



## Numerical Investigation of the Water Hammer on Optimal Design of Sprinkler Irrigation Network

R. Ghobadian<sup>1\*</sup>, A. Hazeri<sup>2</sup> and S.E. Fatemi<sup>3</sup>

### Abstract

Optimization and modeling of the pressurized irrigation systems in order to reduce their construction costs has attracted many scientists up to the present time. Optimization of these irrigation systems has often been conducted by using available commercial codes or toolboxes of conventional evolutionary algorithms combined with hydraulic models. The code developed in the present research which is based on one of the powerful methods of optimization, e.g. genetic algorithm, assigns an integer numeric value to each available diameter. Then, to determine the optimum diameters in the pipe network, the cross-over, mutation and reinsertion with elitism approach is applied on set of chromosomes and an integer numeric for each pipe diameter is then selected. Obtained data from optimization subroutine is then sent to another subroutine that has been developed to simulate the water hammer pressure. Maximum pressure due to the water hammer phenomenon in each network pipe is calculated in this subroutine. Calculated maximum pressures are sent back to the optimization subroutine where constraints of the working pressure are substituted by the bursting pressure constraints. Exchange of information between the optimization model and the hammer model continues so that the calculated optimal diameters do not change anymore. The results showed that compared to the existing design conditions, optimized design by the present model reduces cost of implementation of pipelines in Ismail Abad irrigation network from \$825935.28 to \$730958.37 which is equivalent to 11.5% of the total cost of pipeline implementation. Also the results showed that by changing the diameter of 3 pipes out of 16 existing pipes the excess pressure of the water hammer due to the rapid closing of all valve at the end of pipelines in less than 1 second can be controlled. In this case the cost of implementing the pipelines increases by 6.1% e.g. from \$730958.37 to \$775511.5.

**Keywords:** Optimization, Genetic Algorithm, Water Hammer, Sprinkler Irrigation, Ismail Abad Irrigation Network.

Received: April 24, 2017

Accepted: November 1, 2017

## بررسی عددی تأثیر ضربه قوچ بر طراحی بهینه‌ی سیستم آبیاری تحت فشار

رسول قبادیان<sup>۱\*</sup>، آتنا حاضری<sup>۲</sup> و سید احسان فاطمی<sup>۳</sup>

### چکیده

بهینه‌سازی شبکه‌های آبیاری تحت فشار به منظور کاهش دادن هزینه این زیرساخت‌ها تاکنون تحقیقات بسیاری را به خود اختصاص داده است. در این تحقیقات غالباً بهینه‌سازی شبکه آبیاری تحت فشار با استفاده از کدهای آماده و یا جعبه ابزارهای متداول الگوریتم‌های تکاملی که با مدل‌های هیدرولیکی تلفیق شده‌اند انجام شده است. کد توسعه داده شده در این تحقیق که مبتنی بر یکی از قدرتمندترین روش‌های بهینه‌سازی یعنی الگوریتم ژنتیک می‌باشد به هر یک از قطرهای موجود در بازار یک عدد صحیح اختصاص می‌دهد. سپس جهت تعیین مقادیر بهینه، با انجام عملیات تقاطع، جهش و جایگزینی با رویکرد نخبه‌گرایی بر روی مجموعه کروموزوم‌ها عدد صحیح موردنظر برای هر لوله انتخاب می‌شود. اطلاعات خروجی از مدل شامل قطرهای بهینه و مینیمم هزینه‌ی اجرای شبکه‌ی آبیاری می‌باشد. سپس اطلاعات شبکه بهینه به زیر برنامه تهیه شده برای محاسبات ضربه قوچ فرستاده می‌شود. در آنجا پس از اعمال شرایط مرزی مقادیر حداکثر اضافه فشار ناشی از ضربه قوچ در محل گره‌های سیستم محاسبه می‌شود و اطلاعات به مدل بهینه‌سازی برگشت داده می‌شوند. در این مرحله قیود حداکثر فشار کاری با قیود فشار ترکیدگی لوله جایگزین می‌شوند و مجدداً قطرهای بهینه محاسبه و به مدل ضربه قوچ فرستاده می‌شوند. ارسال اطلاعات از مدل بهینه‌سازی به مدل ضربه قوچ تا جایی که دیگر قطرهای بهینه محاسبه شده تغییری نداشته باشند ادامه می‌یابد. نتایج این تحقیق نشان داد در مقایسه با شرایط موجود طراحی بهینه بر مبنای الگوریتم ژنتیک هزینه اجرای خطوط لوله شبکه آبیاری تحت فشار اسماعیل آباد را از ۸۲۵۹۳۵/۲۸ به ۷۳۰۹۵۸/۳۷ دلار کاهش می‌دهد که معادل ۱۱/۵ درصد هزینه اجرای خطوط لوله شبکه می‌باشد. از طرفی محاسبات نشان داد تنها با تغییر قطر ۳ خط لوله از ۱۶ خط لوله موجود در سیستم می‌توان اضافه فشار ناشی از ضربه قوچ به علت بستن سریع همه شیرهای انتهایی خطوط لوله اصلی در مدت زمان کمتر از یک ثانیه را کنترل نمود. در این حالت هزینه اجرای خطوط لوله از ۷۳۰۹۵۸/۳۷ دلار به ۷۷۵۵۱۱/۲۸ دلار یعنی حدود ۶/۱ درصد افزایش می‌یابد.

**کلمات کلیدی:** بهینه‌سازی، الگوریتم ژنتیک، ضربه قوچ، آبیاری بارانی، شبکه اسماعیل آباد.

تاریخ دریافت مقاله: ۹۶/۲/۱۴

تاریخ پذیرش مقاله: ۹۶/۸/۱۰

1- Associate Professor, Department of Water Engineering, Razi University, Kermanshah, Iran. Email: r\_ghobadian@razi.ac.ir

2- M.Sc. Graduate in Water Structure, Department of Water Engineering, Razi University, Kermanshah, Iran.

3-Assistant Professor, Department of Water Engineering, Razi University, Kermanshah, Iran.

\*- Corresponding Author

۱- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشگاه رازی، کرمانشاه.

۲- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد سازه‌های آبی، گروه مهندسی آب، دانشگاه رازی کرمانشاه.

۳- استادیار گروه مهندسی آب، دانشگاه رازی کرمانشاه.

\*- نویسنده مسئول

بحث و مناظره (Discussion) در مورد این مقاله تا پایان پائیز ۱۳۹۷ امکانپذیر است.

برنامه تحویل آب و متعاقباً افزایش تولید محصول مقدر گردید. (2007) Monem et al. از روش بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک بصورت چندهدفی استفاده کردند و بر این اساس مدل برنامه‌ریزی بهینه تحویل آب در کانال‌های آبیاری تهیه گردید. مدل تهیه شده برای گزینه‌های مختلف در یک کانال توزیع‌کننده در شبکه آبیاری فومنات در گیلان مورد آزمون قرار گرفت و برای هر یک از گزینه‌ها، برنامه بهینه تحویل آب را ارائه نمودند. (2009) Mosavian et al. به کاربرد سه الگوریتم فراابتکاری و ارائه یک الگوریتم هابیرید در بهینه‌سازی شبکه آبرسانی شهر تربت پرداختند. نتایج آنها نشان داد که الگوریتم هابیرید بهتر از سایر روش‌های تکاملی به جواب بهینه همگرا می‌شود همچنین الگوریتم ژنتیک نیز نسبت به روش‌های کلونی مورچه‌ها و جستجوی هارمونی از توانایی بیشتری جهت رسیدن به جواب بهینه برخوردار است. (2011) Kyafar et al. از روش الگوریتم ژنتیک برای بهینه‌سازی تخصیص آب در شبکه آبیاری و زهکشی صوفی‌چای در پایین‌دست سد علویان استفاده کردند. نتایج آنها نشان داد که اختلاف مقدار آب تخصیص یافته، واقعی و مقدار بهینه در مناطق مختلف به طور متوسط برابر ۲/۱ میلیون مترمکعب است. (2013) Ragabpor با تلفیق مدل الگوریتم ژنتیک در محیط MATLAB با بخش هیدرولیکی مدل EPANET برنامه بهینه بهره‌برداری از سامانه انتقال آب از سد کوثر به شهر دوگنبدان در یک روز معمولی را تعیین کردند. نتایج آنها نشان داد مقایسه برنامه بهینه بهره‌برداری تهیه شده با حالت بهره‌برداری عادی، کاهش برابر ۲۶/۸ درصد در هزینه انرژی مصرفی کل را نشان می‌دهد. با وجود این که در حال حاضر مکانیزم تشکیل ضربه قوچ کاملاً شناخته شده است، اما به علت وسعت و گستردگی ابعاد مسأله ضربه قوچ و وجود شرایط گوناگون مکانی و زمانی در این فرآیند، دامنه تحقیقات در این زمینه ادامه دارد. (2010) Solymani از نرم‌افزار Hammer جهت شبیه‌سازی ضربه قوچ در ایستگاه پمپاژ کوهرنگ استفاده کرد. در این مطالعه میزان تغییر در مقدار ضربه قوچ در اثر تغییر پارامترهای مختلفی مانند درجه حرارت آب، جنس، ضخامت و قطر لوله، دور و قدرت موتور و ممان اینرسی تعیین شده است. نتایج نشان داد پارامترهای ممان اینرسی پمپ و موتور، قطر، جنس، ضخامت لوله و درجه حرارت آب به ترتیب بیشترین تأثیر را در کاهش حداکثر ضربه دارند. (2011) Kohestany and Jafarzadeh اثرات پدیده ضربه قوچ را در شبکه آبیاری شهر باخرز به کمک نرم‌افزار WHAMO شبیه‌سازی کردند. نتایج مدل‌سازی نشان داد که با کاهش سریع تقاضای آب، قطع جریان پمپ و بسته شدن شیر سریع بعد از پمپ نوسانات فشاری بزرگی ایجاد می‌شود که نتایج نامطلوبی به دنبال دارد که نصب شیر یک‌طرفه و مخزن ضربه‌گیر پس از پمپ به منظور کنترل این پدیده توصیه می‌شود. (2012) Daneshfaraz and Moradi به ارزیابی ضربه قوچ در

طراحان شبکه‌های آبیاری تحت فشار به دنبال این هدف هستند که طراحی خود را به اقتصادی‌ترین طرح ممکن نزدیک نمایند تا علاوه بر تأمین نیازهای مصرف‌کنندگان، هزینه اجرایی طرح نیز تا حد ممکن کاهش یابد. رسیدن به این هدف در شبکه‌های بزرگ و پیچیده مشکل می‌باشد. پیچیدگی موضوع زمانی بیشتر می‌شود که علاوه بر رعایت محدودیت‌های فشار در گره‌های شبکه و سرعت در لوله‌ها لازم باشد بدون استفاده از تاسیسات کنترل ضربه قوچ تنها با تغییر بهینه قطر لوله‌های سیستم اضافه فشار ناشی از جریانات غیر ماندگار کنترل گردد. امروزه استفاده از روش‌های نوین هوشمند به‌منظور پیش‌بینی و بهینه‌سازی مورد توجه محققان قرار گرفته است.

از میان الگوریتم‌های هوشمند، الگوریتم ژنتیک که ایده آن از سیستم تکامل طبیعی موجودات زنده (ژن و کروموزوم) برگرفته شده، به عنوان روش نوین بهینه‌سازی مدل‌های غیرخطی بسیار مناسب بوده و کاربردهای فراوانی دارد (Haupt, 1998). تا به امروز این روش به‌طور وسیع در مسایل مهندسی، به‌ویژه در مسایل بهینه‌سازی شبکه‌ی لوله‌ها، سازه‌های ساختمانی، کالیبراسیون، مدل‌های بارش-رواناب و پمپاژ آب‌های زیرزمینی مورد استفاده قرار گرفته است. (1996) Dandy and Hassanli مدل الگوریتم ژنتیک را برای بهینه‌سازی آرایش و طراحی هیدرولیکی شبکه‌ی تحت‌فشار شاخه‌ای توسعه دادند که در آن با ارتباط بهینه گره‌های تقاضا به گره منبع، سایز بهینه لوله‌ها و ظرفیت مناسب پمپ تعیین می‌شود. آن‌ها کارایی روش توسعه داده‌شده را با کاربرد آن برای یک مطالعه‌ی موردی با ۱۱ گره تقاضا و یک گره منبع شرح دادند و نتیجه گرفتند که به تحقیقات بیشتری برای اصلاح کردن تکنیک‌های تحقیق در مسائل کاربردی مورد نیاز است. (2007) Farmani et al. یک مدل الگوریتم ژنتیک اصلاح شده را برای بهینه‌سازی شبکه‌های آبیاری شاخه‌ای توسعه دادند. مدیریت و طراحی بهینه سیستم‌های آبیاری تحت فشار با کاربرد مدل فوق و براساس برنامه‌بندی تحویل گردشی و تقاضا یک صرفه‌جویی بیشتر از ۵۰ درصد در هزینه کل را نشان داد. (2007) Gholami et al. به منظور بهینه‌سازی برنامه تحویل آب در شبکه آبیاری درودزن شیراز از روش الگوریتم ژنتیک استفاده کردند. نتایج نشان‌دهنده کاهش در ظرفیت کانال توزیع آب به انشعابات و کاهش در مدت زمان تکمیل برنامه آبیاری بود. (2007) Janshahi et al. به منظور بهینه‌سازی برنامه تحویل آب شبکه آبیاری جیرفت واقع در استان کرمان، از روش الگوریتم ژنتیک استفاده کردند. برنامه زمان‌بندی و تحویل آب به مزارع به گونه‌ای بهینه گردید که از حداقل منابع آبی موجود، بهترین راندمان از نظر

روش‌های بهینه‌سازی یعنی الگوریتم ژنتیک، با در نظر گرفتن محدودیت‌های سرعت و فشار شبکه‌ی آبیاری تحت فشار با آرایش درختی را با کمترین هزینه‌ی ممکن طراحی نماید. همچنین محاسبات ضربه قوچ را برای سیستم بهینه انجام داده و امکان کنترل اضافه فشار ناشی از قوچ را با تغییر بهینه قطر لوله‌های شبکه بررسی می‌نماید. بر خلاف برخی مدل‌ها که قطرهای بهینه با توجه به اعداد حقیقی انتخاب و سپس به نزدیکترین قطر تجاری موجود در بازار گرد می‌شوند در این مدل بر اساس اعداد صحیح مستقیماً قطر تجاری توسط مدل انتخاب می‌شود.

## ۲- روش تحقیق

### ۲-۱- محدوده مورد مطالعه

محدوده مورد مطالعه شبکه آبیاری و زهکشی اسماعیل آباد و خلیف آباد می‌باشد که در فاصله‌ی ۷ کیلومتری شمال غربی شهرستان نورآباد لرستان واقع گردیده است. منبع تعیین کننده آب طرح رودخانه بادآور می‌باشد. سطح حوضه‌ی آبریز این رودخانه ۴۶۲ کیلومتر مربع می‌باشد. مساحت اراضی تحت پوشش این طرح در حدود ۱۰۰۰ هکتار می‌باشد. در شکل ۱ آرایش شماتیک شبکه اسماعیل آباد نشان داده شده است و همچنین در جدول ۱ اطلاعات هندسی و هیدرولیکی برای شبکه‌ی آبیاری اسماعیل آباد آمده است. لازم به ذکر است لوله‌های با قطر بزرگتر از ۵۰۰ میلی‌متر از جنس GRP و سایر لوله‌ها از جنس PE80 می‌باشند (Shahinejad, 2011).

### ۲-۲- روش بهینه‌سازی جستجوی ژنتیکی

الگوریتم ژنتیک به کار رفته در این مطالعه براساس یک سیستم دودویی شامل (۱ و ۰) می‌باشد به نحوی که پارامترهای مدل به منای ۰ و ۱ انتقال یافته و به عبارت دیگر رمزار می‌شوند.

ایستگاه پمپاژ و خط انتقال محمودآباد-ازنا در استان لرستان با استفاده از نرم‌افزار AFT- Impulse پرداخته‌اند. جهت مقابله با پدیده ضربه قوچ در ایستگاه پمپاژ مذکور از محفظه هوا به حجم سه متر مکعب با کمپرسور هوا و شیرهای یک‌طرفه و همچنین در طول خط انتقال در نقاط خط‌الرأس از شیر هوا و در نقاط خط‌القعر از شیر تخلیه استفاده کردند. با در نظر گرفتن این تجهیزات حفاظتی، فشار مثبت کاهش و فشار منفی در سیستم حذف گردید. (2011) Shahinejad با استفاده از برنامه‌ریزی خطی مختلط اعداد حقیقی و صحیح بهینه‌یابی شبکه آبیاری اسماعیل آباد لرستان را انجام داد. این محقق نشان داد در مقایسه با وضع موجود بهینه‌سازی شبکه بدون در نظر گرفتن پدیده ضربه قوچ هزینه اجرا را حدود ۱۲ درصد کاهش می‌دهد. درحالی‌که فشار ابتدای سیستم تغییر قابل ملاحظه‌ای ندارد. (2014) Marcuzzo and Wendland به منظور تعیین پارامترهای هیدرولیکی لوله‌ها در یک سیستم آبیاری میکرو به مساحت ۶۸/۴ هکتار یک کد الگوریتم ژنتیک در محیط نرم‌افزار MATLAB توسعه دادند. نتایج تجزیه و تحلیل هیدرولیکی آنها نشان داد در لوله‌های خروجی‌دار پس از یک کاهش قطر در ابتدای لوله اختلاف بین خط انرژی و پیرومتری افزایش می‌یابد. در انتهای خط لوله خط پیرومتری و خط انرژی شبیه هم هستند و لزوماً در محل آخرین خروجی با هم برابرند. (2017) Wang and Dal اشاره کردند که بهینه‌سازی و مدل کردن سیستم‌های آبیاری تحت فشار توجه محققین زیادی را به خود معطوف نموده است و بیشترین روش استفاده شده برای بهینه‌سازی فرمول اول Clément است که از روش احتمالاتی استفاده می‌کند. استفاده از روش مذکور برای محاسبه یک شبکه آبیاری در مقیاس بزرگ به ساعت‌ها و حتی روزها وقت نیاز دارد. از این‌رو این محققین برای چیره شدن بر این مشکل و اتوماتیک کردن محاسبات یک مدل کامپوتری به زبان ویژوال بیسیک در محیط اکسل تهیه کردند.

هدف نهایی از این پژوهش تهیه مدلی کامپیوتری در محیط برنامه نویسی ویژوال بیسیک است که با استفاده از یکی از قدرت‌مندترین

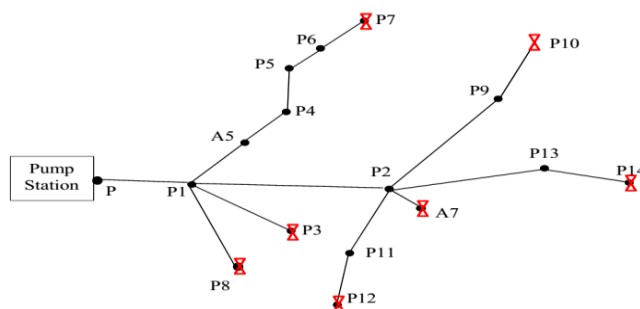


Fig. 1- Plan view of the main lines and semi-main line pipes of Ismail Abad irrigation network

شکل ۱- آرایش شماتیک خطوط اصلی و نیمه اصلی شبکه اسماعیل آباد

**Table 1- Characteristics of the applied pipes in Ismail Abad network in the present condition**

جدول ۱- اطلاعات خطوط اصلی و نیمه اصلی شبکه‌ی اسماعیل‌آباد در شرایط موجود

Pipe	Pipe Length (m)	Discharge (L/s)	Start elevation (m)	End elevation (m)
PP <sub>1</sub>	1116	856.56	1791	1842.08
P <sub>1</sub> P <sub>8</sub>	955	52.9	1842.08	1838.71
P <sub>1</sub> P <sub>3</sub>	1100	128.94	1842.08	1856.52
P <sub>1</sub> A <sub>5</sub>	200	244.92	1842.08	1847.05
A <sub>5</sub> P <sub>4</sub>	201	190.34	1847.05	1846.32
P <sub>4</sub> P <sub>5</sub>	390	128.94	1846.32	1841.18
P <sub>5</sub> P <sub>6</sub>	806	58.33	1841.18	1811.32
P <sub>6</sub> P <sub>7</sub>	575	21.49	1811.32	1810.94
P <sub>1</sub> P <sub>2</sub>	1430	429.8	1842.08	1847.57
P <sub>2</sub> P <sub>9</sub>	670	98.24	1847.57	1821.48
P <sub>9</sub> P <sub>10</sub>	840	33.77	1821.48	1814.43
P <sub>2</sub> P <sub>13</sub>	720	119.73	1847.57	1826.47
P <sub>13</sub> P <sub>14</sub>	660	49.12	1826.47	1847.95
P <sub>2</sub> A <sub>7</sub>	110	46.05	1847.57	1847.57
P <sub>2</sub> P <sub>11</sub>	550	165.8	1847.57	1853.21
P <sub>11</sub> P <sub>12</sub>	700	132	1853.21	1861.89

از صورت دوگان (صفر و یک) به عدد ده دهی تبدیل می‌شود و سپس مقدار تابع هدف مربوط به آن به دست می‌آید. در این مرحله هر کروموزم به وسیله‌ی تابع هدف ارزیابی می‌شود، ورودی تابع هدف یک‌رشته کروموزم متشکل از متغیرهای تصمیم و خروجی آن عددی است که نمایشگر میزان عملکرد کروموزم مورد نظر است. در این تحقیق مجموع حاصل ضرب طول لوله‌های موجود در شبکه در هزینه واحد طول آن‌ها، برابر تابع هزینه مربوط به لوله‌ها می‌باشد. اطلاعات مربوط به لوله‌های تجاری موجود در بازار همراه هزینه تمام شده واحد طول آن‌ها که در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفته‌اند، در جدول ۲ آورده شده است (Shahinejad, 2011).

ارزیابی میزان سازگاری هر کروموزم با استفاده از تابع برازش انجام می‌شود. خروجی‌های تابع هدف حالتی خام دارند که با تابعی دیگر (تابع برازش) ارزیابی و میزان سازگاری نسبی آن‌ها محاسبه می‌شود. میزان سازگاری هر کروموزم  $(f'(x_i))$  طبق رابطه‌ی زیر با تقسیم میزان کارایی آن در تابع هدف  $(f(x_i))$  به مجموع مقادیر تابع هدف به دست می‌آید:

$$f'(x_i) = \frac{f(x_i)}{\sum_{i=1}^N f(x_i)} \quad (4)$$

که در آن  $N$ : تعداد کروموزم‌ها در جمعیت می‌باشد (Alborzi, 2009).

به منظور جستجو و بررسی در فضای تعریفی پارامترها جهت تعیین مقادیر بهینه، عملیات تقاطع، جهش و جایگزینی با رویکرد نخه‌گرایی بر روی مجموعه کروموزم‌ها انجام شد و نهایتاً نسل جدید تولید گردید.

چنانچه محدوده تغییرات هر پارامتر  $a_i \leq x_i \leq b_i$  باشد و میزان دقت اعداد برابر  $\Delta n_i$  باشد از رابطه زیر می‌توان تعداد ژن‌ها  $n_i$  را محاسبه نمود (Zahraei, 2009):

$$2^{n_i-1} \leq (b_i - a_i) \times 10^{\Delta n_i} \leq 2^{n_i} \quad (1)$$

همانگونه که در جدول ۲ نیز نشان داده شده است، تعداد قطر لوله‌هایی که می‌تواند در شبکه‌ی اسماعیل‌آباد استفاده شود معادل ۱۸ می‌باشد. از آنجایی که عدد  $2^4 < 18 < 2^5$  می‌باشد، بنابراین محدوده تغییرات عدد اختصاص داده شده به هر قطر باید عددی بین (۳۲ و ۱۶) باشد. برای مثال در این تحقیق انتخاب عدد ۱ یعنی لوله با قطر داخلی  $93/8$  میلی‌متر، انتخاب عدد ۱۷ یعنی لوله با قطر داخلی ۸۰۰ میلی‌متر و انتخاب عددی بین ۱۸ تا ۳۲ یعنی لوله با قطر ۹۰۰ میلی‌متر است. با در نظر گرفتن میزان دقت اعداد  $\Delta n_i$  برابر با صفر تعداد ژن‌ها  $n_i$  به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$2^4 \leq (32 - 1) \times 10^0 \leq 2^5 \rightarrow n_i = 5 \quad (2)$$

پس از تعیین طول رشته یا ژن‌های مربوط به هر پارامتر، لازم است طول کروموزم جامعه تعیین شود. تعداد لوله‌ها (m) در این شبکه که همان متغیر تصمیم است ۱۶ می‌باشد، بنابر این طول کروموزم جامعه به صورت زیر تعیین می‌شود:

$$L = \sum_{i=1}^m n_i = 80 \quad (3)$$

در اجرای الگوریتم ژنتیک دودویی جمعیت اولیه کروموزم‌ها به‌طور تصادفی تولید می‌شود. چنانچه بخواهیم تعداد  $N$  کروموزم که هر کروموزم  $L$  بیت طول داشته باشد را به‌وجود آوریم باید  $N \times L$  عدد تصادفی از مجموعه‌ی  $\{0,1\}$  تولید شود که برای انتخاب هر کدام از این اعداد از تابع  $[ \text{Rnd} ]$  استفاده می‌شود. در ادامه هر یک از رشته‌ها

**Table 2- Physical characteristics and cost of the pipes used in the present study**

جدول ۲- خصوصیات فیزیکی و هزینه‌ی لوله‌های قابل استفاده در طرح

Row	External diameter (mm)	Internal diameter (mm)	Type of pipe	Price per unit length of pipe (\$/m)
1	110	93.8	PE80	5.895
2	125	106.6	PE80	7.895
3	140	119.4	PE80	9.495
4	160	136.4	PE80	12.375
5	180	153.4	PE80	15.705
6	200	170.6	PE80	19.305
7	225	191.8	PE80	24.525
8	250	213.2	PE80	30.15
9	280	238.8	PE80	37.8
10	315	268.6	PE80	47.7
11	355	302.8	PE80	60.525
12	400	341.2	PE80	76.725
13	450	383.8	PE80	97.2
14	500	426.4	PE80	108.82
15	600	600	GRP	111.323
16	700	700	GRP	137.997
17	800	800	GRP	170.633
18	900	900	GRP	204.289

لوله می‌شود ۰/۷ تا ۱ متر بر ثانیه می‌باشد. بیشترین سرعت مجاز در خطوط لوله اصلی و نیمه اصلی نیز از لحاظ کنترل ضربه قوچ و جلوگیری از ترکیبگی لوله‌ها اهمیت دارد. از این لحاظ بیشترین سرعت بستگی به جنس لوله‌ها داشته و ۱/۵ تا ۲/۵ متر بر ثانیه می‌باشد. با توجه به نکات بالا، حداکثر سرعت ۲ متر بر ثانیه و حداقل سرعت ۰/۷ متر بر ثانیه در نظر گرفته شده است (Iran Water Resources Management Co. Publication No. 286, 2004).

#### ۲) محدودیت فشار در گره‌ها

با توجه به بکارگیری آبپاش نوع AMBO ساخت ایتالیا با فشار ۴ اتمسفر و همچنین روابط موجود برای محاسبه‌ی فشار در محل اتصال بال آبیاری به لوله‌ی اصلی معیار حداقل فشار مورد نیاز در هر گره ۵۰ متر در نظر گرفته شد و بر اساس آن هد فشار ورودی برای سیستم بهینه گردید. حداکثر فشار در شرایط عادی ۱۰۰ متر و در شرایط ضربه قوچ ۱۴۰ متر در نظر گرفته شد.

زمانی که شیر بسته می‌شود یا پمپ از کار می‌افتد کاهش فشار در خط لوله نیز می‌تواند باعث کاویتاسیون و مجاله شدن لوله و اتصالات شود، بنابراین حداقل فشار در سیستم لازم است بیشتر از فشار بخار باشد.

#### ۲-۲-۲- تابع جریمه

حل مسائل بهینه‌سازی مقید با استفاده از الگوریتم‌های ژنتیک مستلزم بکارگیری روش‌های مناسب جهت اعمال قیود مسأله می‌باشد. استفاده

در مدل حاضر پس از انتخاب هر جفت کروموزم یک عدد تصادفی تولید شده چنانچه عدد تصادفی تولیدشده از مقدار احتمال در نظر گرفته شده بالاتر باشد، تقاطع انجام می‌شود. انتخاب محل برش به صورت تصادفی بوده و می‌تواند شامل یک و یا چند موقعیت (در یک ژن و یا چند ژن) باشد. همچنین، در این تحقیق از جهش تک نقطه‌ای کروموزم‌ها استفاده گردید. بدین صورت که یکی از بیت‌های کروموزم به‌طور تصادفی انتخاب و با احتمال کمی مقدار آن از صفر به یک یا بالعکس تغییر یافت. هنگامی که نوزادان جدیدی با استفاده از عملگرهای انتخاب، تقاطع و جهش به وجود آمدند، میزان سازگاری آن‌ها تعیین شد، سپس آن‌ها بر اساس میزان سازگاری وارد جمعیت جدید شدند. تصمیم‌گیری برای اینکه چه تعداد کروموزم بایستی برای تولید نسل بعد نگاه داشته شوند تا حدی اختیاری است و از جمله پارامترهایی محسوب می‌شود که مدل‌کننده می‌تواند مقدار مناسب آن را با توجه به شرایط مسأله و سعی و خطا تعیین کند. باقی گذاشتن تعداد زیاد کروموزم‌ها در هر نسل به منظور تولید فرزندان، شناس انتقال ویژگی نامناسب بعضی کروموزم‌ها را به نسل بعد افزایش می‌دهد. در این تحقیق با مرتب کردن اعضای نسل جدید و قدیم بر اساس میزان سازگاری آنها اعضای نسل بعد انتخاب شدند.

#### ۲-۲-۱- تعریف قیود مسأله بهینه‌سازی با توجه به محدودیت‌های موجود

##### ۱) محدودیت سرعت در لوله‌ها

کمترین سرعت مجاز در خطوط لوله از لحاظ رسوب‌گذاری و تجمع هوا مهم می‌باشد. سرعتی که مانع رسوب‌گذاری و تجمع هوا در خطوط

کامل تبدیل می‌کند سپس بر روی مسیریابی که به خطوط مشخصه مرسوم ( $C^+$ ,  $C^-$ ) هستند منفصل می‌شوند:

$$L_1 = \frac{\partial h_p}{\partial t} + V \frac{\partial h_p}{\partial x} + \frac{a^2}{g} \frac{\partial V}{\partial x} = 0 \quad (9)$$

$$L_2 = \frac{\partial V}{\partial t} + V \frac{\partial V}{\partial x} + g \frac{\partial h_p}{\partial x} + g \frac{\partial z}{\partial x} + g S_f = 0 \quad (10)$$

معادلات بالا دو معادله‌ی دو مجهولی غیرخطی برحسب متغیرهای  $V$  و  $h_p$  هستند که دارای حل عمومی نیستند. بدیهی است که هر ترکیب خطی از آن دو برابر صفر می‌باشد. یعنی می‌توان نوشت:

$$L = L_1 + \lambda L_2 \quad (11)$$

$$L = \frac{\partial h_p}{\partial t} + V \frac{\partial h_p}{\partial x} + \frac{a^2}{g} \frac{\partial V}{\partial x} + \lambda \left( \frac{\partial V}{\partial t} + V \frac{\partial V}{\partial x} + g \frac{\partial h_p}{\partial x} + \right. \quad (12)$$

$$\left. g \frac{\partial z}{\partial x} + g S_f \right) = 0$$

$$L = \frac{\partial h_p}{\partial t} + (V + g\lambda) \frac{\partial h_p}{\partial x} + \lambda \left[ \frac{\partial V}{\partial t} + \left( \frac{a^2}{g\lambda} + V \right) \frac{\partial V}{\partial x} \right] + \quad (13)$$

$$g\lambda \left( S_f + \frac{\partial z}{\partial x} \right) = 0$$

چنانچه:

$$\frac{dx}{dt} = (V + g\lambda) = \left( \frac{a^2}{g\lambda} + V \right) \quad (14)$$

در نظر گرفته شود در آن صورت رابطه ۱۳ بصورت زیر نوشته می‌شود:

$$L = \frac{dh_p}{dt} + \lambda \frac{dV}{dt} + g\lambda \left( S_f + \frac{\partial z}{\partial x} \right) \quad (15)$$

با توجه به رابطه ۱۴،  $\pm a = g\lambda$  که با جایگزینی مقادیر مثبت و منفی آن در رابطه ۱۵ به معادلات دیفرانسیل کامل یعنی روابط ۱۶ ( $C^+$ ) و ۱۸ ( $C^-$ ) به ترتیب در امتداد مشخصه‌های مثبت (رابطه ۱۷) و منفی (رابطه ۱۹) تبدیل می‌شوند:

$$\frac{dh_p}{dt} + \frac{a}{g} \frac{dV}{dt} + a S_f + a \frac{dz}{dx} = 0 \quad (16)$$

$$\frac{dx}{dt} = V + a \quad (17)$$

$$\frac{dh_p}{dt} - \frac{a}{g} \frac{dV}{dt} - a S_f - a \frac{dz}{dx} = 0 \quad (18)$$

$$\frac{dx}{dt} = V - a \quad (19)$$

دو معادله‌ی  $C^+$  و  $C^-$  به صورت زیر در گره‌های میانی منفصل شده‌اند:

$$\frac{hp_i^{n+1} - hp_{i-1}^n}{\Delta t} + \frac{a}{g} \left( \frac{V_i^{n+1} - V_{i-1}^n}{\Delta t} \right) + a \times 10.64 \times \quad (20)$$

$$\frac{V_{i-1}^n |V_{i-1}^n|^{0.85}}{C^{1.85}} \times D^{-4.87} \times A^{1.85} + a \frac{Z_i - Z_{i-1}}{X_i - X_{i-1}} = 0$$

$$\frac{hp_i^{n+1} - hp_{i+1}^n}{\Delta t} - \frac{a}{g} \left( \frac{V_i^{n+1} - V_{i+1}^n}{\Delta t} \right) - a \times 10.64 \times \quad (21)$$

$$\frac{V_{i+1}^n |V_{i+1}^n|^{0.85}}{C^{1.85}} \times D^{-4.87} \times A^{1.85} - a \frac{Z_i - Z_{i-1}}{X_i - X_{i-1}} = 0$$

که در آن  $hp_i^{n+1}$  هدفشاری در گره  $i$  در زمان  $n+1$   $hp_{i-1}^n$  هدفشاری در گره  $i-1$  در زمان  $n$   $a$  سرعت انتشار امواج فشاری،  $A$  سطح مقطع لوله،  $D$  قطر داخلی لوله،  $C$  ضریب هیزن ویلیامز،  $Z_i$  رقوم گره  $i$ ،  $X_i$  فاصله‌ی گره  $i$  از ابتدای لوله است. همه واحدها در سیستم متریک هستند. با استفاده از دو معادله بالا دو مجهول سرعت و فشار در هر گام زمانی برای نقاط داخلی محاسبه می‌شوند. می‌توان روابط ۲۰ و ۲۱ را به اشکال ساده زیر نوشت:

$$hp_i^{n+1} = A_{pi} - \frac{a}{g} V_i^{n+1} \quad (22)$$

از توابع جریمه یکی از معمول‌ترین روش‌ها برای مدل‌سازی مسائل مقید می‌باشد. تحقیقات صورت گرفته برای تعریف و استفاده از توابع جریمه مناسب، نشان دهنده اهمیت و تأثیر این روش در عملکرد الگوریتم‌های ژنتیک می‌باشد. با توجه به اینکه تابع هدف دارای قیود طراحی است، می‌توان به وسیله‌ی تابع جریمه مجموعه قیود مساوی و نامساوی را به یک رابطه تبدیل کرد و به بهینه کردن رابطه‌ی مورد نظر پرداخت. قیود مسأله به صورت توابع  $g(x)$  کوچکتر و یا مساوی صفر و توابع  $h(x)$  مساوی صفر در نظر گرفته و بردار  $V$  را به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$V = \text{Max}[0, g_1(x), g_2(x), g_3(x), \dots, \quad (5)$$

$$|h_1(x)|, |h_2(x)|, |h_3(x)|, \dots]$$

و نهایتاً تابع تابع هدف نامقید به صورت زیر معرفی می‌گردد:

$$\emptyset = f_0 + RV \quad (6)$$

که در آن  $\emptyset$  تابع هدف نامقید،  $f_0$  تابع هدف مقید،  $R$  ضریب جریمه،  $V$  ماکزیمم نقض قید توسط متغیرها می‌باشد.

### ۲-۳- مدل ضربه قوچ

این زیر برنامه جهت شبیه‌سازی پدیده‌ی ضربه قوچ، در شبکه‌ی آبیاری تحت فشار، تهیه شده است و می‌تواند فشار مازاد ناشی از ضربه قوچ را در تمامی نقاط و در هرگام زمانی محاسبه کند. نیمرخ طولی مسیر هر یک از لوله‌ها، سرعت انتشار امواج فشاری، مشخصات قطرهای تجاری شامل قطر داخلی، هزینه تمام شده واحد طول لوله، ضریب زبری و غیره در قالب فایل‌های جداگانه به مدل معرفی شدند.

### ۲-۳-۱- معادلات حاکم

معادلات حاکم همان معادلات پیوستگی و انداره حرکت در شرایط غیر ماندگار می‌باشد:

$$\frac{\partial h_p}{\partial t} + V + \frac{a^2}{g} \frac{\partial V}{\partial x} = 0 \quad (7)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + V \frac{\partial V}{\partial x} + g \frac{\partial h_p}{\partial x} + g \frac{\partial z}{\partial x} + g S_f = 0 \quad (8)$$

که در آنها  $h_p$  هد فشار،  $V$  سرعت جریان،  $Z$  رقوم کف،  $S_f$  شیب خط انرژی،  $g$  شتاب ثقل،  $a$  سرعت انتشار امواج فشاری،  $t$  متغیر زمان و  $x$  بعد مکان می‌باشد.

معادلات دیفرانسیل جزئی ۷ و ۸ غیرخطی و از نوع معادلات هذلولی هستند که با روش تحلیلی نمی‌توان آن‌ها را به‌طور کامل حل کرد. برای حل کامل این دو معادله می‌توان از روش‌های عددی استفاده نمود. یک نمونه از این روش‌های عددی روش خطوط مشخصه است. مطابق آنچه در ادامه ارائه شده است روش خطوط مشخصه معادلات دیفرانسیل جزئی پیوستگی و اندازه حرکت را به معادلات دیفرانسیل

بر لوله‌های ۱ و ۲ معادله‌ی  $C^+$ ، بر لوله‌های ۳ و ۴ معادله‌ی  $C^-$  و بر روی گره معادله‌ی پیوستگی حاکم است:

$$hp_j^{n+1} = A_{p1} - \frac{a_1}{g} v_1^{n+1} \quad (24)$$

$$hp_j^{n+1} = A_{p2} - \frac{a_2}{g} v_2^{n+1} \quad (25)$$

$$v_3^{n+1} = A_{v3} + \frac{g}{a_3} hp_j^{n+1} \quad (26)$$

$$v_4^{n+1} = A_{v4} + \frac{g}{a_4} hp_j^{n+1} \quad (27)$$

$$\sum_{i=1}^4 Q = 0 \quad \text{یا} \quad D_1^2 v_1^{n+1} + D_2^2 v_2^{n+1} = \quad (28)$$

$$D_3^2 v_3^{n+1} + D_4^2 v_4^{n+1}$$

دستگاه ۵ معادله ۵ مجهولی فوق به روش تکراری یا مستقیم حل می‌شود. در این تحقیق در محل گره‌هایی که دبی خروجی ندارند دستگاه معادلات خطی می‌باشد و به روش مستقیم حذف گوس حل شد.

چنانچه همانند شکل ۳ در محل گره جریان خروجی وجود داشته باشد با فرض اینکه دبی خروجی در محل گره با جذر فشار در گره در هر لحظه زمانی ارتباط داشته باشد دستگاه معادلات به صورت ریز به دست می‌آید:

$$hp_j^{n+1} = A_{p1} - \frac{a_1}{g} v_1^{n+1} \quad (29)$$

$$v_2^{n+1} = A_{v2} + \frac{g}{a_2} hp_j^{n+1} \quad (30)$$

$$\sum_{i=1}^2 Q = 0 \quad \text{یا} \quad \frac{\pi}{4} D_1^2 v_1^{n+1} = \frac{\pi}{4} D_2^2 v_2^{n+1} + Q_j^{n+1} \quad (31)$$

که در آن  $Q_j^{n+1}$  دبی خروجی از گره در زمان حال است و بصورت زیر در این تحقیق محاسبه شد:

$$Q_j^{n+1} = C_{orf} \sqrt{hp_j^{n+1}} \quad (32)$$

$$v_i^{n+1} = A_{vi} + \frac{g}{a} hp_i^{n+1} \quad (23)$$

ضرایب  $A_{vi}$  و  $A_{pi}$  به ترتیب از مقایسه رابطه ۲۲ با رابطه ۲۰ و رابطه ۲۳ با رابطه ۲۱ به دست می‌آیند.

### ۲-۳-۲- شرایط مرزی

در ابتدا و انتهای لوله‌ها که مرز نامیده می‌شود فقط یک خط مشخصه (مثبت یا منفی) عبور می‌کند. بنابراین با کمک اطلاعات دیگری از شرایط مرزی بایستی معادله دومی تشکیل داد و با استفاده از این دو معادله مقادیر سرعت و هد فشار در زمان آینده را محاسبه نمود. با توجه به نوع اتصال و یا سازه روی مرز رابطه کمکی مختص به آن به دست می‌آید. شرایط مرزی به دو دسته شرایط مرزی داخلی و شرایط مرزی خارجی تقسیم می‌شوند:

### ۲-۳-۱- شرایط مرزی داخلی

شرط مرزی داخلی شامل انواع شیرها در مسیر لوله‌ها، بوستر پمپ‌ها، محفظه‌های فشار، سرج تانک‌ها و محل اتصال لوله‌ها و غیره باشد. با توجه به مشخصات شبکه اسماعیل‌آباد در این تحقیق مرزهای داخلی فقط شامل محل اتصال لوله‌ها می‌باشد. در این محل ممکن است دبی خروجی نیز وجود داشته باشد. شکل ۲ نمونه‌ای شماتیک از یک اتصال چند لوله‌ای بدون خروجی دبی را نشان می‌دهد. در این سیستم مجهولات عبارت‌اند از هد فشار در محل گره و دبی لوله‌ها در زمان بعد که اگر تعداد لوله‌های موجود در اتصال برابر  $m$  باشد تعداد مجهولات  $m+1$  خواهد بود.

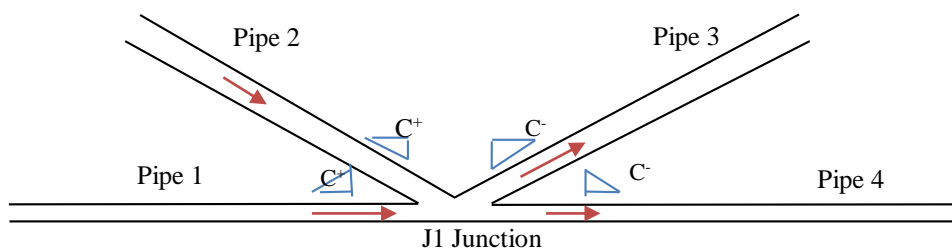


Fig. 2- Pipe junction without outflow  
شکل ۲- محل اتصال چند لوله بدون دبی خروجی

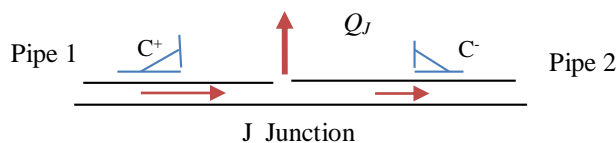


Fig. 3- The junction of two pipes with outflow  
شکل ۳- محل اتصال دو لوله با دبی خروجی

مثال ۱: در این مثال تابع هدف و محدودیت‌ها به شکل زیر تعریف شده‌اند:

$$F(x) = \quad (38)$$

$$-5 \sin(x_1) \sin(x_2) \sin(x_3) \sin(x_4) \sin(x_5) - \sin(5x_1) \sin(5x_2) \sin(5x_3) \sin(5x_4) \sin(5x_5) \quad (39)$$

$$0 \leq x_i \leq \pi \quad (40)$$

جواب بهینه مسأله با استفاده از روش تحلیلی عبارت است از:

$$f\left(\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}\right) = -6,$$

$$(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5) = \left(\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}\right)$$

نتایج بدست آمده از مدل حاضر باتوجه به پارامترهای ارائه شده در جدول ۳ به صورت زیر می‌باشد:

$$(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5) = (1.57, 1.57, 1.57, 1.57, 1.57),$$

$$f(x) = -5.99999$$

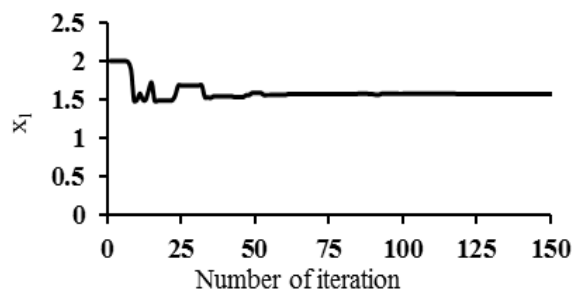
**Table 3- Applied parameters in Genetic Algorithm model for example 1**

جدول ۳- پارامترهای مورد استفاده در الگوریتم ژنتیک برای

مثال ۱

(Parameter)	(Value)
Number of decision variable	5
Number of chromosomes	100
Number of iteration	150
Mutation probability	0.05
Penalty coefficient	1500

برای نمونه تغییرات متغیرهای  $x_1$  و  $x_5$  در مقابل تعداد تکرار به ترتیب در شکل‌های ۴ و ۵ ارایه شده است. همچنین در شکل ۶ تغییرات مقدار تابع هدف در مقابل تعداد تکرار نمایش داده شده است. همانگونه که مشاهده می‌شود بعد از حدود ۱۰۰ تکرار دیگر تغییری در مقدار متغیرها و جواب مسأله مشاهده نشده است. به عبارتی جواب بهینه به‌دست آمده است.



**Fig. 4- Variation of  $x_1$  vs. number of iterations**

شکل ۴- تغییرات  $x_1$  به ازاء تعداد تکرار

که در آن  $C_{off}$  ضریبی است که بستگی به سطح روزنه خروجی و شکل مقطع آن و غیره دارد. در این تحقیق مقدار آن به صورت معکوس بر اساس دبی خروجی و فشار در گره در شرایط ماندگار قبل از اعمال ضربه قوچ به‌دست آمد و در تمام مدت زمان محاسبات مقدار آن ثابت در نظر گرفته شد هرچند مقداری خطا وارد محاسبات می‌نماید.

### ۲-۲-۳-۲- شرایط مرزی خارجی

این نوع شرط مرزی که در ورودی‌ها و در خروجی‌های سیستم اعمال می‌شوند انواع مختلفی دارند. در شبکه اسماعیل‌آباد همانگونه که در شکل ۱ نشان داده شده است در ابتدای سیستم ایستگاه پمپاژ و در انتهای خطوط لوله شیر قطع و وصل وجود دارد. چنانچه خواسته شود یکی از شدیدترین نحوه اعمال ضربه قوچ یعنی قطع ناگهانی ایستگاه پمپاژ به سیستم معرفی شود، شیر یکطرفه بلافاصله بسته می‌شود. بنابراین سرعت جریان در گره ورودی برابر با صفر در نظر گرفته می‌شود و تنها به یک معادله‌ی دیگر برای محاسبه‌ی هد فشار نیاز است که آن همان معادله‌ی  $C^-$  می‌باشد:

$$V_1^{n+1} = 0 \quad (33)$$

$$V_1^{n+1} = A_{v1} + \frac{g}{a_1} hp_1^{n+1} = 0 \quad (34)$$

در خروجی لوله‌های اصلی شبکه که شیر قطع و وصل وجود دارد با فرض اینکه شیر در طول زمان  $T_c$  بسته شود معادلات تغییرات جریان به صورت زیر است:

$$hp_{end}^{n+1} = A_p - \frac{a}{g} V_{end}^{n+1} \quad (35)$$

$$V_{end}^{n+1} = V_0 \left(1 - \frac{t}{T_c}\right) \sqrt{\frac{hp_{end}^{n+1}}{h_0}} \quad 0 < t < T_c \quad (36)$$

$$V_{end}^{n+1} = 0 \quad t \geq T_c \quad (37)$$

که در آن  $hp_{end}^{n+1}$  و  $V_{end}^{n+1}$  به ترتیب سرعت و فشار در انتهای لوله بلافاصله قبل از شیر است.  $h_0$  و  $V_0$  به ترتیب سرعت و فشار در انتهای لوله قبل از اعمال ضربه قوچ،  $t$  زمان از شروع محاسبات و  $T_c$  زمان بسته شدن شیر می‌باشد. با استفاده روابط بالا سرعت و فشار در گره انتهای در گام زمانی بعد به‌دست می‌آید.

### ۳- نتایج و بحث

#### ۳-۱- صحت‌سنجی و ارزیابی مدل بهینه‌سازی

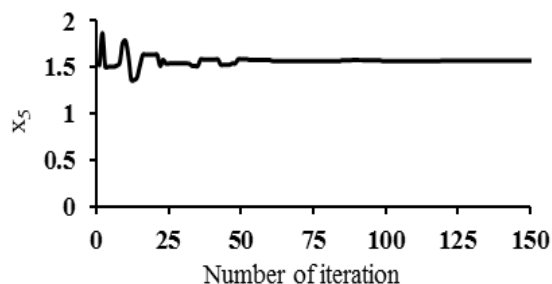
به‌منظور بررسی دقت مدل الگوریتم ژنتیک تهیه شده از نقطه نظر برنامه‌نویسی چندین مسأله بهینه‌سازی خطی و غیرخطی مفید که دارای راه‌حل‌های تحلیلی هستند، با مدل مذکور حل شدند و نتایج به‌دست آمده از آن با نتایج حل تحلیلی مقایسه شد. برای نمونه در ادامه دو مورد ارایه شده است (Alborzi, 2009).



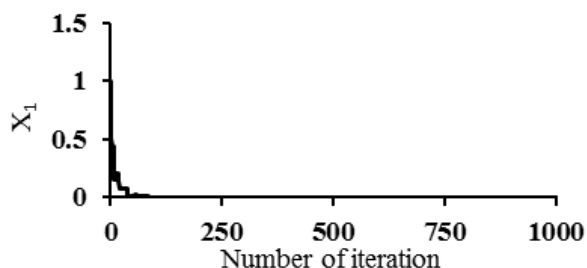
**Table 4- Applied parameters in Genetic Algorithm model for example 2**

جدول ۴- پارامترهای مورد استفاده در مدل الگوریتم ژنتیک برای مثال ۲

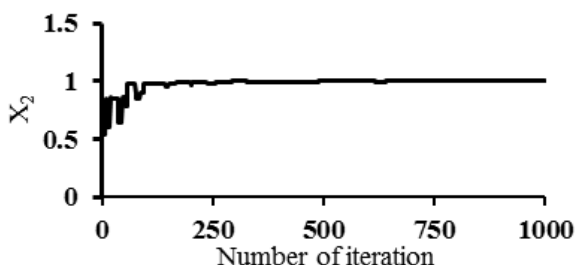
(Parameter)	(Value)
Number of decision variable	6
Number of chromosomes	50
Number of iteration	1000
Mutation probability	0.05
Penalty coefficient	19



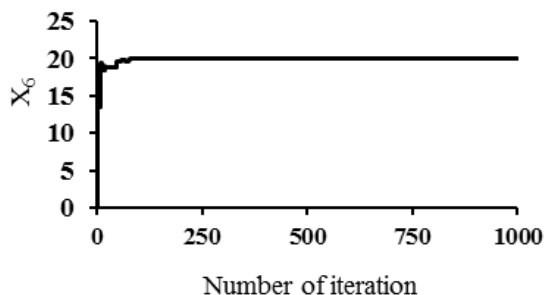
**Fig. 5- Variation of  $x_5$  vs. number of iterations**  
شکل ۵- تغییرات  $x_5$  به ازاء تعداد تکرار



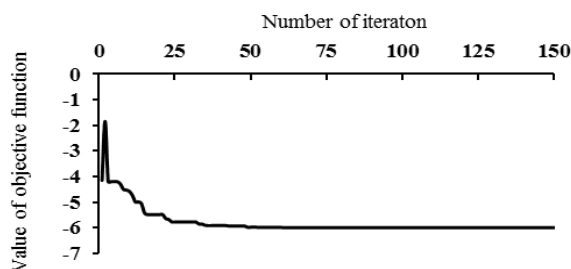
**Fig. 7- Variation of  $x_1$  vs. number of iterations**  
شکل ۷- تغییرات  $x_1$  به ازاء تعداد تکرار



**Fig. 8- Variation of  $x_2$  vs. number of iterations**  
شکل ۸- تغییرات  $x_2$  به ازاء تعداد تکرار



**Fig. 9- Variation of  $x_6$  vs. number of iterations**  
شکل ۹- تغییرات  $x_6$  به ازاء تعداد تکرار



**Fig. 6- Value of objective function vs. number of iterations**

شکل ۶- تغییرات تابع هدف در مقابل تکرار

مثال ۲: در این مثال تابع هدف و محدودیت‌ها به شکل روابط ۴۱ الی ۴۵ می‌باشد:

$$F(x, y) = -10.5x_1 - 5.7x_2 - 3.5x_3 - 2.5x_4 - \quad (41)$$

$$1.5x_5 - 10y - 0.5 \sum_{i=1}^5 x_i^2 \quad (42)$$

$$6x_1 + 3x_2 + 3x_3 + 2x_4 + x_5 \leq 6.5 \quad (43)$$

$$10x_1 + 10x_3 + y \leq 10 \quad (44)$$

$$0 \leq x_i \leq 1 \quad (45)$$

$$y \geq 0 \quad (46)$$

جواب بهینه مسأله با استفاده از روش تحلیلی عبارت است از (Alborzi, 2009)

$$f(x^*) = -213, x^* = (0, 1, 0, 1, 1, 20)$$

نتایج به دست آمده از مدل حاضر با توجه به پارامترهای ارائه شده در جدول ۴ به صورت زیر می‌باشد:

$$f(x^*) = -213.003, x^* = (0, 1, 0, 1, 0.9999, 20)$$

نتایج مدل در حل مثال‌های ۱ و ۲ و موارد متعدد دیگر که بخاطر کاهش حجم مطالب در اینجا ارائه نشده، نشان می‌دهد که مدل بهینه‌سازی حتی توانایی حل مسایل بهینه‌سازی پیچیده غیر خطی مقید را دارد و نتایج مدل برای ادامه کار قابل اطمینان است.

۱۰۰ متر می‌رسد که برابر هد آب داخل مخزن می‌باشد. روندی مشابه برای نقطه انتهایی خط لوله در شکل ۱۲ مشاهده می‌شود.

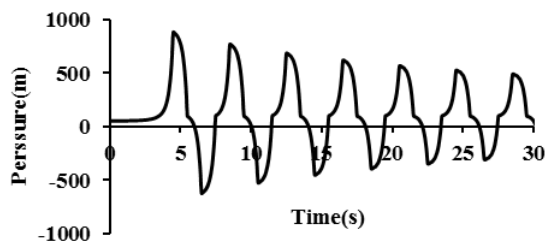


Fig. 11- Variation of pressure head vs. calculation time in the middle of the pipeline

شکل ۱۱- منحنی فشار (نسبت به زمان) حاصل از ضربه قوچ در نقطه‌ی وسط خط لوله

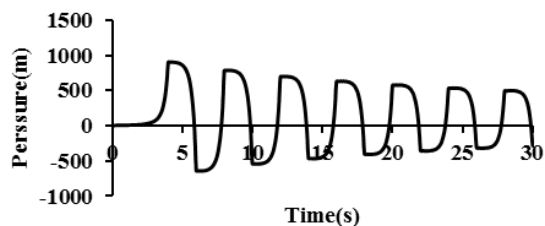


Fig. 12- Variation of pressure head vs. calculation time in the end of the pipeline

شکل ۱۲- منحنی فشار (نسبت به زمان) حاصل از ضربه قوچ در انتهای خط لوله

مورد ۲- مخزن و سیستم چند شاخه به منظور کنترل فشار در محل گره‌ها

به منظور ارزیابی مدل در شبیه‌سازی نوسانات فشار ضربه قوچ در یک سیستم از خطوط لوله، سیستم خطوط لوله با آرایش درختی نشان داده شده در شکل ۱ مورد بررسی قرار گرفت. مشخصات وضع موجود ارائه شده در جدول ۱ به همراه یک مخزن با رقوم سطح آب برابر با ۱۴۰ متر در ابتدای سیستم در نظر گرفته شد. برای شبیه‌سازی ضربه قوچ فرض می‌شود تمام شیرهای موجود در سیستم بلافاصله بسته شوند. در این حالت انتظار می‌رود که پس از پایدار شدن سیستم، فشار در محل گره‌ها که توسط مدل محاسبه می‌شود با اختلاف رقوم سطح آب مخزن ابتدای سیستم و رقوم زمین محل گره‌ها برابر باشد. بدین منظور در محل دو گره  $P_1$  و  $P_3$  به عنوان نمونه مقادیر فشار در مقابل زمان از شروع محاسبات به ترتیب در شکل‌های ۱۳ و ۱۴ ترسیم شده است.

Number of iteration

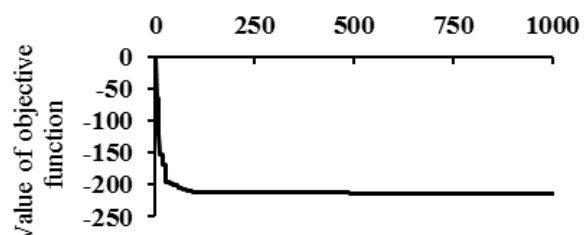


Fig. 10-Variation of objective function value vs. number of iterations

شکل ۱۰- تغییرات تابع هدف در مقابل تکرار

۲-۳- صحت‌سنجی و ارزیابی مدل آنالیز ضربه قوچ

به منظور صحت‌سنجی و ارزیابی مدل آنالیز ضربه قوچ تهیه شده در این تحقیق دو مثال موردی در نظر گرفته شد. در مورد اول یک سیستم ساده متشکل از یک مخزن و لوله متصل به آن در نظر گرفته شد که در انتهای خط لوله یک شیر قطع و وصل قرار دارد. در مورد دوم همانند آنچه که در شکل ۱ نشان داده شده است یک سیستم متشکل از یک مخزن و تعداد ۱۶ خط لوله متصل به هم با آرایش درختی مورد بررسی قرار گرفت. در انتهای آزاد خطوط لوله شیر قطع وصل قرار دارد. در مورد دوم بر خلاف مورد اول شرایط مرزی داخلی نیز مشاهده می‌شود. که در ادامه جزئیات هر دو مورد ارائه شده است.

مورد ۱- مخزن و سیستم تک شاخه

در این مورد یک مخزن که ارتفاع آب در آن ۱۰۰ متر می‌باشد، در نظر گرفته شده است. طول خط لوله (L) متصل به آن ۱۰۰۰ متر با قطر داخلی ۵۰۰ میلی‌متر و ضریب داری و بسباج  $0.12/a$  است که در طول محاسبات ثابت فرض شد. قبل از بسته شدن شیر انتهای لوله فشار در پشت آن  $4/75$  متر است. سرعت موج فشاری (a)  $1000$  متر بر ثانیه، زمان بسته شدن شیر ۴ ثانیه و  $\Delta x = 100$  متر می‌باشد. همچنین زمان کل محاسبات ضربه قوچ  $1000$  ثانیه در نظر گرفته شد. شکل ۱۱ تغییرات فشار در وسط خط لوله را نسبت به زمان (برای وضوح بیشتر نمودار تا زمان ۳۰ ثانیه ترسیم شده است) نشان می‌دهد. همانگونه که مشاهده می‌شود قبل از بسته شدن کامل شیر فشار در وسط خط لوله به تدریج اضافه می‌شود ولی بعد از بسته شدن کامل شیر فشار به سرعت افزایش و سپس کاهش می‌یابد و سیکل‌های تناوبی پدیدار می‌شوند به گونه‌ای که هر سیکل تناوبی در مدت زمان حدود ۴ ثانیه ( $2L/a$ ) تکمیل و تکرار می‌شود. همچنین با هر مرتبه تکرار شدن این سیکل‌ها به علت اصطکاک خط لوله، مقداری از فشار آن کاسته می‌شود تا به حالت ساکن برسد. با توجه به این نکته که لوله افقی می‌باشد پس از میرا شدن امواج، نهایتاً هد فشار در نقطه مورد نظر به

همانگونه که مشاهده می‌شود مقدار فشار در گره P<sub>1</sub> پس از میرا شدن امواج به ۸۸/۹۲ متر می‌رسد که برابر با اختلاف رقوم سطح آب مخزن (۱۴۰+۱۷۹۱) و رقوم گره P<sub>1</sub> (۱۸۴۲/۰۸) می‌باشد. همچنین مقدار فشار در گره P<sub>3</sub> پس از میرا شدن امواج برابر ۷۴/۴۸ متر است که برابر با اختلاف رقوم سطح آب مخزن (۱۴۰+۱۷۹۱) و رقوم گره P<sub>3</sub> (۱۸۵۶/۵۲) می‌باشد. به عبارتی مدل به درستی می‌تواند نوسانات فشار ناشی از ضربه قوچ را در سیستم‌های پیچیده از لوله‌ها را شبیه‌سازی نماید.

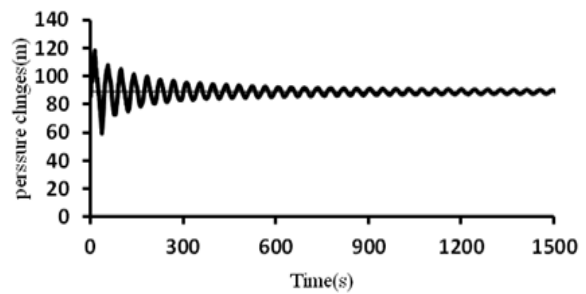


Fig. 13- Variation of pressure head vs. time of calculation at node P<sub>1</sub>

شکل ۱۳- تغییرات فشار نسبت به زمان حاصل از ضربه قوچ در گره P<sub>1</sub>

### ۳-۳- طراحی بهینه شبکه و اثر ضربه قوچ بر آن

پس از اطمینان به نتایج مدل در ابتدا طراحی شبکه اسماعیل آباد با مدل بهینه‌سازی انجام شد. این مدل قطر تجاری موجود در بازار را با در نظر گرفتن محدودیت‌های سرعت و فشار کاری، بهینه‌یابی می‌نماید. نتایج در جدول ۵ ارایه شده است. همچنین در جدول ۶ مقادیر نهایی پارامترهای الگوریتم ژنتیک ارایه شده است.

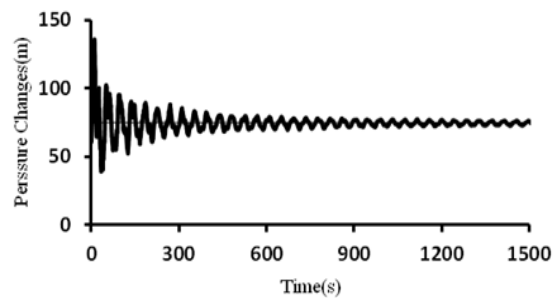


Fig. 14- Variation of pressure head vs. time of calculation at node P<sub>3</sub>

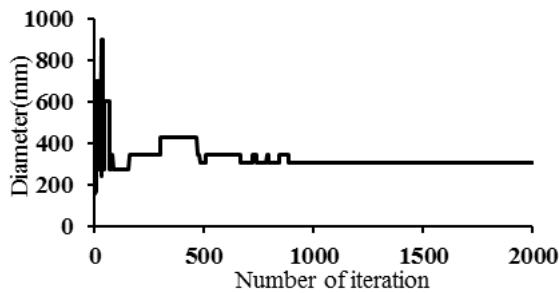
شکل ۱۴- تغییرات فشار نسبت به زمان حاصل از ضربه قوچ در گره P<sub>3</sub>

لازم به ذکر است در روش طراحی دستی هد فشار در ابتدای سیستم ۱۴۰ متر و در حالت بهینه‌سازی مقدار هد فشار در ابتدای سیستم برابر ۱۳۹/۰۸ به دست آمد که تقریباً یکسان هستند به عبارتی هزینه ایستگاه پمپاژ یکسان است که در مقایسه از آن صرف نظر شده است.

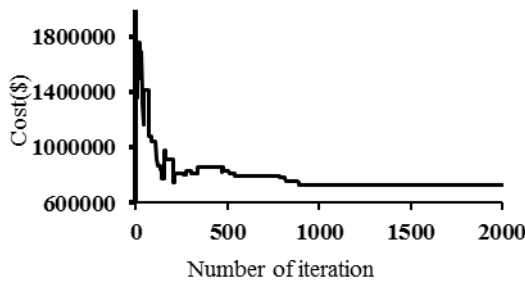
Table 5- Physical characteristics of Ismail Abad irrigation network in the present condition and after optimization

جدول ۵- اطلاعات خطوط اصلی و نیمه اصلی شبکه‌ی اسماعیل آباد در شرایط موجود و بهینه‌یابی شده

Row	Pipe	Discharge (l/s)	Internal diameter present condition (mm)	Optimization without considering water hammer				Optimized diameter with considering water hammer (mm)
				Internal diameter (mm)	Inlet pressure (m)	End pressure (m)	Velocity (m/s)	
1	PP <sub>1</sub>	856.56	900	800	139.08	85.53	1.705	800
2	P <sub>1</sub> P <sub>8</sub>	52.9	213.2	191.8	85.53	72.14	1.832	238.8
3	P <sub>1</sub> P <sub>3</sub>	128.94	302.8	302.8	85.53	60.18	1.791	302.8
4	P <sub>1</sub> A <sub>5</sub>	244.92	426.4	426.4	85.53	79.33	1.716	426.4
5	A <sub>5</sub> P <sub>4</sub>	190.34	426.4	383.8	79.33	78.78	1.646	383.8
6	P <sub>4</sub> P <sub>5</sub>	128.94	341.2	302.8	78.78	80.05	1.791	302.8
7	P <sub>5</sub> P <sub>6</sub>	58.33	213.2	191.8	80.05	92.79	2.02	238.8
8	P <sub>6</sub> P <sub>7</sub>	21.49	136.4	119.4	92.72	74.07	1.92	119.4
9	P <sub>1</sub> P <sub>2</sub>	429.8	700	600	85.53	76.43	1.521	600
10	P <sub>2</sub> P <sub>9</sub>	98.24	268.6	268.6	76.43	95.31	1.735	268.6
11	P <sub>9</sub> P <sub>10</sub>	33.77	170.6	153.4	95.31	83.19	1.828	153.4
12	P <sub>2</sub> P <sub>13</sub>	119.73	341.2	302.8	76.43	91.30	1.663	302.8
13	P <sub>13</sub> P <sub>14</sub>	49.12	213.2	238.8	66.31	75.91	1.097	238.8
14	P <sub>2</sub> A <sub>7</sub>	46.05	136.4	238.8	76.43	75.914	1.029	238.8
15	P <sub>2</sub> P <sub>11</sub>	165.8	341.2	341.2	76.43	65.93	1.814	341.2
16	P <sub>11</sub> P <sub>12</sub>	132.00	268.6	302.8	65.93	50.00	1.834	383.8



**Fig. 17- Variation of diameter of  $P_{11}P_{12}$  pipe vs. number of iterations**  
 شکل ۱۷- تغییرات قطر لوله  $P_{11}P_{12}$  در مقابل تعداد تکرار



**Fig. 18- Variation of system cost vs. number of iterations**  
 شکل ۱۸- تغییرات هزینه سیستم در مقابل تعداد تکرار

پس از تعیین قطر بهینه لوله‌ها محاسبات ضربه قوچ بر روی سیستم بهینه انجام شد. در اینجا یکی از شدیدترین شرایط ایجاد ضربه قوچ در نظر گرفته شد. فرض شد تمام شیرهای انتهایی خطوط لوله اصلی در مدت کمتر از یک ثانیه بسته شود ولی جریان به سمت لترال‌ها همچنان وجود داشته باشد. به عبارتی آبیاری‌های در حال کار باشند. فرض دیگر اینکه در طول مدت زمان محاسبات ضربه قوچ در سیستم هد پمپاژ همانند پمپ‌های دور متغیر ثابت و برابر هد پمپاژ در لحظه شروع محاسبات باشد ولی دبی ورودی به سیستم تحت ضربه قوچ قرار بگیرد. نتیجه محاسبات نشان داد برای کنترل مازاد فشار ناشی از این ضربه قوچ همانگونه که در ستون آخر جدول ۵ ارائه شده است لازم است ۳ قطر از ۱۶ قطر قبلی بهینه شده تغییر یابد و بزرگتر شوند. لازم به ذکر است در این حالت یعنی بهینه‌سازی بر اساس جریانات میرا و لحاظ نمودن فشار مازاد هد فشار در ابتدای سیستم برابر ۱۳۳/۹۸ متر بدست آمد. در شکل‌های ۱۹ الی ۲۴ بصورت نمونه نوسانات فشار، سرعت و دبی جریان خروجی از گره لترال‌ها در برخی موقعیت‌ها برای هر دو حالت بهینه‌سازی مورد نظر این تحقیق نشان داده شده است. همانگونه که مشاهده می‌شود در سیستم بهینه‌شده با در نظر گرفتن معیارهای ضربه قوچ، مقادیر فشار در شرایط غیرمماندار ناشی از ضربه قوچ به‌طور کلی کمتر از فشار ترکیدگی لوله می‌شود.

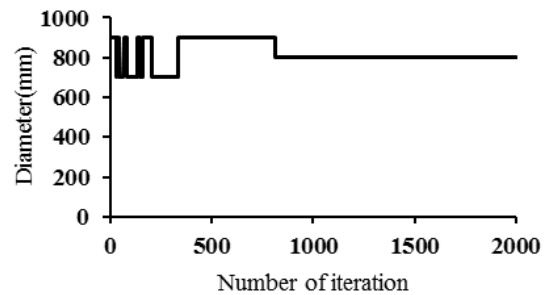
همانگونه که در جدول ۵ ارائه شده، با مقایسه‌ی طراحی شبکه به صورت تجربی و طراحی بهینه با استفاده از الگوریتم ژنتیک مشاهده می‌شود که اختلاف قابل توجهی بین قطرهای به‌دست آمده وجود دارد و روش ارائه شده توانسته است هزینه‌ها را با در نظر گرفتن دو محدودیت سرعت و فشار ۱۱/۵ درصد کاهش دهد.

**Table 6- Applied parameters in Genetic Algorithm model**

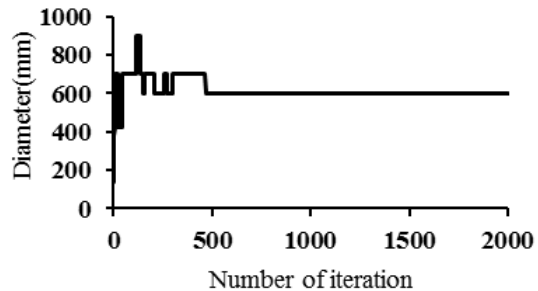
جدول ۶- پارامترهای مورد استفاده در الگوریتم ژنتیک

Parameter	Value
Number of decision variable	16
Number of chromosomes	160
Number of iteration	2000
Mutation probability	0.05
Penalty coefficient for velocity constraints	$10^9 \times 6.5$
Penalty coefficient for pressure constraints	$10^9 \times 6.5$

برای نمونه نمودارهای تغییر قطر برخی لوله‌ها و تغییر هزینه سیستم در مقابل تعداد تکرار در اشکال زیر ترسیم شده است. همانگونه که مشاهده می‌شود بعد از حدود ۱۶۰۰ تکرار هزینه سیستم ثابت شده است و جواب‌های بهینه به‌دست آمده‌اند.



**Fig. 15- Variation of diameter of  $PP_1$  pipe versus number of iterations**  
 شکل ۱۵- تغییرات قطر لوله  $PP_1$  در مقابل تعداد تکرار



**Fig. 16- Variation of diameter of  $P_1P_2$  pipe versus number of iterations**  
 شکل ۱۶- تغییرات قطر لوله  $P_1P_2$  در مقابل تعداد تکرار

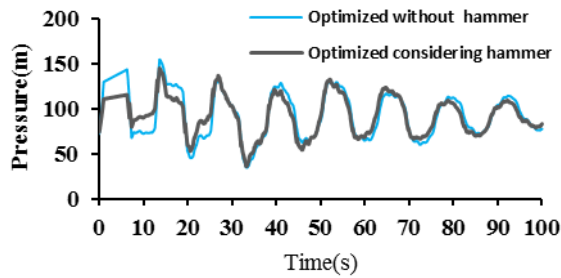


Fig. 20- Pressure variation at node  $P_8$  vs. time  
 شکل ۲۰- تغییرات فشار در گره  $P_8$  در برابر زمان

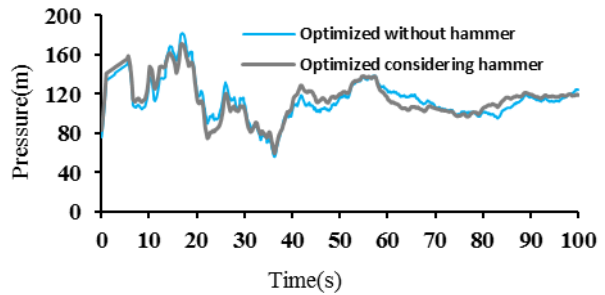


Fig. 19- Pressure variation at node  $P_{10}$  vs. time  
 شکل ۱۹- تغییرات فشار در گره  $P_{10}$  در برابر زمان

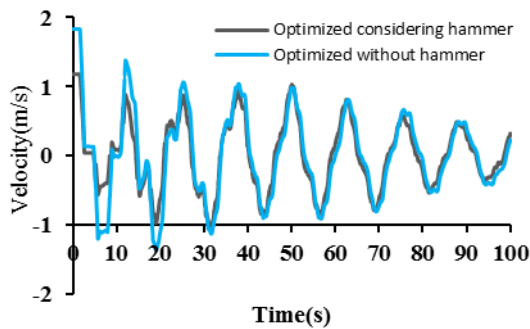


Fig. 22- Velocity variation in pipe  $P_1P_8$  vs. time  
 شکل ۲۲- تغییرات سرعت در وسط لوله  $P_1P_8$  در برابر زمان

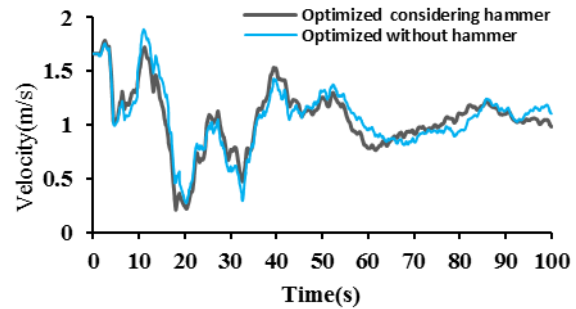


Fig. 21- Velocity variation in pipe  $P_2P_{13}$  vs. time  
 شکل ۲۱- تغییرات سرعت در وسط لوله  $P_2P_{13}$  در برابر زمان

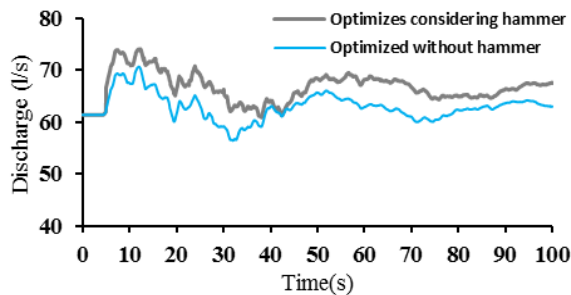


Fig. 24- Outflow variation at node  $P_4$  vs. time  
 شکل ۲۴- تغییرات دبی خروجی از گره  $P_4$  در برابر زمان

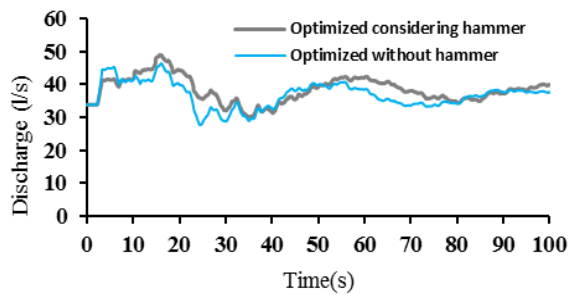


Fig. 23- Outflow variation at node  $P_{11}$  vs. time  
 شکل ۲۳- تغییرات دبی خروجی از گره  $P_{11}$  در برابر زمان

**Table 7- Comparison of total costs in genetic algorithm and experimental methods**  
 جدول ۷- مقایسه‌ی هزینه‌ی اجرای خطوط لوله‌ها بین روش‌های الگوریتم ژنتیک و روش تجربی

Design method	Cost (\$)
Experimental method (existing condition)	825935.28
Genetic algorithm without considering water hammer	730958.37
Genetic algorithm with considering water hammer	775511.28

همانگونه که در جدول ۷ ارایه شده است در مقایسه با شرایط موجود طراحی بهینه بر مبنای الگوریتم ژنتیک هزینه اجرای خطوط لوله شبکه آبیاری تحت فشار اسماعیل آباد را از ۸۲۵۹۳۵/۲۸ به ۷۳۰۹۵۸/۳۷ دلار کاهش می‌دهد که معادل ۱۱/۵ درصد هزینه اجرای خطوط لوله شبکه می‌باشد. با در نظر گرفتن اثر ضربه قوچ، در این حالت هزینه اجرای خطوط لوله از ۷۳۰۹۵۸/۳۷ دلار به ۷۷۵۵۱۱/۲۸ دلار افزایش می‌یابد. با این وجود چون هد پمپاژ از ۱۳۹/۰۸ به ۱۳۳/۹۸ متر کاهش می‌یابد مقداری از این افزایش هزینه با کاهش هزینه ایستگاه پمپاژ جبران می‌شود.

- Daneshfaraz R, Moradi N (2012) Assessment of water hammer in pumping stations and water transmission line using the software AFT-Impulse. National Conference on Water and Wastewater Engineering Sciences, Kerman, Graduate University of Advanced Technology
- Farmani R, Abadia R (2007) Optimum design and management of pressurized branched irrigation network. Journal of Irrigation and Drainage Engineering 133(6):528-537
- Gholami M, Rhnama M, Ebrahimi H (2007) Optimizing of water distribution irrigation and drainage network using genetic algorithm (case study irrigation and drainage network in Fars Doroodzan). The First Regional Conference on Water, Islamic Azad University (In Persian)
- Haupt RL, Haupt SE (1998) Practical Genetic Algorithm. John Wiley and Sons
- Iran Water Resources Management CO. (2004) Design criteria for pressurized irrigation systems. Publication No. 286 (In Persian)
- Jhanshahi P, Rhnama M, Amini A, Ebrahimi H (2007) Optimize the operation of the irrigation network using genetic algorithms (Case study: Jiroft dam downstream irrigation network). Ninth Seminar of Irrigation and Reduce Evaporation, Kerman, Bahonar University, the Association of Irrigation and Water Engineering (In Persian)
- Kohestany M, Jafarzadeh M (2011) Assessment of water hammer in Bakharz irrigation network using WHAMO software. 6th National Congress of Civil Engineering, Semnan, Semnan University
- Kyafar H, Sani khani H, Sdrdini A, Nazmi A (2011) Optimization of water allocation by using genetic algorithm (Case Study: irrigation and drainage network Sofi Chay in East Azerbaijan province). 4<sup>th</sup> Conference of Water Resources Management, Amirkabir University of technology, Tehran (In Persian)
- Marcuzzo FFN, Wendland EC (2014) The optimization of irrigation networks using genetic algorithms. Journal of Water Resource and Protection 6:1124-1138, <http://dx.doi.org/10.4236/jwarp.2014.612105>
- Monem MJ, Najaf MR, Khoshnavaz S (2007) Optimal water scheduling in irrigation networks using genetic algorithm. Iran-Water Resources Research 3(1):1-11
- Mosavian A, Sharifi M, Rajabi H (2009) Application of metaheuristic in the water distribution network optimization. Eighth International Congress of Civil

در این تحقیق یک کد کامپیوتری توسعه داده شد که بر مبنای یکی از قدرت مندترین روش‌های بهینه‌سازی یعنی الگوریتم ژنتیک قادر به حل انواع مختلف مسایل بهینه‌سازی خطی و غیرخطی مقید می‌باشد. همچنین کد کامپیوتری دیگری برای شبیه‌سازی نوسانات فشار ناشی از ضربه قوچ در سیستم‌های آبیاری بارانی و یا آبرسانی با آرایش درختی توسعه داده شد. هر دو کد در قالب یک برنامه کامپیوتری در محیط برنامه‌نویسی ویژوال بیسیک نوشته شده و به همدیگر لینک شده‌اند. نتایج این تحقیق نشان داد:

- در طی مراحل صحت‌سنجی و ارزیابی، مدل الگوریتم ژنتیک به‌درستی قادر به پیدا کردن جواب مسایل بهینه‌سازی خطی و غیرخطی مقید که دارای راه‌حل‌های تحلیلی هستند می‌باشد.

- صحت‌سنجی و ارزیابی مدل آنالیز ضربه قوچ تهیه شده در این تحقیق با استفاده از یک سیستم ساده متشکل از یک مخزن و لوله متصل به آن و یک سیستم متشکل از یک مخزن و تعداد ۱۶ خط لوله متصل به هم با آرایش درختی مورد بررسی قرار گرفت. در انتهای آزاد خطوط لوله شیر قطع و وصل قرار دارد. در هر دو مورد نتایج مدل رضایت‌بخش می‌باشد.

- از لحاظ کاربردی و در مقیاس بزرگ از شبکه‌ی آبیاری و زهکشی اسماعیل‌آباد واقع در استان لرستان به عنوان یک نمونه‌ی واقعی استفاده شد. برای طراحی بهینه‌ی شبکه‌ی مذکور دو سناریو در نظر گرفته شد. در سناریو اول شبکه بدون در نظر گرفتن پدیده‌ی ضربه قوچ بهینه‌یابی گردید، با مقایسه‌ی طرح بهینه با وضع موجود مشاهده شد که اختلاف قابل‌توجهی بین قطرهای به‌دست آمده وجود دارد و روش ارائه شده توانسته است هزینه اجرای خطوط لوله را با در نظر گرفتن دو محدودیت سرعت و فشار ۱۱/۵ درصد کاهش دهد. در سناریو دوم با در نظر گرفتن جریانات میرا ناشی از پدیده‌ی ضربه قوچ شبکه مجدداً بهینه‌یابی گردید. در این حالت هزینه اجرای خطوط لوله در مقایسه با وضع موجود حدود ۶/۱ درصد افزایش می‌یابد. به عبارتی می‌توان تنها با تغییر قطر لوله‌ها و بدون در نظر گرفتن سایر تأسیسات، با صرف اضافه هزینه ۶/۱ درصد ضربه قوچ در سیستم را کنترل نمود. در سناریو اول هد پمپاژ ابتدای سیستم ۱۳۹/۰۸ متر و در سناریو دوم ۱۳۳/۹۸ متر به‌دست آمد.

## ۵- مراجع

- Alborzi M (2009) Genetic Algorithm. Sanati Sharif University, Institute of Scientific Publications, 175p (In Persian)
- Dandy GC, Hassanli AM (1996) Optimum design and operation of multiple subunit drip irrigation systems.

- Solymani A (1387) Sensitivity analysis of maximum water hammer pressure in Koohrang to Cheshme Morvarid water transmission line using the Hammer software. 7th National Hydraulic Conference, Tehran, Iran, University of Water and Power
- Wang KH, Dal M (2017) Optimization and modelling of pressurized irrigation networks. Turkish Journal of Water Science & Management 1(2):62-80
- Zahraii B (2009) Genetic algorithm and engineering optimization. Tehran Gutenberg Press (In Persian)
- Engineering, Shiraz University, Shiraz, Iran (In Persian)
- Ragabpor R (2013) Optimization of energy cost for water in the system using a genetic algorithm. Journal of Selected Topics in Energy, Yasouj University (In Persian)
- Shahinejad B (2011) Optimal design of irrigation networks using mixed integer linear programming. Ph.D. Thesis, Chamran University, Ahvaz (In Persian)