-۲-۴- مرز شیر که در یک بازه زمانی ( $t_c$ ) باز و بسته می شود در این مرز همانگونه که گفته شد، باز و بسته شدن شیر نه به طور ناگهانی بلکه در یک بازه زمانی است، که میان درصد بازشدگی شیر و نیز زمان، رابطه ای به صورت یک تابع وجود دارد که با توجه به شکل خروجی شیر و نیز درصد بازشدگی آن در طی زمان، میزان سرعت جریان در هر لحظه مشخص خواهد شد و مقدار سرعت محاسبه شده در هر لحظه به عنوان شرایط در تحلیل به کار خواهد رفت (شکل ۴). در مورد فشار هم همانگونه که گفته شد میزان فشار در هر لحظه به وسیله تحلیل ضربه قوچ محاسبه خواهد شد (غیر از فشار اولیه).



شکل ۴- نمونه ای از مرز شیر و نمودارهای باز و بسته شدن شیر با زمان

در رابطه ۲۶، اندیس  $O$  نمایانگر حالت پایدار جریان است. در حالت ناپایدار نیز می توان دبی عبوری از شیر را بر اساس معادله حاکم در حالت پایدار به شرح زیر فرض نمود

$$Q_{P_{i,n+1}} = (C_d A_v) \sqrt{2gH_{P_{i,n+1}}} \quad (28)$$

با تقسیم کردن رابطه ۲۸ بر رابطه ۲۷ و جذر گرفتن از دو طرف معادله و جایگذاری نسبت بازشدگی شیر به صورت  $\tau = (C_d A_v) / (C_d A_v)_O$  می توان نوشت

$$Q_{P_{i,n+1}}^2 = \frac{(Q_{O_{i,n+1}} \tau)^2}{H_{O_{i,n+1}}} H_{P_{i,n+1}} \quad (29)$$

<sup>1</sup> Surg Tank

خواهد شد. در صورتی که افت ورودی همانند هد ناشی از سرعت قابل صرف نظر باشد، می توان نوشت

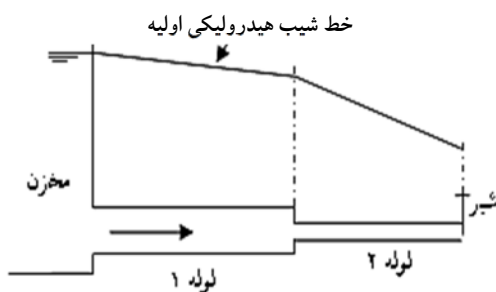
$$H_{P_{i,1}} = H_{res} \quad (37)$$

که در آن  $H_{res}$  ارتفاع سطح سیال نسبت به سطح مبنا است. بنابراین رابطه ۲۲ برای بالادست به صورت زیر خواهد بود

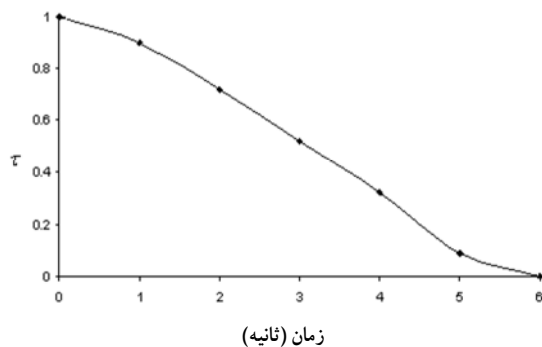
$$Q_{P_{i,1}} = C_{n_i} + C_{a_i} H_{res} \quad (38)$$

### ۵- مثال عددی برای نشان دادن عملکرد مدل شبیه سازی و بهینه سازی

در این بخش ابتدا صحت و دقت مدل شبیه سازی بررسی شد و سپس اقدام به طراحی بهینه شد. سیستم انتقال مورد نظر، که توسط چائوری نیز مدل شده است [۱۳]، مطابق شکل ۶ متشکل از دو خط لوله است که در بالادست به یک مخزن با هد ۶۷/۷ متر اتصال داشته و در پایین دست آن شیری قرار دارد که مطابق شکل ۷ در مدت زمان ۶ ثانیه بسته می شود [۱۳]. خط انتقال برای دبی ۱ مترمکعب طراحی شد. طول لوله اول ۵۵۰ متر، طول لوله دوم ۴۵۰ متر، ضریب اصطکاک لوله اول ۰/۰۱ و ضریب اصطکاک لوله دوم ۰/۰۱۲، سرعت موج فشاری در لوله اول و دوم به ترتیب برابر ۱۱۰۰ و ۹۰۰ متر بر ثانیه بود [۱۳].



شکل ۶- سیستم انتقال لوله های سری با شیر قابل کنترل در انتها



شکل ۷- منحنی باز شدگی شیر بر حسب زمان [۱۶]

دست را به دست می دهد. این رابطه در محل مقطع ۱ مندرج در شکل ۵ بیانگر رابطه بین هد و دبی در لوله نام با ارتفاع آب در مخزن است. به منظور گسترش شرایط مرزی باید رابطه بالا را همزمان با معادله منفی خطوط مشخصه حل شود. با حذف  $H_{P_{i,1}}$  از روابط ۳۲ و ۳۳ می توان نوشت

$$k_1 Q_{P_{i,1}}^2 + Q_{P_{i,1}} - (C_{n_i} + C_{a_i} H_{res}) = 0 \quad (34)$$

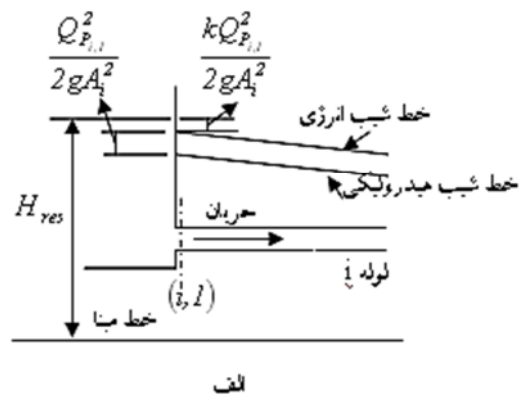
که در آن

$$k_1 = \frac{C_{a_i} (1+k)}{2gA_i^2} \quad (35)$$

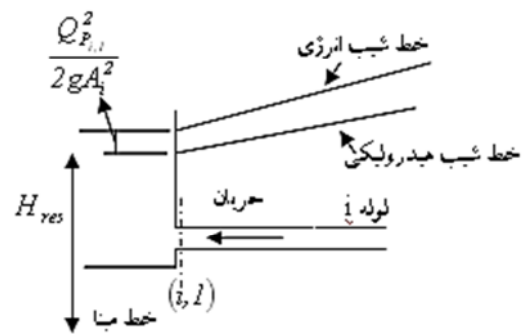
با حل رابطه ۳۴ و حذف علامت منفی جذر، مقدار  $Q_{P_{i,1}}$  از رابطه زیر به دست می آید

$$Q_{P_{i,1}} = \frac{-1 + \sqrt{1 + 4k_1 (C_{n_i} + C_{a_i} H_{res})}}{2k_1} \quad (36)$$

حال مقدار  $H_{P_{i,1}}$  با استفاده از رابطه ۲۲ مشخص خواهد شد. در جریان بازگشتی مقدار  $k$  در رابطه ۳۳ و ۳۵ منفی خواهد بود. لازم به ذکر است علامت منفی جذر در رابطه ۳۶ نیز مجدداً حذف



الف



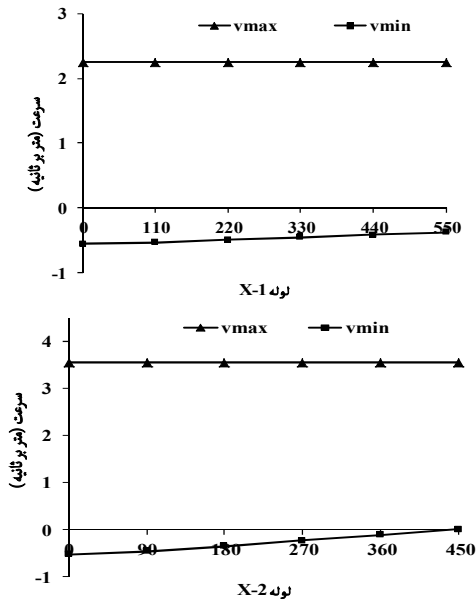
ب

شکل ۵- مرز مخزن با سطح ثابت سیال در بالادست

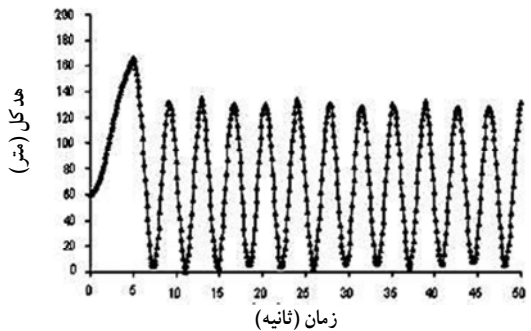


### ۵-۱- شبیه‌سازی جریان گذرا

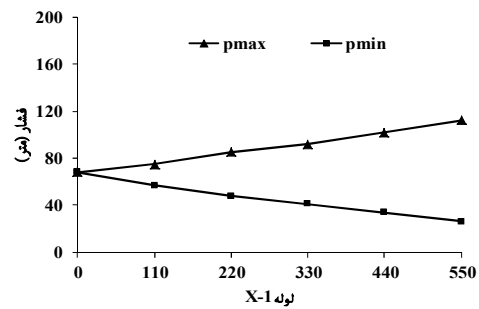
برای اطمینان از صحت عملکرد مدل، ابتدا تشکیل و انتشار ضربه قوچ در سیستم مورد نظر در اثر بسته شدن شیر، شبیه‌سازی شد [۱۳]. شکل ۸ نشان‌دهنده پوش فشار بیشینه و کمینه در دو لوله سیستم انتقال در مدت زمان ۵۰ ثانیه است که شیر در طول ۶ ثانیه اول آن بسته می‌شود. با این که حداکثر فشار در مدت زمان بسته شدن شیر رخ می‌دهد ولی برای اطمینان از عملکرد مدل شبیه‌ساز، شبیه‌سازی در طول ۵۰ ثانیه صورت گرفته است. حداکثر فشار مطابق انتظار در محل شیر رخ می‌دهد و مقدار آن در حدود ۱۶۸ متر است. حداقل فشار نیز در محل شیر رخ می‌دهد و مقدار آن تقریباً برابر صفر است. شکل ۹ نمایش‌گر پوش سرعت بیشینه و کمینه در طول دو لوله است. شکل ۱۰ نشان‌دهنده تغییرات فشار با زمان در محل شیر است. نتایج مشابه نتایج به دست آمده توسط چائوری بود [۱۳]. همانگونه که مشاهده می‌شود، مقدار حداکثر فشار قبل از بسته شدن کامل شیر رخ داد و پس از بسته شدن شیر، تغییرات فشار، رفتاری نوسانی داشت که دامنه آن به‌طور نامحسوسی با زمان کاهش یافت.



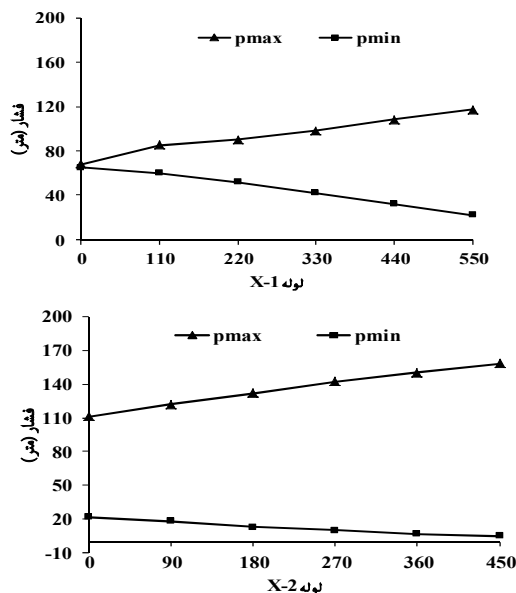
شکل ۹- نمودار پوش سرعت در لوله‌ها (آزمون اول)



شکل ۱۰- نمودار تغییرات فشار - زمان در محل شیر (آزمون اول)



شکل ۸- نمودار پوش فشار در لوله‌ها (آزمون اول)



شکل ۱۱- نمودار پوش فشار در لوله‌ها (آزمون دوم)

مسئله مورد نظر بار دیگر با افزایش ضریب اصطکاک لوله‌ها به مقدار ۰/۰۵ و ۰/۰۶ (آزمون دوم) و سپس ۰/۱ و ۰/۱۲ (آزمون سوم) تحلیل شد که نتایج آن در شکل‌های ۱۱ تا ۱۴ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، تفاوت آزمون دوم و سوم در ضرایب اصطکاک لوله‌هاست. مقایسه شکل‌های ۱۱ و ۱۳ نشان می‌دهد که حداکثر فشار در نقاط مختلف لوله‌ها در آزمون سوم کمتر

### ۲-۵- طراحی بهینه سیستم انتقال

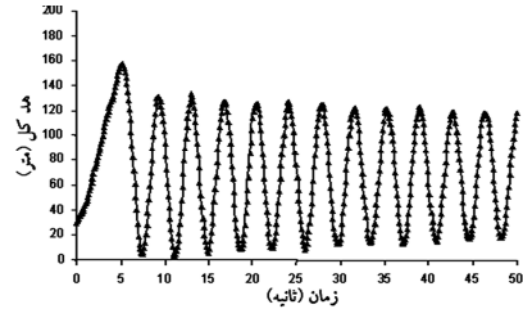
پس از حصول اطمینان از صحت فرایند شبیه‌سازی، مسئله طراحی بهینه سیستم مورد نظر در مقابل ضربه قوچ مد نظر قرار گرفت. در این مثال حداقل قطر ۰/۳ متر، حداکثر قطر ۱ متر، حداقل ضخامت ۱۰ میلی‌متر، حداکثر ضخامت ۱۰۰ میلی‌متر و بیشینه فشار مجاز برابر ۱۲۰ متر در نظر گرفته شد. به این منظور قطر و ضخامت لوله‌های سیستم انتقال مورد نظر با استفاده از دو روش بهینه‌سازی ریاضی و الگوریتم ژنتیک طراحی شد تا قابلیت‌های روش‌های مورد نظر مورد بررسی قرار گیرند. هر دو برنامه شبیه‌ساز و بهینه‌ساز در محیط برنامه‌نویسی فرترن نوشته شده و با هم ارتباط داده شد.

### ۲-۲-۵- بهینه‌سازی با روش برنامه‌ریزی ریاضی

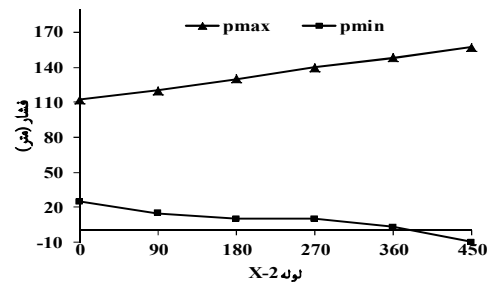
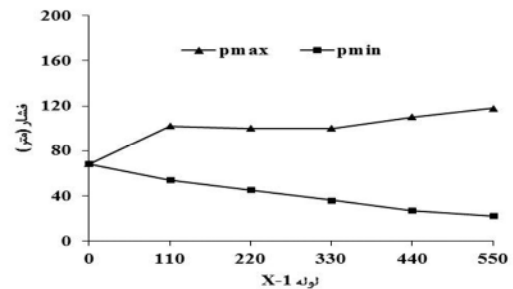
مقادیر اقطار بهینه حاصل از روش برنامه‌ریزی ریاضی به ترتیب برابر ۰/۹۱۳ و ۰/۸۰۰ متر و مقدار ضخامت بهینه هر لوله ۱۰ میلی‌متر به دست آمد. شکل ۱۵ پوش فشار در لوله اول و دوم را در سیستم انتقال طراحی شده نشان می‌دهد، در حالی که شکل ۱۶ نمایشگر تغییرات فشار با زمان در محل شیر است. همانگونه که از این شکل پیداست، مقدار حداکثر فشار در سیستم بهینه همواره کمتر از ۱۲۰ متر است. تابع هدف مورد استفاده در این مثال، حجم کل مصالح مصرفی در لوله‌هاست که مقدار بهینه آن در روش برنامه‌ریزی غیرخطی برابر ۱۳/۶۱ مترمکعب می‌باشد. شکل ۱۷ نیز نمایشگر تغییرات هزینه با تعداد دفعات شبیه‌سازی خط انتقال است که خود بیانگر هزینه روش بهینه‌سازی است. همانگونه که از این شکل بر می‌آید روش برنامه‌ریزی ریاضی با ۱۲۷ بار شبیه‌سازی قادر به یافتن جواب بهینه شد.

### ۳-۲-۵- بهینه‌سازی با روش الگوریتم ژنتیک

شکل‌های ۱۸ و ۱۹ نمایشگر مقادیر حداقل و حداکثر فشار در لوله‌ها و تغییرات فشار با زمان در محل شیر برای جواب بهینه‌ای است که با استفاده از الگوریتم ژنتیک طراحی شده است، و تقریباً مشابه مقادیر به دست آمده از برنامه‌ریزی ریاضی است. مقدار قطر بهینه برای لوله‌های اول و دوم به ترتیب برابر ۰/۹۲۶ و ۰/۸۳۰ متر و مقادیر ضخامت برابر ۱۰ میلی‌متر بود. همان‌طور که ملاحظه می‌شود مقادیر بهینه حاصل از این روش کمی بیشتر از مقادیر مشابه به دست آمده حاصل از روش پیشین است. مقدار تابع هدف بهینه، حاصل از الگوریتم ژنتیک برابر ۱۴/۰۵ مترمکعب است که کمی بیشتر از مقدار تابع هدف بهینه روش برنامه‌ریزی ریاضی است که علت آن سادگی و کوچکی سیستم انتقال مورد نظر است. شکل ۲۰ تغییرات مقدار تابع هدف با تعداد دفعاتی که الگوریتم ژنتیک در

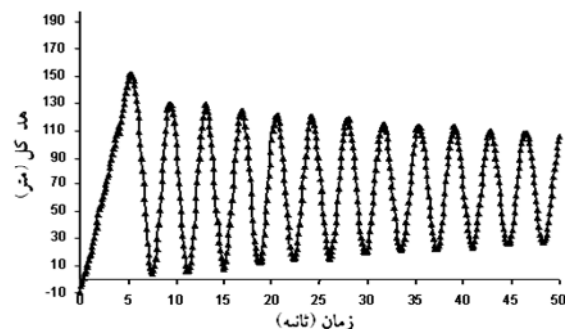


شکل ۱۲- نمودار تغییرات فشار - زمان در محل شیر (آزمون دوم)



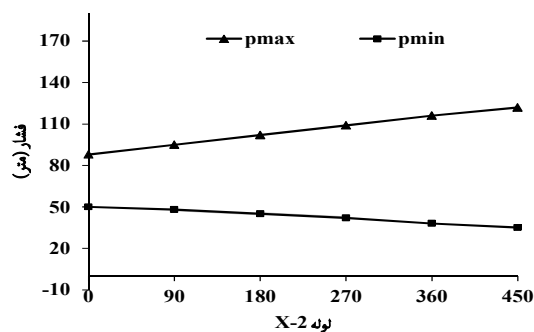
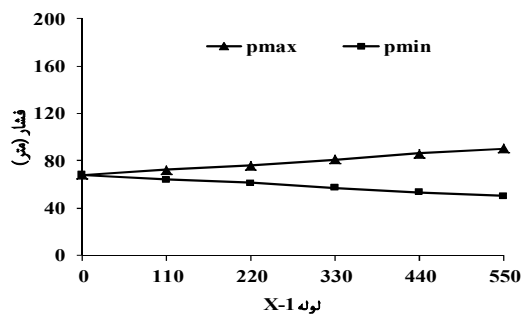
شکل ۱۳- نمودار پوش فشار در لوله‌ها (آزمون سوم)

از آزمون دوم است. به علاوه با مقایسه شکل‌های ۱۲ و ۱۴ ملاحظه می‌شود که حداکثر فشار در محل شیر، در آزمون دوم برابر ۱۶۰ و در آزمون سوم برابر ۱۵۲ متر است. به عبارت دیگر، نتایج دو آزمون نشان می‌دهد که، مطابق انتظار، مقدار حداکثر فشار در محل شیر و لوله‌ها با افزایش ضریب اصطکاک کاهش می‌یابد. اثر افزایش ضریب اصطکاک را به خوبی می‌توان در تغییرات فشار با زمان در محل شیر مشاهده کرد. در این حالت نوسانات فشار در محل شیر با گذشت زمان، میرا شده و از دامنه آن کاسته می‌شود.

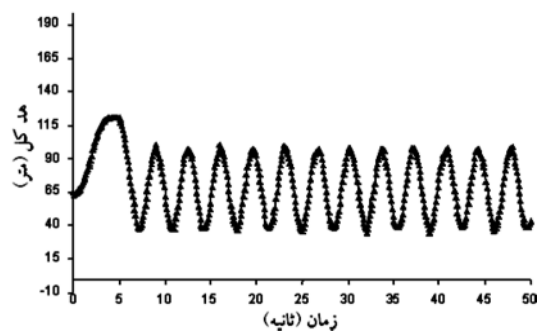


شکل ۱۴- نمودار تغییرات فشار - زمان در محل شیر (آزمون سوم)

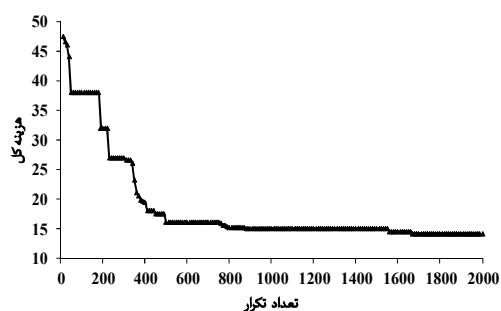
فرایند طراحی نیازمند شبیه‌سازی سیستم انتقال است، را نشان می‌دهد.



شکل ۱۸- نمودار پوش فشار در لوله‌ها (الگوریتم ژنتیک)



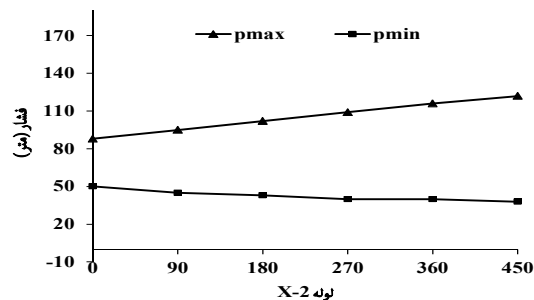
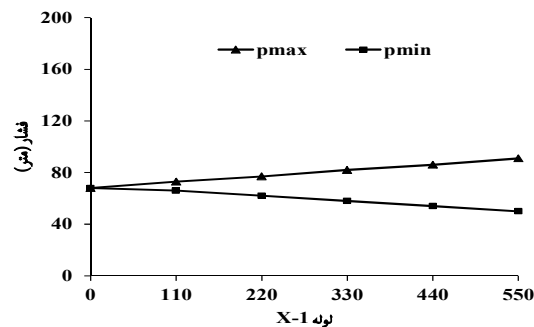
شکل ۱۹- نمودار تغییرات فشار - زمان در محل شیر (الگوریتم ژنتیک)



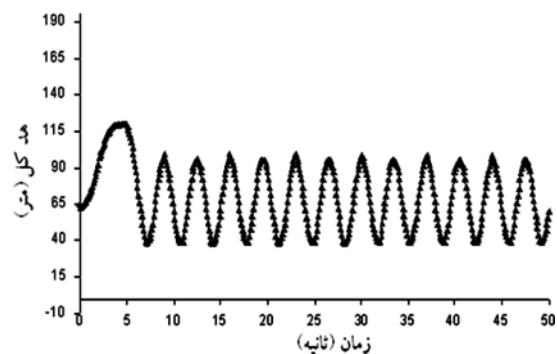
شکل ۲۰- نمودار تغییرات هزینه - تعداد شبیه‌سازی (الگوریتم ژنتیک)

### ۶- نتیجه‌گیری

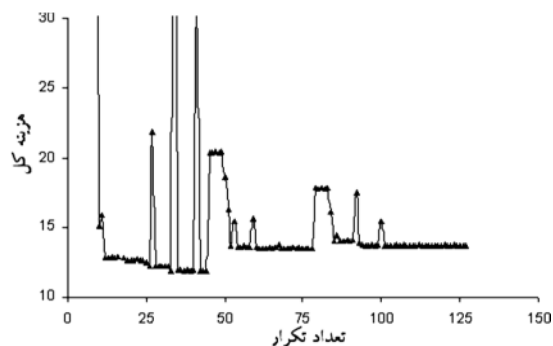
در این تحقیق با استفاده از روش‌های بهینه‌سازی (برنامه‌ریزی ریاضی و الگوریتم ژنتیک) قطر و ضخامت بهینه لوله‌های یک سیستم انتقال به گونه‌ای تعیین شد که پدیده ضربه قوچ روی ندهد.



شکل ۱۵- نمودار پوش فشار در لوله‌ها (برنامه‌ریزی ریاضی)



شکل ۱۶- نمودار تغییرات فشار - زمان در محل شیر (برنامه‌ریزی ریاضی)



شکل ۱۷- نمودار تغییرات هزینه - تعداد شبیه‌سازی (برنامه‌ریزی ریاضی)

از نتایج حاصل از الگوریتم ژنتیک بود و می‌توان عنوان کرد که به جواب‌های نسبتاً یکسانی منجر شده که نشان از صحت فرایند بهینه‌سازی دارد.

به این طریق به مقدار قابل توجهی از هزینه‌های مربوطه کاسته خواهد شد که خود گویای کارایی این روش‌ها است. مقایسه نتایج دو روش بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک و برنامه‌ریزی ریاضی نشان داد که جواب به دست آمده از روش بهینه‌سازی ریاضی اندکی بهتر

## ۷- مراجع

1. Lansey, K. E., and Mays, L. W., (1989). "Optimization model for water distribution system design." *J. Hydraul. Eng.*, 115 (10), 1401-1418.
2. Simpson, A. R., Dandy, G. C., and Murphy, L. J. (1994). "Genetic algorithms compared to other techniques for pipe optimization." *J. of Water Resources Planning and Management*, 120 (4), 423-443.
3. Savic, D. A., and Walters, G. A. (1997). "Genetic algorithms for least-cost design of water distribution networks." *J. of Water Resources Planning and Management*, 123(2), 67-77.
4. Jung, B. S., and Karney, B. W., (2003). "Optimum selection of Hydraulic Devices for Water Hammer Control in the Pipeline Systems Using Genetic Algorithm." *Proceedings of ASME FEDSM'03, 4<sup>th</sup> ASME\_JSME Joint Fluids Engineering Conference*, Honolulu, Hawaii, USA.
5. Jung, B. S., and Karney, B. W. (2004). "Fluid transients and pipeline optimization using GA and PSO: The diameter connection." *Urban Water*, 1(2), 167-176.
6. Jung, B. S., and Karney, B. W. (2006). "Hydraulic optimization of transient protection devices using GA and PSO approaches." *J. of Water Resources Planning And Management*, 132(1), 44-52.
7. Afshar, M. H., Akbari, M., and Marino, M. A. (2005). "Simultaneous layout and size optimization of water distribution networks: Engineering approach." *J. of Infrastructure Systems*, 11(4), 221-230.
8. Malekpour, A., Karney, B. W., and Adams, B. J., (2007). "Improvement of the Yazd water conveyance control system by GA optimization." *Proceedings of the IASTED International Conference on Water Resources Management*, 170-175.
9. Khale, R. V., Singh, R. P., and Mahar, P. S. (2008). "Optimal design of pressurized irrigation subunit." *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 134, (2), 137-146.
10. Vanderplaats, Miura and Associates. (1994). <Http://www.vander.com.>
11. Afshar, M. H., Afshar, A. and Marino, M. A. (2009). "An iterative penalty method for the optimal design of pipe networks." *International Journal of Civil Engineering*, 7(2), 109-123.
12. Goldberg, D. E. (1989). *Genetic algorithms in search optimization and machine learning*, Reading, MA: Addison-Wesley, Longman Pub. Co., Inc., Boston, USA.
13. Chaudhry, M. H. (1979). *Applied hydraulic transients*, Van Nostrand Reinhold, New York.