

# TỐI ƯU CHI PHÍ XÂY DỰNG MẠNG LƯỚI THOÁT NƯỚC THẢI SINH HOẠT SỬ DỤNG TRÍ TUỆ NHÂN TẠO

Phạm Vũ Hồng Sơn<sup>a,b</sup>, Võ Mỹ Nguyệt<sup>a,b,\*</sup>

<sup>a</sup>Khoa Kỹ thuật Xây dựng, Trường Đại học Bách khoa TP. Hồ Chí Minh,  
268 đường Lý Thường Kiệt, quận 10, TP. Hồ Chí Minh, Việt Nam

<sup>b</sup>Đại học Quốc gia TP. Hồ Chí Minh, phường Linh Trung, TP. Thủ Đức, TP. Hồ Chí Minh, Việt Nam

Nhận ngày 10/11/2022, Sửa xong 22/12/2022, Chấp nhận đăng 23/12/2022

## Tóm tắt

Khi quá trình đô thị hóa và biến đổi khí hậu, tần suất ngập lụt sẽ tăng lên. Mỗi trận ngập lụt gây ra thiệt hại cho cơ sở hạ tầng và môi trường. Việc thiết kế tối ưu mạng lưới thoát nước và tiết kiệm chi phí xây dựng là cần thiết. Để giảm chi phí xây dựng một mạng lưới thoát nước hiện hữu, cần tối ưu hóa các thông số kỹ thuật ảnh hưởng trực tiếp đến chi phí và áp dụng các thuật toán tối ưu hóa. Nghiên cứu đã đề xuất phát triển thuật toán lai ghép Bầy Salps (SSA) – Chuồn Chuồn (DA) để tối ưu mạng lưới thoát nước thải giúp phát huy những điểm mạnh và khắc phục những điểm yếu của hai thuật toán, cân bằng quá trình thăm dò và khai thác. Hai ví dụ về mạng lưới thu gom nước thải được dùng để đánh giá hiệu suất của thuật toán và kết quả thu được được so sánh với các thuật toán cổ điển trong những nghiên cứu trước đây mà các tác giả đã thực hiện. Kết quả thu được ở hai case study cho thấy mô hình hiện tại mang lại giải pháp tối ưu hơn so với các phương pháp khác trong những nghiên cứu trước đây. Kết quả cho thấy thuật toán SSA-DA giúp cải thiện các thông số thu được bởi SSA hoặc DA riêng lẻ; chi phí thu được thấp hơn so với kết quả của các nghiên cứu trước đây.

*Từ khóa:* thuật toán bầy salps; thuật toán chuồn chuồn; mạng lưới thoát nước thải sinh hoạt; tối ưu hóa.

AN OPTIMIZATION OF CONSTRUCTION COST FOR THE DOMESTIC SEWERAGE NETWORK USING ARTIFICIAL INTELLIGENCE

## Abstract

As urbanization and climate change, the frequency of flooding will increase. Each flood causes damage to infrastructure and the environment. The optimal design of the drainage network and saving construction costs are necessary. To reduce the cost of building an existing drainage network, it is necessary to optimize the technical parameters that directly affect the cost and apply optimization algorithms. The study proposed to develop a hybrid algorithm of Salps Swarm Algorithm (SSA) – Dragonfly Algorithm (DA) to optimize the wastewater drainage network to help promote the advantages and overcome the disadvantages of the two algorithms, balancing the exploration and exploitation process. Two examples of wastewater collection networks are used to evaluate the performance of the algorithm and the obtained results are compared with classical algorithms in previous studies that the authors have performed. The results obtained in two case studies show that the current model offers more optimal solutions than other methods in previous studies. The results show that the SSA-DA algorithm improves the parameters obtained by the individual SSA or DA; The cost obtained is lower than the results of previous studies.

*Keywords:* salps swarm algorithm; dragonfly algorithm; domestic wastewater drainage network; optimization.

[https://doi.org/10.31814/stce.huce\(nuce\)2023-17\(1V\)-10](https://doi.org/10.31814/stce.huce(nuce)2023-17(1V)-10) © 2023 Trường Đại học Xây dựng Hà Nội (ĐHXDHN)

\*Tác giả đại diện. Địa chỉ e-mail: [vmnguyet.sdh19@hcmut.edu.vn](mailto:vmnguyet.sdh19@hcmut.edu.vn) (Nguyệt, V. M.)

## 1. Giới thiệu

Mạng lưới thoát nước là cấu trúc quan trọng của các thành phố hiện đại được thiết kế để bảo vệ sức khỏe con người và môi trường. Xây dựng mạng lưới thoát nước trong thành phố là một nhiệm vụ khá tốn kém. Tuy nhiên, chi phí xây dựng mạng lưới thoát nước có thể giảm đáng kể nếu cấu hình mạng có thể được tối ưu hóa một cách hiệu quả [1]. Hai vấn đề có thể được thực hiện trong thiết kế tối ưu của hệ thống mạng lưới cống: (1) tối ưu hóa các thành phần thủy lực, và (2) tối ưu hóa bố cục của mạng [1, 2]. Trong nghiên cứu này tập trung vào việc tìm thành phần kích thước tối ưu của mạng lưới cống được bố trí hiện hữu.

Các nhà nghiên cứu đã đề xuất các phương pháp tối ưu hóa khác nhau để giải quyết vấn đề thiết kế mạng lưới thoát nước trong bốn thập kỷ qua. Các phương pháp này được phân loại thành bốn loại chính là Lập trình tuyến tính (LP) [3–5]. Lập trình phi tuyến tính (NLP) [6, 7]; Phương pháp quy hoạch động (DP) [8, 9] và Thuật toán tiến hóa (EA) [10–13]. Mỗi phương pháp này đều có những hạn chế riêng của nó [1].

Để khắc phục những hạn chế của các phương pháp tối ưu hóa toán học, nhiều nhà nghiên cứu đã đề xuất thuật toán lai ghép như Kết hợp Giải thuật Tabu Search (TS) và Thuật toán di truyền (GA) [14]; Mô hình lai kết hợp thuật toán di truyền (GA) với Lập trình bậc hai (QP) [15]; Tối ưu hóa bầy đàn (PSO) kết hợp với Thuật toán di truyền (GA) [16]; Thuật toán tối ưu hóa đàn kiến (ACO) kết hợp với thuật toán cây tăng trưởng (TG) [17]; Thuật toán di truyền (GA) và mô hình cải tiến tự động hóa tế bào (GHCA) lai ghép [18]. Thuật toán di truyền (GA) kết hợp với Giải thuật Tabu Search (TS) [19]; Kết hợp Thuật toán di truyền với Thuật toán cây tăng trưởng (GA-TGA) [20]. Các phương pháp này cho phép tạo ra một giải pháp gần như tối ưu được tính toán trong khoảng thời gian hợp lý đáp ứng yêu cầu giải quyết vấn đề.

Nghiên cứu này sử dụng thuật toán bầy Salps (SSA) được giới thiệu bởi Mirjalili và các đồng tác giả vào năm 2017 [21], là một thuật toán metaheuristic mới lấy cảm hứng từ thiên nhiên được sử dụng để giải quyết các vấn đề tối ưu hóa khác nhau có các chức năng đơn phương thức và đa phương thức [22–24]. Thuật toán tối ưu hóa này được lấy cảm hứng từ hành vi bầy đàn của Salps trên biển [21]. Thuật toán được áp dụng trong nhiều lĩnh vực như Bài toán lựa chọn tính năng [22], tìm ra các thông số tối ưu cho pin nhiên liệu màng Polymer chất điện phân (PEM) [24], thiết kế Kim loại – Oxit – Bán dẫn (CMOS) và vi mạch tích hợp tương tự (IC) [25], hiệu chỉnh bộ ổn định hệ thống cho hệ thống điện nhiều máy [26], ước tính các hoạt động của một chất hóa học [27], nghiên cứu Dự báo phụ tải ngắn hạn [28], dự đoán các giá trị thông số cho đường cong giữ nước của đất [29], tối ưu hóa thông số của mô hình phát được sử dụng cho kỹ thuật tế bào quang điện [30], điều khiển tần số tải điện và điều khiển tần số tải của hệ thống điện [31, 32]. Tuy nhiên thuật toán SSA chưa được áp dụng vào bài toán tối ưu chi phí xây dựng mạng lưới thoát nước thải sinh hoạt. Các nghiên cứu trước đây đã chứng minh thuật toán SSA đơn giản, linh hoạt, dễ thực hiện, chỉ có một tham số điều khiển chính ( $c_1$ ), tốc độ hội tụ nhanh, được ứng dụng trong nhiều lĩnh vực khác nhau, nhưng nó vẫn còn một số hạn chế như chưa tìm được sự cân bằng phù hợp giữa đa dạng hóa và tăng cường [23], độ chính xác khi hội tụ kém, khả năng hội tụ sớm dẫn đến dễ rơi vào trạng thái trì trệ cục bộ [33–35], thiếu các thành phần ngẫu nhiên, các vấn đề trong miền rời rạc, thiếu khả năng tối ưu hóa, khả năng khám phá chưa tốt [36].

Với mục đích khắc phục những nhược điểm của SSA, nghiên cứu này đề xuất thuật toán lai ghép SSA-DA. Thuật toán Chuồn Chuồn (DA) là một trí tuệ bầy đàn mới được Mirjalili đề xuất vào năm 2015 để giải các bài toán rời rạc, bài toán đơn mục tiêu và bài toán đa mục tiêu [37]. DA tận dụng các điểm mạnh như khi liên kết với các phương pháp tối ưu hóa khác, DA đơn giản, linh hoạt, dễ dàng thực hiện, không gian tìm kiếm tương đối rộng lớn để tạo ra một phương pháp thông minh có thể khám phá không gian tìm kiếm hiệu quả; giúp khắc phục những hạn chế của SSA [38]. Thuật toán lai ghép

SSA-DA được đề xuất hứa hẹn sẽ cung cấp một thuật toán lai ghép mới giúp khắc phục những hạn chế của thuật toán SSA tiêu chuẩn, cải thiện sự cân bằng giữa thăm dò và khai thác, giúp thuật toán đạt được hiệu suất tốt hơn.

## 2. Mô hình hóa thiết kế mạng lưới cống thoát nước thải

### 2.1. Tính toán thủy lực cống thoát nước

Trong công tròn, dòng chảy trạng thái ổn định được mô tả bằng nguyên lý liên tục và phương trình Manning là:

$$Q = V \times A \quad (1)$$

trong đó  $Q$  là lưu lượng dòng nước thải;  $V$  là vận tốc của dòng nước thải,  $A$  là diện tích mặt cắt ướt

$$V = \frac{1}{n} R^{2/3} S^{1/2} \quad (2)$$

trong đó  $R$  là bán kính thủy lực;  $n$  là hệ số Manning;  $S$  là độ dốc cống thoát nước.

$$K = QnD^{-8/3}S^{-1/2} \quad (3)$$

$$\theta = \frac{3\pi}{2} \sqrt{1 - \sqrt{1 - \pi K}} \quad (4)$$

$$\left(\frac{d}{D}\right) = \frac{1}{2} \times \left(1 - \cos \frac{\theta}{2}\right) \quad (5)$$

$$R = \frac{D}{4} \left(\frac{\theta - \sin \theta}{\theta}\right) \quad (6)$$

trong đó  $K$  là hằng số;  $D$  là đường kính cống thoát nước;  $\theta$  là góc trung tâm tính bằng radian (hàm số của độ đầy) và  $\left(\frac{d}{D}\right)$  là độ đầy cống thoát nước.

Công thức (4) giá trị  $K$  phải  $< (1/\pi) = 0,318$  tương ứng  $\theta = 265^\circ$ ,  $\frac{d}{D} = 0,838$ .

### 2.2. Quy trình vận hành bài toán thoát nước thải

Quy trình của bài toán được thể hiện trong sơ đồ sau (Hình 1).

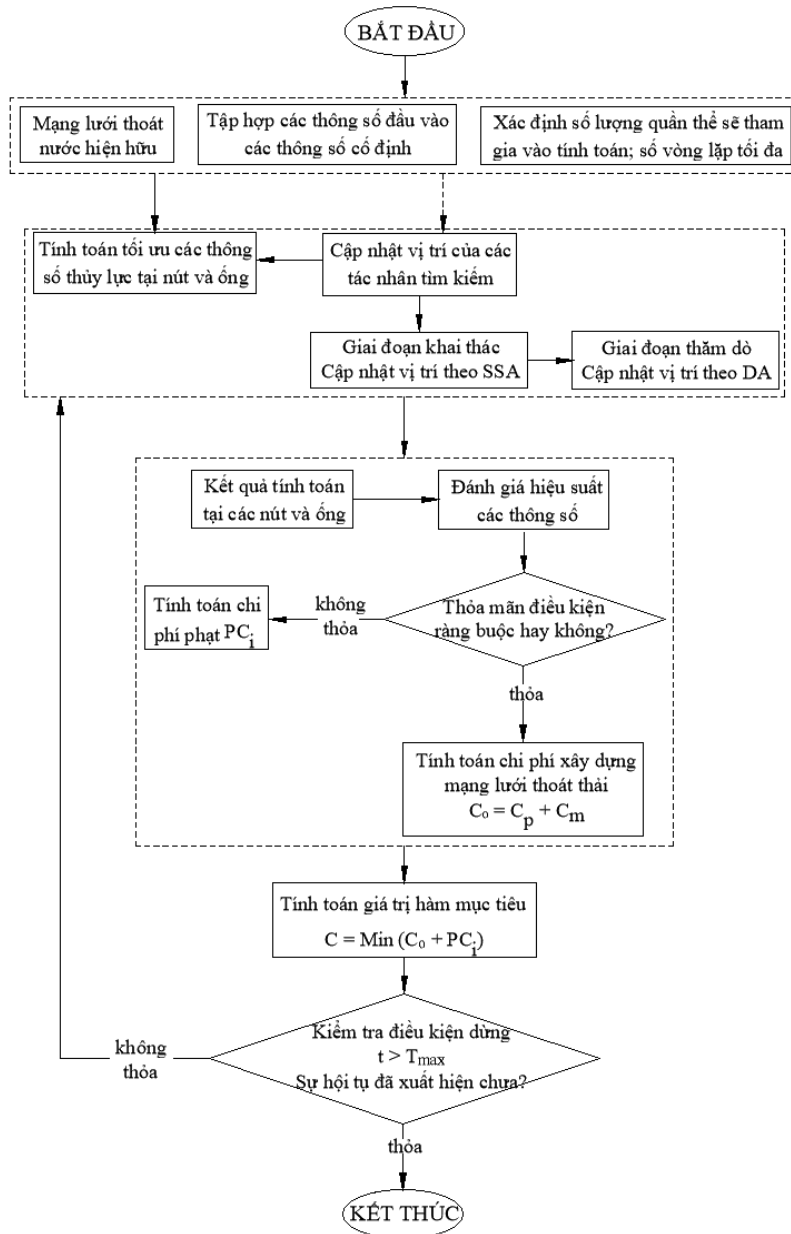
### 2.3. Những vấn đề tối ưu thiết kế mạng lưới cống thoát nước

Thiết kế mạng lưới cống tối ưu nhằm mục đích giảm thiểu tổng chi phí của hệ thống mà vẫn thỏa mãn các hạn chế của bài toán và các thông số thủy lực.

Phương trình (7) cho thấy hàm mục tiêu của bài toán tối ưu hóa thiết kế mạng lưới cống thoát nước:

$$C_0 = C_p + C_m = \sum_{l=1}^N L_l K_p(d_l, E_l) + \sum_{m=1}^M K_m(h_m) \quad (7)$$

trong đó  $C_0$  là hàm chi phí của mạng lưới cống;  $C_p$  là tổng chi phí lắp đặt cống;  $C_m$  là tổng chi phí xây dựng hố ga;  $N$  là tổng số đường ống;  $M$  là tổng số hố ga;  $L_l$  là chiều dài của ống  $l$  ( $l = 1, \dots, N$ );  $K_p$  là đơn vị chi phí cung cấp và lắp đặt cống, một hàm của đường kính ( $d_l$ ) và độ sâu che phủ trung bình ( $E_l$ ); và  $K_m$  là chi phí xây dựng hố ga, một hàm của chiều cao hố ga ( $h_m$ ).



Hình 1. Sơ đồ quy trình thực hiện bài toán tối ưu chi phí xây dựng mạng lưới thoát nước thải sinh hoạt

### Điều kiện ràng buộc:

(1) Độ sâu lớp bao phủ:

$$E_{min} \leq E_i \leq E_{max}; \quad \forall i = 1, \dots, N \quad (8)$$

(2) Vận tốc dòng chảy cống:

$$V_{min} \leq V_i \leq V_{max}; \quad \forall i = 1, \dots, N \quad (9)$$

(3) Độ dốc ống cống tối thiểu:

$$S_{min} \leq S_i \leq S_{max}; \quad \forall i = 1, \dots, N \quad (10)$$

(4) Tỷ lệ độ sâu dòng chảy tương đối tối đa và tối thiểu:

$$\beta_{min} \leq \beta_i \leq \beta_{max}; \quad \forall i = 1, \dots, N \quad (11)$$

$$\text{Với } \beta_i = \left( \frac{y}{D} \right)_i \quad (12)$$

(5) Đường kính ống thương mại:

$$D_i \in D_{com}; \quad \forall i = 1, \dots, M - 1 \quad (13)$$

Với  $N$  biến tìm kiếm (tương ứng  $N$  đoạn ống), thuật toán xử lý bằng cách tạo ra  $N$  mảng một chiều với số phần tử bằng số loại đường kính ống (được hiểu là danh sách các ống có sẵn trên thị trường) sau đó qua các lần lặp, một loại đường kính ống phù hợp trong danh sách này được chọn ra và sử dụng để tính toán giá trị hàm mục tiêu.

(6) Lưu lượng chảy trong ống:

$$Q_i = \frac{1}{n} i a_i R_i^{\frac{2}{3}} s_i^{\frac{1}{2}} \quad (14)$$

(7) Đường kính ống lũy tiến:

$$D_i \leq D_{i+1}; \quad \forall i = 1, \dots, M - 1 \quad (15)$$

**Hàm phí phạt:**

$$PC_i = \alpha_p \times \sum_{g=1}^G CS V_g \quad (16)$$

trong đó  $PC_i$  là hàm phạt;  $CS V_g$  là thước đo vi phạm ràng buộc  $g$ ;  $G$  là tổng số ràng buộc và  $\alpha_p$  được định nghĩa là hằng số hình phạt được giả định đủ lớn để các giải pháp bất khả thi có tổng chi phí lớn hơn giải pháp khả thi.

Hàm mục tiêu của bài toán hiện tại: Bài toán tối ưu hóa mạng lưới cống với số lượng  $N$  cống, được thể hiện:

$$C = \text{Minimize} \sum_{i=1}^N (C_0 + PC_i) \quad (17)$$

trong đó  $C$  là hàm chi phí của mạng lưới thoát nước;  $C$  là tổng số lượng cống thoát nước;  $C_0$  là tổng chi phí mạng lưới cống;  $PC_i$  là hàm phạt

### 3. Phương pháp nghiên cứu

#### 3.1. Thuật toán Bầy Salps (SSA)

Thuật toán bầy Salps (SSA) là thuật toán dựa trên trí thông minh bầy đàn, được lấy cảm hứng từ hành vi của loài cá mút đá. Cá mút đá thuộc họ Salpidae và di chuyển rất giống với sứa. Salp sống theo nhóm, tạo thành một bầy được gọi là chuỗi Salp. Chuỗi này được chia thành hai nhóm: lãnh đạo và những con theo dõi. Con lãnh đạo ở vị trí dẫn đầu chuỗi, phần còn lại của Salps là những con theo sau [39–41].

Con ở vị trí lãnh đạo khám phá không gian tìm kiếm các vùng tối ưu. Một chuỗi  $N$  con Salps khác nhau di chuyển trong không gian tìm kiếm  $D$  chiều bị giới hạn (với  $N$  là một số ngẫu nhiên ứng với tham số đường kính công, tùy thuộc vào giả thuyết trong mỗi case study), nhằm xác định giải pháp tối ưu [22]:

$$X_i = \begin{bmatrix} x_1^1 & x_2^1 & \dots & x_d^1 \\ x_1^2 & x_2^2 & \dots & x_d^2 \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ x_1^N & x_2^N & \dots & x_d^N \end{bmatrix}$$

Cập nhật vị trí con dẫn đầu chuỗi Salps:

$$x_j^1 = \begin{cases} F_j + c_1 (ub_j - lb_j) c_2 + lb_j & c_3 \geq 0 \\ F_j - c_1 (ub_j - lb_j) c_2 + lb_j & c_3 < 0 \end{cases} \quad (18)$$

trong đó  $x_j^1$  là vị trí của con lãnh đạo (dẫn đầu) ở chiều thứ  $j$ ,  $F_j$  là vị trí nguồn thực phẩm ở chiều thứ  $j$ ,  $ub_j$  là giới hạn trên của chiều thứ  $j$ ,  $lb_j$  là giới hạn dưới của chiều thứ  $j$ ,  $c_2$  và  $c_3$  là các giá trị ngẫu nhiên trong khoảng  $[0; 1]$ ,  $c_1$  là tham số chính của thuật toán có nhiệm vụ tạo sự cân bằng giữa thăm dò và khai thác,  $c_1$  giảm theo cấp số nhân:

$$c_1 = 2e^{-\left(\frac{4t}{T_{max}}\right)^2} \quad (19)$$

trong đó  $t$  là số lần lặp hiện tại;  $T_{max}$  là số lần lặp tối đa.

Những con đi theo khai thác khu vực xung quanh con đầu đàn:

$$x_j^i = \frac{x_j^i + x_j^{i-1}}{2} \quad (20)$$

trong đó  $i \geq 2$  và  $x_j^i$  là vị trí của con theo sau thứ  $i$  trong chiều thứ  $j$ .

### 3.2. Thuật toán Chuồn Chuồn (DA)

Thuật toán Chuồn Chuồn là một thuật toán kết quả cho kỹ thuật tối ưu hóa bầy đàn. DA đang bắt chước hành vi bầy đàn của Chuồn Chuồn, vì bầy đàn của chúng là di cư hoặc săn mồi (tương ứng là bầy động hoặc bầy tĩnh). Trong bầy tĩnh (kiếm ăn), các nhóm chuồn chuồn nhỏ di chuyển trong một khu vực nhỏ để săn côn trùng khác. Các hành vi của kiểu bầy đàn này bao gồm các chuyển động cục bộ và thay đổi đột ngột. Trong bầy động (di cư), một số lượng lớn chuồn chuồn tạo thành một nhóm di chuyển trong một khoảng cách xa về cùng hướng [37, 42–44]. Tương tự như các phương pháp dựa trên bầy đàn khác, những người vận hành DA thực hiện hai khái niệm chính: đa dạng hóa, được thúc đẩy bởi các hoạt động bầy đàn tĩnh và tăng cường, được khuyến khích bởi các hoạt động bầy đàn động [45].

Mục đích chính của bầy trong đời sống tự nhiên là sinh tồn, do đó các cá thể cần quan tâm đến nguồn thức ăn và đánh đuổi, đánh lạc hướng kẻ thù ra bên ngoài, vòng đời của Chuồn Chuồn bao gồm hai mốc: trưởng thành và nhộng [38].

Để cập nhật vị trí (các cá thể) hiện tại của Chuồn Chuồn thông minh trong vùng tìm kiếm và bắt chước các hành động và di chuyển, có năm yếu tố chính (là tách biệt ( $s$ ), liên kết ( $a$ ), gắn kết ( $c$ ), thu hút thức ăn ( $f$ ) và đánh lạc hướng kẻ thù ( $e$ ) trong một bầy [45].

Khoảng cách giữa các cá thể được thể hiện trong công thức:

$$S_i = - \sum_{j=1}^N X - X_j \quad (21)$$

trong đó  $X$  là vị trí hiện tại của một cá thể;  $X_j$  là cá thể lân cận của vị trí thứ  $j$ ; và  $N$  là số lượng tất cả các cá thể lân cận trong bầy.

Sự theo hướng của bầy đàn được thể hiện trong công thức:

$$A_i = \frac{\sum_{j=1}^N V_j}{N} \quad (22)$$

trong đó  $V_j$  là vận tốc của cá thể lân cận thứ  $j$ .

Khoảng cách trọng tâm của bầy được thể hiện trong công thức:

$$C_i = \frac{\sum_{j=1}^N X_j}{N} - X \quad (23)$$

trong đó  $X$  là vị trí hiện tại của một cá thể,  $N$  là số lượng tất cả các cá thể lân cận trong bầy và  $X_j$  là cá thể lân cận của vị trí thứ  $j$ .

Sự thu hút bởi con mồi được thể hiện trong công thức:

$$F_i = X^+ - X \quad (24)$$

trong đó  $X$  là vị trí hiện tại của một cá thể và  $X^+$  là vị trí của thức ăn.

Phân tán kẻ thù được thể hiện trong công thức:

$$E_i = X^- + X \quad (25)$$

trong đó  $X$  là vị trí hiện tại của một cá thể và  $X^-$  là vị trí của kẻ thù.

Vị trí nguồn thức ăn (phương trình 24) và vị trí kẻ thù (phương trình 25) được xác định lần lượt dựa trên giải pháp tốt nhất và tồi tệ nhất được tìm thấy.

Vectơ vị trí của Chuồn Chuồn được cập nhật dựa trên hai quy tắc:

Vectơ bước ( $\Delta X$ ) được tính như sau:

$$\Delta X_{t+1} = (sS_i + aA_i + cC_i + fF_i + eE_i) + w\Delta X_t \quad (26)$$

trong đó  $s$  là điểm tách,  $S_i$  là điểm tách của cá thể thứ  $i$ ,  $a$  là điểm liên kết,  $A_i$  là điểm liên kết của cá thể thứ  $i$ ,  $c$  là điểm gắn kết,  $C_i$  là điểm gắn kết của cá thể thứ  $i$ ,  $f$  là hệ số thức ăn,  $F_i$  là nguồn thức ăn của cá thể thứ  $i$ ,  $e$  là yếu tố kẻ thù,  $E_i$  là vị trí kẻ thù của cá thể thứ  $i$ ,  $w$  là trọng lượng quán tính, và  $t$  là số lần lặp lại.

Sử dụng các trọng số ( $s, a, c, f, e, w$ ) định hướng chuồn chuồn tìm kiếm theo các con đường khác nhau. Để chuyển giữa thăm dò và khai thác, bán kính của vùng lân cận được mở rộng tỷ lệ thuận với số lần lặp. Điều chỉnh các trọng số bầy đàn ( $s, a, c, f, e$  và  $w$ ) một cách thích ứng trong quá trình tối ưu hóa là giúp cân bằng giữa thăm dò và khai thác.

Tính toán các vectơ vị trí như sau:

$$X_{t+1} = X_t + \Delta X_{t+1} \quad (27)$$

trong đó  $t$  là số lần lặp hiện tại.

### 3.3. Thuật toán lai ghép Bầy Salps – Chuồn Chuồn (SSA–DA)

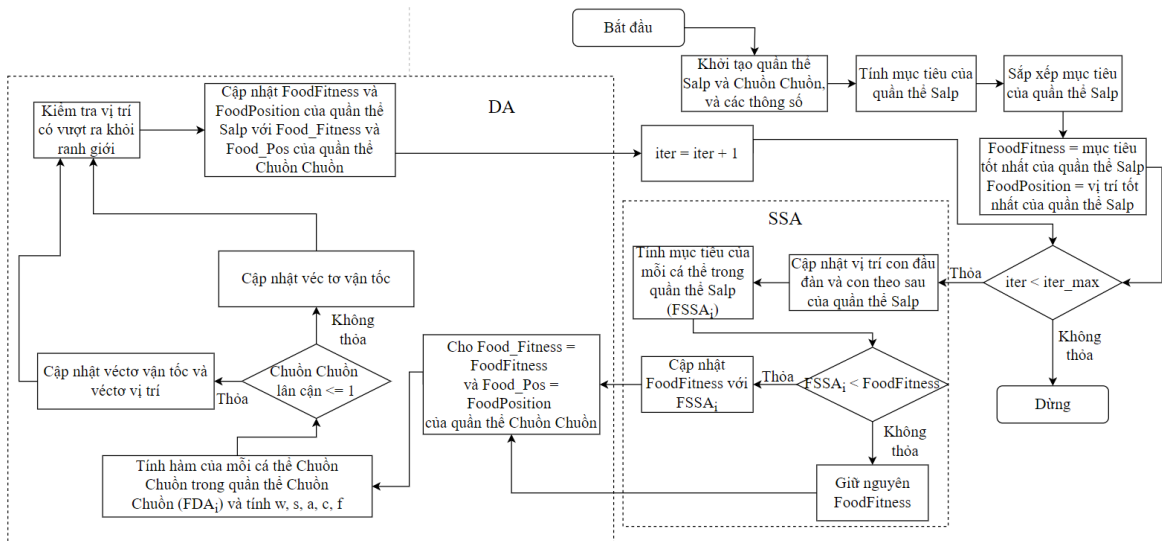
Thuật toán bầy Salp (SSA) cho thấy tốc độ tìm kiếm nhanh trong một số bài toán khó. Nhưng không phải mọi phương pháp lấy cảm hứng từ thiên nhiên đều phù hợp với tất cả các trường hợp ứng dụng, khả năng cân bằng giữa thăm dò và khai thác chưa tốt cho từng hàm trong quá trình tìm kiếm. Do đó, cần nghiên cứu cố gắng cải thiện việc khám phá và khai thác meta-heuristics bằng cách phát triển các phương pháp lai mới [46].

Sự tương tác giữa Salp dẫn đầu và những con theo dõi quyết định phần lớn hiệu suất của SSA. Nếu một con Salp mắc bẫy ở vùng tối ưu cục bộ, nó có thể thoát ra khỏi vùng tối ưu cục bộ nhờ sự kéo ra của con Salp đầu đàn. Tuy nhiên, nếu hầu hết các con Salps rơi vào cùng một điều kiện, toàn bộ thuật toán sẽ chậm lại, bị mắc kẹt xung quanh mức tối ưu cục bộ [36], hội tụ sớm, không phù hợp với các vấn đề hoặc hàm có độ khó cao, mất cân bằng giữa thăm dò và khai thác.

Để giúp khắc phục điểm yếu, thúc đẩy việc thăm dò và khai thác, cải thiện khả năng tìm kiếm của SSA, thuật toán chuồn chuồn (DA) được đề xuất để kết hợp vào để tạo thành một thuật toán lai ghép mới SSA-DA.

Biến thể lai tích hợp các ưu điểm của SSA và DA để loại bỏ nhiều nhược điểm như mắc kẹt trong tối ưu cục bộ, mất cân bằng giữa thăm dò và khai thác, hướng tới các giải pháp tối ưu hơn. DA hỗ trợ những phương pháp kém hơn trong việc thoát ra tối ưu cục bộ và tạo ra một vùng tìm kiếm tốt hơn để có thể tìm ra giải pháp tiềm năng hơn. DA cải thiện hơn nữa giải pháp tối ưu toàn cầu bằng cách tìm kiếm vùng lân cận của nó để có thể thu được giải pháp tốt nhất toàn cầu tốt hơn.

#### Nguyên tắc làm việc của thuật toán lai ghép đề xuất SSA-DA:



Hình 2. Sơ đồ đề xuất thực hiện thuật toán lai ghép SSA-DA

Các bước thực hiện mô hình lai ghép đề xuất (Hình 2):

1. Bài toán bắt đầu bằng việc khởi tạo quần thể Salps và Chuồn Chuồn  $Y_j$  ( $j = 1, 2, \dots, N$ ) cùng với các thông số kỹ thuật.
2. Tính mục tiêu của quần thể Salps. Sắp xếp mục tiêu của quần thể Salps.



3. Tính gần đúng mức tối ưu toàn cục bằng cách bắt đầu nhiều lần tìm kiếm với các vị trí ngẫu nhiên.

4. Tính toán thể trạng của từng con Salp, tìm ra những con Salp có thể lực tốt nhất, gán vị trí cho biến  $F$  là thức ăn nguồn để chuỗi Salps theo sau. Hệ số  $c_1$  là tham số điều khiển quan trọng nhất được cập nhật trong phương trình (19).

5. Cập nhật các trọng số như  $w, s, a, c, f$ , và  $e$ .

6. Cập nhật các vector vị trí  $S, A, C, F$  và  $E$  bằng cách sử dụng các Công thức từ (21) đến (25). Sự phân tách được xác định bằng phương trình (21). Căn chỉnh được xác định bằng phương trình (22). Sự gắn kết được tính bằng phương trình (23). Giải pháp tốt nhất và tồi tệ nhất được tìm thấy lần lượt trở thành nguồn thức ăn và kẻ thù. Phương pháp tạo ra sự hội tụ và phân kỳ đối với vùng hứa hẹn.

7. Gán vị trí nguồn thức ăn và vector vị trí của bầy Salps cho Chuồn Chuồn:

Sự hấp dẫn đối với nguồn thực phẩm được xác định theo vị trí con Salps dẫn đầu:

$$F_j = X_{Salps \text{ dẫn đầu}} - X \quad (28)$$

Đánh lạc hướng kẻ thù ra bên ngoài được xác định bằng phương trình (25).

8. Cập nhật bán kính xung quanh:

$$\Delta X_{t+1} = (sS_i + aA_i + cC_i + fF_j + eE_i) + w\Delta X_t \quad (29)$$

9. Vị trí Chuồn Chuồn lân cận  $\leq 1$ , nếu thỏa cập nhật vector vận tốc và vị trí bằng các phương trình (27) và (29), nếu cá thể được cân nhắc có ít nhất một cá thể xung quanh nó.

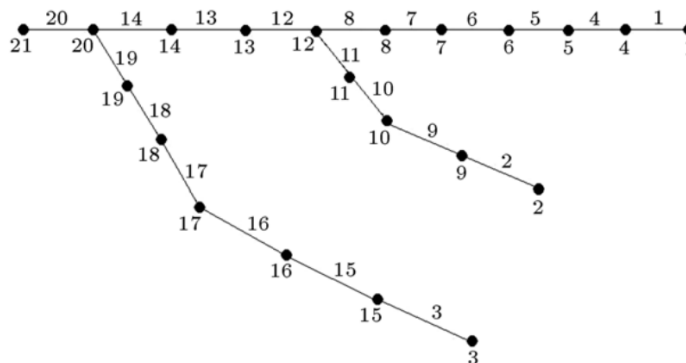
10. Các vị trí cập nhật được kiểm tra và hiệu chỉnh dựa trên ranh giới của các biến. Cập nhật vị trí nguồn thức ăn và mục tiêu tốt nhất của quần thể Salps và Chuồn Chuồn. Tiếp tục thực hiện vòng lặp cho đến số vòng lặp tối đa, tìm ra được giá trị phù hợp và sự hội tụ xuất hiện.

11. Kết thúc.

#### 4. Đánh giá mô hình đề xuất

Tính khả thi của mô hình thuật toán SSA-DA được đề xuất để tối ưu chi phí xây dựng mạng lưới thoát nước thải sinh hoạt đánh giá qua hai trường hợp nghiên cứu tham khảo từ các nghiên cứu trước đây.

##### 4.1. Trường hợp nghiên cứu 1



Hình 3. Mạng lưới thoát nước Kerman [47]

Một phần của mạng do Mansouri và Khanjani (1999) thiết kế ở thành phố ‘Kerman’ Iran Mansouri và Khanjani [47] là những người đầu tiên thiết kế mạng này bằng cách sử dụng lập trình toán học và thuật giải di truyền (GA). Đây là một phần của mạng lưới thoát nước Kerman ở Iran gồm 20 ống và 21 nút như trong Hình 3.

#### Điều kiện ràng buộc của mạng lưới:

Vận tốc dòng chảy:  $0,3 \leq V \leq 3$  (m/s)

Độ sâu dòng chảy tương đối:  $0,1 \leq \beta \leq 0,82$

Độ sâu lớp bao phủ:  $E_{min} \leq E_i \leq E_{max}$  (m)

Hệ số Manning:  $n = 0,013$

Đường kính cống:  $D_i \in D_{com}; D_i \geq D_{i-1}$

Với  $D_{com} = [150; 200; 250; 300; 350; 400; 450; 500; 550; 600]$  mm

Hàm chi phí ứng dụng vào mạng lưới được thể hiện:

$$K_p = 1,93e^{3,43D} + 0,812E^{1,53} + 0,437D \times E^{1,47}$$

$$K_m = 41,46h_m \quad (30)$$

trong đó  $K_p$  là đơn giá lắp đặt đường ống (\$/m);  $K_m$  là đơn giá công tác thi công hố ga (\$).

Bảng 1. Thông số đầu vào

STT ống	Điểm đầu	Điểm cuối	Cao độ mặt đất (m)		L (m)	q (l/s)	s
			Điểm đầu	Điểm cuối			
1	1	4	74,59	73,66	260	27,9	0,003577
2	2	9	70,7	69,9	300	54,9	0,002667
3	3	15	73	71,5	400	21,1	0,00375
4	4	5	73,66	72,1	460	30,4	0,003391
5	5	6	72,1	71,19	260	32,4	0,0035
6	6	7	71,19	69,85	300	34	0,004467
7	7	8	69,85	68,24	450	36,6	0,003578
8	8	12	68,24	67,28	400	38,7	0,0024
9	9	10	69,9	69,3	270	56,2	0,002222
10	10	11	69,3	68,4	310	58	0,002903
11	11	12	68,4	67,28	440	59,6	0,002546
12	12	13	67,28	66,22	470	96,7	0,002255
13	13	14	66,22	65,82	350	101,2	0,001261
14	14	20	65,82	65,42	340	104,7	0,001856
15	15	16	71,5	70,1	400	26,4	0,0035
16	16	17	70,1	68,6	400	30	0,00375
17	17	18	68,6	66,8	500	31,9	0,0036
18	18	19	66,8	66,1	400	40,3	0,00175
19	19	20	66,1	65,42	590	44,6	0,001614
20	20	21	65,42	64,5	320	27,9	0,004982

Chi tiết của mạng lưới ban đầu gồm lưu lượng, chiều dài, cao độ mặt đất được thể hiện trong Bảng 1.

Bảng 2. Kết quả thông số thủy lực sau khi giải bằng thuật toán SSA-DA

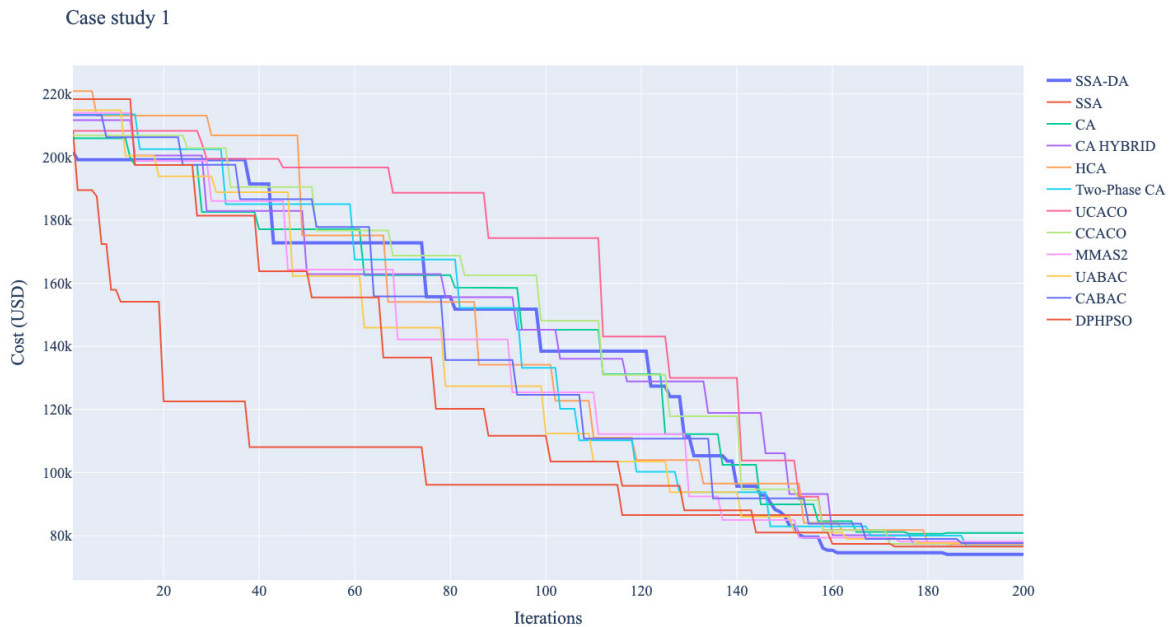
STT ống	D (m)	Cao độ lưng cống (m)		K	$\theta$	d/D	R	V (m/s)
		Điểm đầu	Điểm cuối					
1	0,25	72,39	71,46	0,2445	3,7948	0,6604	0,0725	0,8
2	0,25	68,65	67,85	0,318	4,6601	0,82	0,0759	0,7121
3	0,25	70,8	69,3	0,1806	3,3429	0,5503	0,0662	0,7712
4	0,25	71,46	69,9	0,1683	3,2566	0,5287	0,0776	0,8152
5	0,25	69,9	68,99	0,1765	3,3145	0,5432	0,0789	0,8371
6	0,25	68,99	67,65	0,164	3,2262	0,5211	0,077	0,9302
7	0,25	67,7	66,09	0,0916	2,6620	0,3812	0,0827	0,8732
8	0,25	66,09	65,13	0,1182	2,8860	0,4363	0,0912	0,7637
9	0,25	67,85	67,25	0,318	4,6601	0,82	0,0759	0,65
10	0,25	67,25	66,35	0,318	4,6601	0,82	0,0759	0,7429
11	0,25	66,35	65,23	0,318	4,6601	0,82	0,0759	0,6958
12	0,25	65,23	64,17	0,3048	4,3532	0,7847	0,1215	0,8961
13	0,4	64,27	63,82	0,318	4,6601	0,82	0,1214	0,6698
14	0,4	63,82	63,2	0,318	4,6601	0,82	0,1214	0,8126
15	0,25	69,3	67,9	0,2339	3,7168	0,6418	0,0716	0,785
16	0,25	67,9	66,4	0,2568	3,8884	0,6824	0,0734	0,8259
17	0,25	66,4	64,6	0,2787	4,071	0,7241	0,0748	0,8194
18	0,3	64,65	63,95	0,3105	4,443	0,8029	0,0913	0,6523
19	0,3	64,05	63,1	0,318	4,6601	0,82	0,0911	0,6256
20	0,4	63,2	61,6	0,318	4,6601	0,82	0,1214	1,3314

Bảng 3 so sánh kết quả khi áp dụng thuật toán lai SSA-DA với các phương pháp tối ưu điển hình. Để tối ưu hóa nghiên cứu này, mô hình SSA-DA được khởi chạy với số cá thể trong quần thể là 50 và số vòng lặp tối đa là 200.

Ở các phương pháp của nghiên cứu trước đây thì chi phí tốt nhất là \$76568, kết quả cho ra ở thuật toán lai ghép đề xuất là \$74078,5, có thể thấy phương pháp lai ghép đề xuất mang lại kết quả tốt hơn, độ lệch chuẩn không cao, giúp tiết kiệm được đáng kể chi phí đầu tư nhưng vẫn mang lại hiệu quả. Các thông số ban đầu được chạy ngẫu nhiên, qua 10 lần chạy thu được giá trị nhỏ nhất, trung bình và lớn nhất thể hiện trong Bảng 3. Hình 4 cho thấy sự hội tụ của phương pháp trong ví dụ này. Chi tiết về các thông số thủy lực các thông số ảnh hưởng trực tiếp đến chi phí được tối ưu thu được bằng phương pháp lai ghép SSA-DA đề xuất cũng được trình bày trong Bảng 2.

Bảng 3. So sánh kết quả tối thiểu, tối đa, trung bình sau 10 lần lặp

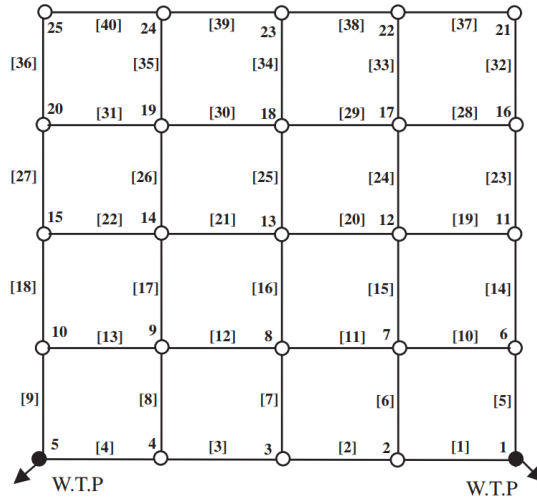
Mô hình	Giá trị chi phí			Độ lệch chuẩn
	Tối đa	Tối thiểu	Trung bình	
Proposed CA method [12]	80879	80879	80879	0
CA based hybrid method (discrete) [48]	82870	77327	79472	0,0232
Continuous HCA [48]	78026	77433	77967	0,0024
Two-Phase CA [49]	82326	76750	78828	0,026
UCACO [50]	81153,9	76648,4	77263,3	0,0178
CCACO [50]	77472,4	76648,4	76975	0,0041
MMAS2 [51]	78214,9	78102,1	78202,7	0,0004
UABAC [52]	90143,7	77674,1	81191,2	0,0429
CABAC [52]	77674,1	77674,1	77674,1	0
DPHPSO [53]	76589	76568	76573	0,0001
SSA (nghiên cứu hiện tại)	99867,9	86544,9	93685,7	0,042
SSA-DA (nghiên cứu hiện tại)	76686	74078,5	75367,6	0,011



Hình 4. Đồ thị thể hiện chi phí khả thi qua các lần lặp

#### 4.2. Trường hợp nghiên cứu 2

Hiệu suất của các thuật toán đề xuất được thử nghiệm dựa trong trường hợp nghiên cứu 2 về thiết kế mạng lưới thoát nước ở Moeini và Afshar [17] (Hình 5). Ví dụ thử nghiệm thứ hai với mạng lưới gồm 25 nút, 40 ống, tất cả các ống trong mạng lưới sẽ từ cống thu gom đến hai nhà máy xử lý nằm ở góc dưới cùng của khu vực. Chiều dài các đường ống trong mạng lưới không đổi và bằng 100 m. Các thông số đầu vào của mạng lưới được thể hiện trong Bảng 4.



Hình 5. Mạng lưới thoát nước [17]

### Điều kiện ràng buộc của mạng lưới:

Vận tốc dòng chảy:  $0,75 \leq V \leq 6$  (m/s)

Độ sâu dòng chảy tương đối:  $0,1 \leq \beta_i = (y/d)_i \leq 0,83$

Hệ số Manning:  $n = 0,013$

Đường kính cống:  $D_i \in D_{com}$

Với  $D_{com} = [200; 250; 300; 400; 500; 600; 700]$  mm

Hàm chi phí ứng dụng vào mạng lưới được thể hiện:

$$\begin{aligned} K_p &= 10,93e^{3,43D} + 0,012E_l^{1,53} + 0,437E_l^{1,47}D \\ K_m &= 41,46h_m \end{aligned} \quad (31)$$

trong đó  $K_p$  là đơn giá lắp đặt đường ống (\$/m);  $K_m$  là đơn giá công tác thi công hố ga (\$).

Bảng 4. Thông số đầu vào

STT ống	Hố ga		Độ sâu lớp bao phủ (m)		L (m)	Q (m <sup>3</sup> /s)	s
	Điểm đầu	Điểm cuối	Điểm đầu	Điểm cuối			
1	2	1	2,5	4,5	100	0,02592	0,04
2	3	2	2,5	2,5	100	0,00648	0,02
3	3	4	2,5	2,5	100	0,01944	0,02
4	4	5	2,5	4,5	100	0,03888	0,04
5	6	1	4	4,5	100	0,1944	0,025
6	7	2	2,5	2,5	100	0,01296	0,02
7	8	3	2,5	2,5	100	0,01296	0,02
8	9	4	2,5	2,5	100	0,01296	0,02
9	10	5	3,25	4,5	100	0,15552	0,0325
10	7	6	3,75	4	100	0,13608	0,0225

STT ống	Hố ga		Độ sâu lớp bao phủ (m)		L (m)	Q (m <sup>3</sup> /s)	s
	Điểm đầu	Điểm cuối	Điểm đầu	Điểm cuối			
11	8	7	2,5	3,75	100	0,02592	0,0325
12	8	9	2,5	2,5	100	0,01296	0,02
13	9	10	2,5	3,25	100	0,0972	0,0275
14	11	6	2,5	4	100	0,05184	0,035
15	12	7	3	3,75	100	0,0972	0,0275
16	13	8	2,5	2,5	100	0,01296	0,02
17	14	9	2,5	2,5	100	0,07128	0,02
18	15	10	2,5	3,25	100	0,05184	0,0275
19	12	11	2,5	2,5	100	0,01296	0,02
20	13	12	3,5	3	100	0,03888	0,015
21	13	14	2,5	2,5	100	0,01296	0,02
22	14	15	2,5	2,5	100	0,01296	0,02
23	16	11	2,5	2,5	100	0,0324	0,02
24	17	12	2,5	3	100	0,04536	0,025
25	18	13	2,5	3,5	100	0,02592	0,03
26	19	14	2,5	2,5	100	0,04536	0,02
27	20	15	2,5	2,5	100	0,0324	0,02
28	17	16	2,5	2,5	100	0,01296	0,02
29	18	17	2,5	2,5	100	0,01296	0,02
30	18	19	2,5	2,5	100	0,01296	0,02
31	19	20	2,5	2,5	100	0,01296	0,02
32	21	16	2,5	2,5	100	0,01296	0,02
33	22	17	2,5	2,5	100	0,01944	0,02
34	23	18	2,5	2,5	100	0,01296	0,02
35	24	19	2,5	2,5	100	0,01944	0,02
36	25	20	2,5	2,5	100	0,01296	0,02
37	22	21	2,5	2,5	100	0,00648	0,02
38	23	22	2,5	2,5	100	0,00648	0,02
39	23	24	2,5	2,5	100	0,00648	0,02
40	24	25	2,5	2,5	100	0,00648	0,02

Thuật toán lai ghép SSA-DA sử dụng với các giá trị tham số là  $\alpha = 1$ ,  $\beta = 0,2$ ,  $P_{\text{best}} = 0,2$  và  $\rho = 0,95$  cho tất cả các ví dụ thử nghiệm thu được bằng một số lần chạy sơ bộ để có hiệu suất tốt nhất của thuật toán. Kết quả thu được khi khởi chạy mô hình SSA-DA với số cá thể trong quần thể là 100 và số lần lặp tối đa là 1000. Bảng 5 cho thấy các thông số ảnh hưởng trực tiếp đến chi phí được tối ưu bằng cách sử dụng thuật toán lai SSA-DA.

Bảng 6 là kết quả của 10 lần chạy sử dụng các thông số ban đầu được tạo ngẫu nhiên cùng với độ lệch chuẩn và số lần chạy của các giải pháp khả thi. Ở các phương pháp của nghiên cứu trước đây thì chi phí tốt nhất là 85873, kết quả cho ra ở thuật toán lai ghép đề xuất là 84717,72. Hình 6 cho thấy đường cong hội tụ của giải pháp chi phí khả thi qua các lần lặp.

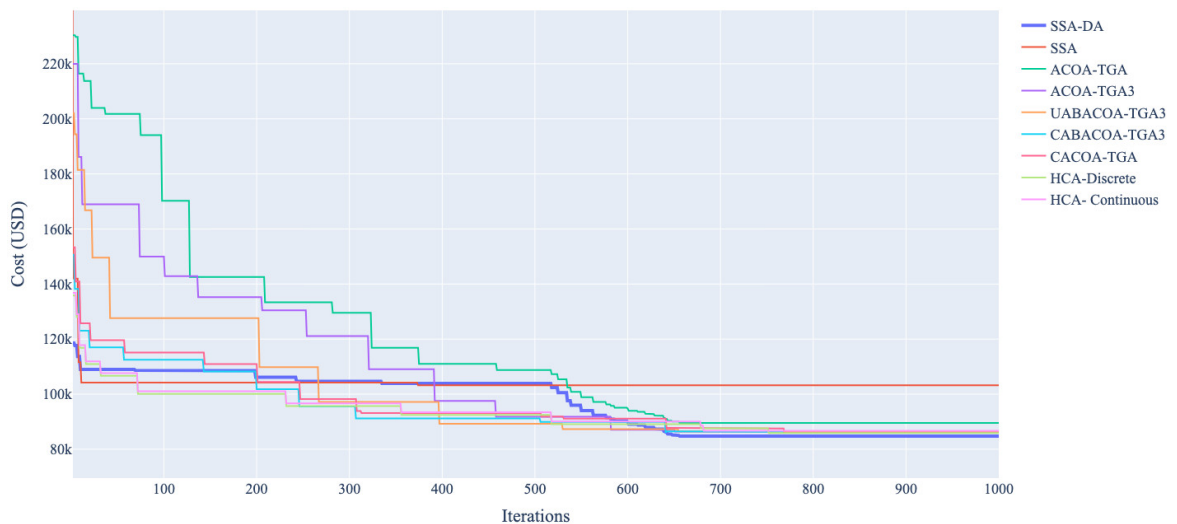
Bảng 5. Kết quả thông số thủy lực sau khi giải bằng thuật toán SSA-DA

STT ống	D (m)	K	$\theta$	d/D	R	V (m/s)
1	0,2	0,1232	2,9247	0,4459	0,0463	1,9843
2	0,1	0,2765	4,0516	0,7197	0,0299	1,0473
3	0,25	0,0720	2,4755	0,3365	0,0469	1,4147
4	0,2	0,1847	3,3718	0,5574	0,0534	2,1812
5	0,35	0,2627	3,9356	0,6933	0,1034	2,6787
6	0,15	0,1876	3,3914	0,5623	0,0402	1,2773
7	0,15	0,1876	3,3914	0,5623	0,0402	1,2773
8	0,15	0,1876	3,3914	0,5623	0,0402	1,2773
9	0,3	0,2781	4,0656	0,7229	0,0897	2,7793
10	0,3	0,2924	4,2048	0,7535	0,0906	2,3273
11	0,15	0,2943	4,2247	0,7577	0,0453	1,7633
12	0,15	0,1876	3,3914	0,5623	0,0402	1,2773
13	0,25	0,3072	4,3888	0,7920	0,0760	2,2888
14	0,2	0,2633	3,9405	0,6945	0,0591	2,1833
15	0,25	0,3072	4,3888	0,7920	0,0760	2,2888
16	0,15	0,1876	3,3914	0,5623	0,0402	1,2773
17	0,25	0,2642	3,9474	0,6960	0,0739	1,9161
18	0,2	0,2971	4,2563	0,7645	0,0605	1,9669
19	0,15	0,1876	3,3914	0,5623	0,0402	1,2773
20	0,2	0,3017	4,3120	0,7762	0,0607	1,4548
21	0,15	0,1876	3,3914	0,5623	0,0402	1,2773
22	0,15	0,1876	3,3914	0,5623	0,0402	1,2773
23	0,2	0,2177	3,6015	0,6140	0,0562	1,5954
24	0,2	0,2726	4,0179	0,7121	0,0596	1,8550
25	0,15	0,3063	4,3747	0,7891	0,0456	1,7003
26	0,2	0,3048	4,3537	0,7848	0,0608	1,6812
27	0,2	0,2177	3,6015	0,6140	0,0562	1,5954
28	0,15	0,1876	3,3914	0,5623	0,0402	1,2773
29	0,15	0,1876	3,3914	0,5623	0,0402	1,2773
30	0,15	0,1876	3,3914	0,5623	0,0402	1,2773
31	0,15	0,1876	3,3914	0,5623	0,0402	1,2773
32	0,15	0,1876	3,3914	0,5623	0,0402	1,2773
33	0,15	0,2813	4,0954	0,7295	0,0450	1,3757
34	0,15	0,1876	3,3914	0,5623	0,0402	1,2773
35	0,15	0,2813	4,0954	0,7295	0,0450	1,3757
36	0,2	0,0871	2,6212	0,3714	0,0405	1,2833
37	0,1	0,2765	4,0516	0,7197	0,0299	1,0473
38	0,1	0,2765	4,0516	0,7197	0,0299	1,0473
39	0,1	0,2765	4,0516	0,7197	0,0299	1,0473
40	0,1	0,2765	4,0516	0,7197	0,0299	1,0473

Bảng 6. So sánh kết quả tối thiểu, tối đa, trung bình sau 10 lần lặp

Mô hình	Giá trị chi phí			Độ lệch chuẩn
	Tối đa	Tối thiểu	Trung bình	
ACOA-TGA [17]	94425,8	89568,3	91951,1	0,0173
ACOA-TGA3 [54]	87581,3	86411,0	87138,8	0,0041
UABACOA-TGA3 [1]	88386,7	86444,5	87197,3	0,0075
CABACOA-TGA3 [1]	86625	85957,6	86371,4	0,0023
CACOA-TGA [1]	86591	85990	86187	0,0020
HCA-Discrete [55]	86953	85873	86410	0,0052
HCA- Continuous [55]	87786	86678	87397	0,0038
SSA (nghiên cứu hiện tại)	108242,8	103205,2	105178,3	0,0166
SSA-DA (nghiên cứu hiện tại)	85915,6	84717,7	85443,4	0,0050

Case study 2



Hình 6. Đồ thị thể hiện chi phí khả thi qua các lần lặp

## 5. Kết luận

SSA được lai ghép với DA để xác định kích thước đường ống và các thông số của mạng lưới cống thoát nước sinh hoạt hiện hữu. Tính khả thi của thuật toán đề xuất được đánh giá thông qua hai trường hợp nghiên cứu, kết quả được trình bày và so sánh với các phương pháp điển hình. Kết quả cho thấy phương pháp đề xuất SSA-DA tạo ra những thông số tối ưu hơn (tốt hơn) so với những thuật toán trong những nghiên cứu trước đây. Các giá trị lớn nhất (xấu nhất), nhỏ nhất (tốt nhất), trung bình cho thấy rằng thuật toán phát huy được điểm mạnh trong số các phương pháp được xem xét. Chi phí giải pháp của phương pháp SSA-DA thấp hơn so với các phương pháp khác trong quá trình phát triển dẫn đến chi phí giải pháp cuối cùng thấp hơn. Khả năng hội tụ của thuật toán SSA-DA tương đối nhanh với những giá trị tối ưu vượt trội, đảm bảo được hiệu suất của các thông số kỹ thuật. Qua đó có thể



thấy, SSA-DA có thể hoạt động tốt hơn các công thức khác vì giải pháp xây dựng bởi SSA-DA sẽ ít vi phạm các điều kiện ràng buộc hơn.

## Tài liệu tham khảo

- [1] Moeini, R., Afshar, M. H. (2017). [Arc Based Ant Colony Optimization Algorithm for optimal design of gravitational sewer networks](#). *Ain Shams Engineering Journal*, 8(2):207–223.
- [2] Masoumi, F., Masoumzadeh, S., Zafari, N., Emami-Skardi, M. J. (2021). [Optimum Sanitary Sewer Network Design Using Shuffled Gray Wolf Optimizer](#). *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice*, 12(4).
- [3] Elimam, A. A., Charalambous, C., Ghobrial, F. H. (1989). [Optimum Design of Large Sewer Networks](#). *Journal of Environmental Engineering*, 115(6):1171–1190.
- [4] Swamee, P. K., Sharma, A. K. (2013). [Optimal design of a sewer line using Linear Programming](#). *Applied Mathematical Modelling*, 37(6):4430–4439.
- [5] Safavi, H., Geranmehr, M. A. (2016). [Optimization of sewer networks using the mixed-integer linear programming](#). *Urban Water Journal*, 14(5):452–459.
- [6] Desher, D. P., Davis, P. K. (1986). [Designing Sanitary Sewers with Microcomputers](#). *Journal of Environmental Engineering*, 112(6):993–1007.
- [7] Swamee, P. K. (2001). [Design of Sewer Line](#). *Journal of Environmental Engineering*, 127(9):776–781.
- [8] Mays, L. W., Wenzel, H. G. (1976). [Optimal design of multilevel branching sewer systems](#). *Water Resources Research*, 12(5):913–917.
- [9] Li, G., Matthew, R. G. S. (1990). [New Approach for Optimization of Urban Drainage Systems](#). *Journal of Environmental Engineering*, 116(5):927–944.
- [10] Afshar, M. H. (2006). [Application of a max–min ant system to joint layout and size optimization of pipe networks](#). *Engineering Optimization*, 38(3):299–317.
- [11] Afshar, M. H. (2007). [Partially constrained ant colony optimization algorithm for the solution of constrained optimization problems: Application to storm water network design](#). *Advances in Water Resources*, 30(4):954–965.
- [12] Afshar, M. H., Shahidi, M., Rohani, M., Sargolzaei, M. (2011). [Application of cellular automata to sewer network optimization problems](#). *Scientia Iranica*, 18(3):304–312.
- [13] Navin, P. K., Mathur, Y. P. (2016). [Design Optimization of Sewer System Using Particle Swarm Optimization](#). *Advances in Intelligent Systems and Computing*, Springer Singapore, 173–182.
- [14] Liang, L. Y., Thompson, R. G., Young, D. M. (2004). [Optimising the design of sewer networks using genetic algorithms and tabu search](#). *Engineering, Construction and Architectural Management*, 11(2): 101–112.
- [15] Pan, T.-C., Kao, J.-J. (2009). [GA-QP Model to Optimize Sewer System Design](#). *Journal of Environmental Engineering*, 135(1):17–24.
- [16] Ostadrahimi, L., Mariño, M. A., Afshar, A. (2011). [Multi-reservoir Operation Rules: Multi-swarm PSO-based Optimization Approach](#). *Water Resources Management*, 26(2):407–427.
- [17] Moeini, R., Afshar, M. H. (2012). [Layout and size optimization of sanitary sewer network using intelligent ants](#). *Advances in Engineering Software*, 51:49–62.
- [18] Rohani, M., Afshar, M. H. (2015). [GA–GHCA model for the optimal design of pumped sewer networks](#). *Canadian Journal of Civil Engineering*, 42(1):1–12.
- [19] Haghighi, A., Bakhshipour, A. E. (2015). [Deterministic Integrated Optimization Model for Sewage Collection Networks Using Tabu Search](#). *Journal of Water Resources Planning and Management*, 141(1).
- [20] Hassan, W. H., Attea, Z. H., Mohammed, S. S. (2020). [Optimum layout design of sewer networks by hybrid genetic algorithm](#). *Journal of Applied Water Engineering and Research*, 8(2):108–124.
- [21] Mirjalili, S., Gandomi, A. H., Mirjalili, S. Z., Saremi, S., Faris, H., Mirjalili, S. M. (2017). [Salp Swarm Algorithm: A bio-inspired optimizer for engineering design problems](#). *Advances in Engineering Software*, 114:163–191.
- [22] Faris, H., Mafarja, M. M., Heidari, A. A., Aljarah, I., Al-Zoubi, A. M., Mirjalili, S., Fujita, H. (2018). [An](#)

- efficient binary Salp Swarm Algorithm with crossover scheme for feature selection problems. *Knowledge-Based Systems*, 154:43–67.
- [23] Sayed, G. I., Khoriba, G., Haggag, M. H. (2018). A novel chaotic salp swarm algorithm for global optimization and feature selection. *Applied Intelligence*, 48(10):3462–3481.
- [24] El-Fergany, A. A. (2018). Extracting optimal parameters of PEM fuel cells using Salp Swarm Optimizer. *Renewable Energy*, 119:641–648.
- [25] Asaithambi, S., Rajappa, M. (2018). Swarm intelligence-based approach for optimal design of CMOS differential amplifier and comparator circuit using a hybrid salp swarm algorithm. *Review of Scientific Instruments*, 89(5):054702.
- [26] Ekinci, S., Hekimoglu, B. (2018). Parameter optimization of power system stabilizer via Salp Swarm algorithm. *2018 5th International Conference on Electrical and Electronic Engineering (ICEEE)*, IEEE.
- [27] Hussien, A. G., Hassanien, A. E., Houssein, E. H. (2017). Swarming behaviour of salps algorithm for predicting chemical compound activities. *2017 Eighth International Conference on Intelligent Computing and Information Systems (ICICIS)*, IEEE.
- [28] Wang, J., Gao, Y., Chen, X. (2018). A Novel Hybrid Interval Prediction Approach Based on Modified Lower Upper Bound Estimation in Combination with Multi-Objective Salp Swarm Algorithm for Short-Term Load Forecasting. *Energies*, 11(6):1561.
- [29] Zhang, J., Wang, Z., Luo, X. (2018). Parameter Estimation for Soil Water Retention Curve Using the Salp Swarm Algorithm. *Water*, 10(6):815.
- [30] Abbassi, R., Abbassi, A., Heidari, A. A., Mirjalili, S. (2019). An efficient salp swarm-inspired algorithm for parameters identification of photovoltaic cell models. *Energy Conversion and Management*, 179: 362–372.
- [31] Barik, A. K., Das, D. C. (2018). Active power management of isolated renewable microgrid generating power from Rooftop solar arrays, sewage waters and solid urban wastes of a smart city using Salp swarm algorithm. *2018 Technologies for Smart-City Energy Security and Power (ICSESP)*, IEEE.
- [32] Guha, D., Roy, P. K., Banerjee, S. (2018). A maiden application of modified grey wolf algorithm optimized cascade tilt-integral-derivative controller in load frequency control. *2018 20th National Power Systems Conference (NPSC)*, IEEE.
- [33] Zhang, H., Cai, Z., Ye, X., Wang, M., Kuang, F., Chen, H., Li, C., Li, Y. (2020). A multi-strategy enhanced salp swarm algorithm for global optimization. *Engineering with Computers*, 1–27.
- [34] Wu, J., Nan, R., Chen, L. (2019). Improved salp swarm algorithm based on weight factor and adaptive mutation. *Journal of Experimental & Theoretical Artificial Intelligence*, 31(3):493–515.
- [35] Zhao, X., Yang, F., Han, Y., Cui, Y. (2020). An Opposition-Based Chaotic Salp Swarm Algorithm for Global Optimization. *IEEE Access*, 8:36485–36501.
- [36] El-Ashmawi, W. H., Ali, A. F. (2020). A modified salp swarm algorithm for task assignment problem. *Applied Soft Computing*, 94:106445.
- [37] Mirjalili, S. (2015). Dragonfly algorithm: a new meta-heuristic optimization technique for solving single-objective, discrete, and multi-objective problems. *Neural Computing and Applications*, 27(4):1053–1073.
- [38] Alshinwan, M., Abualigah, L., Shehab, M., Elaziz, M. A., Khasawneh, A. M., Alabool, H., Hamad, H. A. (2021). Dragonfly algorithm: a comprehensive survey of its results, variants, and applications. *Multimedia Tools and Applications*, 80(10):14979–15016.
- [39] Meraihi, Y., Ramdane-Cherif, A., Mahseur, M., Achelia, D. (2018). A Chaotic Binary Salp Swarm Algorithm for Solving the Graph Coloring Problem. *Modelling and Implementation of Complex Systems*, Springer International Publishing, 106–118.
- [40] Salgotra, R., Singh, U., Singh, S., Singh, G., Mittal, N. (2021). Self-adaptive salp swarm algorithm for engineering optimization problems. *Applied Mathematical Modelling*, 89:188–207.
- [41] Castelli, M., Manzoni, L., Mariot, L., Nobile, M. S., Tangherloni, A. (2022). Salp Swarm Optimization: A critical review. *Expert Systems with Applications*, 189:116029.
- [42] Rahman, C. M., Rashid, T. A. (2019). Dragonfly Algorithm and Its Applications in Applied Science Survey. *Computational Intelligence and Neuroscience*, 2019:1–21.
- [43] Reynolds, C. W. (1987). Flocks, herds and schools: A distributed behavioral model. *ACM SIGGRAPH*

*Computer Graphics*, 21(4):25–34.

- [44] Russell, R. W., May, M. L., Soltesz, K. L., Fitzpatrick, J. W. (1998). [Massive swarm migrations of dragonflies \(Odonata\) in eastern North America](#). *The American Midland Naturalist*, 140(2):325–342.
- [45] Mafarja, M., Heidari, A. A., Faris, H., Mirjalili, S., Aljarah, I. (2020). [Dragonfly algorithm: theory, literature review, and application in feature selection](#). *Nature-inspired optimizers*, 47–67.
- [46] Singh, N., Singh, S. B., Houssein, E. H. (2020). [Hybridizing salp swarm algorithm with particle swarm optimization algorithm for recent optimization functions](#). *Evolutionary Intelligence*, 15(1):23–56.
- [47] Mansuri, M. R., Khanjani, M. J. (1999). Optimization of sewer networks using nonlinear method. *Journal of Water and Wastewater*, 30:20–30.
- [48] Afshar, M. H., Rohani, M. (2012). [Optimal design of sewer networks using cellular automata-based hybrid methods: Discrete and continuous approaches](#). *Engineering Optimization*, 44(1):1–22.
- [49] Afshar, M. H., Zaheri, M. M., Kim, J. H. (2016). [Improving the Efficiency of Cellular Automata for Sewer Network Design Optimization Problems Using Adaptive Refinement](#). *Procedia Engineering*, 154: 1439–1447.
- [50] Moeini, R. (2018). [Different hydraulic analysis conditions for sewer network design optimisation problem using three different evolutionary algorithms](#). *International Journal of Operational Research*, 33(4):512.
- [51] Moeini, R. (2019). [Ant Intelligent Applied To Sewer Network Design Optimization Problem: Using Four Different Algorithms](#). *Environmental Engineering and Management Journal*, 18(5):957–971.
- [52] Moeini, R. (2017). [Arc based ant colony optimization algorithm for solving sewer network design optimization problem](#). *Scientia Iranica*, 24(3):953–965.
- [53] Ahmadi, A., Zolfagharipoor, M. A., Nafisi, M. (2018). [Development of a Hybrid Algorithm for the Optimal Design of Sewer Networks](#). *Journal of Water Resources Planning and Management*, 144(8).
- [54] Moeini, R., Afshar, M. H. (2013). [Sewer Network Design Optimization Problem Using Ant Colony Optimization Algorithm and Tree Growing Algorithm](#). *EVOLVE - A Bridge between Probability, Set Oriented Numerics, and Evolutionary Computation IV*, Springer International Publishing, 91–105.
- [55] Rohani, M., Afshar, M. H. (2013). [Sewer Networks Optimization Using Cellular Automata](#). *Studies in Engineering and Technology*, 1(1):1.