# بهینه‌سازی طراحی جامع تصفیه‌خانه و شبکه جمع‌آوری فاضلاب خانگی با الگوریتم بهینه‌سازی جامعه مورچگان

رامتین معینی [۱]  محمد هادی افشار [۲]

(دریافت ۹۰/۹/۲۰  پذیرش ۹۱/۸/٦)

## چکیده

**در این تحقیق با به‌کارگیری الگوریتم بهینه‌سازی جامعه مورچگان، روشی ابتکاری بر مبنای قضاوت مهندسی برای حل مسئله طراحی جامع بهینه تصفیه‌خانه و شبکه جمع‌آوری فاضلاب خانگی ارائه شد. طراحی جامع بهینه شامل یافتن جانمایی بهینه تصفیه‌خانه و شبکه و ابعاد بهینه شبکه جمع‌آوری فاضلاب خانگی است. طراحی جامع تصفیه‌خانه و شبکه جمع‌آوری فاضلاب خانگی کاری پرهزینه است و بنابراین طراحی بهینه و کم هزینه آن نیازمند مدل‌سازی مسئله در قالب یک مسئله بهینه‌سازی است. مسئله طراحی جامع بهینه تصفیه‌خانه و شبکه جمع‌آوری فاضلاب یک مسئله پیچیده غیر خطی مختلط اعداد صحیح است که حل آن با روشهای مرسوم امکان‌پذیر نیست. در این تحقیق با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی جامعه مورچگان و ارائه روشی ابتکاری، مسئله نمونه‌ای حل و نتایج با نتایج حاصل از به‌کارگیری الگوریتم ژنتیک مقایسه شد. نتایج نشان داد که روش پیشنهادی، روشی مناسب در حل مسئله طراحی جامع بهینه تصفیه‌خانه و شبکه جمع‌آوری فاضلاب خانگی است.**

***واژه‌های کلیدی***: جانمایی، ابعاد، شبکه جمع‌آوری فاضلاب خانگی، تصفیه‌خانه، الگوریتم بهینه سازی جامعه مورچگان

# Optimization of Integrated Design of Wastewater Treatment and Sanitary Sewer Network Using Ant Colony Optimization Algorithm

*R. Moeini*[1]  *M. H. Afshar*[2]

*(Received Dec. 10, 2011  Accepted Oct. 27, 2012)*

## Abstract

In this paper a heuristic method with ad-hoc engineering concept is proposed for design optimization of integrated wastewater treatment and sanitary sewer network using ant colony optimization algorithm. The optimal design of integrated wastewater treatment and sewer network requires that the wastewater treatment location, layout and size of sewer network are optimally determined. The problem of finding the optimal design of integrated wastewater treatment and sanitary sewer network is an expensive task that should be formulated as an optimization problem if an optimal least cost design is required. This problem is a highly constrained Mixed-Integer Nonlinear Programming (MINLP) problem presenting a challenge even to conventional methods. In this paper an efficient heuristic method with ad-hoc engineering concept using ant colony optimization algorithm is proposed and used to solve hypothetical test example and the results are presented and compared with those of obtained with using genetic algorithm. The results indicate the effectiveness and efficiency of the proposed method to optimally solve the problem of optimal design of integrated wastewater treatment and sewer network.

***Keywords:*** Layout, Sizes, Sanitary Sewer Network, Wastewater Treatment, Ant Colony Optimization Algorithm.

۱- دانشجوی دکترا، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران
(نویسنده مسئول) ۰۹۱۹۶۲۰۱۶۰۳ rmoeini@iust.ac.ir
۲- دانشیار، قطب علمی هیدرو انفورماتیک محیطی، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

1. Ph.D. Student, Dept. of Civil Eng., Iran University of Science and Tech., Tehran (Corresponding Author) 09196201603 rmoeini@iust.ac.ir
2. Assoc. Prof., Center of Excellence of Environmental Hydroinformatic, Dept. of Civil Eng., Iran University of Science and Tech., Tehran

## ۱- مقدمه

شبکه جمع‌آوری فاضلاب خانگی یکی از مهم‌ترین شبکه‌های فیزیکی است که برای جمع‌آوری فاضلاب تولیدی مناطق مسکونی و پاکسازی آن در تصفیه‌خانه احداث می‌شود. عدم وجود شبکه مناسب برای جمع‌آوری فاضلاب خانگی و تصفیه‌خانه مناسب منجر به مسائل محیط‌زیستی فراوانی می‌شود که سلامت جامعه بشری را به خطر می‌اندازد. معمولاً ساخت شبکه جمع‌آوری فاضلاب و تصفیه‌خانه کاری پرهزینه است؛ به‌گونه‌ای که با اعمال کوچک‌ترین تغییر در ساختار و المان‌های آنها هزینه‌ها نیز به مقدار قابل توجهی کاهش می‌یابد. امروزه فرایند بهینه‌سازی به‌منظور طراحی و ساخت پروژه‌ها با کمترین هزینه ممکن مورد توجه مهندسان قرار گرفته است. بنابراین مدل‌سازی مسئله طراحی جامع تصفیه‌خانه و شبکه جمع‌آوری فاضلاب در قالب یک مسئله بهینه‌سازی و حل آن با استفاده از روشهای مناسب، ضروری است.

امروزه برای حل مسائل بهینه‌سازی از روشهای مختلفی استفاده می‌شود که به‌کارگیری آنها در حل مسائل بهینه‌سازی با مزایا و معایب مختلفی همراه است. این روشها را می‌توان در چهار دسته کلی تقسیم‌بندی نمود، که عبارت‌اند از : ۱) برنامه‌ریزی خطی[1] ۲) برنامه ریزی غیرخطی[2] ۳) برنامه‌ریزی پویا[3] و ۴) الگوریتم‌های فراکاوشی[4]. الگوریتم‌های فراکاوشی، نامی معمول برای روشهایی است که عموماً برگرفته از طبیعت هستند. این الگوریتم‌ها اساساً سعی در ترکیب اصول اولیه روشهای کاوشی برای رسیدن به یک جستجوی مؤثر در محدوده مورد نظر دارند. در سالهای اخیر الگوریتم‌های فراکاوشی با پیشرفتی سریع در حل مسائل پیچیده و مشکل بهینه‌سازی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. الگوریتم نورد شبیه سازی شده[5]، الگوریتم ژنتیک[6]، جستجوی ممنوعه[7] و الگوریتم بهینه‌سازی جامعه مورچگان[8] را می‌توان به‌عنوان نمونه‌هایی از این الگوریتم‌ها نام برد [۱].

طراحی جامع بهینه تصفیه‌خانه و شبکه جمع‌آوری فاضلاب خانگی شامل دو بخش است: ۱) طراحی بهینه جانمایی[9] تصفیه‌خانه و شبکه جمع‌آوری فاضلاب ۲) طراحی بهینه ابعاد اجزای آنها. اما این دو بخش مستقل از یکدیگر نیستند و یک طراحی بهینه نیازمند منظور نمودن همزمان هر دو بخش است. اکثر تحقیقاتی که در این حوزه انجام شده است، بر روی مسئله طراحی بهینه تصفیه‌خانه و یا طراحی بهینه شبکه جمع‌آوری فاضلاب متمرکزاند و مسئله طراحی جامع بهینه تصفیه‌خانه و شبکه جمع‌آوری فاضلاب کمتر مورد تحقیق و بررسی قرار گرفته است. همچنین در طراحی تصفیه‌خانه و یا طراحی شبکه جمع‌آوری فاضلاب، اکثر تحقیقات در زمینه طراحی بهینه یکی از بخش‌های جانمایی و یا ابعاد متمرکز است و تعداد تحقیقاتی که بر روی هر دو بخش تمرکز داشته باشند، محدود است.

در حوزه طراحی بهینه شبکه جمع‌آوری فاضلاب، بدون در نظر گرفتن مسئله طراحی بهینه تصفیه‌خانه، تحقیقات زیادی انجام شده است. اکثر تحقیقات انجام شده در این زمینه در راستای طراحی بهینه ابعاد شبکه جمع‌آوری فاضلاب، و تعداد تحقیقات انجام شده در حوزه طراحی بهینه جانمایی و ابعاد شبکه جمع‌آوری فاضلاب محدود است. هیستد و جیو مروری بر کارهای انجام شده در این حوزه در ۴۰ سال اخیر ارائه نموده‌اند [۲ و ۳]. در زمینه طراحی بهینه تصفیه‌خانه بدون در نظر گرفتن مسئله طراحی شبکه جمع‌آوری فاضلاب نیز تحقیقات مختلفی انجام شده است. ملو و کامارا مروری بر کارهایی که در این حوزه صورت گرفته است، ارائه نموده‌اند [۴]. به‌عنوان نمونه، از روشهای برنامه‌ریزی ریاضی خطی، برنامه‌ریزی ریاضی غیرخطی، برنامه‌ریزی پویا، روشهای کاوشی و ابتکاری و الگوریتم‌های فراکاوشی در این حوزه استفاده شده است [۲۰-۵]. اما تعداد تحقیقات انجام شده در حوزه طراحی جامع بهینه تصفیه‌خانه و شبکه جمع‌آوری فاضلاب بسیار محدود است. این مسئله در حالت کلی یک مسئله پچیده غیر خطی است که شامل قیود کیفی نیز هست و لذا در اکثر کارهای صورت گرفته، شکل ساده شده آن مورد بررسی قرار گرفته است. به‌عنوان نمونه، سوسا و همکاران و کنها و همکاران فرضیاتی از الگوریتم نورد شبیه‌سازی شده در طراحی جامع بهینه تصفیه‌خانه و شبکه جمع‌آوری فاضلاب منظور نمودند [۲۱ و ۲۲]. زفرینو و همکاران یک مدل چند هدفه برای مسئله طراحی جامع بهینه تصفیه‌خانه و شبکه جمع‌آوری فاضلاب ارائه کردند و با روش بردارهای وزن و الگوریتم نورد شبیه‌سازی شده آنرا حل نمودند [۲۳]. مدل چند هدفه پیشنهادی شامل سه هدف حداقل‌سازی هزینه ساخت، حداقل سازی هزینه نگهداری و تعمیرات و حداکثر سازی میزان اکسیژن محلول در آب است.

در این تحقیق تلاش شد با به‌کارگیری الگوریتم بهینه‌سازی جامعه مورچگان، روشی مناسب برای حل مسئله طراحی جامع بهینه تصفیه‌خانه و شبکه جمع‌آوری فاضلاب خانگی ارائه شود. از الگوریتم سیستم مورچگان بیشینه-کمینه[10] استفاده، و روشی

[1] Linear Programming
[2] Non- Linear Programming
[3] Dynamic Programming
[4] Meta-heuristic Algorithms
[5] Simulated Annealing
[6] Genetic Algorithm
[7] Tabu Search
[8] Ant Colony Optimization Algorithm
[9] Layout
[10] Max-Min Ant System

ابتکاری بر مبنای قضاوت مهندسی[1] برای حل مسئله طراحی جامع بهینه تصفیه‌خانه و شبکه جمع‌آوری فاضلاب خانگی ارائه شد. در این تحقیق در ابتدا توضیحاتی مختصر درباره الگوریتم بهینه‌سازی مورچگان ارائه شد و سپس مدل بهینه‌سازی مسئله طراحی جامع بهینه تصفیه‌خانه و شبکه جمع‌آوری فاضلاب خانگی ارائه گردید. در ادامه روش ابتکاری پیشنهادی در حل مدل بهینه سازی ارائه شد. سپس مسئله نمونه‌ای حل شده و نتایج مورد بررسی و تجزیه و تحلیل قرار گرفت.

## ۲- الگوریتم بهینه سازی جامعه مورچگان

الگوریتم بهینه‌سازی جامعه مورچگان یک الگوریتم فراکاوشی است که بر پایه رفتار طبیعی جستجوی غذا در جامعه مورچگان بنا شده است. جامعه مورچگان قادر هستند که در موقع یافتن منبع غذایی، کوتاه‌ترین مسیر بین لانه و منبع غذا را تعیین نموده و از این مسیر به‌منظور انتقال غذا از منبع غذایی به لانه استفاده نمایند. این کار از طریق فرایند هوش جمعی[2] صورت می‌پذیرد. وقتی مورچه‌ای به دنبال غذا می‌گردد، در طول مسیر حرکت خود، ماده بوداری به نام فرامان[3] به‌جای می‌گذارد که سایر مورچگانی که در جستجوی غذا هستند را به عبور از آن مسیر تشویق می‌نماید. اولین الگوریتم از دسته انواع الگوریتم‌های بهینه‌سازی جامعه مورچگان که بر اساس این رفتار طبیعی پیشنهاد شده، الگوریتم سیستم مورچگان[4] بود که در سال ۱۹۹۱ توسط کلرنی و همکاران پیشنهاد شد[۲۴]. در سالهای اخیر این الگوریتم اولیه پیشنهادی توسعه یافت و الگوریتم‌های دیگری، با مبنا قرار دادن این الگوریتم پایه اولیه، پیشنهاد شد که از جمله آنها می‌توان به الگوریتم سیستم جامعه مورچگان[5]، الگوریتم سیستم مورچگان-نخبه[6]، الگوریتم سیستم مورچگان بیشینه-کمینه، الگوریتم سیستم مورچگان ترتیبی[7]، الگوریتم سیستم مورچگان بهترین- بدترین[8] اشاره نمود [۲۵].

به‌طور خلاصه می‌توان مراحل حل یک مسئله به‌روش الگوریتم بهینه‌سازی جامعه مورچگان را به‌شرح زیر بیان نمود [۲۶]:

۱- تعریف مسئله به‌صورت گراف[9]: این مرحله اولین و اساسی‌ترین مرحله در حل مسئله است و اصولاً حل مسئله با الگوریتم بهینه‌سازی جامعه مورچگان نیازمند تعریف گراف برای مسئله می‌باشد. با تعریف گراف، مورچه‌ها قابلیت حرکت بر روی آن و امکان ساخت جواب را دارا می‌باشند. یک گراف به‌صورت مجموعه‌ای از نقاط تصمیم، مجموعه‌ای از مسیرها و گزینه‌های انتخاب برای هریک از نقاط تصمیم و مجموعه‌ای از هزینه‌های مسیرها و گزینه‌های انتخاب برای هر یک از نقاط تصمیم می‌باشد.

۲- تعریف فرامان مناسب: یکی دیگر از مراحل اساسی در حل مسئله به‌روش الگوریتم بهینه‌سازی جامعه مورچگان، تعریف فرامان مناسب برای مسیرهای گراف است.

۳- تعریف و انتساب مقادیر کاوشی مناسب: یکی دیگر از مراحل اصلی و اساسی برای حل مسئله به‌روش الگوریتم بهینه‌سازی جامعه مورچگان، تعریف و انتساب مقادیر کاوشی مناسب به مسیرهای گراف تعریف شده برای مسئله است. مقادیر کاوشی تعریف شده برای مسئله، به تابع هدف در نظر گرفته شده برای مسئله وابسته است. انتخاب مناسب این مقادیر کاوشی می‌تواند بر عملکرد مناسب الگوریتم تأثیرگذار باشد.

۴- با تعریف گراف و مقادیر فرامان و هدایتگر کاوشی، جامعه‌ای از مورچگان به‌منظور ساخت جوابهای مسئله انتخاب می‌شود.

۵- در هر مرحله مورچه‌ها با مستقر شدن بر روی نقاط تصمیم مسئله، شروع به حرکت می‌کنند.

۶- در هر نقطه تصمیم، برای انتخاب گزینه تصمیم یک تابع احتمال تعریف شده است که بر اساس آن تابع احتمال، گزینه تصمیم توسط مورچه انتخاب می‌شود و به نقطه تصمیم بعدی می‌رود. این روند تا زمان عبور مورچه از کلیه نقاط تصمیم ادامه می‌یابد. موقعی که کلیه نقاط تصمیم پوشش داده شود، یک جواب ساخته شده است.

۷- بر اساس تابع هدف تعریف شده، هزینه جواب ساخته شده توسط مورچه محاسبه می‌شود.

۸- مراحل ششم و هفتم برای تمامی مورچه‌های هر تکرار ادامه می‌یابد.

۹- بعد از انجام مراحل ششم تا هشتم، فرامان مسیر اصلاح شده و تکرار بعدی آغاز می‌شود.

۱۰- مراحل پنجم تا هشتم تا رسیدن به تعداد تکرار مورد نظر و یا سایر معیارهای توقف الگوریتم ادامه می‌یابد.

## ۳- تعریف مسئله

طراحی شبکه جامع بهینه فاضلاب خانگی نیازمند طراحی همزمان جانمایی و ابعاد بهینه تصفیه‌خانه و شبکه جمع‌آوری فاضلاب است. در این بخش، مسئله طراحی جامع بهینه تصفیه‌خانه و شبکه جمع‌آوری در قالب یک مسئله بهینه‌سازی تعریف می‌گردد. مدل‌سازی این مسئله در قالب یک مسئله بهینه‌سازی نیازمند تعریف تابع هدف و قیود مسئله است. در حالت کلی، مسئله

---

[1] Ad-hoc Engineering Method
[2] Swarm Intelligence
[3] Pheromone
[4] Ant System
[5] Ant Colony System
[6] Elitist Ant System
[7] Ranked Ant System
[8] Best - Worst Ant System
[9] Graph

بهینه‌سازی تعریف شده یک مسئله پیچده غیر خطی مختلط عدد صحیح است که دارای قیود غیر خطی و متغیرهای پیوسته و گسسته می‌باشد.

هدف در این مسئله، کمینه کردن هزینه ساخت تصفیه خانه و شبکه جمع‌آوری فاضلاب است. به‌عبارت دیگر:

$$\text{Minimize} \quad F = C_{Sewer} + C_{WWT} \qquad (۱)$$

که در این رابطه

F تابع هدف مسئله بهینه‌سازی، $C_{Sewer}$ تابع هزینه ساخت شبکه جمع‌آوری فاضلاب و $C_{WWT}$ تابع هزینه ساخت تصفیه‌خانه است.

هزینه ساخت تصفیه‌خانه به‌صورت کلی تابع دبی و یا حجم فاضلاب ورودی به تصفیه‌خانه، و هزینه ساخت شبکه جمع‌آوری فاضلاب به‌طور کلی تابع مقدار حجم خاکبرداری، قطر لوله‌ها، تعداد و قطر منهول‌ها، هد و دبی ایستگاههای پمپاژ و غیره است. در این تحقیق با فرض ثقلی بودن شبکه جمع‌آوری فاضلاب، از پمپ و منهول‌های ریزشی صرف‌نظر شد. همچنین در محاسبه هزینه ساخت تصفیه‌خانه، دبی ورودی به تصفیه‌خانه تابع جمعیت سرویس تصفیه‌خانه می‌باشد. بنا براین، تابع هزینه ساخت شبکه جمع‌آوری فاضلاب و تابع هزینه ساخت تصفیه‌خانه به‌ترتیب به شکل زیر تعریف می‌شوند:

$$C_{Sewr} = \sum_{l=1}^{N} L_l K_p(d_l, E_l) + \sum_{m=1}^{M} K_m(h_m) \qquad (۲)$$

$$C_{WWT} = \sum_{nw=1}^{NW} K_W(pop_{nw}) \qquad (۳)$$

که در روابط بالا

$K_p$ تابع هزینه لوله‌گذاری، $d_l$ قطر لوله lام، $E_l$ عمق کارگذاری لوله lام، $L_l$ طول لوله lام، N تعداد کل لوله‌ها، $K_m$ تابع هزینه ساخت منهول، $h_m$ ارتفاع منهول mام، M تعداد کل منهول‌ها، $K_w$ تابع هزینه ساخت تصفیه‌خانه، $pop_{nw}$ جمعیت تحت پوشش تصفیه‌خانه nw ام و NW تعداد کل تصفیه‌خانه‌ها است.

تعریف مدل بهینه‌سازی مسئله نیازمند تعریف محدودیتها و قیود نیز است. در تعریف مدل این مسئله از قیود کیفی صرف‌نظر شده است و بنابراین قیود این مسئله را می‌توان به دو دسته قیود ساختاری[1] و هیدرولیکی تقسیم بندی نمود. قید ساختاری این مسئله یکی از مهم‌ترین قیدهای مسئله است و به این معنی است که ساختار شبکه جمع‌آوری فاضلاب باید به‌صورت شاخه‌ای طراحی شود [۲۷]. منظور از شبکه شاخه‌ای، شبکه‌ای است که از هر گره آن فقط یک خروجی به سمت گره ریشه وجود داشته باشد. بنابراین در ابتدا ساختار پایه برای مسئله تعریف می‌شود. ساختار پایه مسئله با توجه به وضعیت جغرافیایی و توپوگرافی[2] منطقه مورد بررسی، وضعیت و ساختار خیابان‌ها و محدودیتهای جغرافیایی تعریف می‌شود. این ساختار شامل تعدادی گره و تعدادی یال[3] است. موقعیت منهول‌ها، خروجی‌ها و تصفیه‌خانه‌ها به‌عنوان گره، و موقعیت لوله‌ها به‌عنوان یال‌های ساختار پایه تعریف می‌شود. از بین گره‌های تعریف شده، گره‌هایی که نشان‌دهنده موقعیت خروجی‌ها و تصفیه‌خانه‌ها است به‌عنوان گره ریشه تعریف می‌شوند. با توجه به موارد ذکر شده، فرمول‌بندی قیود ساختاری مسئله به‌صورت زیر است

$$X_{ij} + X_{ji} = 1 \qquad \forall i, j = 1,.....,K \qquad (۴)$$

$$\sum_{j=1}^{N_i} X_{ij} = 1 \qquad \forall i = 1,.....,K \qquad (۵)$$

که در روابط بالا

$X_{ij}$ یک متغیر عدد صحیح صفر و یک است که مقدار آن با توجه به جهت جریان در لوله lام تعریف می‌شود، به‌گونه‌ای که اگر جهت جریان در لوله lام از گره i به سمت گره j باشد، مقدار آن یک و در غیر این صورت، صفر است؛ $N_i$ تعداد لوله‌های متصل به گره i و K تعداد کل گره‌های شبکه است.

یکی دیگر از مهم‌ترین قیود مسئله، قید پیوستگی جریان برای هر گره است. این قید که با توجه به متغیر عدد صحیح صفر و یک تعریف شده را می‌توان به‌صورت زیر فرمول‌بندی نمود. بنابراین برای گره فرضی i

$$\sum_{j=1}^{N_i} X_{ji} Q_l - \sum_{j=1}^{N_i} X_{ij} Q_l = 0 \qquad \forall i = 1,.....,K \qquad (۶)$$

که در رابطه بالا

$Q_l$ مقدار دبی جریان در لوله lام است که مابین گره i و گره j قرار دارد.

علاوه بر قیود ذکر شده، تعریف مدل بهینه‌سازی مسئله نیازمند تعریف قیود هیدرولیکی است که در ادامه به آنها اشاره می‌شود:

۱- محدودیت سرعت: سرعت جریان در مقاطع فاضلاب باید در یک محدوده مجاز حداکثر و حداقل قرار گیرد. سرعت حداقل برای جلوگیری از ته‌نشینی مواد جامد و مسدود شدن لوله‌های شبکه و سرعت حداکثر برای جلوگیری از فرسایش لوله‌های فاضلابرو مد نظر قرار می‌گیرد. از آنجا که فرسایش لوله‌ها علاوه بر سرعت جریان و جنس مواد معلق به جنس لوله نیز بستگی دارد، لذا سرعت حداکثر مجاز، تابعی از جنس لوله است. در بیشتر موارد، در تعریف

[1] Topological

[2] Topography

[3] Arc

این محدودیت، سرعت شستشو جایگزین سرعت حداقل می‌شود، به این تعبیر که شبکه به گونه‌ای طراحی می‌شود که حداقل یک بار در طول شبانه روز، سرعت جریان به سرعت شستشو برسد.

۲- محدودیت شیب: لازم است که شیب لوله‌های مقاطع فاضلابرو در یک محدوده مجاز باشند. شیب حداقل برای تأمین سرعت حداقل مد نظر قرار می‌گیرد.

۳- عمق کارگذاری لوله‌ها: عمق کارگذاری لوله‌های مقاطع فاضلابرو باید در محدوده مجاز حداکثر و حداقل باشد. حداقل پوشش لوله‌ها، به‌منظور جلوگیری از یخ زدگی، فشار ناشی از بارهای وارده و غیره در نظر گرفته می‌شود. همچنین به‌دلیل مشکلات ناشی از آبهای زیرزمینی، این پوشش به میزان حداکثر مجاز محدود می‌شود.

۴- محدودیت عمق جریان: به‌علت امکان وجود مواد درشت معلق در فاضلاب و امکان گیر کردن این مواد به کف کانال و در نتیجه ته‌نشینی آنها، برای عمق جریان فاضلاب در لوله‌ها یک مقدار حداقل منظور می‌شود. همچنین به‌دلیل جلوگیری از تشکیل جریان تحت فشار، برای عمق جریان فاضلاب در لوله‌ها، یک مقدار حداکثر نیز در نظر گرفته می‌شود.

۵- قید اقطار تجاری: اقطار موجود برای لوله به‌صورت پیوسته نیست، بلکه مقدار آنها باید از لیست اقطار تجاری انتخاب شود.

۶- قاعده تلسکوپی: در شبکه جمع‌آوری فاضلاب، قطر لوله‌های خروجی از هر گره باید بزرگ‌تر یا مساوی قطر لوله‌های ورودی به آن گره باشد.

۷- معادله هیدرولیکی: برای محاسبه سرعت جریان در لوله‌ها و سایر پارامترهای هیدرولیکی جریان از یک معادله هیدرولیکی مناسب استفاده می‌شود. در این تحقیق از معادله هیدرولیکی مانینگ برای محاسبه سرعت جریان در لوله‌ها و سایر پارامترهای هیدرولیکی جریان استفاده شد.

در نهایت، فرمول‌بندی ریاضی قیود هیدرولیکی را می‌توان به‌شکل زیر ارائه نمود

$$V_l \le V_{max}$$
$$V_l^* \ge V_{clean} \qquad \forall l = 1,.....,N \qquad (۷)$$
$$S_l \ge S_{min} \qquad \forall l = 1,.....,N \qquad (۸)$$
$$E_{min} \le E_l \le E_{max} \qquad \forall l = 1,.....,N \qquad (۹)$$
$$\beta_{min} \le \left(\frac{y}{d}\right)_l \le \beta_{max} \qquad \forall l = 1,.....,N \qquad (۱۰)$$
$$d_l \in D \qquad \forall l = 1,.....,N \qquad (۱۱)$$
$$d_l \ge \mathbf{d_l} \qquad \forall l = 1,.....,N \qquad (۱۲)$$
$$Q_l = \frac{1}{n} A_l R_l^{2/3} S_l^{1/2} \qquad \forall l = 1,.....,N \qquad (۱۳)$$

که در این روابط

$V_l$ سرعت جریان در لوله $l$ام در انتهای دوره طرح، $V_l^*$ سرعت بیشینه جریان در لوله $l$ام در ابتدای شروع بهره‌برداری، $V_{max}$ حداکثر مقدارسرعت جریان، $V_{clean}$ سرعت شستشوی جریان، $S_l$ شیب طولی لوله $l$ام، $S_{min}$ حداقل مقدارشیب طولی لوله، $E_l$ عمق کارگذاری لوله $l$ام، $E_{max}$ حداکثر مقدار عمق کارگذاری، $E_{min}$ حداقل مقدار عمق کارگذاری، $(\frac{y}{d})_l$ نسبت پرشدگی جریان در لوله $l$ام، $\beta_{min}$ حداقل مقدار نسبت پر شدگی جریان در لوله، $\beta_{max}$ حداکثر مقدار نسبت پر شدگی جریان در لوله، $D$ مجموعه قطرهای تجاری لوله‌ها، $\mathbf{d_l}$ مجموعه قطرهای تجاری بالادست لوله $l$ام، $n$ ضریب زبری مانینگ، $A_l$ سطح مقطع لوله $l$ام و $R_l$ شعاع هیدرولیکی لوله $l$ام است.

بررسی فرمول‌بندی ارائه شده نشان می‌دهد که مسئله طراحی جامع بهینه جانمایی و ابعاد تصفیه‌خانه و شبکه جمع‌آوری فاضلاب یک مسئله پیچیده غیرخطی مختلط اعداد صحیح است و بنابراین حل آن نیازمند ارائه یک روش مناسب است.

## ۴- روش پیشنهادی حل مدل بهینه‌سازی

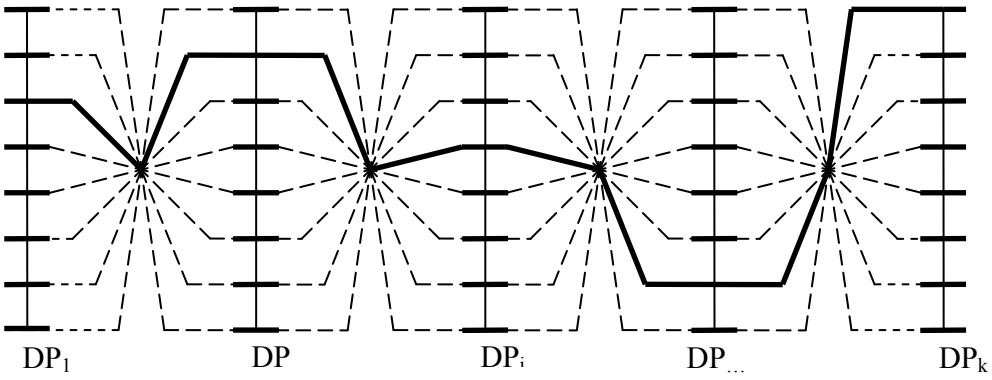
در این تحقیق با توجه به قابلیت‌های الگوریتم‌های فراکاوشی، از الگوریتم بهینه‌سازی جامعه مورچگان در حل مدل بهینه‌سازی مسئله طراحی جامع جانمایی و ابعاد تصفیه‌خانه و شبکه جمع‌آوری فاضلاب استفاده شد و با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی جامعه مورچگان، روشی ابتکاری بر مبنای قضاوت مهندسی برای حل مدل بهینه‌سازی ارائه شد. اولین گام در حل مسئله بهینه‌سازی به‌کمک الگوریتم جامعه مورچگان، تعریف گراف مسئله است. تعریف گراف مسئله نیازمند تعریف متغیر تصمیم مسئله، نقاط تصمیم مسئله و گزینه‌های تصمیم مربوطه است. در این مسئله متغیرهای تصمیم مختلفی از جمله شیب لوله‌ها، تراز گره‌ها، قطر لوله‌ها، موقعیت ایستگاههای پمپاژ و تصفیه‌خانه‌ها و غیره را می‌توان منظور نمود. در این تحقیق تراز گره‌ها به‌عنوان متغیر تصمیم مسئله در نظر گرفته شد. بنابراین، نقاط تصمیم مسئله، گره‌های ساختار پایه تعریف شده برای مسئله است. همچنین گزینه‌های تصمیم در هر نقطه تصمیم، مقادیر گسسته‌سازی شده محدوده مجاز تراز هر گره است. این محدوده به صورت $[Z-E_{max}, Z-E_{min}]$ تعریف می‌شود که $Z$ تراز سطح زمین در هر گره است. شکل ۱ گراف تعریف شده برای حل مسئله به‌کمک الگوریتم بهینه‌سازی جامعه مورچگان را نشان می‌دهد. در این شکل خطوط عمودی $(DP_K,....,DP_1)$ نقاط تصمیم مسئله، خطوط پر رنگ کوچک افقی گزینه‌های تصمیم در هر نقطه تصمیم، خط چین‌های افقی و

مورب جوابهای مسئله و خطوط پر رنگ مورب و افقی یک جواب ساخته شده توسط مورچه فرضی است.

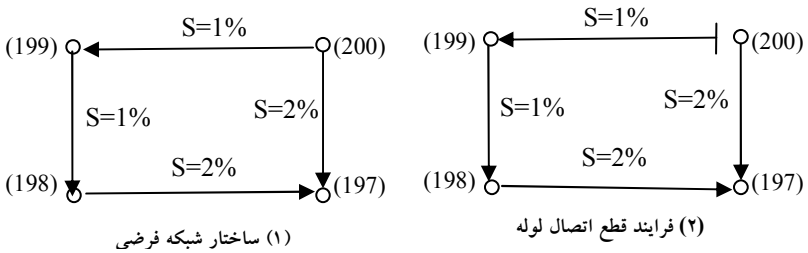
در روش پیشنهادی با تعریف ساختار پایه و گراف مسئله، مورچه‌ها بر روی نقاط تصمیم قرار گرفته و شروع به حرکت می‌کنند. وقتی یک مورچه از همه نقاط تصمیم عبور کند، یک جواب ساخته شده است و بنابراین تراز همه گره‌های مسئله مشخص می‌شود. با صرف‌نظر نمودن از پمپ و منهول‌های ریزشی در روش پیشنهادی، تراز به‌دست آمده برای هر گره با تراز کارگذاری لوله‌های ورودی و خروجی گره مذکور برابر است. با معلوم بودن تراز کارگذاری ابتدایی و انتهایی لوله‌ها و طول لوله‌ها، شیب لوله‌ها قابل محاسبه است. سپس، یک روش ابتکاری بر مبنای قضاوت مهندسی برای تعیین جانمایی شبکه جمع‌آوری فاضلاب پیشنهاد می‌شود. در این روش با معلوم بودن شیب لوله‌ها، لوله‌های ورودی به هر گره و خروجی از آن مشخص می‌شود. با توجه به شاخه‌ای بودن ساختار شبکه جمع‌آوری فاضلاب، باید از هر گره فقط یک خروجی به سمت گره ریشه وجود داشته باشد. بنابراین اگر در اعمال این روش، گره‌ای بدون لوله خروجی وجود داشته باشد، ساختار حاصل، یک جانمایی غیر قابل قبول بوده و جواب به‌دست آمده، یک جواب غیر موجه[1] نامیده می‌شود. همچنین در صورتی که بیش از یک خروجی از هر گره وجود داشته باشد، لوله با شیب بزرگ‌تر را به‌عنوان لوله اصلی شبکه منظور کرده و اتصال سایر لوله‌های خروجی متصل به این گره قطع می‌شود. در نهایت، یک گره مجازی در مجاورت گره اصلی و با ترازی برابر با تراز گره اصلی برای منظور نمودن موقعیت قطع اتصال در نظر گرفته می‌شود. شکل ۲ چگونگی اعمال قطع اتصال در روش پیشنهادی برای شبکه‌ای با ۴ لوله با شیب مشخص و ۴ گره با تراز مشخص را نشان می‌دهد. در این شکل اعداد داخل پرانتز نشان‌دهنده تراز گره‌های به‌دست آمده از الگوریتم بهینه‌سازی جامعه مورچگان است.

این نکته قابل ذکر است که در به‌دست آوردن جانمایی بهینه تصفیه‌خانه‌ها می‌توان با اعمال تغییری کوچک در ساختار پایه تعریف شده، روش پیشنهادی را در تعیین جانمایی بهینه تصفیه‌خانه اعمال نمود. چگونگی اعمال این تغییر به این صورت است که در تعریف ساختار پایه، یک گره مجازی منظور می‌شود که توسط یال‌های مجازی به نقاط کاندید برای احداث تصفیه‌خانه، متصل می‌شود. بنابراین، اگر در اعمال روش پیشنهادی، این یال‌های مجازی به‌عنوان خروجی انتخاب شوند، گره بالادست این یال‌ها به‌عنوان موقعیت تصفیه‌خانه منظور شده و به این صورت جانمایی تصفیه‌خانه نیز مشخص می‌شود. در نهایت، در روش پیشنهادی یک

[1] Infeasible




**شکل ۱**- گراف تعریف شده برای مسئله




**شکل ۲**- چگونگی اعمال قطع اتصال لوله های خروجی

ساختار شاخه‌ای برای شبکه و با شیب لوله‌های معلوم، به‌همراه جانمایی مشخص تصفیه‌خانه حاصل می‌شود. تکمیل فرایند طراحی نیازمند محاسبه قطر لوله‌هاست. در اینجا، قطر لوله‌ها به گونه‌ای محاسبه می‌شود که محدودیتهای مسئله حتی‌الامکان برآورده شود. بنابراین، برای به‌دست آوردن قطر بهینه هر لوله و با شروع از لوله‌های سرشاخه، در هر لوله کوچک‌ترین قطری که همه قیود مسئله را برآورده سازد، به‌عنوان قطر بهینه لوله مورد نظر انتخاب می‌شود.

## ۵- حل مسئله نمونه

به‌منظور نشان دادن قابلیتهای روش پیشنهادی، یک ناحیه مربع شکل به ابعاد ۸۰۰ متر در ۸۰۰ متر در نظر گرفته شد که فاضلاب تولیدی آن توسط شبکه جمع‌آوری فاضلاب به تصفیه‌خانه‌ها حمل می‌شد. تراکم جمعیت در ابتدای دوره طرح (شروع بهره‌برداری) ۲۵۰۰ نفر در هکتار و در انتهای دوره طرح ۴۰۰۰ نفر در هکتار بود. میانگین مصرف آب در طول دوره بهره‌برداری ۲۵۰lit/(day*cap) و ضریب تبدیل آب به فاضلاب ۰/۸ بود. برای این ناحیه، ساختار پایه‌ای مطابق شکل ۳ با ۸۱ گره و ۱۴۴ یال تعریف شد. در این ساختار پایه، ۹ گره به‌عنوان نقاط کاندید خروجی تصفیه‌خانه در نظر گرفته شد که با دوایر توپر نشان داده شده است. نقشه توپوگرافی منطقه مطابق شکل ۴ است. همچنین، طول تمامی لوله‌ها برابر با ۱۰۰ متر بود.

در این مسئله تابع هزینه لوله‌گذاری، منهول و تصفیه‌خانه مطابق روابط زیر تعریف می‌شود

$$K_p = 10.93e^{3.43d_l} + 0.012E_l^{1.53} + 0.437E_l^{1.47}d_l$$
$$K_m = 41.46h_m \qquad (۱۴)$$
$$K_W = 3566.4pop_{nw}^{0.586}$$

مقادیری که برای سایر پارامترهای مسئله منظور شد عبارت‌اند از: ضریب زبری مانینگ ($n$)= ۰/۰۱۵؛ حداکثر عمق کارگذاری لوله‌ها ($E_{max}$) =۱۰ متر؛ حداقل عمق کارگذاری لوله‌ها ($E_{min}$) =۲/۵ متر؛ حداکثر مقدار نسبت پرشدگی ($\beta_{max}$) = ۰/۸۳؛ حداقل مقدار نسبت پر شدگی ($\beta_{min}$) = ۰/۱؛ حداکثر سرعت جریان ($V_{max}$) = ۶ $m/s$ و سرعت شستشوی جریان ($V_{clean}$) = ۰/۷۵ $m/s$. با توجه به روابط و مقادیر مسئله نمونه و با کد نویسی در محیط نرم‌افزار فرترن[1]، از روش پیشنهادی در حل مدل بهینه‌سازی مسئله نمونه استفاده شد. مدل بهینه‌سازی مسئله نمونه یک مدل پیچیده غیر خطی مختلط اعداد صحیح بود که در حالت کلی ۱۶۲ متغیر تصمیم پیوسته، ۱۴۴ متغیر تصمیم گسسته و ۱۴۴ متغیر عدد صحیح صفر و یک دارد. ولی در روش پیشنهادی و با انتخاب تراز گره‌ها به‌عنوان متغیر تصمیم مسئله، تعداد متغیرهای تصمیم مسئله ۸۲ (تعداد ۸۱ گره اصلی شبکه و ۱ گره مجازی تعریف شده) بود. در این تحقیق از بین الگوریتم‌های مختلف پیشنهادی بهینه‌سازی جامعه مورچگان، از الگوریتم مورچه بیشینه- کمینه در حل مدل بهینه‌سازی مسئله استفاده شد. الگوریتم‌های مختلف جامعه مورچگان، به‌دلیل ماهیت تصادفی آنها دارای پارامترهای آزادی هستند که با تغییر مقدار این پارامترها، عملکرد الگوریتم و همگرایی و مرغوبیت جوابهای حاصل از آنها تغییر خواهد کرد. بر این اساس باید قبل از به‌کارگیری الگوریتم، مقادیر مطلوب این پارامترها به‌منظور عملکرد بهینه الگوریتم تنظیم گردد. در این مسئله با روش سعی و خطا، مقادیر مطلوب پارامترهای الگوریتم مورچه بیشینه- کمینه به‌صورت مقادیر جدول ۱ ارائه شده است. نتایج حاصل از ۱۰ بار اجرای مدل بهینه‌سازی مسئله در جدول ۲ ارائه شد. همچنین از الگوریتم ژنتیک با کدگذاری دودویی[2] نیز در حل مدل بهینه‌سازی استفاده شد که نتایج آن نیز در جدول ۲ ارائه شده است. پارامترها و مقادیر مطلوب مورد استفاده در الگوریتم ژنتیک عبارت‌اند از: تعداد جمعیت=۲۰۰؛ تعداد تکرار=۲۰۰۰؛ معیار انتخاب= روش چرخ گردان با رتبه بندی؛ روش ترکیب= یک نقطه ای؛ احتمال ترکیب= ۱ و احتمال جهش= ۰/۰۱. مقایسه نتایج نشان‌دهنده آن است که در حل مدل بهینه‌سازی مسئله با استفاده از روش پیشنهادی، جوابهایی مناسب حاصل شده است. همچنین جوابهای به‌دست آمده از الگوریتم بهینه‌سازی جامعه مورچگان در مقایسه با

**جدول ۱**- مقادیر مناسب پارامترهای الگوریتم مورچه بیشینه-کمینه

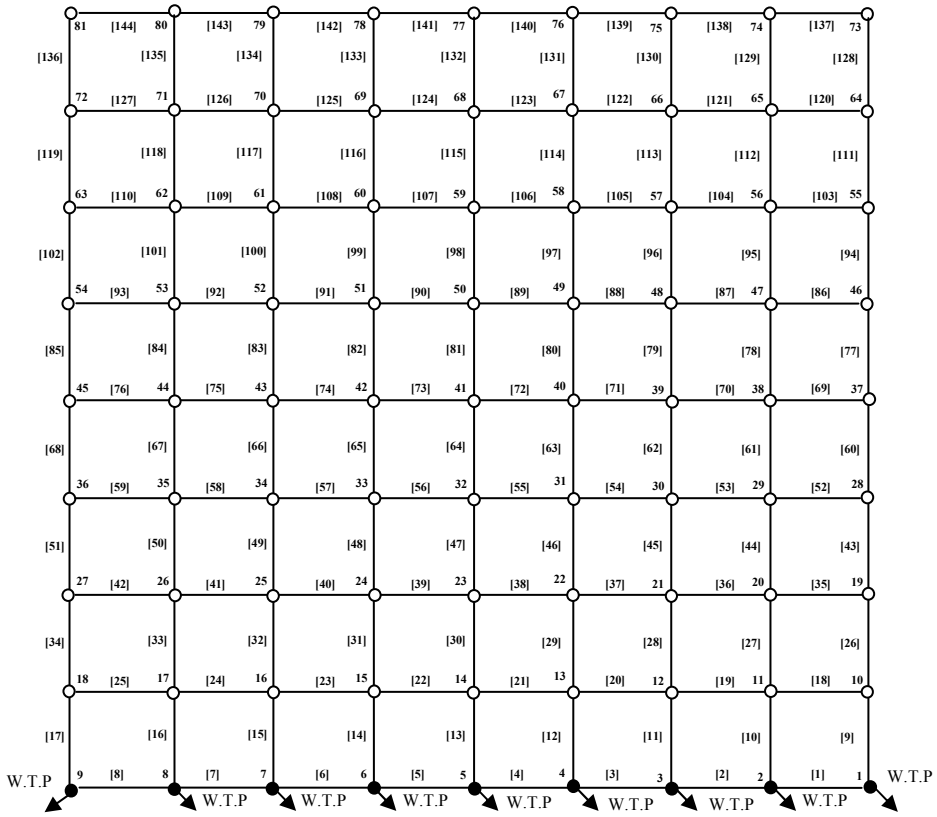
| تعداد مورچه | تعداد تکرار | تعداد گسسته سازی | $\alpha$ | $\beta$ | $\rho$ | $p_{best}$ |
|---|---|---|---|---|---|---|
| ۲۰۰ | ۲۰۰۰ | ۳۰ | ۱ | ۰/۱ | ۰/۹۵ | ۰/۲ |

**جدول ۲**- مقادیر بیشینه، کمینه، میانگین و انحراف معیار جوابها و تعداد جوابهای امکان‌پذیر حاصل از حل مدل بهینه‌سازی مسئله

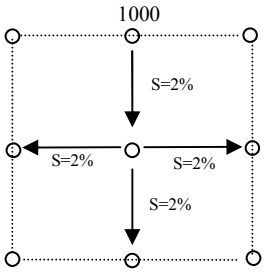
| الگوریتم | مقادیر جوابها | | | انحراف معیار جوابها | تعداد جوابهای امکان‌پذیر |
|---|---|---|---|---|---|
| | کمینه | بیشینه | میانگین | | |
| جامعه مورچگان | ۶۳۵۲۲۶۰ | ۷۳۵۶۳۸۰ | ۷۰۲۰۹۴۰ | ۰/۰۴۹۴۶ | ۱۰ |
| ژنتیک | ۶۶۹۷۶۲۰ | ۷۲۰۶۶۷۰ | ۷۰۲۲۷۱۰ | ۰/۰۱۹۵۸ | ۱۰ |

[1] Fortran

[2] binary

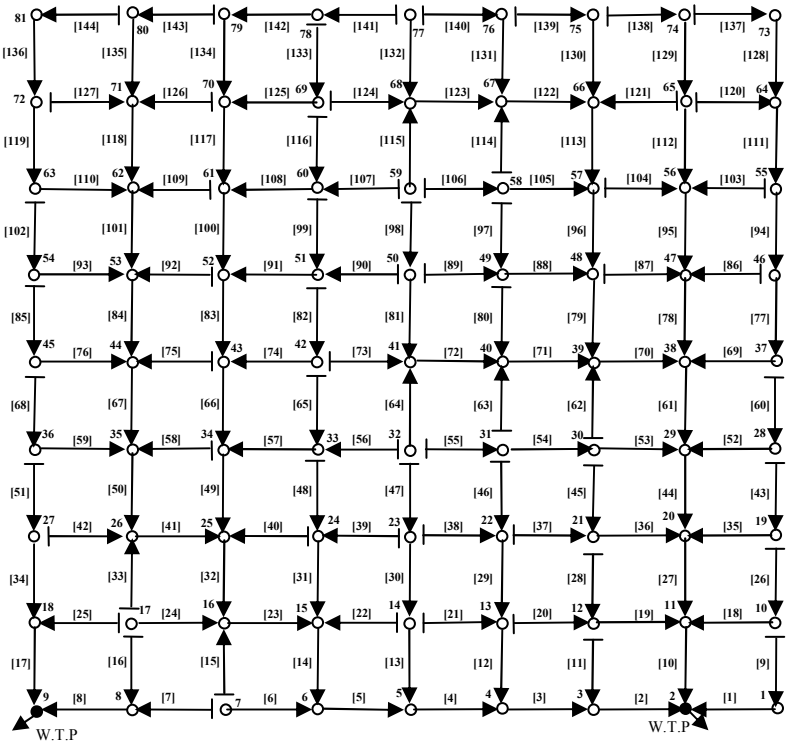



**شکل ۳**- ساختار پایه مسئله نمونه

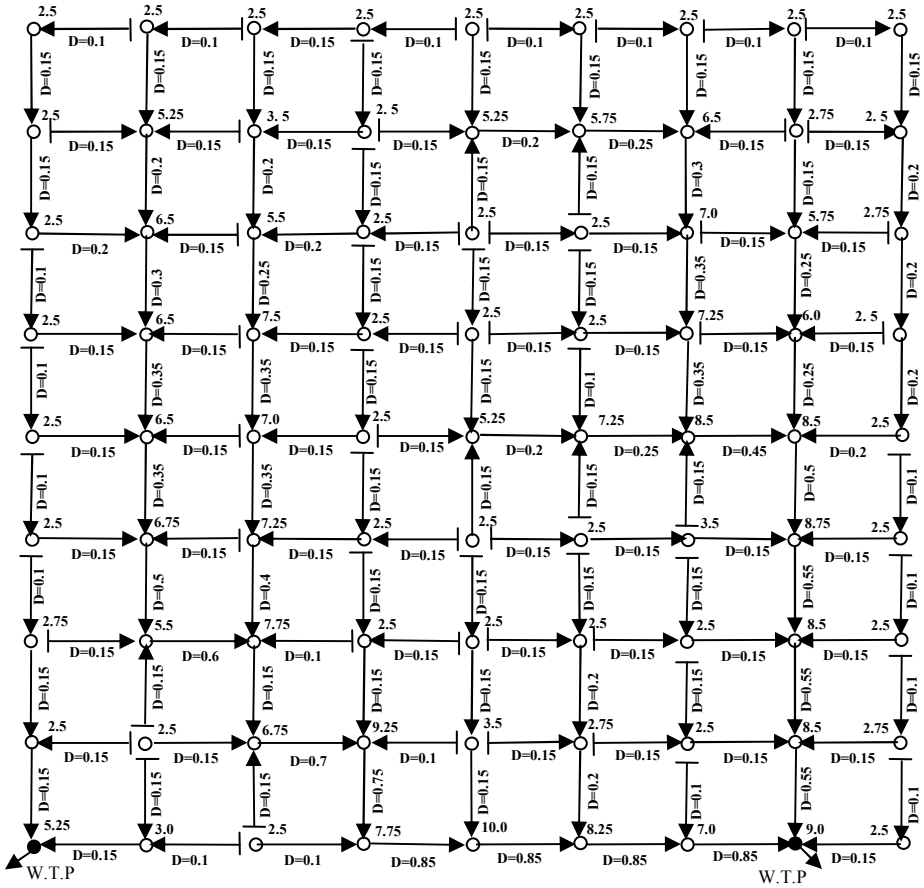



**شکل ۴**- نقشه توپوگرافی منطقه

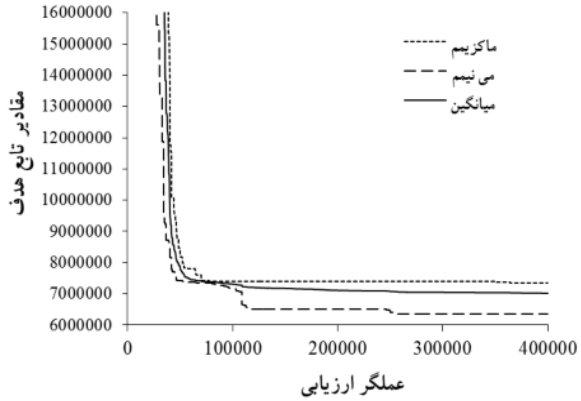
الگوریتم ژنتیک مطلوب‌تر است. شکل ۵ جانمایی بهینه تصفیه‌خانه و شبکه جمع‌آوری فاضلاب برای مسئله نمونه با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی جامعه مورچگان را نشان می‌دهد. شکل ۶ مقادیر بهینه قطر لوله‌ها و پوشش گره‌ها برای ساختار بهینه به‌دست آمده شکل ۵ را نشان می‌دهد. با به‌کارگیری مقادیر شکل ۶ و معادلات مربوطه، سایر پارامترهای هیدرولیکی مسئله از جمله سرعت جریان، نسبت پرشدگی جریان و شیب لوله‌ها قابل محاسبه است. تغییرات مقادیر بیشینه، میانگین و کمینه تابع هدف مسئله نمونه با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی جامعه مورچگان در شکل ۷ نشان داده شده است. شکل ۸ تغییرات میانگین مقدار تابع هدف مسئله با استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی جامعه مورچگان و الگوریتم ژنتیک را نشان می‌دهد. نتایج نشان دهنده آن است که با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی جامعه مورچگان در روش پیشنهادی در مقایسه با الگوریتم ژنتیک، جوابهایی مطلوب‌تر و با هزینه محاسباتی کمتر حاصل شده است و در نتیجه روش پیشنهادی می‌تواند در حل مسئله بهینه‌سازی بزرگ مقیاس طراحی جامع تصفیه‌خانه و شبکه جمع‌آوری فاضلاب خانگی به‌کار گرفته شود.



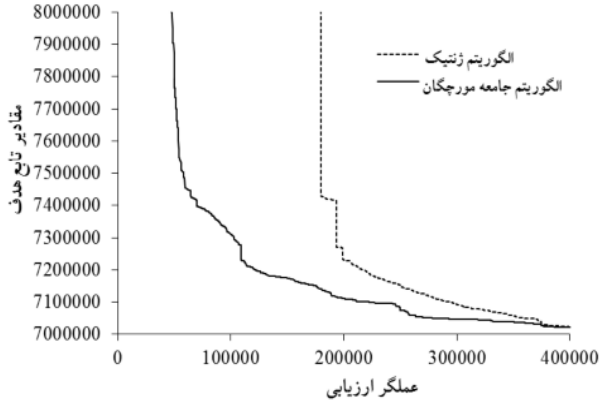

**شکل ۵**- جانمایی بهینه تصفیه‌خانه و شبکه جمع‌آوری فاضلاب مسئله نمونه




**شکل ۶**- مقادیر بهینه قطر لوله‌ها و پوشش گره‌ها برای شبکه بهینه مسئله نمونه




**شکل ۷**- تغییرات بیشینه، کمینه و میانگین مقدار تابع هدف با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی جامعه مورچگان




**شکل ۸**- تغییرات میانگین مقدار تابع هدف با استفاده از الگوریتم‌های بهینه سازی جامعه مورچگان و ژنتیک

## ۶- نتیجه‌گیری

در این تحقیق با استفاده از قابلیتهای الگوریتم‌های فراکاوشی و به‌ویژه الگوریتم بهینه‌سازی جامعه مورچگان، روشی ابتکاری بر مبنای قضاوت مهندسی برای حل مسئله طراحی جامع بهینه تصفیه‌خانه و شبکه جمع‌آوری فاضلاب خانگی ارائه شد. در روش پیشنهادی و با انتخاب ترازهای گره‌ای به‌عنوان متغیر تصمیم، در ابتدا، تراز گره‌ها با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی جامعه مورچگان مشخص شد و سپس ترازهای گره‌ای معلوم در تعیین جانمایی شبکه و تصفیه‌خانه مورد استفاده قرار گرفت. در نهایت مسئله نمونه‌ای با به‌کارگیری روش پیشنهادی حل شد و نتایج آن با نتایج حاصل از به‌کارگیری الگوریتم ژنتیک در تعیین ترازهای گره‌ای مقایسه شد. نتایج نشان دهنده آن بود که با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی جامعه مورچگان در روش پیشنهادی در مقایسه با الگوریتم ژنتیک، جوابهایی مطلوب‌تر و با هزینه محاسباتی کمتر حاصل شده و در نتیجه روش پیشنهادی می‌تواند در حل مسئله بهینه‌سازی بزرگ مقیاس طراحی جامع تصفیه‌خانه و شبکه جمع‌آوری فاضلاب خانگی به‌کار گرفته شود.

## ۷- مراجع


1- Moeini, R., and Afshar, M.H. (2009). "Application of ant colony optimization algorithm for the optimal operation of reservoirs: A comparative study of three proposed formulation." *Scienti Iranica*, 16(4), 273-285.

2- Haestad, Methods. (2004). *Wastewater collection system modelling and design*, Haestad Press, Waterbury, USA.

3- Guo, Y., Walters, G., and Savic, D. (2008). "Optimal design of storm sewer networks: Past, present and future." *In proceeding of 11th International Conference on Urban Drainage*, Edinburgh, Scotland, UK, 1-10.

4- Melo, J.J., and Câmara, A.S. (1994). "Models for the optimization of regional wastewater treatment systems." *Eur. J. Oper. Res*., 73(1), 1-16.

5- Lynn, W.R., Logan, J.A., and Charnes, A. (1962). "Systems analysis for planning wastewater treatment plants." *J. Water Pollut. Control Fed*., 34(6), 565-581.

6- Deininger, R.A. (1965). "Water quality management: The planning of economically optimal pollution control systems." Ph.D. Thesis, Northwestern Univ., Evanston, Ill.

7- Loucks, D.P., ReVelle, C.S., and Lynn, W.R. (1967). "Linear programming models for water pollution control." *Manage. Sci*., 14(4), 166-181.

8- Wanielista, M.P., and Bauer, C.S. (1972). "Centralization of waste treatment facilities." *J. Water Pollut. Control Fed*., 44(12), 2229-2238.

9- Joeres, E.F., Dressler, J., Choand, C.C., and Falkner, C.H. (1974). "Planning methodology for the designing of regional wastewater treatment systems." *Water Resour. Res*., 10(4), 643-649.

10- Brill, E. D., and Nakamura, M. (1978). “A branch and bound method for use in planning regional wastewater treatment systems.” *Water Resour. Res*., 14(1), 109-118.
11- Graves, G.W., and Hatfield, G.B. (1972). “Whinston AB. mathematical programming for regional water-quality management.” *Water Resour. Res*., 8(2), 273-290.
12- Smeers, Y., and Tyteca, D. (1982). “Optimal location and design of wastewater treatment plants under river quality constraints.” Rinaldi, (Ed.,) *Environmental Systems Analysis and Management*, North- Holland, Amsterdam, The Netherlands.
13- Converse, A. O. (1972). “Optimum number and location of treatment plants.” *J. Water Pollut. Control Fed*., 44(8), 1629-1636.
14- Klemetson, S. L., and Grenney, W. J. (1985). “Dynamic optimization of regional wastewater treatment systems.” *J. Water Pollut. Control Fed*., 57(2), 128-134.
15- McConagha, D.L., and Converse, A.D. (1973). “Design and cost allocation algorithm for waste treatment systems.” *J. Water Pollut. Control Fed*., 45(12), 2558-2566.
16- Weeter, D.W., and Belardi, J.G. (1976). “Analysis of regional water treatment system.” *J. Envir. Engrg. Div*., 102(1), 233-237.
17- Lauria, D.T. (1979). “Desk calculator model for wastewater planning.” *J. Envir. Engrg. Div*., 105(1), 113-120.
18- Melo, J.J. (1992). “Optimization of regional wastewater treatment systems: The Opttar model.” Ph.D. Dissertation, New Univ. of Lisbon, Lisbon, Portugal.
19- Voutchkov, N.S., and Boulos, P.F. (1993). “Heuristic screening methodology for regional wastewater treatment planning.” *J. Environ. Eng*., 119(4), 603-614.
20- Wang, C.G., and Jamieson, D.G. (2002). “An objective approach to regional wastewater treatment planning.” *Water Resour. Res*., 38(3), 41-48.
21- Sousa, J., Ribeiro, A., Cunha, M.C., and Antunes, A. (2002). “An optimization approach to waste water systems planning at regional level.” *J. Hydroinform*., 4(2), 115-123.
22- Cunha, M. C., Pinheiro, L., Zeferino J.A., Antunes, A., and Afonso, P. (2009). “Optimization model for integrated regional wastewater systems planning.” *J. of Water Resources planning and Management*, 135(1), 23-33.
23- Zeferino, J.A., Antunes A.P., and Cunha M.C. (2010). “Multi-objective model for regional wastewater systems plane.” *Civil Engineering and Environmental Systems*, 27(2), 95-106.
24- Colorni, A., Dorigo, M., and Maniezzo, V. (1991). *Ant system: An autocatalytic optimizing process*, Tech. Report 91-016, Politecico di Milao, Italy.
25- Afshar, M.H., Rezai, S.E., and Moeini, R. (2010). “Reservoir operation optimization using stochastic adaptive refinement of ant algorithms.” *J. of Iran Water Resource Research*, 6(1), 1-13. (In Prsian)
26 - Moeini, R., and Afshar, M.H. (2009). “Optimal operation of reservoirs by application of max-min ant system (MMAS).” *J. of Science and Technology, Transaction on: Civil Engineering*, 46(1), 85-93.
27- Diogo, A.F., and Graveto, V.M. (2006). “Optimal layout of sewer systems: A deterministic versus a stochastic model.” *ASCE Journal of Hydraulic Engineering*, 132(9), 927-943.