Journal of Water and Wastewater Science and Engineering (JWWSE)
Vol. 5, No. 2, PP. 48-56, Summer 2020
DOI: 10.22112/jwwse.2020.203660.1170

نشریه علمی
علوم و مهندسی آب و فاضلاب
سال پنجم، شماره ۲، صفحات ۴۸-۵۶، تابستان ۱۳۹۹

Research Paper

Cost Evaluation of Meta- Heuristic Design Models for Urban Water Distribution Network

Mobin Eftekhari[1*] and Mohammad Akbari[2]
1- M.Sc. in Civil Engineering, Water and Hydraulic Structures, Young Researchers and Elite Club, Mashhad Branch, Islamic Azad University, Mashhad, Iran.
2- Assistant Professor, Civil Engineering Department, University of Birjand, Birjand, Iran.
* Corresponding author, Email: mobineftekhari@yahoo.com

Received: 10/10/2019
Revised: 26/04/2020
Accepted: 29/04/2020

Abstract

Water distribution networks are amongst the most important infrastructures of water supply projects, which attracts notable financial credits from the governments. As optimal design can significantly reduce the costs of such large projects, designers always try to minimize the costs while applying all the constraints and technical specifications of the project. Genetic algorithm is one of the most popular approaches for optimizations in the design projects. This research aims at evaluating the meta-heuristic methods used in designing the urban water distribution networks and to assess the genetic algorithm as an optimization mean for such methods. Given the heavy costs associated with water distribution network projects, it is very important how a model perform the cost evaluation. For the current study, the modeling was first performed by WaterGEMS software and the total cost was calculated based on the price list. Then, according to the objective function and cost criterion and with respect to constraints of speed and pressure in the network, optimization was performed and the final cost was obtained. The results of the proposed method showed that by optimization, the investment cost would decrease by about 14% compared to the original plan. Comparison was also made to other meta-heuristic algorithms which confirmed better performance of the proposed algorithm with regards to costs.

Keywords: Genetic Algorithm, Optimization, Water distribution network, WaterGEMS.

مقاله پژوهشی

ارزیابی هزینه‌ای مدل‌های فرا ابتکاری مورد استفاده در طراحی شبکه توزیع آب شهری

مبین افتخاری[۱*] و محمد اکبری[۲]
۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد مهندسی عمران آب و سازه‌های هیدرولیکی، عضو باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان، واحد مشهد، دانشگاه آزاد اسلامی، مشهد، ایران.
۲- استادیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران.
* نویسنده مسئول، ایمیل: mobineftekhari@yahoo.com

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۷/۱۸
تاریخ اصلاح: ۱۳۹۹/۰۲/۰۷
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹۷/۰۲/۱۰

چکیده

شبکه‌های توزیع آب به‌عنوان یکی از مهم‌ترین زیرساخت‌های طرح‌های تأمین آب است که بخش مهمی از اعتبارات مالی کشور را به‌خود اختصاص داده است. از آن‌جا که طراحی بهینه دارای تأثیر به‌سزایی در کاهش هزینه چنین طرح‌های عظیمی است، طراحان همواره به‌دنبال یافتن روشی هستند که ضمن تأمین قیود و معیارهای فنی طرح، کمترین هزینه را داشته باشد. یکی از روش‌های بهینه‌سازی، روش الگوریتم‌ژنتیک است که از پرکاربردترین روش‌های بهینه‌سازی است. مسئله‌ای که مورد توجه این تحقیق است ارزیابی روش‌های فرا ابتکاری مورد استفاده در طراحی شبکه توزیع آب شهری است تا جایگاه الگوریتم ژنتیک به‌عنوان یک روش بهینه‌سازی در این خصوص مشخص شود. با توجه به هزینه‌های سنگین مترتب بر پروژه‌های شبکه توزیع آب، ارزیابی هزینه‌ای مدل‌ها مسئله‌ای مهم و مورد نیاز است. در این تحقیق بخشی از شبکه توزیع آب شهر مشهد با استفاده از روش الگوریتم‌ژنتیک، بهینه‌سازی شد. بدین‌منظور ابتدا مدل‌سازی توسط نرم‌افزار WaterGEMS انجام گرفت و هزینه کل براساس فهرست‌بها محاسبه شد. سپس با توجه به تابع هدف و معیار هزینه و با رعایت قیود سرعت و فشار مجاز شبکه، بهینه‌سازی انجام شد و هزینه نهایی به‌دست آمد. نتایج حاصل از روش ارائه شده نشان داد هزینه سرمایه‌گذاری پس از استفاده از رویکرد پیشنهادی بهینه‌سازی در حدود ۱۴ درصد نسبت به طرح اولیه کاهش خواهد یافت. هم‌چنین مقایسه هزینه روش پیشنهادی در مقایسه با سایر الگوریتم های فرا ابتکاری وضعیت مطلوب تری را ارائه کرد.

کلمات کلیدی: الگوریتم ژنتیک، بهینه‌سازی، شبکه توزیع آب، WaterGEMS.

۱- مقدمه

افزایش جمعیت، پیشرفت صنایع و توسعه بخش‌های کشاورزی تمام کشورهای جهان را با کمبود آب مواجه ساخته‌اند. این موضوع باعث به‌وجود آمدن مسائل و مشکلاتی مهم در سیستم آبرسانی شده است. در این راستا شبکه توزیع آب شهری که برای ارتباط بین مصرف‌کننده و منبع آب احداث می‌شود، طراحی و توسعه آن نیازمند تحلیل گسترده و صرف هزینه قابل‌توجه است. لذا طراحی بهینه شبکه توزیع آب شهری امری اجتناب‌ناپذیر بوده و یکی از اهداف جوامع بشری برای به حداکثر رساندن سود و به حداقل رساندن هزینه بوده و دامنه بسیار وسیعی از تحقیقات اخیر مهندسی عمران را به‌خود اختصاص داده است. در دو دهه اخیر ابزار هوش مصنوعی در کنار سایر روش‌های کلاسیک، درزمینه بهینه‌سازی شبکه‌های آبرسانی استفاده می‌شود و هدف مشترک آن‌ها یافتن بهترین جواب قابل‌قبول، با توجه به محدودیت‌ها و نیازهای مسئله است که در این بین، تاکنون الگوریتم ژنتیک بیشترین کاربرد را دارا است. الگوریتم ژنتیک نوعی الگوریتم فرا ابتکاری برپایه جمعیت است که قادر به یافتن جواب بهینه در زمان کوتاه است.

Dandy et al. (1996) در یک مقاله به بررسی الگوریتم ژنتیک پیشرفته برای بهینه‌سازی شبکه توزیع آب شهری پرداختند. نتایج مطالعه موردی حاکی از آن بود که الگوریتم ژنتیک پیشرفته بسیار بهتر از الگوریتم ژنتیک ساده عمل می‌کند و راه‌حلی برای مشکل تونل‌های نیویورک یافت که کم‌هزینه‌ترین راه ممکن بوده است. Halhal et al. (1997) از الگوریتم ژنتیک در اصلاح و توسعه شبکه‌های آب با یک ساختار چند متغیره که بحث هزینه را نیز وارد مسئله کرده استفاده نمودند. نتایج نشان داد که الگوریتم ژنتیک یک ابزار مؤثر برای طراحی شبکه‌هایی است که با مشکل محدودیت هزینه روبرو هستند. Karaboga and Basturk (2007) در مقاله‌ای تحت‌عنوان الگوریتم قدرتمند کارآمد برای بهینه‌سازی عملکرد عددی، به مقایسه روش الگوریتم کلونی زنبورعسل با الگوریتم ژنتیک، الگوریتم الهام‌بخش ذرات پرداخته و از این الگوریتم برای بهینه‌سازی چند متغیره استفاده کردند. نتیجه این‌طور حاصل شد که عملکرد الگوریتم کلونی زنبورعسل بهتر از سایر الگوریتم‌های ذکرشده، است. نیکجوفر و همکاران (۱۳۹۰) در مقاله بهینه‌سازی دو معیاره شبکه‌های توزیع آب نشان دادند که با بهینه‌سازی شبکه توزیع آب با استفاده از الگوریتم ژنتیک دو معیاره در حدود ۱۳٪ از هزینه کل پروژه کاهش یافت و با هزینه کمتر فشار در محل‌های مصرف بیشتر خواهد بود. امیررضائیه و یکانی مطلق (۱۳۹۱) در طراحی و بهینه‌سازی شهر گردکشانه بعد از تحلیل شبکه توزیع آب نشان دادند که هزینه سرمایه‌گذاری پس از استفاده از بهینه‌سازی با روش الگوریتم ژنتیک کاهش خواهد یافت. برزگری حاجی‌آبادی و قزل سوفلو (۱۳۹۴) با بهینه‌سازی شبکه توزیع آب گردکشانه با استفاده از الگوریتم ژنتیک به این نتیجه دست یافتند که هزینه‌های برآورد شده در مدل بهینه حدود ۳۲٪ نسبت به طرح اولیه شبکه توزیع شهرسلامی، کاهش‌یافته است. در پژوهشی Sherri et al. (2018) به تحلیل شبکه آبرسانی غرب شهر تهران با استفاده از نرم‌افزارهای FMGA و WaterGEMS پرداختند. آن‌ها از طریق مدل‌های بهینه‌سازی به حداقل رساندن هزینه و حداکثر بهره‌مندی از فشار از توابع هدف توانستند هزینه را تا ۸۹٪ کاهش دهند که نتایج بهینه‌سازی و اصلاح شبکه با استفاده از داوری مهندسی و بهینه‌سازی هزینه به‌طور قابل‌توجهی کاهش یافته و سطح فشار در همه گره‌ها به بالاتر از حد رسیده است. هم‌چنین خلیفه و همکاران (۱۳۹۷) در یک پژوهش بهینه‌سازی براساس تابع هدف دومنظوره بخشی از شبکه توزیع آب هماشهر واقع در استان کرمان را مورد بررسی قراردادند. بدین منظور در این مطالعه شبکه توزیع توسط نرم‌افزار WaterGEMS تحلیل هیدرولیکی شده و سپس با استفاده از الگوریتم ژنتیک، بهینه‌سازی انجام گرفته است . بعد از بهینه‌سازی، در حدود ۱٪ از هزینه کل پروژه صرفه‌جویی شد.

در راستای مطالعات مذکور هدف از انجام این تحقیق، بهینه‌سازی ساختار شبکه توزیع و قطر لوله‌های مورد استفاده و به‌تبع آن کاهش هزینه سرمایه‌گذاری اولیه شبکه توزیع آب است. در واقع استفاده از الگوریتم ژنتیک منجر به نتایج قابل‌قبولی در زمینه بهینه‌سازی شبکه توزیع آب شهری می‌شود. هم‌چنین در این تحقیق تحلیل حساسیت پارامترهای الگوریتم ژنتیک بر روی جواب بهینه انجام و با توجه به بررسی پارامترها گزینه نهایی انتخاب شد.

۲- مواد و روش‌ها

منظور از طراحی بهینه یک سیستم توزیع و تأمین آب، تخمین بهترین ترکیب از اندازه و آرایش مؤلفه‌هایی مانند اندازه قطر لوله‌ها، انواع پمپ‌ها، محل قرارگیری و ماکزیمم توان آن‌ها، حجم مخزن ذخیره و ... است، به‌گونه‌ای که حداقل هزینه برای شبکه حاصل شود. الگوریتم ژنتیک یک تکنیک جست‌وجو برای حل مسائل با استفاده از مدل ژنتیک است. این الگوریتم در زمره الگوریتم‌های مبتنی بر جمعیت قرار دارد که ایده اساسی خود را از نظریه تکامل می‌گیرد. این الگوریتم در هر تکرار، مجموعه‌ای از جواب‌های مسئله را موردبررسی قرار می‌دهد. سازوکارها و مجموعه قوانین این الگوریتم برگرفته از مفاهیم علم ژنتیک است. در خصوص انتخاب روش الگوریتم ژنتیک می‌توان به نکات مثبت آن اشاره نمود. مهم‌ترین نقطه قوت الگوریتم ژنتیک موازی بودن

آن است به‌طوری‌که برای حل مسئله چندین نقطه شروع وجود دارد و در یک لحظه می‌تواند فضای مسئله را از چند جهت مختلف جستجو کند. این مسئله کارآیی الگوریتم ژنتیک در حل مسائل غیرخطی با فضای بزرگ را افزایش می‌دهد. با توجه به این‌که اغلب مسائل واقعی غیرخطی هستند، در مسائل خطی هر عنصر مستقل است و تغییر بر یک قسمت بر کل سیستم تاثیر مستقیم دارد. در مسائل غیرخطی تغییر در یک قسمت ممکن است تاثیری ناهماهنگ بر کل سیستم و یا تغییر در چند عنصر تاثیر فراوانی بر سیستم بگذارد. موازی بودن الگوریتم ژنتیک باعث حل این مسئله می‌شود (افتخاری و شبانی‌گیو، ۱۳۹۷). از محاسن دیگر الگوریتم ژنتیک خاصیت ساعت‌ساز نابینا بودن آن است. یعنی الگوریتم ژنتیک از مسائلی که حل می‌کند اطلاعی ندارد. الگوریتم برای حل مسئله تغییرات تصادفی را در راه‌حل‌های کاندید نشان می‌دهد و از تابع برازش برای سنجش این‌که تغییرات پیشرفتی ایجاد کرده‌اند یا نه استفاده می‌کند. این عمل به الگوریتم اجازه می‌دهد در یک فضای گسترده‌تر شروع به حل مسئله کند و از آن‌جایی که تصمیمات آن اساسا تصادفی است، همه راه‌حل‌های ممکن به روی مسئله باز است. ویژگی مثبت دیگر این روش می‌توان به جستجوی سراسری خوب، قابلیت پیاده‌سازی آسان، توانایی بهینه‌سازی با متغیرهای گسسته و پیوسته و حل مسائل بهینه‌سازی ترکیبی غیرخطی تحت قیود غیرخطی از نوع برابری و نابرابری را نام برد (طباطبایی و همکاران، ۱۳۹۶). بر این اساس در این تحقیق برای بهینه‌سازی از بستر نرم‌افزار Water GEMS استفاده شده است. زیرا برنامه Darwin Designer در این نرم‌افزار قابلیت استفاده از روش الگوریتم ژنتیک را دارد.

در بهینه‌سازی طراحی شبکه توزیع آب با رویکرد پیشنهادی تحقیق حاضر، قطر و طول لوله‌ها به‌عنوان متغیرهای تصمیم درنظر گرفته‌شده و تابع هدف مسئله، به‌صورت زیر تعریف شد.

$$\text{Objective Function} = \text{Minimize Capital Cost}$$
$$F(x) = \text{MinC} = \sum_{i=1}^{NP} f(D_i . L_i) \qquad (۱)$$

که $f(D_i . L_i)$: هزینه لوله iام به قطر D_i و طول L_i و NP: تعداد لوله‌ها در شبکه هستند.

تابع فوق باید تحت محدودیت‌های زیر حداقل شود. قید حداقل و حداکثر سرعت در لوله‌ها به‌صورت رابطه (۲) ارائه‌شده است:

$$V_k^{min} \le V_k \le V_k^{max} \quad k = 1.2. \dots . NP \,, V_k^{min} = 0.6 \frac{m}{s} \,, V_k^{max} = 1.6 \frac{m}{s} \qquad (۲)$$

که NP: تعداد لوله‌های مقید در سیستم است.

قید حداقل و حداکثر فشار به‌ازای هر گره در شبکه به‌صورت رابطه (۳) داده‌شده است:

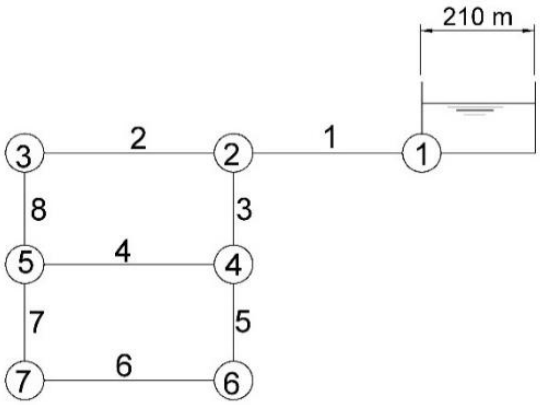
$$H_j^{min} \le H_j \le H_j^{max} \quad j = 1.2. \dots . NN \,, H_j^{min} = 20\ m \,, \quad H_j^{max} = 50\ m \qquad (۳)$$

که NN: تعداد گره‌های مقید در سیستم است.

به‌منظور ارزیابی روش‌های بهینه‌سازی و طراحی شبکه‌های توزیع آب شهری از آن‌جایی که هزینه‌های سنگینی بر طراحی و اجرای این پروژه‌ها مترتب است، مقایسه و ارزیابی هزینه‌ای مبنای این تحقیق است. در خصوص بهینه‌سازی شبکه توزیع آب روش‌های تکاملی زیادی مورد استفاده قرارگرفته است، از جمله روش تبرید، ترکیبی قورباغه، هایبرید و جستجوی پراکنده. در این تحقیق از روش الگوریتم ژنتیک استفاده شده است.

۳- مطالعه موردی

روش طراحی موردنظر در این تحقیق، توسط Alperovits and Shamir (1997) بر روی یک شبکه دو حلقه‌ای مورد مطالعه قرار گرفت. این شبکه از ۷ گره و ۸ لوله تشکیل‌شده است و از یک مخزن با هد ثابت ۲۱۰ متر تغذیه می‌کند. طول تمامی لوله‌ها ۱۰۰۰ متر و ضریب هیزن ویلیامز آن‌ها ۱۳۰ است. حداقل فشار مجاز در هر گره ۳۰ متر درنظر گرفته‌شده است. مصارف و ارتفاع گره‌ها در جدول ۱ و ۱۴ قطر تجاری به همراه هزینه در واحد طول آن‌ها در جدول ۲ آورده شده است.



شکل ۱- شبکه دو حلقه‌ای

جدول ۱- مشخصات گره‌ها در شبه دو حلقه‌ای

شماره گره (ID)	ارتفاع (m)	مصرف (m^3/h)
۲	۱۸۰	۱۰۰
۳	۱۹۰	۱۰۰
۴	۱۸۵	۱۲۰
۵	۱۸۰	۲۷۰
۶	۱۹۵	۳۳۰
۷	۱۹۰	۲۰۰
۱ (مخزن)	۲۱۰	-۱۱۲۰

جدول ۲- اندازه و هزینه لوله‌های قابل انتخاب برای شبکه دو حلقه‌ای

ردیف	قطر (mm)	هزینه (m/$)	ردیف	قطر (mm)	هزینه (m/$)
۱	۲۵/۴	۲	۸	۳۰۴/۸	۵۰
۲	۵۰/۸	۵	۹	۳۵۵/۶	۶۰
۳	۷۶/۲	۸	۱۰	۴۰۶/۴	۹۰
۴	۱۰۱/۶	۱۱	۱۱	۴۵۷/۲	۱۳۰
۵	۱۵۲/۴	۱۶	۱۲	۵۰۸	۱۷۰
۶	۲۰۳/۲	۲۳	۱۳	۵۸۸/۸	۳۰۰
۷	۲۵۴	۳۲	۱۴	۶۰۹/۶	۵۵۰

این مسئله در پژوهش‌های قبلی با الگوریتم‌های تکاملی متفاوت دیگری از قبیل الگوریتم تبرید (Cunha and Sousa, 1999)، الگوریتم جهش ترکیبی قورباغه (Eusuff and Lansey, 2003)، الگوریتم هایبرید (Geem, 2006)، الگوریتم جستجوی پراکنده (Lin et al., 2007)، مورد بررسی قرارگرفت. در جدول ۳ نتایج سایر محققین در مسئله مشابه ارائه شده است.

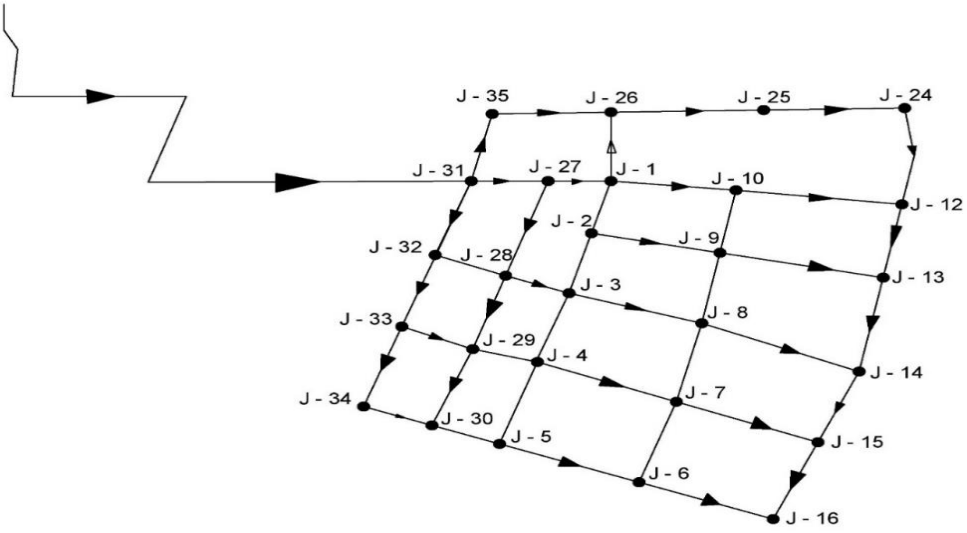
جدول ۳- نتایج حاصل از پژوهش‌های قبل

روش	هزینه نهایی ($)
الگوریتم تبرید	۴۲۹۰۰۰
الگوریتم جهش ترکیبی قورباغه	۴۱۹۳۰۰
الگوریتم هایبرید	۴۱۹۶۰۰
الگوریتم جستجوی پراکنده	۴۱۹۸۰۰

در این تحقیق به‌منظور پیاده‌سازی الگوریتم ژنتیک و نمایش کارایی آن در بهینه‌سازی شبکه‌های توزیع آب، بخشی از شبکه توزیع آب شهر مشهد با استفاده از نرم‌افزار Water GEMS مدل‌سازی شده است. از این پس این شبکه با توجه به منطقه آن، منطقه ۱۱ نام‌گذاری می‌شود. شکل ۲، شبکه توزیع آب موردنظر را نشان می‌دهد. این شبکه از ۲۷ گره و ۴۳ لوله و یک مخزن به ارتفاع ۱۱۰۶ متر تشکیل‌شده است. مشخصات هیدرولیکی گره‌ها در جدول ۴ و مشخصات لوله‌ها در جدول ۵ ارائه‌شده است. جنس تمامی لوله‌ها از چدن و ضریب هیزن ویلیامز ۱۳۰ است.

جدول ۴- مشخصات هیدرولیکی گره‌های شبکه توزیع آب منطقه ۱۱ مشهد

شماره گره	تقاضای گره‌ای (L/S)	فشار (m)	شماره گره	تقاضای گره‌ای (L/S)	فشار (m)
J-۱	۴	۳۶	J-۱۶	۸	۲۹
J-۲	۲۵	۳۲	J-۲۴	۱۲	۳۸
J-۳	۲۵	۳۲	J-۲۵	۱۴	۴۰
J-۴	۲۴	۲۹	J-۲۶	۴	۳۸
J-۵	۱۴	۲۸	J-۲۷	۱۰	۴۰
J-۶	۱۴	۳۴	J-۲۸	۲۵	۳۸
J-۷	۵۰	۳۴	J-۲۹	۲۵	۳۳
J-۸	۳۷	۳۵	J-۳۰	۱۰	۲۹
J-۹	۴۳	۳۸	J-۳۱	۷	۲۷
J-۱۰	۲۰	۳۹	J-۳۲	۱۰	۲۴
J-۱۲	۵	۳۷	J-۳۳	۱۵	۲۵
J-۱۳	۲۲	۳۶	J-۳۴	۵	۲۴
J-۱۴	۲۰	۳۵	J-۳۵	۳	۳۱
J-۱۵	۲۶	۳۳			



شکل ۲- شبکه توزیع آب منطقه ۱۱ مشهد

جدول ۵- مشخصات هیدرولیکی لوله‌های شبکه توزیع آب منطقه ۱۱ مشهد

شماره لوله	طول (متر)	قطر (میلی‌متر)	شماره لوله	طول (متر)	قطر (میلی‌متر)
P-۱	۳۴۱۶	۹۰۰	P-۲۳	۵۸۸	۲۵۰
P-۲	۴۱۲	۴۰۰	P-۲۴	۵۴۲	۲۵۰
P-۳	۵۷۸	۳۰۰	P-۲۵	۴۹۷	۱۵۰
P-۴	۵۴۵	۳۰۰	P-۲۶	۵۰۴	۱۵۰
P-۵	۷۶۴	۳۰۰	P-۲۷	۴۴۱	۸۰
P-۶	۵۸۱	۳۰۰	P-۲۸	۳۸۱	۲۰۰
P-۷	۴۴۵	۳۰۰	P-۲۹	۳۰۱	۲۵۰
P-۸	۵۵۷	۳۰۰	P-۳۰	۵۸۴	۴۰۰
P-۹	۴۷۳	۲۰۰	P-۳۱	۶۴۱	۲۰۰
P-۱۰	۴۸۳	۸۰	P-۳۲	۶۸۳	۲۰۰
P-۱۱	۶۸۹	۸۰	P-۳۳	۷۳۶	۸۰
P-۱۲	۶۷۷	۲۰۰	P-۳۴	۷۷۰	۸۰
P-۱۳	۲۲۳	۲۰۰	P-۳۵	۷۶۷	۸۰
P-۱۴	۴۲۴	۲۰۰	P-۳۶	۳۷۷	۲۰۰
P-۱۵	۴۹۳	۲۰۰	P-۳۷	۴۳۶	۸۰
P-۱۶	۴۵۷	۴۰۰	P-۳۸	۴۹۱	۱۰۰
P-۱۷	۴۷۳	۵۰۰	P-۳۹	۴۸۵	۱۰۰
P-۱۸	۳۵۰	۶۰۰	P-۴۰	۳۰۶	۴۰۰
P-۱۹	۲۹۶	۳۰۰	P-۴۱	۳۳۵	۴۰۰
P-۲۰	۵۶۰	۸۰	P-۴۲	۲۱۸	۳۰۰
P-۲۱	۷۶۹	۸۰	P-۴۳	۴۱۹	۳۰۰
P-۲۲	۴۴۳	۱۵۰			

۴- تحلیل اقتصادی طرح قبل از بهینه‌سازی

براساس فهرست‌بهای شبکه توزیع آب سال ۱۳۹۷ هزینه نهایی طرح اولیه، در جدول ۶ آورده شده است. ملاحظه می‌شود که هزینه نهایی احداث شبکه توزیع آب برابر با ۱۰۰۵۶۰ میلیون ریال محاسبه‌شده است.

جدول ۶- اندازه و هزینه لوله‌های قابل انتخاب در طرح اولیه شبکه توزیع آب منطقه ۱۱ مشهد

قطر (میلی‌متر)	طول (متر)	قیمت (میلیون ریال)
۸۰	۵۶۵۱	۴۸۰۳
۱۰۰	۹۷۶	۹۷۶
۱۵۰	۱۴۴۴	۱۹۶۳
۲۰۰	۴۳۷۲	۸۱۷۵
۲۵۰	۱۴۳۱	۳۵۶۳
۳۰۰	۴۴۰۳	۱۳۶۴۹
۴۰۰	۲۰۹۴	۹۴۲۳
۵۰۰	۴۷۳	۲۹۲۳
۶۰۰	۳۵۰	۲۸۲۱
۹۰۰	۳۴۱۶	۵۲۲۶۴
مجموع	۲۴۶۱۰	۱۰۰۵۶۰

۵- نتایج و بحث

۵-۱- بهینه‌سازی شبکه

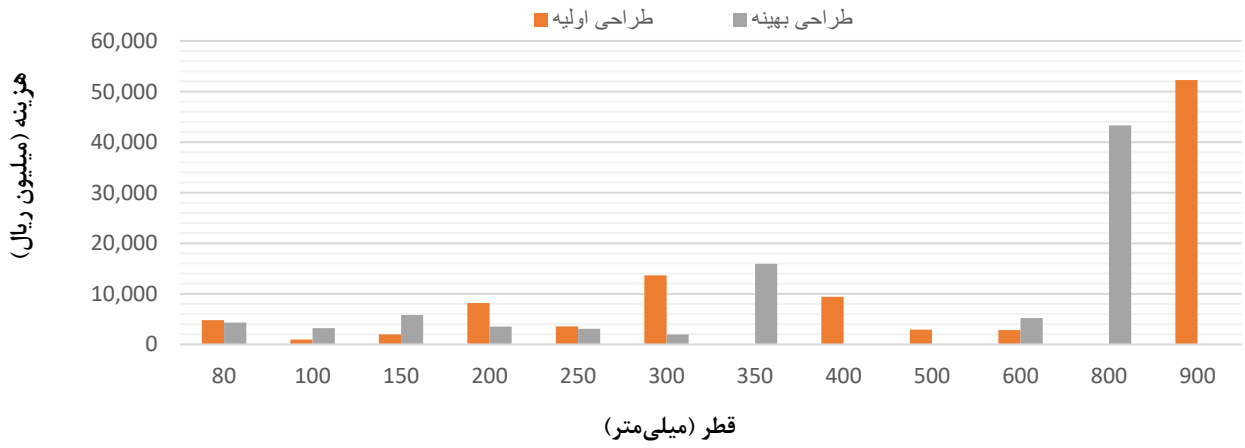
در این تحقیق بعد از این‌که داده‌های موردنیاز وارد نرم‌افزار تحلیل هیدرولیکی شده و شبکه طراحی شد، با استفاده از زیربرنامه Darwin Designer در نرم‌افزار WaterGEMS، مسئله بهینه‌سازی شد. مطابق جدول ۷، طول و هزینه نهایی شبکه موجود بهینه‌سازی شده ۸۶۴۱۲ میلیون ریال برآورد شد، که نسبت به طراحی اولیه معادل ۱۳ درصد کل هزینه نهایی، صرفه‌جویی شده است.

در ادامه این تحقیق، قطر لوله‌های به‌کاررفته در طرح اولیه و مدل بهینه مقایسه شده است. شکل ۳ مقایسه بین طول قطرهای مختلف لوله‌های به‌کار رفته در طرح اولیه و بهینه را نمایش می‌دهد. بررسی نشان می‌دهد که لوله‌های با قطر بزرگ به‌سمت لوله‌های با قطر کوچک‌تر سوق پیداکرده است. به‌همین دلیل در مدل بهینه هزینه‌ها به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای کاهش یافته است که در شکل ۴ قابل‌مشاهده است.

جدول ۷- اندازه و هزینه نهایی در طرح بهینه شبکه توزیع آب منطقه ۱۱ مشهد

قطر (میلی‌متر)	طول (متر)	قیمت (میلیون ریال)
۸۰	۵۰۷۶	۴۳۱۳
۱۰۰	۳۲۲۵	۳۲۲۵
۱۵۰	۴۲۷۰	۵۸۰۸
۲۰۰	۱۸۸۴	۳۵۱۸
۲۵۰	۲۰۰۱	۳۰۹۷
۳۰۰	۶۴۱	۱۹۸۶
۳۵۰	۳۴۵۱	۱۵۹۴۰
۶۰۰	۶۴۶	۵۲۰۸
۸۰۰	۳۴۱۶	۴۳۳۱۶
مجموع	۲۴۶۱۰	۸۶۴۱۲

شکل ۳- مقایسه بین طول لوله‌های بکار رفته در طرح اولیه و طرح بهینه



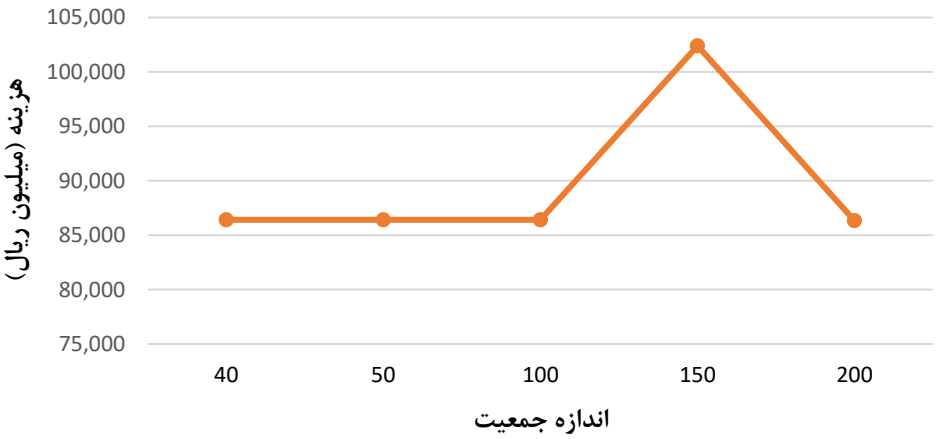
شکل ۴- تغییرات هزینه در برابر تغییرات قطر لوله‌های بکار رفته در طرح اولیه و طرح بهینه

۵-۲- تحلیل حساسیت پارامترهای الگوریتم ژنتیک

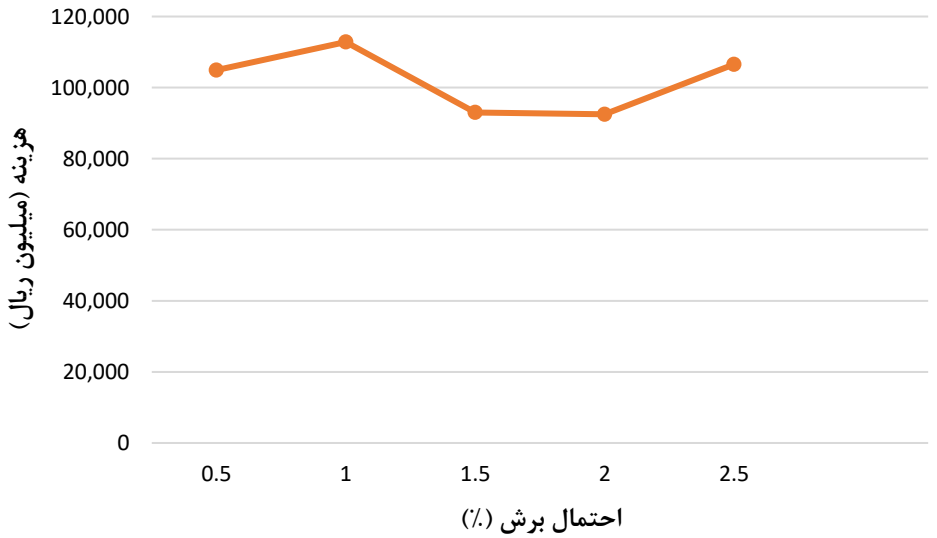
پارامترهای الگوریتم ژنتیک از اهمیت ویژه‌ای برخوردار هستند و نیاز به ارزیابی دارند. پارامترهای مختلفی ازجمله اندازه جمعیت، احتمال برش، احتمال پیوند، احتمال جهش در الگوریتم ژنتیک مؤثر هستند که در این تحقیق تحلیل حساسیت بر روی آن‌ها انجام‌گرفته است. مطابق شکل ۵-الف پارامتر اندازه جمعیت در این تحقیق در محدوده ۴۰ تا ۱۰۰ روند ثابتی را طی کرده و به جواب بهینه رسیده است. با توجه به بازه تعریف‌شده در نرم‌افزار مقدار مناسب ۱۵۰ است و طبق تغییرات حاصل‌شده جزء پارامترهای حساس است. پارامتر مهم و تأثیرگذار دیگر احتمال

برش است که در بازه ۱/۵ تا ۲ درصد، هزینه کاهش‌یافته و در ۱/۷ جواب بهینه حاصل‌شده است. در شکل ۵-ب این بررسی نمایش داده‌شده است. همین‌طور برای پارامتر احتمال پیوند، در این تحقیق، شکل (۵-پ)، مقدار بهینه در ۶۰٪ حاصل‌شده است.

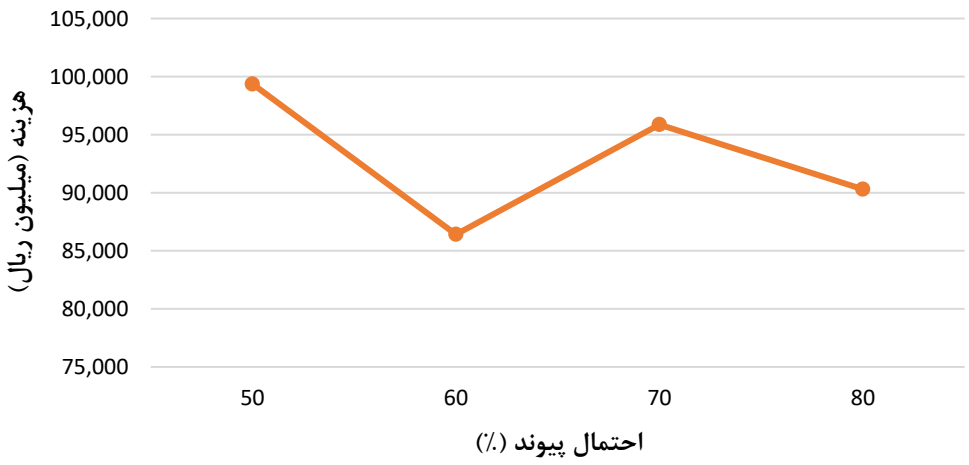
پارامتر احتمال جهش نیز، که در شکل ۵-ت نشان داده‌شده است، در محدوده ۰/۵ تا ۲ درصد موردبررسی قرار گرفت و بهترین مقدار موردنظر در ۱/۵٪ به‌دست‌آمده است.



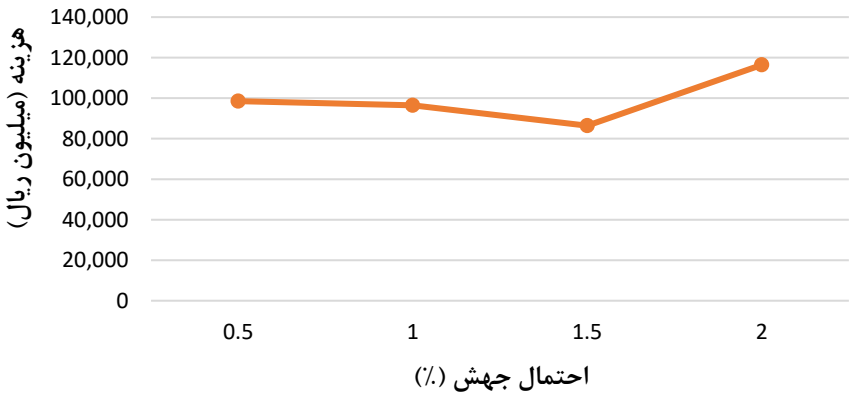
(الف)



(ب)



(پ)



(ت)

شکل ۵- تحلیل حساسیت بر روی پارامترهای GA در شبکه منطقه ۱۱ شهر مشهد: الف) اندازه جمعیت؛ ب) احتمال برش؛ پ) احتمال پیوند؛ ت) احتمال جهش

۶- نتیجه‌گیری

در این تحقیق بخشی از شبکه توزیع آب شهر مشهد، با استفاده از روش الگوریتم ژنتیک بهینه‌سازی شد. در این مدل، برای انتخاب جواب بهینه نهایی، کاهش هزینه هدف بوده و سرعت و فشار مجاز به‌عنوان محدودیت‌های مسئله در نظر گرفته شدند. سپس به کمک نرم‌افزار WaterGEMS که دارای ابزار بهینه‌سازی است، طراحی لازم برای شبکه صورت گرفت. نتایج حاصل از تحلیل مطابق شکل ۴ پس از استفاده از روش بهینه‌سازی نشان داد در طرح بهینه قطر لوله‌ها به‌سمت قطرهای کوچک‌تر متمایل می‌شود. هم‌چنین لوله‌ها با قطر کمتر با متراژ بالاتری استفاده شده است و کاهش هم‌زمان هزینه خرید و اجرای لوله‌گذاری تا ۱۴٪ و تأمین قیود سرعت و فشار مجاز، از نتایج استفاده از این مدل نسبت به طراحی متداول بود. لذا با توجه به کاهش هزینه‌ها می‌توان از این مدل، به‌عنوان یک روش بهینه‌سازی مناسب برای کاهش هزینه طراحی شبکه توزیع آب شهری استفاده نمود. هم‌چنین هزینه به‌دست‌آمده با استفاده از برنامه Darwin Designer، ۴۱۹۰۰۰ دلار به‌دست آمد که با حداقل هزینه به‌دست‌آمده از سایر روش‌های بهینه‌سازی برابر است.

کارایی مدل الگوریتم ژنتیک نه‌تنها درزمینه بهینه‌سازی شبکه‌های انتقال آب قابل‌بیان است، بلکه از آن می‌توان در تشخیص نشت مبتنی بر کالیبراسیون در دو شبکه فرضی و آزمایشگاهی درنظر گرفت. روش پیشنهادی با یک کالیبراسیون معمولی برای یک شبکه موردمطالعه آغاز می‌شود و با حذف گره‌های مشکوک در بین پارامترهای تنظیم‌شده، مجدداً کالیبره می‌شود. سرانجام این فرآیند تکرار می‌شود تا تعداد خواسته‌های ناشناخته برابر با اعداد موردنظر یا مکان‌ها و مقادیر نشت دقیق مشخص شود. این توضیحات توانایی این روش را برای تشخیص محل و اندازه نشت‌ها نشان می‌دهد (Nasirian et al., 2013). استفاده از الگوریتم ژنتیک در طراحی بهینه‌سازی طراحی شبکه‌های توزیع آب با کمترین هزینه در سایر پژوهش‌های دیگر نیز کارآمد بوده است. این امر نشان‌دهنده مناسب بودن این الگوریتم برای بهینه‌سازی شبکه آب‌رسانی آب شرب بیشتر مناطق دارد (Dragan et al., 1997؛ مقدم و همکاران، ۱۳۹۳). هم‌چنین استفاده از الگوریتم ژنتیک نسبت به سایر مدل‌های بهینه‌سازی همانند الگوریتم‌های NSGA-II و SPEA-II که کارایی مناسبی در حل مسائل بهینه‌سازی مهندسی توزیع آب دارند دارای برتری است (یزدی، ۱۳۹۴). این موضوع نشان‌دهنده انتخاب درست روش این تحقیق است.

۷- مراجع

افتخاری، م.، و شبانی گیو، ا.، (۱۳۹۷)، *نگرشی بر مدل‌های عددی آب زیرزمینی*، انتشارات متخصصان آینده، ۱۷۰ ص.

امیررضائیه، ع.، و یکانی مطلق، ی.، (۱۳۹۱)، "طراحی بهینه‌سازی شبکه‌های توزیع آب با استفاده از الگوریتم‌ژنتیک (مطالعه موردی: شهر گردکشانه)"، *همایش ملی مهندسی آب و فاضلاب، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته کرمان، کرمان*.

برزگری حاجی آبادی، م.، و قزل‌سوفلو، ع.ع.، (۱۳۹۴)، "بهینه‌سازی شبکه توزیع آب شهری با استفاده از الگوریتم ژنتیک (مطالعه موردی شهر سلامی)"، *دهمین سمپوزیوم پیشرفت‌های علوم و تکنولوژی*، مؤسسه آموزش عالی خاوران، مشهد.

خلیفه، س.، اسماعیلی، ک.، و خلیفه، ح.، (۱۳۹۷)، "بهینه‌سازی شبکه توزیع آب با رویکرد بیشینه‌سازی سود (مطالعه موردی: هماشهر استان کرمان)"، *نشریه علوم و مهندسی آب و فاضلاب*، ۳(۲)، ۳۵-۴۳.

طباطبایی، س.م.، شهیدی، ع.، و هاشمی، س.ر.، (۱۳۹۶)،

"بررسی الگوریتم ژنتیک و کاربردهای آن در مهندسی و مدیریت منابع آب"، *دو فصلنامه علمی و تخصصی مهندسی آب*، ۴(۲)، ۷۴-۸۸.

مقدم، ع.، علیزاده، ا.، ضیائی، ع.، حسینی، ف.، و فلاح هروی، د.، (۱۳۹۳)، "افزایش سرعت همگرایی در بهینه‌سازی شبکه‌های توزیع آب با استفاده از الگوریتم ژنتیک با آشفتگی سریع"، *نشریه آب و خاک*، ۲۸(۱)، ۲۲-۳۴.

یزدی، ج.، (۱۳۹۴)، "توسعه الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه مبتنی بر تجزیه با استفاده از عملگرهای الگوریتم ژنتیک به‌منظور طراحی بهینه شبکه‌های توزیع آب"، *نشریه هیدرولیک*، ۱۰(۳)، ۲۷-۴۰.

Alperovits, E., and Shamir, U., (1977), "Design of optimal water distribution systems", *Water Resources Research*, 13(6), 885-900.

Cunha, M., and Sousa, J., (1999), "Water distribution network design optimization: Simulated Annealing Approach", *Journal of Water Resources Planning and Management*, 125(4), 215-221.

Dandy, G.C., Simpson, A.R., and Murphy, L.J., (1996), "An improved Genetic Algorithm for pipe network optimization", *Water Resources Research*, 32(1), 449-458.

Eusuff, M.M., and Lansey, E.K., (2003), "Optimization of water distribution network design using the shuffled Frogleaping Algorithm", *Journal of Water Resources Planning and Management*, 129(3), 210-225.

Geem, Z.W., (2006), "Optimal cost design of water distribution networks using harmony search", *Optimization and Engineering*, 38(3), 259-280.

Halhal, D., Walters, G.A., Ouazar, D., and Savic, D.A., (1997), "Water network rehabilitation with Structured Messy Genetic Algorithm". *Journal of Water Resources Planning and Management*, 123(3), 137-146.

Karaboga, D., and Basturk, B., (2007), "A powerful and efficient algorithm for numerical function optimization: artificial bee colony (ABC) algorithm", Journal *of Global Optimization*, 39, 459-471.

Lin, M.D., Liu, Y.H., Liu, G.F., and Chu, C.W., (2007), "Scatter search heuristic for least-cost design of water distribution networks", *Engineering Optimization*, 39(7), 857.

Nasirian, A., Maghrebi, M., and Yazdani, S., (2013), "Leakage detection in water distribution network based on a New Heuristic Genetic Algorithm model", *Journal of Water Resource and Protection*, 5, 294-303.

Savic, D.A. and Walters, G.A., (1997), "Genetic Algorithms for least-cost design of water distribution networks", *Journal of Water Resources Planning and Management*, 123(2), 67-77.

Sherri, F., Mahvi, A.H., Toloie Eshlaghy, A., and Hassani, A.H., (2018), “Increasing convergence rate in two-objective optimization of water distribution network with engineering judgment”, *Environmental Health Engineering and Management Journal*, 5(3), 143-151.