تحقیقات مهندسی سازه‌های آبیاری و زهکشی/جلد ۲۱/ شماره ۸۱/ زمستان ۱۳۹۹/ص ۲۴-۱

توسعه مدل طراحی بهینه خط انتقال آب بر اساس روش الگوریتم ژنتیک (مطالعه موردی: خط انتقال سد خارج از بستر بیستون)

رسول قبادیان[1*]، سارا حشمتی[2] و سید احسان فاطمی[3]

۱، ۲ و ۳ – به ترتیب: دانشیار، کارشناس ارشد؛ و استادیار گره مهندسی آب دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران

تاریخ دریافت: ۹۹/۸/۱۰ ؛ تاریخ پذیرش: ۹۹/۹/۱۸

نوع مقاله: علمی-پژوهشی

چکیده

به‌منظور طراحی بهینه ایستگاه پمپاژ و خط انتقال آن، یک مدل‌کامپیوتری توسعه داده‌شد. در این مدل مجموع هزینه‌های جاری و ثابت طرح بر مبنای بهینه‌سازی به‌روش الگوریتم ژنتیک دودویی با رعایت محدودیت‌های سرعت و فشار کمینه می‌شود. مشخصات هیدرولیکی و اقتصادی لوله‌ها و پمپ‌های موجود در بازار ایران به عنوان یک بانک اطلاعاتی و فایل داده برای مدل تعریف شده است. بعد از طراحی بهینه سیستم با هدف کنترل ایمنی سیستم از نقطه نظر ضربه قوچ محاسبات مربوط به شبیه سازی جریان غیر ماندگار در محیط‌کاری مدل نیز انجام می‌شود. پس از صحت سنجی مدل، طراحی خط انتقال و ایستگاه پمپاژ سد خارج از بستر بیستون کرمانشاه مورد بررسی قرارگرفت. نیمرخ طولی مسیر، دبی انتقالی، محدوده‌های مجاز فشار و سرعت، پارامترهای الگوریتم ژنتیک و همچنین پارامترهای اقتصادی برای مدل تعریف شد. پس از اجرای مکرر مدل نهایتا نتایج بهینه بدست آمد. خروجی مدل نشان داد برای انتقال آب با دبی ۳۵۰۰ لیتر بر ثانیه در طول ٦ ماه از سال (آذر تا اردیبهشت) از رودخانه گاماسیاب به سد خارج از بستر بیستون استفاده از لوله فولادی به قطر ۱٦۰۰ *میلی‌متر* و پمپ گریز از مرکز مدل ۲۰۰-۵۰-۵۰۰ کمترین هزینه را در طی ۲۰ سال عمر مفید پروژه تحمیل می نماید. همچنین نتایج شبیه سازی ضربه قوچ سیستم بهینه نشان داد مخزن هوا با شعاع ۳ متر و ارتفاع حدود ۵/۵ متر خط لوله را از نقطه نظر ضربه قوچ ناشی از قطع ناگهانی ایستگاه پمپاژ ایمن نگه می دارد. علاوه بر این لازم است این مخزن در شرایط اولیه تا نیمه پر از آب بوده و فشار هوای بالای آن حدود ۸٦ متر باشد.

واژه‌های کلیدی

ایستگاه پمپاژ، بهینه سازی، جستجوی ژنتیکی، سد خارج از بستر بیستون، ضربه قوچ

مقدمه

ساخت سد در ساختگاه‌های خارج از بستر اصلی رودخانه به دلایل فنی و اقتصادی مورد توجه طراحان قرار گرفته است. از جمله این دلایل می توان حذف هزینه‌های سیستم انحراف آب در دوره ساخت سد، کاهش هزینه ریسک ناشی از خطر سیلاب، کاهش هزینه‌های خسارت مخزن، مسائل اجتماعی و زیست محیطی به همراه نسبت سود به هزینه بالای اینگونه سدها اشاره نمود (Akbarimoghadam *et al*, 2011; Daneshfaraz *et al*., 2014). با این وجود هزینه‌های ایستگاه پمپاژ و خط انتقال از رودخانه تا محل ساختگاه سد خارج از بستر موضوعی است که در

* نگارنده مسئول: Email: rsghobadian@gmail.com

http://doi: 10.22092/idser.2020.352207.1441

سدهای احداث شده در مسیر رودخانه دیده نمی‌شود. از اینرو تلاش‌ها و تحقیقات متعددی به منظور کاهش هرچه بیشتر هزینه‌های ایستگاه پمپاژ و خط انتقال از رودخانه تا ساختگاه سد و یا در حالت کلی محل تحویل آب انجام شده است. اساس بیشتر این تحقیقات بر مبنای بهینه‌سازی و کاهش هزینه‌های ثابت و جاری استوار است. ماکل و همکاران (Mackle *et al.*, 1995) با استفاده از بهینه سازی به روش الگوریتم ژنتیک[1]، اقدام به بهینه‌سازی ایستگاه‌های پمپاژ به‌منظور کاهش هزینه برق مصرفی نمودند. نامداری و بیدختی (Namdari & Bidokhti, 2009) با اشاره به اینکه استفاده از مدل‌های کامپیوتری نظیر Water Gems برای شبیه‌سازی هیدرولیکی جریان در شبکه‌های انتقال آب گسترش قابل توجهی یافته و نقش موثری در تصمیم گیری‌ها و مدیریت پروژه‌ها ایفا می‌کند استفاده دقیق از این مدل‌ها در طراحی و تحلیل شبکه توزیع و انتقال آب را پیشنهاد کردند. کوئل‌هو و همکاران (Coelho *et al.*, 2012) در تحقیقی مبنی بر بهینه‌سازی ایستگاه پمپاژ، با مقایسه مدل هیدرولیکی EPANET و الگوریتم ژنتیک به این نتیجه رسیدند که ۳۴ درصد از انرژی سیستم طبق مدل الگوریتم ژنتیک قابل صرفه‌جویی است. ژو و همکاران (Zhu *et al.*, 2013) در تحقیق خود برای بهینه‌سازی انتقال آب برمبنای منحنی فرمان مخزن از الگوریتم ژنتیک استفاده کردند. نتایج آنها نشان داد مدل ارایه‌شده بر مبنای روش بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک در بهره‌برداری و انتقال آب بسیار کارآمد است. بارلوو و تانیمبو (Barlow & Tanyimboh, 2014) نیز در بهینه‌سازی شبکه آبرسانی، برتری الگوریتم ژنتیک جهش یافته را در هر مورد نسبت به الگوریتم ژنتیک معمولی نشان دادند. هاشمی و همکاران (Hashemi *et al.*, 2014) به منظور بهینه‌سازی برنامه ایستگاه‌های پمپاژ شبکه‌های توزیع آب شهری با پمپ‌های دور متغیراز الگوریتم ژنتیک استفاده کردند. منکا و همکاران (Menke *et al.*, 2015) با بهره‌گیری از معادلات ریاضی و روش‌های غیرخطی نسبت به بهینه‌سازی خط انتقال آب ایستگاه پمپاژ یک شبکه آبرسانی اقدام کردند. نتایج کار آن‌ها نشان داد روش‌های غیرخطی نسبت به روشهای خطی بهینه‌سازی، از نظر مقدار بسیار بهتر و از لحاظ دقت اندکی پایین‌تر هستند. روحانی و افشار (Rohani & Afshar, 2015) قطر و ضخامت سیستم انتقال ثقلی در مقابل ضربه قوچ ناشی از بسته شدن شیر را با دو روش الگوریتم ژنتیک و ریاضی به گونه‌ای بهینه سازی کرده‌اند که پدیده ضربه قوچ روی ندهد. این امر باعث کاهش قابل توجه در هزینه‌ها مربوطه شد. علاوه بر این مقایسه دو روش بهینه سازی نشان داد که جواب‌های بدست آمده از هر دو روش مطابقت خوبی با همدیگر دارند که خود نشان از صحت فرآیند بهینه‌سازی دارد. معین‌الدینی و همکاران (Moinaldini *et al.*, 2018) به‌منظور کاهش هزینه‌های احداث شبکه لوله‌های آب جایگزن در یکی از شهرک‌های شهر کرمان از الگوریتم رقابت استعماری وسپس شبیه‌سازی شبکه با استفاده از نرم‌افزار Water Gems استفاده کردند. نتایج مدل بهینه‌سازی نشان داد که الگوریتم رقابت استعماری به میزان قابل توجهی توانسته است تابع هزینه را نسبت به حالت قبل از بهینه‌سازی شبکه کاهش دهد. ترابی و همکاران (Torabi *et al.*, 2018) به بهینه‌سازی شبکه‌ی آبیاری اسماعیل آباد لرستان با هدف دسترسی به کمترین هزینه همراه با انتخاب مناسب‌ترین قطر لوله و ارتفاع پمپاژ با استفاده از

1- Genetic Algorithm

الگوریتم‌های فراکاوشی پرداختند. نتایج کار آن‌ها نشان داد با استفاده از الگوریتم‌های فراکاوشی ۱۰/۶۸ درصد هزینه کل کاهش می‌یابد. منصوری و محمدی‌زاده (Mansouri & Mohamadizadeh, 2019) از الگوریتم نیروی مرکزی در نرم افزار متلب برای بهینه‌سازی شبکه آبرسانی و ارزیابی شرایط هیدرولیکی شبکه اسماعیل آباد واقع در شهرستان نورآباد استفاده کردند. نتایج پژوهش آن‌ها نشان داد هزینه بهینه شده ۱/۵۵ درصد بیشتر از بهینه مطلق برآورده شده است. ال-ترکی (El-Turki, 2013) با شبیه سازی ضربه قوچ توسط نرم افزار بنتلی همر نشان داد علت تخریب بخش از خط انتقال آب مورد مطالعه ایشان در کشور لیبی بدین دلیل است که در هنگام وقوع ضربه قوچ فشار در سیستم ۲۰ درصد نسبت به فشار کاری افزایش یافته است. تریکی (Triki, 2015) با جایگزین کردن قطعه کوچکی از لوله فلزی خط انتقال با لوله پلیمری با چگالی بالا و چگالی پایین به بررسی کنترل ضربه قوچ با این روش پرداخت. نتایج این محقق نشان داد قطعه پولیمری با دانسیته پایین برای کاهش فشار ناشی از ضربه قوچ موثرتر است. خوش فطرت و همکاران (Khoshfetrat *et al.*, 2018) نوسانات فشار بر روی خطوط انتقال آب شهرهای بوکان و پیرانشهر در هنگام وقوع جریان غیرماندگار را اندازه‌گیری کردند. همچنین شبیه سازی های انجام شده توسط این محققین با نرم افزار بنتلی همر نشان‌داد استفاده از رابطه افت غیر ماندگار ویتکوفسکی دقت نتایج شبیه سازی را درمقایسه با سایر روش ها افزایش می‌دهد.

بررسی منابع نشان می‌دهد عموما طراحی بهینه سیستم انتقال و توزیع آب با استفاده از روش های بهینه‌سازی ارایه شده در محیط نرم‌افزارهای تجاری همانند متلب انجام می‌شود که با یک مدل تحلیلگر هیدرولیکی نظیر EPANET یا Water Gems لینک شده است. برای شبیه سازی ضربه قوچ سیستم نیز اطلاعات سیستم بهینه به محیط نرم افزار شبیه ساز ضربه قوچ همچون بتلی همر انتقال داده می‌شود. این موضوع، وقتگیر و ممکن است همرا با خطای انسانی باشد ضمن اینکه لینک نرم افزارهای مذکور با یکدیگر پیچیدگی خاص خود را دارد. از اینرو در تحقیق حاضر یک کد کامپیوتری در محیط ویژوال بیسیک توسعه داده شده است که در آن به عنوان یک نوع آوری جدید هر سه مرحله طراحی بهینه، تحلیل و شبیه سازی ضربه قوچ سیستم انتقال و توزیع آب با هر نوع آرایش درختی، حلقه‌ای و مختلط انجام می‌شود. علاوه بر این محاسبات ضربه قوچ برای سیستم با هر نوع جنس لوله اعم از الاستیک و ویسکو- الاستیک انجام می‌گیرد. در تحقیق حاضر کارایی مدل مذکور در طراحی بهینه خط انتقال و ایستگاه پمپاژ سد خارج از بستر بیستون در استان کرمانشاه مورد توجه قرار گرفته است. شبیه سازی ضربه قوچ سیستم بهینه و کنترل آن توسط مخزن هوا در ادامه بررسی شد.

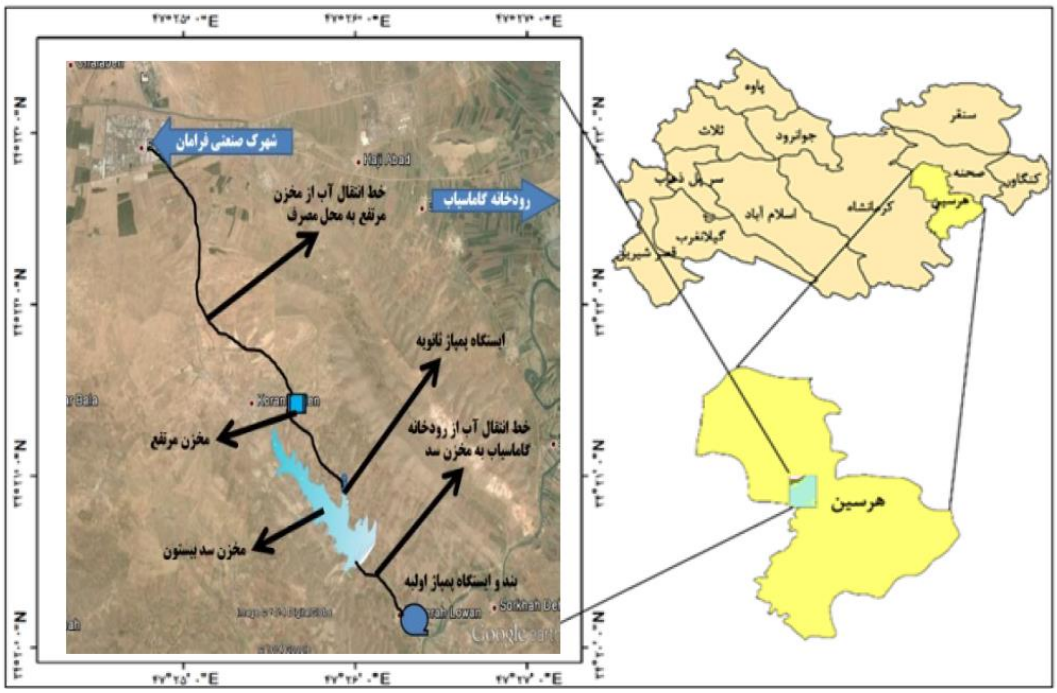
مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

طرح سد مخزنی بیستون (مخزن خارج از بستر) و سامانه‌های انتقال مرتبط با آن در غرب کشور، در استان کرمانشاه و در محدوده مختصات جغرافیایی ″۳۵-′۱۶-°۴۷ تا ″۵۷-′۳۰-°۴۷ طول شرقی و ″۵۸-′۱۳-°۳۴ تا ″۰۲-′۲۵-°۳۴ عرض شمالی در جنوب شرقی شهرستان کرمانشاه واقع شده است (شکل ۱).

سد مخزنی بیستون در فاصله ۳ کیلومتری شهرک صنعتی فرامان در مسیر جاده

بیستون- کرمانشاه و در حوالی روستای کورانیقرار دارد. در صورت احداث سد قسمتی از این روستا در داخل دریاچه قرار گرفته و باید در ساحل چپ آن تجدید ساختمان گردد. مشخصات کلی سد مذکور در جدول (۱) ارایه شده است.



شکل ۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه

Figure 1- Location of the study area

جدول ۱- مشخصات طرح سد مخزنی بیستون (مهندسین مشاور آبدان‌فراز، ۱۳۹۳)

Table 1- Biston Reservoir Dam Project Specification (Abdan Faraz Consulting Engineers, 2015)

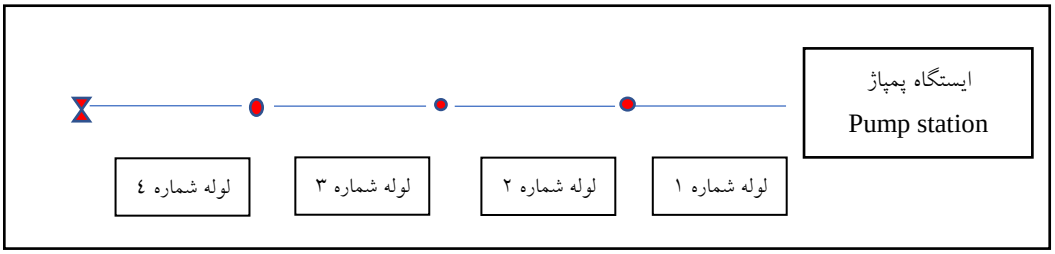
سطح حوزه آبریز رودخانه در ساختگاه بیستون	۳۶/۹ کیلومتر مربع
نوع سد	سنگریزه‌ای با هسته رسی
رقوم کف رودخانه در محل سد	۱۳۰۷ متر ارتفاع از سطح دریا
ارتفاع سد از بستر رودخانه	۴۰ متر
ارتفاع سد از پی	۴۵ متر
عرض تاج سد	۸ متر
طول تاج سد	۷۵۰ متر
رقوم تاج سد	۱۳۴۷ متر ارتفاع از سطح دریا
رقوم نرمال بهره‌برداری از سد	۱۳۴۴ متر ارتفاع از سطح دریا
حداقل تراز بهره‌برداری از سد	۱۳۱۷ متر ارتفاع از سطح دریا
حجم مخزن در رقوم نرمال بهره‌برداری	۲۱/۵۸ میلیون مترمکعب
حجم مخزن در رقوم حداقل تراز بهره‌برداری	۰/۳۸ میلیون مترمکعب
حجم رسوبات ۵۰ ساله	۲/۵میلیون مترمکعب

مشخصات خط انتقال از محل آبگیری تا دریاچه سد درجدول (۲) ارایه شده است. همانگونه که در شکل (۲) نیز نشان داده شده است در این تحقیق طول خط انتقال که حدود ۴ کیلومتر می باشد به چهار قطعه ۱۰۰۰ متری (جهت سهولت کارگزاری و حمل تجهیزات) تقسیم شده است و هدف پیدا کردن قطر بهینه هر قطعه خط لوله (با کمترین هزینه) و پمپ مناسب پمپاژ می‌باشد.

جدول ۲- مشخصات هندسی مسیر خط انتقال سد بیستون

Table 2- Geometry characteristic of conveyance pipeline of Biston dam

لوله (Pipe)	طول لوله (Pipe length) (m)	رقوم ابتدا (Strat elevation) (m)	رقوم انتها (End elevation) (m)
۱	1000	1266.39	1269.46
۲	1000	1269.46	1277.89
۳	1000	1277.89	1299.82
۴	990	1299.82	1337.39



شکل ۲- آرایش ایستگاه پمپاژ و خط انتقال سد خارج از بستر بیستون

Figure 2- Pumping station and conveyance pipeline layout of Biston dam

الگوریتم ژنتیک

روش‌های بهینه‌سازی هوشمند بر خلاف روش‌های مبتنی برگرادیان بدون نیاز به مشتق تابع هزینه به دنبال نقطه بهینه آن می‌گردد. علاوه بر این احتمال به دام افتادن آنها در کمینه محلی کمتر از روش های مبتنی بر گرادیان است. هر ساله روش‌های بهینه‌سازی فراابتکاری جدیدی معرفی می‌شوند و سعی در پوشاندن نقاط ضعف الگوریتم های قبل خود را دارد هرچند که خود ممکن است دارای نقاط ضعف جدیدی باشد. از اینرو این ادعا که یک روش بهینه سازی بهترین روش حل برای مسائل بهینه سازی است چندان صحیح نیست. به گونه‌ای که بعضی از صاحبنظران عرصه الگوریتم های فراابتکاری معتقدند که هیچ دلیلی وجود ندارد که یک روش بهینه سازی تکاملی بهتر از دیگر روش‌ها باشد (Yghini & Akhavan Kazemi, 2011). الگوریتم ژنتیک از جمله روش بهینه‌سازی فراابتکاری و هوشمند است. این روش چنان جای خود را در مسائل بهینه سازی باز کرده است که به عنوان معیاری برای مقایسه عملکرد روش های جدید نیز به بکار می رود. برای حل مساله بهینه‌سازی در الگوریتم ژنتیک از انتخاب کاملا تصادفی جواب‌ها از بین فضای شدنی استفاده می‌شود که اصطلاحاً یک نسل نامیده می‌شود، سپس از بین این جمعیت انتخاب شده جواب‌های بهتر انتخاب شده و با استفاده از فرایند " جهش" جواب-های بهتر با هم تلفیق شده و نسل بهتر از جواب‌ها تشکیل می‌شود و تا رسیدن به بهترین جواب‌های

ممکن این روند ادامه پیدا می‌کند (Jung & Karney, 2014) الگوریتم ژنتیک ژنتیک به کار رفته در این مطالعه براساس یک سیستم دودویی شامل (۱ و ۰) می باشد به نحوی که پارامترهای مدل به مبنای ۰ و ۱ انتقال یافته و به عبارت دیگر رمزدار می‌شوند. چنانچه محدوده تغییرات هر پارامتر $a_i \le x_i \le b_i$ باشد و میزان دقت اعداد آن پارامتر برابر با Δn_i باشد از رابطه زیر می‌توان تعداد ژن‌ها n_i را محاسبه نمود (Ghobadian *et al.*, 2018):

$$2^{ni-1} \le (b_i - a_i) \times 10^{\Delta ni} \le 2^{ni} \qquad (۱)$$

در این تحقیق برای هر قطعه از خط لوله انتقال(در این مدل به ۴ قطعه محدود شده است) یک قطر بهینه محاسبه می شود. به عبارتی ۴ متغیر یا پارامتر باید تعیین شود. این قطر می‌تواند یکی از ۲۴ قطر موجود در بازار باشد که در جدول (۳) ارایه شده است. در این تحقیق برای قطر های زیر ۵۰۰ *میلی‌متر* از جنس پلی اتیلن، بین ۶۰۰ تا ۹۰۰ *میلی‌متر* از جنس GRP و قطرهای بزرگتر فولادی انتخاب می شود(هرچند که مدل می‌تواند هر قطر با هر جنسی را به عنوان بانک اطلاعات بپذیرد). با در نظر گرفتن میزان دقت اعداد برابر یکصدم تعداد ژن ها *(n_i)* ۱۱ در نظر گرفته شد. پس از تعیین طول رشته یا ژن های مربوط به هر پارامتر، لازم است طول کروموزم جامعه تعیین شود. تعداد لوله ها (m) در این شبکه که همان متغیر تصمیم است۴ می‌باشد، بنابراین طول کروموزم جامعه به صورت زیر تعیین می شود:

$$L = \sum_{i=1}^{m} n_i = 44 \qquad (۲)$$

جدول ۳- خصوصیات فیزیکی وهزینه ی لوله های قابل استفاده در طرح

Table 3- Physical characteristics and cost of pipes that can be used in the design

ردیف (Row)	قطرخارجی (mm) (External diameter)	قطر داخلی (mm) (Internal diameter)	نوع لوله (Type of pipe)	هزینه واحد طول لوله ها (Price per unit length of pipes) ($/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
19	1000	1000	STEAL	233/91
20	1200	1200	STEAL	296/21
21	1400	1400	STEAL	358/21
22	1600	1600	STEAL	420/81
23	1800	1800	STEAL	483/11
24	2000	2000	STEAL	545/41

تابع هدف

در تحقیق حاضر برای بهینه یابی قطر لوله‌ی هر قطعه از خط انتقال و همچنین نوع و تعداد پمپ بهینه ایستگاه پمپاژ کمینه نمودن مجموع هزینه های جاری و ثابت در طول عمر مفید پروژه ضمن رعایت محدودیتهای سرعت و فشار مورد توجه قرار گرفت. تابع هدف مذکور در رابطه (۳) معرفی شده‌است:

$$Min: \sum_{i=1}^{NP} CRF \times Li \times CPi + \sum_{i=1}^{NPU} CRF \times CPUj + Cen \times Hpj \qquad (۳)$$

ترم اول رابطه (۳) هزینه تمام شده لوله‌گذاری، ترم دوم هزینه ثابت و ترم سوم هرینه جاری(مانند هزینه‌های تعمیر و نگه‌داری با درنظر گرفتن نرخ تورم) ایستگاه پمپاژ است. در این رابطه Li طول لوله i ام، CPi هزینه واحد طول لوله که تابعی از قطر لوله D می‌باشد، Np تعداد لوله ها، NPU تعداد پمپ‌ها، $CPUj$ هزینه پمپ j ام که تابعی از توان کل موردنیاز پمپ می‌باشد، Cen هزینه انرژی سالیانه، Hpj هد کل پمپ jام و CRF ضریب بازگشت سرمایه است که تابعی از عمرمفید پروژه و نرخ بهره سالیانه i است.

$$CRF = \frac{i(1+i)^y}{-1+(1+i)^y} \qquad (۴)$$

در رابطه بالا y عمر مفید پروژه و i نرخ بهره‌ی سالیانه است.

$$Cen = \frac{EAE \times cfu \times Q_s \times Q_t}{102 \times \eta e} \qquad (۵)$$

$$EAE = \frac{(1+e)^y - (1+i)^y}{(1+e)-(1+i)} \left[\frac{i}{(1+i)^{y-1}} \right] \qquad (۶)$$

که در آن،

EAE = فاکتور هزینه انرژی سالیانه؛ Q_t= تعداد ساعات بهره‌برداری سالانه سیستم؛ Q_s = دبی پمپاژ؛ ηe = راندمان کلی پمپ؛ cfu = هزینه سوخت مربوط به یک کیلو وات ساعت.

تعریف قیود مسئله بهینه‌سازی با توجه به محدودیت‌های موجود

۱)محدودیت سرعت در لوله‌ها

اگر سرعت حرکت آب در لوله‌ها خیلی کم باشد سبب رسوب‌گذاری می‌شود، در مقابل زیاد شدن سرعت سبب ایجاد ضربه‌قوچ می‌گردد بنابراین انتخاب سرعت انتقالی باید به‌نحوی باشد که سیستم انتقال آب با این مشکلات مواجه نگردد، لذا سرعت در لوله‌های یک شبکه انتقال توزیع آب باید در محدوده‌ی سرعت حداکثر و حداقل طراحی گردد:

$$V_{min} \le V_i \le V_{max} \qquad (۷)$$

که در آن،

V_{min} و V_{max} = به‌ترتیب حداقل و حداکثر سرعت مجاز جریان در شبکه لوله‌ها؛ و i = شماره لوله‌ها.

دراین پروژه ۰/۷ و ۲/۷۵ متر بر ثانیه به‌ترتیب حداقل و حداکثر سرعت در نظرگرفته شده است. بنابراین لازم است محدودیت زیر برای تمام لوله‌ها در معادلات محدودیت بهینه‌سازی قرار گیرد:

$$g_1(i) = V_i - V_{max} \le 0 \qquad (۸)$$

$$g_2(i) = -V_i + V_{min} \le 0 \qquad (۹)$$

۲)محدودیت فشار در گره‌ها

فشار موجود در هر گره j یا در تمام طول لوله‌ها

باید در یک محدوده‌ی معینی قرار گیرد. این محدوده معین دارای یک کرانه پایین (حداق فشار، h_{min}) و یک کرانه بالا (حداکثر فشار، h_{max}) است. حداقل فشار برای محدوده مورد مطالعه برابر فشار نسبی اتمسفر(حدود صفر در انتهای خط لوله) و حداکثر فشار ۱۰۰ متر در شرایط کار کرد عادی در نظر گرفته شد. در شرایط شبیه سازی ضربه قوچ حداکثر فشار ۱۴۰ متر و حداقل فشار به فشار بخار محدود گردید. این محدودیت ها به شکل معادلات زیر در مدل تعریف شده اند:

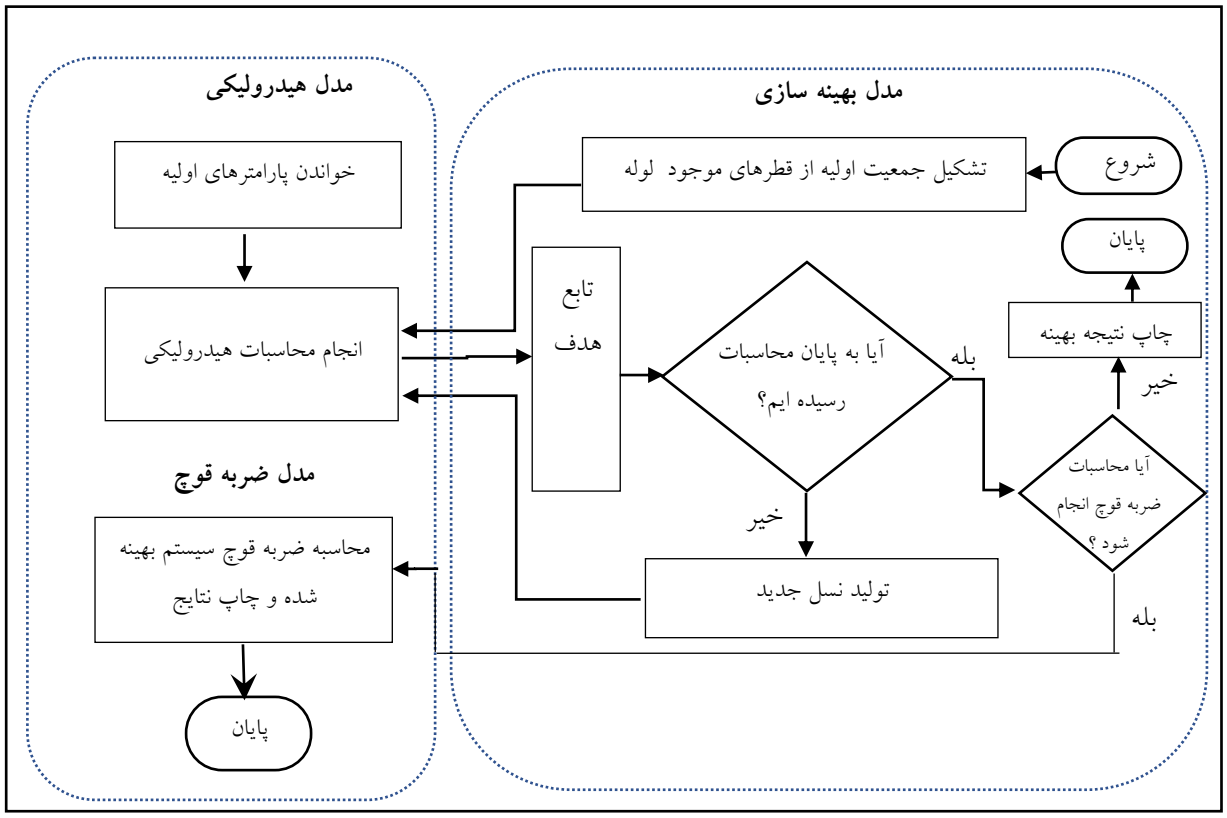
$$g_3(j) = h_j - h_{max} \le 0 \qquad (۱۰)$$

$$g_4(j) = -h_j + h_{min} \le 0 \qquad (۱۱)$$

ساختار مدل

روندنمای انجام محاسبات در این تحقیق در شکل (۳) نشان داده شده است. همانگونه که در شکل مشخص است پس از خواندن اطلاعات مربوط به جانمایی و رقوم مسیر خطوط لوله در سیستم انتقال در ابتدا جمعیتی اولیه از جواب های شدنی شامل قطر های موجود در بازار برای هر یک از چهار قطعه طول لوله بصورت تصادفی انتخاب می شود. سپس با انجام محاسبات هیدرولیکی مقادیر فشار و سرعت جریان در طول لوله ها محاسبه می شود. بر اساس فشار ابتدای سیستم و دبی پمپاژ نوع پمپ مناسب با بیشترین راندمان برای تامین فشار انتخاب می‌شود. هزینه کل سیستم شامل هزینه های ثابت و جاری در طی عمر مفید (۲۰سال) برای هریک از جواب های شدنی محاسبه می‌گردد. با اعمال ضرایب جریمه برای تخطی از قیود فشار و سرعت، خروجی تابع هدف و نهایتا میزان سازگاری نسبی هر یک از جواب های شدنی محاسبه می شود. براساس میزان سازگاری نسبی و روش چرخ گردان جمعیتی میانی به تعداد جمعیت اولیه از جواب های شدنی انتخاب می شود. با اعمال عملگرهای جهش، تقاطع، نخبه‌گرایی و در نهایت عملگر جایگزینی جمعیت جدید تولید می‌شود. محاسبات تا رسیدن به جواب بهینه و ارضا معیاری طراحی ادامه پیدا می‌کند (Ghobadian *et al*, 2018). در انتها چنانچه کاربر بخواهد محاسبات ضربه قوچ بر روی سیستم بهینه انجام می شود و نتایج شبیه سازی چاپ می شود.

لازم به ذکر است در تحقیق حاضر به منظور محاسبه افت جریان در مدل از روابط دارسی- ویسباخ و هیزن- ویلیامز استفاده شده است. در شرایط محاسبه جریان غیر ماندگار ناشی از ضربه قوچ و استفاده از رابطه افت دارسی - ویزباخ گزینه های انتخابی شامل افت ماندگار، شبه ماندگار و غیر ماندگار در نظر گرفته شده است. در شرایط افت ماندگار ضریب افت ثابت فرض می شود. در شرایط افت شبه ماندگار ضریب افت در هر گره و در هر گام زمانی با استفاده از روابط کلبروک- وایت (Colebrook & White, 1937)و یا هالند (Haaland, 1983) برای جریان آشفته و در جریان ورقه‌ای از رابطه هیگن پوازی قابل محاسبه است. در شرایط غیر ماندگار مقدار افت جریان غیر ماندگار بر اساس مدل مبتنی بر شتاب لحظه ای (Vitkovsky *et al.*, 2000) مشخص می‌شود.



شکل ۳ - روند نمای انجام محاسبات در مطالعه حاضر

Figure 2-Flowchart of the calculation in the present study

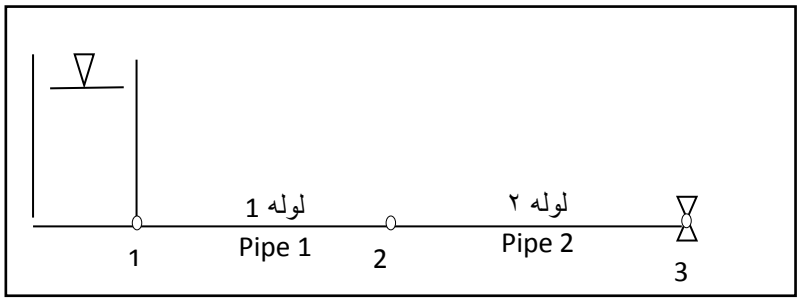
نتایج و بحث

صحت‌سنجی مدل

همانگونه که در شکل (۳) مشخص است در این مدل خط انتقال به چهار قطعه تقسیم می‌شود(هرچند به راحتی تعداد قطعات می‌تواند توسط کاربر کم یا زیاد شود) برای هر قطعه نهایتا قطر بهینه بدست آمده و همزمان در طول محاسبات نوع پمپ مناسب نیز انتخاب می‌شود. به‌منظور ارزیابی مدل طراحی خط انتقال سه مورد به شرح زیر در نظر گرفته شد: ۱- سیستم مخزن - لوله با شیر انتهایی، ۲- طراحی خط لوله بر روی شیب صفر و خروجی‌های جانبی و ۳- طراحی خط انتقال بین دو نقطه با توپوگرافی مسیر طبیعی.

سیستم مخزن- لوله با شیر انتهایی

همانگونه که در شکل (۴) نشان داده شده است به منظور ارزیابی مدل تهیه شده در این مورد یک شبکه متشکل از ۲ لوله و یک مخزن در نظر گرفته شد. در این مرحله نحوه‌ی بدست آمدن قطرهای بهینه برای لوله‌های (۱) و (۲) موردنظر می‌باشد. مشخصات لوله‌ها و اطلاعات مربوط به قطر لوله‌های موجود در بازار در جداول (۴) و (۵) آمده است.



شکل ٤- شبکه شاخه‌ای دو لوله

Figure 4-Two-pipe branch network

جدول ٤- مشخصات لوله ها

Table 4- Pipe characteristics

لوله (Pipe name)	طول لوله(m) (Pipe length(m))	دبی (lit/s) (Discharge(lit/s))	ضریب هیزن (Hazen coefficient)
لوله ۱ (Pipe1)	700	510	130
لوله ۲ (Pipe2)	700	230	130

جدول ٥- اطلاعات مربوط به قطر لوله های موجود در بازار

Table 5 - Industrial pipe market Size by diameter

قطر لوله (اینچ) (Pipe Diameter(in))	هزینه ی لوله به ازاءیک متر لوله(دلار) (Cost per unit length($))
20	58
24	64

در این طراحی ارتفاع مخزن ثابت و برابر ۴۰ مترمی باشد و مقادیر سرعت بین ۰/۳ تا ۳ متر بر ثانیه و فشار بین ۲۰ تا ۶۰ متر محدود شده است. پاسخ بهینه‌ی بدست آمده از مدل الگوریتم ژنتیک، باتوجه به پارامترهای ذکر شده در جدول (۶) در جدول (۷) نشان داده شده است.

در شکل (۴) تغییرات هزینه سیستم یا همان تابع هدف در مقابل تعداد تکرار نشان داده شده است.

همانگونه که مشاهده می‌شود هزینه سیستم بهینه ۸۵۴۰۰ دلار می‌باشد که با مقادیر ارایه شده در تحقیقات شاهی‌نژاد (Shahinejad, 2011) و قبادیان و همکاران (Ghobadian *et al.*, 2018) یکسان می‌باشد.

جدول ٦- پارامتر های الگوریتم ژنتیک مدل در بهینه سازی مورد اول

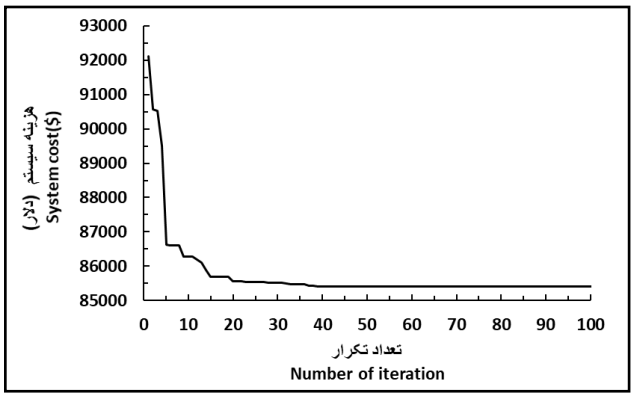
Table 6- Genetic algorithm model parameters in the first case optimization

پارامتر Parameter	تعداد متغیرها Number of decision variable	تعداد کروموزم Number of chromosomes	تعداد تکرار Number of iteration	حتمال جهش Mutation probability	احتمال تقاطع Crossover probability	ضریب جریمه Penalty coefficient
مقدار Value	2	75	50	0.05	1	1

جدول ۷- قطر های بهینه شده شبکه شاخه ای با استفاده از الگوریتم ژنتیک

Table 7- Optimized diameter of branch network using genetic algorithm

نام لوله Pipe Name	قطر (اینچ) (D_{opt}(in))	هد آب (متر) (H(m))	هزینه کل(دلار) (Total Cost($))
لوله ۱ ($Pipe_1$)	24	-	85400
لوله ۲ ($Pipe_2$)	20	-	
مخزن (Reservoir)	-	40	

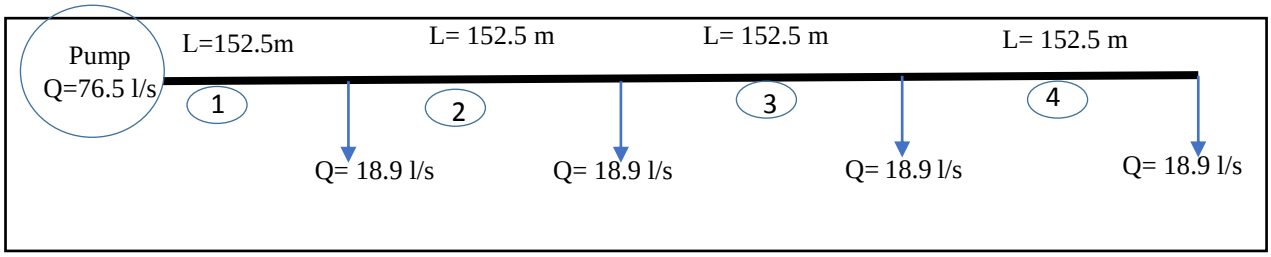


شکل ۵- هزینه سیستم در مقابل تعداد تکرار

System cost Vs. iteration number–Figure 5

طراحی خط لوله بر روی شیب صفر و خروجی های جانبی

در این مورد طراحی خط لوله نیمه اصلی آبیاری بارانی بر روی سطح بدون شیب با چهار خروجی جانبی که در توسط والیانتزاس (Valiantzas, 2003b) معرفی شده است و توسط سایر محققین شاهی‌نژاد (Shahinejad, 2011) و راویندرا و همکاران (Kale *et al.*, 2008) نیزاستفاده شده است مورد بررسی قرار گرفت. همانگونه که در شکل (۵) نشان داده شده است دبی ورودی به سیستم برابر ۷۶/۵ لیتر برثانیه و دبی خروجی از هریک از جانبی ها برابر ۱۸/۹ لیتر بر ثانیه است. مشخصات لوله های موجود که باید در طراحی مورد استفاده قرار گیرند در جدول (۸) داده شده است.



شکل ٦- آرایش ایستگاه پمپاژ و خط انتقال (Valiantzas, 2003b)

Figure 6– Pumping station and conveyance pipeline layout (Valiantzas, 2003b)

جدول ۸- قطرهای موجود وهزینه لوله‌های قابل استفاده (Valiantzas, 2003b)

Table 8- Available diameter and cost of pipes that can be used in the design (Valiantzas, 2003b)

قطرداخلی لوله (میلی‌متر) (Internal Pipe Diameter(mm))	124.6	149.5	199.5	249.4	300.14
هزینه ی لوله به ازاءیک متر لوله(دلار) (Cost per unit length($))	4.92	6.56	8.20	9.84	11.48

ضریب هیزن ویلیام برابر با ۱۳۰، حداقل فشار در گره ها برابر ۳۵/۲ و حداکثر فشار ۴۰/۴ متر لحاظ شده‌است.

پارامترهای اقتصادی مورد استفاده در تابع هدف (روابط ۳ تا ۶) در جدول (۹) ارایه شده‌است.

همچنین پارامترهای الگوریتم ژنتیک مدل بهینه ساز در جدول ۱۰ ارایه شده است.

جدول ۹- پارامترهای اقتصادی

Table 9-Comercial Parameters

η_e	Cen	C_{fu}($/kw-hr)	n(yr)	e	i	Q_t(hr)
0.75	0.6162	0.094	15	0.09	0.2	1000

جدول ۱۰- پارامتر های الگوریتم ژنتیک مدل در بهینه سازی مورد دوم

Table 10- Genetic algorithm model parameters in the second case optimization

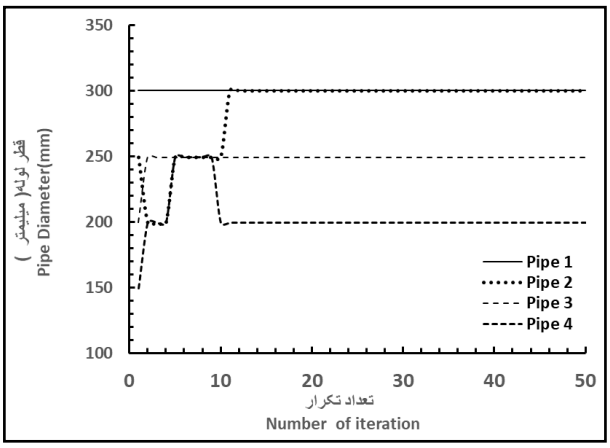
پارامتر Parameter	تعداد متغیرها Number of decision variable	تعداد کروموزم Number of chromosomes	تعداد تکرار Number of iteration	حتمال جهش Mutation probability	احتمال تقاطع Crossover probability	ضریب جریمه Penalty coefficient
مقدار Value	4	100	250	0.03	1	6.5×10^9

نتایج طراحی بهینه سیستم مذکور با استفاده از مدل حاضر در جدول (۱۱) ارایه شده است. مسیر رسیدن به قطر های بهینه و هزینه سالانه و هزینه خرید لوله در اشکال (۷) و (۸) نشان داده شده‌است. همانگونه که ملاحظه می‌شود در کمتر از ۵۰ تکرار نتایج بهینه بدست آمده است.

جدول ۱۱- نتایج طراحی بهینه سیستم (Valiantzas, 2003b) با ستفاده از مدل حاضر

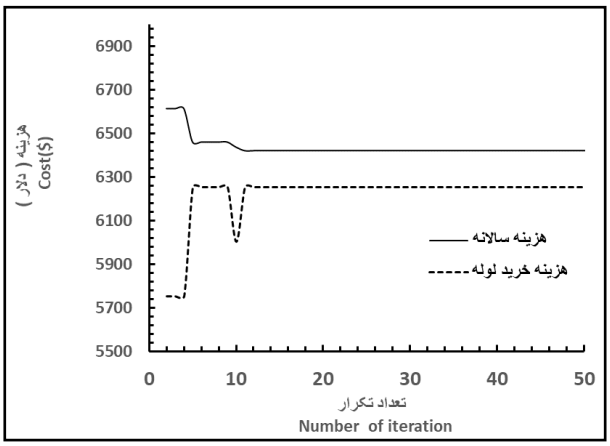
Table 11- Genetic algorithm model parameters in the second case optimization

شماره لوله Pipe Number	قطر بهینه (میلی‌متر) Optimal Diameter(mm)	سرعت (متر برثانیه) Velocity(m/s)	فشار ابتدا (متر) Inlet pressure(m)	فشار انتها (متر) End pressure(m)
1	300.14	1.069	36.863	36.275
2	300.14	0.802	36.275	35.931
3	249.4	0.774	35.931	35.53
4	199.5	0.605	35.53	35.2



شکل ۷- تغییرات قطر لوله ها در مقابل تکرار

Figure 7- Variation of pipe diameter Vs. Iteration



شکل ۸- هزینه سالانه و خرید لوله ها در مقابل تعداد تکرار

Figure 8- Annual cost buying the pipe Vs. number of iteration

به منظور مقایسه نتایج مدل الگوریتم ژنتیک دو دیی تحقیق حاضر با نتایج روش تحلیلی (Valiantzas, 2002)، نتایج روش برنامه ریزی خطی مختلط اعداد صحیح و حقیقی (Shahinejad, 2011) و نتایج روش برنامه ریزی خطی (Kale *et al.*, 2008) مقایسه شد. نتایج این مقایسه در جدول (۱۲) ارایه شده‌است. همانگونه که ملاحظه می‌شود نتایج هر چهار روش بسیار به هم نزدیک است. حداکثر خطای مدل حاضر با سایر مدل‌ها در تخمین فشار ابتدای سیستم و هزینه کل سالانه به کمتر از ۰/۱۸ درصد می‌رسد که اختلاف قابل ملاحظه ای نمی‌باشد.

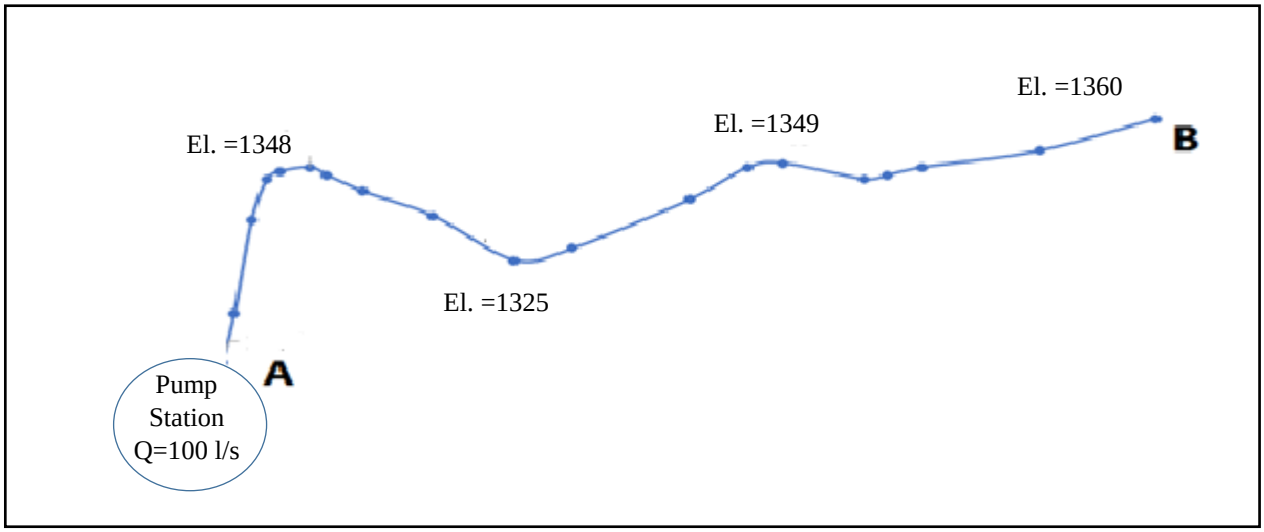
جدول ۱۲- مقایسه نتایج طراحی بهینه سیستم (Valiantzas, 2003b) با روش های مختلف

Table 11- Comparison between result of different optimal design method for Valiantzas(2003b) system

روش بهینه سازی Method of optimization	فشار ابتدای سیستم (متر) Inlet Pressure(m)	هزینه کل سالانه(دلار) Total annual cost($)
مدل الگوریتم ژنتیک حاضر	36.86	6419.89
تحلیلی (Valiantzas, 2002)	36.88	6414.99
برنامه ریزی خطی مختلط (Shahinejad, 2011)	36.83	6408.29

طراحی خط انتقال بین دو نقطه با توپوگرافی نامنظم

هدف از طرح این مسئله بررسی توانایی مدل در طراحی بهینه سیستم انتقالی است که در طول مسیر خود ترکیبی از شیب های مثبت و منفی را داشته باشد (شکل۹). طول کل مسیر انتقال ۸۰۰۰ متر درنظر گرفته شده است. ۷۵۰ متر اولیه از ایستگاه پمپاژ تا رقوم ۱۳۴۸ دارای شیب مثبت سپس به طول ۱۷۵۰متر تا رقوم ۱۳۲۵ با شیب منفی ادامه می یابد. از رقوم ۱۳۲۵ تا انتها دو قطعه ۲۳۰۰ و ۳۲۰۰ متری بصورت سربالایی با شیب متغیر در مسیر مشاهده می شود. همچنین حداقل و حداکثر فشار مجاز به ترتیب برابر با فشار نسبی اتمسفر و ۱۶۵ متر، حداقل و حداکثر سرعت مجاز ۰/۷ و ۲ متر بر ثانیه در نظر گرفته شده است.



شکل ۹- آرایش ایستگاه پمپاژ

Figure 9– Pumping station layout

قطر بهینه محاسبه شده برای هر قطعه از طول لوله به همراه مقادیر سرعت و فشار محاسبه شده در جدول (۱۳) ارایه شده است. همانگونه که ملاحظه می شود مقادیر فشار و سرعت در محدوده مجاز قرار دارند و همه قیود مسئله رعایت شده است.

علاوه بر این قطر لوله مربوط به قطعه دوم مسیر که در سراشیبی تند قرار داشت در مقایسه با دیگر قطعات کوچکتر بدست آمده است که با فیزیک مسئله سازگار می‌باشد. نتایج طراحی توسط مدل حاضر نشان داد پمپ مدل MC200(440) دو طبقه به برای پمپاژ از نقطه A به نقطه B بهینه می باشد. همچنین مقدار هزینه لوله‌گذاری ۹۶۵۶۸/۲۷۷ دلار برآورد گردید.

جدول ۱۳- پارامترهای بهینه مورد سوم

Table 13- Optimal parameters of the third case

شماره لوله Pipe No.	دبی Discharge (lit/s)	طول لوله Pipe length (m)	قطر بهینه (میلی‌متر) Optimal diameter(m)	سرعت آب (متر بر ثانیه) Velocity(m/s)	فشار ابتدا (متر) Start pressure(m)
1	100	750	383.8	0.9	99.76
2	100	1750	302.8	1.38	50
3	100	2300	341.2	1.09	56.31
4	100	3200	383.8	0.86	25.37

طراحی بهینه سیستم انتقال بیستون

پس‌از صحت‌سنجی مدل و بررسی توانایی آن در طراحی چند مورد متفاوت و اعتماد به نتایج آن، سیستم انتقال سد مخزنی خارج از بستر سد بیستون با استفاده از مدل مذکور طراحی گردید. طول خط انتقال به چهار قطعه تقسیم شد و همچنین عمر

مفید پروژه ۲۰ سال و نرخ بهره ۲۰ درصد در محاسبات لحاظ شد. همچنین دبی مورد نیاز سیستم ۳۵۰۰ لیتر در ثانیه و ساعات کارکرد سالانه ایستگاه ۲۸۰۰ ساعت در نظر گرفته شد. بهینه سازی به منظور حداقل کردن مجموع هزینه‌های ثابت و جاری سیستم در طول عمر مفید پروژه انجام شد. همانگونه که قبلا اشاره شد ترم های دوم و سوم رابطه (۳) به ترتیب هزینه ثابت ایستگاه پمپاژ و متعلقات آن از قبیل خرید پمپ ها، هزینه ساختمان، هزینه ترانسفورماتور، تابلو های برق، تاسیسات آبگیر و... و هزینه های جاری شامل هزینه برق، تعمیر و نگهداری، اوپراتور و... را در نظر می گیرد. این هزینه ها به‌صورت ضرایبی از توان ایستگاه پمپاژ در نظر گرفته شدند. مقدار این ضرایب وابسته به مکان و زمان می باشد. اطلاعات گرد آوری شده از کارشناسان خبره اعداد متفاوتی را برای این ضرایب در اختیار قرار دادند. از اینرو در ادامه حساسیت سنجی نتایج نسبت به این ضرایب انجام شد و نتایج با حالتی که تابع هدف تنها شامل حداقل نمودن هزینه خط انتقال باشد (که آیتم های هزینه‌ای آن شفاف‌تر و قابل دسترس تر هستند) مقایسه شدند. پارامترهای نهایی الگوریتم ژنتیک در نظر گرفته شده برای طراحی در این موارد در جدول (۱۴) ارایه شده است.

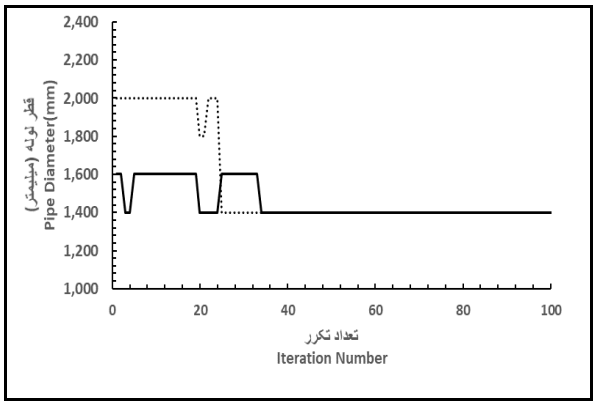
جدول ١٤- پارامتر های مورد استفاده در مدل الگوریتم ژنتیک

Figure 14- Genetic algorithm model parameter

پارامتر Parameter	تعداد متغیرها Number of decision variable	تعداد کروموزم Number of chromosomes	تعداد تکرار Number of iteration	حتمال جهش Mutation probability	احتمال تقاطع Crossover probability	ضریب جریمه Penalty coefficient
مقدار Value	4	50	500	0.05	1	1×10^{32}

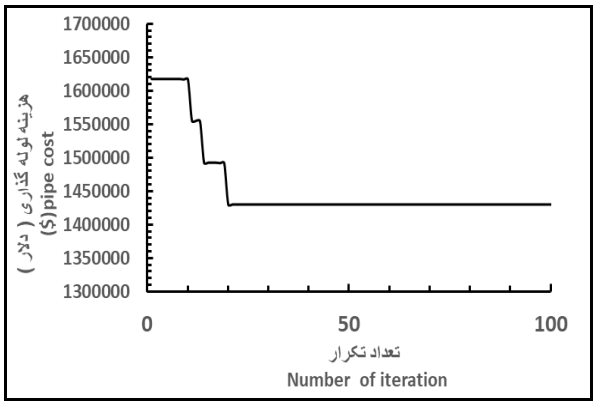
چنانچه فقط هزینه خط انتقال در تابع هدف در نظر گرفته شود همانگونه که در جدول (۱۵) آورده شده است تمام خط انتقال یک قطر ۱۴۰۰ میلی متری از جنس لوله فلزی را به خود اختصاص می‌دهد.

این قطر با آنچه که مشاور طرح در نظر گرفته است یکسان می باشد. برای نمونه مسیر رسیدن به جواب برای قطعه اول و آخر خط انتقال در شکل (۱۰) نشان داده است. همانگونه که در شکل (۱۱) نشان داده شده است در این سناریو هزینه خرید و کارگذاری لوله های خط انتقال برابر ۱۴۳۰۴۵۵ دلار می باشد.



شکل ۱۰- تغییرات قطر لوله قطعه اول (خط نقطه) و قطعه آخر (خط ممتد) در مقابل تکرار

Figure 10- Variation of pipe diameter of first part (dot line) and last part (continues line) Vs. Iteration



شکل ۱۱- هزینه خرید و کارگذاری لوله خط انتقال در مقابل تکرار

Figure 11- The cost of buying and implementation of pipe line

جدول ۱۵- پارامترهای بهینه خط انتقال سد بیستون

Table 15- Optimal parameter of Biston dam pipe line

شماره لوله *Pipe No.*	طول لوله *Pipe length (m)*	دبی *Discharge (lit/s)*	رقوم ابتدا *Start elevation*	رقوم انتها *End elevation*	قطر بهینه (میلی‌متر) *Optimal diameter(m)*	فشار ا بتدا (متر) *Pressure(m)*	سرعت آب (متر بر ثانیه) *Velocity(m/s)*
1	1000	3500	1266.39	1277.89	1400	86.38	2.275
2	1000	3500	1277.89	1287.36	1400	71.03	2.275
3	1000	3500	1287.36	1299.82	1400	57.7	2.275
4	990	3500	1299.82	1337.39	1400	41.39	2.275

نوع پمپ انتخاب شده برای سیستم MC200 (440) می باشد که لازم است تعداد ۲۱ دستگاه از این نوع پمپ به صورت موازی بسته شوند تا دبی مورد نیازطرح را تامین نمایند.

در سناریو دوم فقط هزینه های ثابت شامل هزینه ثابت خط انتقال و هزینه ثابت ایستگاه پمپاژ با هم در نظر گرفته شده است. در اینجا هزینه ثابت ایستگاه(CPU) بصورت حاصلضرب ضریب K در توان کل ایستگاه پمپاژ (P_t) در نظر گرفته شده است.:

$$CPU = K \times P_t \qquad (۱۲)$$

در این رابطه ضریب K هزینه در واحد کیلو وات می باشد. مقدار این ضربیب از یک ایستگاه به ایستگاه دیگر و از یک زمان به زمان دیگر متفاوت است. از اینرو با مقادیر مختلف K بین ۳۰۰ تا ۱۰۰۰ دلار (با توجه به اطلاعات جمع آوری شده از کارشناسان طراح) به ازای هر کیلو وات محاسبات انجام شد. نتایج نشان داد قطر لوله بهینه صرفنظر از مقدار K برابر ۱۶۰۰میلی متر محاسبه می شود. این قطر در مقایسه با حالت قبل ۲۰۰ میلی متر بزرگتر است. مولفه های هزینه ثابت کل در این حالت در جدول (۱۶) ارایه شده است.

جدول ١٦- مولفه‌های هزینه ثابت کل درطرح سیستم انتقال سد بیستون

Table 16-Componnet of total constant cost Biston dam conveyance system

K= 1000 $/ KW	K= 600 $/ KW	K= 300 $/ KW	آیتم
1,681,952	1,681,952	1,681,952	هزینه کل خط لوله (دلار) Total cost of conyeyence pipeline($)
3,208,001	1,924,801	962,400	هزینه کل ساختمان و تجهیزات ایستگاه پمپاژ(دلار) Total constant cost of pump station($)
78.3	78.3	78.3	ارتفاع پمپاژ (متر) Pumping Head(m)

در سناریو سوم علاوه بر هزینه های ثابت خط انتقال ایستگاه پمپاژ هزینه‌های جاری ایستگاه پمپاژ شامل هزینه انرژی و تعمیر نگهداری نیز لحاظ شده است. در این حالت مقدار ضریب (K= 300($/ KW و برای ($/kw-hr)C_{fu} دو مقدار ۰/۰۴۸ و ۰/۰۹۴ در نظر گرفته شد. نتایج اجرای مدل در این حالت نیز نشان داد قطر بهینه لوله خط انتقال ۱۶۰۰ میلی متر است. همانند سناریو دوم ارتفاع پمپاژ ۷۸/۴ متر، توان ایستگاه پمپاژ بدون در نظر گرفتن راندمان الکتروموتور ۳۴۲۵ کیلو وات و پمپ گریز از مرکز مدل(۵۰۰-۵۰-۲۰۰) با راندمان۸۴درصد مناسب می باشد. تعداد ۱۹دستگاه از این مدل پمپ بدون در نظر گرفتن پمپ رزرو برای پمپاژ دبی کل مورد نیاز می باشد. اجزا هزینه سالانه در این سناریو در جدول (۱۷) ارایه شده است. همانگونه که ملاحظه می شود هر چند که ضریب C_{fu} در تعیین قطر بهینه تاثیری نداشت ولی در مقدار مطلق هزینه جاری سیستم بسیار تاثیر گذار می‌باشد.

جدول ۱۷- سهم هر قسمت از هزینه کل سالانه طرح خط انتقال سد بیستون (دلار)

Table 17- Share of each part of the total annual cost of the Biston Dam conveyance line ($)

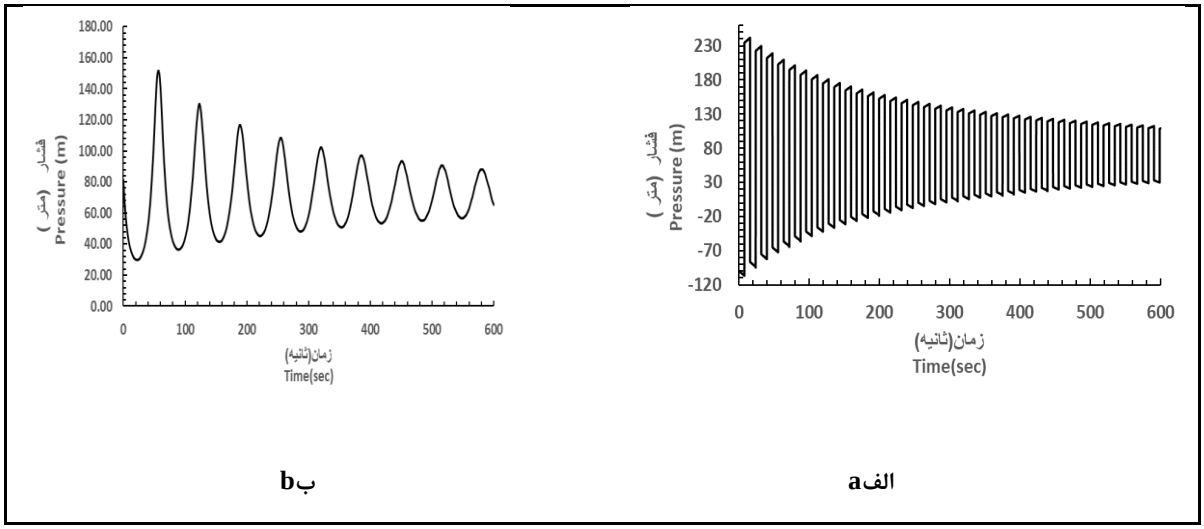
هزینه لوله‌گذاری(سالانه) Annulal cost of conyeyence pipeline $\sum_{i=1}^{NP} CRF \times Li \times CPi$	هزینه ثابت ایستگاه پمپاژ (سالانه) Anuual constant cost of pump station $\sum_{i=1}^{NPU} CRF \times CPUj$	هرینه جاری ایستگاه پمپاژ Anuual cost of pump station $Cen \times Hpj$	
		C_{fu}($/kw-hr)=0.048	C_{fu}($/kw-hr)=0.094
344,800.16	197,292.08	685,634.4	1,342,700.63

شبیه سازی ضربه قوچ سیستم بهینه خط انتقال بیستون

همانگونه که قبلا اشاره شد یکی از قابلیت های مدل حاضر شبیه سازی ضربه قوچ پس از بهینه‌یابی سیستم انتقال می‌باشد. با هدف مطالعه و کنترل ضربه قوچ سیستم بهینه خط انتقال بیستون با قطر ۱۶۰۰ *میلی‌متر*، محاسبات شبیه سازی ضربه قوچ انجام شد. بدین منظور یکی از شدیدترین شرایط ایجاد ضربه قوچ در سیستم خط انتقال یعنی خاموش شدن ناگهانی ایستگاه پمپاژ مورد توجه قرار

گرفت. در شکل۱۲ – الف تغییرات فشار در این حالت در ابتدای خط لوله نشان داده شده است. همانگونه که ملاحظه می‌شود حداقل فشار منفی به حدود ۱۲۰ متر وحداکثر فشار مثبت در لوله به نزدیک ۲۳۵ متر می رسد. با این وجود خط لوله هم از نظر حداقل فشار(فشار بخار) و هم از نقطه نظر حداکثر فشار قابل تحمل خط لوله (۱۶۰ فشار ترکیدگی متر) قطعا دچار مشکل می‌شود. به منظور کنترل ضربه قوچ در این تحقیق استفاده از مخزن هوا با توجه به فراوانی استفاده در ایستگا های پمپاژ مورد بررسی قرار گرفت. با استفاده از سعی و خطا و چندین مرتبه اجرای مدل نهایتا مخزن هوا به سطح مقطع ۲۸/۲۶ متر مربع معیارهای مورد نیاز این پروژه را تامین نمود.

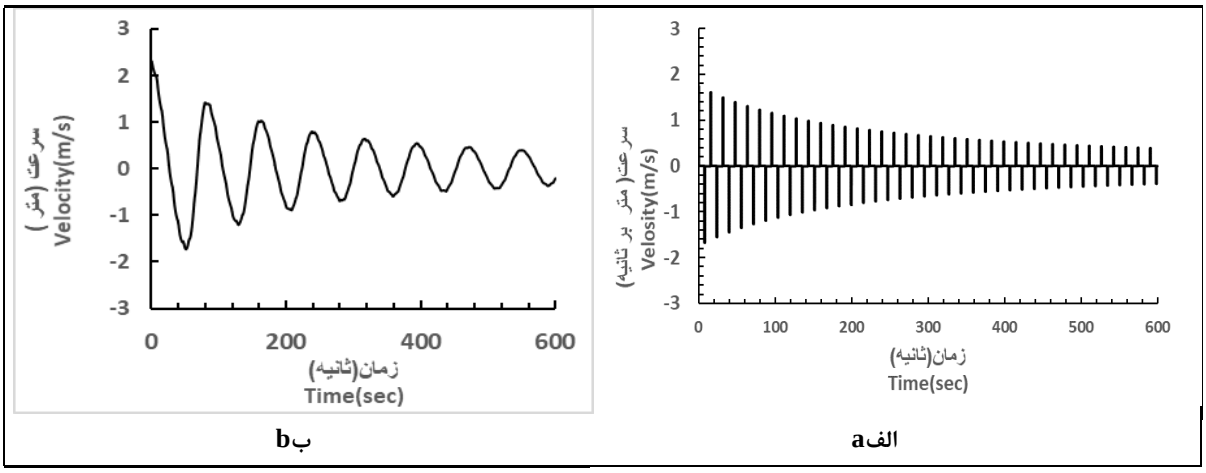
همانگونه که در شکل ۱۲-ب نشان داده شده است با نصب مخزن هوای مذکور در ابتدای خط لوله حداکثر فشار کمتراز ۱۵۰ متر و حداقل فشار بیشتر از فشار بخار می باشد.



شکل ۱۲- تغییرات هد فشار در ابتدای خط لوله در اثر خاموش شدن ناگهانی پمپ الف) بدون تاسیسات کنترل ضربه قوچ ، ب) با وجود مخزن هوا

Figure 12- Pressure head changes at the beginning of the pipeline due to a sudden pump shutdown a) Without water hammer control facilities, b) With air chamber

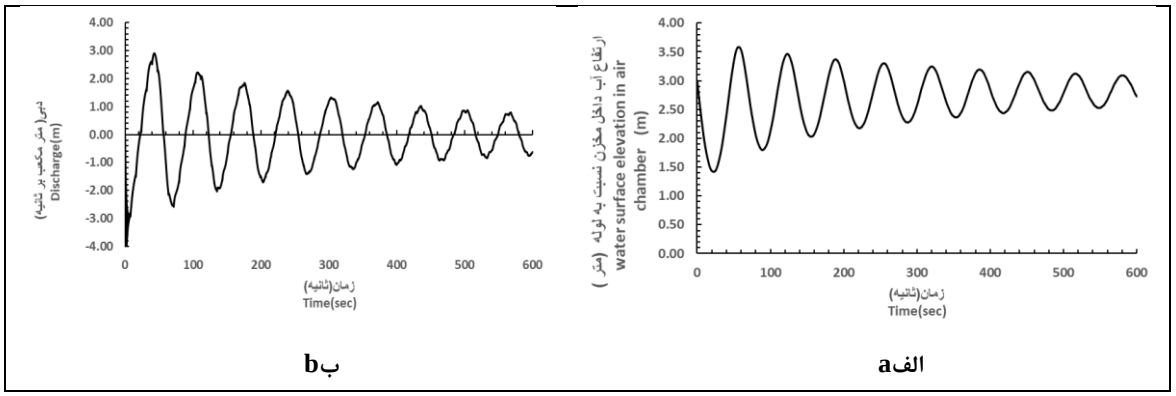
تغییرات سرعت در وسط قطعه اول خط لوله یعنی حدود ۵۰۰ متر از محل ایستگاه پمپاژ قبل و بعد از نصب مخزن هوا در شکل ۱۳ نشان داده شده است. همانگونه که انتظار می رود نصب مخزن هوا نوسانات شدید موج فشاری رفت و برگشتی در داخل خط لوله را تعدیل نموده است.



شکل ۱۳- تغییرات سرعت جریان در وسط قطعه اول خط لوله در اثر خاموش شدن ناگهانی الف) بدون تاسیسات کنترل ضربه قوچ ، ب) با وجود مخزن هوا

Figure 13– Flow velocity changes in the middle of the first section of the pipeline due to a sudden pump shutdown a) Without water hammer control facilities, b) With air chamber

در شکل (۱۴-الف) نوسانات سطح آب داخل مخزن هوا نشان داده شده است. همانگونه که ملاحظه می‌شود در ابتدای شبیه سازی رقوم سطح آب داخل مخزن ۳ متر نسبت به رقوم خط لوله بالاتر است و در حین شبیه سازی حداقل رقوم به ۱/۴۲ متر و حداکثر آن۳/۵۸ متر نسبت به رقوم لوله نوسان می کند. به عبارتی مقدار نوسان سطح آب داخل مخزن ۲/۱۶ متر است. در شرایط حداقل رقوم آب داخل مخزن هنوز۱/۴۲ متر سطح آب نسبت به خط لوله بالاتر است به عبارتی هوای مخزن وارد خط لوله نمی شود و مخزن درست کار می کند. با این اوصاف ارتفاع ۵ تا ۶ متر برای مخزن هوا که تا نیمه آن پر از آب باشد مناسب است. علاوه بر این حداکثر دبی خروجی از مخزن هوا حدود ۳/۵ متر مکعب بر ثانیه و حداکثر دبی ورودی به آن حدود ۲/۹ متر مکعب بر ثانیه محاسبه گردید (شکل ۱۴-ب).



شکل ١٤- تغییرات الف) رقوم سطح آب داخل مخزن ، ب) دبی وروری به مخزن هوا و خروجی از مخزن هوا در طول مدت شبیه سازی

Figure 14- Changes: a) The water level inside the air chamber, b) the Input/Output flow rate of the air chamber during the simulation period.

نتیجه‌گیری

باوجود مزایای متعددی که برای سد های خارج از بستر اصلی رودخانه شمرده شده است ولی هزینه-های ایستگاه پمپاژ و خط انتقال آب از رودخانه تا محل ساختگاه این سدها موضوعی است که می‌تواند توجیه اقتصادی طرح را دچار مشکل نماید. از اینرو تلاش برای کاهش هر چه بیشتر هزینه‌های ایستگاه پمپاژ و خط انتقال همواره مورد توجه محققین بوده است. در این راستا در تحقیق حاضر با استفاده از روش بهینه سازی الگوریتم ژنتیک مدلی کامپیوتری توسعه داده شد که درآن طراحی بهینه ایستگاه پمپاژ و خط انتقال با حداقل نمودن مجموع هزینه های ثابت و جاری انجام می‌شود. علاوه بر این به-منظور اطلاع و تصمیم گیری در خصوص کنترل ضربه قوچ، محاسبات شبیه سازی جریان غیرماندگار دراین مدل انجام می شود. ارزیابی مدل با حل چندین مثال موردی انجام شد و نتایج قابل قبولی حاصل گردید. در ادامه به‌منظور رسیدن به هدف این تحقیق بهینه سازی خط انتقال سد خارج از بستر بیستون در استان کرمانشاه مورد بررسی قرار گرفت. محدودیت‌های سرعت انجام در نظر گرفته شده شامل حداقل و حداکثر سرعت به ترتیب برابر ۰/۷و ۲/۷ متر بر ثانیه می باشد. در شرایط عادی حداکثر فشار ۱۰ اتمسفر و حداقل فشار معادل فشار بخار لحاظ شد. با توجه به مطالعات منابع آب لازم است انتقال آب با دبی ۳۵۰۰ لیتر بر ثانیه در طول ۶ ماه از سال (آذر تا اردیبهشت) از رودخانه گاماسیاب به سد خارج از بستر انجام شود. طول خط انتقال حدود چهار کیلومتری این پروژه به چهار قطعه تقسیم شد و قطر بهینه برای هر قسمت محاسبه گردید. نتایج بهینه سازی با در نظر گرفتن فقط هزینه خط پمپاژ نشان داد قطر بهینه برای هر چهار قطعه یکسان و برابر ۱۴۰۰ *میلی‌متر* است همچنین جنس لوله از نوع فولادی می‌باشد. علاوه بر این بدون احتساب پمپ رزرو تعداد ۲۱ دستگاه پمپ مدل MC200 (440) برای انتقال دبی مورد نظر لازم است. هزینه خرید و لوله‌گذاری طرح بهینه ۱۴۳۰۴۵۴/۹ دلار برآورد می گردد. برای شرایطی که مجموع هزینه های ثابت و جاری سیستم در نظر گرفته شود محاسبات نشان داد خط انتقال با قطر ۱۶۰۰ میلی متر هزینه کل کمتری در طول ۲۰ سال عمر پروژه در مقایسه با قطر ۱۴۰۰ میلی متر دارد. در این حالت بدون احتساب پمپ رزرو تعداد ۱۹دستگاه پمپ گریز از مرکز مدل(۵۰۰-۵۰-۲۰۰) برای انتقال دبی مورد نظر لازم است. محاسبات ضربه قوچ سیستم بهینه نشان داد در شرایط از کار افتادگی ناگهانی ایستگاه پمپاژ حداقل فشار منفی به حدود ۱۲۰ متر وحداکثر فشار مثبت در لوله به نزدیک ۲۳۵ متر می رسد که کارکرد خط لوله از هر دو نظر کاویتاسیون و ترکیدگی با مشکل مواجه می‌شود. از اینرو طراحی مخزن هوا مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد مخزن هوا با شعاع ۳ متر و ارتفاع حدود ۵ الی ۶ متر که در شرایط اولیه تا نیمه آن پر از آب بوده و فشار هوای بالای آن حدود ۸۶ باشد خط لوله را از نقطه نظر ضربه قوچ ایمن نگه می دارد

ازجمله محدودیت های مدل حاضر عدم در نظر گرفتن پدیده جداشدگی ستون مایع در محاسبات ضربه قوچ می‌باشد که در جهت بهبود عملکرد مدل لازم در آینده مورد توجه قرار گیرد. دراین تحقیق بعد از بهینه سازی خط انتقال، تاسیسات ضربه قوچ از جمله مخزن هوا برای‌کنترل احتمالی آن طراحی شد. محاسبات تعیین ابعاد بهینه سیستم کنترل ضربه قوچ همزمان با بهینه سازی خط انتقال آب و ایستگاه پمپاژ موضوعی دیگر است که باید مورد

توجه قرار بگیرد. عموماً در طراحی خطوط انتقال هزینه‌های ثابت در تضاد با هزینه‌های جاری هستند. به‌گونه‌ای که با کاهش هزینه‌های ثابت یعنی کاهش قطر لوله ها، هزینه های جاری به خاطر افزایش افت و هد پمپاژ زیاد می‌شود در این راستا استفاده از سایر روش‌های بهینه سازی دو هدفه همانند NSGA-II توصیه می شود.

مراجع

Abdan Faraz Consulting Engineers. (2015). Bistoon Reservoir Dam and water conveyance systems, Kermanshah Regional Water Authority company. (In Persian)

Akbarimoghadamgheyebashi, A., Razizadeh, F. & Saarzghadim, Y. (2011). Economic evaluation of dams outside the main riverbed, Case study of arsbaran dam, *30th Earth Science Conference*, Tehran, 10 January 2011, https://civilica.com/doc/182378. (In Persian)

Barlow, E. & Tanyimboh, T. (2014). Multi objective genetic algorithm applied to the optimization of water distribution systems. Water Resource Management. 28(2). pp. 2229 – 2242

Colebrook, C.F., & White, C.M., (1937). The reduction of carrying capacity of pipes with age, Journal Institute of Civil Engineering, 7(1), pp.99-118.

Coelho, B., Tavares, A. & Andrade-Campos, A., (2012). Analysis of diverse optimisation algorithms for pump scheduling in water supply systems, *Proceedings of 3rd International Conference on Engineering Optimization* (EngOpt2012), July, Rio de Janeiro, Brazil.

Daneshfaraz, R. & Ghafarinike, A. (2014). Investigation of the consequences of placing the dam outside the main river bed: A case study of Mahabad dam, *National Conference on the Use of New Technologies and Technologies of Design, Calculation and Execution in Civil Engineering, Architecture and Urban Planning*, Maragheh, *Iran, 18 April 2014 https*://civilica.com/doc/465217. (In Persian)

El-Turki, A. 2013. Modeling of hydraulic transients in closed conduits. MSc Thesis, University of Fort Collins, Colorado, USA

Ghobadian, R., Fatemi, S. & Hazeri, A. (2018). Numerical investigating of water hammer on optimal design of sprinkler irrigation network. Iran Water Resources Research. 14(2). pp. 69-81. (In Persian)

Ghobadian, R., Hazeri, A. & Fatemi, S. (2018). Optimization of pressurized irrigation network pipe diameters using genetic algorithm based on integer numeric (Case study: Ismail Abad network in Lorestan). Journal of Water and Soil Conservation. 20(4). pp. 207-224. (In Persian)

Haaland, S. E. (1983). Simple and explicit formulas for the friction factor in turbulent pipe flow. Journal of Fludis Engineering. pp. 89-90

Hashemi, S.S., Tabesh, M. & Ataeekia, B., (2014). Ant colony optimization of pumping schedule to minimize the energy cost using variable speed pump in water distribution networks, Urban Water Journal, *11(5), pp.334-347.*

Jung, B.S. & Karney, B. (2014). Fluid transients and pipeline optimization using GA and PSO: The diameter connection. Urban water journal, 1(2). pp. 169-196.

Kale, R. V., Singh, R. P. & Mahar, P. S. (2008). Optimal design of pressurized irrigation subunit. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 134(2), pp. 137-146.

Khoshfetrat, A. R., Daneshfaraz, R. & Behmanesh, J. (2018). Numerical comparison of various methods of transient flow calculation in water conveyance systems with pumping station. Journal of Water and Wastewater, 29(2), pp. 85-100. Doi: 10.22093/wwj.2017. 54595.2198. (In Persian)

Mackle, G., Savic, G.A. & Walters, G.A., (1995). Application of genetic algorithms to pump scheduling for water supply, *First International Conference on Genetic Algorithms in Engineering Systems: Innovations and Applications* (GALESIA), September 12-14, IET, 400-405.

Mansouri, R. & Torabi, H. (2018). Using Differential Evolution Algorithm for Optimizing and Modeling of Integrated Hydraulic and Water Resources (Case Study: The Central Plateau of Iran). Irrigation and Drainage Structures Engineering Research. 19(70), pp. 17-34. (In Persian)

Menke, R., Abraham, E., Parpas, P. & Stoianov, I. (2015). Approximation of system components for pump scheduling optimisation, Procedia Engineering, 119, pp.1059-1068.

Moinaldini, E., Mohamad Reza Pour, O. & Zeynali, M. (2018). Application of imperialist competitive algorithm in optimizations of pipe diameters for urban water network (Case study: Shahrdari town, Kerman). Water and Soil Science. 28(2), pp. 29-41. (In Persian)

Namdari, T.& Bidokhti, N. (2009). The calibration of Water Gems hydraulic analysis model using genetic algorithm, *3rd National Conference of Water and Wastewater in Iran*. (In Persian)

Rohani, M.& Afshar, M. (2015). Optimal design of gravity pipeline systems using genetic algorithm and mathematical optimization. Journal of Water and Wastewater (parallel title); Ab va Fazilab. 26(1), pp. 107-118. (In Persian)

Shahi Nejad, B. (2011). Optimal design of irrigation networks using mixed integer linear programming. Ph.D. Thesis, Chamran University, Ahvaz. (In Persian)

Torabi, H., Goleij, H., Mirshahi, D. & Shahi Nejad, B. (2018). Irrigation networks optimization using expanded particle swarm algorithm and linear programming. Irrigation and Water Engineering. 8(2). pp. 187-199. (In Persian)

Triki, A., (2015). Water-hammer control in pressurized-pipe flow using an in-line polymeric short-section. Acta Mech, DOI: 10.1007/s00707-015-1493-1. Springer-Verlag Wien.

Valiantzas, J. D. (2002). Hydraulic analysis and optimum design of multi diameter irrigation laterals. Journal of irrigation and drainage engineering, 128(2), pp.78-86.

Yghini, M. & Akhavan Kazemi, M.R. 2011. Meta-heuristic optimization algorithms. Amirkabir university of technology press, p.448. (In Persian)

Vitkovsky, J.P., Lambert, M.F., Simpson, A.R. & Bergant, A. (2000). Advances in unsteady friction modelling in transient pipe flow. *The 8th International Conference on Pressure Surges*, BHR, The Hague, The Netherlands, 12-14 April, 2000

Zhu, X. Zhang, C. Yin, J. Zhou, H. & Jiang, Y. (2013). Optimization of water diversion based on reservoir operating rules: Analysis of the Biliu river reservoir. China. Journal of Hydrologic Engineering, 19(2), pp. 411-421.

Irrigation and Drainage Structures Engineering Research/Vol.21/No.81/ Winter 2021/P:1-24

Development of the Optimal Design Model of Water Transmission Pipeline Using Genetic Algorithm (Case Study: Conveyance Line of Outside of River Bed Biston Dam)

R. Ghobadian*, S. Heshmati and S.E. Fatemi

* Corresponding Author: Associate Professor, Department of Water Engineering, Razi University, Kermanshah, Iran. Email rsghobadian@gmail.com
Received: 31 October 2020, Accepted: 8 December 2020

Extended Abstract

Background and Objectives: Due to the high cost of designing, construction and operation of dam reservoirs and related facilities, Optimization in the construction of reservoirs and related facilities to increase productivity and reduce costs has been considered by designers. In this regard, the development of computer software can be a great help to design engineers in such a way that boring manual calculations and calculation errors are reduced For this purpose, the main goal of the present study is to prepare and develop a computer model based on genetic algorithm in which the objective function that is the sum of the fixed and current costs of the transmission system during the useful life of the project, considering the velocity and pressure constrain was minimized. Simulation water hammer in the optimal system with and without control facilities is one of the secondary goals of this research.

Materials and Methods: In this study, the optimal design of the pumping station and transmission line is performed based on optimizing using the binary genetic algorithm with the objective function of minimizing fixed and current costs of the transmission system and pumping station during the useful life of the project. The study area is the pump station and water transmission line of Biston dam that is located in the outside of Gamasiab river bed in Kermanshah province. In order to optimize the unit length price of 24 pipes of different materials from nominal diameter 110 to 2000 mm as well as the specifications of all domestic manufacturing pumps and some imported pumps were defined as a database in the model. The type of pump and suitable pipes of conveyance line are selected by minimizing the cost function by observing the pressure and velocity constraints.

Result: Model validation results in design of conveyance line by three case: 1- Reservoir - pipe system with end valve, 2- Pipeline with side branches on the slope and 3- Transmission line between two points with irregular topography indicated that the model optimize the transmission line by observing the pressure and velocity constraints in such a way that even in the design of a part of transmission line that placed on downhill slop (case 3) by selecting the optimal smaller diameter prevent overpressure along the transmission line. Then results of the design of the Biston Dam transmission line showed that the diameter of the 1600 mm steel transmission pipe and the centrifugal pump model of 200-50-500 have the lowest cost during useful life of 20 years. The water hammer simulation results on optimal system showed that an Air chamber with a radius of 3 meters and a height of about 5.5 meters that in the initial conditions, it is half full of water and its air pressure is about 86, It keeps the pipeline safe from the point of view of water hammer and sudden shutdown of the pumping station.

Conclusion: Reducing the constant and annual costs of conveyance line and pumping station of outside of river bed dams as much as possible can be effective in the economic explanation of the projects. In this research, in order to reduce the mentioned cost, optimal design of conveyance line and pumping station of outside of river bed Biston dams was considered. In this project it is necessary to transfer 3500 l/s water from Gamasyab river to Biston dam reservoirs during 6 months of the year (November to May) by the optimal transmission pipe line. For this purpose, a computer model was prepared and developed in which based on optimization by binary genetic algorithm method the transmission system is optimized. Model validation was performed using it for optimal design of several different cases and successful results were obtained. Then the optimization of the Biston dam transmission line was done. The result showed that use of 21 centrifugal pump model of 200-50-500 devices (84% efficiency and 78.5 m operating pressure) with steel pipe with a diameter of 1600 is optimal along the entire path. In this situation, the cost of purchase and piping the Biston water transfer project is 1,681,952$.

Key words: Pump station, Optimization, Genetic algorithm, Outside of river bed Biston dam, Water hammer