2022, Vol.9, No.3, Pages 97 to 106
Journal of Water and Sustainable Development

سال نهم، شماره ۳، ۱۴۰۱، صفحات ۹۷ تا ۱۰۶
نشریه آب و توسعه پایدار

Article Type:Applied Article

نوع مقاله: پژوهش کاربردی

Optimal Design of Urban Water Distribution Network Using Improved Artificial Bee Colony Algorithm

M. R. Najarzadegan[1], R. Moeini[2*]

1,2-MSc Student and Associate Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Civil Engineering and Transportation, University of Isfahan, Iran.

*(Corresponding Author Email: r.moeini@eng.ui.ac.ir)

Received: 11-05-2022 Revised: 12-07-2022
Accepted: 14-07-2022 Available Online: 21-12-2022

بهینه‌سازی طراحی شبکه توزیع آب شهری با استفاده از الگوریتم ارتقا یافته کلونی زنبورعسل مصنوعی

محمدرضا نجارزادگان[1]، رامتین معینی[2*]

۱و۲- به ترتیب دانشجوی کارشناسی ارشد محیط‌زیست-آب و فاضلاب و دانشیار، گروه عمران، دانشکده مهندسی عمران حمل و نقل، دانشگاه اصفهان، ایران.

*(نویسنده مسئول، E-Mail: r.moeini@eng.ui.ac.ir)

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۲/۲۱ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۰۴/۲۱
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۴/۲۳ تاریخ انتشار: ۱۴۰۱/۰۹/۳۰

Abstract

Urban Water Distribution Networks are the most important and costly network in each city. The Major part of the urban water distribution network costs is related to the executive progress and purchase of water distribution network accessories. Therefore, the cost of the water distribution network can be reduced by reducing and optimizing this part. For this purpose, the problem of water distribution network design should be defined as an optimization model and solved it using an efficient method. Nowadays, Meta-heuristics algorithms are the most efficient methods for solving optimization models. In this research, two sample problems mean Schaake and Lai (1969) water distribution network and NEWYORK city are modeled in the EPANET software and solved using an improved version of the artificial bee colony algorithm that is called MATLAB software. To evaluate the efficiency of the proposed algorithm, the results are presented and compared with the basic and standard version of the artificial bee colony algorithm and other results. Using an improved artificial bee colony algorithm for the two-loop network (NEWYORK), the objective function value and computational cost are 419000 $ (38.13 M$) and 2800 (3800), respectively. A comparison of the results shows that the construction and computed costs are reduced compared with the result of the standard version. Therefore, this algorithm is an efficient algorithm for solving optimization problems such as the design of a water distribution network.

Keywords: Artificial Bee Colony Algorithm, Water Distribution Network, EPANET, Optimum Design, Pipe Diameter.

چکیده

شبکه‌های توزیع آب شهری از زیرساخت‌های مهم و پر هزینه شهری می‌باشند. بخش زیادی از هزینه‌های شبکه توزیع آب شهری، مربوط به فرآیندهای اجرایی و خرید متعلقات شبکه توزیع آب است. ازاین‌رو، با کاهش و بهینه‌سازی آن، هزینه شبکه توزیع آب کاهش می‌یابد. به این منظور، لازم است مساله طراحی شبکه توزیع آب شهری در چارچوب یک مساله بهینه‌سازی بررسی و با استفاده از یک روش کارآمد حل شود. الگوریتم‌های فراکاوشی از جمله روش‌های کارآمد برای حل مدل‌های بهینه‌سازی می‌باشند. در این تحقیق، دو مثال نمونه یعنی شبکه توزیع آب دوحلقه‌ای تحقیق اسکاک و لای و شبکه توزیع آب شهر نیویورک در محیط نرم‌افزار EPANET مدل‌سازی و با استفاده از نسخه اصلاحی الگوریتم بهینه‌سازی کلونی زنبورعسل مصنوعی در محیط نرم‌افزار MATLAB حل می‌شوند. به‌منظور بررسی کارایی الگوریتم پیشنهادی، نتایج با نسخه پایه و استاندارد الگوریتم کلونی زنبورعسل مصنوعی و سایر نتایج موجود برای دو شبکه شاخص به‌نام‌های دوحلقه‌ای و شهر نیویورک مقایسه می‌شود. برای شبکه‌های دوحلقه‌ای و شهر نیویورک مقدار تابع هدف به‌ترتیب مقدار تابع هدف ۴۱۹۰۰۰ دلار و ۳۸/۱۳ میلیون دلار و هزینه‌محاسباتی به ترتیب مقادیر ۲۸۰۰ و ۳۸۰۰ با استفاده از الگوریتم اصلاحی زنبورعسل مصنوعی به‌دست می‌آید. بررسی نتایج نشان‌دهنده کاهش هزینه‌های احداث و هزینه‌های محاسباتی این الگوریتم در مقایسه با نسخه استاندارد می‌باشد. بنابراین، این الگوریتم، یک الگوریتم کارآمد برای حل مسائل بهینه‌سازی به ویژه طراحی شبکه توزیع آب می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: الگوریتم اصلاحی کلونی زنبورعسل، شبکه توزیع آب، EPANET، طراحی بهینه، قطرلوله.

How to cite this article: Najarzadegan M. R. and Moeini R. 2022. Optimal Design of Urban Water Distribution Network Using Improved Artificial Bee Colony Algorithm. Journal of Water and Sustainable Development, 9(3): 97-106. doi: http://dx.doi.org/10.22067/jwsd.v9i3.2205.1143

مقدمه

آب یک عنصر حیاتی و کلیدی در توسعه اقتصادی و اجتماعی یک کشور است که لازم است با کیفیت مناسب و براساس نیاز آبی به دست مصرف‌کنندگان ازجمله مصرف‌کنندگان شهری برسد. به‌این‌منظور سیستم‌های انتقال و توزیع آب طراحی و احداث می‌شود. سیستم‌های انتقال و توزیع آب، ازجمله شریان‌های حیاتی و زیرساخت‌های مهم یک کشور به‌ویژه در راستای توسعه اقتصادی و صنعتی است(Mehta و همکاران، ۲۰۱۷).

در حالت کلی، شبکه‌های توزیع آب شهری، یک سیستم انتقال و توزیع آب شرب از مخزن (ها) به مصرف‌کنندگان است. هدف اصلی هر شبکه توزیع آب، رساندن آب به مصرف‌کنندگان میزان مورد نیاز و با کیفیت مطلوب براساس استانداردهای موجود می‌باشد. در حالت کلی، احداث شبکه‌ها و بهره‌برداری از آنها، بسیار هزینه‌بر است. علاوه‌برآن با گذشت زمان و افزایش عمر تجهیزات و لوله‌های شبکه‌های توزیع آب، قابلیت اعتماد شبکه کاهش یافته و با هر تغییر در شرایط بهره‌برداری یا فرسودگی عمر لوله‌ها، آبرسانی به مقدار کافی و با کیفیت مناسب دچار ناهماهنگی می‌شود. بنابراین مسأله طراحی و بهره‌برداری بهینه شبکه توزیع آب، مورد توجه محققین این حوزه می‌باشد (Moeini و Mousavi Moulaei، ۲۰۱۸).

بررسی سوابق تحقیقاتی نشان می‌دهد، تحقیقات متعددی در زمینه بهینه‌سازی طراحی و بهره‌برداری شبکه توزیع آب شهری انجام‌شده‌است که در ادامه این بخش به مهمترین انها اشاره شده است. هدف اصلی‌این تحقیقات، کاهش هزینه‌های احداث و بهره‌برداری شبکه، یا بهبود وضعیت شبکه توزیع آب و یا افزایش قابلیت‌اطمینان شبکه توزیع آب می‌باشد. به‌این‌منظور این مسأله در قالب یک مسأله بهینه‌سازی، تعریف و با استفاده‌از روش‌های مناسب حل می‌شود. روش‌های حل مسائل بهینه‌سازی درحالت کلی، در چهاردسته برنامه‌ریزی خطی، برنامه‌ریزی غیرخطی، برنامه‌ریزی پویا و الگوریتم‌های فراکاوشی تقسیم‌بندی می‌شوند. هر یک از این دسته روش‌ها مزایا و محدودیت‌های خاص خود را دارند. دراین بین الگوریتم‌های فراکاوشی مزایای بیشتری نسبت به سایر روش‌ها دارند، بنابراین امروزه استفاده از آن‌ها بیش از سایر روش‌ها مورد توجه محققین قرار گرفته‌است. الگوریتم‌های فراکاوشی دسته‌ای از روش‌هایی هستند که بر مبنای رفتارطبیعی موجودات زنده و پدیده‌های واقعی معرفی می‌شوند. یکی از مهمترین مزایای‌این دسته روش‌ها، توانایی یافتن جوابی نزدیک به جواب‌بهینه و با هزینه‌محاسباتی مناسب می‌باشد. (معینی و سقراطی، ۱۳۹۹)

افشار و غفوری (۱۳۸۲) با استفاده از دو برنامه بهینه‌سازی به‌نام‌های DOT و DOC، ازروش‌های برنامه‌ریزی ریاضی، برای حل مسأله طراحی بهینه شبکه‌های آب و سیستم پمپاژ استفاده نمودند. شاهی و همکاران (۱۳۹۲) با ارائه یک مدل بهینه‌سازی به‌نام الگوریتم تکامل تفاضلی (DE)[1]، برای حل مسأله بهینه‌سازی سیستم توزیع آب شهر تربت جام، استفاده نمودند. نتایج نشان‌دهنده برتری الگوریتم پیشنهادی نسبت به الگوریتم بهینه‌سازی جامعه مورچگان بود. خلیفه و همکاران (۱۳۹۸) با استفاده از الگوریتم ژنتیک و نرم‌افزار تحلیل هیدرولیکی WaterGems مسأله بهینه‌سازی طراحی شبکه توزیع آب شهر رویدر استان هرمزگان را به‌منظور کاهش هزینه‌ها حل نمودند. نتایج نشان‌دهنده کاهش هزینه‌های شبکه در حدود ۱۲ تا ۱۵ درصد از هزینه کل پروژه بود. افتخاری و اکبری (۱۳۹۹) با استفاده‌از الگوریتم ژنتیک و نرم‌افزار تحلیل هیدرولیکی WaterGems، مسأله بهینه‌سازی شبکه توزیع آب شهر مشهد را حل نمودند. نتایج نشان‌دهنده کاهش ۱۴ درصدی هزینه‌های کل پروژه با استفاده از روش پیشنهادی بود.

علاوه‌برآن Savic و Walters (۱۹۹۷) با ارائه نسخه اصلاحی الگوریتم ژنتیک، مسأله بهینه‌سازی شبکه توزیع آب را حل نمودند. مسائل شبکه توزیع آب دوحلقه‌ای و شبکه توزیع آب شهر هانوی به‌عنوان مطالعه موردی انتخاب شد. در این تحقیق، با اعمال محدودیت و کاهش فضای جست‌وجو، کارایی روش پیشنهادی نسبت به الگوریتم پایه و استاندارد بهبود یافت. همچنین آن‌ها با ارائه یک مدل به‌نام GANET و استفاده از الگوریتم ژنتیک استاندارد، مسأله طراحی شبکه توزیع آب را حل نمودند. Lippai و همکاران (۱۹۹۹) با استفاده‌از الگوریتم جست‌وجو ممنوعه[2] و استفاده از نرم‌افزار تحلیل هیدرولیکی EPANET مسأله بهینه‌سازی شبکه توزیع آب را حل نمودند. از اطلاعات شبکه توزیع آب شهر شهر نیویورک به‌عنوان مطالعه موردی استفاده شد. نتایج نشان‌دهنده کاهش هزینه‌های احداث شبکه بود. Cunha و Sousa (۱۹۹۹) بااستفاده‌از الگوریتم نورد شبیه‌سازی شده[3]، مسأله بهینه‌سازی طراحی شبکه توزیع آب را حل نمودند. شبکه توزیع آب نمونه دوحلقه‌ای و هانوی به‌عنوان مطالعه موردی انتخاب شد. نتایج نشان‌دهنده کاهش هزینه محاسباتی و زمان آنالیز بود. Wu و همکاران (۲۰۰۱) با استفاده از الگوریتم ژنتیک مسأله بهینه‌سازی طراحی شبکه توزیع آب نمونه دو حلقه‌ای، هانوی و شهر شهر نیویورک را حل نمودند. نتایج نشان‌دهنده کاهش هزینه‌های محاسباتی در مقایسه با سایر روش‌های موجود بود. Maier و همکاران (۲۰۰۳) مسأله بهینه‌سازی طراحی شبکه توزیع آب شهر شهر نیویورک را با استفاده‌از الگوریتم جامعه مورچگان[4] حل نمودند. نتایج روش پیشنهادی نشان‌دهنده کاهش در حدود ۹ درصد در هزینه‌های احداث شبکه بود. Eusuff و Lansey (۲۰۰۳) با استفاده‌از الگوریتم جهش قورباغه[5] و نرم‌افزار تحلیل هیدرولیکی EPANET مسائل بهینه‌سازی طراحی شبکه توزیع آب دوحلقه‌ای، شهر نیویورک و هانوی را حل نمودند. نتایج نشان‌دهنده کارایی روش پیشنهادی بود. به‌عبارت‌دیگر با استفاده‌از روش پیشنهادی، جوابی با هزینه محاسباتی و زمان محاسبه کمتر حاصل شد. Afshar (۲۰۰۷) مسأله طراحی بهینه شبکه‌های توزیع آب نمونه دوحلقه‌ای و شهر شهر نیویورک را حل کرد و از الگوریتم بهینه‌ساز جامعه مورچگان به‌منظور بهینه‌سازی استفاده نمود. نتایج نشان‌دهنده کارایی روش

پیشنهادی بود. Afshar (۲۰۰۹) مسأله طراحی بهینه شبکه توزیع آب نمونه دوحلقه‌ای و شهر شهر نیویورک را با استفاده از الگوریتم ژنتیک فشرده حل کرد. نتایج نشان‌دهنده کاهش هزینه محاسباتی روش پیشنهادی نسبت به سایر نتایج موجود بود. Tong و همکاران (۲۰۱۱) قطرهای بهینه شبکه نمونه توزیع آب نمونه دوحلقه‌ای را تعیین نمودند. به‌این‌منظور، از الگوریتم بهینه‌سازی جامعه مورچگان استفاده شد. نتایج نشان‌دهنده کارایی مناسب روش پیشنهادی بود. Reca و همکاران (۲۰۱۷) با ارائه نسخه اصلاحی الگوریتم ژنتیک، مسأله بهینه‌سازی شبکه توزیع آب را حل نمودند. مسائل شبکه توزیع آب دوحلقه‌ای و شبکه هانوی به‌عنوان مطالعه موردی انتخاب شد. در این تحقیق، با اعمال محدودیت و کاهش فضای جست‌وجو، کارایی روش پیشنهادی نسبت به الگوریتم پایه و استاندارد بهبود یافت. Shende و Chau (۲۰۱۹) از الگوریتم فراکاوشی جدید به‌نام سیبانت[۶] به‌منظور کاهش هزینه مسائل بهینه‌سازی طراحی شبکه توزیع آب دوحلقه‌ای و شبکه هانوی استفاده نمودند. نتایج نشان‌دهنده کاهش زمان اجرای نرم‌افزار و کاهش هزینه‌های طراحی نسبت به سایر نتایج موجود بود. در نهایت، Heydari و همکاران (۲۰۲۰) مسأله بهینه‌سازی طراحی شبکه توزیع آب شهر ایلام کشور ایران را با استفاده از نسخه توسعه یافته الگوریتم ژنتیک حل نمودند. در این تحقیق، از نرم‌افزار EPANET برای شبیه‌سازی و تحلیل هیدرولیکی استفاده شد. نتایج نشان‌دهنده کاهش هزینه‌های احداث شبکه توزیع آب با استفاده از پلی‌اتیلن و پلی‌پروپن و افزایش ۱۲/۶۱ درصدی هزینه احداث شبکه در صورت استفاده از لوله‌های پلاستیکی تقویت شده با الیاف شیشه بود.

بررسی پیشینه پژوهشی نشان می‌دهد که استفاده از روش‌های هوش مصنوعی در مدل‌سازی، شبیه‌سازی و بهینه‌سازی مسائل حوزه‌های مختلف به‌ویژه در مسائل مهندسی مورد توجه محققین بوده است (Hosseini و همکاران، ۲۰۱۶؛ Sadeghifar و Barati، ۲۰۱۸؛ Kazemi و Barati، ۲۰۲۲). در این راستا، به دلیل قابلیت‌های ویژه الگوریتم‌های فراکاوشی استفاده از آنها در حل بهینه‌سازی و همچنین توسعه الگوریتم‌های اولیه و پایه به‌منظور افزایش کارایی عملکرد آن‌ها مورد توجه محققین می‌باشد. الگوریتم کلونی زنبورعسل مصنوعی (ABC)[۷] از جمله الگوریتم‌های فراکاوشی می‌باشد. در ابتدا، الگوریتم کلونی زنبورعسل مصنوعی را Karaboga و Basturk (۲۰۰۷) معرفی کردند. در ادامه، نسخه‌های اصلاحی مختلف برای‌این الگوریتم پیشنهاد و از آن برای حل توابع ریاضی و مسائل مختلف بهینه‌سازی در حوزه مهندسی پیشنهاد شد. بررسی نتایج نشان‌دهنده عملکرد مناسب این روش نسبت به سایر الگوریتم‌ها در حل مسائل بهینه‌سازی بود (Khetrapal و همکاران، ۲۰۲۰). باتوجه‌به قابلیت‌های الگوریتم کلونی زنبورعسل مصنوعی در حل مسائل بهینه‌سازی و عدم استفاده از آن در حل مسأله طراحی بهینه شبکه توزیع آب شهری، در این تحقیق، از این الگوریتم و نسخه اصلاحی آن برای حل مسأله طراحی بهینه شبکه توزیع آب استفاده شده است. همچنین دو مسأله طراحی شبکه نمونه دوحلقه‌ای و شهر شهر نیویورک با استفاده از این الگوریتم حل شده است. همچنین، با معرفی نسخه اصلاحی این الگوریتم، از آن برای حل این مسائل استفاده و نتایج تجزیه و تحلیل شده است.

مواد و روش‌ها

در این تحقیق از نسخه اصلاحی الگوریتم کلونی زنبورعسل مصنوعی برای حل مسأله طراحی بهینه شبکه توزیع آب استفاده و نتایج با نسخه اولیه و استاندارد، مقایسه شده است. بنابراین، در این بخش توضیحاتی درباره این الگوریتم‌ها ارائه شده است.

• الگوریتم کلونی زنبورعسل مصنوعی

الگوریتم کلونی زنبورعسل مصنوعی از جمله الگوریتم‌های بهینه‌سازی فراکاوشی مبتنی بر جست‌وجو هوشمند است که اولین بار توسط Karaboga و Basturk (۲۰۰۷) ارائه شد. رفتار طبیعی زنبورعسل درتعامل و جست‌وجو غذا توسط زنبورهای عسل، مبنای این الگوریتم می‌باشد. در حالت کلی، زنبورهای عسل به سه دسته، ناظر، کارگر و اکتشاف تقسیم می‌شوند. زنبورعسل کارگر در اطراف منطقه کندو در جست‌وجو منبع غذایی به‌طور تصادفی هستند. پس از انتخاب منبع غذایی با مراجعه به کندو و با همراه کردن زنبورهای اکتشاف، به سوی منبع غذایی حرکت می‌کنند. در این فرآیند، زنبورهای ناظر با در نظر گرفتن بیشترین احتمال یافتن منابع غذایی و کیفیت ماده غذایی، به سوی منابع غذایی حرکت می‌کنند. علاوه‌بر این، زنبورهای اکتشاف بدون در نظر گرفتن اطلاعات دو دسته اول زنبورها، در جست‌وجو منابع غذایی هستند تا همه حالت‌ها و شرایط منابع غذایی بررسی شود (Mirbod و همکاران، ۲۰۱۷؛ معینی و سقراطی، ۱۳۹۹).

به‌طور خلاصه، در الگوریتم کلونی زنبورعسل، جست‌وجوی منابع غذایی شامل سه مرحله اصلی می‌باشد.

۱- جست‌وجو توسط زنبورهای کارگر و حرکت به سوی منابع غذایی (تغذیه) و اندازه‌گیری کیفیت شهد

۲- تعیین مواد غذایی توسط زنبوران ناظر با به اشتراک‌گذاری اطلاعات زنبورهای کارگر و مشخص شدن مقدار شهد هر منبع

۳- حرکت زنبورهای اکتشاف به‌سوی منابع احتمالی غذایی (Mirbod و همکاران، ۲۰۱۷).

در این الگوریتم، موقعیت احتمالی منبع‌غذایی تعیین شده توسط زنبورها نشان‌دهنده جواب بهینه مسأله می‌باشد. همچنین، یک منبع مناسب، کیفیت شهد بهتر و کمترین مسافت تا کندو را دارد. در این الگوریتم، تعداد زنبورهای کارگر و ناظر برابر می‌باشد. با بررسی هر جواب احتمالی، براساس تابع‌هدف مسأله، کیفیت شهد منبع‌غذایی محاسبه می‌شود. به‌این‌منظور، جواب اولیه به‌صورت تصادفی تولیدشده و ادامه جواب‌های جدید، با رابطه (۱) تعیین می‌شود.

$$v_{ij} = x_{ij} + \varphi_{ij}(x_{ij} - x_{kj}) \qquad (۱)$$

در این رابطه، v منبع غذایی جدید، نمایه k و i شمارنده منبع غذایی، نمایه j شمارنده متغیرها، φ عدد تصادفی بین [۱،۱-] و Xij موقعیت متغیر jام از منبع غذایی iام است. در هر تکرار، هزینه جواب جدید ساخته شده، با استفاده از توابع هدف محاسبه می‌شود. باتوجه‌به مقادیر تابع هدف، جواب‌ها با بهترین جواب ذخیره شده قبلی، مقایسه شده و درصورتی‌که این جواب از جواب قبلی بهتر باشد، جایگزین جواب قبلی می‌شود. این مرحله، وظیفه زنبورهای ناظر است. این دسته از زنبورها با جست‌وجو منبع غذایی با کیفیت بیشتر (با فاصله کمتر)، جواب‌بهینه (منبع غذایی برتر) را از بین جواب‌های موجود (منابع غذایی در دسترس) انتخاب می‌کنند. به‌عبارت‌دیگر، زنبورهای کارگر تمامی جواب‌ها (منابع غذایی) را جست‌وجو و اطلاعات را در اختیار زنبورهای ناظر می‌گذارند و دسته زنبورهای ناظر منابع غذایی با کیفیت بهتر (جواب بهینه مسأله) را انتخاب می‌کنند (Mirbod و همکاران، ۲۰۱۷؛ معینی و سقراطی، ۱۳۹۹).

در این الگوریتم، احتمال انتخاب منبع غذایی i ام براساس رابطه (۲) محاسبه‌می‌شود.

$$P_i = \frac{fit_i}{\sum_{I=1}^{SN} fit_i} \qquad (۲)$$

در رابطه بالا، Pi احتمال منبع غذایی iام، fit_i مقدار تابع هدف برای منبع غذایی iام و SN تعداد منابع غذایی می‌باشد. باتوجه‌به مقادیر احتمال محاسباتی، هر منبع غذایی توسط زنبور ناظر بررسی و منبع مناسب انتخاب می‌شود. براین اساس، احتمال اینکه یک منبع در جست‌وجوهای هر تکرار چندین بار بررسی شود، وجود دارد. روند یاد شده تا رسیدن به شرط توقف الگوریتم ادامه می‌یابد (Mirbod و همکاران، ۲۰۱۷).

• الگوریتم اصلاحی کلونی زنبورعسل مصنوعی

در این بخش، به‌منظور افزایش عملکرد الگوریتم استاندارد کلونی زنبورعسل مصنوعی، نسخه اصلاحی آن معرفی می‌شود. در حالت کلی، ساختار نسخه اصلاحی بر مبنای نسخه اولیه و پایه بوده اما برخی از جزئیات، در راستای افزایش عملکرد، اصلاح شده است. در نسخه اصلاحی، تعداد زنبورهای کارگر و ناظر برابر نبوده و به نسبت‌های متفاوت تقسیم می‌شود. علاوه‌براین، در نسخه اصلاحی، عملکرد زنبورهای ناظر در انتخاب و به‌روزرسانی منبع غذایی متفاوت می‌باشد که جزئیات آن در ادامه ارائه می‌شود. به‌منظور بهبود سرعت همگرایی الگوریتم کلونی زنبورعسل، دو ویژگی جدید پیشنهاد شده است (Mirbod و همکاران، ۲۰۱۷).

در الگوریتم اصلاحی، در ابتدا، رابطه (۱) بازنویسی شده و بنابراین ضریب شعاع همگرایی در رابطه (۳) منظور می‌شود. در رابطه بالا، Rc_i ضریب مجاورت همگرایی در تکرار iام است که براساس رابطه (۴) محاسبه می‌شود و سایر پارامترها پیش از این، تعریف شده است.

$$v_{ij} = x_{ij} + Rc_i \times \varphi_{ij}(x_{ij} - x_{kj}) \qquad (۳)$$

$$Rc_i = F_r \times Rc_{i-1} \qquad (۴)$$

در رابطه بالا، F_r ضریبی بین صفر و یک بوده و ضریب شوک نام‌گذاری شده است. براساس رابطه جدید پیشنهادی، دامنه جست‌وجوها محدود شده و در نتیجه زنبورها، در زمان کمتر، منبع غذایی با کیفیت‌تر را شناسایی می‌کنند. به‌این‌ترتیب اگر زنبورها نتوانند در تکرار معین، بهترین راه‌حل را بهبود بخشند، این عملگر به اصلاح برخی از منابع غذایی می‌رسد و با حذف نیمی از بدترین جواب‌ها و جایگزینی به‌طور تصادفی، مایه بهبود کیفیت منابع غذایی می‌شود. در واقع این عملگر به‌منظور افزایش توانایی الگوریتم برای جلوگیری از گیر افتادن در جواب‌های بهینه محلی در فضای جست‌وجوی مسأله تعریف شده است. علاوه‌برآن، ضریب همگرایی در جست‌وجو نیز برای این الگوریتم تعریف می‌شود. به‌این‌صورت که با استفاده از این عملگر، دامنه جست‌وجو زنبورها در تکرارهای مختلف، محدودتر می‌شود. بنابراین موقعیت غذایی جدید به دلیل تغییرات محدود در موقعیت غذایی قبلی قرار نمی‌گیرد بلکه پس از تکرارمعین به جواب بهینه، منتهی می‌شود. در این الگوریتم از پارامترهایی به‌نام limit به مفهوم حداکثر تعداد مجاز عدم بهبود منبع غذایی و ndim تعداد متغیرهای مستقلی که در هر مرحله پس از ایجاد راه‌حل جدید با راه‌حل اولیه مقایسه شوند، به‌منظور تسریع همگرایی استفاده شده است (Mirbod و همکاران، ۲۰۱۷).

• مسأله طراحی بهینه سیستم توزیع آب

در این بخش، مدل بهینه‌سازی مسأله طراحی سیستم توزیع آب شهری معرفی می‌شود. به‌این‌منظور لازم است، متغیرتصمیم مسأله، تابع هدف و محدودیت‌های مسأله تعریف شوند. در این مسأله، متغیر تصمیم، قطر لوله‌ها می‌باشد. توابع هدف مختلفی از جمله حداقل‌سازی هزینه‌های احداث و بهره‌برداری و یا حداکثرسازی قابلیت‌اطمینان و یا تاب‌آوری شبکه را می‌توان برای این مسأله تعریف نمود. در این تحقیق، تابع هدف، حداقل‌سازی هزینه احداث (خرید) شبکه توزیع آب تعریف شده است. محدودیت‌های این مسأله شامل معادله پیوستگی در گره‌ها، افت انرژی در حلقه‌ها، سرعت و فشار حداقل و حداکثر و قطرتجاری لوله‌ها می‌باشد. فرم ریاضی مسأله بهینه‌سازی به شرح رابطه‌های (۵ تا ۱۱) می‌باشد (Moeini و Mousavi Moulaei، ۲۰۱۸).

$$MinimizeCT = \sum_{i=1}^{N} c_i L_i \qquad (۵)$$

Subjected to:

$$\sum_{i \in in(k)} q_i - \sum_{j \in out(k)} q_j = Q_k \; \forall k = 1,2,3,\ldots,K \qquad (۶)$$

$$\sum J_i = 0, i \in p, \forall p = 1,2,3,\ldots,P \qquad (۷)$$

$$J_i = \mu L_i \left(\frac{q_i}{ch_i}\right)^{\lambda} d_i^{\lambda}, \forall i = 1,2,3,\ldots,N \qquad (۸)$$

$$H_{min} \le H_K \le H_{max}, \forall k = 1,2,3,\ldots,K \qquad (۹)$$

$$d_i \in D, \forall i = 1,2,3,\ldots,N \qquad (۱۰)$$

$$V_{min} \le V_i \le V_{max}, \forall i = 1,2,3,\ldots,N \qquad (۱۱)$$

که دراین روابط، C_T کل هزینه احداث شبکه توزیع آب و تابع هدف، L_i طول لوله iام، c_i هزینه واحد طول لوله iام، N برابر کل تعداد لوله‌های موجود در شبکه توزیع آب، Q_k دبی مورد نیاز در گره مصرف شماره k، q_i دبی لوله شماره iام، in(k) لوله‌های ورودی به گره شماره k، out_k لوله‌های خروجی از گره k، K کل تعداد گره‌های موجود در شبکه توزیع آب، J_i افت هد در لوله شماره i، P کل تعداد حلقه‌های شبکه توزیع آب، d_i قطر لوله i، ch_i ضریب هیزن ویلیامز لوله iام، γ، μ و λ ضرایب ثابت معادله هیزن ویلیامز، H_k هد گره k، H_{max} حداکثر هد مجاز در هر گره مصرف، H_{min} حداقل هد مجاز در هر گره مصرف و D لیست قطرهای تجاری موجود در بازار، V_i سرعت جریان در لوله iام، V_{max} حداکثر سرعت مجاز در لوله و V_{min} حداقل سرعت‌مجاز در لوله است.

مدل تعریف‌شده برای مسأله طراحی بهینه شبکه توزیع آب، یک مدل محدود شده‌است که روش‌های متعددی برای اعمال محدویت‌های حل آن پیشنهاد شده است. در این تحقیق از روش ضریب جریمه ثابت برای حل آن استفاده می‌شود. به‌این‌منظور تابع هدف جدیدی یعنی توابع هدف جریمه‌دار شده، به شرح روابط ذیل تعریف شده است:

$$c_p = \sum_{i=1}^{N} c_i l_i + \alpha_p (CSV_V + CSV_H) \quad (۱۲)$$

$$CSV_V = \sum_{i=1}^{N} (1 - \frac{v_i}{v_{min}})^2 + \sum_{i=1}^{N} (\frac{v_i}{v_{max}} - 1)^2 \quad (۱۳)$$

$$CSV_H = \sum_{k=1}^{K} (1 - \frac{H_k}{H_{min}})^2 + \sum_{k=1}^{K} (\frac{H_k}{H_{max}} - 1)^2 \quad (۱۴)$$

در رابطه بالا c_p تابع هدف جریمه‌دار شده، α_p ضریب جریمه (عدد بسیار بزرگ)، CSV_V مقدار تخلف از محدودیت سرعت جریان در لوله‌ها و CSV_H مقدار تخلف از محدودیت فشار گره‌ای است. در صورتی‌که مقادیر مولفه‌های داخل پرانتز، پارامترهای CSV_V و CSV_H منفی باشد، مقدار آن صفر منظور شده‌است (Moeini و Musavi moulaei، ۲۰۱۸).

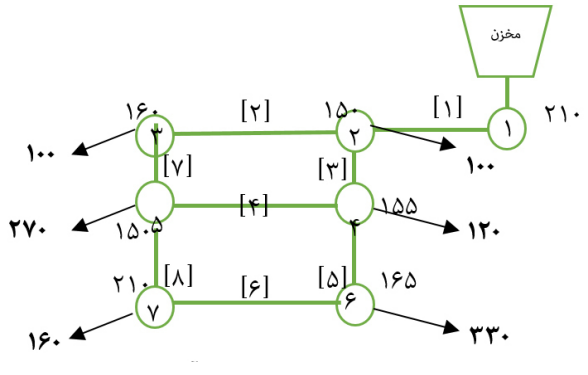
در این تحقیق، یک مدل شبیه‌ساز-بهینه‌ساز به‌منظور طراحی بهینه سیستم توزیع آب شهری پیشنهاد شده است. در مدل پیشنهادی از نرم‌افزار EPANET به‌عنوان شبیه‌ساز و از نسخه‌های استاندارد و اصلاح شده الگوریتم زنبورعسل مصنوعی به‌عنوان بهینه‌ساز استفاده شده است. به‌این‌منظور، کدنویسی الگوریتم در نرم‌افزار متلب انجام و با استفاده از کدهای دستوری مربوط، به نرم‌افزار شبیه‌ساز EPANET متصل شده است. در مدل پیشنهادی با انتخاب قطر لوله به‌عنوان متغیرتصمیم، قطر لوله‌ها توسط الگوریتم اصلاحی کلونی زنبورعسل تعیین و به‌عنوان ورودی مدل شبیه‌ساز EPANET در نظر گرفته شد. با تحلیل شبکه در نرم‌افزار EPANET با استفاده‌از روابط پیوستگی و افت انرژی، خصوصیات هیدرولیکی شبکه تعیین و مقادیر پارامترهای هیدرولیکی (فشار و سرعت) با مقادیر استاندارد، مقایسه شد. این روند تا رسیدن به شرط توقف و تعیین قطرهای بهینه ادامه یافته است.

ازجمله نرم‌افزارهای کاربردی و توانمند در شبیه‌سازی و تحلیل شبکه توزیع آب، می‌توان به نرم‌افزار EPANET اشاره نمود. با استفاده‌از ابزار اتصالی و کدهای دستوری، اتصال نرم‌افزار EPANET با سایر نرم‌افزارها ازجمله متلب (MATLAB) امکان‌پذیر است. بنابراین، تحلیل شبکه‌های بزرگ مقیاس نیز به راحتی امکان‌پذیر است (Metha و همکاران، ۲۰۱۷).

- **مطالعه موردی**

در این تحقیق، به‌منظور بررسی کارایی روش پیشنهادی، دو مسأله بنچ مارک (نمونه)، شبکه دوحلقه‌ای و شهر نیویورک به‌عنوان مطالعه موردی انتخاب و با استفاده از روش پیشنهادی حل شد. برخی از اطلاعات این دو شبکه در این بخش معرفی شده است.

شبکه توزیع آب دوحلقه‌ای، از ۲ حلقه، ۷ گره و ۸ لوله تشکیل‌شده‌است که با استفاده از مخزنی با هد ثابت ۶۸۹ فوت (۲۱۰ متر) آب آن تامین می‌شود. جانمایی این شبکه در شکل (۱) ارائه شده است. در این شکل، اعداد داخل کروشه، شمارنده لوله‌ها و اعداد داخل دایره (گره‌ها)، شمارنده گره‌ها است. در این شبکه، طول لوله‌ها همگی ۳۲۸۱ فوت (۱۰۰۰ متر) و ضریب هیزن ویلیامز لوله‌ها مقدار ثابت ۱۳۰ در نظر گرفته شده است. همچنین، حداقل فشار مجاز گره‌ای ۹۸/۴ فوت (۳۰ متر) در نظر گرفته شده است. برای این شبکه، ۱۴ قطر لوله تجاری موجود در بازار و هزینه واحد طول برای هر قطر در جدول (۱) ارائه شده است. سایر اطلاعات شبکه توزیع آب دوحلقه‌ای در جدول (۱) ارائه‌شده‌است. لازم به ذکر است اعداد مجاور گره‌ها، ترازهای ارتفاعی بر حسب متر و اعداد برجسته نیازهای گره‌ای بر حسب مترمکعب بر ساعت می‌باشد (Sckaake و Lai، ۱۹۶۹).



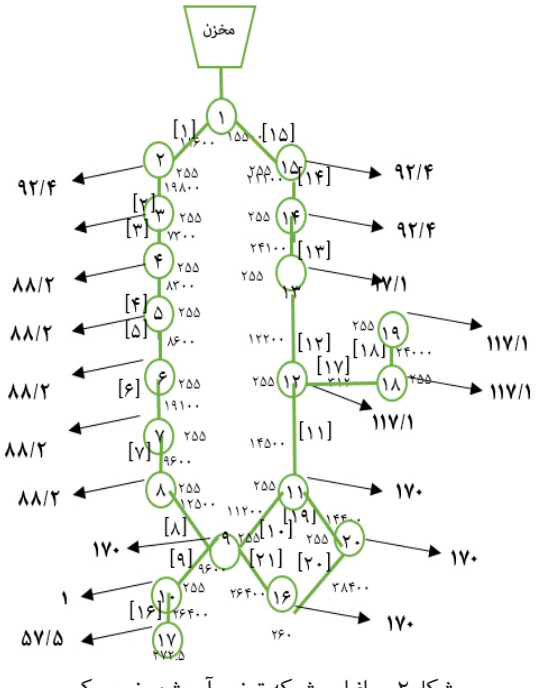
شکل ۱- جانمایی شبکه توزیع آب دوحلقه‌ای

شبکه دوم مطالعه موردی، شبکه توزیع آب شهر شهر نیویورک است که شامل ۲۰ گره، ۲۱ لوله و یک مخزن می‌باشد. جانمایی این شبکه در شکل (۲) ارائه شده است. در این شبکه، هد مخزن مقدار ثابت و برابر با ۳۰۰ فوت (۴۴/۹۱متر) و ضریب هیزن ویلیامز همه لوله‌ها ۱۰۰ در نظر گرفته شده است. در جدول (۳) لیست اطلاعات مورد نیاز به‌منظور مدل‌سازی ارائه شده است. مسأله شبکه توزیع آب شهر

شهر نیویورک با استفاده از قطرهای موجود در جدول (۳) مدل‌سازی و تحلیل شده است. اما مشکل اصلی در این شبکه کمبود فشار در گره‌های مصرف شماره‌های ۱۶، ۱۷، ۱۸، ۱۹ و ۲۰ می‌باشد که با در نظر گرفتن لوله‌هایی به موازات لوله‌های موجود در شبکه توزیع، مشکل عدم تأمین محدویت فشار حداقل در گره‌های یاد شده حل شده است. لیست قطرهای تجاری مورد استفاده به همراه هزینه واحد طول آنها در جدول (۱) ارائه شده است. لازم به ذکر است در شکل (۲) اعداد مجاور گره‌ها، حداقل هد مجاز بر حسب فوت (ft) و اعداد برجسته نیازهای گره‌ای بر حسب فوت مکعب بر ثانیه (cfs/s) و اعداد مجاور لوله‌ها معرف طول لوله‌ها بر حسب فوت می‌باشد. همچنین، قطر لوله‌های ۱ الی ۶ و لوله ۹ برابر ۱۸۰ اینچ (۴۵۷۲ میلی‌متر)، لوله‌های ۷ و ۸ برابر ۱۳۲ اینچ (۳۳۵۲/۸ میلی‌متر)، لوله‌های ۱۰ الی ۱۵ برابر ۲۰۴ اینچ (۵۱۸۱/۶ میلی‌متر)، لوله‌های ۱۶، ۱۷ و ۲۱ برابر ۷۲ اینچ (۱۸۲۸/۸ میلی‌متر) و لوله‌های ۱۸ الی ۲۰ برابر ۶۰ اینچ (۱۵۲۴ میلی‌متر) می‌باشند (Murphy و همکاران، ۱۹۹۳).

جدول ۱- لیست اقطار تجاری و هزینه واحد طول هر قطر موجود

شبکه	هزینه به‌ازای واحدطول هر قطر تجاری	لیست‌قطرهای تجاری موجود
دو حلقه‌ای	۲, ۵, ۸, ۱۱, ۱۶, ۲۳, ۳۲, ۵۰, ۶۰, ۹۰, ۱۳۰, ۱۷۰, ۳۰۰, ۵۵۰ (unit/meter)	۱, ۲, ۳, ۴, ۶, ۸, ۱۰, ۱۲, ۱۴, ۱۶, ۱۸, ۲۰, ۲۲, ۲۴ (in)
شهر نیویورک	۵/۹۳, ۱۳۴, ۱۷۶, ۲۲۱, ۲۶۷, ۳۱۶, ۳۶, ۴۸, ۶۰, ۷۲, ۸۴, ۹۶, ۳۶۵, ۴۱۷, ۴۶۹, ۵۲۲, ۵۷۷, ۶۳۲, ۶۸۹, ۷۴۶, ۸۰۴ (dollar/foot)	۱۰۸, ۱۲۰, ۱۳۲, ۱۴۴, ۱۵۶, ۱۶۸, ۱۸۰, ۱۹۲, ۲۰۴ (in)



شکل ۲- جانمایی شبکه توزیع آب شهر نیویورک

تجزیه و تحلیل نتایج

در این تحقیق، با استفاده از مدل شبیه‌سازی-بهینه‌سازی پیشنهادی، قطر بهینه شبکه‌های دوحلقه‌ای و شهر نیویورک تعیین شده است. در این بخش نتایج به‌دست‌آمده از روش پیشنهادی ارائه شده است. به‌این‌منظور نسخه اصلاحی الگوریتم کلونی زنبورعسل استفاده و نتایج با نتایج الگوریتم پایه و استاندارد کلونی زنبورعسل مقایسه شده است. یادآوری این نکته ضروری است که الگوریتم‌های مورد استفاده، پارامترهای ثابتی دارند که برای تعیین مناسب‌ترین مقدار برای آن لازم است آنالیزحساسیت انجام شود. با انجام آنالیز حساسیت، مقادیر مناسب برای پارامترهای الگوریتم‌ها، در جدول (۲) ارائه شده است. همچنین باتوجه‌به ماهیت تصادفی جواب اولیه الگوریتم‌ها، هر مسأله ۱۰ بار اجرا شده است. باتوجه‌به مقادیر مناسب به‌دست‌آمده برای پارامترهای الگوریتم، در جدول (۲) شبکه‌های دوحلقه‌ای و شهر نیویورک، با استفاده از روش پیشنهادی طراحی شده که نتایج آن، در جدول (۳) ارائه شده است.

مقایسه نتایج نشان‌دهنده آن است که با استفاده از الگوریتم اصلاحی و پایه کلونی زنبورعسل مصنوعی، جواب قابل قبولی برای هر دو مسأله حاصل شده اما عملکرد الگوریتم نسخه اصلاحی الگوریتم مناسب‌تر است. همچنین، هزینه محاسباتی (حاصل‌ضرب جمعیت در تعداد تکرار رسیدن به جواب بهینه) در الگوریتم اصلاحی زنبورعسل مصنوعی از نسخه پایه و استاندارد، کمتر است. به‌عبارت‌دیگر، برای شبکه دوحلقه‌ای و شهر نیویورک، مقادیر هزینه محاسباتی نسخه اصلاحی الگوریتم در مقایسه با نسخه پایه به‌ترتیب ۵۲/۶ درصد و ۱۲/۰۷ درصد کاهش یافته است. مهمترین دلیل آن، تعریف پارامتر شوک در الگوریتم اصلاحی کلونی زنبورعسل مصنوعی است که براین‌اساس دو مفهوم اکتشاف و بهره‌برداری در این الگوریتم تعامل بهتری دارند. علاوه‌برآن در هر ۱۰ بار اجرای مدل، جواب‌شدنی[۸] (موجه) برای مسائل با استفاده از نسخه پایه و اصلاحی الگوریتم کلونی زنبورعسل به‌دست آمده است.

قطر بهینه لوله‌های به‌دست‌آمده با استفاده از نسخه‌های استاندارد و اصلاحی الگوریتم کلونی زنبورعسل مصنوعی، برای هر دو مسأله در جدول‌های (۴ و ۵) ارائه شده است.

نمودار همگرایی حداقل جواب‌های به‌دست‌آمده از نسخه‌های استاندارد و اصلاحی الگوریتم کلونی زنبورعسل مصنوعی (تغییرات هزینه احداث شبکه با افزایش تعداد تکرار الگوریتم) در شکل‌های (۳ و ۴) ارائه شده است. مقایسه نمودارهای همگرایی نشان می‌دهد، سرعت همگرایی جواب‌ها در نسخه اصلاحی الگوریتم بیشتر از نسخه استاندارد الگوریتم می‌باشد. باتوجه‌به نتایج به‌دست‌آمده، عملکرد نسخه اصلاحی الگوریتم زنبورعسل مصنوعی از نسخه استاندارد این الگوریتم مناسب‌تراست. در ادامه، نتایج به‌دست‌آمده

از الگوریتم‌های پیشنهادی با سایر نتایج موجود مقایسه شد. شبکه نمونه توزیع آب دوحلقه‌ای با استفاده از الگوریتم‌های مختلف فراکاوشی ازجمله نسخه‌های مختلف الگوریتم ژنتیک (GA)، الگوریتم بهینه‌سازی جامعه مورچگان (AC)، الگوریتم جهش قورباغه (SF)، الگوریتم ممتیک (MA)، الگوریتم چرخش آب (WCA) و الگوریتم تکاملی تفاضلی (DE) حل شده و جواب بهینه ۴۱۹۰۰۰ برای این مسأله حاصل شده است. هزینه محاسباتی الگوریتم‌های مختلف در حل این مسأله در جدول (۶) ارائه شده است. مقایسه نتایج به‌دست‌آمده، نشان می‌دهد در مقایسه با سایر الگوریتم‌ها، هزینه محاسباتی الگوریتم‌های پیشنهادی، کمتر شده است. علاوه‌برآن، کمترین هزینه محاسباتی با استفاده‌از نسخه اصلاحی الگوریتم کلونی زنبورعسل مصنوعی حاصل شده است. به‌عبارت‌دیگر، با استفاده از نسخه اصلاحی الگوریتم کلونی زنبورعسل مصنوعی، میزان هزینه محاسباتی الگوریتم‌های ژنتیک ساده، ژنتیک سریع، جهش قورباغه، جامعه مورچگان، ممتیک، چرخش آب و تکاملی تفاضلی به‌ترتیب به میزان ۸۹/۲۸٪، ۱۶۶/۶۸٪، ۳۱۲/۶۸٪، ۸۲/۱۴٪، ۳۰۷/۲۲٪، ۶۸۵/۷۲٪ و ۱۷۱/۴۳٪ کاهش یافته است. در مجموع، مقایسه نتایج نشان‌دهنده عملکرد مناسب‌تر الگوریتم‌های پیشنهادی در حل مسأله شبکه توزیع آب دوحلقه‌ای است.

جدول ۲- مقادیر مناسب بهینه پارامترهای الگوریتم‌های استاندارد و اصلاحی کلونی زنبورعسل مصنوعی

مسأله	الگوریتم‌زنبورعسل	تکرار	جمعیت	Limit	ndim	ضریب مجاورت همگرایی	ضریب شوک
دوحلقه‌ای	استاندارد	۶۰	۱۰۰	۸۰	۵	-	-
	اصلاحی	۶۰	۱۰۰	۱۰۰	۷	۳	۰/۹
شهر نیویورک	استاندارد	۸۰	۱۰۰	۱۰۰	۷	-	-
	اصلاحی	۸۰	۱۰۰	۱۰۰	۵	۴	۰/۹

جدول ۳- نتایج به‌دست آمده برای مسائل مورد مطالعه با استفاده از روش پیشنهادی

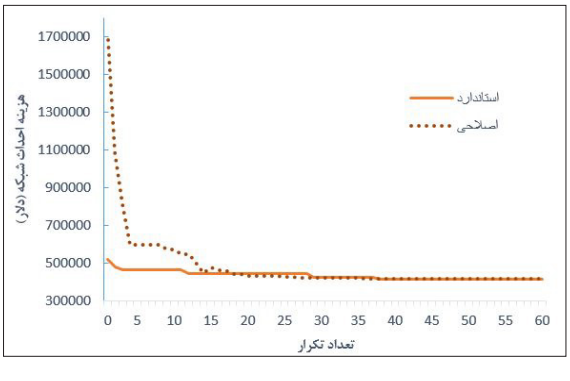
مسأله	الگوریتم‌کلونی زنبورعسل	کمترین‌مقدار تابع‌هدف	میانگین‌مقدار تابع‌هدف	بیشترین‌مقدار تابع‌هدف	انحراف از معیار استاندارد	تعداد جواب شدنی	هزینه محاسباتی
دوحلقه‌ای	استاندارد	۴۱۹۰۰۰	۴۱۹۰۰۰	۴۱۹۰۰۰	۰	۵	۳۸۰۰
	اصلاحی	۴۱۹۰۰۰	۴۱۹۰۲۰/۴۳۴	۴۲۴۰۲۵/۸۴۷	۰/۰۳۰	۵	۱۸۰۰
شهر نیویورک	استاندارد	۳۸۱۲۸۸۰۰	۳۸۴۹۲۹۰	۳۹۲۲۱۱۰۰	۰/۰۱۶۴	۵	۷۱۰۰
	اصلاحی	۳۸۱۲۸۸۰۰	۴۲۸۰۵۲۸	۴۷۴۰۸۲۰۰	۰/۰۷۵۸	۵	۶۲۰۰

جدول ۴-قطر بهینه لوله‌های شبکه توزیع آب دوحلقه‌ای (in)

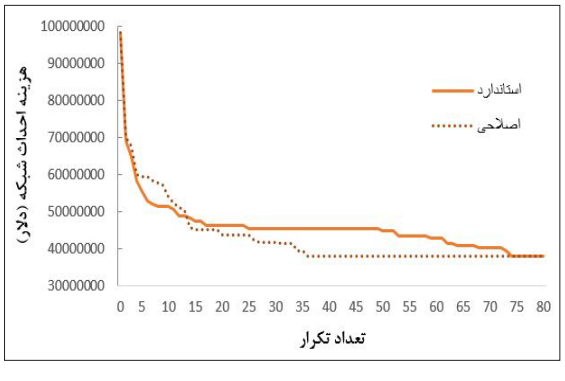
الگوریتم‌کلونی	شماره لوله							
زنبورعسل	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸
استاندارد	۱۸	۱۰	۱۶	۴	۱۶	۱۰	۱۰	۱
اصلاحی	۱۸	۱۰	۱۶	۴	۱۶	۱۰	۱۰	۱

جدول ۵- قطر بهینه لوله‌های موازی موجود در شبکه شهر نیویورک (in)

الگوریتم‌کلونی	شماره لوله						
زنبورعسل	۷	۱۶	۱۷	۱۸	۱۹	۲۱	
استاندارد	۱۳۲	۹۶	۹۶	۸۴	۷۲	۷۲	
اصلاحی	۱۳۲	۹۶	۹۶	۸۴	۷۲	۷۲	



شکل ۳- نمودار همگرایی نسخه‌های استاندارد و اصلاحی الگوریتم کلونی زنبورعسل مصنوعی(شبکه توزیع آب دوحلقه‌ای)



شکل ۴- نمودار همگرایی نسخه‌های استاندارد و اصلاحی الگوریتم کلونی زنبورعسل مصنوعی (شبکه شهر نیویورک)

شبکه توزیع آب شهر شهر نیویورک با استفاده از الگوریتم‌های مختلف فراکاوشی ازجمله الگوریتم ژنتیک، الگوریتم جامعه مورچگان، الگوریتم جهش قورباغه، جست‌وجوی ممنوعه و انواع الگوریتم‌های تکاملی تفاضلی حل شده که مقادیر تابع هدف و هزینه محاسباتی آن در جدول (۷) ارائه شده است. مقایسه نتایج جدول (۷) نشان می‌دهد با استفاده از الگوریتم‌های پیشنهادی تحقیق حاضر، در مقایسه با سایر الگوریتم‌ها، جواب‌های مناسب‌تر (مقدار تابع هدف کمتر) و با هزینه محاسباتی کمتر حاصل شده است که عملکرد نسخه اصلاحی الگوریتم کلونی زنبورعسل مصنوعی در مقایسه با نسخه استاندارد مناسب‌تر است. به‌عبارت‌دیگر، با استفاده از نسخه اصلاحی الگوریتم کلونی زنبورعسل مصنوعی، میزان هزینه احداث شبکه (تابع هدف) در مقایسه با الگوریتم‌های ژنتیک، جامعه مورچگان، ژنتیک فشرده، تکاملی تفاضلی خود تطبیقی و مناسب‌ترین مرجع تکاملی تفاضلی[۹] به ترتیب به اندازه ۶/۰۱٪، ۱/۷۶٪، ۱/۳۴٪، ۱/۳۴٪ و ۱/۳۴٪ کاهش یافته است.

در مجموع، بررسی نتایج حل مسائل مطالعه موردی اول و دوم یعنی شبکه نمونه توزیع آب دو حلقه‌ای و شبکه شهر نیویورک با استفاده از الگوریتم‌های مختلف فراکاوشی نشان دهنده آن است که حل این مسائل با استفاده از سایر الگوریتم های فراکاوشی با افزایش هزینه محاسباتی و افزایش مدت زمان اجرای برنامه در مقایسه با الگوریتم کلونی زنبورعسل مصنوعی است. بنابراین، استفاده از روش پیشنهادی موجب کاهش میزان زمان محاسبات بهینه‌ساز و دستیابی به جواب مناسبتر و با هزینه محاسباتی (تعداد عمگلر ارزیابی) کمتر شده است.

جدول ۶- مقایسه هزینه محاسباتی الگوریتم‌های مختلف فراکاوشی (شبکه توزیع آب دو حلقه‌ای)

نام محقق (سال)	الگوریتم	هزینه‌محاسباتی (تعداد عملگر ارزیابی)
Savic و Walters (۱۹۹۷)	ژنتیک استاندارد	۲۵۰۰۰۰
Abebe و Solomatine (۱۹۹۹)	ژنتیک ساده	۵۳۰۰
Wu و همکاران (۲۰۰۱)	ژنتیک سریع و بی‌نظم (FMGA)	۴۶۷۷
Eusuff و Lansey (۲۰۰۳)	جهش قورباغه	۱۱۵۵۵
Afshar (۲۰۰۷)	جامعه‌مورچگان	۵۱۰۰
Moeini و Mousavi Moulaei (۲۰۱۸)	جامعه‌مورچگان	۴۷۰۰
El-Ghandour و Elbeltagi (۲۰۱۸)	ممتیک (MA)	۱۱۴۰۲
Praneeth و همکاران (۲۰۱۹)	چرخش آب (WCA)	۲۲۰۰۰
Poojitha و همکاران (۲۰۲۰)	تکاملی تفاضلی (DE)	۷۶۰۰
تحقیق حاضر	نسخه استاندارد الگوریتم کلونی زنبورعسل مصنوعی	۳۸۰۰
تحقیق حاضر	نسخه اصلاحی الگوریتم کلونی زنبورعسل مصنوعی	۲۸۰۰

جدول ۷- مقایسه مقدار تابع هدف و هزینه محاسباتی الگوریتم‌های مختلف فراکاوشی (شبکه توزیع آب شهر نیویورک)

محقق (سال)	الگوریتم	مقدار تابع‌هدف (میلیون دلار)	هزینه‌محاسباتی (عملگر ارزیابی)
Murphy و همکاران (۱۹۹۳)	ژنتیک استاندارد	۳۸/۸۰	۱۰۰۰۰۰۰
Savic و Walters (۱۹۹۷)	ژنتیک استاندارد	۴۰/۴۲	۴۶۰۱۶
Lippai و همکاران (۱۹۹۹)	جست‌وجوی ممنوعه	۳۸/۱۳	۱۰۰۰۰۰۰
Eusuff و Lansey (۲۰۰۳)	جهش قورباغه	۳۸/۱۳	۶۰۰۰۰
Maier و همکاران (۲۰۰۳)	جامعه‌مورچگان	۳۸/۸۰	۲۲۶۳۵
Afshar (۲۰۰۹)	ژنتیک فشرده	۳۸/۶۴	۱۸۲۰۰
Moeini و Mousavi Moulaei (۲۰۱۸)	جامعه‌مورچگان	۳۸/۶۴	۹۹۰۰
Zheng (۲۰۱۵)	تکاملی تفاضلی خود تطبیقی (SADE)	۳۸/۶۴	۲۳۵۰۰
Moosavian و Lence (۲۰۱۹)	مناسب‌ترین مرجع تکاملی تفاضلی (FDE)	۳۸/۶۴	۴۱۹۳
تحقیق حاضر	نسخه استاندارد الگوریتم کلونی زنبورعسل مصنوعی	۳۸/۱۳	۷۱۰۰
تحقیق حاضر	نسخه اصلاحی الگوریتم کلونی زنبورعسل مصنوعی	۳۸/۱۳	۶۲۰۰

جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این تحقیق، نسخه اصلاحی الگوریتم کلونی زنبورعسل مصنوعی معرفی و عملکرد آن در حل مسأله طراحی بهینه شبکه توزیع آب بررسی شد. به‌این‌منظور یک مدل شبیه‌ساز-بهینه‌ساز معرفی شد که در آن از نرم‌افزار EPANET به‌عنوان شبیه‌ساز و الگوریتم کلونی زنبورعسل مصنوعی به‌عنوان بهینه‌ساز استفاده شد. به‌منظور نشان دادن عملکرد روش پیشنهادی، دو شبکه توزیع آب دوحلقه‌ای و شهر شهر نیویورک به‌عنوان مطالعه موردی انتخاب شد. نتایج به‌دست‌آمده با نتایج نسخه پایه و استاندارد الگوریتم کلونی زنبورعسل مصنوعی و سایر نتایج موجود مقایسه شد. برای شبکه دو حلقه‌ای مقدار تابع هدف (هزینه احداث شبکه) و هزینه محاسباتی به‌ترتیب ۴۱۹۰۰۰ دلار و ۲۸۰۰ عملگر ارزیابی و برای شبکه شهر نیویورک مقدار تابع هدف (هزینه احداث) ۳۸/۱۳ میلیون دلار و ۶۲۰۰ عملگر ارزیابی، بااستفاده‌از الگوریتم اصلاحی کلونی زنبورعسل مصنوعی، حاصل شد. مقایسه نتایج نشان داد با استفاده از نسخه اصلاحی الگوریتم زنبورعسل مصنوعی نسبت به نسخه استاندارد و سایر الگوریتم‌های فراکاوشی، مقادیر تابع هدف و هزینه محاسباتی کمتر بود. به‌عبارت‌دیگر برای شبکه دوحلقه‌ای، با استفاده از نسخه اصلاحی الگوریتم کلونی زنبورعسل مصنوعی میزان هزینه محاسباتی الگوریتم‌های مورد استفاده در بهترین حالت ۷۲/ ۶۸۵٪ کاهش یافت. همچنین، برای شبکه شهر نیویورک، با استفاده از نسخه اصلاحی الگوریتم کلونی زنبورعسل مصنوعی میزان هزینه احداث شبکه (میزان تابع هدف) در بهترین حالت به اندازه ۶/۰۱٪ کاهش یافت. بنابراین استفاده از آن در حل مسأله بهینه‌سازی شبکه توزیع آب شهری پیشنهاد می‌شود.

پی‌نوشت

1-Differential Evolution Algorithm
2-Tabu Search
3-Simulated Annealing
4-Ant Colony Optimization Algorithm
5-Shuffled Frog Optimization Algorithm
6-SiBANET
7-Artificial Bee Colony
8-Feasible
9-Differential evolution based global best algorithm

منابع

افتخاری، م. و اکبری، م. ۱۳۹۹. ارزیابی هزینه‌ای مدل‌های فراابتکاری مورد استفاده در طراحی شبکه توزیع آب شهری. مجله آب و فاضلاب، ۲: ۴۸-۵۶.

افشار، م.ه. و غفوری، ح.ر. ۱۳۸۲. طراحی بهینه شبکه‌های توزیع آب، نشریه بین‌المللی علوم مهندسی، ۱۴(۲): ۱۳۳-۱۴۵.

خلیفه، س.غ.، بارانی، ع.، خلیفه، و. و ذونعمت کرمانی. م. ۱۳۹۸. بهینه‌سازی شبکه توزیع آب با الگوریتم ژنتیک موجود در مدل Water Gems (مطالعه موردی: شهرروی در استان هرمزگان)، نشریه مهندسی عمران، ۳۲: ۱۱۱-۱۲۳.

شاهی، ب.، جعفرزاده، م. ر. و موسویان، ع. ن. ۱۳۹۲. کاربرد الگوریتم تکامل تفاضلی (DE) در بهینه‌سازی سیستم‌های توزیع آب شهری (مطالعه موردی بر روی شبکه آبرسانی شهر تربت جام). هفتمین کنگره ملی مهندسی عمران. زاهدان، ایران.

معینی، ر. و سقراطی، ف. ۱۳۹۹. بهره‌برداری بهینه از سامانه سد تک مخزنه با الگوریتم اصلاحی کلونی زنبورعسل مصنوعی (مطالعه موردی: سد دز در استان خوزستان). نشریه دانش آب و خاک، ۳۰(۱): ۱۰۹-۱۲۱.

Abebe A.J. and Solomatine D.P. 1999. Application of global optimization to the design of pipe networks. 3rd International Conference on Hydroinformatics, Copenhagen, Balkema, Rotterdam

Afshar M.H. 2007. Application of ant algorithm to pipe network optimization. Iranian Journal of Science and Technology, Transactions B: Engineering, 31(B5): 487-500.

Afshar M.H. 2009. Application of a compact genetic algorithm to pipe network optimization problems,- Scientia Iranica. Transactions A: Civil Engineering, 16(3): 264- 271.

Cunha M.C. and Sousa J. 1999. Water distribution network design optimization: simulated annealing approach, Journal of Water Resources Planning and Management, 125(4): 215-221.

El-Ghandour H. A .and Elbeltagi E. 2018. Comparison of five evolutionary algorithms foroptimization of water distribution networks. Journal of Computing in Civil Engineering, 32(1): 04017066.01-10.

Eusuff M.M. and Lansey K. E. 2003. Optimization of water distribution network design using the shuffled frog leaping algorithm, Journal Water Resource Planning Management, 129(3): 210–225.

Heydari S., Mamizadeh J., Sarvarian J. and Ahmadi G. 2020. Optimization of water distribution networks using developed binary genetic algorithm and hydraulic model software,Journal of applied resource in water and wastewater, 13: 30-35.

Hosseini K., Jafari Nodoushan E., Barati R. and Shahheydari H. 2016. Optimal design of labyrinth spillways us-

Praneeth P, Vasan A and Raju KS. 2019. Pipe size design optimization of water distribution networks using water cycle algorithm. In: Harmony Search and Nature Inspired Optimization Algorithms. Singapore: Springer, 741: 1057-1067.

Poojitha S.N., Singh G. and Jothiprakash V. 2020. Improving the optimal solution ofGoYang network – using genetic algorithm and differential evolution. WaterSupply, 20(1): 95–102

Reca J., Martinez J. and Lopez R. 2017. A hybrid water distribution networks design optimization method based on a search space reduction approach and a genetic algorithm, Water journal, 9: 845-855.

Sadeghifar T. and Barati R. 2018. Application of adaptive Neuro-fuzzy inference system to estimate alongshore sediment transport rate (A real case study: southern shorelines of Caspian Sea). Journal of Soft Computing in Civil Engineering, 2(4): 72-85.

Savic D.A. and Walters G.A. 1977. Genetic algorithms for least-cost design of water distribution networks, Journal of water resources planning and management, 123(2): 67-77.

Schaake J. C. and Lai F.H. 1969. Linear programming and dynamic programming applications to water distribution network design. Rep.116. Deptartment of civil engineering. Massachusetts Inst. of Technol. Cambridge Massachusetts, United States.

ShendeC. and Chau K.W. 2019. Design of water distribution systems using an intelligent simple benchmarking algorithm with respect to cost optimization and computational efficiency,Water Supply, 19: 1892-1898.

Tong L., Han G. and Qia J. 2011. Design of water distribution network via ant colony optimization,The 2nd international conference on intelligent control and information processing. Harbin, China.

Wu Z. Y., Boulos P. F., Orr C. H. and Ro J. J. 2001. Using genetic algorithms to rehabilitate distribution systems, Journal of americanwater works association, 93(11): 74-85.

Zheng F. 2015. Comparing the real-time searching behavior of four differentialevolutionvariants applied to water-distribution-network designoptimization. Journal of Water Resources Planning and Management, 141(10): 04015016-1-12.

ing meta-heuristic algorithms. KSCE Journal of Civil Engineering, 20(1): 468-477.

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.

Kazemi M. and Barati R. 2022. Application of dimensional analysis and multi-gene genetic programming to predict the performance of tunnel boring machines. Applied Soft Computing, 124: 108997.

Khetrapal P. Pathan J. and Shrivastava S. 2020. Power loss minimization in radial distribution systems with simultaneous placement and sizing of different types of distribution generation units using improved artificial bee colony algorithm,International Journal on Electrical Engineering and Informatics, 12: 1-22.

Lippai I., Heaney J.P. and Laguna M. 1999. Robust water system design with commercial intelligent search optimizers, Journal of Computing in Civil Engineering, 13(3): 135-143.

Maier H.R., Simpson A.R., Zecchin A.C., Foong W.K., Phang K.Y., Seah H.Y. and Tan C.L. 2003. Ant colony optimization for design of water distribution systems, Water Resources Planning and Management, 129(3): 200–209.

Mehta D.J., Yadav V., Waikhom S. and Prajapati K. 2017. Design of optimal water distribution systems using WATERGEMS: A case study of Surat City. E-proceedings of the 37th IAHR World Congress. Kuala Lumpur, Malaysia.

Moeini R. and Mousavi Moulaei S.A. 2018.Simulation-optimization model for design of water distribution system using ant based algorithms,The Journal of Engineering Research (TJER),15(1): 42-60.

Moosavian N. and Lence B.J. 2019. Fittest individual referenced differential evolutionalgorithms for optimization of water distribution networks. Journal of Computing in Civil Engineering, 33(6): 04019036-1-16.

Mirbod S.A.R., Daei M. and Tajmir riahi H. 2017. Development of R-μrelation for the seismically base isolated structures using modified ABC algoritem,International journal of optimization in civil Engineering, 7: 25-44.

Murphy L.J., Simpson A.R. and Dandy G.C. 1993.Design of a network using genetic algorithms,Water, 20: 40-42.