

PHÁT TRIỂN THUẬT TOÁN ĐA MỤC TIÊU CÁ VOI ĐỂ CÂN BẰNG TÀI NGUYÊN TRONG TIẾN ĐỘ DỰ ÁN

Phạm Đức Thắng^{a,b}, Nguyễn Đăng Trình^{a,b,*}

^aKhoa 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

^bĐại học Quốc gia Thành phố Hồ Chí Minh, phường Linh Trung, quận Thủ Đức, TP. Hồ Chí Minh, Việt Nam

Nhận ngày 09/8/2021, Sửa xong 15/9/2021, Chấp nhận đăng 16/9/2021

Tóm tắt

Các nhà quản lý dự án phải đối mặt với những thách thức khi họ phải cân bằng các yếu tố nguồn lực khác nhau như thời gian, chi phí, chất lượng, an toàn và môi trường, đặc biệt là khi các dự án trở nên lớn và phức tạp hơn. Nghiên cứu này xây dựng một mô hình kết hợp giữa mô hình thông tin tòa nhà (BIM) và tối ưu hóa đa mục tiêu (MOO) để xác định sự cân bằng giữa các nguồn lực trong lập kế hoạch dự án. Đầu tiên, một mô hình 3D được xây dựng bằng phần mềm Revit. Mô hình BIM này tạo bảng khối lượng để xác định các tài nguyên dự án cần thiết. Sau đó, thuật toán tối ưu hóa cá voi đa mục tiêu (MOWO) được sử dụng để đưa ra các tập giải pháp tối ưu. Tính hiệu quả của mô hình lai ghép được kiểm chứng thông qua một dự án xây dựng thực tế. Thông qua chỉ tiêu so sánh, thuật toán MOWO tìm kiếm được các giải pháp không vượt trội với giá trị độ phân bố (DM) lớn nhất là 28,113; với giá trị nhỏ nhất của độ mở rộng (SP) là 0,872; và giá trị của thể tích hình bao (HV) lớn nhất là 0,875. MOWO đã đưa ra được các kết quả tối ưu với sự phân bố đồng đều cao của các giải pháp so với thuật toán di truyền sắp xếp không vượt trội II và thuật toán đa mục tiêu bầy đàn.

Từ khoá: quản lý dự án; quản lý tài nguyên dự án; tiến độ; mô hình hóa thông tin công trình; tối ưu hóa đa mục tiêu cá voi.

DEVELOPING MULTIPLE OBJECTIVE WHALE OPTIMIZATION ALGORITHM FOR RESOURCE TRADE-OFF IN PROJECT SCHEDULING

Abstract

Project managers face challenges when they must trade-off various resource factors such as time, cost, quality, safety, and the environment, especially as projects have become bigger and more complex. This paper develops a hybrid model for determining tradeoffs among resources in project scheduling that integrates building information modeling (BIM) and multi-objective optimization (MOO). First, a 3D model is built using BIM construction management software. This BIM model generates a bill of quantities to determine the required project resources. Then, an adaptive multiple objective whale optimization (MOWO) algorithm is utilized to provide the optimal solution set. A real project scheduling case study is used to demonstrate the efficiency and effectiveness of the proposed framework. The comparison results showed that the MOWO generated the solutions with the highest value of diversification measurement (DM) of 28.113; the lowest spread (SP) value of 0.872 and the largest value of hyper-volume (HV) of 0.875. MOWO can find the outcome curves with a high uniform distribution of solutions compared to nondominated sorting genetic algorithm II and multiple objective particle swarm optimization.

Keywords: construction management; project resource management; scheduling; building information modeling; multi-objective whale optimization.

[https://doi.org/10.31814/stce.huce\(nuce\)2021-15\(4V\)-14](https://doi.org/10.31814/stce.huce(nuce)2021-15(4V)-14) © 2021 Trường Đại học Xây dựng Hà Nội (ĐHXDHN)

*Tác giả đại diện. Địa chỉ e-mail: ndtrinh@hcmut.edu.vn (Trình, N. Đ.)

1. Giới thiệu

Hiệu quả kinh doanh và sự tồn tại của các công ty phụ thuộc rất lớn vào việc lập kế hoạch và lên tiến độ dự án. Quản lý nguồn lực là một phần quan trọng trong việc lập kế hoạch dự án của tất cả các công ty xây dựng [1]. Thời gian và chi phí thực hiện dự án là hai yếu tố quan trọng và đối lập nhau trong quản lý xây dựng. Thông thường, việc giảm thời lượng dự án sẽ làm tăng chi phí trực tiếp và ngược lại. Quá trình rút ngắn đồng thời thời gian và chi phí dự án được gọi là sự cân bằng chi phí thời gian (TCT – time cost tradeoff), đây là một vấn đề cốt yếu đối với các nhà lập kế hoạch xây dựng. Việc cân bằng được hai yếu tố quan trọng thời gian và chi phí sẽ mang lại lợi thế lớn cho các công ty xây dựng với các đối thủ cạnh tranh [2, 3]. Nhiều nhà nghiên cứu đã sử dụng nhiều phương pháp luận phù hợp để áp dụng cho vấn đề TCT trong quá trình triển khai các hoạt động dự án.

Trong các nghiên cứu gần đây, một yếu tố quan trọng khác ngoài yếu tố thời gian và chi phí đã được thêm vào để đánh giá sự thành công của dự án. Chất lượng của dự án có mối tương quan chặt chẽ với hai yếu tố thời gian và chi phí [4]. Thông thường, việc sử dụng các phương pháp công nghệ thấp và nguồn lực rẻ tiền sẽ kéo dài thời gian của dự án. Áp dụng các công nghệ mới và các nguồn lực sản xuất có thể làm giảm thời gian của dự án, nhưng làm tăng chi phí của dự án. Chất lượng dự án xây dựng có thể giảm khi thời gian hoặc chi phí của dự án giảm. Do đó, tình trạng xuống cấp và lão hóa của các dự án xây dựng liên quan như cầu, đường hầm và đường cao tốc có thể xảy ra nhanh hơn dự kiến và chi phí bảo trì, phục hồi hoặc xây dựng lại hệ thống có thể cao hơn dự kiến [5]. Do đó, các nhà quy hoạch xây dựng đã nỗ lực giải quyết vấn đề cân bằng chất lượng, thời gian, và chi phí (TCQT – time cost quality tradeoff) bằng cách đưa ra phương án thi công cho các công tác trong tiến độ để đồng thời giảm thiểu thời gian và chi phí của dự án trong khi tối đa hóa chất lượng [6].

Ngành xây dựng, thông qua việc xây dựng và vận hành các tòa nhà, chịu trách nhiệm cuối cùng về một loạt các vấn đề môi trường [7, 8]. Nguồn chính gây ô nhiễm không khí và khí nhà kính có liên quan đến quá trình xây dựng. Sản xuất vật liệu xây dựng thải ra nhiều khí cacbonic (CO_2) nhất so với các lĩnh vực công nghiệp khác. Yếu tố thành công quan trọng để đánh giá dự án là việc cung cấp một dự án trong thời gian, chi phí mong muốn và với chất lượng mong muốn. Một yếu tố khác, vấn đề môi trường, hiếm khi được xem xét. Rất ít nghiên cứu được thực hiện về tối ưu hóa các mục tiêu của dự án có xem xét các vấn đề môi trường.

Mô hình thông tin (BIM) đã nổi lên như một quá trình sáng tạo để thiết kế và quản lý các dự án [9]. Mô hình BIM bao gồm thông tin về hình dạng và các khía cạnh khác của công trình [10]. Các ứng dụng của BIM đã được ghi nhận đầy đủ [11, 12] và đang mở rộng sang quản lý dự án xây dựng [13–15]. Ban đầu, BIM được sử dụng để giảm bớt khó khăn trong quá trình thiết kế bằng cách hình thành các mô hình xây dựng 3D ảo cho phép hiển thị các đối tượng xây dựng. Các kỹ thuật dựa trên máy tính đã phát triển nhanh chóng trong những năm gần đây dẫn đến những cải tiến trong phần mềm mô hình hóa, cung cấp các mô-đun khác nhau để xử lý nhiều trở ngại gặp phải trong các lĩnh vực khác nhau, liên quan đến các vấn đề năng lượng và môi trường [16], thiết kế kết cấu [17, 18], và thi công xây dựng [19]. Các lợi ích của BIM, chẳng hạn như cải thiện cộng tác và giao tiếp, cũng như trực quan hóa dự án, có giá trị trong nhiều lĩnh vực, bao gồm cả kỹ thuật xây dựng nói chung và quản lý tài nguyên nói riêng. Trong bài báo này, BIM được áp dụng cho việc trích xuất khối lượng để cung cấp thông số đầu vào cho bài toán tối ưu.

Tối ưu hóa đa mục tiêu (MOPs - Multi-objective problems) được ứng dụng trong nhiều lĩnh vực, bao gồm khoa học, kỹ thuật, kinh tế [20]. Kể từ khi các thuật toán tiến hóa (EAs – Evolutionary algorithms) đầu tiên được đề xuất để giải quyết bài toán đa mục tiêu, Các thuật toán đa mục tiêu (MOEA – multiple objective evolutionary algorithms) đã được phát triển nhanh chóng [21]. MOEA đã được ứng dụng để giải quyết các vấn đề tối ưu hóa trong nhiều lĩnh vực [22, 23]. Tối ưu hóa cá

voi (WO - whale optimization) là một thuật toán metaheuristic dựa trên bầy đàn mới được giới thiệu, được mô phỏng từ hành vi của cá voi lưng gù [24]. Nó đã được áp dụng thành công để giải quyết các vấn đề tối ưu hóa kỹ thuật khác nhau trong nhiều lĩnh vực [25]. Thuật toán có khi cấu trúc đơn giản và ít yêu cầu người vận hành, WO đã chứng tỏ khả năng cao trong việc cân bằng giữa chiến lược thăm dò và khai thác và tốc độ hội tụ nhanh trong việc giải bài toán tối ưu hóa đơn [26, 27]. Một số nhà nghiên cứu đã sử dụng các ưu điểm của WO để giải quyết nhiều vấn đề khác nhau với nhiều bài báo nghiên cứu xác minh hiệu suất của WO so với các thuật toán đa mục tiêu khác [28–30].

Mục tiêu của nghiên cứu là đề xuất một thuật toán đa mục tiêu mới để giải quyết bài toán cân bằng các tài nguyên trong tiến độ dự án. Nghiên cứu phát triển thuật toán đa mục tiêu cá voi dựa trên thuật toán gốc đơn mục tiêu, đồng thời ứng dụng công cụ BIM để cung cấp dữ liệu đầu vào cho bài toán tối ưu. Tính mới và đóng góp của bài báo gồm các điểm sau: (1) Sử dụng BIM để cung cấp dữ liệu đầu vào cho bài toán tối ưu hóa; (2) phát triển thuật toán đa mục tiêu mới; (3) giải quyết bài toán cân bằng tài nguyên với nhiều mục tiêu cùng nhau trong quản lý xây dựng.

2. Bài toán tối ưu hóa tài nguyên trong tiến độ

Mô hình được đề xuất đồng cân bằng bốn mục tiêu mâu thuẫn nhau bao gồm thời gian dự án, chi phí, chất lượng và khí thải carbon dioxide (CO_2). Thông thường, thời gian thực hiện dự án ngắn dẫn đến chi phí trực tiếp cao và ngược lại. Tuy nhiên, khi rút ngắn thời gian thi công ảnh hưởng đến chất lượng thi công một số công tác, dẫn đến việc hư hỏng sớm hơn dự kiến và chi phí bảo trì và phục hồi cao hơn so với dự toán. Khi giảm chi phí dự án có thể phải sử dụng các máy móc, thiết bị cũ, đồng thời các vật liệu sử dụng trong dự án không đạt chất lượng cao dẫn đến lượng khí CO_2 phát thải trong quá trình thi công cao. Quá trình tối ưu hóa nhằm mục đích giảm thiểu thời gian, chi phí và lượng khí thải carbon dioxide của dự án trong khi tối đa hóa chất lượng dự án, sử dụng các phương pháp thi công thích hợp cho từng công tác của dự án.

2.1. Rút ngắn thời gian dự án

$$T_p = \min (\text{Max}_{i=1, \dots, M} (FT_i)) = \min (\text{Max}_{i=1, \dots, M} (ST_i + D_i)) \quad (1)$$

trong đó ST_i , FT_i , D_i lần lượt là thời gian bắt đầu, kết thúc và thời gian cần thiết để hoàn thành công tác i . Sự lựa chọn phương án thi công sẽ quyết định thời gian thực hiện công tác trong khoảng thông thường và rút ngắn.

2.2. Giảm thiểu chi phí dự án

$$TC_p = C_D + C_I = \sum_{i=1}^M c_i + C_0 + bT_p \quad (2)$$

trong đó $C_D = \sum_{i=1}^M c_i$ là tổng chi phí trực tiếp của dự án được tính bằng tổng chi phí trực tiếp của từng công tác. C_I là chi phí gián tiếp bao gồm chi phí chung C_0 (chi phí văn phòng, chi phí huy động và các chi phí ban đầu khác) cộng thêm phần chi phí liên quan đến thời gian dự án bT_p .

2.3. Tăng chất lượng dự án

Chất lượng tổng thể của dự án là tổng chất lượng của tất cả các công tác. Nguồn lực của dự án có thể bao gồm vật liệu của một số loại, máy móc và nhân công. Dựa trên nghiên cứu trước đây và dữ liệu thu thập được, chất lượng của một công tác được đánh giá thông qua chỉ số hoạt động chất lượng (QPI_i) [31, 32]. M là tổng số công tác trong một dự án. Do đó, mục tiêu thứ ba là tối ưu chất lượng tổng thể của dự án được định nghĩa theo công thức (3)

$$Q_p = \sum_{i=1}^M (QPI_i) / M \quad (3)$$

2.4. Giảm thiểu khí CO₂

Mục tiêu thứ tư là giảm thiểu lượng phát thải carbon dioxide tổng thể của dự án [33, 34], được định nghĩa trong công thức (4).

$$CE_p = \sum_{i=1}^M (e_d + e_{in})_i$$

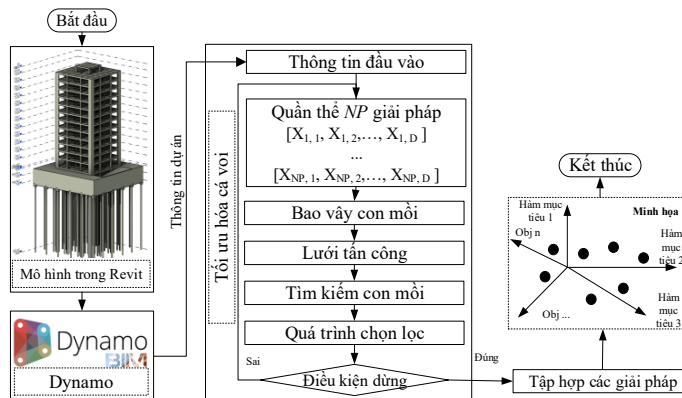
$$e_d = Q_{ed} * F_e + Q_{dd} * F_d$$

$$e_{in} = \sum_{l=1}^m (Q_l * F_l + Q_{el} * F_e + Q_{dl} * F_d)$$

trong đó Q_{ed} và Q_{dd} là điện năng tiêu thụ và dầu diesel cho mỗi công tác. F_e và F_d lần lượt là hệ số phát thải carbon (CEF - carbon emission factor) trên một đơn vị điện và tiêu thụ diesel. Q_l là mức tiêu hao vật chất l trong một công tác. Q_{el} và Q_{dl} là mức tiêu thụ điện và diesel để vận chuyển vật liệu l cho mỗi công tác. F_l là hệ số phát thải carbon (CEF) trên một đơn vị sản xuất vật liệu l .

3. Mô hình thuật toán đa mục tiêu MOWO và BIM

Phần này mô tả mô hình lai ghép để tối ưu hóa sự cân bằng giữa thời gian, chi phí, chất lượng và lượng khí thải carbon dioxide (CO₂) trong tiến độ dự án. Mô hình lai ghép bao gồm hai mô-đun chính (xem Hình 1): (1) mô-đun BIM, (2) mô-đun tối ưu hóa đa mục tiêu. Mỗi mô-đun được mô tả chi tiết bên dưới.



Hình 1. Sơ đồ khối của mô hình lai ghép

3.1. Mô-đun BIM

Đầu tiên, một dự án xây dựng được mô phỏng trong môi trường ảo bằng phần mềm Revit, bao gồm thông tin hình học chi tiết và dữ liệu liên quan. Sau đó, nhiều nút động với các chức năng cần thiết được phát triển để tạo ra các mô hình BIM tham số trong Revit. Lập trình trực quan được sử dụng để chuyển đổi thông tin cơ bản của tòa nhà (mô hình Revit) thành dữ liệu đầu vào cho mô hình tối ưu hóa trong MATLAB.

3.2. Mô-đun tối ưu hóa đa mục tiêu cá voi

Tối ưu hóa đa mục tiêu cá voi (MOWO – multiple objective whale optimization) được đề xuất để tối ưu hóa đồng thời thời gian, chi phí, chất lượng và lượng khí thải carbon dioxide trong tiến độ dự án (TCQC). Thuật toán đa mục tiêu MOWO là mới và là phiên bản đa mục tiêu được phát triển dựa trên thuật toán gốc tối ưu cá voi (WO) bao gồm các giai đoạn khác nhau, đó là khởi tạo, giai đoạn bao vây con mồi, cơ động kiếm ăn bằng lưới bong bóng xoắn ốc, tìm kiếm con mồi, lựa chọn và kết thúc. Tuy nhiên, thuật toán MOWO khác biệt với thuật toán gốc ở các điểm sau. MOWO được sử dụng để giải quyết các bài toán đa mục tiêu (nhiều hơn 1 mục tiêu), trong khi đó thuật toán gốc WO chỉ giải quyết bài toán đơn mục tiêu (một mục tiêu duy nhất). Các kỹ thuật vượt trội (dominance concept) được sử dụng để so sánh lựa chọn hai giải pháp trong không gian tìm kiếm. Thêm vào đó, các kỹ thuật chọn lọc như sắp xếp không vượt trội, kỹ thuật entropy được áp dụng để lựa chọn quần thể mới trong quá trình tối ưu. Quá trình tối ưu hóa được mô tả chi tiết như sau:

a. Khởi tạo và biến quyết định

Thông số đầu vào của thuật toán đa mục tiêu cá voi gồm mối quan hệ giữa các công tác, thời gian, chi phí c_i , chất lượng QPI_i và lượng khí thải carbon dioxide cho mỗi công tác. Tất cả thông tin dự án được lấy từ mô-đun BIM. Ngoài ra, các thông số cơ bản của MOWO cần được cài đặt như số lượng biến quyết định (D), hàm mục tiêu (O), cá thể trong quần thể (NP), vòng lặp tối đa (G_{max}).

Phương pháp ngẫu nhiên được sử dụng để tạo ra NP cá thể đầu tiên của MOWO được minh họa như công thức (5) với $x_{i,j} \in [0, 1]$.

$$X_{i,j}^{G=0} = LB_i + x_{i,j} * (UB_i - LB_i); i = \overline{1, D}; j = \overline{1, NP} \quad (5)$$

Vectơ D phần tử trong công thức (6) thể hiện một giải pháp khả thi cho bài toán cân bằng TCQC trong các dự án xây dựng. Chỉ số j cho biết công tác thứ j trong tổng số D công tác của dự án.

$$X = [x_{i,1}, x_{i,2}, \dots, x_{i,j}, \dots, x_{i,D}] \quad (6)$$

Phương án thi công cho mỗi công tác là số nguyên dương. Do đó, cần phải sử dụng hàm $Ceil$ trong công thức (7) để chuyển đổi các biến quyết định thành các số nguyên.

$$X_{i,j} = Ceil(x_{i,j} \times UB(i)) \quad (7)$$

b. Bao vây con mồi (Encircling prey phase)

Cá voi lưng gù cần phát hiện vị trí con mồi để bao vây và bắt chúng trong quá trình săn mồi. Bởi vì vị trí của con mồi không được biết trước, thuật toán cá voi cho rằng giải pháp ứng cử viên tốt nhất hiện tại là con mồi mục tiêu. Những con cá voi khác sẽ cố gắng cải thiện vị trí của chúng để gần với con mồi tốt nhất. Công thức toán học (8) sau đây biểu thị quy trình di chuyển thức ăn của cá voi [24].

$$\begin{aligned} C &= |A\bar{X}(t) - X(t)| \\ X(t+1) &= \bar{X}(t) - B.C \\ A &= 2.r; B = 2.r.a - a \end{aligned} \quad (8)$$

trong đó $X(t)$ biểu thị vị trí hiện tại của cá voi và $\bar{X}(t)$ là vị trí của cá thể cá voi tốt nhất hiện tại; tham số a tuyến tính giảm từ 2 đến 0 và r là một biến ngẫu nhiên giữa 0 và 1. Ngoài ra, ký hiệu $(.)$ là một phép nhân của các phần tử.

c. Tấn công con mồi (Bubble-net attacking phase)

Để lựa chọn giữa hai phương pháp cập nhật vị trí mới bao gồm mô hình xoắn ốc hoặc cơ chế bao vây thu hẹp, thuật toán cá voi sử dụng xác suất 0,5 để cân bằng giữa phương pháp tăng cường và đa dạng hóa. Các tiêu chí được mô tả như các phương trình (9) sau [24]

$$C = |\bar{X}(t) - X(t)|$$

$$X(t+1) = \begin{cases} \bar{X}(t) - \alpha \cdot C & \text{nếu } p < 0,5 \\ C \cdot e^{\alpha} \cdot \cos(2\pi\alpha) + \bar{X}(t) & \text{nếu } p \geq 0,5 \end{cases} \quad (9)$$

trong đó C biểu thị khoảng cách giữa con cá voi thứ i và con cá voi tốt nhất, α là số ngẫu nhiên trong khoảng $[-1, 1]$, p là biến ngẫu nhiên từ 0 đến 1, và ký hiệu $(.)$ là một phép nhân của các phần tử.

d. Tìm kiếm con mồi (Prey search phase)

Để nâng cao khả năng thăm dò và cho phép tìm kiếm toàn cục của thuật toán WO, tham số α được gán ngẫu nhiên với giá trị nằm ngoài phạm vi $[-1, 1]$ để di chuyển cá voi ra xa cá voi tham chiếu. Chỉ tiết được biểu thị bằng các phương trình (10) sau:

$$C = |A\bar{X}_{rand}(t) - X(t)|$$

$$X(t+1) = \bar{X}_{rand}(t) - \alpha \cdot C \quad (10)$$

trong đó $\bar{X}_{rand}(t)$ được chọn ngẫu nhiên từ tập hợp hiện tại và A giữ nguyên các giá trị như trong phương trình (8).

e. Lựa chọn quần thể

Sau mỗi vòng lặp, thuật toán sẽ lựa chọn các cá thể cho quần thể mới ở vòng lặp tiếp theo. Từ quần thể kết hợp, các kỹ thuật sắp xếp không vượt trội (non-dominated sorting) [35] và kỹ thuật entropy [36] được áp dụng để lựa chọn NP cá thể tốt nhất. Đầu tiên, kỹ thuật sắp xếp không vượt trội chia quần thể kết hợp thành lớp không vượt trội đặt tên là $F_1, F_2, \dots, F_n$. Số lượng cá thể được lấy sẽ nằm từ lớp F_1 đến F_k . Sau đó kỹ thuật entropy sẽ lựa chọn chính xác NP cá thể.

f. Điều kiện dừng

Thuật toán sẽ dừng khi đạt đến yêu cầu do người dùng thiết lập ví dụ như số vòng lặp tối đa G_{max} hoặc số lần đánh giá hàm mục tiêu. Bài báo này cài đặt điều kiện dừng là số vòng lặp tối đa.

4. Trường hợp nghiên cứu

Một dự án xây dựng dân dụng tại thành phố Hồ Chí Minh, Việt Nam được sử dụng để minh họa mô hình nghiên cứu. Dự án bao gồm hai tầng hầm và mười ba tầng với phương án móng cọc. Tất cả dữ liệu của các công tác đều được trích xuất từ mô hình BIM, thông tin dự án và nhận định của các chuyên gia. Trong trường hợp nghiên cứu, thuật ngữ “công tác tổng” được sử dụng; Ví dụ, công tác cột của tầng hai bao gồm việc lắp đặt cốt thép, ván khuôn, đổ bê tông và tháo ván khuôn, chúng được định nghĩa là một công tác. Dữ liệu đầu vào của dự án gồm mối quan hệ công tác, phương án thi công cho các công tác với thông tin về thời gian, chi phí, chất lượng, và lượng phát thải CO_2 được thể hiện ở trong Bảng 1.

Bảng 1. Dữ liệu dự án

Số TT	Công tác	Mối quan hệ công tác	Lựa chọn 1				Lựa chọn 2				Lựa chọn 3			
			T	C	Q	CE	T	C	Q	CE	T	C	Q	CE
1	Công tác cọc	-	60	6186	92,41	127,52	50	6662	94,57	136,22	-	-	-	-
2	Dầm, sàn hầm thứ hai	1FS+2	18	2908	90,54	125,91	17	2774	96,95	174,96	-	-	-	-
3	Cột tầng hầm thứ hai	2FS+2	18	1103	92,87	130,84	17	1157	97,54	143,25	15	1246	83,64	84,77
4	Dầm, sàn tầng hầm 1	3	17	2610	91,75	114,07	16	2736	96,62	105,76	15	2947	82,52	89,30
5	Cột cửa tầng hầm đầu tiên	4FS+1	7	1063	90,73	171,3	6	1115	98,46	149,59	-	-	-	-
6	Tầng trệt bên ngoài	5	7	958	94,27	144,11	6	991	95,24	154,63	-	-	-	-
7	Tầng trệt	5	7	521	91,14	169,38	6	539	96,64	153,86	5	584	84,95	157,67
8	Cột tầng trệt	7FS+1, 6FS+1	3	222	93,98	110,66	2	254	94,68	137,93	-	-	-	-
9	Tầng hai	8	7	533	92,75	167,91	6	595	98,15	114,23	5	577	81,42	162,32
10	Cột tầng hai	9FS+1	3	189	94,41	101,73	2	217	96,31	146,81	1	224	81,76	79,08
11	Tầng ba	10	6	577	94,69	160,78	7	515	96,56	127,96	5	533	85,98	149,04
12	Cột tầng ba	11FS+1	3	189	91,42	151,62	2	217	96,17	78,78	-	-	-	-
13	Tầng bốn	12	7	515	94,07	101,69	6	533	97,16	138,68	5	577	84,13	35,35
14	Cột tầng bốn	13FS+1	3	189	92,46	177,72	2	217	97,80	112,80	-	-	-	-
15	Tầng thứ năm	14	7	567	91,44	156,75	6	586	96,10	148,34	5	635	81,71	147,55
16	Cột tầng năm	15FS+1	3	177	94,98	124,53	2	203	97,49	137,29	1	209	83,92	85,43
17	Tầng thứ sáu	16	7	569	94,7	156,85	6	589	97,80	128,88	5	638	81,92	97,37
18	Cột tầng sáu	17FS+1	3	177	92,62	159,34	2	203	97,47	109,41	1	209	85,76	100,80
19	Tầng thứ bảy	18	7	569	94,3	178,32	6	589	98,90	161,11	-	-	-	-
20	Cột tầng bảy	19FS+1	3	177	90,31	168,88	2	203	94,81	81,37	-	-	-	-
21	Tầng tám	20	7	569	94,67	106,84	6	589	97,19	90,91	-	-	-	-
22	Cột tầng tám	21FS+1	3	177	90,52	126,85	2	203	98,05	138,38	-	-	-	-
23	Tầng chín	22	7	626	90,21	156,92	6	647	98,24	135,37	-	-	-	-
24	Cột tầng chín	23FS+1	3	195	93,8	167,54	2	223	98,53	80,95	-	-	-	-
25	Tầng thứ mười	24	7	626	93,31	114,26	6	647	96,22	106,31	-	-	-	-
26	Cột tầng mười	25FS+1	3	195	94,16	143,81	2	223	97,51	161,86	1	230	83,58	106,62
27	Tầng 11	26	7	626	94,59	175,73	6	647	98,15	110,56	5	701	81,22	163,12
28	Cột tầng mười một	27FS+1	3	195	93,44	149,08	2	223	97,57	142,12	1	230	81,49	122,02
29	Tầng mười hai	28	7	626	91,24	121,08	6	647	95,33	167,44	5	701	84,78	88,61
30	Cột tầng mười hai	29FS+1	3	195	91,57	170,14	2	223	98,31	142,33	1	230	82,05	112,81
31	Sàn sân thượng	30	7	619	92,81	168,53	6	640	94,87	135,91	5	693	81,08	119,83
32	Cột sàn sân thượng	31FS+1	3	37	91	157,67	2	43	94,99	120,48	1	44	85,91	111,15
33	Tầng mái	32	7	107	90	156,73	6	111	94,30	99,57	5	120	83,44	91,62

Ghi chú: T (thời gian – ngày); C (chi phí –USD); Q (chất lượng – %); CE (CO₂ khí thải – Kg).

4.1. Kết quả tối ưu hóa

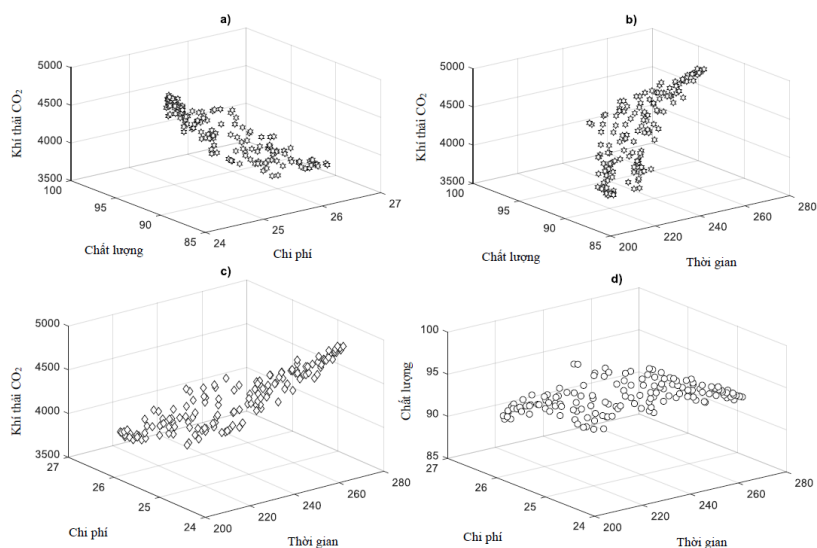
Người dùng phải cài đặt các thông số cho thuật toán tối ưu. Nghiên cứu này phát triển thuật toán MOWO là thuật toán không tham số. Do đó, hai thông số cơ bản gồm số lượng quần thể (NP) và số

vòng lặp tối đa ($G_{\max}$) được gán giá trị tương ứng là 150 và 200. Để loại bỏ kết quả ngẫu nhiên trong quá trình tối ưu, nghiên cứu thực hiện chạy với 30 lần.

Các kết quả tối ưu tốt nhất được sắp xếp theo các mục tiêu riêng về thời gian, chi phí, chất lượng, khí thải CO₂ và cân bằng giữa các mục tiêu được trình bày ở Bảng 2. Bảng 2 cũng liệt kê các phương án thi công cho các công tác. Ví dụ, nhà quản lý dự án muốn ưu tiên về thời gian thì giải pháp 1 và 2 là phù hợp nhất. Trong khi đó, giải pháp 3 và 4 thì mang lại lựa chọn tốt nhất nếu ưu tiên về chi phí.

Bảng 2. Các giải pháp tốt nhất đạt được bởi mô hình MOWO-TCT

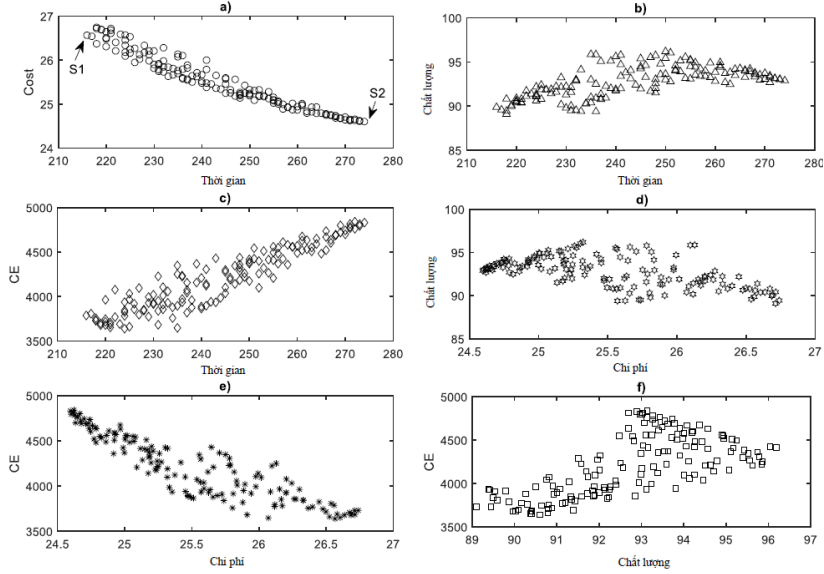
TT	Sắp xếp ưu tiên	Phương án thi công	Thông số dự án			
			Thời gian	Chi phí	Chất lượng	Khí thải CO ₂
1	Theo thời gian	2.2.3.3.2.2.2.2.3.3.3.2.3.3.3.3.2.2.2.2.2.2.3.3.3.3.3.3.3	216	26560	89,87	3787,4
2		2.1.3.2.2.2.2.2.3.3.3.2.3.3.3.3.2.2.2.2.2.2.3.3.3.3.3.3.3	217	26537	89,59	3807,4
3	Theo chi phí	1.2.1.1.1.1.1.1.1.2.1.1.1.1.1.1.1.1.1.1.1.1.1.1.1.1.1.1.1	274	24596	92,89	4831,3
4		1.2.1.1.1.1.1.1.1.2.1.1.1.1.1.1.1.1.1.1.1.1.1.1.1.1.1.2.1	273	24602	93,01	4794,1
5	Theo chất lượng	1.2.2.2.2.2.2.1.1.2.2.2.2.2.2.2.2.2.2.2.2.2.2.2.1.2.2.1.1.2.2	250	25321	96,18	4417,4
6		1.2.2.2.2.2.2.1.1.2.2.2.2.2.1.2.2.2.2.2.2.2.2.2.2.1.2.2.1.1.2.2	251	25302	96,04	4425,8
7	Theo khí thải CO ₂	2.1.3.3.2.2.2.1.2.3.2.2.3.3.2.2.2.1.2.2.1.3.2.3.3.3.3.3.3	224	26566	90,60	3639,1
8		1.1.3.3.2.2.2.1.2.3.2.2.3.3.3.1.2.2.1.2.2.1.3.2.3.3.3.3.3	235	26070	90,40	3647,7
9	Cân bằng	2.1.3.3.2.2.2.2.3.3.2.3.2.3.3.3.2.2.2.2.2.1.3.2.3.3.3.3.3	219	26691	90,09	3698,2
10		2.1.3.2.2.2.2.1.2.3.3.2.3.2.3.3.2.2.2.2.2.2.2.3.3.2.3.2.3	224	26448	92,19	3825,4



Hình 2. Các giải pháp tốt nhất trên không gian 3D

Do khó trình bày các giải pháp không vượt trội trong một đồ thị bốn chiều, các giải pháp không bị chi phối của trường hợp nghiên cứu được hiển thị trong không gian ba chiều như trong Hình 2. Ngoài ra, Hình 3 biểu thị sự cân bằng giữa hai mục tiêu bất kỳ. Ví dụ, Hình 3(a) cho thấy rõ ràng mỗi quan

hệ giữa thời gian và chi phí của dự án. Giải pháp S1 sở hữu thời gian ngắn nhất và giải pháp S2 có chi phí thấp nhất; những điểm khác là các giải pháp thỏa hiệp. Các đường cong được cung cấp giúp các nhà quản lý dự án trong quá trình đánh giá dự án.



Hình 3. Các giải pháp tốt nhất trên mặt phẳng 2D

4.2. So sánh kết quả

Kết quả tối ưu của thuật toán đa mục tiêu cá voi được so sánh với kết quả tìm được bởi các thuật toán thông dụng như thuật toán di truyền sắp xếp không vượt trội II (NSGA-II nondominated sorting genetic algorithm II) [35] và thuật toán đa mục tiêu bầy đàn (MOPSO – multiple objective particle swarm optimization) [37]. Hai thông số cơ bản của các thuật toán được cài đặt như sau: Số cá thể trong quần thể là 150 và số vòng lặp tối đa là 200.

Ngoài ra, các thông số đặc trưng cho các thuật toán so sánh được cài đặt như sau: Đối với, MOPSO, thông số nhận thức và xã hội c_1 và c_2 là 2, thông số quán tính w được lấy ngẫu nhiên trong khoảng 0,3 đến 0,7. Đối với NSGA-II, xác suất chéo và đột biến được đặt lần lượt là $p_c = 0,9$ và $p_m = 0,5$.

Kỹ thuật tối ưu hóa đa mục tiêu thường sử dụng các chỉ số sau để so sánh tính hiệu quả giữa các thuật toán. Các chỉ số được minh họa như sau:

a) Độ phân bố (DM- Diversification measurement) thể hiện độ mở rộng của các giải pháp trong tập giải pháp (công thức (11)). Trong đó, Min, Max f_i tương ứng là giá trị bé nhất và lớn nhất của hàm mục tiêu i trong tổng số k mục tiêu. Giá trị DM càng lớn thể hiện tính hiệu quả cao của thuật toán.

$$DM = \sqrt{\sum_{i=1}^k (\text{Min } f_i - \text{Max } f_i)^2} \quad (11)$$

b) Độ mở rộng (SP-Spread) thể hiện tính đồng đều của các giải pháp, được đo lường theo công thức (12).

$$SP = \frac{d_f + d_l + \sum_{i=1}^{N-1} |d_i - \bar{d}|}{d_f + d_l + (N - 1)\bar{d}} \quad (12)$$

trong đó, d_i là giá trị khoảng cách euclid giữa hai điểm kề nhau trong tập tối ưu, d_f và d_l là khoảng cách của điểm xa nhất trong tập tối điểm biên. d ngang là trung bình của tất cả các khoảng cách. N là số giải pháp tối ưu mà thuật toán tìm được. Giá trị SP càng nhỏ càng tốt.

c) Thể tích hình bao (HV - hypervolume) thể hiện độ lớn không gian của tập tối ưu (công thức (13)). v_i là đường chéo của hình hộp chữ nhật bao, được từ điểm thấp nhất đến điểm tham khảo. Thuật toán tốt nếu cho giá trị HV lớn.

$$HV = volume \left(\bigcup_{i=1}^{|\Omega|} v_i \right) \quad (13)$$

Kết quả so sánh giữa ba thuật toán được thể hiện ở Bảng 3. Các giá trị của các chỉ số trong bảng cho thấy, thuật toán MOWO là hiệu quả nhất trong các thuật toán so sánh.

Bảng 3. Kết quả so sánh giữa các thuật toán

Thuật toán	Chỉ số 1: DM	Chỉ số 2: SP	Chỉ số 3: HV
MOWO	28,113	0,872	0,875
MOPSO	17,371	1,123	0,706
NSGA-II	14,764	1,765	0,701

5. Kết luận

Nghiên cứu này đã đề xuất một mô hình kết hợp giữa BIM và thuật toán tối ưu hóa đa mục tiêu MOWO để tối ưu đồng thời thời gian, chi phí, chất lượng và phát thải carbon dioxide (CO₂) trong tiến độ dự án. Thuật toán đa mục tiêu MOWO được phát triển dựa trên thuật toán gốc WO bằng cách sử dụng các kỹ thuật vượt trội, kỹ thuật chọn lọc như sắp xếp không vượt trội, kỹ thuật entropy.

Một dự án xây dựng thực tế được sử dụng để chứng minh tính khả thi của mô hình đề xuất trong việc tạo ra các giải pháp không vượt trội. Các kết quả tìm được cung cấp cho các nhà quản lý dự án những thông tin hữu ích để điều hành dự án với việc cân bằng đồng thời các mục tiêu về thời gian, chi phí, chất lượng và phát thải CO₂ của dự án. So sánh với các thuật toán phổ biến như thuật toán di truyền sắp xếp không vượt trội II và thuật toán đa mục tiêu bầy đàn, MOWO đạt được kết quả tốt nhất về các chỉ tiêu so sánh như giá trị độ phân bố (DM), độ mở rộng (SP), và giá trị của thể tích hình bao (HV).

Việc tìm kiếm các kết quả tối ưu của thuật toán đề xuất MOWO không phụ thuộc vào số lượng biến quyết định và hàm mục tiêu. Thêm vào đó, mô hình đề xuất dễ sử dụng và vận hành trong máy tính. Do đó, việc ứng dụng mô hình đề xuất cho các bài toán khác trong lĩnh vực quản lý xây dựng cũng như khoa học kỹ thuật khác là khả thi và mang lại nhiều kết quả thú vị.

Lời cảm ơn

Nghiên cứu được tài trợ bởi Đại học Quốc gia Thành phố Hồ Chí Minh (ĐHQG-HCM) trong khuôn khổ Đề tài mã số C2021-20-41.

Tài liệu tham khảo

- [1] Panwar, A., Jha, K. N. (2019). [A many-objective optimization model for construction scheduling](#). *Construction Management and Economics*, 37(12):727–739.
- [2] Chen, P.-H., Weng, H. (2009). [A two-phase GA model for resource-constrained project scheduling](#). *Automation in Construction*, 18(4):485–498.
- [3] Khoa, H. N., Học, T. Đ., Long, L. Đ. (2020). [Đề xuất thuật toán đa mục tiêu nhóm xã hội và phương pháp ra quyết định đa tiêu chí cho bài toán thời gian, chi phí, rủi ro trong tiến độ dự án](#). *Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng (KHCN XD)-ĐHXDHN*, 14(5V):1–10.
- [4] Mungle, S., Benyoucef, L., Son, Y.-J., Tiwari, M. K. (2013). [A fuzzy clustering-based genetic algorithm approach for time–cost–quality trade-off problems: A case study of highway construction project](#). *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 26(8):1953–1966.
- [5] Jeunet, J., Orm, M. B. (2020). [Optimizing temporary work and overtime in the Time Cost Quality Trade-off Problem](#). *European Journal of Operational Research*, 284(2):743–761.
- [6] Zhang, H., Xing, F. (2010). [Fuzzy-multi-objective particle swarm optimization for time–cost–quality tradeoff in construction](#). *Automation in Construction*, 19(8):1067–1075.
- [7] Buchanan, A. H., Honey, B. G. (1994). [Energy and carbon dioxide implications of building construction](#). *Energy and Buildings*, 20(3):205–217.
- [8] González, M. J., Navarro, J. G. (2006). [Assessment of the decrease of CO₂ emissions in the construction field through the selection of materials: Practical case study of three houses of low environmental impact](#). *Building and Environment*, 41(7):902–909.
- [9] Eastman, C., Teicholz, P., Sacks, R., Liston, K. (2008). *BIM handbook: A guide to building information modeling for owners, managers, designers, engineers and contractors*. Wiley Publishing.
- [10] Nam, L. H., Dung, V. T. K., Giang, H. V., Cầm, Đ. N. (2018). [BIM cho các công trình hạ tầng kỹ thuật ở Việt Nam: Thực trạng, rào cản ứng dụng và giải pháp](#). *Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng (KHCN XD) - ĐHXDHN*, 12(1):53–64.
- [11] Ayman, R., Alwan, Z., McIntyre, L. (2019). [BIM for sustainable project delivery: review paper and future development areas](#). *Architectural Science Review*, 63(1):15–33.
- [12] Rokooei, S. (2015). [Building Information Modeling in Project Management: Necessities, Challenges and Outcomes](#). *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 210:87–95.
- [13] Olawumi, T. O., Chan, D. W. M. (2019). [Building Information Modelling and Project Information Management Framework for Construction Projects](#). *Journal of Civil Engineering and Management*, 25(1): 53–75.
- [14] Çelik, U. (2020). [4D and 5D BIM: A System for Automation of Planning and Integrated Cost Management](#). *Advances in Building Information Modeling*, Springer International Publishing, 57–69.
- [15] Phương, L. Q., Quân, N. T. (2020). [Đề xuất quy tắc tạo lập mô hình BIM phục vụ việc tự động hóa đo bóc khối lượng trong các dự án xây dựng sử dụng vốn nhà nước tại Việt Nam](#). *Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng (KHCN XD) - ĐHXDHN*, 14(4V):118–129.
- [16] Shadram, F., Mukkavaara, J. (2018). [An integrated BIM-based framework for the optimization of the trade-off between embodied and operational energy](#). *Energy and Buildings*, 158:1189–1205.
- [17] Vilutiene, T., Kalibatiene, D., Hosseini, M. R., Pellicer, E., Zavadskas, E. K. (2019). [Building Information Modeling \(BIM\) for Structural Engineering: A Bibliometric Analysis of the Literature](#). *Advances in Civil Engineering*, 2019:1–19.
- [18] Mangal, M., Cheng, J. C. (2018). [Automated optimization of steel reinforcement in RC building frames using building information modeling and hybrid genetic algorithm](#). *Automation in Construction*, 90: 39–57.
- [19] Bradley, A., Li, H., Lark, R., Dunn, S. (2016). [BIM for infrastructure: An overall review and constructor perspective](#). *Automation in Construction*, 71:139–152.
- [20] Marler, R., Arora, J. (2004). [Survey of multi-objective optimization methods for engineering](#). *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 26(6):369–395.
- [21] Cheshmehgaz, H. R., Haron, H., Sharifi, A. (2013). [The review of multiple evolutionary searches and multi-objective evolutionary algorithms](#). *Artificial Intelligence Review*, 43(3):311–343.

- [22] Zhou, A., Qu, B.-Y., Li, H., Zhao, S.-Z., Suganthan, P. N., Zhang, Q. (2011). [Multiobjective evolutionary algorithms: A survey of the state of the art](#). *Swarm and Evolutionary Computation*, 1(1):32–49.
- [23] Chiandussi, G., Codegone, M., Ferrero, S., Varesio, F. (2012). [Comparison of multi-objective optimization methodologies for engineering applications](#). *Computers & Mathematics with Applications*, 63(5): 912–942.
- [24] Mirjalili, S., Lewis, A. (2016). [The Whale Optimization Algorithm](#). *Advances in Engineering Software*, 95:51–67.
- [25] Rana, N., Latiff, M. S. A., Abdulhamid, S. M., Chiroma, H. (2020). [Whale optimization algorithm: a systematic review of contemporary applications, modifications and developments](#). *Neural Computing and Applications*, 32(20):16245–16277.
- [26] Elaziz, M. A., Mirjalili, S. (2019). [A hyper-heuristic for improving the initial population of whale optimization algorithm](#). *Knowledge-Based Systems*, 172:42–63.
- [27] Li, Y., Han, M., Guo, Q. (2020). [Modified Whale Optimization Algorithm Based on Tent Chaotic Mapping and Its Application in Structural Optimization](#). *KSCE Journal of Civil Engineering*, 24(12):3703–3713.
- [28] Li, A.-D., He, Z. (2020). [Multiobjective feature selection for key quality characteristic identification in production processes using a nondominated-sorting-based whale optimization algorithm](#). *Computers & Industrial Engineering*, 149:106852.
- [29] Got, A., Moussaoui, A., Zouache, D. (2020). [A guided population archive whale optimization algorithm for solving multiobjective optimization problems](#). *Expert Systems with Applications*, 141:112972.
- [30] Zeng, N., Song, D., Li, H., You, Y., Liu, Y., Alsaadi, F. E. (2021). [A competitive mechanism integrated multi-objective whale optimization algorithm with differential evolution](#). *Neurocomputing*, 432:170–182.
- [31] Zhang, L., Du, J., Zhang, S. (2014). [Solution to the Time-Cost-Quality Trade-off Problem in Construction Projects Based on Immune Genetic Particle Swarm Optimization](#). *Journal of Management in Engineering*, 30(2):163–172.
- [32] Tran, D.-H., Cheng, M.-Y., Cao, M.-T. (2015). [Hybrid multiple objective artificial bee colony with differential evolution for the time–cost–quality tradeoff problem](#). *Knowledge-Based Systems*, 74:176–186.
- [33] Farazmand, N., Beheshtinia, M. (2018). Multi-objective optimization of time-cost-quality-carbon dioxide emission-plan robustness in construction projects. *Journal of Industrial and Systems Engineering*, 11(3): 102–125.
- [34] Liu, S., Tao, R., Tam, C. M. (2013). [Optimizing cost and CO₂ emission for construction projects using particle swarm optimization](#). *Habitat International*, 37:155–162.
- [35] Deb, K., Pratap, A., Agarwal, S., Meyarivan, T. (2002). [A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II](#). *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 6(2):182–197.
- [36] Wang, Y.-N., Wu, L.-H., Yuan, X.-F. (2009). [Multi-objective self-adaptive differential evolution with elitist archive and crowding entropy-based diversity measure](#). *Soft Computing*, 14(3):193–209.
- [37] Dai, C., Wang, Y., Ye, M. (2015). [A new multi-objective particle swarm optimization algorithm based on decomposition](#). *Information Sciences*, 325:541–557.