



Article info

Type of article:

Original research paper

DOI:

<https://doi.org/10.58845/jstt.utt.2026.vn.6.1.87-102>

***Corresponding author:**

Email address:

nhanbnd@utt.edu.vn

Received: 11/11/2025

Received in Revised Form:

21/03/2026

Accepted: 22/03/2026

Using Discrete-Event Simulation to optimize earthmoving equipment fleet under urban traffic conditions in Vietnam

An Van Hoang¹, Thanh Hong Pham¹, Binh Thanh Phan¹, Nam Quang Nguyen², Dung-Nhan Nguyen Bui^{3,*}

¹ Class of Civil Engineering – K57, Le Quy Don Technical University, 236 Hoang Quoc Viet, Hanoi, Vietnam

² Institute of Special Construction Engineering, Le Quy Don Technical University, 236 Hoang Quoc Viet, Hanoi, Vietnam

³ Faculty of Transport Economics, University of Transport Technology, 54 Trieu Khuc, Hanoi, Vietnam

Abstract: This study applies Discrete-Event Simulation (DES) to evaluate the impacts of urban traffic conditions on schedule and cost performance in earthwork operations and to identify an optimal construction equipment fleet configuration. An initial fleet was first determined using conventional theoretical calculations, consisting of 4 excavators and 8 trucks per excavator to complete the work. The earthwork process was then modeled in EZStrobe and extended through multiple simulation scenarios, in which the probability of stopping at signalized intersections (P1) was treated as the primary influencing variable. Results indicate that under the most unfavorable condition (P1 = 100%), project duration and cost increase by 28.24% and 29.9%, respectively, compared with the theoretical estimate. Under the traffic conditions observed at the project site (P1 = 70%), additional scenarios were analyzed by varying the number of excavators from 4 to 6. The simulation identified the optimal fleet configuration that satisfies both schedule and cost objectives as 6 excavators combined with 8 to 9 trucks per excavator. These findings confirm that explicitly accounting for stochastic urban traffic factors is necessary to ensure feasible construction planning, and they demonstrate that DES is an effective decision-support tool for selecting construction execution strategies.

Keywords: Discrete Event Simulation; EZStrobe; Earthworks; Equipment fleet; Urban Traffic



Thông tin bài viết
Dạng bài viết:
Bài báo nghiên cứu

DOI:
<https://doi.org/10.58845/jstt.utt.2026.vn.6.1.87-102>

*Tác giả liên hệ:
Địa chỉ Email:
nhanbnd@utt.edu.vn

Ngày nộp bài: 11/11/2025
Ngày nộp bài sửa: 21/03/2026
Ngày chấp nhận: 22/03/2026

Ứng dụng mô phỏng sự kiện rời rạc để tối ưu hóa đội hình thiết bị thi công đất trong điều kiện giao thông đô thị tại Việt Nam

Hoàng Văn An¹, Phạm Hồng Thanh¹, Phan Thanh Bình¹, Nguyễn Quang Nam², Bùi Nguyễn Dũng Nhân^{3*}

¹Lớp Xây dựng dân dụng – K57, Đại học Kỹ thuật Lê Quý Đôn, 236 Hoàng Quốc Việt, Hà Nội, Việt Nam

²Viện Kỹ thuật CTĐB, Đại học Kỹ thuật Lê Quý Đôn, 236 Hoàng Quốc Việt, Hà Nội, Việt Nam

³Khoa Kinh tế vận tải, Trường Đại học Công nghệ Giao thông vận tải, 54 Triều Khúc, Hà Nội, Việt Nam

Tóm tắt: Nghiên cứu này ứng dụng mô phỏng sự kiện rời rạc (DES) để đánh giá tác động của điều kiện giao thông đô thị đến tiến độ và chi phí trong hoạt động thi công đất, từ đó xác định đội hình thiết bị thi công tối ưu. Ban đầu, đội hình thiết bị được xác định theo phương pháp tính toán lý thuyết với 4 máy đào và 8 xe tải/máy để hoàn thành công việc. Quá trình thi công sau đó được mô hình hóa bằng chương trình mô phỏng EZStrobe và được phát triển với nhiều kịch bản mô phỏng, trong đó xác suất dừng chờ tại các nút giao có đèn tín hiệu (P1) được xem là biến ảnh hưởng chính. Kết quả cho thấy, trong điều kiện bất lợi nhất (P1 = 100%), tiến độ và chi phí thi công lần lượt tăng 28,24% và 29,9% so với tính toán lý thuyết. Trong điều kiện giao thông thực tế tại khu vực thi công (P1 = 70%), tiến hành phân tích các kịch bản thay đổi về số lượng máy đào từ 4 đến 6 máy. Mô phỏng đã xác định đội hình thiết bị tối ưu đáp ứng yêu cầu về tiến độ và chi phí là 6 máy đào kết hợp với 8 đến 9 xe tải/máy. Kết quả khẳng định rằng việc xem xét đầy đủ các yếu tố ngẫu nhiên của giao thông đô thị là cần thiết để đảm bảo tính khả thi của kế hoạch tổ chức thi công, đồng thời cho thấy DES là công cụ hiệu quả trong việc hỗ trợ ra quyết định, lựa chọn phương án thi công.

Từ khóa: Mô phỏng sự kiện rời rạc; EZStrobe; thi công đất; đội hình thiết bị; giao thông đô thị.

1. Giới thiệu

Công tác thi công đất là một giai đoạn quan trọng trong hầu hết các dự án xây dựng. Hoạt động này vốn mang tính đặc thù khi chịu tác động ngẫu nhiên bởi nhiều yếu tố và đòi hỏi sự phối hợp nhịp nhàng giữa nhiều loại thiết bị cơ giới như máy đào, xe tải và máy ủi. Hiệu quả của quá trình thi công đất có ảnh hưởng trực tiếp đến tiến độ, chi phí và

chất lượng tổng thể của dự án. Trong đó, việc tổ chức đội hình thiết bị thi công hợp lý giữ vai trò then chốt, quyết định đến năng suất và sự hiệu quả sử dụng nguồn lực [1].

Trong thực tế, việc ước tính năng suất và xác định đội hình thiết bị thường chủ yếu dựa trên kinh nghiệm của người quản lý hoặc các phương pháp tính toán lý thuyết đơn giản, thiếu sự hỗ trợ từ các

công cụ phân tích hiện đại. Các phương pháp truyền thống thường chỉ xem xét năng suất của từng thiết bị riêng lẻ mà không phản ánh được mối tương tác phức tạp giữa các thiết bị trong quá trình thi công, cũng như không tính đến các yếu tố ngẫu nhiên như điều kiện mặt bằng, thời tiết, hay các gián đoạn trong quá trình vận chuyển. Hệ quả là dẫn đến sự mất cân đối trong tổ chức đội hình thiết bị, một số thiết bị phải chờ đợi, trong khi các thiết bị khác hoạt động vượt công suất, làm tăng chi phí, kéo dài tiến độ và giảm hiệu quả sử dụng nguồn lực. Đặc biệt, trong điều kiện thi công tại khu vực đô thị, các yếu tố ngẫu nhiên càng trở nên phức tạp và khó dự đoán hơn. Mật độ giao thông cao, cùng với sự hiện diện của nhiều nút giao có đèn tín hiệu đã tạo ra sự biến động lớn trong thời gian vận chuyển và chu kỳ làm việc của thiết bị. Các phương tiện vận chuyển thường phải dừng chờ, di chuyển chậm hoặc thay đổi lộ trình do tắc nghẽn, dẫn đến sự gián đoạn và làm giảm đáng kể hiệu suất của máy đào trên công trường. Những tác động này có thể làm thay đổi đáng kể năng suất và chi phí thi công, song vẫn chưa được xem xét một cách đầy đủ trong các phương pháp tính toán truyền thống.

Trong những năm gần đây, mô phỏng sự kiện rời rạc (Discrete Event Simulation – DES) đã được chứng minh là một công cụ hiệu quả trong việc mô hình hóa và tối ưu hóa các quá trình thi công xây dựng phức tạp có tính ngẫu nhiên cao. Nhiều công trình nghiên cứu đã cho thấy tiềm năng ứng dụng rộng rãi của DES. Chẳng hạn, nghiên cứu [2], đã đề xuất mô hình DES nhằm tối ưu hóa đội hình thiết bị dựa trên năng suất tiêu chuẩn, hỗ trợ đáng kể cho quá trình ra quyết định trong giai đoạn lập kế hoạch. Tương tự, nghiên cứu [3], phát triển nền tảng mô phỏng dựa trên DES để mô phỏng chi tiết toàn bộ chu trình thi công đất, từ đó xác định tổ hợp xe tải và máy đào tối ưu. Các nghiên cứu [4-7], sử dụng DES để tối ưu hóa đồng thời năng suất và chi phí trong công tác vận chuyển đất thông qua mô phỏng nhiều kịch bản bố trí thiết bị khác nhau. Trong lĩnh vực khai thác mỏ, các

nghiên cứu [8, 9], đã chứng minh rằng DES có thể phản ánh ảnh hưởng của các yếu tố ngẫu nhiên như điều kiện vận hành, sự cố và biến thiên chu kỳ vận chuyển đến năng suất thực tế. Ngoài ra, một số nghiên cứu mới như [10, 11], khi kết hợp dữ liệu thực tế và DES cũng đã cho thấy tiềm năng của phương pháp này trong việc mô phỏng năng suất và tối ưu bố trí thiết bị trong môi trường có độ bất định cao.

Tại Việt Nam, nghiên cứu về ứng dụng DES trong phân tích các hoạt động xây dựng vẫn còn khá hạn chế. Một số nghiên cứu gần đây [12, 13], đã bước đầu áp dụng DES để đánh giá tác động của các yếu tố ngẫu nhiên như sự cố thiết bị đến năng suất trong thi công đất và thi công hầm. Những nghiên cứu trên đã cho thấy tiềm năng lớn của DES trong việc phân tích năng suất, xác định đội hình thiết bị tối ưu và đánh giá rủi ro tiến độ thi công. Tuy nhiên, phần lớn các nghiên cứu hiện nay chủ yếu tập trung vào các dự án có điều kiện không gian mở hoặc ít chịu ảnh hưởng của giao thông đô thị, trong khi môi trường đô thị tại các quốc gia đang phát triển như Việt Nam lại có đặc thù phức tạp hơn, chịu tác động mạnh của mật độ giao thông và các yếu tố ngẫu nhiên khó dự đoán.

Trước những khoảng trống đó, nghiên cứu này được thực hiện nhằm ứng dụng DES để tối ưu hóa đội hình thiết bị thi công đất trong điều kiện giao thông đô thị tại Việt Nam. Nghiên cứu tập trung vào việc xây dựng mô hình mô phỏng phản ánh các yếu tố thực tế như lưu lượng giao thông, khoảng cách vận chuyển, thời gian chờ đèn tín hiệu và sự giới hạn không gian, qua đó xác định tổ hợp thiết bị tối ưu nhằm đạt hiệu quả cao nhất về thời gian và chi phí. Kết quả kỳ vọng của nghiên cứu là cung cấp một công cụ hỗ trợ ra quyết định cho các nhà quản lý thi công, đồng thời góp phần thúc đẩy việc ứng dụng mô phỏng tiên tiến trong lĩnh vực quản lý thi công xây dựng tại Việt Nam.

2. Phương pháp nghiên cứu

2.1. Quy trình thực hiện nghiên cứu

Quy trình thực hiện nghiên cứu được chia

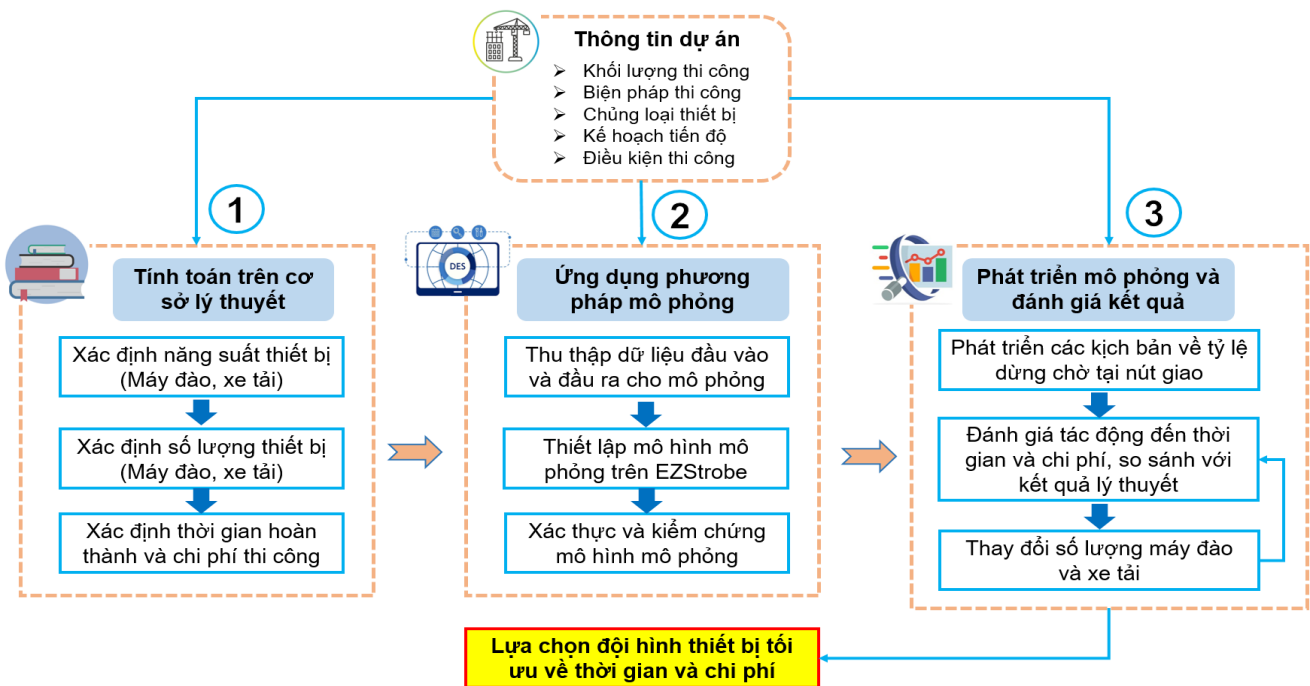
làm ba giai đoạn chính và được mô tả bằng sơ đồ như trong Hình 1.

Giai đoạn 1: Dựa trên cơ sở dữ liệu từ dự án thực tế, năng suất của máy đào và xe tải được xác định theo phương pháp lý thuyết để tính toán số lượng thiết bị cần thiết. Từ đó, xác định tiến độ và chi phí thi công, làm cơ sở so sánh với các kết quả phân tích từ mô phỏng.

Giai đoạn 2: Quá trình thi công đất được mô hình hóa bằng phần mềm EZStrobe với các thông số đầu vào và đầu ra cho mô phỏng được thu thập từ dự án thực tế. Trong đó, số lượng thiết bị (máy

đào và xe tải) được xác định từ lý thuyết. Mô hình sau đó được thiết lập, xác thực và kiểm chứng để đảm bảo phản ánh đúng điều kiện thi công trong môi trường đô thị.

Giai đoạn 3: Các kịch bản mô phỏng được phát triển nhằm xem xét ảnh hưởng của điều kiện giao thông ngẫu nhiên, đặc biệt là tỷ lệ dừng chờ tại các nút đèn tín hiệu. Kết quả mô phỏng được so sánh với giá trị lý thuyết về thời gian và chi phí, từ đó điều chỉnh quy mô đội hình thiết bị (số lượng máy đào, xe tải) nhằm xác định phương án tối ưu đáp ứng tiến độ và cân đối chi phí.



Hình 1. Sơ đồ quy trình thực hiện nghiên cứu

2.2. Chương trình mô phỏng EZStrobe

EZStrobe là một công cụ mô phỏng sự kiện rời rạc dựa trên sơ đồ chu trình hoạt động (ACD) và áp dụng mô hình quét ba pha do Martinez đề xuất [14, 15]. Mô hình mô phỏng trong EZStrobe được thể hiện hoàn toàn dưới dạng mạng đồ họa, trong đó các nút và liên kết được xây dựng trực quan thông qua thao tác kéo, thả trong môi trường Microsoft Visio [16]. Phần mềm bao gồm 05 phần tử mô hình hóa cơ bản thể hiện như trên Hình 2: Hàng đợi (Queue), Hoạt động có điều kiện (Combi Activity), Hoạt động thường (Normal Activity), Phân nhánh (Fork) và Liên kết (Link) [15]. Cụ thể,

“Queue” được dùng để lưu trữ tài nguyên nhân công; “Combi” biểu diễn một tác vụ bắt đầu ngay khi có đủ các tài nguyên cần thiết; còn “Normal” sẽ khởi động ngay khi một hoạt động trước nó kết thúc; Các liên kết “Link” kết nối các phần tử với nhau theo quan hệ chức năng. Đặc biệt, phần tử “Fork” cho phép phân nhánh hướng di chuyển của tài nguyên theo một tỷ lệ xác suất “P” định trước, đây cũng là phần tử giúp nghiên cứu khảo sát các kịch bản mô phỏng tương ứng với tỷ lệ xác suất dừng chờ đèn tín hiệu tại các nút giao. Ngoài ra, EZStrobe cũng cung cấp nhiều hàm phân phối xác suất tích hợp sẵn cho các hoạt động, cho phép mô hình hóa các yếu tố ngẫu nhiên và biến thiên trong

quá trình thi công thực tế. Mặc dù ra đời từ những năm 2000 và không phải là đại diện cho xu hướng hiện tại trong tối ưu hóa tự động, nhưng EZStrobe vẫn được giới nghiên cứu chuyên môn về xây dựng quan tâm, đánh giá cao và tiếp tục sử dụng bởi các ưu điểm vượt trội sau [14,15,18]:

- Phần mềm cho phép mô hình hóa hệ thống mà không đòi hỏi lập trình phức tạp, đồng thời hỗ trợ hoạt ảnh mô phỏng để theo dõi và xác minh logic vận hành. Nhờ đó, mô hình có thể được xây dựng, kiểm tra và hiệu chỉnh một cách thuận lợi;

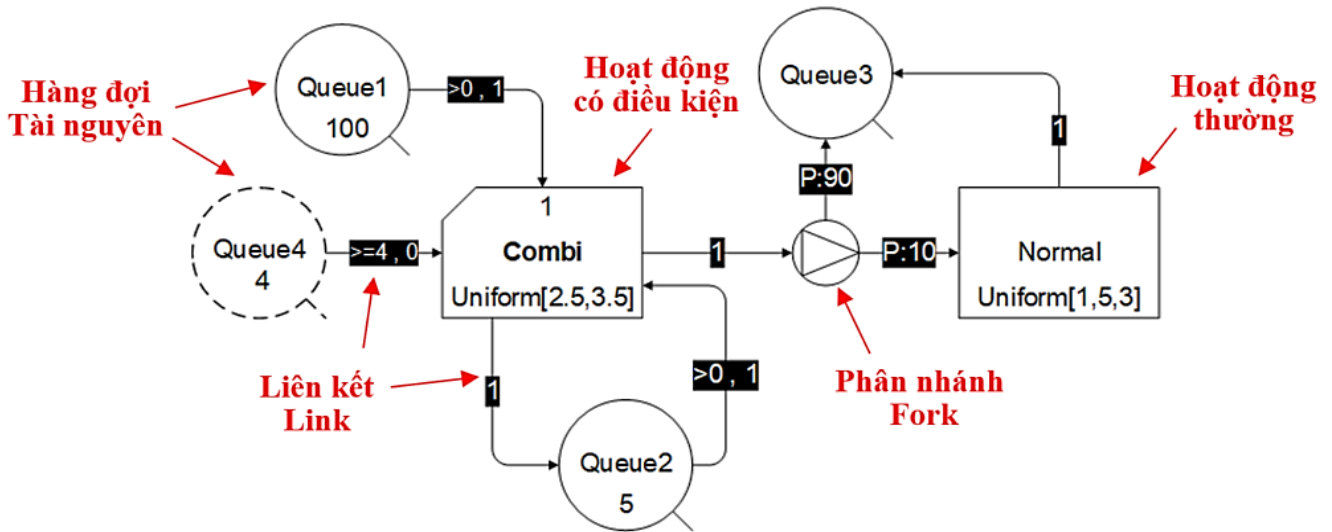
- EZStrobe cung cấp các thống kê chi tiết cho hàng đợi và hoạt động, đồng thời hỗ trợ tham số hóa đầu vào, cấu hình đầu ra, tạo điều kiện thuận

lợi cho việc phân tích, hiệu chỉnh và so sánh các kịch bản mô phỏng;

- Phần mềm cho phép sử dụng nhiều luồng số ngẫu nhiên độc lập, qua đó nâng cao độ tin cậy khi so sánh giữa các kịch bản khác nhau;

- So với các công cụ hiện đại như SimPy, AnyLogic hay Arena/Simio, EZStrobe có thể không nổi bật ở khả năng tối ưu hóa tích hợp, nhưng lại có ưu thế về tính trực quan, độ ổn định, khả năng tiếp cận và không đòi hỏi chi phí bản quyền cao hoặc kỹ năng lập trình sâu.

Cũng vì những lý do trên, chúng tôi chọn EZStrobe làm công cụ trong nghiên cứu này.



Hình 2. Các phần tử mô hình hoá trong EZStrobe

3. Trường hợp nghiên cứu

Nghiên cứu điển hình được xây dựng dựa trên giai đoạn thi công đào đất phần hầm của dự án Khu nhà ở cán bộ, nhân viên Ban Cơ yếu Chính phủ tại khu đất M2, Khuất Duy Tiến, Thanh Xuân, Hà Nội. Phần ngầm của công trình được thi công bằng phương pháp đào mở, sử dụng hệ cừ Larsen kết hợp với khoan neo để chống giữ hố đào.

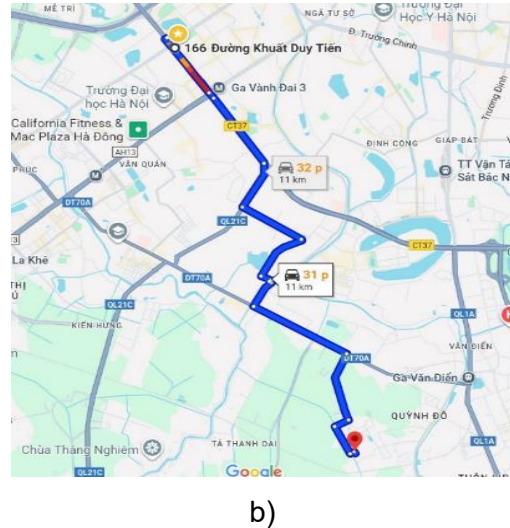
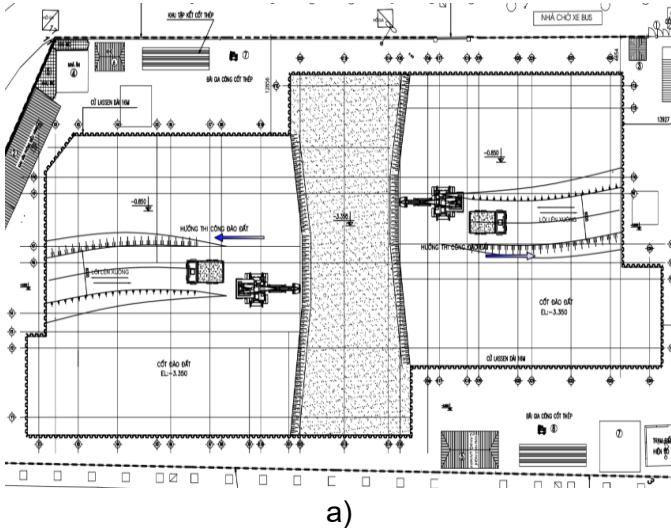
Nghiên cứu này tập trung vào giai đoạn thi công đào đất lớp 1 và lớp 2 của tầng hầm với cos cao độ thi công từ -0,85 m đến -6,35 m, khối lượng đất đào là 28460 m³. Nhà thầu thi công tổ chức thi công đào đất theo 2 hướng, sử dụng máy đào gầu nghịch đào đất từ vị trí giữa của công trình. Đất thải được vận chuyển bằng ô tô tự đổ, vị trí đổ đất thải cách địa điểm thi công 11km tại bãi chôn lấp xã Vĩnh Quỳnh, huyện Thanh Trì, TP Hà Nội.

Bảng 1. Thông tin về thiết bị thi công đất trong dự án

STT	Loại thiết bị	Chủng loại	Nhãn hiệu	Năm sản xuất	Công suất (kW/Hp)	Tải trọng (T)	Dung tích (m ³)
1	Máy đào	DooSan	DX180	2012	98/131	19,6	0,8
2	Xe tải	Huyndai	HD270	2015	279/374	15	10

Hình 3a và 3b lần lượt thể hiện mặt bằng tổ chức thi công đào đất và bản đồ google maps tuyến đường vận chuyển đất thực tế. Đây là tuyến vận chuyển đi qua khu vực nội đô có mật độ giao thông cao, bao gồm 05 nút giao thông trên hành trình đi và 04 nút giao thông trên hành trình về. Về thiết bị thi công, nhà thầu sử dụng máy đào gầu nghịch Doosan DX180 có dung tích gầu 0,8 m³ để

đào đất, kết hợp với ô tô tự đổ Hyundai HD-270 tải trọng 15 tấn để vận chuyển đất. Thông tin thiết bị được thể hiện chi tiết trong Bảng 1. Thời gian hoàn thành công việc theo tiến độ được phê duyệt là 10 ngày, với hình thức tổ chức 01 ca làm việc mỗi ngày, mỗi ca kéo dài 8 giờ. Khung giờ thi công theo quy định là về ban đêm, từ 20 giờ hôm trước đến 04 giờ hôm sau.



Hình 3. Biện pháp tổ chức thi công đào đất và vận chuyển đất thải

a) Mặt bằng tổ chức thi công đào đất; b) Tuyến đường vận chuyển đất thải

4. Tính toán đội hình thiết bị theo lý thuyết

4.1. Tính năng suất của thiết bị thi công

- Năng suất lý thuyết của máy đào được xác định theo các Công thức (1) và (2), [17]:

$$Q_m = q \cdot K_{d1} \cdot K_t \cdot N_{ck} \cdot K_{sd1} \quad (m^3/h) \quad (1)$$

$$M_d = Q_m \cdot n_{ca} \cdot 8 \quad (m^3) \quad (2)$$

Trong đó: Q_m - Năng suất máy đào (m³/h); M_d - Khối lượng đất do 01 máy đào được trong 01 ngày (m³); n_{ca} - Số ca làm việc trong ngày; q - Dung tích gầu đào (m³), q = 0,8 (m³); K_{d1} - Hệ số đầy gầu, K_{d1} = 0,9; K_t - Hệ số tơi của đất, với đất cấp II, lấy K_t = 1,15; K_{sd1} - Hệ số hiệu suất sử dụng máy đào, lấy K_{sd1} = 0,9; N_{ck} - Số chu kỳ (đào - đổ) của máy đào trong 01 giờ, N_{ck} = 120 (chu kỳ).

- Năng suất lý thuyết của xe tải được xác định theo các Công thức (3):

$$Q_x = q_x \cdot K_{dt2} \cdot \frac{3600}{T_{ck,x}} \cdot K_{sd2} \quad (3)$$

Trong đó: Q_x - Năng suất xe tải (m³/h); q_x - Dung tích của thùng xe (m³); q_x = 10 (m³); K_{dt2} - Hệ số đầy thùng xe, lấy K_{dt2} = 1,07; K_{sd2} - Hệ số hiệu suất sử dụng xe tải, lấy K_{sd2} = 0,95; T_{ck,x} - Thời gian chu kỳ của xe tải (s) được xác định theo Công thức (4);

$$T_{ck,x} = t_1 + t_2 + t_3 + t_4 + t_5 + t_6 \quad (s) \quad (4)$$

Trong đó: t₁ - Thời gian ô tô lùi vào chỗ lấy đất (s) (20s ÷ 25s); t₂ - Thời gian đổ đất đầy xe được xác định theo Công thức (5); t₃ - Thời gian rửa xe trước khi rời công trường (s), (50s ÷ 60s); t₄ - Thời gian vận chuyển đất đến chỗ đổ (s), được xác định như trong Công thức (6); t₅ - Thời gian dịch chuyển và đổ đất tại bãi đổ (s), (50s ÷ 70s); t₆ - Thời gian xe quay về vị trí đào (s), xác định như t₄ với vận tốc xe trống tải V_r = 35 (km/h).

$$t_2 = T_{ck} \cdot N_g = \frac{3600}{T_{ck} \cdot N_g} \quad (s) \quad (5)$$

Trong đó: T_{ck} - Thời gian thực hiện 01 chu kỳ đào của máy đào (s); N_{ck} - Số chu kỳ đào - đổ trong 01 giờ, N_{ck} = 120 (chu kỳ); N_g - Số lượng chu kỳ

đào – đổ để chất đầy xe tải; $N_g = 13$ (chu kỳ).

$$t_4 = \frac{L}{V_d} \cdot 3600 \text{ (s)} \tag{6}$$

Trong đó: L - Chiều dài quãng đường vận

chuyển (km), L = 11 (km); Vận tốc trung bình của xe khi đầy tải $V_d = 25$ (km/h);

Kết quả tính toán lý thuyết về năng suất của thiết bị được tổng hợp trong Bảng 2

Bảng 2. Năng suất lý thuyết của thiết bị

Máy đào		Xe tải							
Q_m (m ³ /h)	M_d (m ³)	t_1 (s)	t_2 (s)	t_3 (s)	t_4 (s)	t_5 (s)	t_6 (s)	$T_{ck,x}$ (s)	Q_x (m ³ /h)
89,4	715,4	20	390	60	1584	50	1131	3235	11,3

4.2. Xác định số lượng thiết bị thi công

Số lượng máy đào cần để đáp ứng yêu cầu tiến độ được xác định theo Công thức (7):

$$N_{may} = \frac{V_{01}}{M_d} \text{ (máy)} \tag{7}$$

Trong đó: V_{01} - Khối lượng đất cần đào trong 01 ngày theo kế hoạch (m³); với tổng khối lượng đào là 28460 (m³) cần hoàn thành trong 10 ngày, vậy $V_{01} = 2846$ (m³); M_d - Khối lượng đất do 01 máy đào được trong 01 ngày (m³), Từ Bảng 2, ta có giá trị $M_d = 715,4$ (m³).

$$N_{may} = 2846/715,4 = 3,98 \text{ (máy)}.$$

=> Chọn $N_{may} = 04$ (máy).

Số lượng xe tải chở đất được tính toán để phù hợp với năng suất đào đất của máy đào. Số lượng xe tải cần thiết cho 01 máy đào được xác định theo Công thức (8):

$$N_{xe} = \frac{Q_m}{Q_x} \text{ (xe)} \tag{8}$$

Trong đó: Q_m - Năng suất máy đào (m³/h); Q_x - Năng suất xe tải (m³/h). Từ Bảng 2, ta có giá trị $Q_m = 89,4$ (m³/h) và $Q_x = 11,3$ (m³/h).

$$N_{xe} = 89,4/11,3 = 7,91 \text{ (xe)}$$

=> Chọn $N_{xe} = 08$ (xe)

Như vậy để hoàn thành công việc trong 10 ngày trên cơ sở lý thuyết thì cần sử dụng 04 máy đào DX180 và 32 xe tải HD270.

4.3. Xác định tiến độ và chi phí thi công

4.3.1. Xác định tiến độ thi công

Tiến độ thi công được xác định theo năng suất của máy đào, là thiết bị thi công chính. Thời gian hoàn thành công việc được xác định theo Công thức (9), trong đó khối lượng đất đào trong một ngày được xác định theo Công thức (10):

$$T_{ht} = \frac{V_{đào}}{M'_d} \text{ (ngày)} \tag{9}$$

$$M'_d = M_d \cdot N_{may} \text{ (m}^3\text{)} \tag{10}$$

Trong đó: T_{ht} - Thời gian hoàn thành dự kiến (ngày); $V_{đào}$ - Tổng khối lượng đất đào và vận chuyển (m³); M'_d - Khối lượng đất đào trong 01 ngày (m³); M_d - Khối lượng đất do 01 máy đào được trong 01 ngày (m³) xác định trong Bảng 2; $N_{máy}$ - Số lượng máy đào (máy). Các kết quả tính toán về thời gian hoàn thành được trình bày trong Bảng 3.

Bảng 3. Thời gian hoàn thành công việc

$V_{đào}$ (m ³)	M_d (m ³)	$N_{máy}$ (máy)	M'_d (m ³)	T_{ht} (ngày)
28460	715,4	04	2861,6	9,95

4.3.2. Ước tính chi phí thi công

Trong nghiên cứu này, chi phí cho hoạt động thi công đất được xác định theo chi phí trực tiếp bao

gồm chi phí thuê thiết bị và nhân công. Bảng 4 thể hiện đơn giá thuê thiết bị và nhân công theo hình thức thuê trọn gói theo ca (đã bao gồm chi phí nhiên liệu).

Bảng 4. Đơn giá thuê thiết bị và nhân công

STT	Chi phí thuê	Ký hiệu	Đơn giá (Triệu VNĐ/ca)
01	Máy xúc DX180	G_m	4,2
02	Xe tải HD270	G_x	3,4
03	Nhân công lái máy xúc	G_{lm}	0,6
04	Nhân công lái xe tải	G_{lx}	0,5

Chi phí được xác định qua các Công thức (11) đến (13):

$$G = G_{TB} + G_{NC} \text{ (Triệu VNĐ)} \quad (11)$$

$$G_{TB} = (G_m \cdot N_{may} + G_x \cdot N_{xe}) \cdot T_{ht} \text{ (Triệu VNĐ)} \quad (12)$$

$$G_{NC} = (G_{lm} \cdot N_{may} + G_{lx} \cdot N_{xe}) \cdot T_{ht} \text{ (Triệu VNĐ)} \quad (13)$$

Trong đó: G - Chi phí thi công (Triệu VNĐ);
 G_{TB} - Chi phí thuê thiết bị (Triệu VNĐ); G_{NC} - Chi

phí thuê nhân công (Triệu VNĐ); G_m, G_x - Lần lượt là chi phí thuê máy đào và xe tải (Triệu VNĐ/ca); N_{may}, N_{xe} - Lần lượt là số lượng máy đào và xe tải (chiếc); T_{ht} - Thời gian hoàn thành công việc (ngày). Từ các công thức trên, kết quả tính toán chi phí thi công theo lý thuyết được thể hiện như trong Bảng 5.

Bảng 5. Kết quả tính toán chi phí thi công

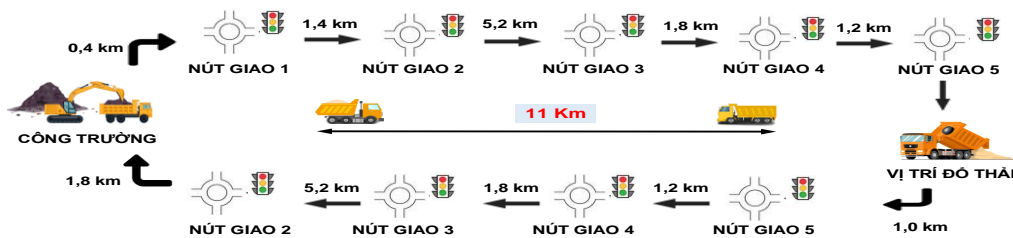
N _{máy} (máy)	N _{xe} (xe)	T _{ht} (ngày)	G _{TB} (Triệu VNĐ)	G _{NC} (Triệu VNĐ)	G (Triệu VNĐ)
4	32	9,95	1249,7	165,2	1414,9

5. Xác định đội hình thiết bị thi công đất bằng phương pháp mô phỏng

5.1. Thu thập dữ liệu đầu vào cho mô phỏng

Để thiết lập mô hình mô phỏng một cách sát thực tế, việc xác định các hoạt động cụ thể trong quá trình thi công đất là rất cần thiết. Thực tế cho

thấy, trong quá trình vận chuyển đất, các xe tải sẽ di chuyển qua các nút giao thông có đèn tín hiệu. Vị trí các nút giao thông có đèn tín hiệu trên quãng đường vận chuyển cả chiều đi và chiều về được minh họa như trên Hình 4. Trình tự các hoạt động trong quy trình thi công đất và các điều kiện ràng buộc được thể hiện như trong Bảng 6.



Hình 4. Minh họa vị trí các nút giao thông có đèn tín hiệu trên tuyến đường vận chuyển

Bảng 6. Thông tin về các hoạt động trong quy trình thi công đào đất

TT	Tên hoạt động	Ký hiệu	Điều kiện diễn ra hoạt động
1	Xe tải di chuyển vào vị trí đào	Vaolaydat	Có vị trí đào trống và có xe tải ở vị trí chờ
2	Máy xúc đào đất đổ đầy xe tải	Daodat	Có máy xúc nhận rỗi và xe tải ở vị trí đào
3	Xe tải di chuyển ra vị trí cầu rửa xe	DencauRX	Xe tải đã chất đầy
4	Vệ sinh lớp xe trước khi rời công trường	Ruaxe	Đã vào vị trí cầu rửa xe
5	Xe tải di chuyển đến nút giao 1 (0,4km)	DenNG1	Vệ sinh lớp xe xong
6	Xe tải di chuyển đến nút giao 2 (1,4km)	DenNG2	Xe tải đi qua nút giao 1
7	Xe tải di chuyển đến nút giao 3 (5,2 km)	DenNG3	Xe tải đi qua nút giao 2
8	Xe tải di chuyển đến nút giao 4 (1,8 km)	DenNG4	Xe tải đi qua nút giao 3
9	Xe tải di chuyển đến nút giao 5 (1,2 km)	DenNG5	Xe tải đi qua nút giao 4
10	Xe tải di chuyển đến vị trí đổ đất (1,0 km)	DenVTdodat	Xe tải đi qua nút giao 5
11	Xe tải đổ đất tại bãi thải	Dodat	Xe tải đã vào vị trí đổ
12	Xe tải rỗng quay về nút giao 5 (1,0 km)	VeNG5	Xe tải sau khi đổ đất xong
13	Xe tải rỗng quay về nút giao 4 (1,2 km)	VeNG4	Xe tải đi qua nút giao 5
14	Xe tải rỗng quay về nút giao 3 (1,8 km)	VeNG3	Xe tải đi qua nút giao 4
15	Xe tải rỗng quay về nút giao 2 (5,2 km)	VeNG2	Xe tải đi qua nút giao 3
16	Xe tải rỗng quay về vị trí đào (1,8 km)	VeVTchodao	Xe tải đi qua nút giao 2
17	Xe tải chờ đèn xanh	Chodenxanh	Khi đến các nút giao thông gặp đèn đỏ

Một trong những dữ liệu quan trọng đầu vào của mô phỏng đó là thời gian diễn ra các hoạt động. Trong nghiên cứu này, nhóm tác giả lựa chọn phương pháp chuyên gia để xác định thời lượng diễn ra các hoạt động. Dựa vào hồ sơ quản lý chất lượng của nhà thầu thi công, catalog kỹ thuật của thiết bị thi công cũng như các video thực tế ghi lại hoạt động của thiết bị trong quá trình thi công, thời gian diễn ra các hoạt động đa số được đại diện bởi hàm phân phối tam giác, đối với thời gian dừng chờ đèn tín hiệu sẽ được đại diện bởi hàm phân phối đều (uniform).

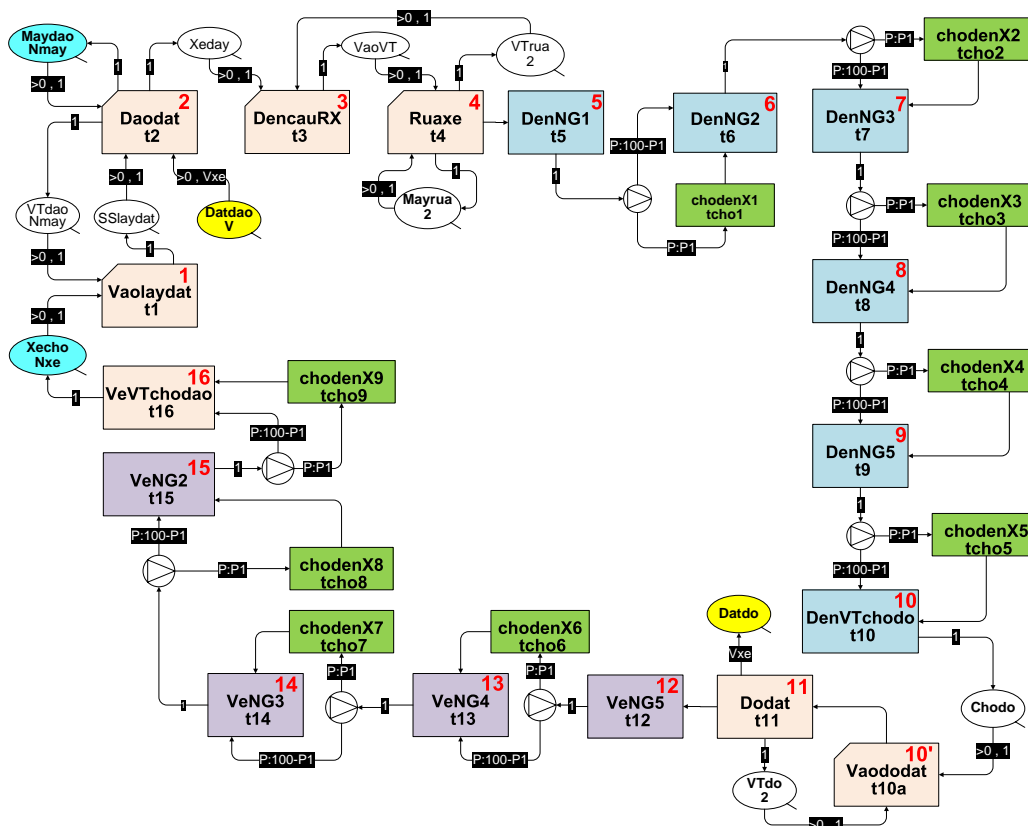
Hàm phân phối tam giác (Triangular) là một phân phối xác suất liên tục, thường được sử dụng khi dữ liệu thống kê chưa đầy đủ nhưng có thể ước lượng được ba giá trị cơ bản: thời gian nhỏ nhất (a), thời gian lớn nhất (b) và thời gian khả dĩ nhất (m). Sử dụng phương pháp chuyên gia chúng ta có thể xác định được ba giá trị này cho các hoạt động thi công đất. Trong phương pháp mô phỏng, chỉ cần những thông tin cơ bản của phân phối tam

giác nhưng thông qua quá trình mô phỏng hàng nghìn lần, kết quả cũng rất gần với thực tế. Phân phối xác suất thời lượng của từng hoạt động trong mô phỏng EZStrobe được sử dụng trong phân tích các kịch bản mô phỏng ở phần sau (Mục 5.3).

5.2. Thiết lập và xác thực mô hình mô phỏng

Sau khi thu thập đầy đủ các dữ liệu đầu vào, mô hình mô phỏng quá trình thi công đất được thiết lập trên phần mềm EZStrobe như trong Hình 5. Để kiểm chứng mô hình, các thông số theo tính toán lý thuyết được đưa vào mô phỏng. Trong đó, giả định rằng xe tải di chuyển liên tục và không phải dừng chờ tại các nút giao thông (xác suất gặp đèn đỏ, $P1 = 0$).

Mô hình sau đó được xác thực bằng cách so sánh, đối chiếu kết quả mô phỏng với kết quả tính toán trên cơ sở lý thuyết. Hình 6 thể hiện các thông số khai báo cho mô hình kiểm chứng theo điều kiện tính toán từ lý thuyết với đội hình 4 máy đào.



Hình 5. Mô hình mô phỏng hoạt động thi công đất trong EZStrobe

Sau khi kiểm tra cấu trúc và logic của mô hình trên sơ đồ ACD và xác minh được mô hình

sát với thực tế, tiến hành chạy mô hình với các giá trị thời gian tất định và so sánh với kết quả tính theo

phương pháp lý thuyết. Bảng 7 thể hiện kết quả so sánh về tiến độ và năng suất giữa mô phỏng và tính toán lý thuyết.

Kết quả so sánh trong Bảng 7 cho thấy với sai số rất nhỏ (1,2%) cho phép xác nhận rằng, mô

hình đã hoạt động thông suốt, không có lỗi trong quá trình lập mô hình. Khi đó, có thể tiến hành phát triển các kịch bản mô phỏng vào phân tích các tình huống hoạt động với các biến đầu vào là ngẫu nhiên.

Bảng 7. Kết quả so sánh về tiến độ và năng suất giữa mô phỏng và tính toán lý thuyết

Trường hợp	Tiến độ (ngày)	Năng suất (m ³ /h)
Lý thuyết	9,95	357,70
Mô phỏng	10,07	353,39
Sai khác (%)	1,20	1,20

THÔNG SỐ VỀ THỜI GIAN CÁC HOẠT ĐỘNG		
t1	Thời gian xe tải vào vị trí đào (giay)	20
t2	Thời gian máy xúc đào đất do dây 01 xe (giay)	390
t3	Thời gian xe tải đi chuyên ra vị trí cầu rửa xe (giay)	20
t4	Thời gian rửa xe trước khi rời công trường (giay)	40
t5	Thời gian xe tải rời công trường đi đến nút giao 1 (giay)	58
t6	Thời gian xe tải đi chuyên đến nút giao 2 (giay)	202
t7	Thời gian xe tải đi chuyên đến nút giao 3 (giay)	749
t8	Thời gian xe tải đi chuyên đến nút giao 4 (giay)	259
t9	Thời gian xe tải đi chuyên đến nút giao 5 (giay)	173
t10	Thời gian xe tải đi chuyên đến vị trí do đất (giay)	156
t11	Thời gian xe tải do đất tại bãi (giay)	50
t12	Thời gian xe tải rời đi chuyên về nút giao 5 (giay)	103
t13	Thời gian xe tải đi chuyên về nút giao 4 (giay)	123
t14	Thời gian xe tải đi chuyên về nút giao 3 (giay)	185
t15	Thời gian xe tải đi chuyên về nút giao 2 (giay)	535
t16	Thời gian xe tải rời về vị trí đào (giay)	185

THÔNG SỐ ĐẦU VÀO VỀ TÀI NGUYÊN		
V	Tổng khối lượng đất đào (m ³)	28460
Vxe	Khối lượng đất vận chuyển cho 01 chuyên (m ³)	10
Nmay	Số lượng máy đào (máy)	4
Nxe	Số lượng xe tải (xe)	32

THÔNG SỐ KẾT QUẢ ĐẦU RA CỦA MÔ PHỎNG		
Time	Tổng thời gian thi công (gio)	SimTime/(60*60)
Tiendot	Tiến độ thi công (ngày)	Time/8
Nangsuat	Năng suất thi công (m ³ /gio)	V/Time
Tchomaydao	Thời gian máy đào cho xe	Maydao.AveWait
Tchukymay	Thời gian chu kỳ của máy đào(phut)	(t2+Tchomaydao)/60
KsdMD	Hiệu suất máy đào	1-(Maydao.AveCount)/Nmay
KsdXT	Hiệu suất xe tải	1-(Xecho.AveCount)/Nxe
P1	Xác suất gặp đèn đỏ (%)	0

Hình 6. Các thông số khai báo cho mô hình kiểm chứng theo điều kiện tính toán lý thuyết với 4 máy đào

5.3. Phân tích các kịch bản mô phỏng

Dựa trên đội hình thiết bị đã xác định từ tính toán lý thuyết với 4 máy đào và 8 xe tải/máy, nhóm tác giả sẽ khảo sát các kịch bản mô phỏng với những giá trị khác nhau về xác suất dừng chờ đèn đỏ (P1) nhằm đánh giá tác động của điều kiện giao thông đến tiến độ và năng suất thi công. Sau đó, phát triển các kịch bản với số lượng xe tải và máy đào khác nhau, để xác định phương án tối ưu về tiến độ và chi phí. Hình 7 minh họa các thông số khai báo cho một kịch bản mô phỏng theo điều kiện giao thông thực tế với P1 = 70%. Tiến hành chạy mô phỏng với số lần phân tích mỗi kịch bản là 1000 lần. Kết quả phân tích các kịch bản được tổng hợp tại Bảng 8 và thể hiện dưới dạng biểu đồ so sánh

như trong Hình 8.

Từ bảng tổng hợp kết quả mô phỏng và biểu đồ so sánh trong Hình 8 cho thấy, sự ảnh hưởng rõ rệt của xác suất dừng chờ đèn đỏ (P1) đến tiến độ, năng suất và chi phí thi công. Khi P1 tăng từ 0% đến 100%, tiến độ thi công tăng từ 9,95 ngày lên 12,76 ngày, tương ứng mức tăng 28,24% so với điều kiện lý thuyết. Đồng thời, năng suất trung bình giảm 22,08% từ 357,70 m³/h xuống 278,72 m³/h, dẫn đến chi phí thi công tăng 29,9% từ 1414,90 triệu đồng lên 1837,95 triệu đồng. Đặc biệt, khi đối chiếu với tiến độ thực tế ghi nhận tại công trường (12 ngày), kịch bản P1 = 70% cho kết quả 11,86 ngày, là mức gần với thực tế nhất, phù hợp với điều kiện giao thông tại khu vực Khuất Duy Tiến. Điều này cho thấy việc xe tải phải dừng chờ

tại các nút giao thông làm tăng thời gian vận chuyển và gây gián đoạn chu kỳ phục vụ của đội

xe, kéo theo thời gian chờ của máy đào trong mỗi chu kỳ tăng đáng kể, từ 35,47 s lên 86,33 s.

THÔNG SỐ VỀ THỜI GIAN CÁC HOẠT ĐỘNG		
t1	Thời gian xe tải vào vị trí đào (giây)	Triangular[15,20,25]
t2	Thời gian máy xúc đào đất do tay 01 xe (giây)	Triangular[360,390,420]
t3	Thời gian xe tải đi chuyên ra vị trí cầu rửa xe (giây)	Triangular[15,20,25]
t4	Thời gian rửa xe trước khi rời công trường (giây)	Triangular[30,40,50]
t5	Thời gian xe tải rời công trường đi đến nút giao 1	Triangular[48,58,72]
t6	Thời gian xe tải đi chuyên đến nút giao 2 (giây)	Triangular[168,202,252]
t7	Thời gian xe tải đi chuyên đến nút giao 3 (giây)	Triangular[624,749,936]
t8	Thời gian xe tải đi chuyên đến nút giao 4 (giây)	Triangular[216,259,324]
t9	Thời gian xe tải đi chuyên đến nút giao 5 (giây)	Triangular[144,173,216]
t10	Thời gian xe tải đi chuyên đến bãi do (giây)	Triangular[120,144,180]
t10a	Thời gian xe tải vào vị trí đổ đất (giây)	Triangular[15,20,25]
t11	Thời gian xe tải đổ đất (giây)	Triangular[30,40,50]
t12	Thời gian xe tải rong đi chuyên về nút giao 5 (giây)	Triangular[90,103,120]
t13	Thời gian xe tải đi chuyên về nút giao 4 (giây)	Triangular[108,123,144]
t14	Thời gian xe tải đi chuyên về nút giao 3 (giây)	Triangular[162,185,216]
t15	Thời gian xe tải đi chuyên về nút giao 2 (giây)	Triangular[468,535,624]
t16	Thời gian xe tải rong về vị trí đào (giây)	Triangular[162,185,216]
tcho1	Thời gian xe tải cho đến xanh tại nút giao 1 (giây)	Uniform[5,100]
tcho2	Thời gian xe tải cho đến xanh tại nút giao 2 (giây)	Uniform[5,100]
tcho3	Thời gian xe tải cho đến xanh tại nút giao 3 (giây)	Uniform[5,100]
tcho4	Thời gian xe tải cho đến xanh tại nút giao 4 (giây)	Uniform[5,80]
tcho5	Thời gian xe tải cho đến xanh tại nút giao 5 (giây)	Uniform[5,80]
tcho6	Thời gian xe tải cho đến xanh tại NG5 khi về (giây)	Uniform[5,80]
tcho7	Thời gian xe tải cho đến xanh tại NG4 khi về (giây)	Uniform[5,80]
tcho8	Thời gian xe tải cho đến xanh tại NG3 khi về (giây)	Uniform[5,100]
tcho9	Thời gian xe tải cho đến xanh tại NG2 khi về (giây)	Uniform[5,100]

THÔNG SỐ ĐẦU VÀO VỀ TÀI NGUYÊN		
V	Tổng khối lượng đất đào và vận chuyển (m3)	28460
Vxe	Dung tích thùng xe cho đất (m3)	10
Nmay	Số lượng máy đào DX180 (máy)	4
Nxe	Số lượng xe tải HD270 (xe)	32
Gm	Đơn giá thuê máy đào (triệu VND)	4.2
Gx	Đơn giá thuê xe tải (triệu VND)	3.4
Glm	Đơn giá thuê lái máy đào (triệu VND)	0.6
Glx	Đơn giá thuê lái xe tải (triệu VND)	0.5

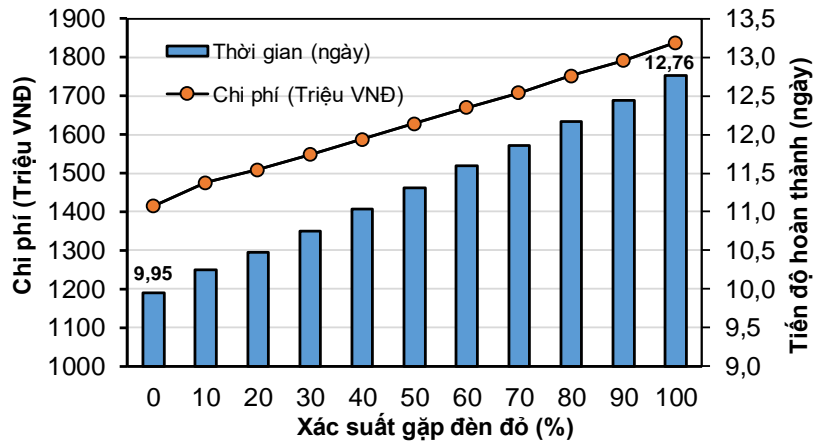
THÔNG SỐ KẾT QUẢ ĐẦU RA CỦA MÔ PHỎNG		
Time	Tổng thời gian thi công (giờ)	SimTime/(3600)
Tiend0	Tiền do thi công (ngày)	Time/8
Nangsuat	Năng suất thi công (m3/giờ)	V/Time
Tchukymay	Thời gian chu kỳ của máy đào (phút)	(t2+Tchomaydao)/60
TchodenGT	Thời gian xe tải cho đến xanh (phút)	(tcho1+tcho2+tcho3+tcho4+tcho5+tcho6+tcho7+tcho8+tcho9)/60
Tchomaydao	Thời gian máy đào cho xe tải (s)	Maydao.AveWait
GTB	Chi phí thiết bị (triệu VND)	(Gm*Nmay+Gx*Nxe)*Tiend0
GNC	Chi phí thiết nhân công lái máy (triệu VND)	(Glm*Nmay+Glx*Nxe)*Tiend0
Chiphi	Chi phí thi công (triệu VND)	GTB+GNC
P1	Xác suất gặp đèn đỏ (%)	70

Hình 7. Các thông số khai báo cho một kịch bản mô phỏng theo điều kiện giao thông thực tế (P1=70%)

Bảng 8. Tổng hợp kết quả phân tích các kịch bản mô phỏng và so sánh với kết quả lý thuyết

Kịch bản	P1 (%)	Tiến độ (ngày)	Năng suất (m ³ /h)	T _{chờ} (giờ)	Chi phí (Triệu VNĐ)
LT	0	9,95	357,70	35,47	1414,90
1	10	10,25	347,21	40,82	1475,42
2	20	10,48	339,40	45,99	1509,39
3	30	10,75	330,90	51,14	1548,15
4	40	11,03	322,62	56,29	1587,89
5	50	11,31	314,54	61,35	1628,64
6	60	11,59	306,70	66,38	1670,31
7	70	11,86	299,86	71,43	1708,39
8	80	12,17	292,35	76,45	1752,27
9	90	12,44	285,87	81,42	1791,90
10	100	12,76	278,72	86,33	1837,95

* P1 - Xác suất gặp đèn đỏ tại các nút giao; T_{chờ} - Thời gian chờ đợi của máy đào (Tchomaydao)



Hình 8. Biểu đồ tương quan giữa xác suất gặp đèn đỏ với thời gian thi công và chi phí

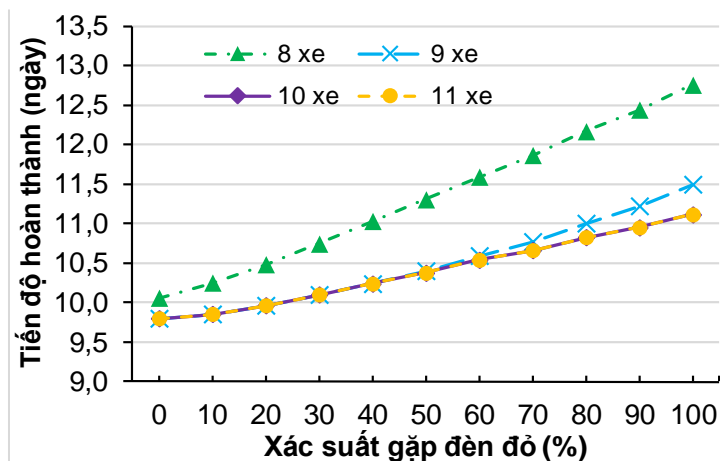
Từ kết quả trên, có thể thấy rằng trong điều kiện thi công thực tế, việc bố trí 08 xe tải phục vụ cho 01 máy đào như tính toán ý thuyết sẽ khó có thể đáp ứng yêu cầu tiến độ thi công được phê duyệt (10 ngày). Do đó, nghiên cứu tiếp tục khảo

sát các kịch bản với việc tăng số lượng xe tải từ 9 đến 11 xe/máy.

Kết quả phân tích các kịch bản được thể hiện trong Bảng 9 và được so sánh dưới dạng biểu đồ như trong Hình 9.

Bảng 9. Kết quả mô phỏng về tiến độ hoàn thành theo quy mô đội hình xe tải

Kịch bản	P1 (%)	Tiến độ hoàn thành (ngày)			
		8 xe/máy	9 xe/máy	10 xe/máy	11 xe/máy
1	0	10,06	9,80	9,80	9,80
2	10	10,25	9,85	9,85	9,85
3	20	10,48	9,96	9,96	9,96
4	30	10,75	10,10	10,10	10,10
5	40	11,03	10,24	10,24	10,24
6	50	11,31	10,40	10,38	10,38
7	60	11,59	10,59	10,54	10,54
8	70	11,86	10,77	10,66	10,66
9	80	12,17	11,00	10,82	10,82
10	90	12,44	11,22	10,95	10,95
11	100	12,76	11,49	11,12	11,12



Hình 9. Quan hệ giữa xác suất gặp đèn đỏ và tiến độ hoàn thành theo quy mô đội hình xe tải

Kết quả phân tích và so sánh cho thấy, việc tăng số lượng xe tải đem lại hiệu quả rõ rệt trong việc rút ngắn tiến độ hoàn thành. Khi xác suất dừng đèn đỏ (P1) từ 0 ÷ 40%, đội hình xe tải với 9 xe/máy cho hiệu quả nhất, giúp giảm 0,79 ngày (từ 11,03 ngày xuống 10,24 ngày). Việc tăng thêm xe vượt mức này sẽ không cải thiện thêm về tiến độ mà còn làm gia tăng chi phí. Khi P1 vượt 40%, tác động của việc dừng chờ đèn đỏ trở nên rõ rệt, làm giảm đáng kể hiệu suất vận chuyển. Khi đó đội hình 10 xe/máy được xem là phù hợp hơn để đáp ứng công suất máy đào. Với P1 = 100%, việc tăng quy mô đội xe từ 8 lên 10 (xe/máy) giúp rút ngắn 1,64 ngày (từ 12,76 xuống 11,12 ngày). Tuy nhiên, kết quả phân tích tổng hợp cho thấy, khi P1 lớn hơn

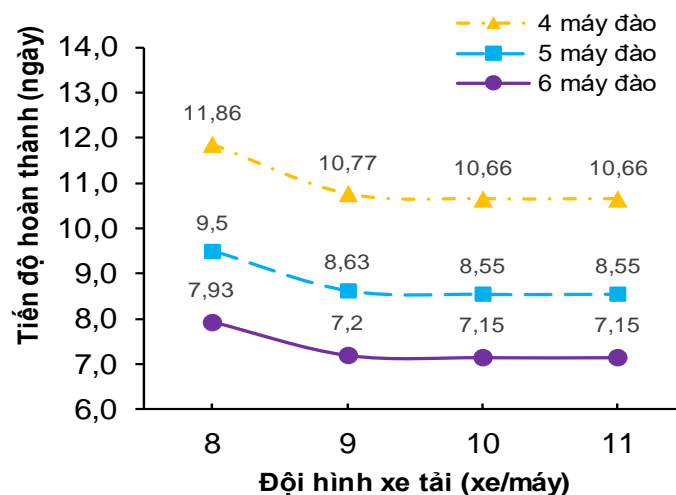
20%, việc chỉ tăng số lượng xe tải không đủ để cải thiện tiến độ, và đội hình gồm 04 máy đào không thể hoàn thành công việc trong 10 ngày như kế hoạch. Do đó, cần điều chỉnh phương án tổ chức thi công theo hướng tăng số lượng máy đào, đồng thời xác định lại quy mô đội xe tải hợp lý.

Các kịch bản mô phỏng tiếp theo được thiết lập với P1 = 70%. Số lượng máy đào được giới hạn tối đa 06 máy để phù hợp điều kiện mặt bằng và tổ chức thi công.

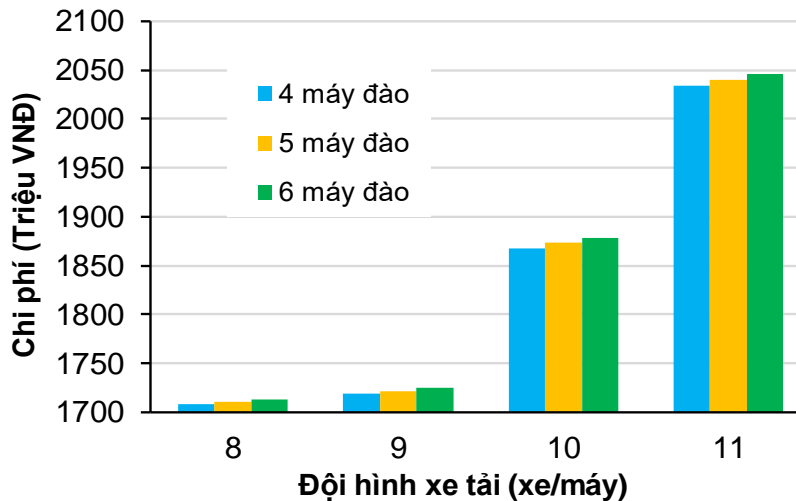
Bảng 10 tổng hợp các kết quả phân tích từ mô phỏng về thời gian, năng suất và chi phí thi công theo các kịch bản đội hình thiết bị. Kết quả sau đó được so sánh dưới dạng đồ thị như trong các Hình 10 và 11.

Bảng 10. Kết quả phân tích về thời gian, năng suất, chi phí theo các đội hình thiết bị thi công

Số lượng máy đào (máy)	số lượng xe tải (xe/máy)	Thời gian (ngày)	Năng suất (m ³ /h)	Chi phí (Triệu VNĐ)
4	8	11,86	299,87	1708,36
	9	10,77	330,28	1719,07
	10	10,66	333,67	1867,96
	11	10,66	333,66	2034,29
5	8	9,5	374,39	1710,38
	9	8,63	412,31	1721,32
	10	8,55	415,86	1873,45
	11	8,55	415,86	2040,25
6	8	7,93	448,45	1713,49
	9	7,20	493,84	1724,59
	10	7,15	497,59	1878,87
	11	7,15	497,55	2046,35



Hình 10. Kết quả so sánh về thời gian hoàn thành theo đội hình thiết bị



Hình 11. Kết quả so sánh về chi phí thi công theo đội hình thiết bị

Kết quả mô phỏng trong Bảng 10 và biểu đồ so sánh trong Hình 10 đến Hình 11 cho thấy việc điều chỉnh số lượng máy đào và quy mô đội hình xe tải có tác động rõ rệt đến tiến độ và chi phí thi công. Trong đó, hiệu quả rõ nhất tập trung ở phương án sử dụng 6 máy đào.

Nếu mục tiêu là rút ngắn tối đa tiến độ để tạo thời gian dự phòng, thì tổ hợp 6 máy đào và 9 xe tải/máy được xác định là hiệu quả nhất, giúp rút ngắn tiến độ thi công 39,3%, từ 11,86 ngày xuống còn 7,20 ngày, với mức tăng chi phí 0,95% (tương ứng 16,23 triệu VNĐ). Mặt khác, nếu ưu tiên cân đối giữa tiến độ và chi phí, thì đội hình 6 máy đào và 8 xe tải/máy là phương án tối ưu nhất, khi giúp tiến độ giảm 33,14%, từ 11,86 ngày xuống còn 7,93 ngày với mức tăng chi phí chỉ 0,3% (tương ứng 5,13 triệu VNĐ). Các kết quả này cho thấy mô hình mô phỏng có khả năng phản ánh chính xác mối quan hệ phi tuyến giữa quy mô đội hình thiết bị và hiệu quả thi công, đồng thời là công cụ hữu hiệu hỗ trợ lựa chọn cấu hình thiết bị hợp lý trong điều kiện thi công đô thị chịu tác động ngẫu nhiên của yếu tố giao thông.

6. Kết luận

Nghiên cứu đã xây dựng được mô hình mô phỏng phản ánh đầy đủ quy trình thi công đất thực tế, có xét đến các yếu tố ngẫu nhiên của môi trường đô thị, đặc biệt là xác suất dừng chờ đèn đỏ nhằm đánh giá các tác động đến năng suất, tiến

độ và chi phí thi công. Kết quả nghiên cứu cho thấy khi xác suất dừng chờ đèn đỏ tăng, hiệu suất vận chuyển của xe tải giảm đáng kể, đòi hỏi phải điều chỉnh quy mô đội hình thiết bị để đáp ứng yêu cầu tiến độ.

Trên cơ sở phân tích mô phỏng trong điều kiện thực tế ứng với $P1 = 70%$, hai phương án đội hình thiết bị tối ưu được xác định: (1) khi mục tiêu ưu tiên là rút ngắn tiến độ và tăng thời gian dự phòng, phương án sử dụng 06 máy đào và 09 xe tải/máy là phù hợp nhất, giúp giảm 39,3% thời gian thi công so với điều kiện lý thuyết; (2) khi cần cân bằng giữa tiến độ và chi phí, phương án 06 máy đào và 08 xe tải/máy được xem là tối ưu, với mức tăng chi phí chỉ 0,3% trong khi thời gian thi công giảm 33,14%.

Phương pháp mô phỏng được xây dựng trên dữ liệu thực tế kết hợp giả định hợp lý, cho phép định lượng tương đối chính xác tác động của việc thay đổi đội hình thiết bị, đồng thời chứng minh tính linh hoạt và hiệu quả của DES trong việc hỗ trợ ra quyết định, đặc biệt với các dự án trong môi trường đô thị, nơi có nhiều yếu tố bất định.

Tuy nhiên, nghiên cứu vẫn còn một số giới hạn/hạn chế nhất định:

- Mô hình hiện tại chưa xem xét các yếu tố ngẫu nhiên khác như điều kiện thời tiết, sự cố thiết bị hoặc hành vi của người vận hành, vốn có thể ảnh hưởng đến năng suất thực tế.
- Thời gian di chuyển của phương tiện trên

các đoạn tuyến được xem là các biến ngẫu nhiên độc lập mà chưa xét tới các quan hệ tương quan không gian - thời gian của các biến cố giao thông. Điều này có thể làm sai lệch phương sai của tổng thời gian vận chuyển.

- Mô hình hiện tại sử dụng một tham số xác suất dừng chờ chung cho các nút giao, thay vì xác lập riêng cho từng nút. Điều này chưa phản ánh sát với thực tế của hệ thống giao thông và có thể làm ảnh hưởng đến sự chính xác trong đánh giá định lượng kết quả đầu ra của mô hình.

- Mô hình chi phí mới chỉ xét tới phương án thuê thiết bị với đơn giá trọn gói theo thời gian, nên chưa cho phép đánh giá được sự thay đổi của chi phí nhiên liệu theo trạng thái vận hành (tĩnh, động) của thiết bị.

Trong các nghiên cứu tiếp theo, mô hình sẽ được tiếp tục hoàn thiện theo hướng tích hợp thêm dữ liệu thực nghiệm nhằm nâng cao độ tin cậy và khả năng phản ánh thực tế. Đồng thời, mô hình có thể được mở rộng để xem xét thêm các yếu tố ngẫu nhiên khác, cũng như phản ánh tốt hơn ảnh hưởng tương quan không gian - thời gian của giao thông đô thị. Khi có đủ dữ liệu phù hợp, tham số xác suất gặp đèn đỏ có thể được hiệu chỉnh theo từng nút giao hoặc nhóm nút giao tương đồng để mô hình phản ánh sát hơn điều kiện thực tế. Bên cạnh đó, cấu trúc chi phí sẽ được phát triển chi tiết hơn nhằm làm rõ tác động kinh tế của điều kiện giao thông đối với hoạt động thi công. Ngoài ra, cũng cần xem xét bổ sung tiêu chí về tác động môi trường, như phát thải CO₂, nhằm hướng tới tối ưu hóa toàn diện đội hình thiết bị thi công trên các khía cạnh kỹ thuật, kinh tế và bền vững.

Tài liệu tham khảo

- [1] A. Mohsenijam, A. Mahdavian, A. Shojaei. (2020). Stochastic earthmoving fleet arrangement optimization considering project duration and cost. *Modelling*, 1(2), 156-174. https://doi.org/10.3390/modelling1020010?urlappend=%3Futm_source%3Dresearchgate.net%26utm_medium%3Darticle
- [2] Y. Ko, K. Ngov, J. Noh, Y. Kim, S. Han. (2022). Discrete Event Simulation based Equipment Combination Optimization Method-based on construction equipment performance estimation of the Construction Standard Production Rate. *Korean Journal of Construction Engineering and Management*, 23(6), 21-29. <https://doi.org/10.6106/KJCEM.2022.23.6.021>
- [3] C. Yi, M. Lu. (2018). A Simulation-based Earthmoving Fleet Optimization Platform (SEFOP) for truck/Excavator selection in rough grading project. *Proceedings of the International Symposium on Automation and Robotics in Construction*, 35, ISARC Publications, 1-7. <https://doi.org/10.22260/ISARC2018/0133>
- [4] B.-S. Kim, Y.-W. Kim. (2016). Configuration of earthwork equipment considering environmental impacts, cost and schedule. *Journal of Civil Engineering and Management*, 22(1), 73-85. <https://doi.org/10.3846/13923730.2014.897964>
- [5] N. Markiz, A. Jrade. (2017). An expert system to optimize cost and schedule of heavy earthmoving operations for earth-and rock-filled dam projects. *Journal of Civil Engineering and Management*, 23(2), 222-231. <https://doi.org/10.3846/13923730.2015.1027258>
- [6] E. Pourrahimian, M. Al Hattab, R. Ead, R. R. Labban, S. AbouRizk. (2020). A simulation-based decision-support system for reducing duration, cost, and environmental impacts of earthmoving operations. *2020 Winter Simulation Conference (WSC)*, 668-679. <https://doi.org/10.1109/WSC48552.2020.9384073>
- [7] A. S. B. Nugroho, A. Aminullah. (2021). Penggunaan Simulasi Komputer Untuk Optimalisasi Kebutuhan Alat Berat Pekerjaan Pemindahan Tanah. *Rekayasa Sipil*, 15(2), 142-149.

- <https://doi.org/10.21776/ub.rekayasasipil.2021.015.02.9>
- [8] D. Huayanca, G. Bujaco, A. Delgado. (2023). Application of discrete-event simulation for truck fleet estimation at an open-pit copper mine in Peru. *Applied Sciences*, 13(7), 4093. https://doi.org/10.3390/app13074093?urlappend=%3Futm_source%3Dresearchgate.net%26utm_medium%3Darticle
- [9] D. Meneses, F. D. Sepúlveda. (2023). Modeling productivity reduction and fuel consumption in open-pit mining trucks by considering the temporary deterioration of mining roads through discrete-event simulation. *Mining*, 3(1), 96-105. <https://doi.org/10.3390/mining3010006>
- [10] K. M. Rashid, J. Louis. (2022). Integrating process mining with discrete-event simulation for dynamic productivity estimation in heavy civil construction operations. *Algorithms*, 15(5), 173. https://doi.org/10.3390/a15050173?urlappend=%3Futm_source%3Dresearchgate.net%26utm_medium%3Darticle
- [11] H. Lee and S. Kim. (2025). Optimum Equipment Allocation Under Discrete Event Simulation for an Efficient Quarry Mining Process. *Processes*, 13(7), 2215. https://doi.org/10.3390/pr13072215?urlappend=%3Futm_source%3Dresearchgate.net%26utm_medium%3Darticle
- [12] N. Q. Nam, B. N. D. Nhân. (2025). Sử dụng công cụ mô phỏng đánh giá ảnh hưởng của sự cố thiết bị đến năng suất hoạt động thi công đất: Một trường hợp nghiên cứu tại dự án xây dựng trên đảo xa bờ. *Tạp chí điện tử Khoa học và Công nghệ Giao thông*, 117-127. <https://doi.org/10.58845/jstt.utt.2025.vn.5.2.117-127>
- [13] N. T. Tĩnh, C. C. Quang. (2025). Sử dụng công cụ mô phỏng đánh giá ảnh hưởng của sự cố thiết bị đến tốc độ đào hầm khẩu độ nhỏ bằng khoan nổ. *Tạp chí Công nghiệp Mỏ*, XXXIV(1), 21-29.
- [14] EZStrobe. Official website. [Online]. Available:<https://www.ezstrobe.org>. [Accessed: 25-10-2025].
- [15] J. C. Martinez, (2001). EZStrobe-general-purpose simulation system based on activity cycle diagrams. *Proceeding of the 2001 Winter Simulation Conference*. <https://doi.org/10.1109/WSC.2001.977485>
- [16] J. C. Martinez. (1996). STROBOSCOPE: State and resource based simulation of construction processes. University of Michigan.
- [17] T. Đ. Hiếu. (2022). Giáo trình Máy và thiết bị thi công đất. Hà Nội: Nhà xuất bản Xây dựng.
- [18] W. Malik, S. Singh, N. Singh. (2021). A Review on Simulations Use in Constructions. *International Research Journal of Engineering and Technology*.