



Optimum Design of Placement and Hydraulic Dimensions of Domestic Wastewater Collection Network with the Approach of Removing the Highest Amount of COD and Increasing DO Along the Route

Massoud Tabesh^{1*}, Omid Pouraskari Dehnavi², Reza Heydarzadeh³

1. Prof., School of Civil Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran (Corresponding Author) mtabesh@ut.ac.ir

2. MSc., School of Civil Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

3. PhD., School of Civil Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran and Head of the Technical Office, Khorasan Razavi Province Water and Wastewater Company, Mashhad, Iran

<https://doi.org/10.22093/wwj.2025.503059.3477>

Original Paper

Abstract

Today, the design and implementation of wastewater collection, disposal and treatment networks is considered as one of the vital factors in preserving and protecting the environment and ensuring the public health of people in cities and villages. By reviewing past studies as well as the lack of optimized layout design, qualitative analysis of the sewerage network along with the design of the dimensions of the sewerage network becomes obvious. In this research, a method for the simultaneous design of layout and dimensions of the domestic sewage network has been used; with an optimal design, in addition to satisfying the required hydraulic conditions, can improve the quality of incoming wastewater treatment via COD and DO modeling. For this purpose, using the Loop-by-Loop cutting algorithm to generate network layout, the algorithm to determine the hydraulic dimensions of the sewer network, and the WATS model for qualitative modeling of wastewater in the network, employing the gray wolf algorithm for optimization, the desired network is established. To evaluate the presented method, a sample wastewater collection network was investigated. Based on the results obtained, the cost of scenarios 2 and 3 increased by 9 and 14 percent, respectively, compared to scenario 1, which is mainly due to the increase in the slope of the pipes and, as a result, the increase in the depth of the pipes. The COD objective function in scenarios 2 and 3 improved by 164 and 132 percent, respectively. For example, in scenario 2, a 4.5 percent decrease in the COD value was observed along the studied network. The DO objective function is also zero in all three scenarios due to the depletion of DO along the wastewater transport path. However, in each scenario, the DO values in the pipes show a higher value than the previous scenario, which makes it necessary for that scenario to have less aeration than the previous one.

Keywords:
Optimal Design,
Sewage Collection
Network, Gray Wolf
Algorithm, Qualitative
Analysis, COD, DO.



Received: Jan. 22, 2025

Revised: Apr. 7, 2025

Accepted: May 4, 2025

To cite this article:

Tabesh, M., Pouraskari Dehnavi, O., Heydarzadeh, R., 2025. Optimum design of placement and hydraulic dimensions of domestic wastewater collection network with the approach of removing the highest amount of COD and increasing Do along the route. *Water and Wastewater*, 36(2), 1-22. <https://doi.org/10.22093/wwj.2025.503059.3477>.

© The Author(s).

This work is licensed under a [Creative Commons Attribution 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Use your device to scan and read the article online



1. Introduction

A review of previous studies reveals a lack of optimized layout design and qualitative analysis in sewer networks, alongside the conventional focus on sizing and dimensioning. This research addresses this gap by presenting a method for the simultaneous design of both layout and dimensions of domestic sewage networks. The proposed approach aims not only to satisfy hydraulic requirements but also to enhance the quality of wastewater entering treatment facilities by modeling chemical oxygen demand and dissolved oxygen. In the absence of adequate DO and re-aeration, anaerobic processes occur within the pipes, producing gases such as methane and hydrogen sulfide. These gases can lead to pipe corrosion, network explosions, and lower organic matter removal compared to aerobic processes. Therefore, maintaining oxygen in the pipes must be considered during design, with an objective function capable of quantifying this effect.

2. Methodology

The objective functions for maximizing COD removal (Eq. 1) and maximizing DO (Eq. 2) are defined as follows:

$$OF_{COD} = \frac{\sum_1^m COD_{Removal(i)} \times Q_{(i)}}{\sum_1^m Q_{(i)}} \quad (1)$$

$$OF_{DO} = \frac{\sum_1^m DO_{out(i)} \times Q_{(i)}}{\sum_1^m Q_{(i)}} \quad (2)$$

Where,

m represents the total number of pipes and $Q_{(i)}$ is the flow rate in each pipe.

The cost objective function accounts for pipe purchase and excavation costs, as well as manhole construction, excluding pumping stations and overflow manholes. It is defined by Eqs. 3 to 5 as follows:

$$C_{cost} = (\sum_{i=1}^m L_i K_p(d_i, E_i)) + (\sum_{j=1}^n K_d(h_d)) \quad (3)$$

$$K_p = 10.93e^{3.43d_i} + 0.012E_i^{1.53} + 0.437E_i^{1.47}d_i \quad (4)$$

$$K_d = 41.46h_d \quad (5)$$

Where,

K_p and K_d are the cost functions for pipes and manholes, respectively; L_i is pipe length, d_i is pipe diameter, E_i is the average pipe depth, h_d is manhole depth, m is the number of pipes, and n is the number of manholes.

The WATS¹ model was employed to simulate aerobic processes of organic matter in sewers, tracking COD changes in both liquid and biofilm phases under aerobic and anaerobic conditions (Hvitved-Jacobsen et al., 2013). COD component percentages were adopted from (Hvitved-Jacobsen et al., 2013). The parameters and coefficients of the kinetic equations were taken equal to the values suggested by (Almeida, 1999). Due to the complexity of the WATS model equations, numerical methods were required; specifically, the fourth-order Runge-Kutta method was applied (Heydarzadeh et al., 2019).

To calculate the quality of the wastewater network, some of the network's hydraulic information, such as hydraulic radius, flow velocity in the pipes, flow depth in the pipes, and Froude number were determined. By providing a sequential algorithm, the quality characteristics (COD concentration value) of the network at different points were calculated.

Graph theory was used for designing the sewer network layout. A base cyclic graph, where all pipes (edges) and manholes (nodes) are interconnected, represents all possible layouts. A sub graph is then extracted to meet design requirements. Optimization is conducted to identify the best spanning tree by weighting edges according to the objective function.

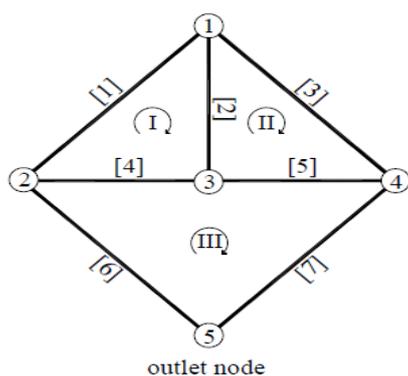
To design the layout of the sewage network, in this way, a base graph is initially formed. This graph is a cyclic graph in which all pipes (graph edges) and manholes (graph nodes) are connected to each other, and includes all possible states for the layout. A sub graph is then extracted from the base graph, and all the conditions required for designing the layout of the sewage network are taken into account. According to the graph theory, to achieve the best spanning tree, optimization methods must be used and the objective function must be followed by weighting the edges.

To do this, from the Loop-by-Loop cutting algorithm to generate network layout (Fig. 1), the algorithm presented by (Bakhshipour, 2012) was used to determine the hydraulic dimensions of the sewer network from the WATS model for qualitative modeling of wastewater in the network and from the gray wolf algorithm² for optimization (Fig. 2). Achieving maximum DO

¹ Wastewater Aerobic/Anaerobic Transformations in Sewers (WATS)

² Gray Wolf Algorithm (GOA)





$$B = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 2 \\ 2 & 1 & 1 & 0 & 1 & 3 \\ 3 & 0 & 1 & 0 & 1 & 4 \\ 4 & 1 & 0 & 1 & 2 & 3 \\ 5 & 0 & 1 & 1 & 4 & 3 \\ 6 & 0 & 0 & 1 & 5 & 2 \\ 7 & 0 & 0 & 1 & 4 & 5 \end{bmatrix}$$

Fig. 1. Basic graph matrix formation (Haghighi, 2012)

and COD removal along the wastewater transfer route to the treatment plant is the objective function of this optimization algorithm.

3. Results and discussion

In this study, a large network includes 79 pipes, 57 manholes and 23 rings was investigated to test the ability of the method presented in this study to design and optimize the wastewater network. Considering the discreteness of the objective functions used in this research, the design and optimization of each network was carried out in three different scenarios. The scenario 1 was to achieve the lowest network implementation cost, the scenario 2 was to achieve the highest COD objective function (the highest amount of COD removed) and the scenario 3 was to achieve the

highest DO level along the wastewater network. The optimization results of the three scenarios are given in Tables 1 to 3.

Comparing the results of these scenarios demonstrates that the optimal placement and design can be selected according to the desired goal. Since the aim of this research is to improve the quality of wastewater entering the treatment plant, the scenarios 2 and 3, which are related to wastewater quality, receive more attention.

By comparing the results obtained for this network, it is observed that by placing scenario 2 as the main goal of the problem (achieving the highest COD removal rate along the wastewater transition line), in the plan that is used as the best plan to achieve this objective function, the two objective functions of network implementation cost and the amount of DO in the pipes will also reach desirable numbers. As can be seen, scenarios 1 and 2 are in the same direction. That is, by reducing the slope of the pipes, the drilling costs and, consequently, the total cost of implementing the network are reduced. Also, the flow velocity in the pipes is reduced, which will lead to an increase in the retention time and greater COD removal along the path, but scenario 3 will perform better by increasing the slope and the flow velocity in the pipes, which contradicts the previous two scenarios.

Another result of this research is the low amount of DO in the network (OF_{DO}) in all scenarios, which reveals the need for aeration of the networks along the route. Therefore, scenario 2 can be used to improve the quality of wastewater entering the treatment plant. By following this scenario, the cost of implementing the project will also be a desirable number, and by performing aeration along the way, scenario 3 will also be met and the final goal will be achieved.

Table 1. General results of the scenario 1 for the (Li and Matthew, 1990) network

No. of iterations of the algorithm	Time to reach the optimal result (min)	OF_{COST}	OF_{COD}	OF_{DO}
20000	89	1.69E06	0.53	0

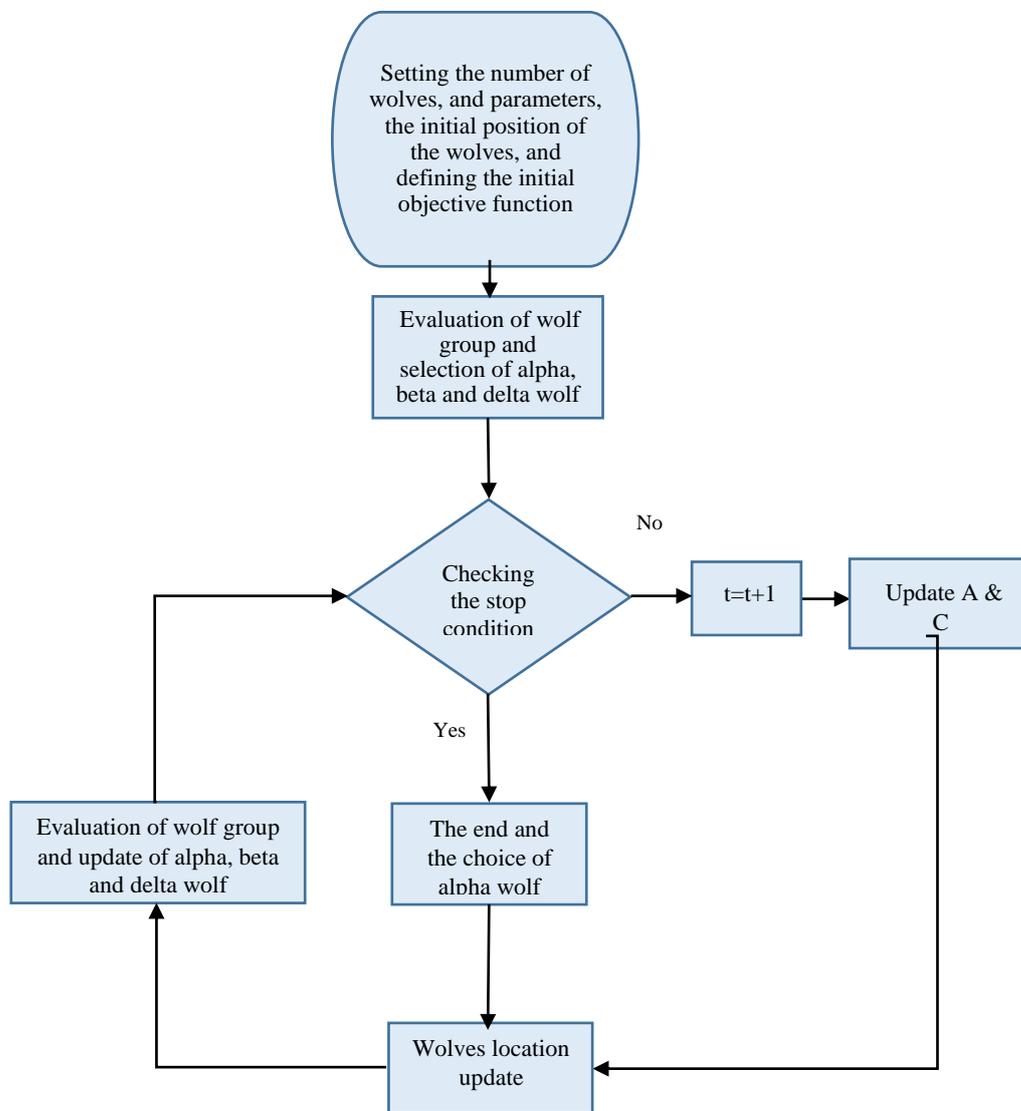
Table 2. General results of the scenario 2 for the (Li and Matthew, 1990) network

No. of iterations of the algorithm	Time to reach the optimal result (min)	OF_{COST}	OF_{COD}	OF_{DO}
20000	86	1.84E06	1.4	0



Table 3. General results of the scenario 3 for the (Li and Matthew, 1990) network

No. of iterations of the algorithm	Time to reach the optimal result (min)	OF _{COST}	OF _{COD}	OF _{DO}
18000	68	1.93E06	1.23	0

**Fig. 2.** Flowchart of how the GOA works

4. Conclusions

As observed, the first and second scenarios are in the same direction. That is, by reducing the slope of the pipes, excavation costs and, consequently, the total cost of network implementation will be reduced. Also, the flow velocity in the pipes will be reduced, which will lead to an increase in the residence time and greater COD removal along the route. However, the third scenario will have better performance by increasing the slope and increasing the flow velocity in the pipes. Another

result of this research is the low dissolved oxygen content in the network (OFDO function) in all scenarios, revealing the need for aeration of the networks along the route. Therefore, in general, to improve the quality of wastewater entering the treatment plant, the second scenario can be used. By following this scenario, the cost of implementing the project will also be a desirable number, and by performing aeration along the way, the third scenario will also be met and the final goal will be achieved.





طراحی بهینه جانمایی و ابعاد هیدرولیکی شبکه جمع آوری فاضلاب خانگی با رویکرد حذف بیشترین مقدار COD و افزایش DO در طول مسیر

مسعود تابش^{۱*}، امید پورعسکری دهنوی^۲، رضا حیدرزاده^۳

۱- استاد، دانشکده مهندسی عمران، دانشکدگان فنی دانشگاه تهران، تهران، ایران (نویسنده مسئول) mtabesh@ut.ac.ir

۲- دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشکدگان فنی دانشگاه تهران، تهران، ایران

۳- دکترای مهندسی عمران- محیطزیست، دانشکده مهندسی عمران، دانشکدگان فنی دانشگاه تهران، تهران، ایران و مسئول دفتر فنی شرکت آب و فاضلاب استان خراسان رضوی، مشهد، ایران



<https://doi.org/10.22093/wwj.2025.503059.3477>

مقاله پژوهشی

چکیده

امروزه طرح و اجرای شبکه‌های جمع‌آوری، دفع و تصفیه فاضلاب به‌عنوان یکی از فاکتورهای حیاتی در حفظ و حراست محیط‌زیست و تضمین سلامت و بهداشت عمومی مردم در سطح شهرها و روستاها محسوب می‌شود. با بررسی مطالعات انجام شده در گذشته، خلأ تحلیل کیفی شبکه فاضلاب در کنار طراحی جانمایی و ابعاد شبکه فاضلاب احساس می‌شود. به این منظور در این پژوهش روشی برای طراحی ابعاد شبکه فاضلاب خانگی به کار گرفته شد که با طراحی بهینه، علاوه بر جانمایی مناسب شبکه و ارضای شرایط هیدرولیکی موردنیاز شبکه فاضلاب، به دنبال ارتقای کیفیت فاضلاب ورودی به تصفیه‌خانه از طریق مدل کردن COD و DO نیز است. برای این کار از الگوریتم برش حلقه به حلقه برای بهینه‌سازی جانمایی شبکه، به‌منظور تعیین ابعاد هیدرولیکی شبکه فاضلاب، از مدل WATS برای مدل‌سازی کیفی فاضلاب موجود در شبکه و از الگوریتم گرگ خاکستری برای بهینه‌سازی شبکه جمع‌آوری فاضلاب استفاده شد. سه سناریوی کمینه کردن هزینه اجرای شبکه، بیشینه کردن مقدار COD حذف شده و بیشینه کردن میزان DO در طول مسیر انتقال فاضلاب به تصفیه‌خانه در نظر گرفته شد. در ادامه به‌منظور ارزیابی روش ارائه شده، یک شبکه نمونه جمع‌آوری فاضلاب بررسی شد. بر اساس نتایج به دست آمده هزینه سناریو ۲ و ۳ نسبت به سناریو ۱ به ترتیب ۹ و ۱۴ درصد افزایش یافته که عمدتاً به علت افزایش شیب لوله‌ها و در نتیجه افزایش عمق کارگذاری لوله‌ها بود. میزان تابع هدف COD در سناریو ۲ و ۳ به ترتیب ۱۶۴ و ۱۳۲ درصد بهبود یافت. به‌عنوان مثال در سناریو ۲ مقدار ۴/۵ درصد کاهش در مقدار COD در طول شبکه مورد مطالعه مشاهده شد. مقدار تابع هدف DO نیز به علت اتمام اکسیژن محلول در طول مسیر انتقال فاضلاب در هر سه سناریو صفر بود، ولی در هر سناریو نسبت به سناریو قبلی، مقدار اکسیژن محلول در لوله‌ها مقدار بیشتری را نسبت به سناریوها نشان داد که باعث شد برای آن سناریو هوادهی کمتری نسبت به سناریوی قبلی لازم باشد.

واژه‌های کلیدی:
طراحی بهینه، شبکه
جمع‌آوری فاضلاب،
الگوریتم گرگ خاکستری،
تحلیل کیفی، COD،
DO



دریافت: ۱۴۰۳/۱۱/۱۳

اصلاح: ۱۴۰۴/۱/۱۸

پذیرش: ۱۴۰۴/۲/۱۴

از دستگاه خود برای اسکن و خواندن مقاله به صورت آنلاین استفاده کنید



برای ارجاع به این مقاله به صورت زیر اقدام فرمایید:

تابش، م.، پورعسکری دهنوی، ا.، حیدرزاده، ر.، ۱۴۰۴، طراحی بهینه جانمایی و ابعاد هیدرولیکی شبکه جمع‌آوری فاضلاب خانگی با رویکرد حذف بیشترین مقدار COD و افزایش DO در طول مسیر.

آب و فاضلاب، ۳۶(۲)، ۲۲-۱. <https://doi.org/10.22093/wwj.2025.503059.3477>



© The Author(s).

This work is licensed under a [Creative Commons Attribution 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)



۱- مقدمه

طراحی شبکه فاضلاب خانگی شامل دو بخش طراحی جانمایی شبکه و طراحی ابعاد شبکه برای یک جانمایی معلوم است (Moini, 2013). بخش اول مربوط به تعیین محل قرارگیری لوله‌ها و نحوه ارتباط آن‌ها از سرشاخه‌ها تا نقطه خروجی است. بخش دوم که به شدت تحت تأثیر جانمایی شبکه قرار دارد، شامل تعیین قطر و شیب لوله‌ها، عمق کارگذاری لوله‌ها و محل قرارگیری ایستگاه‌های پمپاژ است. در کنار این موارد مباحث کیفی شبکه فاضلاب نیز اهمیت زیادی دارند، به‌گونه‌ای که عدم توجه به پارامترهای کیفی فاضلاب انتقالی در شبکه می‌تواند هزینه‌های گزافی را در تصفیه‌خانه به سیستم تحمیل کند. در نتیجه باید در هنگام طراحی شبکه جمع‌آوری فاضلاب، مباحث کیفی آن نیز بررسی شود. یکی از پارامترهای بسیار مهم کیفی شبکه فاضلاب، میزان COD موجود در فاضلاب است که با کاهش آن در طول مسیر انتقال فاضلاب می‌توان فاضلاب را با شرایط کیفی مطلوب‌تری به تصفیه‌خانه تحویل داد (Heydarzadeh, 2019).

روال معمول طراحی شبکه‌های جمع‌آوری فاضلاب، آزمون و خطا است. به این صورت که طراح با انتخاب گزینه‌های طراحی و شبیه‌سازی آن‌ها در جستجوی پیدا کردن گزینه‌های بهینه، از بین طرح‌های مطلوب و قابل قبول است؛ اما نکته قابل توجه در بحث طراحی شبکه‌های جمع‌آوری فاضلاب، یافتن گزینه قابل قبول با ابعاد نسبتاً مناسب است که بتواند بدون وقفه و با رعایت کلیه استانداردهای مفروض و وظایف خود را انجام دهد. با توجه به هزینه‌های گزاف سرمایه‌گذاری، لزوم استفاده از بهینه‌سازی در طراحی شبکه‌های جمع‌آوری فاضلاب بیش از پیش بر همگان آشکار شده است؛ بنابراین استفاده از برنامه‌های رایانه‌ای و الگوریتم‌های بهینه‌سازی برای طراحی بهینه این شبکه‌ها لازم و ضروری است.

Izquierdo et al. برای طراحی بهینه ابعاد شبکه جمع‌آوری فاضلاب از الگوریتم بهینه‌سازی دسته ذرات^۱ استفاده کردند. این الگوریتم، ساده و دارای پارامترهای کمتری نسبت به الگوریتم ژنتیک و الگوریتم مورچگان است. در این الگوریتم، متغیر تصمیم مورد نظر، شیب و قطر لوله‌ها است و از توابع جریمه برای تعیین قیدها استفاده شده است. در این روش از الگوریتم هوش جمعی

¹ Particle Swarm Optimization (PSO)

برای طراحی بهینه ابعاد شبکه جمع‌آوری فاضلاب استفاده شده است که در آن منهول ریزی و پمپ لحاظ نمی‌شود و در انتها با مقایسه نتایج آن با نتایج روش برنامه‌ریزی پویا، به این نتیجه رسیدند که با صرف هزینه محاسباتی کمتر نسبت به روش برنامه‌ریزی پویا، دقت لازم برای نتایج حاصل شده است. در این مدل هزینه به‌عنوان تابع هدف تعریف شده است (Izquierdo et al., 2008).

حقیقی ابتدا با بهره‌گیری از یک تابع هزینه ساده شده و استفاده از الگوریتم ژنتیک، جانمایی بهینه شبکه فاضلاب را مشخص کرد. این روش یک الگوریتم تطابقی را ارائه می‌دهد که در آن گراف حلقوی اولیه، مرحله به مرحله برش داده می‌شود تا تبدیل به یک جانمایی امکان‌پذیر شود. الگوریتم تولید جانمایی باید بتواند تمامی حالات ممکن برای جانمایی را تولید کند، ولی به‌علت محدودیت‌های خاص شبکه‌های فاضلاب، بسیاری از این جانمایی‌های تولید شده غیرقابل قبول هستند. این روش هم‌زمان با تولید تمامی حالات امکان‌پذیر برای جانمایی شبکه، با استفاده از قیود مناسب از رسیدن به جانمایی‌های غیرقابل قبول نیز اجتناب می‌کند. علی‌رغم آن‌که این روش از نظر محاسباتی بسیار کارآمد و از حیث پیاده‌سازی و اجرا بسیار آسان است، اما توانایی رسیدن به جواب بهینه مطلق را ندارد. تابع هزینه در این روش توانایی در نظر گرفتن هزینه‌های واقعی شبکه فاضلاب را ندارد (Haghighi, 2012).

در ادامه این پژوهش، حقیقی و بخشی‌پور بهینه‌سازی دومرحله‌ای جانمایی و ابعاد شبکه فاضلاب را انجام دادند. در ابتدا جانمایی شبکه توسط الگوریتم حلقه به حلقه تعیین شد و سپس برای این شبکه که جانمایی مشخص دارد، طراحی هیدرولیکی ابعاد شبکه انجام و عمق گره‌ها، مشخصات پمپ‌ها و قطر فاضلاب‌روها تعیین شدند. در مراحل طی شده، تمام قیود فنی مورد نیاز طراحی برآورده شدند. آن‌ها هزینه ساخت شبکه فاضلاب را به‌عنوان تابع هدف در نظر گرفتند که تفاوت کار آن‌ها با پژوهش حقیقی، در همین تابع هدف است که برخلاف پژوهش اول که تابع هدف را به‌صورت ساده شده در نظر گرفته بود، در پژوهش دوم، تابع هدف هزینه واقعی تعریف شد. برای بهینه‌سازی از روش جستجوی تابو استفاده شد. بر اساس نتایج به‌دست آمده، روش جستجوی تابو به‌خوبی توانست پاسخ بهینه‌ای را برای این مثال پیدا کند و همچنین در



بر اساس مفاهیم پایه تئوری گراف‌ها به وجود آمده است، منهول‌ها، رئوس گراف و فاضلاب‌روها، یال‌های گراف را تشکیل می‌دهند و سپس با استفاده از روش برنامه‌ریزی پویا، برای جانمایی ثابت مشخصات هیدرولیکی شبکه به صورت بهینه طراحی می‌شوند (Haghighi, 2012).

ناوین و همکاران الگوریتمی را به منظور تولید کلیه جانمایی‌های ممکن برای شبکه فاضلاب معرفی کردند. در این پژوهش آن‌ها شبکه‌های تولید شده را به ترتیب افزایش دبی جمععی کل مرتب کردند و تابع هزینه را به عنوان تابع هدف این مسئله در نظر گرفتند و شبکه‌ای که کمترین هزینه را داشت به عنوان بهترین گزینه انتخاب کردند. آن‌ها دریافتند که هزینه جانمایی شبکه با افزایش دبی جمععی کل افزایش می‌یابد. به منظور طراحی بهینه ابعاد شبکه فاضلاب از الگوریتم HPSO³ استفاده کردند. از اشکالات این روش، در نظر نگرفتن رقوم ارتفاعی زمین در گره‌ها است. این پژوهشگران به منظور بررسی عملکرد روش پیشنهادی خود، آن را بر روی دو شبکه مختلف آزمایش کرده و نتایج را با روش PSO مقایسه کردند. نتایج بیانگر عملکرد بهتر الگوریتم HPSO نسبت به PSO است (Navin et al., 2016).

از سوی دیگر، (De Villiers et al., 2017) طراحی هم‌زمان جانمایی و ابعاد شبکه جمع‌آوری فاضلاب را انجام دادند. این پژوهشگران به منظور طراحی جانمایی شبکه از تئوری گراف استفاده کردند که دارای دو مرحله بود. در مرحله اول محل منهول‌ها و لوله‌ها با توجه به شرایط محیطی تعیین و در مرحله دوم جهت جریان در لوله‌ها مشخص شد. آن‌ها همچنین فرض کردند که قبل از فرایند بهینه‌سازی باهدف به حداقل رساندن هزینه نصب و راه‌اندازی شبکه فاضلاب، موقعیت‌یابی منهول‌ها و لوله‌ها به اتمام رسیده است. آن‌ها در این پژوهش با استفاده از چهار استراتژی مختلف، الگوریتم جامعه مورچگان را توسعه دادند. تابع هدف آن‌ها رسیدن به بهترین شرایط هیدرولیکی و کمترین هزینه بود. در انتها از سه مسئله با ابعاد مختلف به منظور آزمودن این چهار استراتژی استفاده کردند که بر اساس نتایج حاصله، هیچ‌کدام از این چهار استراتژی به طور واضح از دیگران برتر نبود، اما آن استراتژی که تنها از یک الگوریتم برای طراحی جانمایی و ابعاد استفاده می‌کرد نتوانست

مقایسه با مطالعات قبلی، مقدار تابع هدف کاهش یافته و سرعت همگرایی در رسیدن به جواب نیز افزایش یافت (Haghighi and

Bakhsipour, 2014, Haghighi, 2012)

صفوی و گرانه‌ر به منظور بهینه‌سازی ابعاد شبکه‌های فاضلاب از روش برنامه‌ریزی خطی صحیح ترکیبی¹ استفاده کردند. تابع هدف این پژوهش رسیدن به کمترین هزینه (شامل هزینه خریداری و پوشش لوله و ساخت منهول) بود. همچنین از شیب لوله‌ها، قطر آن‌ها و عمق متوسط کارگذاری آن‌ها به عنوان متغیر تصمیم استفاده شد. تمامی قيود تعریف شده در این پژوهش نیز به صورت خطی درآمدند. به منظور اجتناب از غیرخطی شدن تابع هدف، فرض‌هایی در نظر گرفته شد که در رسیدن به جواب بهینه نهایی تأثیرگذار بودند. به طور مثال در محاسبه هزینه کارگذاری لوله‌ها تا عمق مشخصی، این هزینه تابعی از قطر در نظر گرفته شد ولی برای کارگذاری در اعماق بیشتر، تأثیر قطر در هزینه لحاظ نشد. نتایج حاصل از به‌کارگیری این مدل بر روی یک شبکه واقعی حاکی از کاهش قابل‌ملاحظه زمان محاسبات و رسیدن به هزینه کمتر نسبت به سایر روش‌ها بود (Safavi and Geranmehr, 2017).

تیان و هی با در نظر گرفتن یک جانمایی ثابت برای شبکه جمع‌آوری فاضلاب و با استفاده از روش جمع‌آوری برنامه‌ریزی پویا² بهینه‌سازی ابعاد شبکه فاضلاب را انجام دادند. در این پژوهش، قطر لوله‌ها به عنوان متغیر تصمیم و هزینه اجرای شبکه نیز به عنوان تابع هدف مسئله در نظر گرفته شد. با استفاده از این الگوریتم در طراحی یک شبکه فاضلاب واقعی در کشور چین، مشاهده شد که بین طراحی شبکه قبل و بعد از بهینه‌سازی تفاوت زیادی وجود دارد و استفاده از این الگوریتم و بهینه‌سازی شبکه، باعث کاهش قابل توجه هزینه‌ها شد. از دیگر نتایج حاصل از این پژوهش، امکان استفاده از این الگوریتم در شبکه‌های بزرگ مقیاس و پیچیده بود (Tian and He, 2020).

مرور ادبیات فنی نشان می‌دهد که به صورت کلی، پژوهش‌های انجام شده در زمینه طراحی بهینه هم‌زمان جانمایی و ابعاد شبکه جمع‌آوری فاضلاب بسیار محدود هستند و اغلب مطالعات انجام شده، با در نظر گرفتن جانمایی ثابت، فقط به دنبال طراحی بهینه ابعاد شبکه بوده‌اند. از جمله در الگوریتم ارائه شده توسط حقیقی که

³ Hierarchical Particle Swarm Optimization (HPSO)

¹ Mixed-Integer Linear Programming (MILP)

² Dynamic Programming Aggregation Method (DPAM)



هزینه را به اندازه سایر سناریوها بهینه کند.

دوکه و همکاران با ارائه یک روش ریاضی، بهینه‌سازی جانمایی و ابعاد هیدرولیکی شبکه جمع‌آوری فاضلاب را انجام دادند. در این پژوهش انتخاب جانمایی شبکه با استفاده روش برنامه‌ریزی صحیح ترکیبی انجام شد و در انتها یک شبکه شاخه‌ای تولید شد. سپس با استفاده از کد نوشته شده، مشخصات هیدرولیکی شبکه (شامل قطر و تراز کارگذاری لوله‌ها) محاسبه شد. در این پژوهش تابع هدف، کاهش هزینه اجرای شبکه بود. با اجرای این روش بر روی شبکه پیشنهادی در مطالعات گذشته، طرح ارائه شده توانست هزینه را به میزان ۴۲ درصد نسبت به پژوهش‌های قبل از آن کاهش دهد (Duque et al., 2020).

هدف از پژوهش سالداریاگا و هران طراحی شبکه‌های جمع‌آوری فاضلاب ارزان‌قیمت و با قابلیت اطمینان بالا بود. برای این هدف آن‌ها روشی برای بررسی انعطاف‌پذیری و قابلیت اطمینان در طرح‌های متنوعی که با تغییر تابع هدف مدل طرح جانمایی شبکه تولید می‌شود را پیشنهاد کردند. آن‌ها روش پیشنهادی خود را در چهار سناریو با استفاده از دو معادله هزینه و دو معیار طراحی شبکه فاضلاب که از پژوهش‌های گذشته استخراج شده بود آزمایش کردند و نشان دادند که در اغلب سناریوها، یافتن طرح‌هایی با هزینه کمتر و قابلیت اطمینان و انعطاف‌پذیری بالاتر از آنچه قبلاً منتشر شده امکان‌پذیر است (Saldarriaga and Herran, 2024).

علاوه بر مدل‌سازی هیدرولیکی، وضعیت پارامترهای کیفی در شبکه فاضلاب را نیز می‌توان با مدل‌سازی بررسی کرد. مطالعات بر روی پارامترهای کیفی شبکه فاضلاب نسبت به مطالعات بر روی مشخصات هیدرولیکی شبکه فاضلاب، گستردگی کمتری دارد. از اولین پژوهش‌های انجام شده در این زمینه پژوهش Kaijun et al. بود که به دنبال یافتن معادله حاکم بر فرایند کاهش غلظت COD در سه نوع راکتور بی‌هوازی، هوازی و راکتور میکروآیروفیل بود. آن‌ها در این پژوهش، این سه راکتور را در آزمایشگاه مدل‌سازی کردند. نتایج نشان‌دهنده این بود که درصد عمده از فرایند حذف در اولین روز اتفاق می‌افتد و سیستم هوازی از نظر حذف COD بهترین عملکرد را دارد و پس از آن سیستم میکروآیروفیل و در آخر نیز سیستم بی‌هوازی قرار دارد. در انتها نتیجه‌گیری آن‌ها برای معادله حاکم بر نرخ مصرف مواد آلی به این صورت بود: چنانچه

زمان‌ماند در لوله فاضلاب حدود ۲ روز باشد، ممکن است معادله درجه اول بتواند نرخ حذف مواد آلی را نشان دهد، ولی در صورتی که زمان‌ماند کمتر از ۱ روز باشد آنگاه می‌توان با اطمینان بالاتری از معادله درجه اول برای تعیین میزان کاهش مواد آلی استفاده کرد (Kaijun et al., 1995).

در پژوهشی فرایندهایی که در فاضلاب‌روها توسط میکروارگانیسم‌ها اتفاق می‌افتند را دسته‌بندی کرده و آن‌ها را به صورت رشد هتروتروفیک توده بیولوژی، کسب انرژی موردنیاز بقای توده‌های بیولوژیکی، هیدرولیز مواد آلی قابل هیدرولیز به صورت سریع و هیدرولیز مواد آلی قابل هیدرولیز به صورت دسته‌بندی کردند. در نتیجه COD فاضلاب به چهار بخش توده بیولوژیکی هتروتروفیک (X_{HW})، سوبستره قابل تجزیه بیولوژیکی سریع (S_S)، سوبستره قابل هیدرولیز سریع (X_{SI}) و سوبستره قابل هیدرولیز کند (X_{S2}) تقسیم‌بندی شد. در این پژوهش معادلات حاکم بر این چهار بخش و مقدار پارامترهای موردنیاز برای محاسبه آن‌ها نیز ارائه شد (Hvitved-Jacobsen et al., 1999).

المیدا و همکاران از یک خط لوله فاضلاب به طول ۷۲۰۰ متر و قطر ۱ متر با شیب متوسط ۰/۷ درصد برای انجام مطالعات خود استفاده کردند. در این پژوهش میزان اکسیژن محلول همواره بالاتر از ۱ میلی‌گرم بر لیتر بود که این مورد به همراه زمان‌ماند طولانی، باعث کاهش قسمتی از مواد قابل تجزیه بیولوژیکی در فاضلاب شده بود؛ بنابراین اهمیت تعادل اکسیژن برای بهبود عملکرد کیفی فاضلاب به‌خوبی تبیین می‌شود و باید شرایطی برای طراحی لحاظ شود که بتوان به حداکثر مقدار اکسیژن محلول دسترسی پیدا کرد (Almeida et al., 2000).

احراری تغییرات پارامترهای مختلف کیفی فاضلاب در شبکه جمع‌آوری فاضلاب شهر بیرجند را بررسی کرد. در این پژوهش نمونه‌برداری از نقاط مختلف شبکه فاضلاب انجام شد و پارامترهای کیفی pH، دما (T)، اکسیژن محلول، کل جامدات محلول (TDS)، هدایت الکتریکی (EC)، اکسیژن‌خواهی بیوشیمیایی^۱، اکسیژن‌خواهی شیمیایی (COD)، سولفات (SO_4^{2-})، نیترات (NO_3^-) و نیتريت (NO_2^-) مورد سنجش قرار گرفت. در ادامه با استفاده از روش‌های آماری و روش بی‌زین کریجینگ،

¹ Biological Oxygen Demand (BOD)



مختلف شبکه تعیین کرد. همان گونه که در سناریوهای دهگانه بررسی شده این پژوهش مشاهده شد، در فرایند بهینه‌سازی توابع هدف، نسبت پرشدگی و COD تقریباً با یکدیگر همسو هستند و افزایش یا کاهش یکی به افزایش یا کاهش دیگری منجر می‌شود. از طرفی توابع هدف سرعت و اکسیژن محلول نیز تا حدودی با یکدیگر همسو بوده، اما با توابع هدف نسبت پرشدگی و COD در تقابل بودند و تغییر در مقدار توابع همسو منجر به نتیجه معکوس در توابع هدف مقابل شد. تابع هدف هزینه به شدت از تغییر متغیرهای تصمیم تأثیر گرفت و مقدار آن تغییرات زیادی را نشان داد (Heydarzadeh, 2019, Heydarzadeh et al., 2019).

همان طور که مشاهده می‌شود اغلب پژوهش‌های گذشته بهینه‌سازی هم‌زمان جانمایی و ابعاد هیدرولیکی و برخی نیز بهینه‌سازی هم‌زمان ابعاد هیدرولیکی و عملکرد کیفی شبکه فاضلاب را بررسی کردند و هیچ‌کدام بهینه‌سازی هم‌زمان هر سه هدف جانمایی، ابعاد هیدرولیکی و عملکرد کیفی شبکه فاضلاب را مورد بررسی قرار ندادند. بنابراین در این پژوهش بهینه‌سازی هم‌زمان هر سه هدف مدنظر بود که نوآوری این پژوهش محسوب می‌شود.

در این پژوهش بهینه‌سازی سه هدف جانمایی، ابعاد هیدرولیکی و عملکرد کیفی شبکه فاضلاب انجام شد. ابتدا در طراحی جانمایی شبکه از الگوریتم برش حلقه به حلقه استفاده شد و سپس برای شبکه‌ای که جانمایی مشخصی دارد طراحی هیدرولیکی شبکه انجام شد و با استفاده از نتایج تحلیل هیدرولیکی، توابع هدف هزینه و کیفی (COD و DO) محاسبه شدند. در مرحله بعد بهینه‌ساز تا بهینه شدن هر یک از این اهداف در سناریو مربوطه، متغیرهای تصمیم را که شامل قطر و شیب لوله بودند تغییر داد.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- طراحی ابعاد هیدرولیکی شبکه فاضلاب

برای طراحی ابعاد هیدرولیکی شبکه فاضلاب به مدلی نیاز است که بتواند قیود هیدرولیکی و فنی مسئله طراحی شبکه فاضلاب را به صورت خودکار تأمین کند و هر طرحی را که ارائه می‌دهد، امکان‌پذیر بوده و دیگر نیازی به انجام عملیات اضافی به منظور رسیدن به شرایط مجاز نباشد. همچنین این مدل باید بتواند به خوبی به قسمت محاسبات کیفی مسئله و قسمت بهینه‌سازی مسئله متصل

بهنه‌بندی غلظت پارامترهای کیفی مورد سنجش در سطح تحت پوشش شبکه فاضلاب بیرجند انجام شد. در انتها مشاهده شد که غلظت دو پارامتر BOD_5 و COD در نقاط شمالی شهر که فاصله بیشتری نسبت به سایر نقاط از خط انتقال دارند بیشتر است و هرچقدر فاضلاب تولیدی زمان بیشتری را در شبکه بگذراند، غلظت پارامترهای مذکور کاهش می‌یابد که نشان‌دهنده انجام فرایندهای تصفیه در طول شبکه است (Ahrari, 2014).

گو و همکاران برای مدل‌سازی و کالیبراسیون سیستم‌های فاضلاب روش جدیدی را معرفی کردند. در این روش فاضلاب به عنوان بیوراکتور در نظر گرفته شد و مدل‌سازی بیوشیمیایی بلندمدت سیستم یکپارچه متشکل از شبکه جمع‌آوری و تصفیه‌خانه فاضلاب بود. در این شبیه‌سازی، فاضلاب به صورت مخزن‌های سری در نظر گرفته شد و از مدل SeweX به منظور محاسبه تغییرات کیفی فاضلاب استفاده شد. در این پژوهش مشاهده شد که نتایج تغییر کیفیت فاضلاب توسط این مدل بیوشیمیایی شباهت بسیاری به نتایج مدل‌هایی که کل شبکه را یکجا شبیه‌سازی می‌کنند دارند، در حالی که سرعت شبیه‌سازی آن بسیار سریع‌تر و کالیبراسیون آن آسان‌تر است. از محدودیت‌های این پژوهش می‌توان به در نظر نگرفتن اثر گذشت زمان بر کیفیت فاضلاب و همچنین دیده نشدن اثر ورود فاضلاب‌های جدید بر کیفیت فاضلاب اشاره کرد (Guo et al., 2019).

در پژوهش‌هایی طراحی بهینه چندهدفه را با استفاده از روش‌های PSO و MPSO^۱ در راستای بالا بردن کارایی تصفیه در طول مسیر انتقال فاضلاب انجام دادند. توابع هدف بهینه‌سازی این پژوهش شامل قابلیت عملکرد هیدرولیکی، مکانیکی، کیفی و هزینه کل بود و طراحی برای شبکه با جانمایی ثابت انجام شد. شبیه‌سازی مقدار COD و اکسیژن محلول در شبکه توسط مدل ساخته شده نشانگر عملکرد خوب مدل در این خصوص بود. آن‌ها نشان دادند که می‌توان با دانستن میانگین مقدار COD و اکسیژن محلول فاضلاب دفعی به شبکه و همچنین مشخصات فیزیکی شبکه، مدل تغییرات ماده آلی و اکسیژن محلول را برای شبکه مورد نظر ساخت و کالیبره کرد. آنگاه با اندازه‌گیری دبی جریان در نقطه خروجی شبکه می‌توان با دقت مناسب مقدار اکسیژن محلول را در نقاط

¹ Multi Particle Swarm Optimization (MPSO)



شکل ۱). این ماتریس از m سطر و $NL+1$ ستون تشکیل می‌شود که ستون اول، شماره لوله‌ها از ۱ تا m و ستون‌های ۲ تا $NL+1$ حضور و یا عدم حضور هر لوله در هر حلقه را نشان می‌دهند. به این صورت که اگر لوله x در حلقه y حضور داشته باشد، در ماتریس B درایه $y+1$ ام و سطر x ام برابر با ۱ خواهد بود و اگر حضور نداشته باشد این درایه برابر با صفر خواهد بود. دو ستون آخر ماتریس B ، ستون ماقبل آخر حاوی شماره منهول بالادست هر لوله و ستون آخر، حاوی شماره منهول پایین دست هر لوله هستند. این دو ستون در ابتدا به صورت دلخواه توسط کاربر تعیین می‌شوند و سپس با استفاده از یک الگوریتم ترتیبی، شماره صحیح منهول بالادست و پایین دست یک لوله تعیین می‌شود.

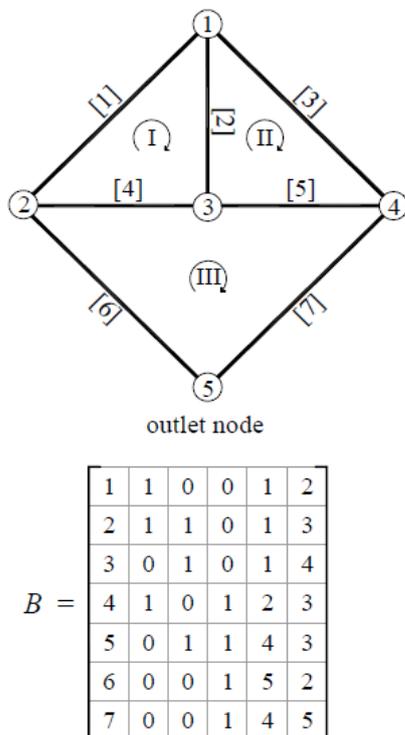


Fig. 1. Basic graph matrix formation (Haghighi, 2012)

شکل ۱- تشکیل ماتریس گراف پایه (Haghighi, 2012)

بعد از تشکیل ماتریس گراف پایه باید یک زیرگراف از آن استخراج شود، برای این کار مطابق مراحل زیر عمل می‌شود:
۱- همان طور که اشاره شد، برای تبدیل یک گراف حلقوی به یک گراف شاخه‌ای باید یک لوله از هر حلقه بریده شود. به این منظور دو

شود. به این صورت که اطلاعات هیدرولیکی موردنیاز برای محاسبات کیفی و بهینه‌سازی را در اختیار قسمت‌های مربوطه قرار دهد. به این منظور باید مدلی ارائه شود که توانایی طراحی-تحلیل را به صورت هم‌زمان داشته باشد و همچنین در زمان بهینه‌سازی بتواند به صورت آزاد در فضای جستجو به انتخاب متغیرهای تصمیم بپردازد و به سمت تابع هدف بهینه مسئله حرکت کند. برای این منظور از مدل توسعه داده شده توسط (Haghighi and Bakhshipour, 2014) استفاده شد.

۲-۲- طراحی جانمایی (پیکربندی) شبکه

برای طراحی جانمایی شبکه فاضلاب می‌توان از نظریه گراف‌ها استفاده کرد. به این صورت که در ابتدا یک گراف پایه تشکیل می‌شود. این گراف یک گراف حلقوی است و در آن تمامی لوله‌ها (یال‌های گراف) و منهول‌ها (گره‌های گراف) به یکدیگر متصل هستند؛ بنابراین این گراف دربرگیرنده تمامی حالات ممکن برای جانمایی است. سپس یک زیرگراف از گراف پایه استخراج می‌شود که در این زیرگراف کلیه شرایط موردنیاز برای طراحی جانمایی شبکه فاضلاب لحاظ می‌شود. طبق تئوری نظریه گراف‌ها، برای رسیدن به بهترین درخت فراگیر باید از روش‌های بهینه‌سازی استفاده شود و با وزن‌دهی به یال‌ها، تابع هدف دنبال شود. در تئوری گراف‌ها به هر یال وزن ثابتی اختصاص می‌یابد و سپس بهینه کردن تابع هدف تشکیل شده (رسیدن به حداقل مقدار مجموع حاصل ضرب وزن هر یال در طول آن) با استفاده از روش‌های بهینه‌سازی انجام می‌شود.

۲-۲-۱- الگوریتم برش حلقه به حلقه

برای تولید یک درخت فراگیر قابل قبول باید از یک روش و الگوریتم مناسب استفاده شود. به همین منظور در این پژوهش از روش برش حلقه به حلقه که توسط (Haghighi, 2012) مطرح شده است، با اندکی تغییرات استفاده شد. در ادامه، جزییات این الگوریتم بیان می‌شود. در ابتدا پارامترهای مورد استفاده معرفی می‌شود:

n : تعداد منهول‌های موجود در شبکه؛ m : تعداد لوله‌های موجود در شبکه؛ NL : تعداد حلقه‌های موجود در شبکه؛ B ماتریس اطلاعات گراف پایه است. برای تشکیل گراف پایه که حاوی مشخصات منهول‌ها و لوله‌ها است، ابتدا ماتریس B تشکیل می‌شود (مطابق



کنترل شده و اگر فقط یک لوله به منهول پایین دست متصل باشد، در حلقه‌های بعد نباید این لوله برای برش انتخاب شود. به منظور انجام این قید در ماتریس B^* کلیه درایه‌های مربوط به این لوله باقی مانده (ستون ۲ تا $NL+1$) باید به صفر تبدیل شوند.

۴- همین الگوریتم برش برای سایر حلقه‌ها نیز به کار گرفته می‌شود تا تمامی حلقه‌ها برش داده شوند.

۵- بعد از بازکردن تمامی حلقه‌ها باید جهت جریان در لوله‌ها تعیین شود. همان طور که بیان شد، دو ستون آخر در ماتریس B و ماتریس‌های به روز شده حاصل از آن به شماره منهول‌های بالادست و پایین دست هر لوله اختصاص دارد؛ بنابراین باید برای تعیین جهت جریان در لوله‌ها فقط بر روی این دو ستون تمرکز کرد. طبق الگوریتم ارائه شده برای برش لوله‌ها، جهت جریان در لوله‌های بریده شده به صورت خودکار به طور مناسب (جهت جریان از منهول اضافه شده به لوله به سمت منهول موجود است) تعیین می‌شود و باید روشی ارائه شود که جهت جریان در سایر لوله‌ها نیز به خوبی تعیین شود. از آنجایی که کلیه مسیرها باید در نهایت به منهول ریشه ختم شوند، برای تعیین جهت در لوله‌ها نیز باید ابتدا منهول‌های سرشاخه شناسایی شوند. سپس به ترتیب از منهول‌های سرشاخه به سمت منهول ریشه حرکت شود و با جابه‌جایی درایه‌های موجود در دو ستون آخر ماتریس B جهت جریان مشخص شود. در این حرکت از منهول‌های سرشاخه به سمت منهول ریشه، در طول مسیر هر منهول (به جز منهول‌های سرشاخه و منهول ریشه) یک بار به عنوان بالادست و حداقل یک بار به عنوان پایین دست برای لوله‌ها قرار می‌گیرد. پس از طی مراحل گفته شده می‌توان یک زیرگراف از گراف پایه استخراج کرد که دارای ویژگی‌های متناسب با قیده‌های شبکه فاضلاب باشد و بتواند جهت جریان در لوله‌ها را نیز به خوبی تعیین کند؛ بنابراین با توجه به مطالب گفته شده در این بخش، جانمایی لوله‌های شبکه و مسیر حرکت فاضلاب برای شبکه تعیین می‌شود.

۲-۳- بررسی اجزای تشکیل دهنده فاضلاب

طبق پژوهش COD, Hvited-Jacobsen et al. موجود در فاضلاب از اجزای مختلفی تشکیل شده است که S_F سوبستره محلول با تجزیه پذیری بالا، S_A اسید فرار، X_{Sn} : سوبستره معلق ($n=1$) تجزیه با سرعت زیاد، X_{HW} توده بیولوژیکی هتروتروف در

بردار با نام‌های α و β به صورت تصادفی تولید می‌شوند که بردار α دارای NL عضو حقیقی بین صفر تا ۱ و بردار β نیز دارای NL عضو صفر یا ۱ است. بردار α لوله‌هایی که در حلقه‌ها باید بریده شوند را مشخص می‌کند و بردار β این موضوع را مشخص می‌کند که لوله انتخاب شده برای برش، از بالادست لوله بریده شود و یا از پایین دست.

۲- برای یافتن لوله‌ای که در حلقه i ام باید بریده شود از معادله ۱ استفاده می‌شود

$$\mu_i = \text{round} \left(1 + \alpha_i \left(\sum_{j=1}^m B_{j,i+1} - 1 \right) \right) \quad (1)$$

به این ترتیب با استفاده از ماتریس B و α_i و گرد کردن عدد حاصله از معادله ۱ به نزدیک‌ترین عدد صحیح، از بالای لیست ستون $i+1$ ام در ماتریس B ، μ_i امین درایه غیر صفر (لوله) برای برش انتخاب می‌شود. برای اینکه تعیین شود این لوله انتخابی باید از بالادست بریده شود و یا از پایین دست، باید به β_1 مراجعه شود. اگر β_1 برابر با صفر بود، لوله از بالادست بریده می‌شود و اگر برابر با ۱ بود لوله از پایین دست بریده می‌شود.

۳- پس از انتخاب لوله برای برش باید درایه‌های ماتریس B تغییر کنند که این تغییرات به ترتیب زیر در آن لحاظ می‌شوند:

الف) بعد از برش یک لوله از حلقه i ام، در محل بریده شدن لوله یک منهول جدید به وجود می‌آید که شماره این منهول جدید برابر با $n+i$ است. باید این عدد در ماتریس B به جای منهول بالادست لوله انتخاب شده برای برش قرار داده شود.

ب) هنگام انتخاب یک لوله برای برش، باید تمام درایه‌هایی از ماتریس B که معرف حضور یا عدم این لوله در حلقه‌ها هستند (ستون ۲ تا $NL+1$)، به صفر تبدیل شوند؛ زیرا این لوله دیگر نمی‌تواند به عنوان لوله منتخب برای برش در حلقه‌های دیگر استفاده شود.

ج) در صورتی که تمامی لوله‌هایی که در یک رأس مشترک هستند، برای حلقه‌های مختلف به عنوان لوله منتخب برای برش انتخاب شوند، لوله‌ای برای اتصال به آن رأس مشترک باقی نمی‌ماند (مانند رأس ۳ در شکل ۱)، در این حالت باید حداقل یک لوله به منظور اتصال به رأس مورد نظر نگه‌داشته شده و بریده نشود؛ بنابراین در هر حلقه باید قبل از برش لوله منتخب، شرایط منهول پایین دست آن



بیانگر نحوه تغییر در اجزای مختلف تشکیل‌دهنده COD و میزان تغییرات اکسیژن محلول در فاضلاب بر اساس مدل WATS هستند (Hvitved-Jacobsen et al., 2013, Almeida, 1999)

(۳)

$$\frac{dS_s}{dt} = -\frac{1}{Y_{HW}} \mu_{H,02} \frac{S_F + S_A}{K_{SW} + (S_F + S_A)} \frac{S_O}{K_O + S_O} X_{HW} \alpha_W^{(T-20)} + (1 - f_{s1}) K_{hn} \frac{\frac{X_{Sn}}{X_{HW}}}{K_{xn} + (\frac{X_{Sn}}{X_{HW}})} \frac{S_O}{K_O + S_O} (X_{HW} + \epsilon X_{Hf} \frac{A}{V}) \alpha_W^{(T-20)} - q_m \frac{S_O}{K_O + S_O} X_{HW} \alpha_W^{(T-20)} - \frac{1}{Y_{HF}} K_{1/2} S_O^{0.5} \frac{Y_{HF}}{1 - Y_{HF}} \frac{S_F + S_A}{K_{Sf} + (S_F + S_A)} \frac{A}{V} \alpha_f^{(T-20)}$$

(۴)

$$\frac{dX_s}{dt} = K_{hn} \frac{\frac{X_{Sn}}{X_{HW}}}{K_{xn} + (\frac{X_{Sn}}{X_{HW}})} \frac{S_O}{K_O + S_O} (X_{HW} + \epsilon X_{Hf} \frac{A}{V}) \alpha_W^{(T-20)}$$

$$K_{La} = 0.66(1 + 0.2Fr^2)(s.u)^{3/8} d_m^{-1}$$

(۶)

$$\frac{dS_O}{dt} = K_{La}^* (S_{O_s} - S_O) - \left(\frac{1 - Y_{HW}}{Y_{HW}} \right) \mu_{H,02} \frac{S_F + S_A}{K_{SW} + (S_F + S_A)} \frac{S_O}{K_O + S_O} X_{HW} \alpha_W^{(T-20)} - K_{1/2} S_O^{0.5} \frac{S_F + S_A}{K_{Sf} + (S_F + S_A)} \frac{A}{V} \alpha_f^{(T-20)}$$

که در آنها

S_s : سوبستره قابل تجزیه بیولوژیک آسان ($gCOD.m^{-3}$)، α_w : ضریب تصحیح دما برای فاز مایع (بدون بعد)، α_f : ضح دما برای بیوفیلم (بدون بعد)، $\mu_{H,02}$: حداکثر نرخ رشد ویژه برای توده بیولوژیک هتروتروف (d^{-1})، ϵ : ثابت بازدهی برای هیدرولیز توده بیولوژیک بیوفیلم (درصد)، K_{h1} : ثابت نرخ هیدرولیز سریع (d^{-1})، K_{h2} : ثابت هیدرولیز کند (d^{-1})، K_O : ثابت اشباع برای اکسیژن محلول ($gO_2.m^{-3}$)، K_{SW} : ثابت نیمه اشباع برای ماده آلی قابل تجزیه بیولوژیک آسان در فاز مایع ($gCOD.m^{-3}$)، K_{X1} : ثابت اشباع برای هیدرولیز سریع (بدون بعد)، K_{X2} : ثابت اشباع برای هیدرولیز کند (بدون بعد)، q_m : ثابت نرخ انرژی موردنیاز بقا (d^{-1})، Y_{HW} : ثابت تبدیل برای توده بیولوژیک هتروتروف در فاز مایع (بدون بعد)، Y_{HF} : ثابت تبدیل برای توده بیولوژیک

فاز مایع اجزای تشکیل‌دهنده COD هستند. به‌علت وجود فرایندهای حذف فیزیکی و ته‌نشینی، در فاضلاب‌روها حذف غیربیولوژیک نیز وجود دارد (Hvitved-Jacobsen et al., 2013). در پژوهش حیدرزاده از شاخص COD برای مدل‌سازی و بررسی کیفی شبکه فاضلاب استفاده شده است و از بررسی سایر مواد موجود در شبکه فاضلاب مانند گوگرد و فسفر به علت زمان‌بر بودن و در دسترس نبودن اطلاعات کافی، چشم‌پوشی شده است. همچنین این پژوهش برای ساده‌سازی، فقط فرایندهای هوازی موجود در جریان فاضلاب را در نظر می‌گیرد و فرایندهای بی‌هوازی در نظر گرفته نشده است (Heydarzadeh, 2019).

برای بررسی کیفی شبکه فاضلاب باید برآوردی از میزان مواد آلی ورودی به سیستم وجود داشته باشد. حیدرزاده در پژوهش خود برای شبکه‌های موجود، غلظت مواد آلی را با استفاده از انجام آزمایش به‌دست آورد و برای بهینه‌سازی طراحی شبکه فاضلاب، از مقدار پیشنهاد شده در پژوهش‌های گذشته برای برآورد مقدار مواد آلی ورودی به شبکه استفاده کرد. از معادله ۲ به‌منظور برآورد مقدار هر یک از اجزای تشکیل‌دهنده COD استفاده می‌شود (Hvitved-Jacobsen et al., 2013, Heydarzadeh, 2019)

$$\frac{S_F}{3} = \frac{S_A}{3} = \frac{X_{S1}}{14} = \frac{X_{HW}}{10} \quad (۲)$$

که در آن

S_F : سوبستره محلول (قابل تخمیر) باقابلیت تجزیه‌پذیری بیولوژیک بالا ($g COD/m^3$)، S_A : اسید فرار یا محصولات حاصل از تخمیر ($g COD/m^3$)، X_{S1} : سوبستره معلق قابل هیدرولیز با سرعت زیاد ($g COD/m^3$) و X_{HW} : توده بیولوژیک هتروتروف در فاز مایع ($g COD/m^3$) هستند.

در این پژوهش به‌منظور مدل‌سازی فرایندهای هوازی مواد آلی در فاضلاب‌روها مدل WATS^۱ به‌کار گرفته شد. مدل WATS با بررسی و در نظر گرفتن اجزای مختلف تشکیل‌دهنده COD، تغییرات مواد آلی فاضلاب را در دو فاز مایع و بیوفیلم و تحت شرایط هوازی و بی‌هوازی مشخص می‌کند (Hvitved-Jacobsen et al., 2013). معادلات دیفرانسیل ارائه شده در معادلات ۳ تا ۶،

¹ Wastewater Aerobic/Anaerobic Transformations in Sewers (WATS)



۲-۴- الگوریتم محاسبات کیفی

به منظور محاسبات کیفی شبکه فاضلاب ابتدا باید بعضی از اطلاعات هیدرولیکی شبکه مانند شعاع هیدرولیکی، سرعت جریان در لوله‌ها، عمق جریان موجود در لوله‌ها و عدد فرود برای لوله‌ها مشخص باشند. بعد از تعیین این اطلاعات، با ارائه یک الگوریتم ترتیبی، مشخصات کیفی (مقدار غلظت COD) شبکه در نقاط مختلف محاسبه خواهد شد. برای این کار به صورت زیر عمل شد.

ابتدا منهول‌های سرشاخه شبکه شناسایی شدند. این منهول‌ها با توجه به ماتریسی که حاوی اطلاعات جهت حرکت جریان در لوله‌ها است، شناسایی شد. حاصل این کار یک بردار است (بردار V) که حاوی نام منهول‌های سرشاخه است. پس از تشکیل بردار V ، اولین درایه این بردار (شماره اولین منهول سرشاخه) را انتخاب کرده و از آن به سمت منهول ریشه (تصفیه‌خانه) حرکت خواهد کرد. به این صورت شاخه اصلی شبکه شکل داده می‌شود. در طول حرکت به سمت منهول ریشه، مقدار دبی هر لوله مشخص می‌شود و هم‌زمان با آن کد نویسی مربوط به محاسبه گام‌های مکانی و زمانی و حل معادلات دیفرانسیل ۳ تا ۶ با روش رانگ-کوتای مرتبه چهارم برای لوله‌های این شاخه انجام و مشخصات کیفی این شاخه محاسبه می‌شود. پس از انجام محاسبات برای شاخه اصلی، سایر منهول‌های سرشاخه از بردار V بررسی و دبی و غلظت COD لوله‌های هر شاخه به صورت تجمعی تعیین شد. تا جایی این کار ادامه یافت که این شاخه‌ها به لوله‌های برسند که از قبل دبی و غلظت COD برای آن تعیین شده بود. هنگام رسیدن شاخه به چنین لوله‌ای، باید با استفاده از میانگین‌گیری وزنی بین مقدار دبی و مشخصات کیفی فاضلاب موجود در این شاخه و فاضلابی که از قبل در این لوله موجود است، میزان دبی و مشخصات کیفی لوله به‌روزرسانی شود. سپس محاسبه مجدد مقدار دبی و مشخصات کیفی لوله‌های موجود در مسیر تا رسیدن به منهول ریشه ادامه پیدا می‌کند. این کار برای تمامی

هتروتروف در بیوفیلم (بدون بعد)، Fr : عدد فرود (بدون بعد)، u : سرعت میانگین جریان در لوله $(m.s^{-1})$ ، s : شیب $(m.m^{-1})$ ، dm : عمق میانگین هیدرولیکی در لوله (m) ، S_O : غلظت اکسیژن محلول در فاضلاب $(g.m^{-3})$ ، S_{OS} : غلظت اشباع اکسیژن در فاضلاب $(g.m^{-3})$ ، K_{SF} : ثابت نیمه اشباع برای توده بیولوژیک $(g.m^{-3})$ ، $K_{1/2}$: ثابت واکنش مرتبه ۵ $(g^{0.5}m^{-0.5}d^{-1})$ ، X_{HW} : توده بیولوژیک فعال هتروتروف در فاز مایع $(g.m^{-3})$ ، A : سطح بیوفیلم (m^2) و V : حجم موجود در لوله (m^3) ، f_{SI} : درصد محصولات بی‌اثر ناشی از هیدرولیز، K_{La} : ضریب هوادهی مجدد (d^{-1}) ، T : دما (درجه سلسیوس) و X_{HF} : توده بیولوژیک فعال هتروتروف در بیوفیلم $(g.m^{-3})$ هستند.

به علت تعدد پارامترهای موجود در معادلات ۳ تا ۶، نمی‌توان از روش‌های تحلیلی برای حل این معادلات استفاده کرد؛ بنابراین برای حل آن‌ها از روش‌های عددی استفاده می‌شود. بر اساس پیشنهاد حیدرزاده، در این پژوهش از روش حل عددی رانگ-کوتای مرتبه چهارم استفاده شد (Heydarzadeh, 2019). درصد‌های مورد استفاده برای اجزای مختلف COD مطابق جدول ۱ بر اساس مقدار پیشنهادی (Hvitved-Jacobsen et al., 2013) در نظر گرفته شد.

از طرفی برای حل معادلات ۳ تا ۶ باید مقدار پارامترها و ضرایب معادلات مشخص شوند که برای این منظور از مقدار پیشنهادی مراجع و مطالعات پیشین استفاده شد. مقدار اولیه برای پارامترهای مدل طبق جدول ۲ برابر با مقدار پیشنهاد شده توسط المیدا در نظر گرفته شد (Almeida, 1999).

جدول ۱- درصد‌های مورد استفاده برای اجزای مختلف COD

Table 1. Used percentages for different parts of COD (Hvitved-Jacobsen et al., 2013)

S_S 19-31	X_S 30-60	X_H 2-7	COD part Range(%)
28	32	5	Selected value(%)

جدول ۲- مقدار اولیه پارامترهای مدل (Almeida, 1999)

Table 2. Initial values for model parameters (Almeida, 1999)

Y_H (gCOD/gCOD)	H (d^{-1}) μ	K_h (d^{-1})	K_o (gO_2/m^3)	K_{su} ($gCOD/m^3$)
0.54	7.8	1.9	0.05	10.9



شاخه‌ها تکرار می‌شود تا مشخصات کیفی کل لوله‌های شبکه تعیین شود.

۲-۴-۱- تابع هدف حذف COD

با توجه به قابل توجه بودن زمان ماند فاضلاب در شبکه انتقال فاضلاب، فرصت برای انجام واکنش‌های بیوشیمیایی و تغییر در میزان مواد آلی موجود در فاضلاب وجود دارد؛ بنابراین با پایش این واکنش‌ها و مدل‌سازی این فرایندها، تغییرات مواد آلی در طول مسیر بررسی می‌شود. تابع هدف حداکثرسازی حذف COD به صورت معادله ۷ تعریف می‌شود (Heydarzadeh, 2019)

$$OF_{COD} = \frac{\sum_{i=1}^m COD_{Removal(i)} \times Q_{(i)}}{\sum_{i=1}^m Q_{(i)}} \quad (7)$$

که در آن

OF_{COD} تابع هدف حداکثرسازی حذف COD و m : تعداد کل لوله‌ها و $Q_{(i)}$: دبی هر لوله است.

۲-۴-۲- تابع هدف اکسیژن محلول

در صورت مصرف شدن اکسیژن محلول در فاضلاب و عدم هوادهی مجدد، فرایندهای بی‌هوازی در لوله‌ها اتفاق خواهد افتاد. انجام این فرایندها منجر به تولید محصولاتی نظیر گازهای متان و سولفید هیدروژن می‌شود. این گازها می‌توانند اثرات مخربی مانند ایجاد خوردگی در لوله‌ها و انفجار در شبکه را به‌جای بگذارند. علاوه بر آن، مقدار حذف مواد آلی در فرایندهای بی‌هوازی از فرایندهای هوازی کمتر است؛ بنابراین در بحث طراحی باید به وجود اکسیژن در لوله‌ها توجه شود و تابع هدفی تعریف شود که بتواند این موضوع را به‌خوبی به نمایش بگذارد. در این پژوهش از معادله ۸ به‌عنوان تابع هدف اکسیژن محلول استفاده شد (Heydarzadeh, 2019)

$$OF_{DO} = \frac{\sum_{i=1}^m DO_{out(i)} * Q_{(i)}}{\sum_{i=1}^m Q_{(i)}} \quad (8)$$

که در آن

OF_{DO} تابع هدف اکسیژن محلول و m : تعداد کل لوله‌ها و $Q_{(i)}$: دبی هر لوله را بیان می‌کند.

۲-۵- تابع هدف هزینه

در این پژوهش از معادلات ۹ تا ۱۱ برای برآورد تابع هدف هزینه استفاده شد. این تابع شامل هزینه خرید لوله‌ها، حفاری و خاک‌برداری و هزینه ایجاد منهول‌ها است و از هزینه‌های ایستگاه‌های پمپاژ و منهول‌های ریزشی در آن صرف‌نظر شده است (Moini, 2013)

$$OF_{cost} = (\sum_{i=1}^m L_i K_p(d_i, E_i)) + (\sum_{j=1}^n K_d(h_d)) \quad (9)$$

$$K_p = 10.93e^{3.43d_i} + 0.012E_i^{1.53} + 0.437E_i^{1.47}d_i \quad (10)$$

$$K_d = 41.46h_d \quad (11)$$

که در آن‌ها

OF_{cost} : تابع هدف هزینه، K_p : تابع هزینه لوله‌گذاری، L_i : طول لوله i ، d_i : قطر لوله i ، E_i : عمق متوسط جایگذاری لوله i ، K_d : تابع هزینه ساخت منهول، h_d : عمق منهول d ، m و n هم به ترتیب تعداد کل لوله‌ها و تعداد کل منهول‌ها هستند.

۲-۶- الگوریتم بهینه‌سازی گرگ خاکستری

الگوریتم بهینه‌سازی گرگ خاکستری از سازمان‌دهی موجود در گرگ‌های خاکستری برای شکار کردن در طبیعت الگوبرداری می‌کند. این الگوریتم توسط میرجلیلی و همکاران ارائه شد (Mirjalili et al., 2014). الگوریتم گرگ خاکستری همانند الگوریتم‌های جمعیت ذرات^۱ و جامعه مورچگان^۲ در دسته الگوریتم‌های هوش جمعی به حساب می‌آید و برای تعیین موقعیت گرگ‌ها در فضای حل مسئله تنها از یک عملگر (ترکیبی) استفاده می‌کند. در مسئله بهینه‌سازی، هر گرگ یک عامل جستجو و یک جواب است که با توجه به موقعیت و نزدیکی به هدف ارزیابی

¹ Particle Swarm Optimization (PSO)

² Ant Colony Optimization (ACO)



معادله ۱۹ را می‌توان تغییر داده و به هر یک از X ها وزن داد، مثلاً وزن X_1 (آلفا) بیشتر از سایرین باشد و تأثیر بیشتری بر موقعیت بعدی جواب داشته باشد. به همین ترتیب با انجام تکرارهای متوالی، موقعیت گرگ‌ها به‌روز می‌شود تا به موقعیت طعمه و جواب نهایی برسد.

۳- مطالعه موردی

شبکه‌ای که مورد بررسی قرار می‌گیرد، شبکه پیشنهادی توسط لی و متیو است (Li and Matthew, 1990). این شبکه در زمینی به مساحت ۷۶۰۰۰۰ مترمربع و از نظر توپوگرافی، تقریباً مسطح، واقع شده است. این شبکه شامل ۷۹ لوله، ۵۷ منهول و ۲۳ حلقه است. گراف پایه مرتبط با این شبکه در شکل ۲ قابل مشاهده است. تحلیل این شبکه با سه سناریو دنبال می‌شود. سناریو ۱ رسیدن به کمترین هزینه اجرای شبکه، سناریو ۲ رسیدن به بیشترین مقدار COD حذف شده و سناریو ۳ رسیدن به بیشترین میزان DO در طول شبکه فاضلاب است.

ابتدا با استفاده از روش برش حلقه به حلقه و الگوریتم گرگ خاکستری، بهینه‌سازی شبکه مورد نظر انجام شده است. جانمایی بهینه لوله‌ها در سناریو ۱ در شکل ۳ ارائه شده است. در سناریو ۱، ابتدا عدد $1.43E06$ که کمترین عدد حاصله برای هزینه در مطالعات گذشته بود به‌عنوان مقدار اولیه تابع هدف هزینه تعریف شد. در جدول ۳ خلاصه نتایج حاصله از سناریو ۱ برای این شبکه قابل مشاهده است. طبق نتایج ارائه شده در جدول ۳ مقدار تابع هزینه عدد $1.69E06$ است. لازم به ذکر است که به علت افزوده شدن محاسبات پیچیده کیفی، هزینه و زمان اجرای این روش بیشتر از بهترین نتیجه پژوهش‌های گذشته است. مقدار OFDO برابر با صفر به‌دست آمده است که این مورد به علت اتمام اکسیژن محلول در طول مسیر انتقال فاضلاب است و اگر هوادهی مناسب انجام نشود فرایندهای بی‌هوازی در شبکه فاضلاب مورد نظر اتفاق می‌افتند. بر اساس معادله ۶ تغییرات اکسیژن محلول در زمان برابر است با مقدار اکسیژن اضافه شده بر اثر هوادهی مجدد (جمله اول رابطه) منهای مقدار اکسیژن محلول مصرف شده (دو جمله دوم). چنانچه مقدار اکسیژن مصرف شده (مورد نیاز) از مقدار اکسیژن اضافه شده بر اثر هوادهی مجدد بیشتر شود مقدار خالص منفی محاسبه خواهد شد که معادل اکسیژن محلول صفر است.

می‌شود. بهترین موقعیت (راه‌حل)، آلفا، بهترین راه‌حل دوم، بتا، بهترین راه‌حل سوم، دلتا و سایر راه‌حل‌ها امگا نامیده می‌شوند. معادلات ریاضی برای محاصره طعمه به‌صورت معادلات ۱۲ تا ۱۵ تعریف می‌شوند

$$\vec{X}(t+1) = \vec{X}_p(t) - \vec{A} \times \vec{D}(t) \quad (12)$$

$$\vec{D}(t) = \left| \vec{C} \times \vec{X}_p(t) - \vec{X}(t) \right| \quad (13)$$

$$\vec{A} = \vec{a}(2r_1 - 1) \quad (14)$$

$$\vec{C} = 2r_2 \quad (15)$$

که در آن‌ها

$X(t)$: موقعیت گرگ خاکستری در تکرار t ام و $X_p(t)$: موقعیت شکار در تکرار t ام هستند. مؤلفه a به‌صورت خطی از ۲ تا صفر کاهش می‌یابد و با تعداد تکرارها (t) رابطه معکوس دارد. مثلاً در ابتدای کار که هنوز تکراری انجام نشده t برابر با صفر و a برابر با ۲ است و r_1 و r_2 دو بردار بین ۱- و ۱ هستند که به‌صورت تصادفی تولید می‌شوند.

از آنجا که در فضای جستجو هیچ دانشی نسبت به موقعیت شکار ($X_p(t)$) وجود ندارد، در ابتدا موقعیت شکار همان موقعیت آلفا (بهترین موقعیت به‌دست آمده) در نظر گرفته می‌شود. معادلات دست‌یابی به موقعیت شکار به‌صورت معادلات ۱۶ تا ۱۹ هستند

$$\vec{X}_1(t) = \vec{X}_\alpha(t) - \vec{A}_1 \times \vec{D}_\alpha(t), \vec{D}_\alpha(t) = \left| \vec{C}_1 \times \vec{X}_\alpha(t) - \vec{X}(t) \right| \quad (16)$$

$$\vec{X}_2(t) = \vec{X}_\beta(t) - \vec{A}_2 \times \vec{D}_\beta(t), \vec{D}_\beta(t) = \left| \vec{C}_2 \times \vec{X}_\beta(t) - \vec{X}(t) \right| \quad (17)$$

$$\vec{X}_3(t) = \vec{X}_\delta(t) - \vec{A}_3 \times \vec{D}_\delta(t), \vec{D}_\delta(t) = \left| \vec{C}_3 \times \vec{X}_\delta(t) - \vec{X}(t) \right| \quad (18)$$

$$\vec{X}(t+1) = \frac{\vec{X}_1(t) + \vec{X}_2(t) + \vec{X}_3(t)}{3} \quad (19)$$



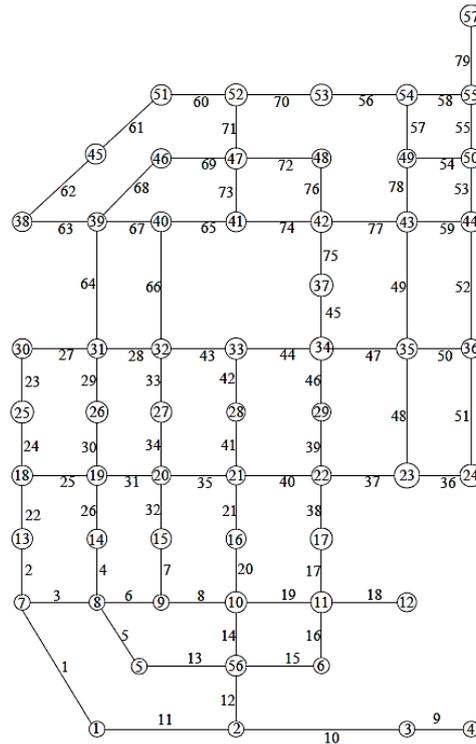


Fig. 2. Placement of pipes in the (Li and Matthew, 1990) network
 شکل ۲- گراف پایه مرتبط با شبکه (Li and Matthew, 1990)

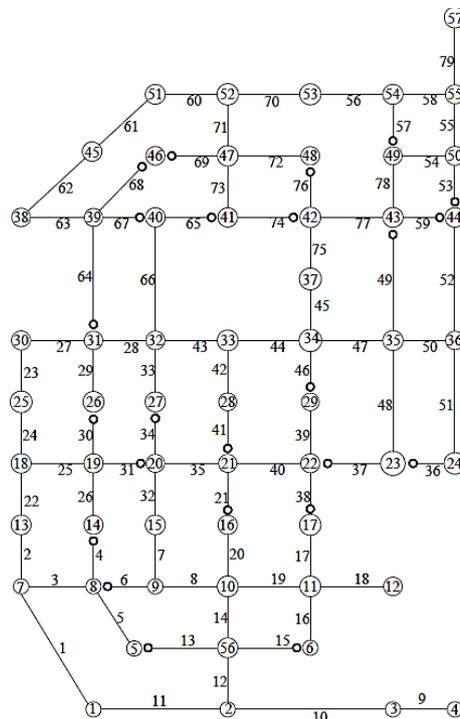


Fig. 3. Placement of pipes in the (Li and Matthew, 1990) network in scenario 1
 شکل ۳- جانمایی لوله‌ها در شبکه (Li and Matthew, 1990) در سناریو ۱



جدول ۳- نتایج کلی سناریو ۱ برای شبکه (Li and Matthew, 1990)

Table 3. General results of scenario 1 for the (Li and Matthew, 1990) network

No. of iterations of the algorithm	Time to reach the optimal result (min)	OF _{COST}	OF _{COD}	OF _{DO}
20000	89	1.69E06	0.53	0

جدول ۴- نتایج کلی سناریو ۲ برای شبکه (Li and Matthew, 1990)

Table 4. General results of scenario 2 for the (Li and Matthew, 1990) network

No. of iterations of the algorithm	Time to reach the optimal result (min)	OF _{COST}	OF _{COD}	OF _{DO}
20000	86	1.84E06	1.4	0

جدول ۵- نتایج کلی سناریو ۳ برای شبکه (Li and Matthew, 1990)

Table 5. General results of scenario 3 for the (Li and Matthew, 1990) network

No. of iterations of the algorithm	Time to reach the optimal result (min)	OF _{COST}	OF _{COD}	OF _{DO}
18000	68	1.93E06	1.23	0

به علت افزایش شیب لوله‌ها و در نتیجه افزایش عمق کارگذاری لوله‌ها و عمق منهل‌ها است. میزان تابع OF_{COD} نسبت به سناریو ۱ به میزان ۱۳۲ درصد بهبود یافته است که عدد قابل ملاحظه‌ای است. همچنین مقدار اکسیژن محلول در لوله‌ها مقدار بیشتری را نسبت به سایر سناریوها نشان می‌دهند که باعث می‌شود برای این سناریو هوادهی کمتری نسبت به سایر سناریوها لازم باشد. جانمایی بهینه لوله‌ها در سناریو ۳ نیز در شکل ۵ ارائه شده است. همچنین میزان تغییرات توابع هدف در سناریوهای ۲ و ۳ نسبت به سناریو ۱ در شکل ۶ ارائه شده است.

در جدول ۶ اطلاعات کیفی منجر شده به بهترین تابع هدف COD قابل مشاهده است. لازم به ذکر است که در این جدول مقدار اکسیژن محلول ورودی در محل‌های ورود فاضلاب به شبکه (منهل‌ها) قابل اندازه‌گیری است و به‌طور تقریبی $1.7 \frac{mg}{l}$ بوده است. همچنین مقدار اکسیژن محلول خروجی هر لوله، اکسیژن محلول ورودی لوله بعدی است. داده‌های مندرج در جدول ۶ مقدار CD_{in} و COD_{ou} هر لوله را نشان می‌دهند که تفاوت آن‌ها مقدار ناچیزی است؛ اما در یک شبکه طولانی که لوله‌ها به صورت سری و پشت سرهم هستند مجموع مقدار کم کاهش COD در لوله‌ها منجر به مقدار قابل توجه کاهش COD در کل شبکه می‌شود. همان طور که

نتایج سناریو ۲ (رسیدن به بیشترین میزان حذف COD) در جدول ۴ آورده شده است. مطابق نتایج این جدول، هزینه اجرای طرح به میزان ۹ درصد نسبت به سناریو ۱ افزایش پیدا کرده است که عمدتاً به علت افزایش شیب لوله‌ها و در نتیجه افزایش عمق کارگذاری لوله‌ها است. میزان تابع OF_{COD} نسبت به سناریو ۱ به میزان ۱۶۴ درصد بهبود یافته است. OF_{DO} در این سناریو نیز همچنان صفر است، اما با توجه به مقایسه جزئیات مقدار اکسیژن محلول در لوله‌ها، مقدار اکسیژن محلول در لوله‌ها در سناریو ۲ بیشتر از سناریو ۱ هستند. در نتیجه برای این سناریو هوادهی کمتری نسبت به سناریو ۱ لازم است. همچنین میزان غلظت COD ورودی به تصفیه‌خانه در این سناریو حدود ۶۳۳ میلی‌گرم بر لیتر است که اگر با عدد ۶۶۰ که میزان COD فرضی فاضلاب ورودی به شبکه است مقایسه شود، مشاهده می‌شود که حدود ۴ درصد از غلظت COD در طول مسیر کاسته شده است. جانمایی بهینه در سناریو ۲ نیز در شکل ۴ ارائه شده است.

نتایج سناریو ۳ (رسیدن به بیشترین میزان اکسیژن محلول) در جدول ۵ ارائه شده است. مطابق نتایج جدول ۵ هزینه اجرای طرح به میزان ۱۴ درصد نسبت به سناریو ۱ و به میزان ۴/۹ درصد نسبت به سناریو ۲ افزایش پیدا کرده است. این افزایش هزینه



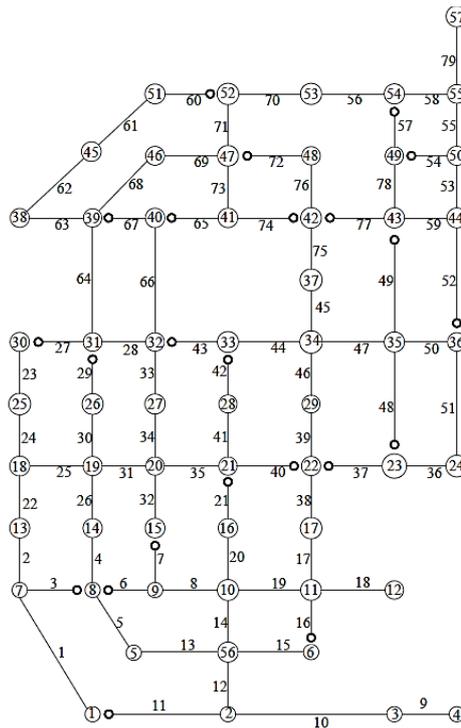


Fig. 4. Placement of pipes in the (Li and Matthew, 1990) network in scenario 2

شکل ۴- جانمایی لوله‌ها در شبکه (Li and Matthew, 1990) در سناریو ۲

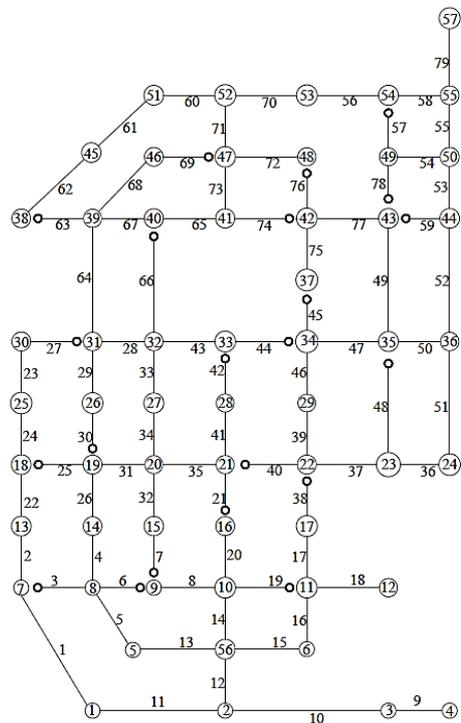


Fig. 5. Placement of pipes in the (Li and Matthew, 1990) network in scenario 3

شکل ۵- جانمایی لوله‌ها در شبکه (Li and Matthew, 1990) در سناریو ۳



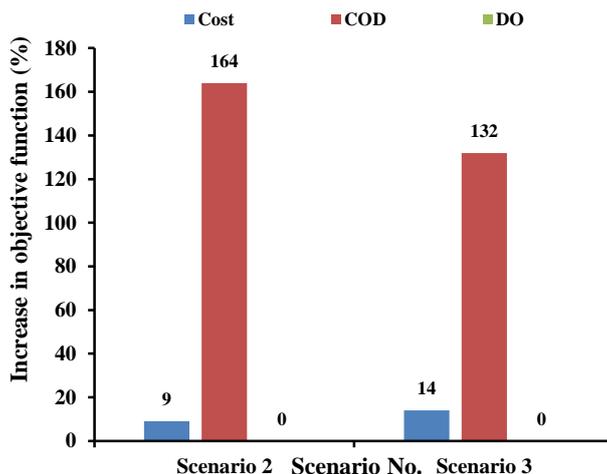


Fig. 6. Comparison of 3 objective functions (Cost, COD and DO) in Scenarios 2 and 3 against Scenario 1

شکل ۶- مقایسه مقدار توابع هدف هزینه، COD و DO در سناریوهای ۲ و ۳ نسبت به سناریو ۱

در شبکه به صورت طبیعی یا با هوادهی مصنوعی و افزایش زمان ماند فاضلاب در شبکه می توان مقدار کاهش COD را تا ۱۰ درصد نیز افزایش داد.

این جدول مشاهده می شود مقدار COD_{in} ورودی به لوله های ابتدای شبکه نظیر لوله ۹ حدود $660 \frac{mg}{l}$ است ولی COD_{out} لوله ۷۹ که لوله انتهایی شبکه است برابر $633 \frac{mg}{l}$ است که نشان دهنده ۴/۵ درصد کاهش در مقدار COD است. با افزایش مقدار اکسیژن محلول

جدول ۶- اطلاعات کیفی طرح منجر شده به بهترین تابع هدف COD

Table 6. Qualitative information leading to the best COD objective function

Pipe	COD-in (mg/L)	COD-out (mg/L)	Do-out (mg/L)	Pipe	COD-in (mg/L)	COD-out (mg/L)	Do-out (mg/L)
1	660.00	658.45	0.01	41	659.28	658.31	-0.01
2	659.12	657.99	-0.19	42	660.00	658.88	0.27
3	660.00	658.62	0.06	43	660.00	658.97	0.34
4	651.11	649.82	-6.98	44	659.74	658.24	-0.08
5	651.79	650.61	-6.33	45	658.35	657.55	-0.62
6	660.00	658.97	0.34	46	657.83	656.87	-1.20
7	660.00	658.88	0.27	47	656.96	655.64	-2.22
8	660.00	659.21	0.17	48	660.00	658.16	-0.09
9	660.00	658.88	0.27	49	660.00	658.62	0.06
10	659.32	658.14	-0.16	50	657.81	656.50	-1.55
11	660.00	657.88	-0.31	51	659.02	657.20	-0.97
12	658.40	657.34	-0.84	52	660.00	658.45	0.01
13	652.86	651.51	-5.59	53	658.24	657.47	0.05
14	653.91	652.50	-4.79	54	660.00	658.79	0.19
15	660.00	658.88	0.27	55	657.47	656.58	0.03
16	660.00	658.88	0.27	56	637.22	635.03	-18.20
17	655.85	655.04	-2.71	57	660.00	658.88	0.27
18	660.00	659.07	0.42	58	635.03	633.30	-20.40



ادامه جدول ۶- اطلاعات کیفی طرح منجر شده به بهترین تابع هدف COD

Cont. Table 6. Qualitative design information leads to the best COD objective function

Pipe	COD-in (mg/L)	COD-out (mg/L)	Do-out (mg/L)	Pipe	COD-in (mg/L)	COD-out (mg/L)	Do-out (mg/L)
19	655.44	653.80	-3.73	59	659.24	658.49	0.06
20	659.58	658.51	0.02	60	660.00	659.17	0.50
21	660.00	659.07	0.42	61	659.99	658.87	0.26
22	658.48	657.43	-0.66	62	659.41	658.49	0.13
23	660.00	658.70	0.13	63	658.64	657.48	-0.70
24	659.37	658.04	-0.24	64	644.94	643.60	-12.04
25	657.72	656.23	-1.66	65	660.00	658.79	0.19
26	650.17	649.06	-7.60	66	659.12	658.59	0.04
27	660.00	658.88	0.27	67	660.00	658.70	0.12
28	646.25	644.94	-10.95	68	643.60	642.11	-13.26
29	660.00	658.79	0.19	69	642.42	640.90	-14.24
30	658.79	657.61	-0.52	70	639.33	637.22	-17.22
31	649.10	647.65	-8.75	71	640.90	639.33	-15.51
32	660.00	659.17	0.50	72	660.00	658.88	0.27
33	647.15	646.18	-9.94	73	658.92	658.21	-0.00
34	647.96	646.69	-9.53	74	660.00	658.55	0.02
35	658.93	657.78	-0.53	75	658.66	658.04	-0.27
36	659.19	658.02	-0.24	76	659.63	658.41	0.06
37	660.00	658.55	0.02	77	660.00	658.62	0.06
38	656.28	655.48	-2.34	78	658.88	658.02	0.18
39	656.99	656.11	-1.82	79	634.15	632.96	-11.24
40	660.00	658.43	0.13				

۴- نتیجه‌گیری

با مقایسه نتایج به‌دست آمده برای این شبکه، مشاهده شد که با در نظر گرفتن سناریو ۲ به‌عنوان هدف اصلی مسئله (رسیدن به بیشترین میزان حذف COD در طول مسیر انتقال فاضلاب)، در جانمایی و ابعاد هیدرولیکی بهینه که به‌عنوان بهترین طرح برای دستیابی به این تابع هدف استفاده می‌شود، دو تابع هزینه اجرای شبکه و میزان اکسیژن محلول در لوله‌ها نیز به اعداد مطلوبی خواهند رسید.

همان‌گونه که مشاهده شد سناریوهای ۱ و ۲ هم‌جهت هستند؛ یعنی با کاهش شیب لوله‌ها، هزینه‌های حفاری و در نتیجه هزینه کل اجرای شبکه کاهش می‌یابد. همچنین سرعت جریان نیز در لوله‌ها کاهش می‌یابد که منجر به افزایش زمان ماند و حذف بیشتر COD در طول مسیر خواهد شد؛ اما سناریو ۳ با افزایش شیب و افزایش سرعت جریان در لوله‌ها عملکرد بهتری خواهد داشت. از دیگر نتایج حاصل از این پژوهش، کم بودن میزان اکسیژن محلول در شبکه

در این پژوهش، بهینه‌سازی جانمایی و ابعاد هیدرولیکی شبکه جمع‌آوری فاضلاب به نحوی بررسی شد که بتواند موجب کمترین هزینه، بیشترین میزان حذف COD و بیشترین مقدار DO شود. یک شبکه بزرگ بررسی شد تا بتواند توانایی روش ارائه شده در این پژوهش برای طراحی و بهینه‌سازی شبکه فاضلاب را محک بزند. با توجه به گسستگی توابع هدف مورد استفاده در این پژوهش، طراحی و بهینه‌سازی شبکه موردنظر در سه سناریو مختلف انجام شد. با انجام این سناریوها و مقایسه نتایج حاصل از آن‌ها، می‌توان جانمایی و طراحی بهینه را با توجه به هدف موردنظر انتخاب کرد. از آنجایی که هدف عمده این پژوهش، علاوه بر بهینه‌سازی متعارف هزینه و ابعاد هیدرولیکی شبکه، بهبود کیفیت فاضلاب ورودی به تصفیه‌خانه بود، سناریوهای ۲ و ۳ که مربوط به کیفیت فاضلاب بودند، بیشتر مورد توجه قرار گرفتند.



کرد. با دنبال کردن این سناریو، هزینه اجرای طرح نیز عدد مطلوبی خواهد بود و با انجام هوادهی در طول مسیر، سناریو ۳ نیز برآورده خواهد شد و هدف نهایی محقق خواهد شد.

(تابع OF_{DO}) در تمامی سناریوها بود که نیاز شبکه‌ها را به هوادهی در طول مسیر آشکار می‌سازد؛ بنابراین به‌طور کلی به‌منظور بهبود کیفیت فاضلاب ورودی به تصفیه‌خانه، می‌توان از سناریو ۲ استفاده

References

- Ahrari, F., 2014. Investigation of the quality changes of wastewater in urban wastewater collection networks (case study: Birjand City). MSc. Thesis of Environmental Engineering, Shahrood Islamic Azad University, Semnan, Iran. (In Persian)
- Almeida, M. C., 1999. Pollutant transformation processes in sewers under aerobic dry weather flow conditions. PhD. Thesis, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Imperial College of Science, Technology and Medicine, London University, London, UK.
- Almeida, M. C., Butler, D. and Matos, J. S., 2000. In-sewer biodegradation study at the costa do Estoril intrerceptor. *Urban Water*, 2(4), 327-334. [https://doi.org/10.1016/S1462-0758\(00\)00064-9](https://doi.org/10.1016/S1462-0758(00)00064-9).
- Bakhshipour, A. A., 2012. Integrated optimization of wastewater collection networks using an unconditional Tabu search model. MSc. Thesis, Civil Engineering Department, Shahid Chamran University, Ahwaz, Iran. (In Persian)
- De Villiers, N., Van Rooyen, G. C. and Middendorf, M., 2017. Sewer network design: heuristic algorithm for hydraulic optimisation. *Journal of the South African Institution of Civil Engineering*, 59(3), 48-56. <https://doi.org/10.17159/2309-8775/2017/v59n3a6>.
- Duque, N., Duque, D., Aguilar, A. and Saldarriaga, J., 2020. Sewer network layout selection and hydraulic design using a mathematical optimization framework. *Water*, 12(12), 3337. <https://doi.org/10.3390/w12123337>.
- Guo, L., Tik, S., Ledergerber, J. M., Santoro, D., Elbeshbishy, E. and Vanrolleghem, P. A., 2019. Conceptualizing the sewage collection system for integrated sewer-WWTP modelling and optimization. *Journal of Hydrology*, 573, 710-716. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.04.012>.
- Haghighi, A., 2012. Loop by loop cutting algorithm to generate urban drainage systems layout. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 139(6), 693-702. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0000294](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000294).
- Haghighi, A. and Bakhshipour, A. E., 2014. Deterministic integrated optimization model for sewage collection networks using Tabu search. *Water Resources Planning and Management*, 141(1), 04014045-1-11. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0000435](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000435).
- Heydarzadeh, R., 2019. Optimal multi-objective design of wastewater collection networks with the approach of maximizing treatment efficiency. PhD. Thesis, School of Civil Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran. (in Persian)
- Heydarzadeh, R., Tabesh, M. and Miklas Scholz, M., 2019. Multiobjective optimization in sewer network design to improve wastewater quality. *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice*, 10(4), 04019037. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)PS.1949-1204.0000416](https://doi.org/10.1061/(ASCE)PS.1949-1204.0000416).
- Hvitved-Jacobsen, T., Vollertsen, J. and Tanaka, N., 1999. Wastewater quality changes during transport in sewers-an integrated aerobic and anaerobic model concept for carbon and sulfur microbial transformations. *Water Science and Technology*, 39(2), 242-249. [https://doi.org/10.1016/S0273-1223\(99\)80036-5](https://doi.org/10.1016/S0273-1223(99)80036-5).
- Hvitved-Jacobsen, T., Vollertsen, J. and Haaning Nielsen, A., 2013. *Sewer processes, microbial and chemical process engineering of sewer networks*, 2nd Edition, CRC Press, Taylor and Francis Group. New York. [Link]
- Izquierdo, J. Montalvo, I. Pérez, R. and Fuertes, V. S., 2008. Design optimization of wastewater collection networks by PSO. *Computers and Mathematics with Applications*, 56(3), 777-784. <https://doi.org/10.1016/j.camwa.2008.02.007>.
- Kaijun, W., Zeeman, G. and Lettinga, G., 1995. Alteration of sewage characteristics upon aging. *Water Science and*



- Technology*, 31(7), 191-200. [https://doi.org/10.1016/0273-1223\(95\)00336-L](https://doi.org/10.1016/0273-1223(95)00336-L).
- Li, G. and Matthew, R. G. S., 1990. New approaches for optimization of urban drainage systems. *Journal of Environmental Engineering*, 116(5), 927-944. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9372\(1990\)116:5\(927\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9372(1990)116:5(927)).
- Mirjalili, S., Mirjalili, S. M. and Lewis, A., 2014. Grey wolf optimizer. *Advances in Engineering Software. Elsevier*, 69, 46-61. <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2013.12.007>.
- Moini, R., 2013. Development of intelligent ant community optimization algorithm for simultaneous solution of location and dimension problem in water engineering field (household sewage network), PhD. Thesis, Faculty of Civil Engineering, Tehran University of Science and Technology, Iran. (In Persian)
- Navin, P. K., Mathur, Y. P., Kumar, D., 2016. Layout optimization of sewer network using minimum cumulative flow in the sewer network. *Proceedings of Recycle 2016, Guwahati, India*, 333-343. https://doi.org/10.1007/978-981-13-0215-2_23.
- Safavi, H. R. and Geranmehr, M. A., 2017. Optimization of sewer networks using the mixed-integer linear programming. *Urban Water Journal*, 14(5), 452-459. <https://doi.org/10.1080/1573062X.2016.1176222>.
- Saldarriaga, J. and Herran J., 2024. Sewer network design methodology for low-cost, resilient and reliable designs. *Urban Water Journal*, 20(7), 943-952. <https://doi.org/10.1080/1573062X.2023.2218339>.
- Tian, J. and He, G., 2020. Optimization design method for urban sewage collection pipe networks. *Water Science and Technology*, 81(9), 1828-1839. <https://doi.org/10.2166/wst.2020.200>.

