

# Giải pháp cân bằng tiến độ và chi phí nhà liên kế lắp ghép bằng mô hình tối ưu hóa và lý thuyết ra quyết định

Trần Quốc Bằng<sup>1\*</sup>, Lâm Ngọc Mai<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Khoa Kỹ thuật Xây Dựng, Trường Đại học Bách khoa-ĐHQG TP.HCM

## TỪ KHOA

Nhà liên kế lắp ghép  
Tiến độ  
Chi phí  
Quản lý dự án

## TÓM TẮT

Nhà liên kế lắp ghép, được xây dựng từ các thành phần đúc sẵn, mang lại sự kết hợp giữa tốc độ thi công vượt trội và tính thẩm mỹ của các thiết kế truyền thống. Việc cân bằng hiệu quả giữa tiến độ và chi phí dự án là yếu tố then chốt để đảm bảo hiệu quả thi công ngoài công trường. Nghiên cứu này giới thiệu một mô hình kết hợp, tích hợp thuật toán tiến hóa vi phân đa mục tiêu (MODE) và phương pháp ra quyết định đa tiêu chí (MCDM), nhằm tối ưu hóa sự đánh đổi giữa thời gian và chi phí trong các dự án nhà phố đúc sẵn. Một trường hợp thực tế đã được áp dụng để kiểm chứng hiệu quả của phương pháp. Kết quả cho thấy mô hình đề xuất có khả năng tạo ra các giải pháp Pareto tối ưu, cung cấp cho các nhà quản lý dự án một công cụ đáng tin cậy để lựa chọn kế hoạch triển khai tối ưu nhất.

## KEYWORDS

Assembled townhouses  
Scheduling  
Construction cost  
Project management

## ABSTRACT

Assembled townhouses, built from prefabricated components, combine the benefits of fast construction with the aesthetic appeal of traditional designs. Achieving an optimal balance between project schedule and cost is crucial for efficient off-site construction. This research presents a hybrid model that integrates Multi-Objective Differential Evolution (MODE) with Multi-Criteria Decision-Making (MCDM) to optimize the trade-off between time and cost in prefabricated townhouse projects. Real-world case studies were utilized to evaluate the effectiveness of the proposed approach. Results show that the model effectively generates Pareto-optimal solutions, providing project managers with a reliable framework for selecting the most suitable implementation schedules.

## 1. Giới thiệu

Xây dựng tiền chế đòi hỏi phải sản xuất các thành phần xây dựng ngoài công trường trong môi trường nhà máy được kiểm soát, sau đó vận chuyển và lắp ráp chúng tại công trường xây dựng theo thông số kỹ thuật thiết kế [1]. Phương pháp này mang lại những lợi thế đáng kể so với xây dựng truyền thống, bao gồm năng suất được cải thiện, thời gian dự án ngắn hơn, tăng cường an toàn và giảm tác động đến môi trường. Việc áp dụng công nghệ bê tông đúc sẵn mang lại lợi ích cho tất cả các bên liên quan bằng cách đảm bảo chất lượng và độ bền vượt trội. Sử dụng máy móc tiên tiến và công nghệ hỗ trợ máy tính trong các nhà máy đúc sẵn, các thành phần này được sản xuất trong điều kiện được kiểm soát, tạo ra các sản phẩm có độ tin cậy và độ bền cao [2, 3]. Bất chấp những lợi thế này, việc quản lý sự cân bằng giữa tiến độ dự án và chi phí vẫn là một thách thức quan trọng đối với các nhà quản lý dự án, vì nguồn lực, đầu vào công nghệ và hạn chế vận hành phải được cân bằng kỹ lưỡng.

Cân bằng giữa tiến độ và chi phí là yếu tố then chốt trong xây dựng nhà liên kế lắp ghép, do tính chất đặc thù yêu cầu sự phối hợp chặt chẽ giữa các khâu sản xuất, vận chuyển và lắp ráp tại hiện trường [4]. Việc rút ngắn tiến độ thường đòi hỏi sử dụng nhiều nguồn lực hơn

cùng công nghệ tiên tiến, dẫn đến gia tăng chi phí dự án. Ngược lại, kéo dài thời gian để giảm chi phí có thể làm phát sinh những rủi ro như chi phí gián tiếp cao hơn, kém hiệu quả trong quản lý tài nguyên và giảm mức độ hài lòng của khách hàng [5]. Để vượt qua những thách thức này, cần áp dụng các phương pháp tiên tiến, có khả năng đánh giá toàn diện và tối ưu hóa mối quan hệ phức tạp giữa các yếu tố ảnh hưởng đến tiến độ và chi phí, nhằm đảm bảo hiệu quả tối đa cho dự án [6].

Để giải quyết vấn đề này, các nhà nghiên cứu và chuyên gia đã phát triển nhiều mô hình và phương pháp tối ưu hóa khác nhau nhằm đạt được sự cân bằng tốt nhất trong phạm vi thời gian-chi phí. Các thuật toán tiến hóa, chẳng hạn như tiến hóa vi phân đa mục tiêu (multiple objective differential evolution - MODE) [7], đã trở nên nổi bật do khả năng khám phá hiệu quả các không gian giải pháp phức tạp và xác định sự cân bằng tối ưu Pareto. Tuy nhiên, việc tạo ra các giải pháp tối ưu chỉ là bước đầu tiên; việc lựa chọn giải pháp phù hợp nhất để triển khai đòi hỏi phải có khuôn khổ ra quyết định mạnh mẽ. Các phương pháp ra quyết định đa tiêu chí (multi-criteria decision making - MCDM) [8] cung cấp một phương pháp tiếp cận có cấu trúc để ưu tiên các giải pháp dựa trên các tiêu chí cụ thể của dự án, cho phép các nhà quản lý điều chỉnh các lựa chọn với các mục tiêu rộng hơn của dự án.

Nghiên cứu này giới thiệu một mô hình bằng cách kết hợp MODE

\*Liên hệ tác giả: bang.bmkt@hcmut.edu.vn

Nhận ngày 02/12/2024, sửa xong ngày 07/01/2025, chấp nhận đăng ngày 08/01/2025

Link DOI: <https://doi.org/10.54772/jomc.01.2025.861>

và MCDM để giải quyết vấn đề cân bằng thời gian và chi phí trong xây dựng nhà liên kế lắp ghép. Mô hình đề xuất được thiết kế để tạo ra một bộ giải pháp tối ưu Pareto toàn diện đồng thời trang bị cho các nhà quản lý dự án các công cụ ra quyết định để đánh giá và lựa chọn tiến độ phù hợp nhất. Một dự án thực tế được sử dụng để xác thực hiệu suất của mô hình và chứng minh tính ứng dụng thực tế của nó. Bằng cách tích hợp các kỹ thuật tối ưu hóa với lý thuyết quyết định, nghiên cứu này nhằm mục đích nâng cao hiệu quả, độ tin cậy và lập kế hoạch chiến lược cho các dự án xây dựng lắp ghép, cuối cùng góp phần mang lại kết quả dự án tốt hơn và các hoạt động xây dựng bền vững.

## 2. Các nghiên cứu liên quan

Cân bằng tiến độ và chi phí trong xây dựng nhà phố lắp ghép là một thách thức phức tạp đã thu hút sự chú ý đáng kể trong nghiên cứu gần đây. Việc tích hợp các mô hình tối ưu hóa và lý thuyết quyết định đã được chứng minh là cần thiết để giải quyết vấn đề này một cách hiệu quả. Ahire, et al. [9] đã sử dụng các kỹ thuật mạng nơ-ron nhân tạo (ANN) để tối ưu hóa thời gian và chi phí trong quản lý xây dựng lắp ghép, làm nổi bật tiềm năng của các mô hình ANN để nâng cao độ chính xác của phân tích và dự đoán. Nghiên cứu nhằm mục đích phát triển một mô hình dự báo thời gian và chi phí tối ưu phù hợp với công nghệ dự kiến đồng thời phân tích các yêu cầu cần thiết để đạt được mục tiêu này. Bằng cách tận dụng ANN, nghiên cứu đã chứng minh khả năng giảm thiểu cả thời gian thực hiện dự án và tổng chi phí mà không ảnh hưởng đến kết quả tối ưu hóa. Phương pháp ANN nổi bật là một phương pháp tinh vi, giúp giảm lỗi và cải thiện hiệu quả trong phạm vi hạn chế của các dự án xây dựng lắp ghép thông qua các kỹ thuật sản xuất tiên tiến.

ElSahly, et al. [10] thực hiện một đánh giá toàn diện về các mô hình tối ưu hóa thời gian-chi phí trong quản lý xây dựng, phân loại chúng thành ba nhóm chính: mô hình chính xác, mô hình gần đúng, và mô hình thuật toán lai. Các mô hình chính xác mang lại giải pháp tối ưu nhưng đòi hỏi thời gian tính toán lớn và không phù hợp với các vấn đề đa mục tiêu hoặc dự án quy mô lớn. Ngược lại, các mô hình gần đúng giúp giảm thiểu công sức tính toán và cung cấp các giải pháp gần như tối ưu, nhưng lại gặp hạn chế về hiệu quả khi áp dụng cho các dự án lớn. Các mô hình thuật toán lai, bằng cách kết hợp ưu điểm của nhiều thuật toán, mang lại giải pháp chất lượng cao và hiệu quả hơn. Bài đánh giá cũng chỉ ra các hướng nghiên cứu trong tương lai, bao gồm việc phát triển các mô hình lai kết hợp nhiều kỹ thuật tối ưu hóa, tích hợp quản lý rủi ro vào quy trình tối ưu hóa, và áp dụng phân tích dữ liệu nâng cao để tăng độ chính xác của các mô hình. Phân tích này mang đến cái nhìn sâu sắc và giá trị cho cả nhà nghiên cứu lẫn người thực hành, cung cấp bức tranh tổng thể hiện tại về các mô hình tối ưu hóa thời gian-chi phí, đồng thời đưa ra các khuyến nghị thiết thực nhằm định hướng nghiên cứu và cải thiện hiệu quả của các mô hình này trong quản lý xây dựng.

Wang Heping [11] đề xuất một thuật toán di truyền sắp xếp không bị vượt trội cải tiến (INSGA-II) nhằm giải quyết các mô hình tối

ưu hóa hai mục tiêu về thời gian và chi phí, đặc biệt được thiết kế cho việc tối ưu tiến độ xây dựng nhà lắp ghép. Khác với các nghiên cứu trước đây giả định thời gian thực hiện cố định và chỉ có một chế độ thực hiện cho mỗi nhiệm vụ, nghiên cứu này đưa vào xem xét sự không chắc chắn trong thời gian hoạt động và sự đa dạng của các chế độ thực hiện, phản ánh tính phức tạp của các quy trình lập lịch thực tế. Một mô hình lập lịch mờ với các ràng buộc tài nguyên đa mục tiêu và đa chế độ đã được xây dựng, trong đó thuật toán INSGA-II được áp dụng để giải quyết hiệu quả mô hình này. Thuật toán kết hợp các bước khởi tạo quần thể và thao tác lai ghép dựa trên quan hệ ưu tiên giữa các hoạt động, đồng thời áp dụng phương pháp mã hóa ba phần mới gồm danh sách hoạt động, chế độ, và tài nguyên. Thông qua nghiên cứu trường hợp từ một dự án xây dựng nhà lắp ghép thực tế và so sánh hiệu suất với các thuật toán khác, mô hình và thuật toán được đề xuất đã chứng minh khả năng giải quyết hiệu quả các vấn đề lập lịch mờ với các ràng buộc tài nguyên đa chế độ. Phương pháp này mang đến một khuôn khổ khoa học toàn diện và các giải pháp thực tiễn cho việc thiết kế các kế hoạch lập lịch xây dựng tối ưu và hiệu quả.

Zou and Feng [12] đã nghiên cứu việc ứng dụng Mô hình thông tin xây dựng (BIM) và mô phỏng phần tử hữu hạn để tối ưu hóa chi phí trong xây dựng nhà lắp ghép, tập trung vào việc tích hợp các công nghệ tiên tiến nhằm mang lại các giải pháp hiệu quả về chi phí. Nghiên cứu phát triển một thư viện thành phần lắp ráp dựa trên BIM, đồng thời đề xuất phương pháp thiết kế mới tập trung vào các thành phần riêng lẻ thay vì toàn bộ cấu trúc, qua đó nâng cao hiệu quả thiết kế và quản lý. Sử dụng thư viện thành phần lắp ghép làm trường hợp nghiên cứu, nhóm nghiên cứu đã tạo ra và tối ưu hóa một mô hình BIM toàn diện bao gồm các giai đoạn sản xuất, vận chuyển và lắp ráp. Nghiên cứu nhấn mạnh những ưu điểm vượt trội của các tòa nhà lắp ghép, như tăng hiệu quả, hiện đại hóa và đánh giá các yếu tố ảnh hưởng đến chi phí, bao gồm các phương án kỹ thuật và phương thức thi công. Dựa trên các nghiên cứu thực tế, các phát hiện đề xuất các chiến lược giảm chi phí, gia tăng lợi nhuận và cải thiện chất lượng dự án trong lĩnh vực xây dựng nhà lắp ghép.

Yin, et al. [13] đã đề xuất một mô hình tối ưu hóa lịch trình phối hợp đa mục tiêu nhằm hợp lý hóa quá trình sản xuất, vận chuyển và lắp ráp tại chỗ các thành phần đúc sẵn, với mục tiêu cải thiện hiệu quả dự án và giảm chi phí. Mô hình này tích hợp các yêu cầu thực tiễn, như việc nâng ngay các thành phần đúc sẵn tại công trường xây dựng, thông qua việc thiết lập các ràng buộc về trình tự nâng, lịch trình giao hàng và lộ vận chuyển. Để tối ưu hóa, một thuật toán di truyền đa mục tiêu đã được phát triển nhằm đạt được ba mục tiêu chính: giảm chi phí phạt do giao hàng sớm hoặc muộn, giảm thời gian lưu thông trong sản xuất và vận chuyển, đồng thời cân bằng các yếu tố này thông qua phương pháp tiếp cận đa mục tiêu có trọng số. Các nghiên cứu điển hình được thực hiện trên các dự án xây dựng với tỷ lệ đúc sẵn thấp (khoảng 20 %) và cao (trên 40 %) đã chứng minh hiệu quả của mô hình. Kết quả cho thấy mô hình có khả năng phối hợp hiệu quả lịch trình sản xuất và vận chuyển, đồng thời xử lý tốt các ràng buộc về nâng tại chỗ, khẳng định tính ứng dụng thực tiễn trong việc nâng cao hiệu suất và giảm chi

phí cho các dự án xây dựng đúc sẵn.

He, et al. [14] đã phát triển một mô hình tối ưu hóa xây dựng nhà lắp ghép (PB) nhằm nâng cao hiệu quả lập lịch trong điều kiện hạn chế nguồn lực, với mục tiêu giảm thiểu thời gian thi công, chi phí và lãng phí tài nguyên. Mô hình này khắc phục những hạn chế của các phương pháp lập lịch truyền thống bằng cách phân chia các hoạt động xây dựng thành ba không gian làm việc liên kết: lắp ráp, hậu cần và sản xuất, trong đó các nút thời gian đóng vai trò làm ràng buộc chung để phối hợp hoạt động giữa các không gian. Thuật toán di truyền (GA) được áp dụng để tối ưu hóa việc phân bổ nguồn lực trong không gian lắp ráp, đảm bảo sự sắp xếp nguồn lực hiệu quả nhất nhằm giảm thiểu thời gian và chi phí. Đồng thời, lập lịch trình động được triển khai nhằm tăng cường phối hợp, với các ràng buộc giữa các nút thời gian của không gian lắp ráp, hậu cần và vận chuyển. Cách tiếp cận tích hợp này tạo nên nền tảng cho chiến lược lập lịch nguồn lực. Kết quả nghiên cứu cho thấy mô hình này có khả năng tối ưu hóa việc sử dụng nguồn lực, cải thiện sự phối hợp và giảm chi phí một cách hiệu quả trong các dự án xây dựng nhà lắp ghép.

Wang, et al. [15] đã nghiên cứu cách cân bằng lịch trình và chi phí trong xây dựng nhà phố lắp ghép bằng cách áp dụng các mô hình tối ưu hóa. Nghiên cứu tập trung vào hệ thống sản xuất, vận chuyển và lắp ráp (PTA) nhiều giai đoạn, trong đó thời lượng hoạt động và tài nguyên được xem là các biến ngẫu nhiên. Sử dụng lý thuyết độ tin cậy, nhóm nghiên cứu đã phát triển một mô hình lập lịch ngẫu nhiên để tối đa hóa khả năng hoàn thành dự án đúng hạn trong điều kiện hạn chế tài nguyên. Để giải quyết bài toán NP-khó, một thuật toán lai ghép kết hợp tiến hóa vi phân và tối ưu hóa bầy đàn đã được đề xuất. Kết quả từ một dự án thực tế chứng minh thuật toán lai ghép có khả năng tìm ra các giải pháp tối ưu toàn cục hiệu quả, cải thiện đáng kể độ tin cậy và hiệu suất trong lập lịch trình xây dựng nhà lắp ghép.

### 3. Mô hình nghiên cứu đề xuất

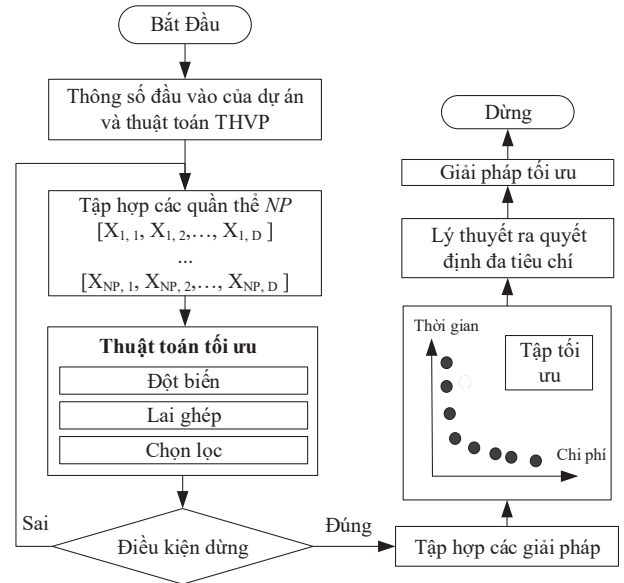
Phần này trình bày thuật toán tối ưu hóa tiến hóa đa mục tiêu (MODE), dựa trên thuật toán tiến hóa vi phân (DE) để đồng thời tối ưu hóa thời gian và chi phí trong tiến độ các dự án xây dựng nhà liên kế lắp ghép. Hình 1 minh họa sơ đồ cấu trúc tổng thể của mô hình đề xuất, trong đó MODE được tích hợp với phương pháp ra quyết định đa tiêu chí (MCDM) để giải quyết bài toán cân bằng thời gian và chi phí. Mô hình này không chỉ tạo ra các giải pháp tối ưu Pareto mà còn hỗ trợ nhà quản lý lựa chọn phương án phù hợp nhất với các mục tiêu cụ thể của dự án.

#### 3.1. Khởi tạo

Nghiên cứu này tối ưu đồng thời thời gian và chi phí trong dự án xây dựng nhà liên kế lắp ghép, yêu cầu các thông số đầu vào gồm thông tin dự án (mối quan hệ công việc, thời gian, chi phí, phương án thi công) và thông số thuật toán (quần thể NP, số biến D, hàm mục tiêu M, biên độ đột biến F, xác suất lai ghép, thể hệ tối đa  $G_{max}$ , giá trị nhỏ

nhất LB, lớn nhất UB). Thuật toán tự động tính toán để tìm các tổ hợp phương án thi công tối ưu. Quần thể ban đầu được khởi tạo ngẫu nhiên theo công thức.

$$X_{i,j} = LB_j + rand(0,1) * (UB_j - LB_j) \quad (1)$$



Hình 1. Mô hình đề xuất cân bằng thời gian và chi phí.

#### 3.2. Biến quyết định và hàm mục tiêu

Giải pháp bài toán thời gian-chi phí (TC) được biểu diễn dưới dạng vector

$$X = [X_{i1}, X_{i2}, \dots, X_{iD}] \quad (2)$$

với D là số công việc trong dự án,  $X_{ij}$  là phương án thi công của công việc j, và  $X_{ij}$  là số nguyên thuộc khoảng  $[1, M_j]$ , trong đó  $M_j$  là tổng số phương án thi công của công việc j. Do thuật toán tiến hóa vi phân làm việc với số thực, cần chuyển đổi từ biến thực sang số nguyên khả thi bằng công thức:

$$X_{ij} = ceil(X'_{ij}) \quad (3)$$

Hàm (ceil) làm tròn lên đảm bảo giá trị của  $X_{ij}$  luôn nằm trong miền khả thi.

Hàm mục tiêu đầu tiên là thiểu thời gian dự án được tính theo công thức sau

$$T_p = \min(\max(FT_i)) = \min(\max(ST_i + D_i)) \quad (4)$$

Hàm mục tiêu thứ hai là thiểu chi phí dự án được tính theo công thức sau

$$TC_p = C_D + C_I = \sum_{i=1}^M c_i + C_0 + b.T_p \quad (5)$$

#### 3.3. Giai đoạn đột biến

Thuật toán tiến hóa vi phân thực hiện đột biến trong mỗi vòng lặp để mở rộng không gian tìm kiếm. Mỗi vector  $X_i$  tại thế hệ G (vector mẹ) sinh ra vector đột biến  $V_i$  theo công thức:

$$V_i = X_{r1} + F(X_{r2} - X_{r3}) \quad (6)$$

với  $r_1, r_2, r_3$  là ba số nguyên ngẫu nhiên khác nhau, khác  $i$ , trong khoảng  $[1; NP]$ , và  $F$  là biên độ đột biến  $([0, 2])$ . Quá trình này tăng cường đa dạng quần thể và khả năng tìm kiếm tối ưu.

3.4. Giai đoạn lai ghép

Sau đột biến, quá trình lai ghép trao đổi thành phần giữa “vector mẹ”  $X_i$  và “vector đột biến”  $V_i$  để tạo “vector con”  $U_i$ :

$$U_{i,j} = \begin{cases} V_{i,j} & \text{nếu } rand(0,1) \leq Cr \text{ hoặc } j = j_{rand} \\ X_{i,j} & \text{ngược lại} \end{cases} \quad (7)$$

Trong đó  $C_r$  là xác suất lai ghép và  $j_{rand}$  là số nguyên ngẫu nhiên  $[1; D]$ . Quá trình này tăng đa dạng và cải thiện tìm kiếm giải pháp.

3.5. Lựa chọn quần thể

Nghiên cứu sử dụng kỹ thuật lọc nhanh các giá trị không vượt trội [16] và kỹ thuật entropy [17] để chọn NP giải pháp tốt nhất cho thế hệ tiếp theo. Đầu tiên, kỹ thuật lọc nhanh phân chia quần thể thành các tập không vượt trội  $F_1, F_2, \dots, F_n$ , lần lượt chọn từ  $F_1$  đến  $F_k$ . Với  $F_k$  là tập cuối, kỹ thuật entropy xác định chính xác các cá thể NP.

3.6. Điều kiện dừng và ra quyết định đa tiêu chí

Điều kiện dừng do người dùng xác định, như số lần đánh giá hàm hoặc số vòng lặp  $G_{max}$ . Nghiên cứu này sử dụng số vòng lặp  $G_{max}$  làm điều kiện dừng. Ra quyết định đa tiêu chí (MCDM) được sử dụng để chọn giải pháp tốt nhất từ tập Pareto, dựa trên các tiêu chí như thời gian và chi phí, giúp nhà quản lý dự án lựa chọn phương án phù hợp với mục tiêu cụ thể.

4. Trường hợp nghiên cứu

Tính hiệu quả và khả thi của mô hình được kiểm chứng qua dự án thực tế xây dựng cửa hàng đồ ăn nhanh tại Bình Dương, Việt Nam. Bảng 1 cung cấp dữ liệu dự án gồm mối quan hệ logic giữa các công tác, thời gian thực hiện (T – đơn vị tính là ngày) và chi phí (C – đơn vị tính là ngàn đồng) cho từng phương án thi công.

Mô hình thuật toán MODE trong nghiên cứu này được lập trình bằng ngôn ngữ lập trình Matlab 2016a. Thiết lập thông số đầu vào của mô hình MOSGO như sau: số quần thể là 100, số thế hệ là 50. Các giải pháp tốt nhất được thể hiện ở Hình 2.

Các phương án nằm trên đường Pareto được sắp xếp dựa trên các tiêu chí tối ưu về thời gian và chi phí, như được trình bày trong Bảng 2. Bảng này cung cấp thông tin chi tiết về từng phương án, cho phép so sánh và đánh giá các lựa chọn dựa trên mục tiêu cụ thể của dự án.

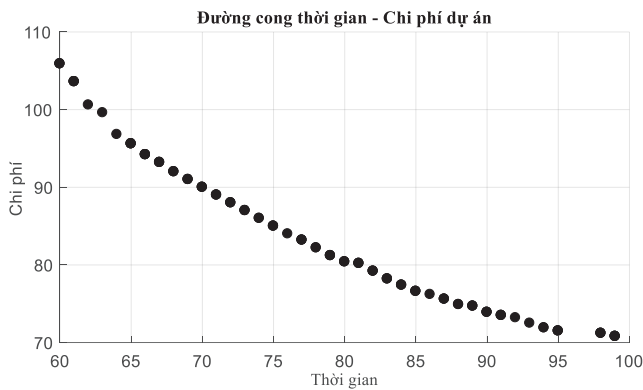
Bảng 1. Thông tin dự án.

No	Tên công tác	Công tác trước	Lựa chọn 1 (T, C)	Lựa chọn 2 (T, C)	Lựa chọn 3 (T, C)
1	Dầm móng	-	7, 1900	3, 5900	-
2	Tấm tường Panel	1;	9, 5000	7, 6000	5, 10000
3	Khu vực đậu xe	1;	8, 2900	7, 3500	5, 4400
4	Dàn mái	2;	8, 1700	10, 3500	9, 4700
5	Mái	4;	7, 1300	3, 2000	2, 2800
6	Cửa và cửa sổ	5;	9, 3200	7, 5800	5, 6200
7	Quầy	6;	7, 2600	6, 4000	4, 5800
8	Thiết bị tủ lạnh	6;	10, 5400	6, 7400	-
9	Thiết bị tại quầy	7;	9, 4200	5, 5000	4, 6200
10	Thiết bị bếp	8;9	10, 6400	6, 8400	-
11	Lát sàn	7;10	8, 5000	7, 6000	5, 8000
12	Hoàn thiện	3;11	7, 3000	6, 4500	4, 5800
13	Cảnh quan	5;	6, 2600	5, 4500	4, 5800
14	Hệ thống chiếu sáng	12;	4, 2800	3, 3200	2, 4200
15	Hệ thống cấp thoát nước	13;	6, 3500	5, 4800	4, 5200
16	Hệ thống điện	14;	5, 4000	4, 5200	3, 6200
17	Lắp đặt hệ thống an ninh	16;	7, 3500	6, 4800	4, 5200
18	Hoàn chỉnh nội thất	12;	9, 8000	8, 9500	6, 12000
19	Kiểm tra toàn diện	15;16;17;18	5, 2000	4, 2800	-
20	Khai trương chính thức	19;	1, 1000	1, 1500	-

4.1. Kết quả tính toán

**Bảng 2.** Các giải pháp tối ưu tìm bởi MODE.

TT	Sắp xếp ưu tiên	Phương án thi công	Thời gian	Chi phí
1	Thời gian	2.3.1.1.3.3.3.2.3.2.3.3.1.3.1.3.3.1.2.1	60	104600
2		2.3.1.1.3.3.3.2.3.2.3.3.1.3.1.2.3.1.2.1	61	103600
3	Chi phí	1.1	99	70700
4		1.1.1.1.2.1.1.1.1.1.1.1.1.1.2.1.1.1.1.1.1.1	98	71100
5	Cân bằng	1.2.1.1.3.3.1.1.2.2.2.1.1.2.1.1.3.1.2.1	78	82200
6		2.2.1.1.3.3.1.1.2.2.3.3.1.3.1.1.3.1.2.1	68	92000



**Hình 2.** Kết quả tối ưu của MODE.

4.2. So sánh kết quả

Để đánh giá hiệu quả của thuật toán được đề xuất (MOSGO), nghiên cứu đã so sánh nó với các thuật toán phổ biến như thuật toán tối ưu hóa bầy đàn đa mục tiêu (MOPSO) [18] và thuật toán di truyền sắp xếp không vượt trội II (NSGA-II) [16]. Cả ba thuật toán đều được thiết lập với kích thước quần thể 100 và số vòng lặp tối đa 50 để đảm bảo sự công bằng trong so sánh. MODE: Biên độ đột biến thường chọn  $F=0.5$ , trong khi xác suất lai ghép ( $C_c$ ) thường từ 0.7 đến 0.9. MOPSO: Tham số nhận thức ( $c_1$ ) và xã hội ( $c_2$ ) đều được đặt là 2, trọng lượng quán tính ( $w$ ) dao động từ 0.3 đến 0.7. NSGA-II: Xác suất lai ghép ( $p_c$ ) là 0.9 và xác suất đột biến ( $p_m$ ) là 0.5.

Khác với thuật toán đơn mục tiêu, các thuật toán đa mục tiêu yêu cầu đánh giá hiệu quả dựa trên nhiều chỉ số như độ phân bố (DM), độ mở rộng (SP), và thể tích hình bao (HV). Bảng 3 so sánh hiệu suất của MODE, MOPSO, và NSGA-II, trong đó MODE vượt trội hơn trên tất cả các tiêu chí. DM đo mức độ phân tán trên tập Pareto, càng lớn càng tốt; SP đánh giá mức độ đồng đều giữa các giải pháp, càng nhỏ càng hiệu quả; và HV đo không gian bao phủ, giá trị càng lớn thể hiện giải pháp càng chất lượng. Các chỉ số này cung cấp cơ sở vững chắc để so sánh hiệu quả giữa các thuật toán đa mục tiêu.

$$DM = \sqrt{\sum_{i=1}^k (Min f_i - Max f_i)^2} \quad (8)$$

$$SP = \frac{d_f + d_l + \sum_{i=1}^{N-1} |d_i - d_l|}{d_f + d_l + (N-1)d} \quad (9)$$

$$HV = volume(U_{i=1}^{|Q|} v_i) \quad (10)$$

Độ phân bố (DM) đo mức độ phân tán của các giải pháp trên tập Pareto, được tính từ giá trị nhỏ nhất và lớn nhất của từng hàm mục tiêu ( $f_i$ ) chia cho số hàm mục tiêu ( $k$ ). Các khoảng cách  $d_j$  và  $d_l$  từ điểm biên đến điểm xa nhất, cũng như khoảng cách giữa các điểm liên tiếp ( $d_i$ ) và giá trị trung bình ( $d_{ngang}$ ), được sử dụng để đánh giá độ đồng đều. Thể tích hình bao (HV) đo không gian bao phủ bởi các giải pháp, được tính từ khoảng cách ( $v_i$ ) từ các điểm trong tập Pareto đến điểm tham chiếu do người ra quyết định xác định.

**Bảng 3.** Kết quả các chỉ số so sánh giữa các thuật toán.

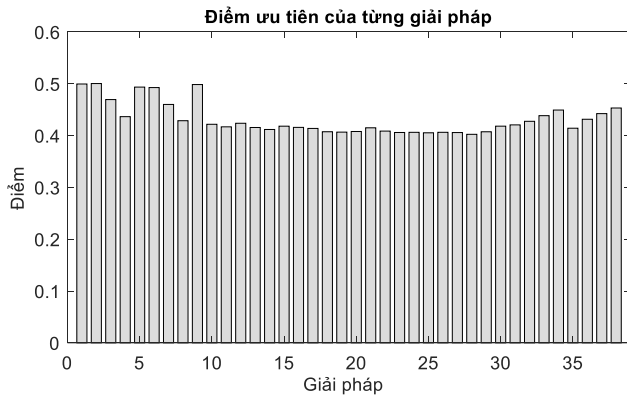
Thuật toán	DM	SP	HV
MODE	14.187	0.653	0.825
MOPSO	11.174	0.721	0.792
NSGA-II	12.352	0.798	0.714

4.3. Ra quyết định và đề xuất giải pháp

Hình 3 minh họa quá trình xếp hạng tập Pareto, được tạo ra từ thuật toán MODE, dựa trên điểm số ưu tiên được tính toán cho một trường hợp nghiên cứu cụ thể. Trong các bài toán đa mục tiêu, các mục tiêu thường xung đột với nhau, chẳng hạn như giảm chi phí có thể làm tăng thời gian thực hiện hoặc ngược lại. Điều này dẫn đến việc hình thành một tập Pareto gồm các giải pháp không vượt trội, trong đó không có giải pháp nào tốt hơn hoàn toàn các giải pháp khác trên tất cả các mục tiêu. Tuy nhiên, khi tập Pareto rất lớn, việc lựa chọn giải pháp phù hợp nhất từ tập hợp này trở thành một thách thức lớn đối với nhà quản lý dự án.

Để hỗ trợ quá trình ra quyết định, phương pháp ra quyết định đa tiêu chí (MCDM) được áp dụng. MCDM sử dụng nhiều tiêu chí để đánh giá và xếp hạng các giải pháp không vượt trội trong tập Pareto theo thứ tự ưu tiên. Thông qua quá trình này, nhà quản lý có thể dễ dàng xác định giải pháp tối ưu nhất phù hợp với các yêu cầu và mục tiêu cụ thể của dự án. Hình 3 không chỉ thể hiện thứ tự xếp hạng của các giải pháp mà còn minh chứng cho tính khả thi và hiệu quả của thuật toán MODE trong việc hỗ trợ nhà quản lý ra quyết định một cách chính xác và nhanh chóng.





Hình 3. Kết quả phương pháp ra quyết định đa tiêu chí.

### 5. Kết luận

Bài báo này đã trình bày một giải pháp toàn diện để cân bằng tiến độ và chi phí trong xây dựng nhà liên kế lắp ghép, kết hợp mô hình tối ưu hóa đa mục tiêu và phương pháp ra quyết định đa tiêu chí (MCDM). Thuật toán tối ưu hóa được phát triển dựa trên tiến hóa vi phân đa mục tiêu (MODE), nhằm tìm kiếm các giải pháp tối ưu nằm trên tập Pareto, trong khi MCDM hỗ trợ nhà quản lý lựa chọn giải pháp phù hợp nhất dựa trên các ưu tiên cụ thể của dự án.

Ứng dụng mô hình vào các dự án thực tế đã chứng minh tính hiệu quả và khả thi của giải pháp đề xuất. Dữ liệu thực nghiệm từ dự án xây dựng cửa hàng đồ ăn nhanh tại Bình Dương cho thấy, mô hình không chỉ cải thiện hiệu quả quản lý tiến độ và chi phí mà còn tăng cường khả năng ra quyết định nhờ việc cung cấp các giải pháp đa dạng và được xếp hạng rõ ràng. So sánh với các thuật toán phổ biến như NSGA-II và MOPSO, thuật toán đề xuất MODE thể hiện ưu thế vượt trội về độ phân bố, độ đồng đều và chất lượng giải pháp.

Giải pháp này mở ra hướng tiếp cận mới trong quản lý xây dựng, đặc biệt trong bối cảnh nhà liên kế lắp ghép ngày càng phổ biến nhờ tính linh hoạt và hiệu quả. Nghiên cứu trong tương lai có thể tập trung vào việc tích hợp thêm các yếu tố bền vững, tối ưu hóa chuỗi cung ứng, và áp dụng mô hình vào các loại công trình xây dựng khác để nâng cao giá trị thực tiễn.

### Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường Đại học Bách Khoa – Đại học Quốc Gia thành phố Hồ Chí Minh trong khuôn khổ đề tài cấp trường với mã số đề tài là T-KTXD-2023-12.

### Tài liệu tham khảo

[1]. Z. Li, G. Q. Shen, and X. Xue, "Critical review of the research on the management of prefabricated construction," *Habitat International*, vol. 43, pp. 240-249, 2014/07/01/ 2014.

[2]. Y. Wang, Z. Yuan, and C. Sun, "Research on assembly sequence planning and optimization of precast concrete buildings," *Journal of Civil Engineering and Management*, vol. 24, no. 2, pp. 106-115, 2018.

[3]. G. Polat, "Precast concrete systems in developing vs. industrialized countries," *Journal of Civil Engineering and Management*, vol. 16, no. 1, pp. 85-94, 2010.

[4]. W.-T. Chan and Z. Zeng, "Rescheduling Precast Production with Multiobjective Optimization," in *Computing in Civil Engineering (2005)*(Proceedings, 2012, pp. 1-10.

[5]. L. Wang, Y. Zhao, and X. Yin, "Precast production scheduling in off-site construction: Mainstream contents and optimization perspective," *Journal of Cleaner Production*, vol. 405, p. 137054, 2023/06/15/ 2023.

[6]. Z. Ma, Z. Yang, S. Liu, and S. Wu, "Optimized rescheduling of multiple production lines for flowshop production of reinforced precast concrete components," *Automation in Construction*, vol. 95, pp. 86-97, 2018/11/01/ 2018.

[7]. M.-Y. Cheng and D.-H. Tran, "Opposition-based Multiple Objective Differential Evolution (OMODE) for optimizing work shift schedules," *Automation in Construction*, vol. 55, pp. 1-14, 7// 2015.

[8]. S. Monghasemi, M. R. Nikoo, M. A. Khaksar Fasaei, and J. Adamowski, "A novel multi criteria decision making model for optimizing time–cost–quality trade-off problems in construction projects," *Expert Systems with Applications*, vol. 42, no. 6, pp. 3089-3104, 2015/04/15/ 2015.

[9]. R. Ahire, A. Deore, A. Patil, S. Patil, and K. Gurani, "An Effective Optimization of Time and Cost for Prefabricated Construction using ANN," *International Journal of All Research Education and Scientific Methods*, vol. 11, no. 5, pp. 2455-6211, 2023.

[10]. O. M. ElSahly, S. Ahmed, and A. Abdelfatah, "Systematic Review of the Time-Cost Optimization Models in Construction Management," *Sustainability*, vol. 15, no. 6. doi: 10.3390/su15065578

[11]. G. X. Wang Heping, Li Yan, "A Construction Scheduling Optimization of Prefabricated Buildings Based on Improved NSGA-II Algorithm," *Industrial Engineering Journal*, vol. 26, no. 2, pp. 85-92, 2023.

[12]. Y. Zou and W. Feng, "Cost optimization in the construction of prefabricated buildings by using BIM and finite element simulation," *Soft Computing*, vol. 27, no. 14, pp. 10107-10119, 2023/07/01 2023.

[13]. J. Yin, R. Huang, H. Sun, and S. Cai, "A multi-objective optimization model for prefabricated construction integrating production, transportation, and assembly," *SSRN*, vol. 0, no. 0, pp. 1-10, 2023.

[14]. W. He, W. Li, and X. Meng, "Scheduling Optimization of Prefabricated Buildings under Resource Constraints," *KSCE Journal of Civil Engineering*, vol. 25, no. 12, pp. 4507-4519, 2021/12/01 2021.

[15]. J. Wang, H. Liu, and Z. Wang, "Stochastic Project Scheduling Optimization for Multi-stage Prefabricated Building Construction with Reliability Application," *KSCE Journal of Civil Engineering*, vol. 27, no. 6, pp. 2356-2371, 2023/06/01 2023.

[16]. K. Deb, A. Pratap, S. Agarwal, and T. Meyarivan, "A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II," *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, vol. 6, no. 2, pp. 182-197, 2002.

[17]. Y.-N. Wang, L.-H. Wu, and X.-F. Yuan, "Multi-objective self-adaptive differential evolution with elitist archive and crowding entropy-based diversity measure," (in English), *Soft Computing*, vol. 14, no. 3, pp. 193-209, 2010/02/01 2010.

[18]. C. Dai, Y. Wang, and M. Ye, "A new multi-objective particle swarm optimization algorithm based on decomposition," *Information Sciences*, vol. 325, pp. 541-557, 2015/12/20/ 2015.