Semnan University

Journal of Modeling in Engineering

Journal homepage: https://modelling.semnan.ac.ir/

ISSN: 2783-2538

Research Article

An Optimization Model for Reducing Pumping Costs in Water Distribution Systems

Abbasali Rezapour [a,*]

[a] *Department of Civil Engineering, Birjand Univerdity of Technology, Birjand, Iran*

PAPER INFO

Paper history:

Received: 2024-02-27
Revised: 2024-04-20
Accepted: 2024-04-23

Keywords:

Water distribution system;
Pumping cost reduction;
Optimization model;
Mixed linear models;
Water tanks.

ABSTRACT

The architecture of water distribution networks is inherently intricate, encompassing the strategic management of pumping mechanisms, modulation of reservoir water levels, and ensuring the delivery of water to consumers with adequate flow and pressure. A pivotal element of operating these systems is the strategic planning of pump schedules, which exerts a considerable influence on the operational expenditures. The present study introduces an optimization framework designed to schedule pump operations with the objective of minimizing energy consumption. This framework is equipped with the capability to regulate the frequency of pump activation and deactivation cycles, employing the operational durations of the pumps as binary variables and the volumetric flow rates within each conduit as continuous variables throughout the scheduling horizon. The development of this framework commenced with the formulation of the issue as a mixed nonlinear programming problem, which subsequently underwent transformation into a mixed linear programming model through the application of linearization methodologies. An empirical case study was conducted to assess the efficacy of the proposed model. The examination of the results indicates that the use of the proposed optimization method leads to a reduction in energy costs by approximately 16 percent and an increase in the efficiency of the water distribution system.

DOI: https://doi.org/10.22075/jme.2024.33389.2630

© 2024 Published by Semnan University Press.
This is an open access article under the CC-BY 4.0 license. (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

*** Corresponding Author.**
E-mail address: abbas.rezapoor@birjandut.ac.ir

How to cite this article:
Rezapour, A. (2024). An Optimization Model for Reducing Pumping Costs In Water Distribution Systems. Journal of Modeling in Engineering, 22(79), 255-265. doi: 10.22075/jme.2024.33389.2630

مقاله پژوهشی

ارائه مدل بهینه‌سازی برای کاهش هزینه‌های پمپاژ در سیستم‌های توزیع آب

عباسعلی رضاپور[۱،*]

اطلاعات مقاله

دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۱۲/۰۸
بازنگری مقاله: ۱۴۰۳/۰۲/۰۱
پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۰۲/۰۴

واژگان کلیدی:
سیستم توزیع آب،
کاهش هزینه پمپاژ،
مدل بهینه‌سازی،
مدل‌های خطی آمیخته،
مخازن آب.

چکیده

سیستم‌های توزیع آب ساختار پیچیده‌ای دارند که شامل برنامه‌ریزی پمپ‌ها، تنظیم سطوح آب در مخازن و تحویل آب با جریان و فشار مناسب به مشتریان می‌شود. برنامه‌ریزی برای پمپ‌ها از جمله وظایف اصلی عملکرد سیستم توزیع آب است که اثر مهمی بر هزینه‌های عملیاتی دارد. در این پژوهش، یک مدل بهینه‌سازی برای برنامه‌ریزی زمان کار پمپ‌ها با هدف کاهش مصرف انرژی معرفی می‌گردد. این مدل قابلیت محدودسازی تعداد دفعات روشن و خاموش‌شدن پمپ‌ها را دارد و زمان کار پمپ‌ها را به عنوان متغیرهای گسسته (متغیرهای دودویی) و مقدار جریان در هر لوله را به عنوان متغیر پیوسته در دوره برنامه‌ریزی بکار می‌گیرد. برای دستیابی به این مدل، ابتدا مسئله به عنوان یک مسئله برنامه‌ریزی غیرخطی آمیخته مدل‌سازی شد، سپس با استفاده از تکنیک‌های خطی‌سازی به یک مدل بهینه‌سازی خطی آمیخته تبدیل گردید. عملکرد مدل پیشنهادی با استفاده از یک مثال کاربردی مورد ارزیابی قرار گرفت. بررسی نتایج نشان می‌دهد که استفاده از روش بهینه‌سازی پیشنهادی منجر به کاهش هزینه‌های انرژی در حدود ۱۶ درصد و افزایش کارایی سیستم توزیع آب می‌گردد.

DOI: https://doi.org/10.22075/jme.2024.33389.2630

© 2024 Published by Semnan University Press.
This is an open access article under the CC-BY 4.0 license. (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

۱- مقدمه

با توجه به رشد سریع صنعت و محدودیت منابع آبی و انرژی، بهینه‌سازی و مدیریت زیرساخت‌های آب و فاضلاب امری ضروری است. استخراج، انتقال و توزیع آب از جمله مسائلی است که می‌توان با استفاده از فناوری‌های نو و مدیریت صحیح، عملکرد آن‌ها را بهبود بخشید [۱]. در سیستم‌های توزیع آب، عملیات پمپاژ هزینه‌های قابل توجهی دارد. لذا ارائه راهکاری برای برنامه‌ریزی بهینه زمان کار پمپ‌ها با هدف کاهش مصرف انرژی با تاکید بر حفظ کیفیت توزیع آب، بسیار ضروری به نظر می‌رسد [۲]. بهینه‌سازی یک رویکرد مرسوم در برنامه‌ریزی و زمان‌بندی پمپ‌های آب در شبکه‌های آبرسانی است. در مطالعه [۳] تعدادی از روش‌های بهینه‌سازی اولیه برای برنامه‌ریزی پمپ‌ها مرور شده است. محققین در [۴] یک روش برنامه‌ریزی پویای تکراری را جهت یافتن برنامه‌ریزی بهینه عملیات پمپ‌ها توسعه دادند. در این روش از تقاضاهای پیش‌بینی شده برای ۲۴ ساعت و شرایط اولیه و نهایی در مخازن و همچنین ویژگی‌های هیدرولیکی کل سیستم استفاده گردید. در مقاله [۵] برای یافتن برنامه‌ریزی بهینه پمپ‌ها یک روش بهینه‌سازی خطی پیشنهاد شد. محققان در مطالعه [۶] یک فرمول بهینه‌سازی چندهدفه را با در نظر گرفتن هزینه انرژی و معیار تغییر پمپ به عنوان تابع هدف ارائه دادند.

در ادامه به مرور مقالاتی می‌پردازیم که به بهبود عملکرد عملیات پمپ در سیستم‌های توزیع آب بر اساس الگوریتم‌های فراابتکاری تمرکز کرده‌اند. محققین در

* abbas.rezapoor@birjandut.ac.ir
۱. گروه مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی بیرجند، بیرجند، ایران

استناد به این مقاله:
رضاپور، عباسعلی. (۱۴۰۳). ارائه مدل بهینه‌سازی برای کاهش هزینه‌های پمپاژ در سیستم‌های توزیع آب. مدل سازی در مهندسی، ۲۲(۷۹)، ۲۵۵-۲۶۵. doi: 10.22075/jme.2024.33389.2630

مطالعات [۷و۸] با توسعه نسخه‌های مختلف الگوریتم ژنتیک نسبت به حل مسائل بهینه‌سازی پمپ اقدام نمودند. در مرجع [۹] رویکردی برای حداکثرسازی استفاده از انرژی الکتریکی با هزینه کم (مانند پمپاژ در شب) پیشنهاد شده است. در این رویکرد، بهینه‌سازی عملکرد شبکه‌های توزیع آب به عنوان یک مسئله برنامه‌ریزی غیرخطی فرمول‌بندی شده است. محققین در مقاله [۱۰] رویکردی مبنی بر تعیین مقداری جریمه در تابع هدف به منظور کمینه‌سازی هزینه های پمپاژ معرفی کردند. در این پژوهش، یک نسخه از الگوریتم ژنتیک بر اساس این رویکرد توسعه داده شد. در مقاله [۱۱] برنامه‌ریزی زمان‌دار پمپ‌ها بر اساس محرک‌های کنترلی زمان معین (با در نظر گرفتن حداکثر تعداد سوئیچ پمپ) تعریف شده‌اند. در این پژوهش برای حل مسئله برنامه‌ریزی پمپ‌ها از یک الگوریتم بهینه‌سازی کلونی مورچه استفاده شده است. در مقاله [۱۲] رویکردی برای تجزیه سیستم تأمین آب به زیرسیستم‌ها و تقسیم برنامه تولید به دوره‌های عملیاتی پیشنهاد شده است. در آن مقاله، تخلیه پمپ‌ها با استفاده از روش‌های فراابتکاری گسسته‌سازی حل شده است تا تعداد بارگذاری‌های پمپ کاهش یابد. در نهایت یک روش برنامه‌ریزی پویا برای حل مسئله بهینه‌سازی به کار گرفته شد. یک الگوریتم جستجوی تطبیقی در مقاله [۱۳] پیشنهاد شده است. این الگوریتم با استفاده از ضرایب تأثیر و فشار در شبکه لوله‌کشی، تصمیم می‌گیرد کدام پمپ‌ها را روشن یا خاموش کند.

مطالعات معدودی در داخل کشور به مسئله زمان‌بندی پمپ‌ها با رویکرد بهینه‌سازی پرداخته‌اند. در مطالعه [۱۴] با استفاده از الگوریتم ژنتیک موضوع بهینه‌سازی عملکرد شبکه‌های آبرسانی مورد ارزیابی قرار گرفت. محققین با استفاده از این الگوریتم تلاش کردند، عملکرد شبکه‌های آبرسانی را بهبود دهند به‌طوری‌که هزینه‌ها و زمان مورد نیاز برای توزیع آب کاهش یابد. در مرجع [۱۵] بهینه‌سازی سیستم توزیع آب شهری با استفاده از الگوریتم جستجوی هارمونیکی مورد بررسی قرار گرفت. در این مطالعه، محققین با استفاده از الگوریتم جستجوی هارمونیک توزیع بهینه واحدهای تهیه آب و مصرف آب در سیستم توزیع آب شهری را تعیین کردند. در مقاله [۱۶] محققین به تحلیل بهینه سیستم توزیع آب شهری با استفاده از الگوریتم ژنتیک پرداختند. آنان با استفاده از این الگوریتم، روش‌های مطلوبی برای بهینه‌سازی عملکرد سیستم توزیع آب طراحی کردند. خواننده را به مقاله [۱۷] برای مروری جامع بر پژوهش‌های مرتبط با الگوریتم ژنتیک در این زمینه ارجاع می‌دهیم.

در مرجع [۱۸] موضوع بهینه‌سازی سیستم توزیع آب با استفاده از الگوریتم مورچگان مورد مطالعه قرار گرفت. در این مقاله، نویسندگان با استفاده از روش مبتنی بر الگوریتم مورچگان به تعیین مسیر بهینه خطوط لوله و توزیع آب در شبکه آبرسانی پرداختند. در مرجع [۱۹] بهینه‌سازی توزیع آب در شبکه آبرسانی به وسیله الگوریتم جریان ذرات مغناطیسی مورد بررسی قرار گرفت. محققین با استفاده از این الگوریتم سعی کردند مسیرها و جریان آب را به صورت بهینه تعیین کنند تا هزینه و زمان مورد نیاز برای توزیع آب کاهش یابد و کیفیت آب نیز حفظ شود. در [۲۰] روشی برای بهینه‌سازی مصرف انرژی و هزینه‌های توزیع آب در شبکه‌هایی با پمپ‌های دور متغیر ارایه گردید. در این مطالعه، مدل هیدرولیکی ایستگاه پمپاژ و تجهیزات کنترلی توسط حل‌گر هیدرولیکیEPANET شبیه سازی گردید و با استفاده از الگوریتم تکامل تفاضلی به بهینه سازی مدل پرداخته شد.

اخیرا مقالاتی در زمینه‌های مختلف مدیریت زیرساخت‌ها و بهینه‌سازی شبکه‌های توزیع آب مطالعات مهمی داشته‌اند. مقاله [۲۱] به بررسی چالش‌های مدیریت دارایی‌های چندگانه زیرساخت‌ها می‌پردازد و به تحلیل مشکلات مرتبط با هماهنگی مدیریت پیاده‌روها، فاضلاب‌ها و شبکه‌های توزیع آب می‌پردازد. مقاله [۲۲] رویکردی نوآورانه برای تشخیص نشت در شبکه‌های توزیع آب از طریق طبقه‌بندی سیگنال‌های ارتعاشی ارائه می‌دهد. مقاله [۲۳] به تحلیل اقتصادی روش‌های مختلف بازسازی شبکه‌های توزیع آب و مقایسه آن‌ها بین مصر و مالزی می‌پردازد.

هدف اصلی پژوهش حاضر، ارائه مدلی جهت کاهش مصرف انرژی با حفظ کیفیت توزیع آب در شبکه آبرسانی است. برای این منظور، یک مدل بهینه‌سازی برای برنامه‌ریزی زمان کار پمپ‌ها ارائه می‌گردد. این مدل با استفاده از یک مسئله برنامه‌ریزی غیرخطی آمیخته مدل‌سازی شده است. تفاوت اساسی این پژوهش با کارهای قبلی این است که در مدل پیشنهادی این پژوهش، قابلیت محدود کردن تعداد دفعات خاموش و روشن شدن هر پمپ وجود دارد. این محدودیت غیر خطی بوده و باعث غیرخطی شدن مدل

می‌گردد. برای فائق آمدن بر این پیچیدگی، مساله مورد نظر توسط تکنیک‌های خطی‌سازی به یک مساله بهینه‌سازی خطی آمیخته تبدیل شد. علاوه بر این، در پژوهش حاضر متغیرهای گسسته دودویی برای زمان‌های کار پمپ‌ها و متغیرهای پیوسته برای جریان در هر لوله مدل‌سازی شده است. این رویکرد جدید مدلسازی، توانایی بهینه کردن مصرف انرژی را با توجه به زمان اوج مصرف برق افزایش می‌دهد.

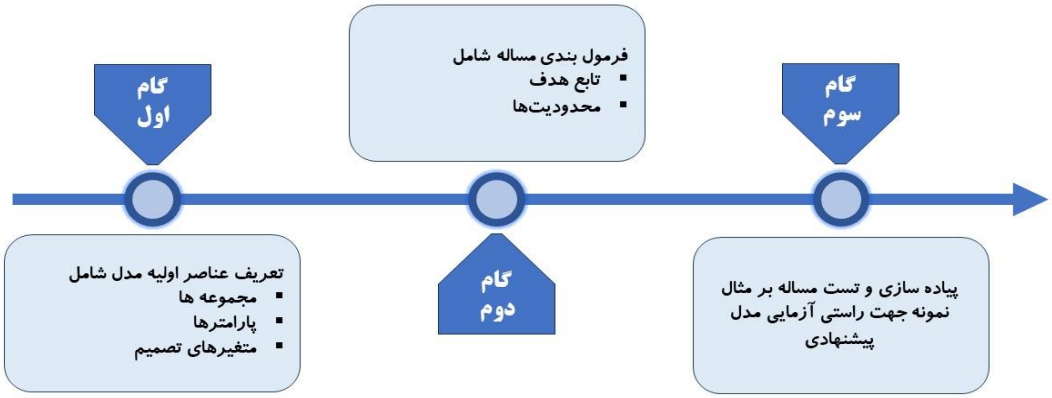
۲- مدل بهینه‌سازی پیشنهادی

برای دست‌یابی به مدل بهینه، باید مسئله کمینه‌سازی هزینه‌های پمپاژ به صورت یک مسئله بهینه‌سازی فرمول‌بندی گردد. مسئله زمانبندی پمپ‌های آب در شبکه آبرسانی می‌تواند به صورت یک مسئله بهینه سازی مطرح شود. هدف اصلی در این مسئله، کمینه کردن هزینه برق مصرفی پمپ‌ها است. این مسئله از آنجا به میان می‌آید که هزینه برق در زمان اوج مصرف بیشتر است. زمان اوج مصرف برق معمولاً زمانی است که تقاضای برق بیشترین مقدار خود را دارد، معمولاً در ساعات پرتراکم و مصرف بالا در روز هزینه برق بیشتر منظور می‌گردد تا منجر به نوسانات برقی و قطع برق نگردد. در این زمان، صنعتگران نیز مجبور هستند کمترین ظرفیت تولید خود را فعال کنند تا منجر به افزایش هزینه تولید برق نشود.

در این مسئله، اگر پمپ‌های آب در زمان اوج مصرف برق فعال شوند، منجر به افزایش هزینه برق مصرفی پمپ‌ها می‌شوند. برای کاهش هزینه برق، رویکرد بهینه این است که پمپ‌ها در زمان‌هایی که تقاضای برق کمتر است، مانند ساعات کمتر از میانگین روزانه مصرف برق، فعال شوند. این زمان‌ها معمولاً شامل ساعت‌های شبانه و ساعت‌های کم‌باری است. با این حال، عوامل متعددی وجود دارند که روند تصمیم‌گیری را پیچیده می‌کنند که پیش‌بینی دقیق تقاضای آب در مناطق مختلف به عنوان یکی از مهم‌ترین این عوامل محسوب می‌گردد. با استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی، می‌توان بهینه‌ترین زمان برای روشن و خاموش کردن پمپ‌ها را تعیین کرد به‌طوری که مصرف برق در زمان‌های با قیمت پایین‌تر صورت گیرد و هزینه برق کمتری برای پمپ‌ها ایجاد شود. این می‌تواند منجر به بهره‌وری بیشتر از نظر اقتصادی در سیستم آبرسانی شود و همچنین سازماندهی بهتری در مصرف برق در شبکه ایجاد کند.

مدل‌سازی این مسئله تصمیم‌گیری، مشابه با دیگر مسایل این حوزه سه گام اصلی دارد که در شکل (۱) تشریح شده است. اولین گام در این فرآیند، شامل تعریف مجموعه‌ها، پارامترها و متغیرها است. عناصر اولیه این مسئله به صورت زیر تعریف می‌شوند:

- **مجموعه‌ها**: مجموعه‌ها گردایه‌ای شامل ویژگی‌های مجردی از مسئله (اشیا یا عناصر) هستند. در این مسئله مجموعه پمپ‌ها، تانکرها و عناصر تشکیل دهنده شبکه، مجموعه‌های مسئله را تشکیل می‌دهند که در جدول ۱ با جزییات به ذکر آنها پرداخته شده است.
- **پارامترها**: پارامترها مقادیر ثابتی هستند که برای مدل‌سازی مسئله مورد استفاده قرار می‌گیرند. این مقادیر معمولاً خواص و ویژگی‌های عناصر مسئله را شامل می‌شوند و بر اساس داده‌های تاریخی، اطلاعات فنی و تجربی و یا مقادیر محاسباتی تعیین می‌شوند. در این مسئله پارامترهای مختلفی وجود دارد که از آن جمله می‌توان به مواردی چون ظرفیت لوله، توان پمپ‌ها و هزینه برق اشاره نمود. این پارامترها در جدول ۲ آمده است.
- **متغیرهای تصمیم**: متغیرهای تصمیم نشان‌دهنده مقادیری هستند که بایستی در مورد آنها تصمیم‌گیری شود. این متغیرها برای حل مسئله و یافتن جواب بهینه تعیین می‌شوند. در این مسئله متغیرهایی از جمله میزان جریان آب در هر لوله و میزان پمپاژ آب از هر پمپ وجود دارند. جدول ۳ به‌طور کامل این متغیرها تشریح کرده و نوع هر متغیر را مشخص می‌کند.



شکل ۱- فرآیند مدل‌سازی مسایل برای بهینه‌سازی

جدول ۱- مجموعه‌های مورد استفاده در مدل

تعریف مجموعه	نماد	اندیس به کار رفته
مجموعه پمپ‌ها در شبکه آبرسانی	$P = \{1,2,\dots,\|P\|\}$	p
مجموعه تانکرها در شبکه آبرسانی	$K = \{1,2,\dots,\|K\|\}$	k
بازه زمان مورد نظر	$T = \{1,2,\dots,\|T\|\}$	t
رئوس و گره‌های شبکه آبرسانی	$V = \{1,2,\dots,\|V\|\}$	i,j
مجموعه لوله‌ها در شبکه آبرسانی که بین دو گره i و j قرار دارد.	$A = \{(i,j): i,j \in V \cup T \cup P\}$	(i,j)

جدول ۲- پارامترهای مورد استفاده در مدل

تعریف پارامتر	نماد
ظرفیت لوله (i,j): این پارامتر حداکثر حجم آبی را که می‌توان در واحد زمان از لوله (i,j) عبور داد، مشخص می‌کند.	u_{ij}
زمان مورد نیاز برای عبور جریان آب در لوله (i,j): این مقدار زمان لازم برای حرکت آب از نقطه ابتدایی i تا نقطه پایانی j را نشان می‌دهد.	τ_{ij}
میزان مصرف گره متقاضی i در زمان t: این پارامتر مقدار آب مورد نیاز برای مصرف‌کننده در گره i در زمان t را تعیین می‌کند.	d_i^t
حداقل مقدار آبی که در تانکر k باید موجود باشد	C_k^{min}
حداکثر مقدار آبی که در تانکر k باید موجود باشد	C_k^{max}
توان پمپ p برای پمپاژ: این پارامتر میزان آبی که پمپ p می‌تواند در واحد زمان پمپاژ کند را مشخص می‌کند.	q_p
هزینه برق در لحظه t برای پمپ p : این مقدار هزینه مصرف برق پمپ p در زمان t را نشان می‌دهد.	c_p^t
حداکثر تعداد دفعاتی که پمپ p می‌تواند روشن یا خاموش شود. این پارامتر تعداد دفعات مجاز برای روشن و خاموش کردن پمپ p را محدود می‌کند.	o_p
مقدار آب اولیه در تانکر k: این مقدار حجم آب موجود در تانکر k در ابتدای دوره برنامه‌ریزی را نشان می‌دهد.	C_k^0

جدول ۳- متغیرهای مورد استفاده در مدل

تعریف متغیر	نماد	نوع متغیر	توضیحات
مقدار جریان آبی که به لوله (i,j) در لحظه t وارد می‌شود.	x_{ij}^t	متغیر پیوسته نامنفی	
وضعیت روشن یا خاموش بودن پمپ p در لحظه t	z_p^t	متغیر صحیح دودویی	مقدار یک یعنی پمپ روشن است و مقدار صفر یعنی پمپ خاموش است.
وضعیت خروج یا ورود آب به تانکر	y_k^t	متغیر صحیح دودویی	مقدار یک یعنی آب در حال خروج از تانکر است و مقدار صفر یعنی آب در حال ورود به آن است.
میزان جریان خروجی از پمپ p در لحظه t	v_p^t	متغیر پیوسته نامنفی	
میزان جریان ورودی یا خروجی از تانکر kدر لحظه t	w_p^t	متغیر پیوسته آزاد	مقدار مثبت یعنی آب در حال خروج از تانکر است و مقدار منفی یعنی آب در حال ورود به آن است.
میزان آب موجود در تانکر k در لحظه t	C_k^t	متغیر پیوسته نامنفی	

بر اساس شکل (۱)، گام دوم در فرآیند مدل‌سازی تعیین تابع هدف و محدودیت‌های مسئله است. تابع هدف یک مسئله بهینه‌سازی عبارت است از تابعی که بیان‌کننده هدف عمومی مسئله باشد و بایستی با استفاده از انتخاب مناسب مقادیر ورودی (مثال: متغیرهای تصمیم‌گیری)، بیشینه یا کمینه شود. با استفاده از تابع هدف، می‌توانیم عملکرد سیستم را ارزیابی کنیم و بهترین جواب را پیدا کنیم. هدف اصلی در مسئله زمانبندی پمپ‌ها در شبکه آبرسانی، کمینه کردن هزینه برق مصرفی آن‌ها است. این بدین معنی است که زمان‌بندی بهینه‌ای برای روشن و خاموش کردن پمپ‌ها تعیین گردد به طوری که کمترین هزینه برق مصرفی برای عملکرد سیستم آبرسانی به دست آید. برای دستیابی به این هدف، باید زمان فعالیت پمپ‌ها در شبکه آبرسانی بهینه شود. با این روش می‌توان از ظرفیت بهینه پمپ‌ها استفاده کرد و هزینه برق را کاهش داد. بنابراین تابع هدف این مسئله، کمینه‌سازی هزینه برق مصرفی پمپ‌ها است.

محدودیت‌ها در مسائل بهینه‌سازی قیودی هستند که بر روی متغیرهای تصمیم‌گیری اعمال می‌شوند. این قیود معمولاً محدودیت‌هایی برای مقادیر متغیرها ایجاد کرده که متغیرهای تصمیم‌گیری باید آنها را رعایت کنند. مسئله مورد مطالعه محدودیت‌های متعددی دارد که باید در نظر گرفته شوند. در ادامه به بیان برخی از این محدودیت‌ها می‌پردازیم:

- **توان هر پمپ:** هر پمپ در شبکه آبرسانی یک توان مشخص دارد که توانایی پمپاژ مقداری آب را تحمل می‌کند. این توان باید مورد رعایت قرار گیرد تا مشکلی مانند افزایش فشار یا خرابی پمپ به وجود نیاید.
- **نیاز آب در هر منطقه:** در شبکه آبرسانی، هر منطقه نیاز مخصوص به خود را برای آب دارد که باید برآورده شود. نیاز آب هر منطقه در هر بازه زمانی خاص باید رعایت شود و پمپ‌ها باید در زمان‌هایی که نیاز آب بیشتر است، فعال شوند.
- **ظرفیت شبکه آبرسانی**: شبکه آبرسانی دارای ظرفیت خاصی است که نمی‌توان از آن بیشتر برای انتقال آب استفاده کرد. بنابراین، حجم آبی که توسط پمپ‌های آب پمپاژ می‌شود، باید در حدود ظرفیت شبکه باشد.
- **محدودیت زمانی:** هر فعالیت پمپ در شبکه آبرسانی نیاز به زمان خاصی دارد. برای مثال، ممکن است لازم باشد که پمپ‌ها در بازه زمانی خاصی فعال شوند و در دیگر بازه‌های زمانی خاموش باشند. برای رعایت این محدودیت زمانی، باید زمان‌بندی برای پمپ‌ها تعیین شود.
- **ظرفیت تانکر:** هر تانکر در شبکه دارای ظرفیت مشخصی است که نشان دهنده حجم آبی است که می‌توان در آن ذخیره کرد. بنابراین، ظرفیت تانکر باید رعایت شود و حجم آبی که به تانکرها پمپاژ می‌شود، نباید از ظرفیت تانکرها بیشتر باشد.
- **تعداد دفعات خاموش و روشن شدن پمپ:** محدودیتی که در این مدل نسبت به کارهای قبلی

خودنمایی می‌کند، تعداد دفعات خاموش و روشن شدن پمپ است با این کار از استهلاک ناشی از خاموش و روشن شدن بیش از حد خودداری می‌گردد. با این توضیحات می‌توان این مسئله بهینه‌سازی را به شکل زیر مدل‌بندی نمود:

$$\min \sum_{p\in P}\sum_{t\in T} c_p^t v_p^t \qquad (۱)$$

$$\sum_{j:(i,j)\in A} x_{ij}^{t+\tau_{ij}} - \sum_{j:(j,i)\in A} x_{ji}^t = d_i^t \qquad \forall i \in V, \forall t \in T, \qquad (۲)$$

$$\sum_{j:(p,j)\in A} x_{pj}^t = v_p^t \qquad \forall p \in P, \forall t \in T, \qquad (۳)$$

$$y_k^t \sum_{j:(k,j)\in A} x_{kj}^t - (1 - y_k^t) \sum_{j:(j,k)\in A} x_{jk}^t = w_k^t \qquad \forall k \in K, \forall t \in T, \qquad (۴)$$

$$C_k^{t-1} - w_k^t = C_k^t \qquad \forall k \in K, \forall t \in T, \qquad (۵)$$

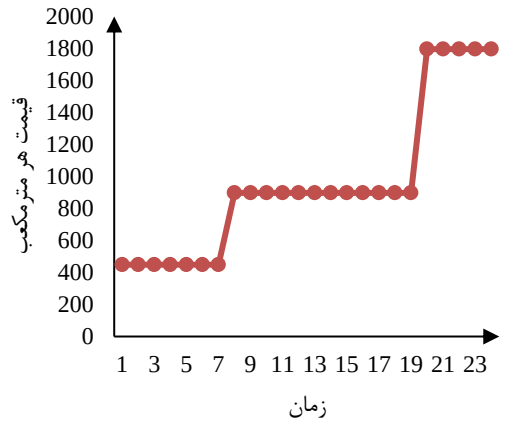
$$0 \le x_{ij}^t \le u_{ij} \qquad \forall (i,j) \in A, \forall t \in T \qquad (۶)$$

$$0 \le v_p^t \le q_p z_p^t \qquad \forall p \in P, \forall t \in T, \qquad (۷)$$

$$C_k^{min} \le C_k^t \le C_k^{max} \qquad \forall k \in K, \forall t \in T, \qquad (۸)$$

$$\sum_{t\in T} |z_p^t - z_p^{t-1}| \le o_p \qquad \forall p \in P, \qquad (۹)$$

اکنون به تشریح روابط موجود در این مدل می‌پردازیم. رابطه (۱) تابع هدف مسئله است که به کمینه‌سازی مجموع هزینه‌های برق پمپ‌ها در زمان‌های مختلف می‌پردازد. در این رابطه c_p^t عبارت‌است از هزینه برق مصرفی ناشی از پمپاژ یک واحد آب در زمان t. با توجه به وابستگی این پارامتر به زمان می‌توان سیاست‌های مختلف ناشی از اختلاف قیمت را در این پارامتر گنجاند. به عنوان نمونه در شکل (۲) یک سیاست قیمت‌گذاری میزان تعرفه مصرف برق به صورت روزانه مشخص شده است. در این شکل مصارف به سه دسته کم مصرف، میان مصرف و پرمصرف دسته بندی شده‌اند و هر دسته قیمت مربوط به خود را دارد. همانطور که در شکل مشخص است، تعرفه میان مصرف نسبت به پر مصرف حدود دو برابر و پر مصرف نسبت به کم مصرف حدود ۴.۵ برابر می‌باشد.



شکل ۲- یک الگو از میزان تعرفه مصرف برق در نیمه اول سال برای مرکز صنعتی

رابطه (۲) بیانگر پیوستگی جریان و محدودیت بقای جرم در هر گره است و تاکید می‌کند که تفاوت بین جریان ورودی و خروجی در هر گره باید برابر تقاضای آن گره باشد. رابطه (۳) پیوستگی جریان در پمپ است که بیان می‌کند، میزان جریان خروجی از هر پمپ برابر با حجم پمپاژ شده توسط آن پمپ است. رابطه (۴) مشخص می‌کند که جریان ورودی و خروجی از هر تانکر باید برابر با مقدار ورودی/خروجی آن تانکر (به عبارت دیگر w_k^t) باشد. رابطه (۵) حجم آب موجود در تانکر در هر لحظه را نسبت به حجم آب در زمان قبلی و میزان ورودی/خروجی آب به تانکر نشان می‌دهد. در رابطه (۶) تاکید می‌گردد که نمی‌توان جریان آبی را در یک لوله بیش از ظرفیت آن لوله برقرار کرد. رابطه (۷) محدودیت توان پمپ را اعمال می‌کند. بر اساس این رابطه توان هر پمپ محدود است به عبارتی میزان پمپاژ هر پمپ هنگام روشن بودن نمی‌تواند بیشتر از توان آن باشد. رابطه (۸) به بیان این حقیقت می‌پردازد که حجم آب موجود در یک تانکر همیشه باید در بازه $[C_k^{min}, C_k^{max}]$ باشد. رابطه (۹) تاکید می‌کند که تعداد کل روشن و خاموش کردن یک پمپ نمی‌تواند بیشتر از مقدار مشخص o_p باشد. این محدودیت به دلیل این است که روشن و خاموش کردن مکرر پمپ‌ها می‌تواند باعث خرابی آن‌ها شود.

۱-۲- خطی‌سازی

مدل پیشنهادی ارائه شده به دلیل وجود محدودیت‌های (۴) و (۹) یک مسئله برنامه‌ریزی (بهینه‌سازی) غیرخطی است و به دلیل داشتن متغیرهای پیوسته و گسسته، یک مسئله با متغیرهای آمیخته می‌باشد. در عین حال می‌توان با تکنیک‌های خطی‌سازی این مدل را به یک مدل خطی

تبدیل کرد و از مزیت مسایل بهینه‌سازی خطی نسبت به غیر خطی استفاده نمود چرا که برای حل مسائل خطی روش‌های سریع‌تر و کاراتری وجود دارد. لذا ابتدا بر روی خطی‌سازی محدودیت (۴) تمرکز می‌گردد. همان‌طور که ذکر شد، این محدودیت تعیین می‌کند که مقدار ورودی و خروجی به تانکر بایستی برابر w_k^t باشد. چنانچه این فرض را به مساله بیافزاییم که حداکثر یکی از جریان‌های ورودی و خروجی به هر تانکر می‌تواند مثبت باشد این محدودیت قابل تبدیل به حالت خطی است. البته این فرض در واقعیت نیز عملیاتی است زیرا لوله ورود و خروج آب از هر نقطه از شبکه به هر تانکر مشترک است. با این فرض می‌توان محدودیت (۴) را مطابق محدودیت‌های زیر بازنویسی کرد:

$$\sum_{j:(k,j)\in A} x_{kj}^t - \sum_{j:(j,k)\in A} x_{jk}^t = w_k^t \qquad \forall k \in K, \forall t \in T, \qquad (۱۰)$$

$$\sum_{j:(k,j)\in A} x_{kj}^t \le M y_k^t \qquad \forall k \in K, \forall t \in T, \qquad (۱۱)$$

$$\sum_{j:(j,k)\in A} x_{jk}^t \le M(1-y_k^t) \qquad \forall k \in K, \forall t \in T, \qquad (۱۲)$$

محدودیت‌های (۱۱) و (۱۲) نشان می‌دهند که در یک لحظه حداکثر یکی از مقادیر جریان ورودی و خروجی از طریق یک راس به هر تانکر می‌توانند مثبت باشند. در رابطه (۱۲) M یک عدد ثابت بسیار بزرگ است. در روابط بالا محدودیت (۱۰) بازنویسی شده محدودیت (۴) با در نظر نگرفتن متغیرهای صفر و یک است.

برای خطی سازی محدودیت (۹) نیاز به معرفی متغیرهای صفر و یک جدیدی داریم که بتوانند مفهوم قدر مطلق را مدل‌سازی کنند. این متغیرها را با $z_p'^t$ نمایش می‌دهیم و مقدار آنها از رابطه $z_p'^t = \left|z_p^t - z_p^{t-1}\right|$ حاصل می‌گردد. پس با کمک این متغیر محدودیت (۹) به شکل زیر قابل بازنویسی است:

$$\sum_{t\in T} z_p'^t \le o_p \qquad \forall p \in P, \qquad (۱۳)$$

به منظور این که مقدار $z_p'^t$ به طور خطی مدل سازی شود، محدودیت‌های زیر نیز به مساله اضافه می‌گردد:

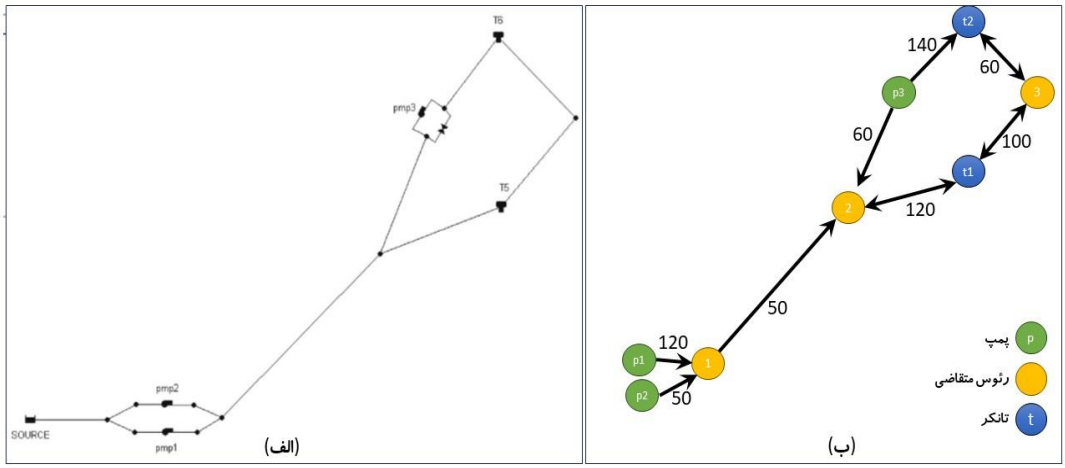
$$z_p^t - z_p^{t-1} \le z_p'^t \qquad \forall p \in P, \forall t \in T, \qquad (۱۴)$$

$$z_p^{t-1} - z_p^t \le z_p'^t \qquad \forall p \in P, \forall t \in T, \qquad (۱۵)$$

این دو محدودیت رابطه $z_p'^t = \left|z_p^t - z_p^{t-1}\right|$ را تضمین می‌کند.

۳- مثال عددی

در این بخش با بکارگیری یک مثال عددی نتایج حاصل از مدل پیشنهادی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. شبکه ارایه شده در شکل (۳-الف) برگرفته از مقاله [۷] است. شکل (۳-ب) گراف متناظر با این شبکه را نشان می‌دهد. همانطور که در شکل مشخص مشاهده می‌شود، شبکه شامل ۳ پمپ، ۲ تانکر و ۳ نقطه شهری متقاضی آب است. قابل توجه است که یال‌های خروجی از پمپ‌ها، در یک جهت جریان را عبور داده و یال‌های دیگر ممکن از هر دو جهت انتقال جریان آب را انجام دهند. بنابراین بسته به نوع جریان آب در هر لوله، یال‌های متناظر در گراف جهت‌دار شده‌اند.



شکل ۳- الف) شبکه اصلی برگرفته از مقاله [۷] ب) گراف متناظر با شبکه اصلی به همراه ظرفیت هر یال

برای مدل‌سازی هزینه‌های وابسته به زمان، یک شبانه روز به ۴ بازه ۶ ساعته تقسیم شدند که هزینه‌های آن منطبق با شکل ۲ به ترتیب برابر ۴۲۰، ۹۰۰، ۹۰۰ و ۱۸۰۰ واحد پول است. حداکثر تعداد روشن و خاموش کردن هر پمپ برابر ۲ منظور شده است. جداول ۴، ۵ و ۶ داده‌های مورد نیاز برای هر راس متقاضی، تانکر و پمپ را نمایش می‌دهند.

جدول ۴- میزان تقاضای رئوس در هر دوره زمانی (واحد: هزار متر مکعب)

	دوره زمان اول	دوره زمان دوم	دوره زمان سوم	دوره زمان چهارم
راس متقاضی ۱	۴۱	۵۵	۱۴	۲۲
راس متقاضی ۲	۶۵	۷۶	۵۹	۷۶
راس متقاضی ۳	۳۷	۱۲	۸	۱۴

جدول ۵- داده‌های تانکرها (واحد: هزار متر مکعب)

	ظرفیت اولیه	حداقل ظرفیت	حداکثر ظرفیت
تانکر ۱	۰	۲۰۰	۴۰۰
تانکر ۲	۰	۱۵۰	۳۰۰

جدول ۶- داده‌های پمپ‌ها (واحد: هزار متر مکعب بر یک دوره زمانی)

	پمپ ۱	پمپ ۲	پمپ ۳
توان پمپ	۳۰۰	۱۰۰	۱۵۰

مسأله مورد نظر با کمک زبان برنامه‌نویسی پایتون کدنویسی شده و با کتابخانه بهینه‌سازی پایومو (Pyomo) حل گردید. جواب بهینه حاصل از حل مسئله در جداول ۷ و ۸ آمده و در آن مقدار هزینه کل پمپاژ ۲۰۳۷۰۰ واحد پول محاسبه گردیده است. در مقایسه با حالتی که هزینه‌های برق به صورت پلکانی در مسأله نادیده گرفته شود، مقدار صرفه‌جویی در هزینه برق در حدود ۱۶ درصد است که درصد قابل توجهی از صرفه جویی را نشان می‌دهد.
جدول ۷ نشان می‌دهد که پمپ ۲ اصلاً نیاز به استفاده ندارد و تنها دوره زمانی مورد نیاز برای استفاده از پمپ ۱ دوره زمانی سوم است. پمپ ۳ نیز در دوره زمانی سوم نیاز به استفاده ندارد و در سه دوره دیگر می‌بایست کار کند.

جدول ۷- میزان پمپاژ آب و هزینه آب در جواب بهینه (واحد: هزار متر مکعب)

	دوره زمان اول	دوره زمان دوم	دوره زمان سوم	دوره زمان چهارم	هزینه برق (برای هر پمپ)
پمپ ۱	۰	۰	۴۲	۰	۳۷۸۰۰
پمپ ۲	۰	۰	۰	۰	۰
پمپ ۳	۱۴۰	۴۷	۰	۳۶	۱۶۵۹۰۰
هزینه برق (در هر دوره)	۵۸۸۰۰	۴۲۳۰۰	۳۷۸۰۰	۶۴۸۰۰	هزینه کل: ۲۰۳۷۰۰

جدول ۸- میزان جریان آب در هر دوره زمانی برای هر یال در جواب بهینه (واحد: هزار متر مکعب)

یال	دوره زمان اول	دوره زمان دوم	دوره زمان سوم	دوره زمان چهارم
$(p_1, 1)$	۰	۰	۴۲	۰
$(p_2, 1)$	۰	۰	۰	۰
(p_3, t_2)	۱۴۰	۴۷	۰	۰
$(p_3, 2)$	۰	۰	۰	۳۶
$(1,2)$	۱۴	۳۷	۱۲	۵۰
$(t_1, 2)$	۰	۰	۰	۰
$(2, t_1)$	۱۰۰	۵۱	۴۹	۲۰
$(t_1, 3)$	۰	۰	۰	۰
$(3, t_1)$	۱۰۰	۰	۰	۸
$(t_2, 3)$	۰	۰	۰	۱۴۶
$(3, t_2)$	۶۰	۳۷	۱۲	۰

جدول ۹- میزان موجودی آب در هر دوره زمانی برای هر تانکر در جواب بهینه (واحد: هزار متر مکعب)

	دوره زمان اول	دوره زمان دوم	دوره زمان سوم	دوره زمان چهارم
تانکر ۱	۲۰۰	۲۵۱	۳۰۰	۳۲۸
تانکر ۲	۲۰۰	۲۸۴	۲۹۶	۱۵۰

۴- نتیجه گیری

با توجه به پیچیدگی ویژگی‌های سیستم توزیع آب، برنامه‌ریزی مناسب و بهینه‌سازی عملکرد آن امری حیاتی است. در این پژوهش، یک مدل بهینه‌سازی برای برنامه‌ریزی زمان کار پمپ‌ها با هدف کاهش مصرف انرژی معرفی شده است. این مدل بهینه از متغیرهای گسسته و پیوسته برای مدل‌سازی زمان کار پمپ‌ها و جریان لوله‌ها استفاده می‌کند. مسئله به صورت یک مسئله برنامه‌ریزی غیرخطی و آمیخته مدل‌سازی شده است. سپس با استفاده از رویکردهای خطی‌سازی به صورت یک مدل بهینه‌سازی خطی آمیخته تبدیل شد تا بتوان آن را با حل کننده‌های مختلف به صورت کارا حل نمود. عملکرد مدل پیشنهادی با استفاده از یک مثال کاربردی مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج بدست آمده نشان داد که استفاده از روش بهینه‌سازی پیشنهادی منجر به کاهش هزینه‌های عملیاتی و افزایش کارایی سیستم توزیع آب می‌شود. با توجه به مطالب مورد بحث در این مقاله، پیشنهاد می‌شود که در پژوهش‌های آتی به موارد زیر توجه گردد:

- تحقیقات بیشتر بر روی رابطه بین مصرف انرژی و عملکرد سیستم توزیع آب: این تحقیقات می‌توانند به شناخت بهتری از تأثیر برنامه‌ریزی بهینه پمپ‌ها بر مصرف انرژی و همچنین بر کارایی سیستم توزیع آب کمک کنند.
- بررسی روش‌های دیگر بهینه‌سازی: علاوه بر مدل پیشنهادی، بررسی و ارزیابی روش‌های دیگر بهینه‌سازی مانند روش‌های فراابتکاری، روش‌های مبتنی بر سیستم‌های فازی و سایر الگوریتم‌های مطرح در این زمینه می‌تواند سودمند باشد.
- ارزیابی تاثیر متغیرهای مختلف در برنامه‌ریزی پمپ‌ها: بررسی و ارزیابی تاثیر متغیرهای مختلفی مانند حجم آب در مخازن، قطر لوله‌ها و سطح آب در تانکرها روی کارایی و بهینه‌سازی برنامه‌ریزی پمپ‌ها می‌تواند نتایج جالبی به همراه داشته باشد.
- برنامه‌ریزی هوشمند مصرف انرژی: استفاده از روش‌های هوشمند برای کنترل عملکرد پمپ‌ها و برنامه‌ریزی بهینه آن‌ها با استفاده از الگوریتم‌های مبتنی بر یادگیری ماشین، شبکه‌های عصبی و سیستم‌های هوشمند، می‌تواند به بهبود عملکرد و کارایی سیستم توزیع آب منجر شود.

موارد پیشنهادی فوق الذکر، بهبود عملکرد و بهینه‌سازی سیستم توزیع آب را برای آینده مطرح می‌کنند و می‌توانند به تحقق هدف کاهش مصرف انرژی و افزایش کارایی این سیستم کمک کنند.

تعارض منافع

نویسنده اعلام می‌کند که در مورد انتشار این مقاله تعارض منافع وجود ندارد.

مراجع

[1] Gh. Fallahi, and M. Salehzadeh. " Pressure Management in Water Distribution Networks using Geographic Information System and Spatial Open Source Database (Case Study: Golestan Town of Shiraz)." *Journal of Water and Sustainable Development* 4, no. 2 (2018): 151-158. (in Persian)

[2] M. Herman, M. Romi Syahputra, S. Sutarman, and G.W. Weber. "Water Distribution Network Optimization Model with Reliability Considerations in Water Flow (Debit)." *Water* 15, no. 17 (2023): 3119.

[3] O. Ormbsee, and L. Lansey. "Optimal control of water supply pumping systems." *Journal of Water Resources Planning and Management* 120, no. 2 (1994): 237–252.

[4] U. Zessler, and U. Shamir. "Optimal operation of water distribution systems." *Journal of Water Resources Planning and Management* 115, no. 6 (1989): 735–752.

[5] M.F.K. Pasha, and K. Lansey. "Optimal pump scheduling by linear programming." *In Proceedings of World Environmental and Water Resources Congress*. Kanzas city. (2009): 395–404.

[6] A. Savic, D. Walters, A. Godfrey, and M. Schwab. "Multiobjective genetic algorithms for pump scheduling in water supply." *In Evolutionary Computing, AISB.* (1997): 1–10.

[7] G.C. Dandy. A.R. Simpson. and L.J. Murphy. "An improved genetic algorithm for pipe network optimization." *Water Resources Research* 32, no. 2 (1996): 449–458.

[8] V. Kelner, and O. Léonard. "Optimal pump scheduling for water supply using genetic algorithms." In 5th International Conference on Evolutionary Computing for Industrial Applications (EUROGEN'03). 2003.

[9] C. Biscos, M. Mulholland, M.V. Le Lann, C.A. Buckley, and C.J. Brouckaert. "Optimal operation of water distribution networks by predictive control using MINLP." *Water Sa* 29, no. 4 (2003): 393–404.

[10] M. Van Dijk, S.J. van Vuuren, and J.E. Zyl. "Optimising water distribution systems using a weighted penalty in a genetic algorithm." *Water Sa* 34, no. 5 (2008): 537–548.

[11] M. Lopez-Ibanez, T. Devi Prasad, and B. Paechter. "Ant colony optimization for optimal control of pumps in water distribution networks." *Journal of Water Resources, Planning and Management, ASCE* 134, no. 5 (2008): 337–346.

[12] V. Nitivattananon, E.C. Sadowski, and R.G. Quimpo. "Optimization of water supply system operation." *Journal of Water Resources, Planning and Management, ASCE* 122, no. 5 (1996): 374–384.

[13] S. Pezeshk, and O.J. Helweg. "Adaptive search optimization in reducing pump operating costs." *Journal of Water Resources, Planning and Management, ASCE* 122, no. 1 (1996): 57–63.

[14] M. Zarei, et al. "Optimizing the performance of water supply networks using genetic algorithm." *Irrigation and Development Engineering*, no. 1 (2006). (in Persian)

[15] R. Yusefi, et al. "Optimization of urban water distribution system using harmonic search algorithm." *Water Resources Engineering*, no. 3 (2020). (in Persian)

[16] M.M. Shahbazi, et al. "Optimization of urban water distribution system using genetic algorithm." *Scientific-Research Journal of Urban-Spatial Civil Engineering*, no. 2 (2014). (in Persian)

[17] S. Parvaze, R. Kumar, J.N. Khan, N. Al-Ansari, S. Parvaze, D.K. Vishwakarma, and A. Kuriqi. "Optimization of water distribution systems using genetic algorithms: A review." *Archives of Computational Methods in Engineering* 30, no. 7 (2023): 4209-4244.

[18] S.J. Musavi, et al. "Optimization of water distribution system using ant algorithm." *Bimonthly Water and Wastewater Journal*, no. 23 (2016). (in Persian)

[19] S. Hajiha, et al. "Optimization of water distribution in water supply network using magnetic particle flow algorithm." *Journal of Water and Sewage*, no. 34 (2018). (in Persian)

[20] H. Moeinfar, and J. Yazdi. "Optimization of energy consumption in water distribution networks using variable speed pumps." *Iranian Hydraulic Association Journal of Hydraulics* 18, no. 3 (2023): 45-61. (in Persian)

[21] S. Daulat, M.M. Rokstad, A. Klein-Paste, J. Langeveld, and F. Tscheikner-Gratl. "Challenges of integrated multi-infrastructure asset management: a review of pavement, sewer, and water distribution networks." *Structure and Infrastructure Engineering* 20, no. 4 (2024): 546-565.

[22] T. Yu, X. Chen, W. Yan, Z. Xu, and M. Ye. "Leak detection in water distribution systems by classifying vibration signals." *Mechanical Systems and Signal Processing*, 185 (2023): 109810.

[23] A.M. Farouk, R.A. Rahman, and N.S. Romali. "Economic analysis of rehabilitation approaches for water distribution networks: Comparative study between Egypt and Malaysia." *Journal of Engineering, Design and Technology* 21, no. 1 (2023): 130-149.