

XÂY DỰNG CÔNG CỤ HỖ TRỢ HOẠCH ĐỊNH SẢN XUẤT DỰA TRÊN THUẬT TOÁN CPM

DEVELOPMENT OF A CPM-BASED SOFTWARE TOOL FOR PRODUCTION PLANNING

LÊ THỊ NHUNG*, PHẠM THỊ YẾN

Viện Cơ khí, Trường Đại học Hàng hải Việt Nam

*Email liên hệ: nhunglt.vck@vimaru.edu.vn

DOI: <https://doi.org/10.65154/jmst.925>

Tóm tắt

Nghiên cứu khảo sát việc ứng dụng Phương pháp đường găng (CPM) để nâng cao hiệu quả lập kế hoạch, hoạch định và giám sát dự án. Mục tiêu chính là phát triển một công cụ tính toán tích hợp các nguyên tắc CPM nhằm giảm thiểu thời gian hoàn thành dự án. Nghiên cứu sử dụng ngôn ngữ lập trình Python để thiết kế và triển khai một hệ thống một công cụ có khả năng xử lý dữ liệu sản xuất. Các tham số đầu vào được lấy từ các nghiên cứu điển hình thực tế, bao gồm cấu trúc phân chia công việc, thời lượng hoạt động và mối quan hệ ưu tiên giữa các nhiệm vụ. Chương trình sẽ tự động tạo sơ đồ mạng trực quan hóa các mối quan hệ phụ thuộc của nhiệm vụ và tính toán các tham số trong hoạch định dự án như Thời điểm Bắt đầu Chậm nhất, Thời điểm Kết thúc Chậm nhất, thời gian dự phòng và tổng thời gian thực hiện dự án. Kết quả đạt được đã chứng minh hiệu quả của hệ thống trong việc đề xuất các hoạt động quan trọng, hỗ trợ ra quyết định trong lập lịch trình dự án và giảm thời gian lập kế hoạch so với các phương pháp thủ công.

Từ khóa: Phương pháp đường găng, CPM, hoạch định, điều độ sản xuất.

Abstract

The study investigates the application of the Critical Path Method (CPM) to enhance the effectiveness of project planning, scheduling, and monitoring. The primary objective is to develop a computational tool that integrates CPM principles to minimize overall project completion time. The research employs the Python programming language to design and implement a software system capable of processing production-related data. Input parameters are derived from real-world case studies, including the work breakdown structure, activity durations,

and precedence relationships among tasks. The proposed system automatically generates a network diagram to visualize task dependencies and computes key project planning parameters such as Latest Start Time, Latest Finish Time, float, and total project duration. The results demonstrate the effectiveness of the system in identifying critical activities, supporting project scheduling decision-making, and significantly reducing planning time compared to conventional manual methods.

Keywords: Critical Path Method (CPM), project planning, production scheduling, manufacturing management.

1. Mở đầu

Quản lý thời gian và lập tiến độ công việc là thành phần quan trọng trong quá trình quản lý một dự án nhằm đảm bảo hoàn thành đúng thời gian quy định và đạt chất lượng cao nhất. Đặc biệt trong giai đoạn phát triển hiện nay, các dự án thường phức tạp hơn do liên quan đến việc phân chia thành nhiều giai đoạn, có nhiều bên tham gia và phụ thuộc liên hệ lẫn nhau, điều này làm cho công tác quản lý gặp rất nhiều khó khăn. Nhiều thuật toán và phương pháp khác nhau đã được các nhà khoa học phát triển nhằm giải quyết thách thức này, trong đó phải kể đến sơ đồ Gantt [1, 2], kỹ thuật PERT (Program Evaluation and Review Technique) [3, 4] và phương pháp đường găng CPM (Critical Path Method) [5-9]. Sơ đồ Gantt cung cấp cái nhìn trực quan và đơn giản về tiến trình thực hiện công việc của dự án. Tuy nhiên phương pháp này có hạn chế trong việc phân tích sâu để xác định các mối quan hệ phụ thuộc và công việc quan trọng. Phương pháp PERT sẽ xem xét yếu tố không chắc chắn trong thời gian thực hiện thông qua ước lượng xác suất, phù hợp với các dự án có mức độ biến động cao nhưng đòi hỏi dữ liệu và tính toán phức tạp. Ngược lại, phương pháp CPM cung cấp cách tiếp cận có hệ thống và xác định trong việc lập tiến độ, bằng cách nhận diện rõ chuỗi

các công việc quan trọng ảnh hưởng trực tiếp đến thời gian hoàn thành dự án. Với khả năng tính toán độ trễ và tối ưu hóa phân bổ nguồn lực, CPM giúp nhà quản lý đưa ra quyết định hiệu quả trong việc rút ngắn hoặc điều chỉnh tiến độ. Do đó, CPM được xem là một trong những phương pháp quản lý thời gian và lập tiến độ đáng tin cậy, hiệu quả nhất trong ngành công nghiệp có tính chất chuỗi công việc phụ thuộc chặt chẽ như xây dựng, sản xuất cơ khí hay năng lượng.

Phương pháp CPM được giới thiệu lần đầu tiên vào năm 1959 bởi Kelley và Walker, trong đó mô tả quy trình xác định đường găng trong dự án công nghiệp [5]. Tiếp đó, CPM đã trải qua nhiều giai đoạn mở rộng và cải tiến nhằm tăng tính ứng dụng thực tiễn và khả năng xử lý dữ liệu phức tạp. Fapohunda và Akinlabi [6] chỉ ra rằng việc áp dụng CPM trong các dự án xây dựng có thể rút ngắn thời gian hoàn thành trung bình từ 10-15% so với phương pháp truyền thống [6]. Ballesteros-Pérez và Smith [7] đề xuất mô hình tích hợp giữa CPM và phương pháp giá trị thu được, qua đó cải thiện khả năng kiểm soát tiến độ theo thời gian thực. Bên cạnh đó, một số hướng nghiên cứu lại tập trung vào việc mở rộng CPM bằng cách kết hợp với các thuật toán tối ưu hóa và mô phỏng khác. Ví dụ, Leu và Yang [8] cùng Marzouk và Moselhi [9] đã áp dụng thuật toán di truyền (GA) cho bài toán liên hệ giữa thời gian và chi phí, trong khi Nassar và Hegab [10] phát triển hệ thống hỗ trợ ra quyết định kết hợp CPM và GA cho các dự án xây dựng quy mô lớn. Một số nghiên cứu khác tích hợp CPM với các công cụ mô phỏng và trí tuệ nhân tạo nhằm tăng khả năng dự đoán trong môi trường có bất định cao. Các ứng dụng CPM trong lĩnh vực sản xuất cơ khí và công nghiệp chế tạo đang được quan tâm mạnh mẽ. Các nghiên cứu [11, 12] đã chứng minh được mô hình hóa tiến độ dựa trên CPM cho phép doanh nghiệp cân bằng giữa chi phí, chất lượng và thời gian trong điều kiện nguồn lực giới hạn. Ngoài ra, tích hợp CPM vào các hệ thống lập lịch tự động đang mở ra hướng đi mới cho chuyển đổi số trong nhà máy sản xuất.

CPM là một giải pháp mang lại hiệu quả cao, tuy nhiên nếu sử dụng phương pháp thủ công để tính toán sẽ tạo ra nhiều khó khăn trong các thách thức kỹ thuật, đặc biệt khi xử lý các dữ liệu phức tạp. Hiện nay, có nhiều phần mềm được xây dựng dựa trên thuật toán này ví dụ như MS Project và Primavera P6 đang được sử dụng tại các cơ sở sản xuất. Dựa trên nền tảng cơ sở có sẵn, nghiên cứu này sẽ sử dụng ngôn ngữ lập trình Python để lập chương trình tự động tính toán và trực quan hóa đường găng trong các dự án tại các nhà máy sản xuất vừa và nhỏ với màn hình giao diện dễ tiếp cận và sử dụng.

2. Thuật toán CPM

Xét một dự án gồm n công việc khác nhau, có ràng buộc về thứ tự và thời gian thực hiện. Trong đó, thời gian xử lý của một công việc j ($j \rightarrow 1 \div n$) là cố định và được ký hiệu là p_j . Gọi C'_j là thời điểm hoàn thành sớm nhất của công việc j , S'_j là thời điểm bắt đầu sớm nhất của công việc j . Khi đó, $C'_j = S'_j + p_j$ là thời gian xử lý của công việc j .

Ký hiệu $\{k \rightarrow j\}$ là tập hợp các công việc trước đó của công việc j . Điều này có nghĩa là: nếu công việc k là liên trước của j , thì k phải hoàn thành trước khi j có thể bắt đầu. Phương pháp CPM được giải quyết dựa trên kết quả của hai quy trình là tiến và lùi.

Quy trình tiến dựa trên một nguyên lý đơn giản như sau: Một công việc chỉ có thể bắt đầu xử lý khi hoàn thành tất cả các công việc liên trước. Do đó, thời điểm bắt đầu sớm nhất của một công việc sẽ bằng giá trị lớn nhất của các thời điểm hoàn thành sớm nhất của tất cả các công việc trước đó. Thuật toán được thực hiện như sau:

Bước 1:

Đặt thời gian $t = 0$. Với mỗi công việc j không có công việc trước đó: đặt $S_j = 0$, và $C'_j = p_j$.

Bước 2: Tính toán quy nạp với mỗi công việc j :

$$S'_j = \max_{k \rightarrow j} C'_k \quad (1)$$

$$C'_j = S'_j + p_j \quad (2)$$

Bước 3: Thời gian hoàn thành toàn bộ dự án:

$$C_{max} = \max (C'_1, \dots, C'_n) \quad (3)$$

Kết thúc thuật toán

Thuật toán trên cho kết quả tối ưu về kế hoạch thực hiện và thời gian hoàn thành. Trong đó, mỗi công việc bắt đầu xử lý tại thời điểm sớm nhất có thể và hoàn thành tại thời điểm sớm nhất có thể. Tuy nhiên, điều này không nhất thiết là điều kiện bắt buộc để đạt được thời gian hoàn thành dự án tối thiểu, trong một số trường hợp, việc trì hoãn bắt đầu một số công việc có thể không làm tăng thời gian hoàn thành dự án.

Quy trình lùi được sử dụng để xác định thời điểm bắt đầu và kết thúc trễ nhất có thể của tất cả các công việc, với giả định thời gian thực hiện tối đa được giữ ở mức tối thiểu. Thuật toán sử dụng giá trị C_{max} là kết quả đầu ra từ quy trình làm dữ liệu đầu vào. Một số ký hiệu sử dụng trong thuật toán gồm: C''_j là thời điểm hoàn thành trễ nhất của công việc j , S''_j là thời điểm bắt đầu trễ nhất của công việc j . $\{j \rightarrow k\}$ biểu thị tất cả các công việc kế tiếp của công việc j . Thuật toán được thực hiện như sau:

Bước 1:

Đặt $t = C_{max}$

Đặt $C_j'' = C_{max}$ và $S_j'' = C_{max} - p_j$ với mỗi công việc j không có công việc kế tiếp:

Bước 2:

Tính toán hồi quy với mỗi công việc j :

$$C_j'' = \min_{j \rightarrow k} S_k'' \quad (4)$$

$$S_j'' = C_j'' - p_j \quad (5)$$

Bước 3:

$$\min(S_1'', \dots, S_n'') = 0 \quad (6)$$

Kết thúc thuật toán.

Một công việc mà thời điểm bắt đầu sớm nhất nhỏ hơn thời điểm bắt đầu trễ nhất được gọi là công việc có độ trễ. Phần chênh lệch giữa thời điểm bắt đầu trễ nhất và sớm nhất gọi là độ trễ. Ngược lại, nếu thời điểm bắt đầu sớm nhất bằng với thời điểm bắt đầu trễ nhất, thì công việc đó được gọi là công việc tới hạn.

Hạn chế của thuật toán CPM truyền thống nêu trên là mới chỉ xét tới quan hệ ràng buộc trước sau giữa các công việc và chưa xét tới các yếu tố tác động bên ngoài như nguồn nhân lực, máy móc thực hiện dự án, hay thời gian cung cấp nguyên vật liệu,... Giả sử ta gọi chung các yếu tố này là ràng buộc nguồn tài nguyên và giả định trong công việc chỉ chịu ràng buộc của một yếu tố. Gọi W là giới hạn nguồn tài nguyên, W_{jt} là tài nguyên cần thiết của một công việc p_j . Tại thời điểm có sự chồng chéo công việc và nguồn tài nguyên sử dụng, ta cần phải điều chỉnh thời gian hoàn thành công việc nhằm đảm bảo giới hạn nguồn tài nguyên cho phép. Gọi x_{jt} là biến nhị phân (0-1), trong đó nhận giá trị 1 nếu công việc hoàn thành đúng thời điểm t và 0 trong các trường hợp còn lại. Khi đó, số nhân lực cần thiết trong khoảng thời gian $[t-1, t]$ của công việc j là:

$$\sum_t^{t+p_j-1} W_{jt} x_{jt} \quad (7)$$

Điều kiện ràng buộc tài nguyên sẽ là:

$$\sum_{j=1}^k \sum_t^{t+p_j-1} W_{jt} x_{jt} \leq W \quad (8)$$

Thời điểm hoàn thành công việc j và thời gian hoàn thành toàn bộ dự án sau khi điều chỉnh được tính như sau:

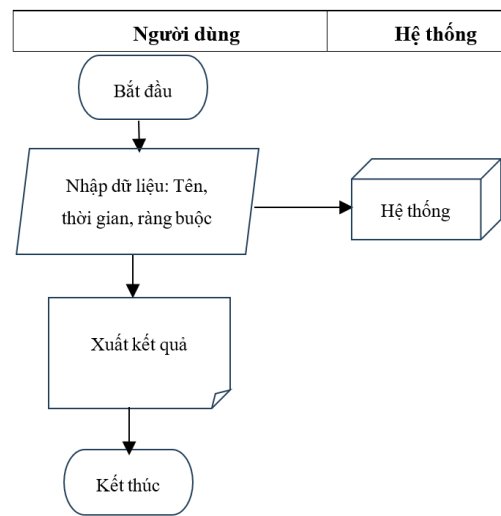
$$\sum_{t=1}^H t x_{jt} \quad (9) \quad \text{và} \quad \sum_{t=1}^H t x_{n+1,t} \quad (10)$$

Bài toán tối ưu hóa nguồn tài nguyên thường khó giải nếu số lượng công việc lớn và miền thời gian dài. Do đó, trong phần dưới đây sẽ giới thiệu sơ đồ thuật toán và công cụ tính toán dừng lại ở phần tối ưu hóa

thời gian hoàn thành dự án, phân tích hợp tối ưu hóa nguồn tài nguyên sẽ được thực hiện trong các nghiên cứu tiếp theo.

* Sơ đồ thuật toán

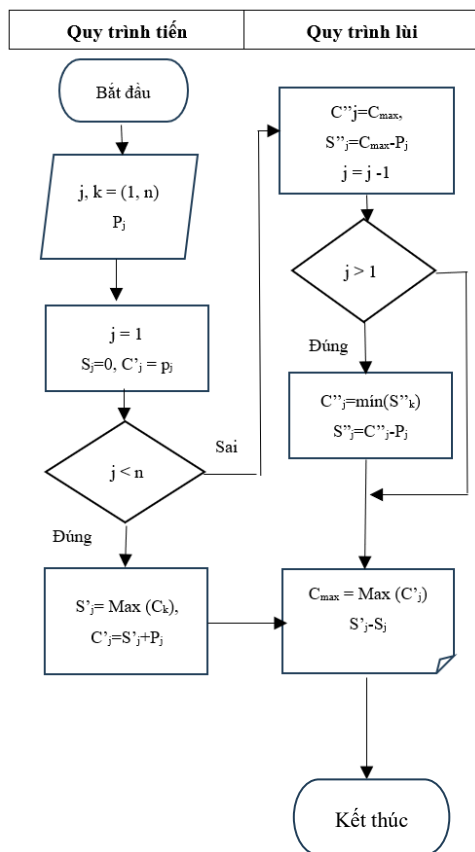
Trong Hình 1 biểu diễn sơ đồ nhập dữ liệu của người sử dụng. Người dùng gõ thông tin vào ô dữ liệu, khi đó chương trình sẽ tự động sao lưu dữ liệu vào cấu trúc dữ liệu tạm thời. Trong bước này yêu cầu dữ liệu phải có cấu trúc rõ ràng, tránh nhập trùng, thiếu hoặc sai định dạng. Hệ thống sẽ kiểm tra các lỗi như tính hợp lệ của công việc, mối quan hệ trước sau, lỗi nhập thông tin và gửi thông báo cho người dùng. Quy trình và cách xử lý số liệu được mô tả trong sơ đồ Hình 1.



Hình 1. Sơ đồ nhập và xử lý dữ liệu của người dùng

Hình 2 biểu diễn sơ đồ thuật toán trong lập trình Python cho quy trình tiến và lùi. Thuật toán bắt đầu từ danh sách các công việc được nhập từ người dùng, thời lượng công việc và quan hệ trước sau. Khi đó chương trình sẽ chuyển danh sách công việc thành một đồ thị có hướng, nghĩa là công việc liền trước phải xuất hiện trước công việc kế tiếp và không có chu trình phụ thuộc, trong đó mỗi công việc ứng với một nút.

Trong quy trình tiến, theo thứ tự chạy của biến j , các giá trị C_j' và S_j' được tính cho đến khi chạy hết công việc. Tiếp đó, chương trình sẽ chuyển sang quy trình lùi. Khi biến j chạy, các giá trị C_j'' và S_j'' được tính toán, từ đó tìm ra độ trễ giữa hai quy trình sẽ xuất ra đường găng cho toàn bộ dự án. Các thông số đầu ra của bài toán sẽ là sơ đồ thể hiện liên hệ giữa các công việc có quan hệ chặt chẽ tới thời gian hoàn thành dự án và thời gian hoàn thành ngắn nhất.



Hình 2. Sơ đồ thuật toán tiến lùi

3. Kết quả và thảo luận

Giao diện người dùng của chương trình được biểu diễn trên Hình 3 và 4.

Hình 3. Giao diện chung

Hình 4. Giao diện nhập dữ liệu

Bảng 1. Ví dụ minh họa

STT	Mô tả công việc	Thời gian (tuần)	Công việc liền trước
1	Đào móng	4 tuần	-
2	Làm nền móng	2 tuần	1
3	Lắp dầm sàn	3 tuần	2
4	Hệ thống ống ngoài nhà	3 tuần	1
5	Làm sàn	2 tuần	3, 4
6	Cấp điện tạm	1 tuần	2
7	Xây tường	10 tuần	5
8	Đi dây điện	2 tuần	6, 7
9	Lắp đường truyền tín hiệu	1 tuần	8
10	Hệ thống ống trong nhà	5 tuần	7
11	Lắp cửa sổ	2 tuần	10
12	Lắp cửa ra vào	2 tuần	10
13	Tường thạch cao	3 tuần	9, 10
14	Nội thất bên trong	5 tuần	12, 13
15	Ngoại thất bên ngoài	4 tuần	12
16	Sơn tường	3 tuần	11, 14, 15
17	Trải thảm	1 tuần	16
18	Kiểm tra	1 tuần	17

Trong nhập dữ liệu sẽ có các trường để nhập mã công việc, tên công việc và phần ràng buộc. Ngoài ra còn có một số các nút hỗ trợ trong quá trình nhập sai thông tin.

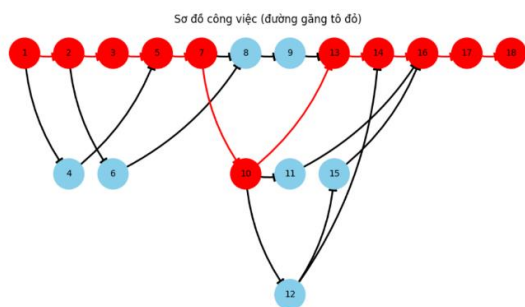
Phần kết quả hiển thị sẽ có các trường hiện bảng hoặc sơ đồ và kết quả tính ra thời gian hoàn thành ngắn nhất.

Phần dưới đây sẽ trình bày một ví dụ về cách xử lý số liệu trong một dự án xây dựng dựa trên phần mềm đã lập trình. Bảng 1 biểu diễn 18 nhóm công việc với thời gian hoàn thành và các mối liên hệ ràng buộc công việc trước sau.

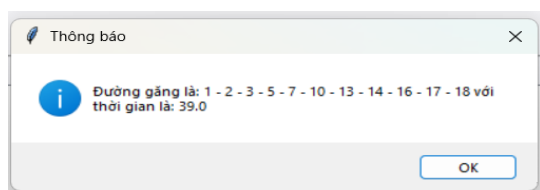
Các dữ liệu trong bảng sẽ được nhập vào máy. Kết quả thu được được đưa ra trong Hình 5, 6.

Hình 5 mô tả cấu trúc mạng lưới thể hiện các quan

hệ phụ thuộc giữa các công việc thông qua sơ đồ CPM. Trong sơ đồ này, mỗi nút đại diện cho một công việc (p_j), còn các cung có hướng biểu diễn mối quan hệ trước-sau. Dựa trên cấu trúc này sẽ giúp người quản lý xác định chuỗi công việc quyết định thời gian hoàn thành dự án trở nên ngắn nhất. Cụ thể, thông qua việc phân tích thứ tự logic và độ dài thời gian thực hiện của từng hoạt động để nhận diện các công việc có ảnh hưởng lớn nhất đến dự án xét theo toàn bộ tiến độ tổng thể.



Hình 5. Sơ đồ biểu diễn mối quan hệ giữa các công việc



Hình 6. Kết quả hiển thị các công việc trên đường găng dựa trên thuật toán CPM

Hình 6 thể hiện kết quả xác định đường găng, tức chuỗi các hoạt động có độ dự trữ thời gian bằng 0. Đây là tập hợp các công việc then chốt mà bất kỳ sự chậm trễ nào của chúng đều dẫn đến sự kéo dài thời gian hoàn thành dự án. Ngược lại, các hoạt động không nằm trên đường găng có độ dự trữ dương nghĩa là các công việc này có khả năng dịch chuyển trong phạm vi một khoảng thời gian nhất định mà không ảnh hưởng đến thời gian hoàn thành của dự án. Thời gian thể hiện trong Hình 6 chính là thời gian tối thiểu hoàn thành dự án, được tính dựa trên tổng thời gian của chuỗi các công việc.

Bảng 2 trình bày kết quả tính toán các thông số cốt lõi trong phương pháp CPM bao gồm thời điểm sớm nhất bắt đầu một công việc, thời điểm sớm nhất kết thúc công việc, thời điểm muộn nhất bắt đầu công việc và thời điểm muộn nhất kết thúc công việc không làm thay đổi thời gian hoàn thành dự án, độ dự trữ tổng, cho biết mức độ linh hoạt của từng công việc.

Kết quả trong bảng giúp làm rõ tác động của từng hoạt động lên tiến độ tổng thể. Các giá trị ES/EF thu

được từ quy trình tiến thể hiện giới hạn sớm nhất của tiến độ, trong khi LS/LF thu được từ quy trình lùi phản ánh các ràng buộc tiến độ ở mức muộn nhất có thể chấp nhận. Sự chênh lệch giữa hai cặp giá trị này là cơ sở xác định độ trễ, từ đó xác định đường găng và mức độ linh hoạt của từng công việc.

Bảng 2. Kết quả tính

Công việc j	P_j	ES	EF	LF	LS	Độ trễ
1	4.0	0	4.0	4.0	0.0	0.0
2	2.0	4.0	6.0	6.0	4.0	0.0
3	3.0	6.0	9.0	9.0	6.0	0.0
4	3.0	4.0	7.0	9.0	6.0	2.0
5	2.0	9.0	11.0	11.0	9.0	0.0
6	1.0	6.0	7.0	23.0	22.0	16.0
7	10.0	11.0	21.0	21.0	11.0	0.0
8	2.0	21.0	23.0	25.0	23.0	2.0
9	1.0	23.0	24.0	26.0	25.0	2.0
10	5.0	21.0	26.0	26.0	21.0	0.0
11	2.0	26.0	28.0	34.0	32.0	6.0
12	2.0	26.0	28.0	29.0	27.0	1.0
13	3.0	26.0	29.0	29.0	26.0	0.0
14	5.0	29.0	34.0	34.0	29.0	0.0
15	4.0	28.0	32.0	34.0	30.0	2.0
16	3.0	34.0	37.0	37.0	34.0	0.0
17	1.0	37.0	38.0	38.0	37.0	0.0
18	1.0	38.0	39.0	39.0	38.0	0.0

4. Kết luận

Nghiên cứu đã xây dựng thành công một chương trình tính toán CPM bằng Python, cho phép xây dựng nhanh sơ đồ biểu diễn mối quan hệ ràng buộc giữa các công việc, xác định các công việc then chốt ảnh hưởng tới thời gian hoàn thành dự án và đưa ra thời gian hoàn thành dự án ngắn nhất.

Kết quả cho thấy hệ thống hoạt động chính xác, ổn định và giúp giảm đáng kể thời gian xử lý so với phương pháp thủ công. Việc ứng dụng Python mang lại tính linh hoạt cao trong nhập dữ liệu, kiểm tra ràng buộc, trực quan hóa kết quả và dễ dàng mở rộng cho các bài toán nâng cao.

Từ các kết quả bước đầu đạt được trong việc hoạch định dự án dựa trên thuật toán CPM trong, hướng phát triển tiếp theo của nghiên cứu sẽ đi sâu vào các yếu tố ràng buộc và tài nguyên, tích hợp với thời gian thực để hỗ trợ trong việc quản lý và đưa ra quyết định trong từng giai đoạn.

Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường Đại học Hàng hải Việt Nam trong đề tài mã số: **DT25-26.45**.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Wadhwa, K. (2012), *Gantt-Charts Revisited: A Critical Analysis of Its Roots and Implications to the Management of Projects Today*, Copenhagen Business School Research Publications.
- [2] Li, Z. X., & Zhang, L. L. (2012), *A Study on Multi-Project Management Based on Gantt Chart and Network Planning Technique*, Applied Mechanics and Materials, Vol.174-177, pp.2854-2858.
- [3] Bagshaw, K. B. (2021), *PERT and CPM in project management with practical examples*, American Journal of Operations Research, Vol.11, pp.215-226.
- [4] Duc, N. A. (2024), *Enhancing Program Evaluation and Review Technique (PERT) for construction project scheduling with Bayesian updating and appropriate probability distributions*, Journal of Science and Technology in Civil Engineering (JSTCE - HUCE), Vol.18(4), pp.132-147.
- [5] Kelley, J. E., & Walker, M. R. (1959), *Critical-Path Planning and Scheduling*, Proceedings of the Eastern Joint Computer Conference, pp.160-173.
- [6] Fapohunda, J. A., & Akinlabi, E. T. (2017), *Optimizing project scheduling through critical path analysis and resource leveling*, Journal of Construction Project Management and Innovation, Vol.7(2), pp.1926-1941.
- [7] Ballesteros-Pérez, P., & Smith, S. D. (2015), *Improving project control by integrating the earned value and critical path methods*. Journal of Construction Engineering and Management, Vol.141(6), p. 04015005.
- [8] Leu, S. S., & Yang, C. H. (1999), *GA-based multicriteria optimal model for construction scheduling*, Journal of Construction Engineering and Management, Vol.125(6), pp.420-427.
- [9] Marzouk, M. M., & Moselhi, O. (2003), *A decision support tool for construction time-cost trade-off analysis using genetic algorithms*, Advances in Engineering Software, Vol.34(7), pp.421-432.
- [10] Nassar, K. M., & Hegab, M. (2006), *Developing a decision support system for project time-cost optimization using CPM and genetic algorithms*, Automation in Construction, Vol.15(6), pp.731-740.
- [11] Tareghian, H. R., & Taheri, S. H. (2006), *On the discrete time, cost and quality trade-off problem*, Applied Mathematics and Computation, Vol.181(2), p. 1305.
- [12] Julyanto, O., Wirani, A. P., & Agustina, H. (2021), *Product Planning and Control Using the Critical Path Method*, International Journal of Social and Management Studies, Vol.2(3), pp.93-98.
- [13] Ridwan, A. (2025), *Optimizing Project Time Management Using the Critical Path Method (CPM) and Program Evaluation and Review Technique (PERT)*, Jurnal Aplikasi Pelayaran dan Kepelabuhanan, Vol.15(2), pp.354-361
- [14] Eviany Raranta, M., Manoppo, F. J., & Malingkas, G. Y. (2025), *Implementation of the Critical Path Method (CPM) in Web Applications for Project Scheduling with Python Programming*, Journal of Social Research, Vol.4(7).
- [15] Raihan, M., & Sidabalok, A. S. (2025), *Design and Build Project Scheduling Applications Using the Critical Path Method*, Bigint Computing Journal, Vol.3(2).
- [16] Tohari, H., & Suhasto, R. I. (2023), *The Application of Critical Path Method (CPM) in The Development of Project Management Information Systems Using the Incremental Model*, Jurnal AKSI, Vol.8(2).
- [17] Suramli, S., Rachman, K. A., Dewi, N. F., Novianda, D. S., & Surahman, S. (2025), *Critical Path Analysis Scheduling Project with Critical Path Method (CPM) using Application Microsoft Project*, Enrichment: Journal of Management, Vol.15(2).

Ngày nhận bài:	02/12/2025
Ngày nhận bản sửa:	06/01/2026
Ngày duyệt đăng:	01/02/2026