

Tổng quan về giải pháp tối ưu trong lập phương án thi công xây dựng

Lê Ngọc Thanh¹, Hồ Ngọc Khoa^{2*}, Nguyễn Mạnh Tuấn²

¹ Viện Công nghệ kỹ thuật xây dựng, số 55 Giải Phóng, phường Bạch Mai, Hà Nội

² Khoa Xây dựng dân dụng và Công nghiệp, trường Đại học Xây dựng Hà Nội, số 55 Giải Phóng, phường Bạch Mai, Hà Nội

TỪ KHOÁ

Tối ưu hoá
Đa mục tiêu
Tổ chức thi công
Thuật toán tối ưu
Kiểm soát khí thải

TÓM TẮT

Trong lĩnh vực xây dựng, quá trình tổ chức thi công đóng vai trò then chốt trong việc chuyển hóa thiết kế thành hiện thực, đòi hỏi công tác lập kế hoạch và lựa chọn phương án thi công phải được thực hiện một cách khoa học, có hệ thống và dựa trên nhiều tiêu chí kỹ thuật, kinh tế và môi trường. Bên cạnh tiêu chí chất lượng, thời gian và chi phí thì tiêu chí kiểm soát phát thải đang được quan tâm theo định hướng phát triển bền vững trở thành một yêu cầu cấp bách. Đặc biệt, khi đưa tiêu chí kiểm soát khí thải vào cùng với các mục tiêu truyền thống như chi phí, tiến độ, độ an toàn và khả thi về kỹ thuật, bài toán thiết lập phương án thi công trở thành một bài toán tối ưu nhiều mục tiêu với các mâu thuẫn nội tại. Chính vì vậy, việc xây dựng và phát triển một thuật toán tối ưu nhiều mục tiêu chuyên biệt, có khả năng xử lý đồng thời các mục tiêu mâu thuẫn hiệu quả là trọng tâm cần thiết của nghiên cứu. Mặt khác, các chuyên gia khoa học kỹ thuật cũng đang nỗ lực nghiên cứu các giải pháp xử lý nhiều mục tiêu tốt hơn. Bài viết này trình bày tổng quan về tình hình phát triển của các thuật toán tối ưu nhiều mục tiêu, ưu điểm của nó mang lại và định hướng phát triển trong việc sử dụng phương pháp tối ưu bằng các thuật toán nhiều mục tiêu trong lập phương án thi công xây dựng.

KEYWORDS

Optimization
Multi-objective
Construction organization
Optimization algorithm
Emission control

ABSTRACT

In the construction field, the construction organization process plays a key role in transforming the design into reality, requiring planning and selection of construction options to be carried out scientifically, systematically and based on many technical, economic and environmental criteria. In addition to the criteria of quality, time and cost, the emission control criterion is being concerned with the orientation of sustainable development and has become an urgent requirement. In particular, when the emission control criterion is included together with traditional objectives such as cost, progress, safety and technical feasibility, the problem of establishing a construction option becomes a multi-objective optimization problem with internal contradictions. Therefore, the construction and development of a specialized multi-objective optimization algorithm, capable of handling conflicting objectives simultaneously and effectively, is a necessary focus of research. On the other hand, scientific and technical experts are also making efforts to research better solutions for handling multiple objectives. This article presents an overview of the development of multi-objective optimization algorithms, their advantages and development orientation in using optimization methods using multi-objective algorithms in construction planning.

1. Giới thiệu

Trong lĩnh vực xây dựng, quá trình tổ chức thi công đóng vai trò then chốt trong việc chuyển hóa thiết kế thành hiện thực, ảnh hưởng trực tiếp đến chất lượng, tiến độ, chi phí của công trình. Cùng với sự phát triển nhanh chóng của các đô thị và hạ tầng hiện đại, quy mô và độ phức tạp của các dự án xây dựng ngày càng tăng, đòi hỏi công tác lập kế hoạch và lựa chọn phương án thi công phải được thực hiện một cách khoa học, có hệ thống và dựa trên nhiều tiêu chí kỹ thuật – kinh tế – môi trường.

Trong bối cảnh toàn cầu hóa và chuyển đổi xanh, lĩnh vực xây dựng đang dần mở rộng phạm vi đánh giá hiệu quả không chỉ giới hạn

trong các yếu tố truyền thống như chi phí và thời gian, mà còn bao gồm các yếu tố bền vững như lượng phát thải khí nhà kính (CO₂-e), mức tiêu thụ năng lượng và tác động môi trường [1,2]. Giai đoạn thi công – vốn là một trong những nguồn phát thải đáng kể từ vận hành thiết bị, vận chuyển vật liệu và xử lý phế thải – cần được đánh giá dưới góc độ mới: phát thải phát sinh trong quá trình tổ chức thi công và khả năng kiểm soát. [3]

Tuy nhiên, việc lồng ghép tiêu chí môi trường vào mô hình thiết lập phương án thi công chưa được khai thác một cách toàn diện. Trong nhiều trường hợp, các phương án thi công vẫn chủ yếu được xác lập theo kinh nghiệm, thiếu công cụ định lượng và tối ưu hóa để cân bằng đồng thời nhiều mục tiêu. Khi số lượng yếu tố quyết định tăng lên (lựa

*Liên hệ tác giả: khoahn@huce.edu.vn

Nhận ngày 11/09/2025, sửa xong ngày 14/10/2025, chấp nhận đăng ngày 15/10/2025

Link DOI: <https://doi.org/10.54772/jomc.05.2025.1151>

chọn thiết bị, nhân lực, trình tự thi công, thời điểm triển khai, phương tiện vận chuyển...), không gian tìm kiếm lời giải trở nên phi tuyến và có tính tổ hợp cao – đây là điều mà các phương pháp ra quyết định truyền thống khó đáp ứng hiệu quả [4].

Trong bối cảnh đó, các thuật toán tối ưu đang chứng minh vai trò quan trọng trong việc giải quyết các bài toán có xung đột mục tiêu, đặc biệt trong lĩnh vực quản lý xây dựng. Bài toán Tối ưu hóa mục tiêu đơn (SO) là bài toán tìm kiếm giải pháp tốt nhất cho một tiêu chí hoặc số liệu cụ thể. Bài toán Tối ưu hoá đa mục tiêu (MOO) xét đồng thời nhiều hàm mục tiêu khác nhau (2-3 mục tiêu), để tìm ra một tập hợp các giải pháp tốt nhất. Bài toán Tối ưu hoá nhiều mục tiêu (MaOO) xét từ 4 mục tiêu trở lên. Bài toán tối ưu phương án thi công xây dựng là bài toán nhiều mục tiêu, thường từ 4 mục tiêu trở lên. Vì vậy, trong phạm vi nghiên cứu tôi sẽ giới thiệu tổng quan về hàm mục tiêu bài toán tối ưu nhiều mục tiêu trong lập phương án thi công xây dựng.

Từ thực tiễn đó, việc tích hợp mục tiêu kiểm soát phát thải vào mô hình thiết lập phương án thi công và phát triển một giải pháp tối ưu phù hợp vẫn còn là khoảng trống đáng chú ý trong nghiên cứu. Đây là định hướng nghiên cứu có cơ sở lý luận rõ ràng, có khả năng ứng dụng cao, và phù hợp với xu thế hiện đại hóa quản lý xây dựng theo hướng bền vững, thông minh và số hóa.

2. Lập phương án thi công công trình xây dựng

Lập phương án là một thuật ngữ chung chỉ việc xác định một bản đồ đường đi rành mạch rõ ràng để đạt được mục tiêu đặt ra. Các phương pháp lập phương án truyền thống đã được sử dụng trong thời gian dài và có những đóng góp quan trọng nhưng vẫn chưa thể có sự cân bằng hay kết hợp tối ưu giữa các mục tiêu. Tiềm ẩn rủi ro chưa được tính trước gây phát sinh chi phí và ảnh hưởng đến tiến độ, chất lượng. Do đó, phương pháp lập phương án thi công sau này được phát triển nhằm phát triển các mô hình tối ưu và cân bằng đa mục tiêu có sự kết hợp chặt chẽ với nhau nhằm phục vụ việc quản lý công trình hiệu quả hơn. Trong phần này, tổng quan về các phương pháp lập phương án thi công công trình xây dựng sẽ được tóm lược và phân tích đánh giá.

2.1 Phát biểu bài toán lập phương án thi công xây dựng:

Cố gắng thực hiện một dự án xây dựng mà không có kế hoạch tỉ mỉ thì cũng như là cố gắng đi tới một địa điểm chưa biết mà không có bản đồ. Nếu không có kế hoạch, thì không thể phối hợp các nguồn lực, tài nguyên dự án, không theo dõi được quá trình thực hiện và không thể đưa ra giải pháp điều chỉnh khi gặp vấn đề. Thời gian, chi phí, chất lượng và rủi ro là những mục tiêu quan trọng và xung đột trong lập phương án thi công thường được các nhà nghiên cứu chọn là mục tiêu hay sử dụng. Mục tiêu mà người quản lý dự án phải đối mặt là giảm thiểu tổng thời gian, chi phí, rủi ro và tối đa hoá chất lượng tổng thể của dự án. Hàm mục tiêu của bài toán được phát biểu như sau:

Tìm giá trị cực tiểu (hoặc cực đại) hàm:

$$f(X) \rightarrow \min(\max); X \in R^n$$

Với các điều kiện ràng buộc:

$$g_i(X) \geq 0; \quad i = 1, 2, \dots, m$$

$$h_i(X) = 0; i = 1, 2, \dots, l;$$

Bài toán đặt ra yêu cầu là tìm tập hợp các biến $\{x_i\}$; $i = 1, \dots, n$ thoả mãn các điều kiện ràng buộc đồng thời hàm $f(x)$ đạt giá trị cực tiểu (hoặc cực đại).

Hàm $f(x)$ được gọi là hàm mục tiêu hoặc tiêu chuẩn tối ưu, biểu diễn mối quan hệ giữa tiêu chuẩn chất lượng của quá trình khảo sát và các biến độc lập $\{x_i\}$.

Các hàm số $g_i(x)$, $h_i(x)$ là các điều kiện ràng buộc của bài toán tối ưu dưới dạng bất đẳng thức và đẳng thức. Trong không gian các biến, các hàm số này tạo ra miền giới hạn D các khả năng cho phép của hàm $f(x)$.

2.2 Một số phương pháp, kỹ thuật lập kế hoạch thi công truyền thống:

Phương pháp sơ đồ ngang được giới thiệu năm 1917 bởi Henry Gantt. Trong sơ đồ ngang thể hiện thông tin công việc và biểu đồ tiến độ với dòng thời gian. Các công việc được biểu diễn như các thanh bar với chiều dài là thời gian thi công của công việc, được vẽ từ thời gian bắt đầu đến thời gian kết thúc công việc. Ưu điểm của phương pháp này là dễ vẽ tiến độ, dễ hiểu, dễ nắm bắt thông tin như thời gian bắt đầu, kết thúc của công việc, trình tự công việc. Nhược điểm chính của phương pháp này là không cho thấy mối quan hệ giữa các công việc. [6]

Phương pháp sơ đồ mạng là một trong những kỹ thuật cơ bản và quan trọng nhất trong quản lý tiến độ xây dựng. Khác với sơ đồ ngang chỉ mô tả thời gian thực hiện, sơ đồ mạng thể hiện mối quan hệ logic giữa các công tác thông qua các nút và cung, cho phép nhà quản lý nhìn rõ chuỗi phụ thuộc và xác định đường găng. Hai biến thể phổ biến nhất là Critical Path Method (CPM) và Program Evaluation and Review Technique (PERT). Trong lĩnh vực xây dựng, sơ đồ mạng có ưu điểm nổi bật là thể hiện tốt các mối quan hệ công việc, chỉ rõ được các công việc găng quyết định thời gian hoàn thành công trình, xét được các dự trữ của công việc không găng, dễ dàng chuyển sang sơ đồ ngang. Tuy nhiên, phương pháp này cũng tồn tại các khuyết điểm là việc tính toán chỉ dựa vào thời gian công việc nên các biểu đồ tài nguyên thường không điều hoà, vấn đề giới hạn tài nguyên và cân bằng tài nguyên phải thực hiện sau khi đã lập xong tiến độ, quá trình lập tiến độ không xét được các thời hạn hoàn thành dự án và giới hạn về chi phí. [6]

Phương pháp Critical Path Method (CPM) là một trong những công cụ lập tiến độ truyền thống phổ biến nhất trong quản lý dự án xây dựng, được phát triển từ thập niên 1950 nhằm xác định chuỗi công việc quan trọng quyết định tổng thời gian dự án [5]. Trong CPM, tiến độ dự án được mô hình hóa dưới dạng mạng công việc với các quan hệ logic chủ yếu là Finish-to-Start (FS), nghĩa là một công việc chỉ bắt đầu sau khi công việc tiền nhiệm hoàn thành. Các công việc găng (critical activities) là chuỗi công việc có độ dự trữ thời gian (float) bằng không, bất kỳ sự chậm trễ nào ở chúng sẽ trực tiếp kéo dài thời gian hoàn thành dự án. Ưu điểm lớn nhất của CPM là khả năng xác định rõ

“đường găng” (critical path), từ đó hỗ trợ nhà quản lý tập trung nguồn lực vào các hoạt động quyết định tiến độ, đồng thời đánh giá được mức độ linh hoạt của các công việc không găng. Tuy nhiên, hạn chế cơ bản của CPM truyền thống là thiếu tính linh hoạt: việc tuân thủ tuyệt đối quan hệ FS làm kéo dài tổng tiến độ, đặc biệt đối với các dự án quy mô lớn hoặc yêu cầu khẩn cấp, khi cơ hội rút ngắn bằng chồng lấn (overlapping) các giai đoạn là cần thiết [5].

Program Evaluation and Review Technique (PERT) là một phương pháp lập tiến độ mạng được phát triển trong chương trình Polaris của Hải quân Hoa Kỳ nhằm xử lý các dự án có độ phức tạp và bất định cao. Khác với Critical Path Method (CPM) vốn giả định thời lượng công tác là tất định, PERT xem thời gian thực hiện công việc là một biến ngẫu nhiên và được ước lượng bằng ba tham số: lạc quan, khả năng cao nhất, và bi quan. Thời gian kỳ vọng được tính theo công thức trung bình trọng số cho phép mô hình hóa phân phối thời gian theo dạng Beta để đánh giá rủi ro tiến độ. PERT được coi là một công cụ bổ sung quan trọng cho CPM, đặc biệt hữu ích trong bối cảnh các dự án xây dựng có nhiều yếu tố bất định về điều kiện thi công và nguồn lực [7]. Tuy nhiên, phương pháp này cũng bộc lộ một số hạn chế: ước lượng ba điểm thường dựa trên chủ quan của chuyên gia, giả định phân phối Beta không phải lúc nào cũng phản ánh đúng dữ liệu thực tế, và việc áp dụng PERT cho các dự án quy mô lớn trở nên phức tạp nếu thiếu công cụ phần mềm chuyên dụng. [8]

Kỹ thuật Fast-tracking trong quản lý dự án xây dựng được định nghĩa là kỹ thuật nén tiến độ bằng cách chồng lấn các giai đoạn thiết kế và thi công thay vì thực hiện tuần tự truyền thống, nhằm rút ngắn thời gian hoàn thành mà không thay đổi phạm vi công việc [9]. Các nghiên cứu thực nghiệm đã chứng minh tính hiệu quả của Fast-tracking, cho thấy thời gian dự án có thể rút ngắn đáng kể khi các gói thiết kế được hoàn thiện đến mức đủ thi công và triển khai song song với các gói còn lại [10]. Ưu điểm nổi bật của phương pháp này là giảm đáng kể tổng tiến độ, đồng thời mang lại lợi ích tài chính như giảm chi phí lãi vay, hạn chế tác động của lạm phát giá và cho phép khai thác công trình sớm [11]. Tuy vậy, Fast-tracking cũng làm tăng rủi ro sai sót và tái làm (rework) khi thi công dựa trên thiết kế chưa hoàn chỉnh, đồng thời đòi hỏi năng lực phối hợp và quản lý thay đổi rất cao để kiểm soát phát sinh chi phí và tranh chấp hợp đồng [12]. Các nghiên cứu gần đây còn nhấn mạnh rằng mức độ chồng lấn quá cao sẽ làm giảm khả năng dự đoán của tiến độ và gia tăng tính bất định, do đó Fast-tracking chỉ phát huy hiệu quả tối ưu khi kết hợp với cơ chế quản lý thay đổi, đánh giá rủi ro và ứng dụng công cụ công nghệ như BIM hay PMIS để tăng cường phối hợp và giám sát [13].

Kỹ thuật Crashing trong quản lý tiến độ xây dựng được định nghĩa là kỹ thuật rút ngắn thời gian dự án bằng cách gia tăng nguồn lực (nhân lực, thiết bị, ca kíp, thuê ngoài) cho các công việc nằm trên đường găng nhằm giảm thời lượng thực hiện của chúng, từ đó rút ngắn tiến độ tổng thể mà không thay đổi phạm vi dự án. Khác với Fast-tracking vốn dựa trên chồng lấn các hoạt động, Crashing trực tiếp can thiệp vào tốc độ hoàn thành của từng công việc găng thông qua sự đánh đổi giữa chi phí tăng thêm và thời gian tiết kiệm được [14]. Các nghiên

cứu thực nghiệm chỉ ra rằng, việc lựa chọn hoạt động để crash thường dựa trên chi phí rút ngắn thấp nhất trên đơn vị thời gian (cost slope), nhờ đó đạt được hiệu quả tối ưu về mặt kinh tế khi buộc phải rút ngắn tiến độ [15]. Ưu điểm của Crashing là cho phép nhà quản lý bù đắp các chậm trễ hoặc đáp ứng yêu cầu tiến độ khẩn cấp mà không cần thay đổi thiết kế; đồng thời, nếu được thực hiện có kiểm soát, nó có thể duy trì một mức độ linh hoạt của lịch, tránh tình trạng tiến độ quá cứng dễ bị sụp đổ khi có sự cố [16]. Tuy vậy, Crashing cũng tiềm ẩn nhiều rủi ro: chi phí tăng cao do làm thêm giờ và huy động thêm thiết bị; hiệu suất lao động giảm khi quá tải; và khả năng rút ngắn có giới hạn vì mỗi công việc đều có “thời lượng tối thiểu” (minimum crash duration) không thể vượt qua [17].

Building Information Modeling 4D (BIM 4D) là phương pháp lập kế hoạch thi công dựa trên việc tích hợp tiến độ vào mô hình BIM 3D, cho phép trực quan hóa quá trình xây dựng theo không gian – thời gian. Trong các nghiên cứu gần đây, BIM 4D được khẳng định là công cụ hữu hiệu để nâng cao độ tin cậy của kế hoạch và phát hiện xung đột thi công. Việc áp dụng 4D BIM trong dự án nhà cao tầng giúp giảm 12 % thời gian thi công so với phương pháp CPM truyền thống, nhờ khả năng phân tích không gian và tài nguyên tích hợp [18]. BIM 4D không chỉ cải thiện việc trực quan hóa tiến độ mà còn tăng tính minh bạch và hiệu quả trong phối hợp đa bên, đặc biệt ở các dự án hạ tầng quy mô lớn [19]. Tuy nhiên, BIM 4D vẫn đối mặt với những thách thức về dữ liệu và triển khai. Việc liên kết dữ liệu tiến độ với mô hình BIM đòi hỏi chuẩn hóa thông tin và tương thích phần mềm là một rào cản phổ biến trong thực tế thi công. Chi phí và nguồn lực triển khai cao khiến nhiều doanh nghiệp xây dựng vừa và nhỏ khó áp dụng rộng rãi. 4D BIM chủ yếu hỗ trợ ở giai đoạn lập kế hoạch và phối hợp, nhưng vẫn cần kết hợp với các hệ thống quản lý thi công thời gian thực để phát huy hết hiệu quả. [20]

Microsoft Project là công cụ được các nhà quản lý sử dụng rộng rãi nhất. Nó được tạo ra để giúp các nhà quản lý lập kế hoạch, phân phối nguồn lực, theo dõi tiến độ và phân tích khối lượng công việc. Đây là công cụ được đánh giá cao với khả năng tự động hoá khá đơn giản và dễ sử dụng.

GanttPro là phần mềm dựa trên biểu đồ Gantt. Nó cho phép lập kế hoạch và quản lý các dự án trực tuyến, trực quan hoá các quy trình, tạo và phân công nhiệm vụ, kiểm soát tiến độ hoàn thành. GanttPro có các tính năng như sắp xếp thời gian các công việc dựa trên mức độ ưu tiên, phân phối nhiệm vụ giữa các bên thực hiện dự án, lịch trình tự động, theo dõi tiến độ hiện tại để kiểm soát giai đoạn thực hiện dự án.

Ngoài ra, còn có các công cụ quản lý dự án hiệu quả như: Primavera P6, fWork, Misa, Due, PMS, VietPm,...

3. Kiểm soát khí thải quá trình thi công xây dựng

Ngành xây dựng bị chỉ trích là một trong những nguồn phát thải khí nhà kính (GHG) lớn và là lĩnh vực còn tương đối ít được điều tiết trong quản lý phát thải carbon. Khi áp lực từ rủi ro biến đổi khí hậu ngày càng gia tăng, việc cắt giảm mạnh phát thải carbon từ hoạt động

thi công trở thành ưu tiên hàng đầu nếu doanh nghiệp xây dựng muốn đáp ứng các yêu cầu kiểm soát phát thải ngày càng nghiêm ngặt. Một số quốc gia phát triển đã đưa ra sáng kiến nhắm mạnh vào lĩnh vực xây dựng để cắt giảm khí thải trên công trường xây dựng, song ở nhiều nơi vẫn chưa có chương trình giảm phát thải được xác lập rõ. Vì vậy, cần có kế hoạch và chiến lược kiểm soát khí thải tốt hơn ngay trong giai đoạn thi công, cũng như trực quan hóa tác động môi trường của các hoạt động xây dựng. [21]

Khí thải là tập hợp các chất ô nhiễm ở dạng khí hoặc hạt (ví dụ: CO₂, CO, NO_x, SO₂, VOCs, hơi nhiên liệu, bụi PM₁₀/PM_{2.5}, silica hô hấp RCS...) phát ra vào môi trường không khí từ các hoạt động tự nhiên hoặc do con người (đốt nhiên liệu, quá trình sản xuất, vận hành thiết bị, vận chuyển, thi công...). Trong thi công xây dựng, khí thải thường gồm: Khí từ động cơ và thiết bị (máy xúc, cần cẩu, máy phát điện...): CO₂, NO_x, CO, HC, SO₂, muối than/PM; Bụi khoáng sinh ra khi khoan/cắt/đập phá, vận chuyển vật liệu rời: PM₁₀/PM_{2.5} và RCS; Phát thải hàm chứa (embodied GHG) gián tiếp gắn với vật liệu (xi măng, thép) và logistics, khi xét theo vòng đời. [22]

Theo báo cáo về Khoa học công nghệ - Môi trường ngành xây dựng ngày 25/09/2025 trên trang của Bộ Xây dựng về vấn đề “Phát triển vật liệu xanh – Giải pháp bền vững hướng tới tương lai xanh” nhận định: Biến đổi khí hậu, ô nhiễm môi trường và khai thác tài nguyên quá mức là những thách thức lớn nhất hiện nay. Ngành sản xuất vật liệu xây dựng truyền thống có đóng góp đáng kể vào phát thải khí nhà kính, vì vậy phát triển vật liệu xanh là yêu cầu cấp thiết. Việt Nam đã cam kết tại COP26 đưa phát thải ròng về “0” vào năm 2050, trong đó ngành Xây dựng giữ vai trò quan trọng. Một trong những yếu tố cốt lõi của xây dựng bền vững chính là sử dụng vật liệu xanh, được thiết kế để giảm thiểu tác động môi trường, bao gồm sử dụng nguyên liệu tái tạo, giảm phát thải carbon, tiết kiệm năng lượng và nước đồng thời đảm bảo an toàn cho sức khỏe con người. Hiện nay, các nhà nghiên cứu trong lĩnh vực xây dựng đang tiếp tục nghiên cứu các giải pháp nhằm kiểm soát khí thải trong dự án xây dựng. Một số đề xuất kiểm soát khí thải đã được công bố:

Việc kiểm soát khí thải ngày càng trở nên nghiêm ngặt hơn buộc các nhà sản xuất phải cải tiến để giảm phát thải chất ô nhiễm từ các phương tiện, thiết bị. Trong nhiều nghiên cứu đã được thực hiện chủ yếu là sửa đổi động cơ, hệ thống phun nhiên liệu điện tử và cải thiện tính chất nhiên liệu. Tuy nhiên, các biện pháp này đã không đạt được như kỳ vọng và chỉ có thể đạt được bằng các hệ thống kiểm soát khí thải sau xử lý, thông thường sử dụng 2 nhóm giải pháp kỹ thuật là: Giảm phát thải ngay tại nguồn phát sinh (bên trong xilanh động cơ) và giảm phát thải trên đường khí thải của động cơ. Mỗi giải pháp đều có những ưu nhược điểm nhất định vì vật lựa chọn giải pháp nào phù hợp cần căn cứ vào cơ chế hình thành các chất độc hại có trong khí thải của động cơ. [23]

Ngành xây dựng và thi công là một trong những ngành chính đóng góp vào lượng khí thải carbon trên toàn cầu. Các sáng kiến giảm phát thải hiện nay trong ngành xây dựng và thi công đã phần lớn giảm tỷ trọng phát thải carbon vận hành (OC) trong lượng khí thải vòng đời

của dự án. Việc đạt được mức giảm phát thải carbon nội tại (EC) là điều cần thiết để khử cacbon cho ngành. Isuri Amarasinghe và cộng sự đã áp dụng tổng quan tài liệu toàn diện và phỏng vấn chuyên gia với các chuyên gia chủ chốt trong ngành để xác định các rào cản đối với việc giảm phát thải EC trong ngành xây dựng và thi công, đồng thời đề xuất các chiến lược và hành động để vượt qua các rào cản đã xác định và tạo điều kiện thuận lợi hơn nữa cho việc áp dụng các cân nhắc về EC. Kết quả cho thấy các rào cản thuộc bốn hạng mục: tổ chức, tài chính, quy định và chính sách, và phương pháp luận và tính khả dụng của dữ liệu. Nghiên cứu đề xuất các chiến lược sau để giảm phát thải EC: (1) lồng ghép các mục tiêu giảm phát thải carbon vào chiến lược của tổ chức, (2) thực hiện các quy định và chính sách, (3) tích hợp công nghệ số để đánh giá EC, (4) khuyến khích phối hợp liên ngành, (5) xây dựng năng lực và khả năng, và (6) khuyến khích các sáng kiến R&D. Nghiên cứu cung cấp những hiểu biết quan trọng về các chiến lược cần được áp dụng để giảm phát thải EC. Cuối cùng, một khuôn khổ dựa trên bằng chứng được đề xuất để cung cấp tài liệu tham khảo hữu ích cho các chuyên gia và người ra quyết định trong lĩnh vực xây dựng khi lập kế hoạch và thực hiện các chiến lược giảm EC. [24]

Vấn đề kiểm soát khí thải hướng tới phát triển bền vững là mục tiêu toàn cầu, đặc biệt đối với các nước đang phát triển như Việt Nam có tỷ trọng khí thải từ ngành xây dựng chiếm phần lớn. Do đó, nghiên cứu về kiểm soát khí thải quá trình thi công xây dựng là yêu cầu cấp thiết nhằm hướng tới đưa phát thải ròng về “0” vào năm 2050.

4. Các thuật toán tối ưu thường sử dụng

Cho đến nay, thuật toán tối ưu hóa đã được phát triển gần 50 năm. Đây là một trong những hướng nghiên cứu chính trong lĩnh vực thuật toán và trí tuệ nhân tạo. Ngày nay con người có nhiều khả năng tìm ra lời giải khả thi hơn bằng cách sử dụng thuật toán lặp ngẫu nhiên này trong thời gian ngắn thay thế các phương pháp truyền thống.

4.1. Thuật toán Đơn mục tiêu

Bài toán tối ưu đơn mục tiêu hướng đến việc tìm giá trị nhỏ nhất hoặc lớn nhất của một hàm mục tiêu duy nhất. Không gian tìm kiếm thường phi tuyến, phi lồi, đa cực trị và có ràng buộc phức tạp, khiến các phương pháp giải tích truyền thống dễ rơi vào cực trị cục bộ hoặc không khả thi [25]. Một số thuật toán thường được sử dụng xử lý Bài toán tối ưu đơn mục tiêu như Thuật toán di truyền (GA), thuật toán tiến hoá vi phân (DE).

Thuật toán di truyền (GA) là một trong những thuật toán tiến hoá phổ biến được các nhà nghiên cứu sử dụng. GA sử dụng khái niệm về nhiễm sắc thể để trình bày các giải pháp khả thi trong các chuỗi nhiễm sắc thể này. Các khía cạnh khác nhau của mỗi giải pháp được định vị vào các vectơ tạo thành chuỗi. Một tập hợp các giải pháp mới được tìm thấy bằng cách lai giữa các chuỗi vectơ mẹ và vectơ con sẽ thừa hưởng các đặc điểm tốt nhất của chuỗi vectơ mẹ. [26,27]

Thuật toán tiến hoá vi phân (DE) phát triển từ thuật toán GA. Thuật toán DE hiệu quả và có độ phức tạp thuật toán thấp. Ngoài ra, còn có một số bằng chứng về hiệu quả của nó trong việc giải quyết các vấn đề tối ưu hóa liên tục với các loại ràng buộc và hàm khác nhau. Phương pháp DE bằng quá trình đột biến và lai ghép giữa các vectơ trong quần thể ban đầu để tạo ra quần thể mới đa dạng và vượt trội hơn. [28,29]

Các thuật toán này có ưu điểm đơn giản, dễ sử dụng. Tuy nhiên, khi số biến tăng, không gian tìm kiếm tăng theo cấp số mũ, khiến số nghiệm khả thi trở nên cực lớn. Điều này dẫn đến việc phải đánh đổi giữa tốc độ và độ chính xác, đặc biệt với các bài toán liên tục hoặc hỗn hợp rời rạc-liên tục. [30]

4.2. Thuật toán Đa mục tiêu

Tối ưu đa mục tiêu là một bài toán đặc biệt trong các vấn đề tối ưu hóa, khi đó nhiều mục tiêu cùng tồn tại cần được giải quyết trong một vấn đề tối ưu hóa. Đồng thời các mục tiêu này có xu hướng mâu thuẫn và đối lập nhau. Các bài toán tối ưu hóa đa mục tiêu luôn tồn tại nhiều kịch bản tối ưu khác nhau được gọi là tập Pareto và mặt Pareto [31]. Đây cũng là thách thức của bài toán tối ưu đa mục tiêu khi phải tối ưu tất cả các mục tiêu cùng lúc [32].

Khác với bài toán tối ưu đơn mục tiêu chỉ giải quyết một hàm mục tiêu, thuật toán tối ưu đa mục tiêu sẽ phải giải quyết các bài toán với nhiều mục tiêu xung đột với nhau. Đối với lời giải của bài toán tối ưu đa mục tiêu sẽ không phải là duy nhất mà sẽ là một tập hợp các lời giải đảm bảo sự cân bằng giữa các mục tiêu đối lập của bài toán. Điều này dẫn đến việc phải đánh giá các giải pháp để xác định vai trò giá trị giữa các mục tiêu. Một số thuật toán thường sử dụng để giải quyết bài toán đa mục tiêu như Thuật toán tiến hoá Pareto (SPEA), Thuật toán di truyền sắp xếp không trội (NSGA-II), Thuật toán di truyền đa mục tiêu (MOGA), Thuật toán Tối ưu hoá bầy đàn (PSO), Thuật toán tối ưu hoá đàn kiến (ACO).

Thuật toán tiến hoá Pareto (SPEA) hoạt động bằng cách lưu trữ các giải pháp không bị chi phối được tìm thấy trong ma trận Pareto ở mỗi lần lặp lại. Sau đó, dựa trên số lượng giải pháp mà nó chi phối, mỗi giải pháp trong kho lưu trữ được xếp hạng theo mức độ mạnh. [28, 33]

Thuật toán di truyền sắp xếp không trội (NSGA-II) sử dụng phương pháp sắp xếp không trội cho các nghiệm trong quần thể. Các nghiệm không trội được xếp hạng ở mỗi lần lặp và bị loại khỏi quần thể ở mỗi lần lặp sau đó. Ngoài ra, trong mỗi tập nghiệm xếp hạng, các nghiệm được so sánh với nhau thông qua hình thái tập hợp của chúng. Trong bước tập hợp, vị trí của một nghiệm đơn được đo bằng khoảng cách của nó đến các điểm của nghiệm liên kề, và dựa trên khoảng cách đó, nghiệm được gán một thứ hạng, với thứ hạng tốt nhất bắt đầu từ khoảng cách ngắn nhất đến dài nhất. [28]

Thuật toán di truyền đa mục tiêu (MOGA) là phiên bản nâng cao của GA truyền thống. Sự khác biệt giữa MOGA và GA nằm ở việc phân bổ sức khỏe cá thể, trong khi các bước còn lại được thực hiện giống như trong GA. Trong MOGA, thứ hạng được gán cho mỗi cá thể trong

quần thể. Thứ hạng được gán dựa trên mức độ trội của cá thể đó. Nếu cá thể đó không bị một cá thể khác trong quần thể lấn át thì nó được gán với thứ hạng bằng một. Nhưng nếu một cá thể bị các cá thể khác lấn át thì nó được gán với thứ hạng bằng tổng số cá thể trội cộng với một. [34]

Thuật toán Tối ưu hoá bầy đàn (PSO) lấy cảm hứng từ đàn chim và cá. Trong PSO, một tập hợp các giải pháp được gọi là bầy đàn, trong khi một giải pháp được gọi là hạt. Các hạt được định vị trong không gian tìm kiếm D chiều. Ở mỗi bước, mỗi hạt thay đổi vận tốc của nó để di chuyển về phía giải pháp tốt nhất và hướng tới giải pháp tốt nhất toàn cục. [35,36]

Thuật toán tối ưu hoá đàn kiến (ACO) lấy cảm hứng từ sự di chuyển của kiến và đường đi của pheromone khi tìm kiếm thức ăn. Trong quy trình ACO, mỗi giải pháp được kết nối với một tuyến đường mà kiến tìm kiếm. Chất lượng của mỗi giải pháp được đánh giá bằng lượng pheromone mà kiến để lại trên tuyến đường. Lượng pheromone còn lại trên một tuyến đường cho biết mức độ gần với giải pháp tối ưu. Cơ hội tìm thấy tuyến đường ngắn nhất của kiến tăng lên khi lượng pheromone trên tuyến đường tăng lên. [37]

Thuật toán đa mục tiêu thường giải quyết bài toán 2-3 mục tiêu, khi số mục tiêu tăng, tỷ lệ nghiệm Pareto không bị chi phối trong quần thể tăng lên, làm giảm khả năng hội tụ; thuật toán khó tạo áp lực chọn lọc đủ mạnh, dễ dần trải mà không tiến gần biên. Một số nghiên cứu đã chứng minh các thuật toán NSGA-II và MOEA/D giải quyết hiệu quả những bài toán tối ưu hoá đa mục tiêu trong lĩnh vực xây dựng đầy thách thức này [38, 39]

4.3. Thuật toán Nhiều mục tiêu

Các thuật toán tiến hóa đa mục tiêu (MOEA) đã chứng minh được tính hiệu quả và hiệu suất của chúng trong việc giải quyết các vấn đề phức tạp với hai hoặc ba mục tiêu. Tuy nhiên, các nghiên cứu gần đây đã chỉ ra rằng hiệu suất của các MOEA cổ điển bị giảm sút khi giải quyết các vấn đề liên quan đến số lượng lớn các mục tiêu xung đột. Vì hầu hết các cá thể không bị chi phối lẫn nhau, nên hành vi của các MOEA trở nên tương tự như một bước đi ngẫu nhiên trong không gian tìm kiếm. [40]

Hàm mục tiêu của bài toán được phát biểu như sau:

$$f(x) = (f_1(x), f_2(x), \dots, f_m(x))^T \in R^m. x \in R^n$$

Trong đó R^n xác định không gian quyết định là phạm vi của $x = (x_1, \dots, x_n)^T$ các giải pháp tiềm năng. Không gian mục tiêu R^m được xác định bởi $m \geq 4$ mục tiêu, mỗi mục tiêu đều yêu cầu tối thiểu hoá. Tập Tối ưu Pareto được mô tả là miền quyết định được hình thành bởi tập hợp các giải pháp tối ưu Pareto. [41]

Các phương pháp tiếp cận như thuật toán tối ưu nhiều mục tiêu (MaOEA) đã được công nhận rộng rãi trong các tài liệu [42]. Các phương pháp dựa trên dân số này cố gắng đưa ra một bộ các giải pháp tối ưu, hội tụ hiệu quả và thể hiện tính đa dạng trên mặt trận Pareto thực sự liên quan đến MaOP. Những thập kỷ gần đây đã chứng kiến sự xuất hiện của nhiều MaOEA, được thiết kế riêng cho MaOP và chứng

minh tính hiệu quả của chúng. Mặc dù đã thành công, hiệu suất của MaOEA, đặc biệt là những MaOEA dựa trên các nguyên tắc Pareto, trong các kịch bản có nhiều chiều cần được xem xét thêm. Một thách thức chính trong các bối cảnh như vậy là khả năng so sánh các giải pháp; trong không gian có nhiều chiều, tỷ lệ các giải pháp không bị chi phối tăng lên. Vấn đề này trở nên trầm trọng hơn khi số lượng mục tiêu tăng lên, dẫn đến áp lực lựa chọn giảm. Một thách thức thứ cấp là bảo tồn tính đa dạng của dân số. Các phương pháp truyền thống để duy trì tính đa dạng, như Khoảng cách gần nhất, khoảng cách tập trung, v.v. không phù hợp với không gian mục tiêu rộng lớn [41]. Để khắc phục những thách thức này, một số thuật toán đã được đề xuất và chúng có thể được phân loại thành ba phương pháp chính:

Phương pháp giải trực tiếp có thể tìm luôn ra bộ nghiệm Pareto, tiêu biểu nhất là thuật toán NSGA-III. Phương pháp này xây dựng quá trình tìm kiếm dựa trên mối quan hệ ưu thế Pareto giữa các cá thể trong quần thể. Mục tiêu là tiệm cận biên Pareto và duy trì đa dạng nghiệm trong cùng một lần chạy tiến hoá. Phương pháp này dựa trên sắp hạng không trội để xác định cấp độ ưu thế và duy trì đa dạng dọc biên Pareto. [43]

Phương pháp này phân rã bài toán tối ưu nhiều mục tiêu (MOP) thành một tập hợp các bài toán tối ưu đơn mục tiêu con. Mỗi bài toán con tương ứng với một hướng tìm kiếm trong không gian mục tiêu. Phương pháp dựa trên phân tích đơn giản hóa các vấn đề tối ưu hóa đa mục tiêu phức tạp (MaOP) thành các vấn đề con hoặc một loạt các vấn đề mục tiêu đơn. Tiêu biểu là thuật toán MOEA/D tối ưu hóa từng vấn đề con bằng dữ liệu từ các vấn đề con liên kế để giảm thiểu độ phức tạp về mặt tính toán. [41]

Phương pháp dựa trên chỉ số đánh giá sử dụng các thước đo định lượng nhằm đánh giá mức độ không trội của các nghiệm và định hướng quá trình tìm kiếm trong không gian Pareto [41]. Mỗi cá thể được đánh giá bằng đóng góp vào chi báo toàn cục, quần thể mới được hình thành bằng cách giữ lại các cá thể có đóng góp cao nhất vào chất lượng tổng thể của biên Pareto. Tiêu biểu của phương pháp này như các chỉ số HV, GD, IGD, R2. [44]

Sự phức tạp của các vấn đề trong các dự án xây dựng khiến việc tối ưu hóa thường khó khăn khi sử dụng một phương pháp duy nhất. Các kỹ thuật lai tạo hiệu quả và hữu ích trong việc tạo ra các giải pháp tối ưu trong các vấn đề tối ưu hóa phức tạp. Trong một số nghiên cứu, các phương pháp lai tạo này đã vượt trội hơn một số phương pháp ở dạng cơ bản và biến thể của chúng. Ví dụ, trong lập lịch trình, chúng vượt trội hơn PSO đa mục tiêu, ABC đa mục tiêu, DE đa mục tiêu, MOGA, SPEA-II và NSGA-II. Trong vật liệu, chúng vượt trội hơn GA hai cấp đa mục tiêu và SA hai cấp đa mục tiêu. Trong quy hoạch địa điểm, chúng vượt trội hơn dạng cơ bản của ABC và một trong các biến thể của ACO. Cuối cùng, về tính bền vững, chúng vượt trội hơn NSGA-II [45]. Mỗi thuật toán đều có ưu nhược điểm và ứng dụng vượt trội hơn cho các bài toán đặc trưng của nó. Có thể thấy, tối ưu hoá là một trong những khoa học hoặc thực tiễn lâu đời nhất và luôn không ngừng phát triển để theo kịp các vấn đề thực tiễn cũng như giải quyết hiệu quả các bài toán tối ưu nhiều mục tiêu trong lĩnh vực xây dựng.

5. Tình hình và định hướng trong việc sử dụng phương pháp tối ưu bằng các thuật toán nhiều mục tiêu trong lập phương án thi công xây dựng

Việc tối ưu hóa các bài toán trong lập phương án thi công xây dựng là một nhiệm vụ quan trọng đối với các nhà quản lý công trình nhằm đảm bảo hoàn thành công trình trong phạm vi ngân sách, trong thời gian dự kiến và có chất lượng đảm bảo. Tuy nhiên, đây là một quá trình phức tạp vì nó liên quan đến việc so sánh và đánh giá các phương án khác nhau để xác định phương án tối ưu với tổng chi phí thấp nhất, chất lượng tốt nhất hay tiến độ nhanh nhất bất chấp sự không chắc chắn đáng kể trong việc cân bằng nhiều mục tiêu. Trong lĩnh vực xây dựng, việc lập phương án thi công xây dựng là bài toán nhiều tiêu chí, vì vậy đòi hỏi cần có thuật toán để xử lý hiệu quả việc cân bằng nhiều mục tiêu. Những năm qua, có nhiều nghiên cứu đã công bố kết quả ứng dụng các thuật toán tối ưu đa mục tiêu và nhiều mục tiêu trong quản lý công trình xây dựng xoay quanh chủ yếu các tiêu chí về thời gian, chi phí, chất lượng hay rủi ro...

Năm 2007, A. Sathya Narayanan và CR Suribabu đã sử dụng thuật toán tiến hóa vi phân để giải quyết bài toán tối ưu hóa đa mục tiêu thời gian, chi phí, chất lượng. Hai nghiên cứu điển hình được phân tích và kết quả thu được được so sánh với các phương pháp khác để kiểm tra tính ứng dụng và hiệu quả của thuật toán. Kết quả cho thấy thuật toán tiến hóa vi phân hoạt động hiệu quả trong việc tìm ra giải pháp tối ưu với hàm đánh giá tối thiểu. [46]

Năm 2020, Hồ Ngọc Khoa cùng cộng sự đã đề xuất một thuật toán đa mục tiêu nhóm xã hội (MOSGO) và phương pháp ra quyết định đa tiêu chí (MCDM) để cân bằng thời gian, chi phí, rủi ro của dự án. Mô hình áp dụng cho một dự án thực tế để thấy được tính hiệu quả của thuật toán đề xuất. Các kết quả so sánh chỉ ra rằng phương pháp MOSGO là một công cụ mạnh, hiệu quả trong việc tìm kiếm đường cong của tập tối ưu. Ngoài ra, phương pháp ra quyết định đa tiêu chí được áp dụng để giúp nhà quản lý dự án lựa chọn giải pháp phù hợp nhất cho dự án. [47]

Gần đây, Barada Prasad Sethy đã đưa ra một mô hình tối ưu hóa lai kết hợp quy trình phân cấp phân tích (AHP) với thuật toán di truyền sắp xếp không bị chi phối III (NSGA-III) để đạt được một phương pháp tiếp cận cân bằng. Phân tích so sánh với MOPSO, TLBO và MOACO cho thấy NSGA-III mang lại hiệu suất vượt trội, tạo ra các giải pháp phân tán tốt hơn với các chỉ số khoảng cách thế hệ và siêu khối lượng được cải thiện. Kết quả cho thấy phương pháp tiếp cận dựa trên hướng tham chiếu của NSGA-III mang lại những lợi thế đáng kể so với các thuật toán truyền thống, khiến nó trở nên lý tưởng cho việc tối ưu hóa nhiều mục tiêu phức tạp trong xây dựng. [48]

Trong năm 2025, Trần Đức Học cùng cộng sự đã ứng dụng thuật toán kính hiển vi quang học đa mục tiêu (MOOMA) để xử lý bài toán cân bằng giữa thời gian, chi phí, chất lượng và việc sử dụng tài nguyên để đạt được kết quả tối ưu. Nghiên cứu này phát triển một mô hình phân bổ tài nguyên toàn diện, ưu tiên chất lượng và điều chỉnh sự biến động đầu vào. Sử dụng thuật toán kính hiển vi quang học đa mục tiêu

(MOOMA), logic mờ và ra quyết định đa tiêu chí (MCDM), nghiên cứu tích hợp các kỹ thuật siêu heuristic và lựa chọn đầu vào mờ để lọc kết quả dựa trên các yếu tố ảnh hưởng. MOOMA, lấy cảm hứng từ độ phóng đại quang học, cung cấp một phương pháp tiếp cận độc đáo cho tối ưu hóa đa mục tiêu. [49]

Số lượng mục tiêu được sử dụng phổ biến nhất trong các nghiên cứu là hai và ba. Các tiêu chí thời gian, chi phí là những mục tiêu được nhắm đến nhiều nhất vì các tiêu chí này cũng là các mục tiêu quan trọng nhất để dự án hiệu quả trong đầu tư. Tiêu chí chất lượng hoặc rủi ro cũng thu hút sự quan tâm của các nhà nghiên cứu để đánh đổi về chi phí hoặc thời gian.

Trong số các phương pháp nhiều mục tiêu được sử dụng, NSGA-III và MOEA/D là các phương pháp đang được sử dụng hiệu quả nhất và có khả năng giải quyết các bài toán tối ưu hóa nhiều mục tiêu trong lĩnh vực xây dựng. NSGA-III có nhiều ưu điểm giúp nó phù hợp với nhiều loại bài toán tối ưu hóa như đạt được nhiều nghiệm đa dạng trên mặt Pareto, tuy nhiên, NSGA-III có thể dần trải nghiệm trong không gian mục tiêu mà không tiến gần nghiệm Pareto thật hoặc các nghiệm trội hơn ít không được ưu tiên dẫn tới hội tụ chậm hoặc dừng sớm [44]. Thuật toán MOEA/D cho phép hướng tìm kiếm của từng cá thể rõ ràng, không phụ thuộc vào quan hệ trội hoá nên tránh sự mơ hồ của quan hệ Pareto khi số mục tiêu nhiều lên và khả năng đơn giản hoá bài toán nhiều mục tiêu thành các bài toán đơn mục tiêu hoặc đa mục tiêu sau đó sử dụng các phương pháp giải trực tiếp đã được chứng minh hiệu quả. Vì vậy, xu hướng hiện nay là nghiên cứu phát triển mô hình tối ưu hoá lai kết hợp mới phù hợp để xử lý các bài toán trong lập phương án thi công xây dựng đang được quan tâm và nghiên cứu sâu hơn nhằm giải quyết hiệu quả các bài toán nhiều mục tiêu.

6. Kết luận

Trong bài báo này, chúng tôi đã xem xét một số nghiên cứu về phương pháp, kỹ thuật và phân tích định hướng phát triển ứng dụng các thuật toán tối ưu nhiều mục tiêu trong lập phương án thi công xây dựng. Ngoài ra, đánh giá tiêu chí kiểm soát khí thải là một mục tiêu quan trọng trong xu hướng phát triển bền vững đảm bảo yêu cầu đưa phát thải ròng về “0” vào năm 2050 hiện nay và cần nghiên cứu đưa vào xét ngang các tiêu chí về thời gian, chi phí, chất lượng, rủi ro,... Điều này có thể là kết quả của những nỗ lực xây dựng các tòa nhà bền vững một cách tối ưu và giảm thiểu sự cạn kiệt tài nguyên thiên nhiên. Do đó, việc đưa thêm mục tiêu kiểm soát khí thải vào xét cân bằng cùng các mục tiêu như thời gian, chi phí, chất lượng trong lập phương án thi công xây dựng là điều hết sức cần thiết hiện nay. Tuy nhiên, vẫn chưa có nhiều nghiên cứu giải quyết vấn đề này để đáp ứng xu hướng phát triển ngành xây dựng trong tương lai.

Từ các phân tích trên có thể thấy việc ứng dụng các thuật toán tối ưu hoá vào lĩnh vực xây dựng vẫn đang là xu thế nghiên cứu hiện nay, đặc biệt là các phương pháp lai tạo các thuật toán để xây dựng thuật toán mới vượt trội hơn một số phương pháp ở dạng cơ bản và biến thể của chúng nhằm xử lý hiệu quả các bài toán tối ưu nhiều mục

tiêu. Vì vậy, việc phát triển một mô hình tối ưu nhiều mục tiêu có tích hợp tiêu chí kiểm soát khí thải, kết hợp với đặc điểm kỹ thuật của các phương án thi công cụ thể, là định hướng nghiên cứu có cơ sở lý luận rõ ràng, có khả năng ứng dụng cao, và phù hợp với xu thế hiện đại hóa quản lý xây dựng theo hướng bền vững, thông minh và số hóa.

Tài liệu tham khảo

- [1]. Wang, M., & Ding, Y. “Multi-objective optimization of construction project time–cost–carbon emission based on BIM technology”. *E3S Web of Conferences*, 386, 04004, (2023).
- [2]. Zuo, J., & Zhao, Z. Y. “Green building research–current status and future agenda: A review”. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 30, 271–281, (2014).
- [3]. Akbarnezhad, A., & Xiao, J. “Estimation and minimization of embodied carbon of buildings: A review”. *Buildings*, 7(1), 5, (2017).
- [4]. Deb, K., Pratap, A., Agarwal, S., & Meyarivan, T. “A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II”. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 6(2), 182–197, (2002).
- [5]. PMA. *A Guide to the Project Management Body of Knowledge PMBOK GUIDE*. Seventh Edition. PMI, 2021.
- [6]. Lê Hồng Hà, Hồ Ngọc Khoa – Trường Đại học xây dựng Hà Nội, *bài giảng môn Cơ sở quản lý công trình*. 2020.
- [7]. Patricia D. Galloway, Ph.D., P.E., F.ASCE. “Survey of the Construction Industry Relative to the Use of CPM Scheduling for Construction Projects”. *Journal of Construction Engineering and Management*. Volume 132, Issue 7, (2006).
- [8]. Yanjin Qian, Min Xie, Thong Ngee Goh, Jun Lin. “Optimal testing strategies in overlapped design process”. *European Journal of Operational Research*. Volume 206, Issue 1, (2010).
- [9]. Alcabes, J. “Fast-track scheduling”. *Project Management Quarterly*. 4(3), 15, 1973.
- [10]. S. Revay, P. Fazio, O. Moselhi, P. Théberge. “Fast-tracking of construction projects: a case study”. *Can. J. Civ. Eng.* IS, 493–499, 1988.
- [11]. C. William Ibbs, Stephanie A. Lee, Michael I. Li. “Fast-Tracking’s Impact on Project Change”. *Project Management Journal*. 1998, Vol. 29, No. 4, 35–42, 1998.
- [12]. Claudia Garrido Martins, Susan M. Bogus, Vanessa Valentin. “Perceptions of Construction Risks Due to Fast-Track Activity Overlapping”. *Eng.* 4(4), 2879–2895, 2023.
- [13]. Khalid K. Naji, Murat Gunduz, Mohamed Adalbi. “Analysis of Critical Project Success Factors—Sustainable Management of the Fast-Track Construction Industry”. *Buildings*. 13, 2890, 2023.
- [14]. Fachrurrazi, Husin, S. “Practical Crash Duration Estimation for Project Schedule Activities”. *Journal of King Saud University - Engineering Sciences*. 2019.
- [15]. Dimitrios D. Kantianis. “Construction Project Crashing with Uncertain Correlated Normal and Crash Task Durations and Costs: An Integrated Stochastic Practical Approach”. *European Project Management Journal*. 13(1):3–22, 2023.
- [16]. Harun Turkoglu, Gul Polat, Firat Dogu Akin. “Crashing construction projects considering schedule flexibility: an illustrative example”. *International Journal of Construction Management*. 23(5):1–18, 2021.
- [17]. Fachrurrazi, Saiful Husin. “Practical Crash Duration Estimation for Project Schedule Activities”. *Journal of King Saud University - Engineering Sciences*. S1018-3639(19)30238-7, 2019.

- [18]. Arnold Ziesche, Julia Bergelt, Heiner Deubel, Fred H. Hamker. "Pre- and post-saccadic stimulus timing in saccadic suppression of displacement – A computational model". *Automation in Construction*. 138 (2017) 1–11, 2017.
- [19]. Omar Doukari, Boubacar Seck, David Greenwood. "The Creation of Construction Schedules in 4D BIM: A Comparison of Conventional and Automated Approaches". *Buildings*. 12(8), 1145, 2022.
- [20]. Omar Doukari, Boubacar Seck, David Greenwood. "The efficient generation of 4D BIM construction schedules: A case study of the Nanterre 2 CESI project in France". *Frontiers in Built Environment*. Volume 8-2022.
- [21]. Johnny K.W. Wong, Heng Li, Haoran Wang, Ting Huang, Eric Luo, Vera Li. "Toward low-carbon construction processes: the visualisation of predicted emission via virtual prototyping technology". *Automation in Construction*. 33 (2013) 72 – 78, 2013.
- [22]. Pengju Bie, Liang Ji, Huanxing Cui, Gang Li, Shunli Liu, Ying Yuan, Kebin He, Huan Liu. "A review and evaluation of nonroad diesel mobile machinery emission control in China". *Journal of Environmental Sciences*. Volume 123, January 2023, Pages 30-40.
- [23]. Nguyễn Thành Trung, Nguyễn Sĩ Thành, Lê Văn Tuấn. "Đánh giá thực trạng và đề xuất giải pháp giảm nguy cơ gây ô nhiễm môi trường không khí đối với máy móc thi công trong các dự án đầu tư xây dựng dân dụng". *Tạp chí Vật liệu và Xây dựng*. Tập 14 số 05 năm 2024.
- [24]. Isuri Amarasinghe, Tingting Liu, Rodney A. Stewart, Sherif Mostafa. "Paving the way for lowering embodied carbon emissions in the building and construction sector". *Clean Technologies and Environmental Policy*. Volume 27, pages 1825-1843, 2025.
- [25]. Blum, C., & Roli, A. "Metaheuristics in combinatorial optimization: Overview and conceptual comparison". *ACM Computing Surveys*, 35(3), 268–308, 2003.
- [26]. Whitley D. A. "Genetic algorithm tutorial". *Statistics and Computing*. 4(2):65-85, 1994.
- [27]. Sivanandam S, Deepa S. Genetic. "Algorithm optimization problems. In: Introduction to Genetic Algorithms". *Springer Science & Business Media*. pp. 165-209, 2008.
- [28]. Talbi EG. "Metaheuristics: From Design to Implementation". *John Wiley & Sons*; p. 500, 2009.
- [29]. Boussaid I, Lepagnot J, Siarry P. "A survey on optimization metaheuristics". *Information Sciences*. 237:82-117, 2013.
- [30]. Rardin, R. L., & Uzsoy, R. "Experimental evaluation of heuristic optimization algorithms: A tutorial". *Journal of Heuristics*, 7(3), 261–304, 2001.
- [31]. Abouhawwash, M., M. Jameel, and K. Deb. "A smooth proximity measure for optimality in multi-objective optimization using Benson's method". *Computers & Operations Research*, Vol.117, p.104900, 2020.
- [32]. Jameel, M. and M. Abouhawwash. "Multi-objective Mantis Search Algorithm (MOMSA): A novel approach for engineering design problems and validation". *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol.422, p.116840, 2024.
- [33]. Simon D (2013). Evolutionary Optimization Algorithms. *John Wiley & Sons*. 2013. p. 772.
- [34]. Awad M, Khanna R. "Efficient Learning Machines: Theories, Concepts, and Applications for Engineers and System Designers". *Berkeley, CA: Apress*. 2015. p. 268.
- [35]. Fallah-Mehdipour E, Haddad OB, Rezapour Tabari MM, Marino MA. "Extraction of decision alternatives in construction management projects: Application and adaptation of NSGA-II and MOPSO". *Expert Systems With Applications*. 2012; 39(3): 2794-2803.
- [36]. Van den Bergh F, Engelbrecht AP. "A cooperative approach to particle swarm optimization". *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*. 2004; 8(3):225-239.
- [37]. Parpinelli RS, Lopes HS, Freitas AA. "Data mining with an ant colony optimization algorithm". *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*. 2002;6(4):321-332.
- [38]. Truong-Son Cao, Thi-Thanh-Thuy Nguyen, Van-Son Nguyen, Viet-Hung Truong, Huu-Hue Nguyen. "Performance of six metaheuristic algorithms for multi-objective optimization of nonlinear inelastic steel trusses". *Buildings*. 13 (4), 868, 2023.
- [39]. Truong-Son Cao, Hoang-Anh Pham, Viet-Hung Truong. "An efficient algorithm for multi-objective structural optimization problems using an improved pbest-based differential evolution algorithm". *Advances in Engineering Software*. 197, 103752, 2024.
- [40]. Kalita, K., Jangir, P., Čep, R. et al. "Many-Objective Grasshopper Optimization Algorithm (MaOGO): A New Many-Objective Optimization Technique for Solving Engineering Design Problems". *Int J Comput Intell Syst* 17, 214 (2024).
- [41]. Yuan, J., Liu, H.-L., Gu, F., Zhang, Q., He, Z. "Investigating the properties of indicators and an evolutionary many-objective algorithm using promising regions". *IEEE Trans. Evol. Comput.* 25(1), 75–86 (2021).
- [42]. Deb, K., & Jain, H. "An Evolutionary Many-Objective Optimization Algorithm Using Reference-Point-Based Nondominated Sorting Approach (NSGA-III)". *IEEE TEC*, 18(4), 577–601, 2014.
- [43]. Ishibuchi, H., et al. "Performance metrics for many-objective optimization: A critical review". *IEEE TEC*, 22(1), 97–116, 2018.
- [44]. Li, K., et al. "The θ -dominance based evolutionary algorithm for many-objective optimization". *IEEE TEC*, 19(3), 408–423, 2015.
- [45]. Alothaimeen and D. Ardit. " Overview of Multi-Objective Optimization Approaches in Construction Project Management, Multicriteria Optimization - Pareto-Optimality and Threshold-Optimality". *IntechOpen*. Nov. 26, 2020.
- [46]. A. Sathya Narayanan and C. R. Suribabu. "Multi-Objective Optimization of Construction Project Time-Cost-Quality Trade-off Using Differential Evolution Algorithm". *Jordan Journal of Civil Engineering*. Volume 8, No. 4, 2014
- [47]. Trần Đức Học, Hồ Ngọc Khoa, Lương Đức Long. "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)-ĐH XDHN*. 14 (5V), 66-76, 2020.
- [48]. Sethy, B.P., Gupta, P., Chandra, A. "Optimizing construction time, cost, and quality: a hybrid AHP-NSGA-III model for enhanced multi-objective decision making". *Asian J Civ Eng*. 26, 1043–1057, 2025.
- [49]. Duc-Hoc Tran, Khanh-Nhan Tran, Nghia Hoai Nguyen. "A novel hybrid multiple objective optical microscope algorithm for fuzzy time, cost, and quality tradeoff in project management". *International Journal of Construction Management*. 25 (10), 1141-1153, 2025.