Iranian Hydraulic Association
Journal of Hydraulics
Vol. 18, No. 3, PP. 45-61, Fall 2023

Research Article
https://doi.org/10.30482/jhyd.2023.347879.1609

Optimization of Energy Consumption in Water Distribution Networks Using Variable Speed Pumps

Homa Moeinfar[1], Jafar Yazdi[2*]

1- Graduate Student, MSc, Water and Hydraulic Structures, Faculty of Civil, Water and Environmental Engineering, Shahid Beheshti University.
2- Corresponding Author, Associate Professor, Department of Water Resources Engineering, Faculty of Civil, Water and Environmental Engineering, Shahid Beheshti University.

[*] **j_yazdi@sbu.ac.ir**

Received: 23 June 2022, Accepted: 7 June 2023 J. Hydraul. Homepage: www.jhyd.iha.ir

Abstract

Introduction: In recent years, with the expansion of urban planning and the larger and more complex water supply networks, the need for energy consumption to carry out the process of water supply and distribution has increased. On the other hand, the increase in energy costs nowadays, due to the limited resources and power plants that produce electricity, has made it necessary to quota available energy for various purposes and activities. Water pumping requires a lot of energy, which is a significant part of the network's operating cost. In this research, intelligent operation of these infrastructures using optimization tools and mathematical models has been considered to be useful by increasing the efficiency of pumping stations in urban areas and reducing costs. Over the past decade, many studies have proposed various automated systems for optimal planning of pump operation with the aim of saving energy and reducing operating and maintenance costs, but a small number of these studies have investigated the optimization of the rotation speed of the pumps, the parameter that has been investigated in this research. The main purpose of this study is to achieve the best energy efficiency in water distribution networks (reducing energy consumption and its costs) while achieving other operating goals (providing standard limits of node pressure, etc.). Optimum adjustment of pumps rotation speed is a topic that has not been investigated in previous researches by considering the historical series of water consumption data.

Methodology: The hydraulic model of the network, pumping station and its control equipment are simulated by EPANET hydraulic solver. Hydraulic solver coupling with differential evolution (DE) algorithm as a random search algorithm is used to adjust the motor speed of water distribution network pumps optimally. In the DE algorithm, a string of numbers with the range [0.5-2], which is the network pump's rotation speed coefficient, is randomly generated. The objective function evaluates these random values to obtain the optimal answer finally. Constraints monitored in the optimization problem are continuity, energy conservation, and minimum node pressure constraints. In the static operating policy developed in this research, the operational variables of the rotational speed of the pumps are in 15-minute time steps for one day. The DE algorithm optimizes the rotational speed values for one day in 15-minute time steps, and then the optimal pattern is applied uniformly for all days. Hassanabad water distribution network in Tehran has been selected for a case study, and the optimal pumps speed pattern has been extracted as an operation policy.

Results and Discussion: We received water demands of the entire network for 219 days in 15-minute time steps as the initial research data. The amount of energy consumed by the pumps for these 219 days in the current state of the network is equal to 491496.97 kWh. In the current state, the pumps rotate at a constant speed of 1450 rpm. According to the number of decision variables in this issue (192 variables), the initial population is equal to 400, and the number of iterations of the optimization algorithm is defined as 100. The completion condition of the optimization process is completing 100 iterations. After optimizing and determining the optimal rotation pattern of the pumps, by statically considering this optimal pattern for these 219 days and simulating the network by EPANET software, the energy consumption of the pumps for these 219 days was obtained to be 444212.54 kWh. This optimization-simulation process took about 27 days on a system with "8 core, 2.3 GHz" CPU and "10 GB" RAM. The obtained model shows a significant saving in energy consumption compared to the current state of the network while determining this optimal model by the operator through work experience alone is practically impossible. The obtained energy savings show the efficiency and proper performance of the proposed approach.

Conclusion: In this research, an optimization-simulation model was presented to determine how to adjust the speed of variable speed pumps in water distribution networks with the aim of minimizing energy consumption. The conclusion obtained from the comparison of the results of the optimal model developed for the water distribution network of Hassanabad town using the differential evolution algorithm against the current state of the network indicates that the approach adopted in this study has reduced energy consumption by 47284.42 kilowatt-hours equivalent to 9.6%. Also, in the peak hour of water consumption, the presented approach has been able to reduce the energy consumption by 19914.4 kilowatt-hours, equivalent to 74.3%. This is an important advantage over traditional methods and can be effective in saving energy. The main advantage of this operation approach is simplicity, comprehensibility for the operator and its operationality. In addition to this advantage, perhaps the most important limitation of this method is the lack of consideration of special events and possible accidental conditions in the network and non-compliance with it in the way of operation.

Keywords: Energy, Optimization, differential evolution (DE) algorithm, Water Distribution Networks, Pump station.

© 2023 Iranian Hydraulic Association, Tehran, Iran.
This is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0 license)
(http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

انجمن هیدرولیک ایران
نشریه هیدرولیک
سال ۱۸، شماره ۳، صفحات ۴۵-۶۱، پاییز ۱۴۰۲

مقاله پژوهشی
https://doi.org/10.30482/jhyd.2023.347879.1609

بهینه‌سازی مصرف انرژی در شبکه‌های توزیع آب با کاربرد پمپ‌های با دور متغیر

هما معین‌فر[۱]، جعفر یزدی[۲*]

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد رشته مهندسی آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی.
۲- نویسنده مسئول، دانشیار گروه مهندسی منابع آب، دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی.

[*] **j_yazdi@sbu.ac.ir**

دریافت: ۱۴۰۱/۰۴/۰۲، پذیرش: ۱۴۰۲/۰۳/۱۷ وب‌گاه نشریه هیدرولیک: www.jhyd.iha.ir

چکیده: در سال‌های اخیر، با گسترش شهرسازی و بزرگتر و پیچیده‌تر شدن شبکه‌های آبرسانی، نیاز به مصرف انرژی برای انجام فرآیند تأمین و توزیع آب افزایش پیدا کرده است. پمپاژ آب به انرژی زیادی نیاز دارد که هزینه تأمین این انرژی بخش قابل‌توجهی از هزینه‌های دوران بهره‌برداری از شبکه را در بر می‌گیرد. در این تحقیق، بهره‌برداری هوشمند از این زیرساخت‌ها با استفاده از ابزار بهینه‌سازی و مدل‌های ریاضی مورد توجه قرار گرفته است تا با افزایش بازده ایستگاه‌های پمپاژ در منطقه‌های شهری و کاهش هزینه‌ها سودمند واقع شود. هدف اصلی این تحقیق دست‌یابی به بهترین بازده مصرف انرژی در شبکه‌های توزیع آب (کاهش مصرف انرژی و هزینه‌های آن) در حین تأمین دیگر هدفهای بهره‌برداری (تأمین فشار گرهی و غیره) است. مدل هیدرولیکی شبکه، ایستگاه پمپاژ و تجهیزات کنترلی آن توسط حل‌گر هیدرولیکی EPANET شبیه‌سازی شده است. جُفت حل‌گر هیدرولیکی با الگوریتم تکامل تفاضلی (DE) به عنوان الگوریتم جستجوی تصادفی برای تنظیم بهینه دور موتور پمپ‌های شبکه توزیع آب بکار گرفته شده است. تنظیم بهینه دور موتور پمپ‌ها موضوعی است که در تحقیقات پیشین با در نظر گرفتن دوره تاریخی داده‌های مصرف آب، تحقیق نشده است. شبکه توزیع آب شهر حسن‌آباد تهران برای بررسی موردی انتخاب و الگوی بهینه دور پمپ‌ها بصورت یک سیاست بهره‌برداری استخراج شده است. نتایج نشان می‌دهد که این رویکرد مصرف انرژی را نسبت به وضعیت موجود شبکه ۴۷۲۸۴/۴۲ کیلووات-ساعت معادل ۹/۶ درصد کاهش می‌دهد. همچنین در ساعت اوج مصرف آب، رویکرد ارائه شده توانسته است میزان انرژی مصرفی را ۱۹۹۱۴/۴ کیلووات-ساعت معادل ٪۷۴/۳ کاهش دهد.

کلیدواژگان: انرژی، بهینه‌سازی، الگوریتم تکامل تفاضلی، شبکه‌های توزیع آب، ایستگاه پمپاژ.

۱- مقدمه

امر آبرسانی باید بنا بر یک برنامه دقیق و از پیش طراحی شده انجام گیرد تا هم این نیاز حیاتی به میزان و دقت کافی برطرف شود و هم از نقطه نظر دیگر، هزینه انجام این کار بیهوده بالا نرود و از مصرف بیهوده انرژی جلوگیری شود. پمپاژ آب به انرژی زیادی نیاز دارد که هزینه تأمین این انرژی بخش قابل توجهی از هزینه‌های دوران بهره‌برداری از شبکه را در بر می‌گیرد. در این میان، نبود دستور کار و استاندارد مشخص در بهره‌برداری از سامانه‌های پمپاژ آبرسانی کشور، موجب شده تا این سامانه‌ها اغلب با بازده پایینی مورد بهره‌برداری قرار گیرند و میزان زیادی از انرژی الکتریکی که می‌تواند برای کاربردهای ضروری‌تر در نظر گرفته شود در این سامانه‌ها از بین رود. در طول دهه گذشته بررسی‌های چندی، سامانه‌های خودکار را برای برنامه‌ریزی بهینه بهره‌برداری پمپ با هدف صرفه‌جویی در انرژی و کاهش هزینه‌های عملیاتی و نگهداری پیشنهاد کرده‌اند.

Rasoulzadeh et al. (2012) به بررسی و توسعه کاربرد الگوریتم ترکیبی NLP- GA در طراحی و بهره‌برداری بهینه از ایستگاه‌های پمپاژ پرداختند و کارایی این الگوریتم را با دیگر الگوریتم‌ها مقایسه کردند. نتایج نشان‌دهنده کار بهتر الگوریتم ترکیبی است. Makaremi

et al. (2013) روش‌های مختلف شبیه‌سازی برنامه‌ی زمانی کارکرد پمپ‌ها در سیستم‌های آبرسانی را از منظر بهینه‌سازی مصرف انرژی مقایسه کردند. Sami kashkouli et al. (2016) بهره‌برداری بهینه از ایستگاه‌های پمپاژ سامانه‌های تأمین آب با استفاده از الگوریتم جامعه زنبورهای عسل مصنوعی (ABC) بررسی کردند؛ ۳۲ درصد کاهش هزینه انرژی در حالت بهره‌برداری با برنامه زمان‌بندی روشن و خاموش کردن بهینه پمپ‌ها، نتیجه به دست امده از تحقیق آنان بود. Fotuhi and Tabesh (2016) به بهینه‌سازی هزینه انرژی با در نظر گرفتن قابلیت اطمینان هیدرولیکی وکیفی شبکه‌های توزیع آب با استفاده از الگوریتم جامعه مورچگان پرداختند؛ نتایج نشان داد که نمی‌توان به ترکیبی از دور پمپ دست یافت که هر سه قابلیت اطمینان پمپ، هیدرولیکی و کیفی به‌طور همزمان بالا باشند. Aghajanpour and Monsef (2017) به بررسی و مدیریت مصرف انرژی در بهره‌برداری از ایستگاه‌های پمپاژ شبکه‌های آبرسانی (بررسی موردی شهر رضوانشهر گیلان) پرداختند. بدین منظور از یک الگوریتم ژنتیک در کنار مدل هیدرولیکی شبکه‌ی واقعی استفاده کردند تا برنامه‌ی زمان‌بندی مناسب برای کارکرد پمپ‌ها به دست آید. برنامه زمان‌بندی ارائه شده کاهش ۱۰ درصدی مصرف انرژی را نشان داد. Alamatian et al. (2017) برنامه زمان‌بندی برای ساعت‌های کارکرد پمپ‌ها، به‌منظورکاهش مصرف انرژی شبکه آبرسانی شهر مشهد ارائه دادند. برنامه زمان‌بندی ارائه شده نشان دهنده کاهش حدود ٪۲۰ مصرف انرژی در این شبکه است. Angebini et al. (2018) به بهینه‌سازی مصرف انرژی ایستگاه‌های پمپاژ آب شهر درگهان با الگوریتم ژنتیک پرداختند. قیود هیدرولیکی در تحقیق آنان شامل کمینه و بیشینه حجم مخزن و شمار بارهای خاموش و روشن شدن اقتصادی پمپ‌ها می‌باشد. نتایج نشانگرکاهش ٪۶ هزینه مصرف انرژی است. Baradaran and Chari (2018) مدل برنامه‌ریزی خطی فازی برای ارتقاء بهره‌وری انرژی الکتریکی از طریق تعیین ساعت‌های کارکرد الکتروپمپ‌ها، در تاسیسات تامین آب شرب (بررسی موردی: طرح آبرسانی سیستان) را ارائه نمودند. ٪۲۳ کاهش هزینه انرژی نتیجه تحقیق آنان می‌باشد. Dini et al. (2022) به بیشینه‌سازی کارایی هیدرولیکی شبکه توزیع آب شهر خمام با برنامه‌ریزی بهینه شمار و سرعت پمپ‌ها پرداختند. آنان چهار پیش‌فرض مختلف را بررسی کردند و نتایج نشان داد که پیش‌فرض‌های تنظیم بهینه سرعت پمپ‌های دور متغیر و تنظیم بهینه شمار و سرعت پمپ‌های روشن دور متغیر با اندکی اختلاف، بیشترین میزان قابلیت اطمینان و کمترین میزان نشت در شبکه را دارند. پیش‌فرض‌های ارائه شده تنها بر روی داده‌های ۲۴ ساعت (در یک روز خاص) از شبکه اجرا شده است و بر مقایسه پیش‌فرض‌های مختلف تمرکز شده است، حال آنکه در تحقیق حاضر برای تعیین دور بهینه پمپ‌ها دوره تاریخی داده‌های شبکه استفاده شده است و به ارائه رویکردی که قابلیت پیاده‌سازی در شبکه را داراست، پرداخته شده است. Pezeshk et al. (1996) روشی به نام الگوریتم جستجوی تطبیقی (ASA) برای بهینه‌سازی برنامه زمانی کارکرد پمپ‌ها در سیستم آبرسانی ارائه کردند و به کاهش هزینه‌های عملیاتی پمپ پرداختند. Babu and Angira (2003) به بهینه‌سازی سیستم پمپاژ آب با استفاده از راهبردهای تکامل تفاضلی پرداختند. آنان نقطه کارکرد بهینه پمپ را با ایجاد توازن بین اختلاف فشار و دبی عبوری بین دو مخزن، یافتند. Zhu et al. (2004) شبیه‌سازی پویایی کار ایستگاه پمپاژ با استفاده از مدل هیدرولیک کنترل زمان واقعی را بررسی کردند. Wu (2007) به بررسی در مورد به کمینه رساندن هزینه انرژی بهره‌برداری پمپ‌ها با سرعت ثابت و متغیر، با استفاده از الگوریتم ژنتیکی آشفته سریع (fmGA[1]) پرداخت. Bunn (2008) به بهینه‌سازی برنامه‌ریزی پمپ در چهار شهر کشور ایالات متحده پرداختند. Pasha and Lansey (2011) چند راهبرد بهره‌برداری زمان واقعی بهینه پمپ برای سامانه‌های توزیع آب را بررسی کردند. Giacomello et al. (2013) به بهینه‌سازی سریع ترکیبی[2] برای زمان‌بندی کارآیی پمپ (روشن/خاموش) پرداختند. نتایج به دست آمده در دو بررسی موردی به روشنی نشان می

1 Fast messy Genetic Algorithm
2 Fast Hybrid Optimisation Method

دهد که روش LPG ترکیبی در مقایسه با روش بهینه سازی GA، قادر به حل کارآمدتر مسئله برنامه‌ریزی پمپ است و همچنین سرعت پردازش بیشتری داراست که استفاده از آن را به صورت زمان واقعی ممکن می‌سازد. Coelho and Andrade-Campos (2014) اقدام‌های و روش‌های دست‌یابی به بهره‌وری سامانه‌های تامین آب را مرور و بررسی کردند. Hashemi et al. (2014) به برنامه‌ریزی پمپ‌های سرعت متغیر در شبکه‌های توزیع آب برای به کمینه رساندن هزینه انرژی با استفاده از الگوریتم جامعه مورچگان پرداختند. نتایج نشان داد استفاده از پمپ با سرعت متغیر می‌تواند منجر به صرفه‌جویی حدود ۱۰٪ در هزینه انرژی پمپاژ در مقایسه با پمپ‌های سرعت ثابت شود. در این تحقیق نیز از دوره تاریخی داده‌های تقاضای آب استفاده نشده است. Wu et al. (2015) به بهینه‌سازی سیستم پمپ موازی برای بهبود بهره‌وری انرژی پرداختند. آنان از مدل بهینه‌سازی توسعه یافته از یک الگوریتم ژنتیکی (GA) با هدف بازده بیشینه پمپ‌ها استفاده کردند و یک راه حل نظری ساده از بهینه‌سازی سرعت چرخش دو پمپ یکسان با استفاده از روش‌های چندگانه GA و لاگرانژ ارائه دادند. Brentan et al. (2017) به بهینه‌سازی پمپ و مدیریت فشار با استفاده از الگوریتم PSO، باتقریب زمان واقعی پرداختند. نتایج بیانگر کاهش ۵۴٪ مصرف انرژی می‌باشد. Castro-Gama et al. (2017) به بررسی و برنامه‌ریزی سرعت چرخش پمپ برای یک شبکه بزرگ توزیع آب در میلان ایتالیا با بهره‌گیری از الگوریتم ژنتیک پرداختند. نتایج نشان‌دهنده کاهش ۲۶٪ هزینه انرژی است. Paola et al. (2017) یک الگوریتم بهینه‌سازی جستجوی هارمونی اصلاح شده‌ی چند هدفه برای حل مسئله برنامه‌ریزی ساعت‌های کارکرد پمپ‌ها در شبکه‌های توزیع آب ارائه کردند. نتایج بیانگر توانایی ارائه برنامه زمان‌بندی بهینه در زمان محاسبه شده کوتاه می‌باشد که کاهش قابل قبول مصرف انرژی را داراست. Khatavkar and Mays (2019) یک روش جدید (مدل بهینه‌سازی-شبیه‌سازی) برای بهره‌برداری زمان واقع سامانه‌های توزیع آب (WDS) در شرایط بحرانی محدودیت انرژی الکتریکی و یا آب در دسترس ارائه دادند. Patel and Raja (2021) کار ۹ الگوریتم بهینه‌سازی پیشرفته را از نظر کمینه‌سازی انرژی مورد نیاز در شبکه‌ی آب دارای برنامه زمان‌بندی سوئیچ پمپ، مقایسه کردند. نتایج کیفی الگوریتم‌ها با تجزیه و تحلیل آماری به‌دست آمد که نشان می‌دهد الگوریتم سینوس–کسینوس رتبه نخست را در کمینه انرژی مورد نیاز با شمار پمپ‌های مختلف در حال کار در شبکه به دست آورد. Dini et al. (2022) روشی برای بهینه‌سازی شمار پمپ‌های فعال و تنظیم دور آنها، با استفاده از الگوریتم بهینهُسازی ازدحام ذرات در شبکه‌های توزیع آب ارائه کردند. سه پیش‌فرض مختلف در این تحقیق بررسی شده است. در پیش‌فرضی اول، فرض شده است پمپ‌ها به طور پیوسته با سرعت ثابت کار کنند و شمار پمپ‌های فعال بهینه شده است. در پیش‌فرض دوم، فرض بر این است که همه‌ی پمپ‌ها به صورت دور متغیر بهره‌برداری شوند و دور موتور آن‌ها بهینه‌سازی شده است. در پیش‌فرض سوم، شمار پمپ‌های فعال مورد نیاز تعیین شده و سپس تنظیمات دور موتور برای هر پمپ فعال بهینه شده است. در این تحقیق نیز از دوره تاریخی داده‌های تقاضای آب استفاده نشده است و پیش‌فرضهای ارائه شده تنها بر روی داده‌های ۲۴ ساعت (در یک روز خاص) از شبکه اجرا شده است. Salvino et al. (2022) یک سیستم کنترل برای بهینه‌سازی بهره‌وری انرژی سامانه‌های توزیع آب با استفاده از یک شبکه عصبی مصنوعی طراحی کردند. هدف اصلی آنان طراحی یک شبکه عصبی مصنوعی با یادگیری کنترل خودکار فشار در شبکه‌های توزیع آب در عین افزایش بازده انرژی سامانه‌های پمپاژ بوده است. نتایج تجربی نشان داد که کنترل‌کننده پیشنهادی توانسته است نقطه کار پمپ‌ها را در نزدیک نقطه بازده بیشینه نگه دارد و لذا کاهش میزان انرژی مصرفی را بین ۱۵/۱٪ و ۱۷/۸٪ در مقایسه با سیستم کنترل‌نشده ارائه کند.

در این پژوهش، سرعت بهینه چرخش پمپ از نظر کمینه‌سازی میزان مصرف انرژی، توسط الگوریتم تکامل تفاضلی بررسی شده است. از دوره تاریخی داده‌های مصرف آب در شبکه به منظور تعیین سرعت بهینه چرخش پمپ‌ها استفاده شده است. در تحقیقات پیشین

بهینه‌سازی سرعت چرخش پمپ‌ها در مقایسه با دیگر فراسنجه‌های پمپاژ (مانند برنامه‌ریزی ساعت‌های کارکرد پمپ‌ها) کمتر مورد توجه بوده است و تحقیقات اندکی که در این زمینه صورت گرفته‌اند از داده‌های محدودی (اکثراً داده‌های یک روز مصرف در شبکه توزیع) برای بیان تاثیرگذاری برنامه‌ریزی بهره گرفته‌اند. تعیین دور بهینه پمپ‌ها نیازمند درنظرگیری شرایط گسترده‌ای از نیازهای شبکه است و بهینه‌سازی سرعت پمپ‌ها بر اساس داده‌های تنها یک روز (۲۴ ساعت) لزوما سیاست بهره‌برداری بهینه برای دیگر روزهای سال نیست. بررسی سوابق تحقیق نشان می‌دهد پژوهشی که بر روی دوره تاریخی داده‌ها متمرکز شده و رویکردی قابل اجرا ارائه دهد، انجام نشده است. رویکرد ارائه شده در این تحقیق، از داده‌های ۲۱۹ روز سال برای تعیین یک سیاست بهره‌برداری بهینه ایستا با ترکیب حل‌گر EPANET و الگوریتم جستجوی تکامل تفاضلی استفاده شده است. یادآوری می‌شود که دلیل انتخاب این طول از بازه زمانی، دسترسی به اطلاعات تنها ۲۱۹ روز از داده‌های ورودی به شبکه مورد بررسی بوده است. روش پیشنهادی بر روی شبکه توزیع آب حسن‌آباد تهران بررسی شده و نتایج به دست امده از آن با نتایج تجربی اجرا شده این شبکه توزیع آب مقایسه شده است.

۲- مواد و روش‌ها

به منظور بهینه‌سازی مصرف انرژی در شبکه، در این تحقیق از محیط برنامه‌نویسی MATLAB، نسخه ۲۰۱۷ و مرتبط کردن آن با EPANET نسخه ۲ بوسیله ابزار EPANET-MATLAB Toolkit استفاده شده است. نرم‌افزار EPANET یک برنامه رایانه‌ای است که رفتار هیدرولیکی و کیفی آب را در داخل شبکه لوله‌های تحت فشار شبیه‌سازی می‌کند. EPANET جریان آب در هر لوله، فشار در هر گره، ارتفاع آب در هر تانک و غلظت یک نوع ماده شیمیایی را در سراسر شبکه در طی یک دوره شبیه‌سازی می‌کند (Rossman, 2000).

۲-۱- فرمول‌بندی مسئله بهینه‌سازی

رویکرد سیاست بهره‌برداری بهینه ایستا در قالب یک مساله بهینه‌سازی فرمول‌بندی و تحلیل می‌شود. تابع هدف مجموع میزان مصرف انرژی در پمپ‌ها و میزان تابع جریمه است و به صورت رابطه (۱) تعریف شده است.

$$Min\ C = \sum_{i=1}^{np} Pumping\ \ Energy + \sum_{j=1}^{nj} Pen(j) \qquad (1)$$

که در این رابطه C میزان تابع هدف، np شمار پمپ‌ها، nj شمار گره‌های نیاز، $Pumping\ Energy$ میزان انرژی مصرفی توسط پمپ‌ها و $Pen(j)$ میزان تابع مجازات در گره jام می‌باشند.

برای اعمال استاندارد کمینه فشار گرهی در شبکه H_j^l (۱۴ مترآب)، یک تابع جریمه به صورت زیرتعریف شده است:

$$pen(j) = abs\left(min\left(\left(H_j - H_j^l\right),0\right)\right)\times 10^{10} \qquad (2)$$

که در این رابطه، j شمارنده گره‌ها است.

قیود مسئله بهینه‌سازی عبارت‌اند از:

۱- قید پیوستگی که برای هر گره باید ارضا شود (Todini, 2000):

$$\sum Q_{in} - \sum Q_{out} = Q_e \qquad (3)$$

در رابطه (۳) Q_{in} و Q_{out} به ترتیب دبی ورودی و خروجی از گره و Q_e دبی نیاز در گره است.

۲- قید بقای انرژی که برای هر حلقه به صورت رابطه (۴) نوشته می‌شود (Todini, 2000):

$$\sum_{k\in Loop\ l} \Delta h_k = 0 \qquad \forall\ l \in Nl \qquad (4)$$

که Δh_k افت بار در لوله kام و Nl شمار کل حلقه‌ها در سیستم است. افت بار در هر لوله تابعی از دبی، قطر لوله و ضریب زبری لوله است. افت بار بطور معمول با استفاده از معادلات تجربی نظیر دارسی-ویسباخ یا هیزن ویلیامز محاسبه می‌شود.

۳- قید کمینه فشار گرهی قابل قبول که برای هر گره برابر رابطه (۵) نوشته می‌شود (Yazdi, 2015):

$$H_j^l \le H_j \qquad \forall\ j \in 1,2,\ldots,nj \qquad (5)$$

در این رابطه H_j^l کمینه فشار مجاز در گره j می‌باشد. این قید به عنوان تابع جریمه برابر رابطه (۲)، در تابع هدف اعمال شده است.

برای حل مسئله بهینه‌سازی، قیود انرژی و پیوستگی با استفاده از یک حل‌گر هیدرولیکی (در این نوشتار EPANET2.0) به طور خودکار ارضا می‌شوند.

در این رویکرد متغیر بهره‌برداری که الگوی سرعت چرخش پمپ‌ها می‌باشد، برای یک روز با گام‌های زمانی ۱۵ دقیقه، توسط الگوریتم بهینه‌سازی تفاضل تکاملی (DE) بهینه می‌شود و الگوی بهینه به‌دست‌آمده برای همه‌ی روزها به‌صورت یکسان اعمال می‌شود. انتخاب الگوی سرعت پمپ مناسب که تأثیر مطلوب مدنظر را داشته باشد به خودی خود و تنها با استفاده از تجربه کنشگر غیرممکن است. برای تعیین سرعت چرخش بهینه بهره‌برداری پمپ‌های شبکه، نیاز به استفاده از ابزار بهینه‌سازی است. در این تحقیق الگوریتم تکامل تفاضلی (DE) به‌عنوان الگوریتم حل مسئله بهینه‌سازی استفاده شده است و میزان سرعت چرخش پمپ در گام‌های زمانی ۱۵ دقیقه‌ای به‌عنوان متغیر تصمیم در نظر گرفته شده است. شمار کل گام‌های زمانی الگوی سرعت چرخش یک روزه با در نظر گرفتن گام‌های ۱۵ دقیقه‌ای، برابر ۹۶ گام (T=۲۴×۴=۹۶) می‌باشد. با توجه به تخصیص الگوی سرعت چرخش مجزا به هر پمپ، برای شبکه مورد بررسی در این تحقیق که دارای دو پمپ فعال (m=۲) است، شمار کل متغیرهای تصمیم برابر ۱۹۲ (m×T=۲×۹۶=۱۹۲) متغیر است. چگونگی تعریف رشته متغیرهای تصمیم در شکل ۱ نشان داده شده است.

۲-۲- الگوریتم تکامل تفاضلی[1] (DE)

الگوریتم DE یک الگوریتم بهینه‌سازی است که نخستین بار در سال ۱۹۹۵ توسط Storn معرفی شد. این محقق نشان داد که این الگوریتم توانایی خوبی در بهینه‌سازی تابع‌های غیرخطی مشتق ناپذیر دارد و به‌عنوان روشی توانمند و سریع برای مسائل بهینه‌سازی در فضاهای پیوسته معرفی شده است (Storn and Price, 1997). الگوریتم تکامل تفاضلی همگی به‌عنوان الگوریتم‌های تکاملی بهینه‌سازی همه منظوره شناخته می‌شود که قادر به پیدا کردن پاسخ‌های نزدیک به بهینه برای مسائل ریاضی و واقعی می‌باشند، درحالی‌که روش‌های کلاسیک و تحلیلی قادر به پیدا کردن پاسخ بهینه در یک زمان محاسباتی منطقی نمی‌باشند. این الگوریتم برای چیرگی بر کاستی اصلی الگوریتم‌های ژنتیکی یعنی نداشتن جستجوی محلی در این الگوریتم‌ها ارائه شده است. تفاوت اصلی بین الگوریتم‌های ژنتیکی و الگوریتم DE در ترتیب عملگرهای جهش و تلاقی (بازترکیبی) و همچنین در چگونگی کار عملگر انتخاب است. این الگوریتم از یک اپراتور تفاضلی برای تولید پاسخ‌های جدید بهره می‌گیرد که این اپراتور باعث مبادله اطلاعات بین اعضای جمعیت می‌شود. از جمله برتری‌های این الگوریتم داشتن حافظه است که اطلاعات پاسخ‌های مناسب را در جمعیت کنونی حفظ می‌کند. دیگر برتری این الگوریتم مربوط به عملگر انتخاب آن است. در این الگوریتم همه اعضای یک جمعیت شانس یکسانی برای انتخاب شدن به‌عنوان یکی از والدین را دارند. به این صورت که نسل نوزاد با نسل والد از نظر میزان شایستگی که توسط تابع هدف سنجیده شده، مقایسه می‌شود. سپس بهترین اعضا به‌عنوان نسل بعدی وارد مرحله بعد می‌گردند (Mansouri and Torabi, 2015). شکل ۲ روند کلی مرحله‌های جستجو در این الگوریتم را نشان می‌دهد.

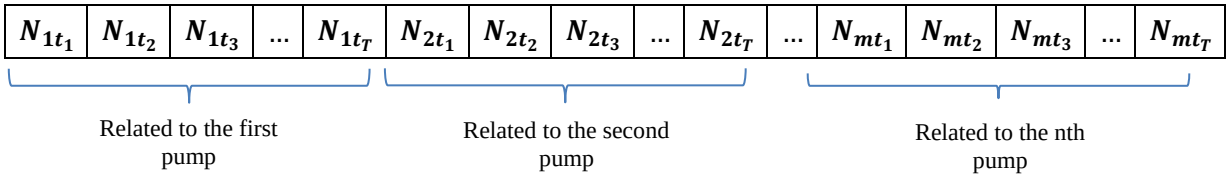

Fig. 1 The set of decision variables in the optimization problem assuming the presence of m pump at the station and T time step per day

شکل ۱ رشته متغیرهای تصمیم در مسئله بهینه‌سازی با فرض وجود m پمپ در ایستگاه و T گام زمانی در شبانه‌روز

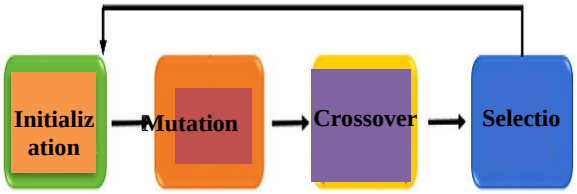

Fig. 2 Process of Operators of Differential Evolution Algorithm (Mansouri and Torabi, 2015)

شکل ۲ روندکار عملگرهای الگوریتم تکامل تفاضلی (Mansouri and Torabi, 2015)

مهم‌ترین ویژگی‌های الگوریتم DE، سرعت بالا، سادگی و توانمند بودن آن است. این روش تنها با تنظیم سه فراسنجه آغاز به کار می‌کند. فراسنجه NP اندازه جمعیت[1]، فراسنجه F وزن جهش و فراسنجهCr احتمال انجام بازترکیبی یا تقاطع است، که در تفاضل دو بردار ضرب می‌شود و به بردار سوم اضافه می‌شود. به گفته استورن و پرایس (۱۹۹۵)، فراسنجه F بطور معمول بین ۰ تا ۲ تنظیم و فراسنجه Cr مقداری بین ۰ تا ۱ می‌گیرد. به گفته استورن و پرایس (۱۹۹۷)، بازه معقول برای اندازه جمعیت بین ۳ تا ۱۰ برابر شمار متغیرهای تصمیم مسئله است. به‌طورکلی این الگوریتم دارای چهار مرحله اساسی ارزش‌دهی، جهش، تقاطع یا بازترکیبی و درنهایت انتخاب است (Mansouri and Torabi, 2015). در الگوریتم DE در این تحقیق، رشته‌ای از اعداد با محدوده [۲-۰/۵] که ضریب سرعت چرخش پمپ‌های موجود در شبکه است، به‌صورت تصادفی تولید می‌شوند. سپس این میزان‌های تصادفی توسط تابع هدف ارزیابی می‌شود؛ حین عمل جهش شماری از پاسخ‌ها جهش‌یافته و متغیرهای جدید تولید می‌شوند. میزان تابع هدف برای تغییرات ایجاد شده در هر تکرار محاسبه می‌شود. الگوریتم DE به‌صورت تک هدفه و چند هدفه قابل تعریف است. در حالت تک هدفه تنها یک تابع هدف قابل تعریف و محاسبه است. در مقابل، در الگوریتم‌های DE چند هدفه چند معیار یا تابع هدف به‌طور مستقل در نظر گرفته می‌شود. تابع‌های چند هدفه را می‌توان با استفاده از تابع‌های مجازات به یک هدف واحد تبدیل کرد، در این تحقیق نیز از این ترفند استفاده شده است. در حالت تک هدفه تنها یک پاسخ بهینه به دست می‌آید که کمترین میزان تابع هدف را در میان دیگر پاسخ‌ها داراست. روندنمای انجام کار رویکرد ارائه شده، در شکل ۳ نمایش داده شده است.

تبدیل پمپ‌های دور ثابت به پمپ دور متغیر از طریق نصب درایو تغییر سرعت بر روی الکتروموتور اجرا می‌شود. اینورتر یا درایو تغییر سرعت دستگاهی است که به کمک آن می‌توان سرعت یک موتور سه فاز را کنترل کرد بدون آن که قدرت و گشتاور موتور کاهش یابد. کنترل اتوماتیک دور پمپ از طریق تغییر بسامد جریان ورودی امکان‌پذیر است. تغییر در ولتاژ ورودی از منبع و استفاده از مبدل بسامد مدوله شده با عرض ضربه یا پالس (PWM)[1]، رایج‌ترین روش‌هایی استند که بدین منظور استفاده می‌شوند (Hydraulic Institute of America, 2004).

۳- بررسی موردی

در این تحقیق شبکه آب شهر حسن‌آباد تهران بررسی و ارزیابی شده است. این شبکه دارای ۱۳۲ لوله با قطرهای ۶۳ تا ۲۰۰ میلی‌متر است. همچنین این شبکه دارای یک مخزن ذخیره زمینی به حجم ۱۰۰۰۰مترمکعب در ارتفاع ۹۶۵/۴ متری است و کم ارتفاع‌ترین قسمت شبکه ۹۲۶ متر و مرتفع‌ترین قسمت آن ۹۶۸ متر ارتفاع دارد (شکل ۴). بیشینه فشار گرهی شبکه در وضعیت موجود آن ۵۴/۰۱ متر آب و کمینه آن ۱۴/۱ متر آب می‌باشد. توزیع فشار در گره‌های شبکه، در ساعت اوج مصرف آب در پرمصرف‌ترین روز از دوره بهره‌برداری ۲۱۹ روزه در نظر گرفته شده، در شکل ۵ نمایش داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود فشارهای گرهی در محدوده مجاز و استاندارد است. با توجه به اینکه در این پژوهش، مدلسازی شبکه بر مبنای تحلیل مبتنی بر تقاضا بوده است، در همه مدلسازی‌ها دبی به اندازه نیاز گرهی در شبکه تامین می‌شود. این شبکه بدون شیر فشارشکن است. این شبکه دارای ۴ پمپ می‌باشد که به‌صورت موازی به هم متصل هستند. هر چهار پمپ از نوع "گریز از مرکز، ۴۰۰-۱۵۰ پمپیران، دور موتور ۱۴۵۰ rpm، دبی نامی ۳۸۰ m^3/s، قطر پروانه ۳۲۰mm" می‌باشد. دو پمپ از چهار پمپ یاد

1 Number of Population

شده فعال بوده و آب را از مخزن ذخیره به شبکه پمپاژ می‌کنند. میزان نیاز آبی در این شبکه برای ۲۱۹ روز در گام‌های زمانی ۱۵ دقیقه از طریق مکاتبه با شرکت آب و فاضلاب در دسترس بوده است. با در نظر گرفتن الگوی بهینه به‌دست آمده برای این ۲۱۹ روز به صورت ایستا و شبیه‌سازی هیدرولیکی شبکه توسط نرم‌افزار EPANET، میزان انرژی مصرفی پمپ‌ها برای این ۲۱۹ روز به دست می‌آید. برای ارزیابی کار سیاست بهینه به دست آمده برای پمپ‌ها، میزان بهینه انرژی مصرفی با میزان انرژی مصرفی در وضعیت کنونی شبکه که بدون برنامه زمانی پمپ است، مقایسه شده است.

۴- تحلیل نتایج

میزان‌های مصرف آب در شبکه برای ۲۱۹ روز (از تاریخ ۱۳۹۵/۱۲/۱۱ تا ۱۳۹۶/۷/۱۵) در گام‌های زمانی ۱۵ دقیقه‌ای از سازمان امور آب و فاضلاب حسن‌آباد دریافت شد. این داده‌ها توسط فلومتر نصب شده درست پس از مخزن تامین آب شبکه، ثبت شده است که میزان کل مصرف شبکه را در گام‌های زمانی مختلف نشان می‌دهد. نیازهای گرهی در مدل هیدرولیکی اولیه این شبکه به‌صورت ثابت و متوسط روزانه در نظر گرفته شده بود. لذا الگوی مصرف گره‌های شبکه اصلاح و به صورت متغیر و با گام‌های ۱۵ دقیقه استخراج و در مدلسازی اعمال شد. برای این کار بشرح زیر اقدام شد:

با تقسیم داده‌های مصرف هر روز به میانگین داده‌های همان روز، ضریب‌های الگوی مصرف در این ۲۱۹ روز (۵۲۵۶ ساعت) به دست آمد که نمودار میزان‌های آن در شکل ۶ نشان داده شده است. با اعمال این الگوی مصرف

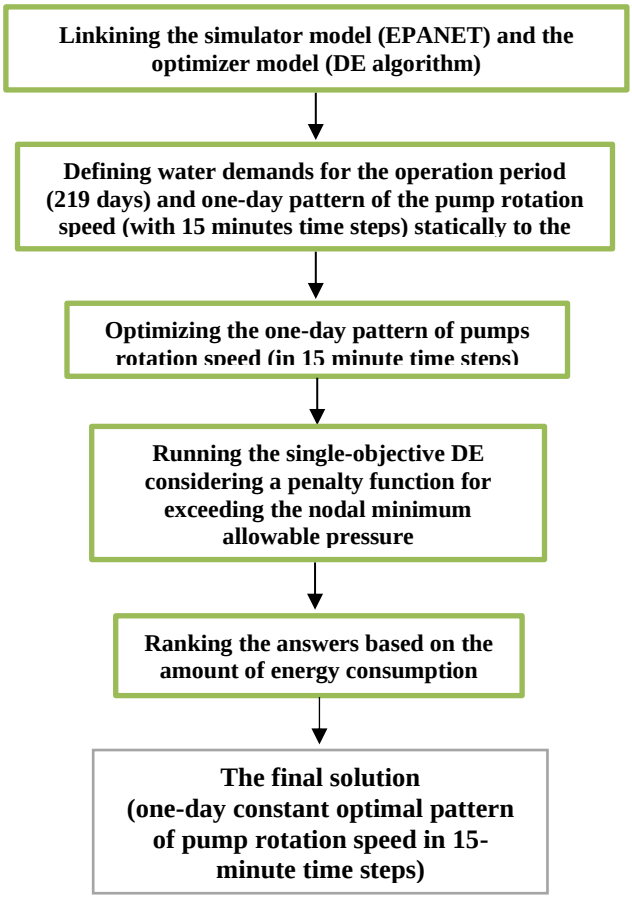

Fig. 3 Flowchart of the work process in the static operation approach

شکل ۳ رو ندنمای انجام کار در رویکرد سیاست بهره‌برداری ایستا

1 Pulse-Width Modulated

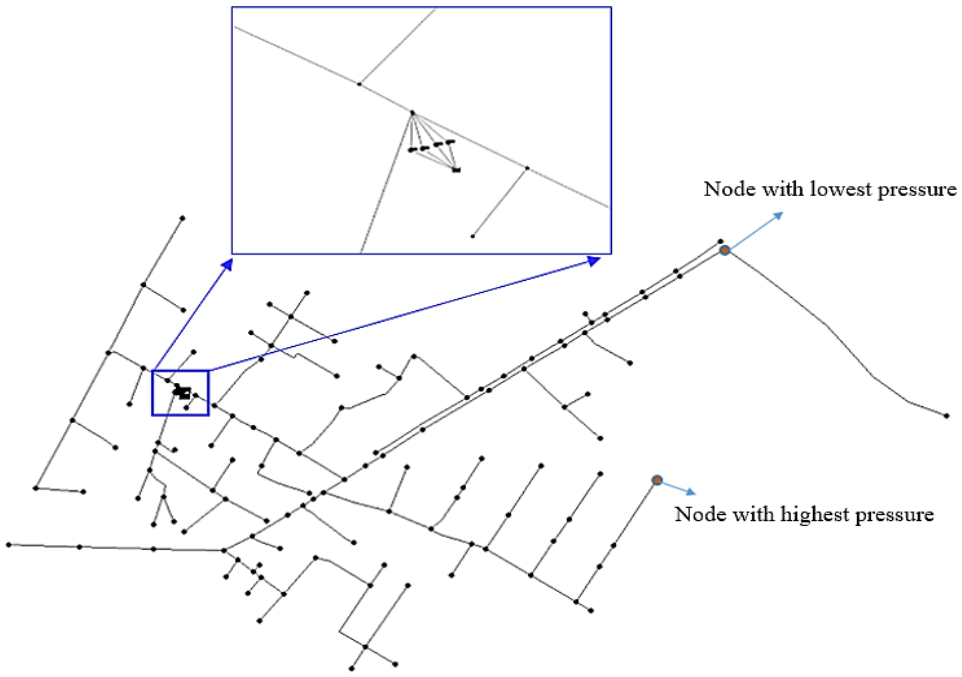

Fig. 4 Overview of the studied network in Tehran in EPANET software environment

شکل ۴ نمای کلی از شبکه مورد بررسی در شهر تهران در محیط نرم‌افزار EPANET

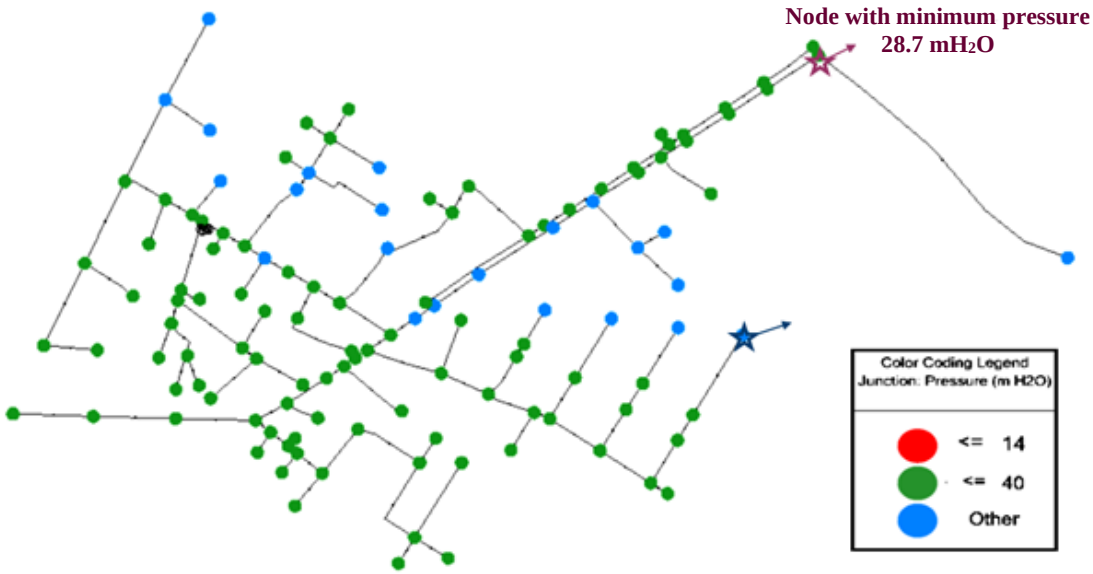

Fig. 5 Pressure distribution in the network nodes during the peak hour of water consumption on the most consumed day of the 219-day operation period

شکل ۵ توزیع فشار در گره‌های شبکه در ساعت اوج مصرف آب در پرمصرف‌ترین روز از دوره بهره‌برداری ۲۱۹ روزه

به مدل شبکه و شبیه‌سازی وضعیت موجود شبکه در این ۲۱۹ روز، میزان انرژی مصرفی توسط پمپ‌های شبکه برابر با ۴۹۱۴۹۶/۹۷ کیلووات-ساعت به دست آمد. در وضعیت موجود پمپ‌ها با سرعت ثابت ۱۴۵۰ دور بر دقیقه می‌چرخند.

در رویکرد سیاست بهره‌برداری ایستای توسعه داده شده در این تحقیق، متغیرهای بهره‌برداری سرعت دورانی پمپ‌ها در گام‌های زمانی ۱۵ دقیقه‌ای به مدت یک

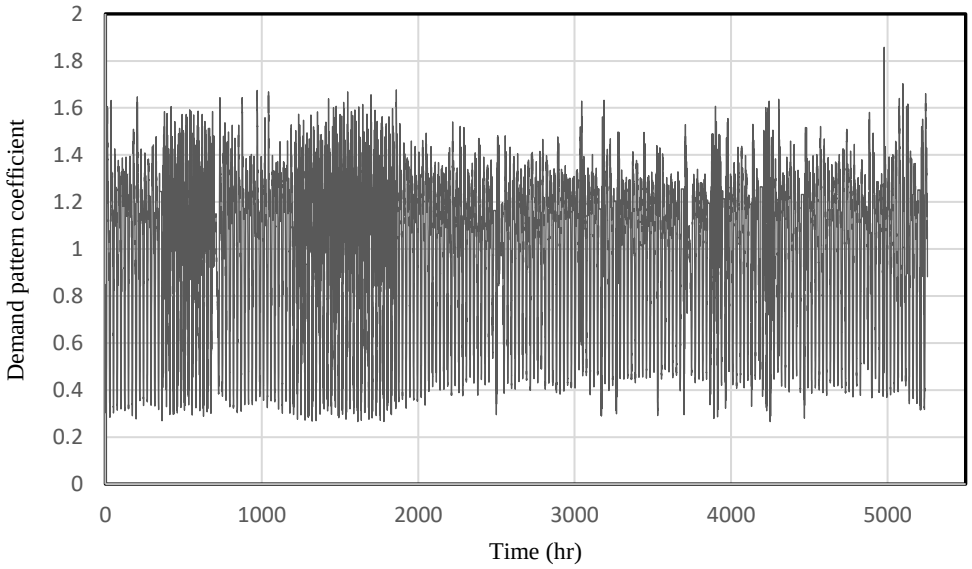

Fig. 6 Demand pattern coefficients in Hassan Abad water distribution network

شکل ۶ ضریب‌های الگوی مصرف در شبکه توزیع آب شهرحسن آباد

شبانه‌روز است. میزان‌های سرعت دورانی برای یک روز با گام‌های زمانی ۱۵ دقیقه، توسط الگوریتم بهینه‌سازی تفاضل تکاملی (DE) بهینه می‌شود و پس از آن، الگوی بهینه به‌دست‌آمده برای همه‌ی روزها به‌صورت یکسان اعمال می‌شود؛ بنابراین برای ایستگاه پمپاژ مورد نظر که تنها دو پمپ به‌صورت فعال کار می‌کنند، دو الگوی سرعت چرخش که هر یک ۹۶ گام زمانی دارا خواهد بود باید پیش‌بینی شود و در مجموع ۱۹۲ متغیر تصمیم در مدل بهینه‌سازی این تحقیق وجود دارد. با توجه به بررسی صورت گرفته بر روی دامنه کار پمپ‌های با سرعت متغیر در مجموعه پمپ‌های شرکت پمپیران، ضریب سرعت دورانی پمپ اعدادی بین ۰/۵ تا ۲ می‌تواند باشد که با ضرب در سرعت ثابت ۱۴۵۰ دور بر دقیقه، سرعت دورانی مربوطه در آن گام زمانی به دست می‌آید. در واقع ضریب‌های سرعت چرخش پمپ در گام‌های زمانی ۱۵ دقیقه‌ای به‌عنوان متغیر تصمیم در نظر گرفته شده است. دلیل انتخاب گام زمانی ۱۵ دقیقه‌ای در این پژوهش این است که داده‌های میدانی اندازه‌گیری دبی ورودی به شبکه ۱۵ دقیقه‌ای بوده است و با توجه به اینکه این گام‌های زمانی سطح دسترسی اطلاعات به نوسانات مصرف آب شبکه را در طی روزهای مختلف نشان می‌دهد همین گام‌های زمانی برای تحلیل‌ها در نظر گرفته شده است. دلیل تعریف سرعت دورانی متغیر به نحو یادآوری شده نیز این است که در حل‌گر هیدرولیکی EPANET برای متغیر تعریف نمودن فراسنجه‌ها نظیر میزان مصارف گرهی و نیز سرعت دورانی پمپ بایستی این کار از طریق تعریف ضرایب الگو در نرم‌افزار انجام شود.

با توجه به شمار متغیرهای تصمیم در این مسئله (۱۹۲ متغیر)، میزان جمعیت اولیه برابر ۴۰۰ و شمار تکرار الگوریتم بهینه‌سازی ۱۰۰ تعریف شده است. شرایط اهمه فرآیند بهینه‌سازی پایان ۱۰۰ تکرار تعریف شده است. در مسائل بهینه‌سازی، پیشنهاد می‌شود میزان جمعیت اولیه بین ۲ تا ۵ برابر شمار متغیرهای تصمیم مسئله در نظر گرفته شود. با توجه به شمار متغیرهای تصمیم مسئله در تحقیق حاضر (۱۹۲ متغیر تصمیم)، جمعیت اولیه برابر ۴۰۰ در نظر گرفته شده است که دو برابر شمار متغیرهای تصمیم مسئله است. با توجه به مدت زمان اجرای طولانی مسئله بهینه‌سازی در تحقیق حاضر، شرایط پایان به نحوی تعیین گشته است که مدت اجرای مسئله منطقی بوده و در عین حال میزان کاهش مصرف انرژی به میزان مطلوبی دست یابد. همان‌طور که یادآوری شد، میزان نیاز آبی کل شبکه برای ۲۱۹ روز در گام‌های زمانی ۱۵ دقیقه در

دسترس بوده است. پس از پایان بهینه‌سازی و تعیین الگوی بهینه چرخش پمپ‌ها، با لحاظ این الگوی بهینه برای این ۲۱۹ روز به‌صورت ایستا و شبیه‌سازی هیدرولیکی شبکه توسط نرم‌افزار EPANET، میزان انرژی مصرفی پمپ‌ها برای این ۲۱۹ روز برابر ۴۴۴۲۱۲/۵۴ کیلووات-ساعت به دست آمد.

انجام این فرآیند بهینه‌سازی-شبیه‌سازی بر روی یک سیستم با "CPU "8 core, 2.3 GHz و "RAM "10 GB حدود ۲۷ روز به طول انجامید. الگوی بهینه به‌دست آمده برای دو پمپ در شکل ۶ نشان داده شده است. همان‌طور که از الگوی بهینه به‌دست آمده برای دو پمپ در شکل ۷ مشاهده می‌شود، بطور کلی می‌توان بیان کرد که در بازه زمانی ساعت ۸ تا ۱۲ سرعت چرخش بهینه دو پمپ با هم رابطه عکس دارد بطوریکه با کاهش سرعت چرخش یک پمپ، سرعت چرخش پمپ دیگر افزایش یافته است؛ اما این رابطه الزاما در همه شبکه‌های توزیع آب بر قرار نمی‌باشد و الگوی بهینه به‌دست آمده تابع نیازهای گرهی شبکه در طی روزهای مختلف بوده است. این الگو نسبت به وضعیت فعلی شبکه صرفه‌جویی قابل ملاحظه‌ای را در مصرف انرژی معادل ٪۹/۶ نشان می‌دهد حال آنکه تعیین این الگوی بهینه از طرف بهره‌بردار یا اپراتور از طریق صرفاً تجربه کاری عملاً امکان‌پذیر نیست. میزان صرفه‌جویی به‌دست آمده معادل ٪۹/۶ انرژی مصرفی، کارایی و عملکرد مناسب رویکرد پیشنهاد شده را نشان می‌دهد.

نمودار همگرایی الگوریتم بهینه‌سازی در شکل ۸ ارائه شده است. همانطور که از این نمودار پیداست، احتمال اینکه با ادامه فرایند بهینه‌سازی برای شمار تکرار بیشتر، همگرایی الگوریتم به پاسخ‌های بهتر اتفاق افتد وجود دارد، اما با توجه به مدت زمان اجرای طولانی، فرایند بهینه‌سازی در ۱۰۰ تکرار خاتمه داده شده است که اجرای آن ۲۷ روز به طول انجامیده است. نمودار شمار تکرار-زمان اجرا در شکل ۹ ارائه شده است. میزان انرژی مصرفی به‌دست آمده حاصل از رویکرد سیاست بهره‌برداری بهینه ایستا با میزان انرژی مصرفی در وضعیت موجود شبکه که بدون برنامه زمانی پمپ است، مقایسه شده و در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱ مقایسه میزان‌های انرژی مصرفی در طول ۲۱۹ روز در وضعیت موجود شبکه و رویکرد سیاست بهره‌برداری بهینه ایستا

¶Table 1 Comparison of energy consumption in 219 days in the current state of the network and the static optimal operation policy approach

Energy consumption in the current state (kW.h)	491496.97
Energy consumption in optimal static operation policy (kW.h)	444212.54
Reduction in energy consumption (kW.h)	47284.42
Percentage of energy consumption reduction	9.6%

عملکرد رویکرد ارائه شده در ساعت‌های شبانه‌روز برای مجموع ۲۱۹ روز، در جدول ۲ ارائه و مقایسه شده است. ساعت اوج مصرف آب در این شبکه، ساعت ۱۳-۱۲ و ساعت اوج مصرف برق ساعت ۱۹-۲۰ می‌باشد. در جدول ارائه شده میزان‌های مربوط به ساعت اوج مصرف آب و ساعت اوج مصرف برق، هایلایت شده است. همانطور که مشاهده می شود در ساعت اوج مصرف آب، انرژی مصرفی پمپاژ حاصل از اعمال سیاست بهینه بهره‌برداری (با بهینه سازی دور پمپ و نزدیک کردن نقطه کار پمپ به نقطه بازده بیشینه) به اندازه ٪۷۴ و در ساعت اوج مصرف برق شهر ٪۹۴ در کل ۲۱۹ روز کاهش داشته است. در بعضی ساعت‌های نیز مصرف انرژی پمپاژ با اعمال سیاست بهینه بهره‌برداری افزایش داشته است ولی در مجموع حدود ٪۱۰ انرژی پمپاژ آب به شبکه کاهش نشان داده است. دلیل اینکه در بعضی ساعت‌های افزایش و در بعضی ساعت‌های انرژی مصرفی کاهش داشته است این است که مدل بهینه‌سازی بر اساس فرمول‌بندی مسئله مجبور بوده است یک سیاست ثابت برای سرعت چرخش پمپها در گامهای زمانی ۱۵ دقیقه یک شبانه روز در همه ۲۱۹ روز به دست آورد و بعبارتی سیاست بهره‌برداری، یک سیاست بهره‌برداری آزاد نبوده است که بتواند برای هر گام زمانی در هر روز یک دور بهینه را استخراج کند.

جدول ۲ مقایسه میزان‌های انرژی مصرفی در وضعیت موجود شبکه و رویکرد سیاست بهره‌برداری بهینه ایستا در طول ۲۴ ساعت شبانه‌روز برای ۲۱۹ روز

¶Table 2 Comparison of energy consumption in the current state of the network and the static optimal operation policy approach during 24 hours a day for 219 days

Time (hr)	0-1	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9	9-10	10-11	11-12	12-13	13-14	14-15	15-16	16-17	17-18	18-19	19-20	20-21	21-22	22-23	23-24
Energy consumption in the current state (kW.h)	15779.9	11595.7	9994.8	9709.3	9705.6	11283.2	14121.8	17087.7	20859.8	24014.0	25477.2	26253.7	26792.0	26124.1	25137.0	24561.6	25284.5	25834.1	25925.2	25149.7	24120.4	23740.7	22707.8	20217.2
Energy consumption in optimal static operation policy (kW.h)	9676.3	18640.8	4344.7	238.0	4868.0	3926.7	3635.9.3	6101.9	5267.9.3	1712.5.6	9817.2	2555.2.7	6877.6	7854.5	1019.5	6390.0.0	1870.1	1144.6.0	2799.7.2	1615.2	2225.1.2	9325.9	3548.7.6	2981.1.5
Percentage of energy consumption reduction (%)	38.7	-61	56.5	97.5	49.8	-248	-157	64.3	-152	28.7	61.5	2.7	74.3	69.9	95.9	-160	92.6	55.7	-8%	93.6	7.7	60.7	-56	-48

peak hour of water

peak hour of electricity

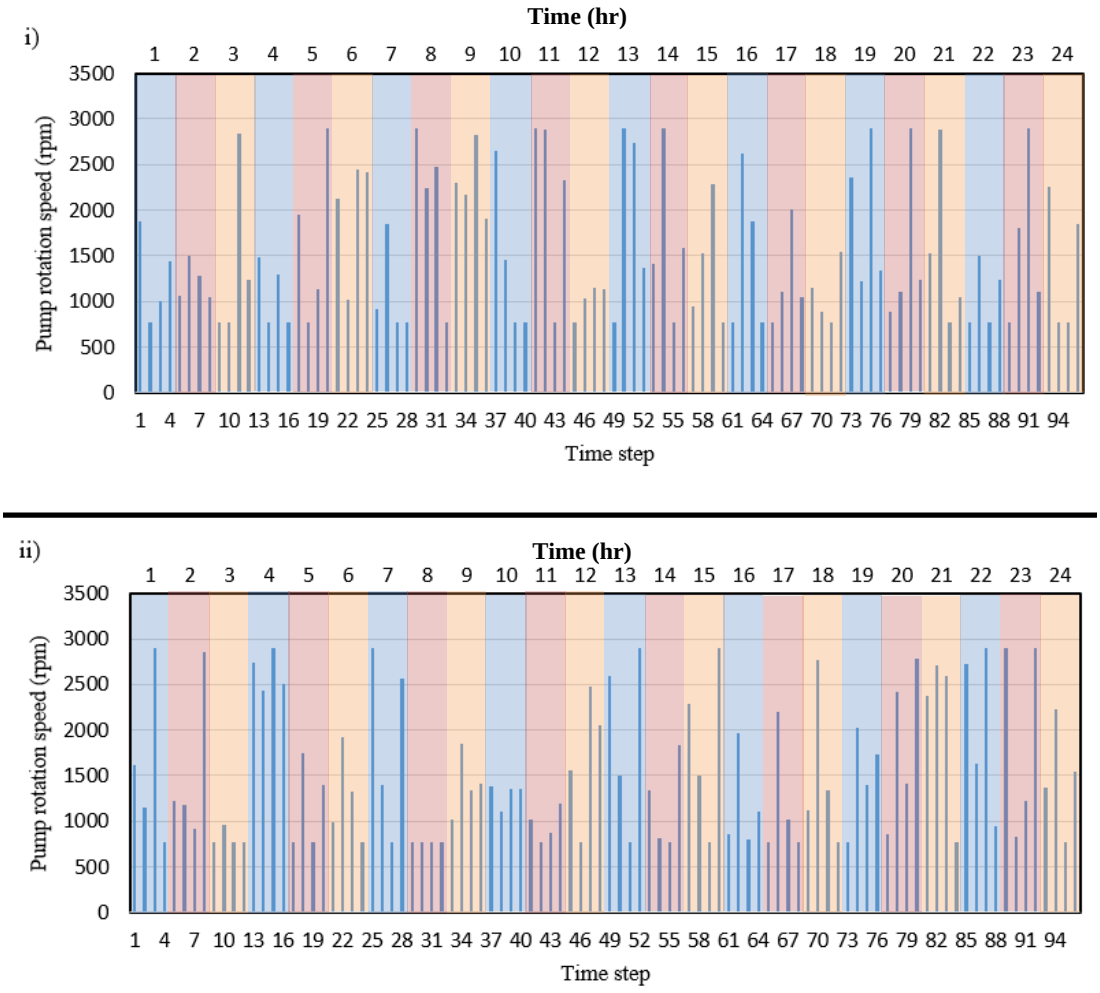

Fig. 7 Optimal rotation speeds of pumps (i) pump 1, (ii) pump 2

شکل ۷ رابطه سرعت‌های چرخش بهینه پمپ‌ها (i) پمپ اول، (ii) پمپ دوم

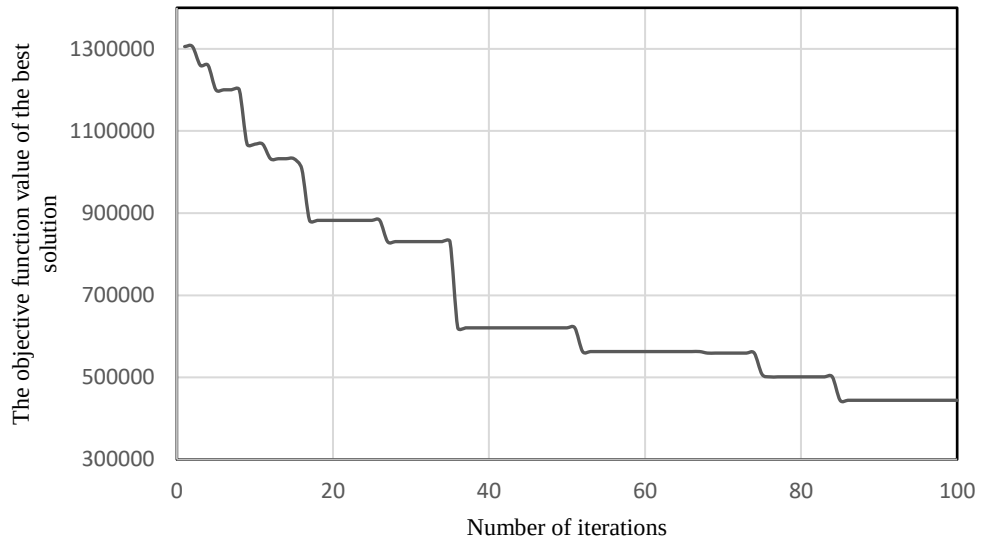

Fig. 8 Convergence process of DE optimization algorithm

شکل ۸ روند همگرایی الگوریتم بهینه‌سازی DE

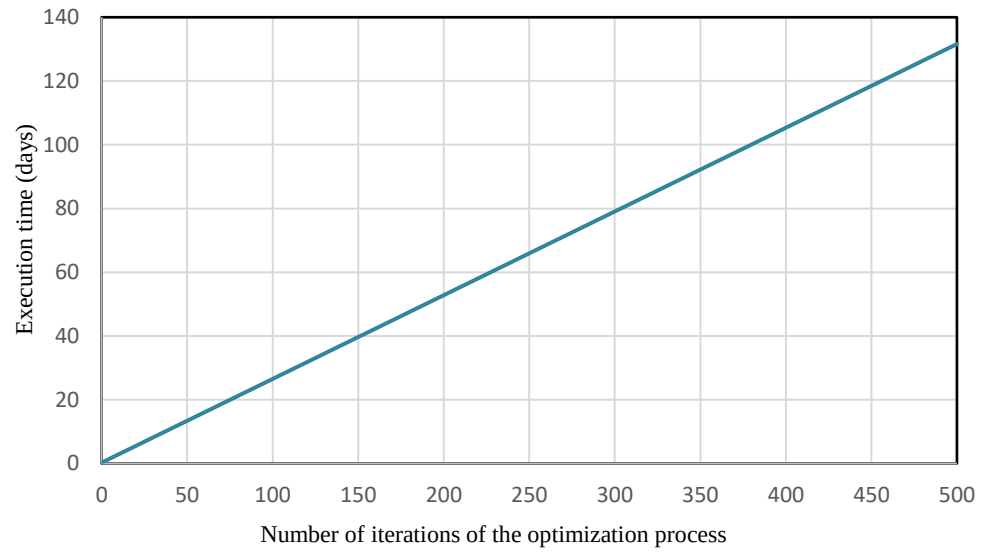

Fig. 9 The execution time of the optimizer program according to the number of iterations of the optimization process

شکل ۹ زمان اجرای برنامه بهینه‌ساز با توجه به شمار تکرار فرایند بهینه‌سازی

۵- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، یک مدل بهینه‌سازی-شبیه‌سازی برای تعیین چگونگی تنظیم سرعت پمپ‌های دور متغیر در شبکه‌های توزیع آب با هدف کمینه‌سازی انرژی مصرفی ارائه شده است. نتیجه‌گیری حاصل شده از مقایسه نتایج مدل بهینه توسعه داده شده برای شبکه توزیع آب شهر حسن‌آباد تهران با استفاده از الگوریتم تکاملی تفاضلی، در مقابل وضعیت موجود شبکه، گویای آن است که رویکرد اتخاذ شده در این تحقیق ٪۹/۶ مصرف انرژی کمتری را دارا می‌باشد که برتری مهمی نسبت به روش‌های سنتی به شمار آمده و می‌تواند در صرفه‌جویی مصرف انرژی مؤثر باشد. یادآوری می‌شود که بهینه‌سازی پمپاژ و مصرف انرژی توسط محققین دیگر نیز قبلا بررسی شده است و در سابقه تحقیق کاهش ۱۰ تا ۵۵٪ میزان انرژی مصرفی پمپاژ توسط محققان مختلف گزارش شده است، اما تفاوت ساختاری این تحقیق با پژوهش‌های پیشین، در عملیاتی

بودن سیاست بهره‌برداری ارائه شده است. در واقع در بررسی‌های پیشین، بهینه‌سازی با فرض معلوم بودن نیازهای گرهی و در یک روز ثابت انجام شده است که چنین فرضیه‌هایی در واقعیت وجود ندارد.

رویکرد اتخاذ شده در این پژوهش همچنین توانسته است میزان انرژی مصرفی را در ساعت اوج مصرف انرژی و ساعت پیک مصرف آب به ترتیب ٪۹۳/۶ و ٪۷۴/۳ در طول دوره بهره‌برداری در نظر گرفته شده، کاهش دهد. مزیت اصلی این رویکرد بهره‌برداری سادگی، قابل درک و فهم بودن برای بهره‌بردار و عملیاتی بودن آن است. در کنار این مزیت، شاید مهم‌ترین محدودیت این روش عدم در نظر گرفتن اتفاقات و شرایط خاص و تصادفی محتمل در شبکه و عدم انطباق با آن در چگونگی بهره‌برداری را بتوان نام برد. در واقع، از آنجا که رویکرد بهره‌برداری پیشنهادی در این تحقیق بر اساس نیاز یا الگوی مصرف در طی یک دوره نسبتاً بلندمدت در گذشته توسعه داده شده است، در صورت بروز هرگونه تغییر فاحش در میزان‌های نیازهای گرهی و یا هیدرولیک شبکه (برای مثال، به دلیل شکستگی اتفاقی چند لوله)، این سیاست بهره‌برداری به حتم بهینه نخواهد بود. به‌عبارت دیگر، سیاست ایستای به‌دست‌آمده برای شرایط نرمال شبکه مناسب است. از این نظر، رویکردهای بهره‌برداری بهنگام یا به اصطلاح زمان واقعی در شرایط غیرعادی مناسب‌تر به نظر می‌رسد. درعین‌حال عملکرد نسبی رویکرد بهینه ایستا در این تحقیق با روش بهره‌برداری زمان واقعی در شرایط نرمال نیز همچنان بحث برانگیز است. لذا تاکید می‌شود در تحقیقات بعدی رویکرد زمان واقعی نیز برای مسئله بهره‌برداری از پمپ‌های دور متغیر استفاده شود و نتایج آن با سیاست بهینه ایستای از نوع این تحقیق مقایسه شود.

۶- فهرست نشانه‌ها

تابع قدر مطلق	abs
میزان کل تابع هدف	C
میزان بار واقعی در گره j شبکه (mH_2O)	H_j
کمینه فشار مجاز در گره j شبکه (mH_2O)	H_j^l
تابع تعیین میزان کمینه	min
شمار گره‌های نیاز	nj
شمار حلقه‌های شبکه	Nl
شمار پمپ‌های شبکه	np
میزان تابع جریمه برای گره ژام شبکه	$Pen(j)$
میزان انرژی مصرفی توسط پمپ‌ها (kW.h)	$Pumping\ Energy$
دبی نیاز در یک گره دلخواه شبکه (m^3s^{-1})	Q_e
دبی ورودی به یک گره دلخواه شبکه (m^3s^{-1})	Q_{in}
دبی خروجی از یک گره دلخواه شبکه (m^3s^{-1})	Q_{out}
افت بار در لوله kام (mH_2O)	$\triangle h_k$

۷- منبع‌ها

Aghajanpour, A. & Monsef, H. (2017). Energy consumption management in operation of pumping stations of water supply networks - a case study of rezvanshahr, guilan, First national confrence on water loss and consumption management, Shahid Beheshti University, Tehran. (in Persian)

Alamatian, E., Eslaminia, H. & Haddadsarai, B. (2017). Presenting the operation schedule of the pumping station in order to reduce the energy consumption of water supply networks (mashhad i1 case study), The 10th Symposium on Advances in Science and Technology (10thSASTech), Mashhad, Iran. (in Persian)

Angebini, S., Rouhani, M., Ghosami, A. & Sadeghi, S. (2018). Optimization of water pumping stations energy consumption in dargahan using genetic algorithm, 12th International Energy Confrence, National Energy Committee of the Islamic Republic of Iran and Secretariat of the International Energy Conference, Tehran. (in Persian)

Babu, B. & Angira, R. (2003). Optimization of water pumping system using differential evolution strategies, Proceedings of The Second International Conference on Computational Intelligence, Robotics, and Autonomous Systems, Singapore.

Baradaran, V. & Abdolvesal, C. (2018). Presenting a fuzzy linear programming model to improve electrical energy efficiency in drinking water supply facilities (case study: Sistan water supply project), *Water and Wastewater*, *29*(1), 27-36. (in Persian)

Brentan, B.M., Luvizotto, E., Montalvo, I., Izquierdo, J. & Pérez-García, R. (2017). Near real time pump optimization and pressure management. *Procedia Engineering*, *186*, 666-675.

simulating the operation schedule of pumps in water supply systems with the aim of optimizing energy consumption, 12th Iranian Hydraulic Conference, Karaj, Iran. (in Persian)

Mansouri, R. & Torabi, H. (2015). Application of differential evolution (de) algorithm for optimizing water distribution networks (case study: Ismail abad pressurized irrigation network), *Water and soil knowledge (agricultural knowledge)*, *25*(4/2), 81-95. (in Persian)

Paola, F., Fontana, N., Giugni, M., Marini, G. & Pugliese, F. (2017). Optimal solving of the pump scheduling problem by using a harmony search optimization algorithm, *Journal of Hydroinformatics*, *19*(6), 879-889.

Pasha, F. & Lansey, K. (2011). Strategies for real time pump operation for water distribution systems., American Society of Civil Engineers, 12/21; 2015/11 2011, 1456-1469.

Patel, V.K. & Raja, B.D. (2021). Comparative Performance of Recent Advanced Optimization Algorithms for Minimum Energy Requirement Solutions in Water Pump Switching Network, *Archives of Computational Methods in Engineering*, *28*, 1545-1559, https://doi.org/10.1007/s11831-020-09429-x.

Pezeshk, S. & Helweg, O.J. (1996). Adaptive search optimization in reducing pump operating costs, *Journal of Water Resources Planning and Management*, *122*(1), 57-63.

Rasoulzadeh Gharibdousti, S. & Bozorg Haddad, O. (2012). Development and application of nlp-ga hybrid algorithm in optimal design and operation of pumping stations, *Soil and Water Research of Iran (Iran Agricultural Sciences)*, *43*(2), 129-137. (in Persian)

Rossman, L. (2000). Epanet 2 users manual.

Salvino, L., Gomes, H. & de Tarso, S. (2022). Design of a Control System Using an Artificial Neural Network to Optimize the Energy Efficiency of Water Distribution Systems, *Water Resources Management*, *36*(8), 2779–2793. https://doi.org/10.1007/s11269-022-03175-4.

Sami Kashkouli, B., Bahrami, M. & Ansari Jaberi, M. (2016). Using bee algorithm in optimal operation of pumping stations of water supply systems, *Journal of Soil and Water Conservation Research*, *23*(5), 175-189. (in Persian)

Storn, R. & Price, K. (1997). Differential Evolution

Bunn, S. (2008). Pump scheduling optimization in four us cities: Case studies, Eighth Annual Water Distribution Systems Analysis Symposium (WDSA) Cincinnati, Ohio, United States.

Castro Gama, M., Pan, Q., Lanfranchi, E., Jonoski, A. & Solomatine, D. (2017). Pump scheduling for a large water distribution network. Milan, Italy, *Procedia Engineering*, *186*, 436-443.

Coelho, B. & Andrade-Campos, A. (2014). Efficiency achievement in water supply systems—a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *30*, 59–84.

Dini, M., Hemmati, M. & Hashemi, S. (2022). Optimal operational scheduling of pumps to improve the performance of water distribution networks, *Water Resources Management*, *36*(1), 417-432.

Dini, M., Hemmati, M. & Hashemi, S. (2022). Maximizing the hydraulic performance of khomam water distribution network with optimal planning of the number and speed of pumps, *Journal of Water & Wastewater*, *32*(137), 36-47. (in Persian)

Europump and Hydraulic Institute of America. (2004). Variable Speed Pumping: A guide to successful application.

Fotuhi, M. & Tabesh, M. (2016). Optimization of energy costs considering hydraulic and quality reliability using ant colony algorithm. *Ferdowsi Civil Engineering (Faculty of Engineering)*, *27*(2), 111-126. (in Persian)

Geem, Z.W. (2009). Harmony search optimisation to the pump-included water distribution network design. *Civil Engineering and Environmental Systems - CIV ENG ENVIRON SYST*, *26*, 211-221.

Giacomello, C., Kapelan, Z. & Nicolini, M. (2013). Fast hybrid optimization method for effective pump scheduling, *Journal of Water Resources Planning and Management*, *139*, 175-183.

Hashemi, S.S., Tabesh, M. & Ataeekia, B. (2014). Ant-colony optimization of pumping schedule to minimize the energy cost using variable-speed pumps in water distribution networks, *Urban Water Journal*, *11*(5), 335-347.

Khatavkar, P. & Mays ,L. (2019). Optimization-simulation model for real-time pump and valve operation of water distribution systems under critical conditions. *Urban Water Journal*, *16*, 1-11.

Makaremi, Y., Haghighati, A. & Ranginkaman, M. (2013). Evaluation of different methods of

– A Simple and Efficient Heuristic for global Optimization over Continuous Spaces. *Journal of Global Optimization*, *11*, 341–359, https://doi.org/10.1023/A:1008202821328.

Todini, E. (2000). Looped water distribution networks design using a resilience index based heuristic approach, *Urban Water*, *2*, 115-122.

Wu, P., Lai, Z., Wu, D. & Wang, L. (2015). Optimization research of parallel pump system for improving energy efficiency, *Journal of Water Resources Planning and Management*, 141(8), https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000 493.

Wu, Z. (2007). A benchmark study for minimizing energy cost of constant and variable speed pump operation, World Environmental and Water Resources Congress 2007, Tampa, Florida, United States.

Yazdi, J. (2015). Development of decomposition-based multi-objective optimization algorithm using genetic algorithm operators to optimally design water distribution networks, *Journal of Hydraulics*, *10*(3), 27-40. (in Persian)

Zhu, G., Chiang, W. & Paredes, C. (2004). Dynamic simulation of pump station operation using a real-time control hydraulic model, Proceedings of the Water Environment Federation, 2004, 112-128.