QUY TRÌNH BIM CHO THIẾT KẾ HẦM GIAO THÔNG

NGÔ THANH THỦY
HUỲNH XUÂN TÍN*
Trường Đại học Giao thông vận tải
** Email: tinhx_ph@utc.edu.vn*

Phản biện 1: PGS.TS. Đỗ Tiến Sỹ
Phản biện 2: TS. Vũ Văn Toản

TÓM TẮT

Hiện nay việc xây dựng mô hình BIM cho các công trình hầm đang gặp nhiều thách thức do đặc điểm hình học phức tạp, nhiều cấu kiện lặp lại và yêu cầu cập nhật thường xuyên khi có thay đổi thiết kế. Nghiên cứu này đề xuất một quy trình BIM dựa trên việc ứng dụng thuật toán Dynamo nhằm tự động hóa quy trình ứng dụng BIM cho hầm giao thông. Phương pháp được kiểm chứng thông qua nghiên cứu tại hai hầm thuộc nút giao thông An Phú, TP.HCM. Hiệu quả của quy trình BIM dựa trên Dynamo được đánh giá thông qua hệ thống chỉ tiêu định lượng và định tính, bao gồm thời gian mô hình hóa, khả năng cập nhật mô hình khi thay đổi thiết kế và mức độ tái sử dụng. Nghiên cứu này còn cho thấy khả năng ứng dụng thực tiễn của quy trình BIM tự động trong thiết kế các công trình hạ tầng giao thông tại Việt Nam.

Từ khóa: BIM, Dynamo, hầm giao thông

ABSTRACT

Developing BIM models for tunnel infrastructure remains challenging due to complex geometries, repetitive structural components, and the need for frequent updates when design changes occur. This study proposes a BIM workflow based on the application of Dynamo algorithms to automate the BIM modeling process for road tunnels. The proposed method is implemented through a case study of two tunnels within the An Phu interchange project in Ho Chi Minh City, Vietnam. The effectiveness of the Dynamo-based BIM workflow is evaluated using a set of quantitative and qualitative performance indicators, including modeling time, model update capability under design changes, and workflow reusability. The results demonstrate the practical applicability of automated BIM workflows for the design of transportation infrastructure projects in Vietnam.

Keywords: BIM, Dynamo, road tunnel

1. MỞ ĐẦU

Trong những năm gần đây, Mô hình thông tin công trình (Building Information Modeling - BIM) đã trở thành một công cụ quan trọng trong quá trình chuyển đổi số của ngành xây dựng. BIM cho phép tích hợp thông tin hình học, dữ liệu kỹ thuật và các thông tin quản lý công trình trong một môi trường mô hình số thống nhất, từ đó hỗ trợ hiệu quả cho các hoạt động thiết kế, phối hợp kỹ thuật và quản lý dự án. Nhờ khả năng liên kết dữ liệu giữa các giai đoạn của vòng đời công trình, BIM giúp nâng cao tính minh bạch của thông tin, cải thiện khả năng phối hợp giữa các bên tham gia dự án và hỗ trợ quá trình ra quyết định trong thiết kế và thi công. Đối với các dự án hạ tầng giao thông có quy mô lớn và cấu trúc phức tạp, việc áp dụng BIM đã được chứng minh là có thể nâng cao hiệu quả quản lý thông tin, giảm xung đột kỹ thuật giữa các bộ môn thiết kế và tối ưu hóa quá trình phát triển dự án. Tuy nhiên, việc triển khai BIM trong thiết kế các công trình hạ tầng, đặc biệt là các công trình hầm giao thông, vẫn gặp nhiều thách thức do đặc điểm hình học phức tạp và sự đa dạng của các cấu kiện kết cấu [1-3].

Các công trình hầm thường bao gồm các tuyến cong, các đoạn xiên và nhiều loại cấu kiện bê tông cốt thép khác nhau. Bên cạnh đó, các module hầm thường có tính lặp lại dọc theo tuyến nhưng vẫn phải thích ứng với các điều kiện hình học và kết cấu thay đổi theo từng đoạn [4,5]. Trong quá trình phát triển thiết kế, mô hình BIM của hầm cũng cần được cập nhật thường xuyên khi các tham số hình học hoặc yêu cầu kỹ thuật thay đổi. Khi sử dụng phương pháp mô hình hóa thủ công truyền thống, việc tạo lập và cập nhật các cấu kiện này thường đòi hỏi nhiều thời gian và công sức, đồng thời tiềm ẩn nguy cơ phát sinh sai sót trong quá trình xây dựng mô hình. Trong bối cảnh đó, thiết kế tham số (parametric design) và tự động hóa quy trình BIM đang được xem là một hướng tiếp cận tiềm năng nhằm nâng cao hiệu quả mô hình hóa trong các dự án hạ tầng.

Một trong những công cụ được sử dụng phổ biến cho mục tiêu này là Dynamo, một nền tảng lập trình trực quan tích hợp trong môi trường BIM cho phép xây dựng

các thuật toán để tự động hóa quá trình tạo lập mô hình [6,7]. Thông qua việc thiết lập các tham số đầu vào và các mối quan hệ hình học giữa các cấu kiện, Dynamo cho phép các phần tử BIM được tạo lập tự động và cập nhật nhanh chóng khi các tham số thiết kế thay đổi. Mặc dù một số nghiên cứu đã đề cập đến việc ứng dụng Dynamo trong thiết kế hạ tầng, các nghiên cứu thực nghiệm về mô hình hóa tham số cho các cấu kiện hầm giao thông vẫn còn hạn chế, đặc biệt trong bối cảnh các dự án hạ tầng tại Việt Nam. Xuất phát từ những vấn đề trên, nghiên cứu này đề xuất một quy trình BIM dựa trên Dynamo nhằm tự động hóa quá trình mô hình hóa các cấu kiện hầm giao thông. Quy trình được kiểm chứng thông qua nghiên cứu tại hai hầm thuộc dự án nút giao thông An Phú, TP.HCM, và được đánh giá thông qua hệ thống các chỉ tiêu định lượng và định tính như thời gian mô hình hóa, khả năng cập nhật mô hình khi thay đổi thiết kế và mức độ chuẩn hóa quy trình. Kết quả nghiên cứu góp phần làm rõ tiềm năng ứng dụng của quy trình BIM tự động dựa trên Dynamo trong thiết kế các công trình hạ tầng giao thông.

2. CƠ SỞ LÝ THUYẾT BIM VÀ DYNAMO

2.1. BIM trong thiết kế và quản lý hạ tầng giao thông

Trong các dự án hạ tầng giao thông, BIM ngày càng được sử dụng như một công cụ hỗ trợ tích hợp dữ liệu số và quản lý thông tin trong suốt vòng đời công trình [8-10]. Các công trình như cầu, hầm hoặc nút giao thông thường có quy mô lớn, cấu trúc phức tạp và sự tham gia của nhiều chuyên ngành thiết kế khác nhau. Việc áp dụng BIM trong các dự án này cho phép tích hợp dữ liệu thiết kế trong một mô hình thống nhất, từ đó cải thiện khả năng phối hợp giữa các bộ môn và hỗ trợ phát hiện sớm các xung đột kỹ thuật trong giai đoạn thiết kế.

Tuy nhiên, việc triển khai BIM cho các công trình hạ tầng vẫn gặp nhiều thách thức so với các công trình dân dụng thông thường. Các công trình hạ tầng thường có hình học phức tạp, bao gồm các tuyến cong, các đoạn xiên hoặc các cấu kiện có hình dạng thay đổi dọc theo tuyến. Đặc biệt đối với các công trình hầm giao thông, mô hình BIM thường bao gồm nhiều cấu kiện lặp lại như các module hầm, bản đáy, tường hầm và bản nắp. Khi sử dụng phương pháp mô hình hóa thủ công, việc tạo lập và cập nhật các cấu kiện này thường đòi hỏi nhiều thời gian và dễ phát sinh sai sót trong quá trình xây dựng mô hình.

2.2. Thiết kế tham số và vai trò của Dynamo trong môi trường BIM

Để giải quyết những hạn chế của phương pháp mô hình hóa truyền thống, nhiều nghiên cứu đã đề xuất áp dụng thiết kế tham số (parametric design) và các phương pháp tự động hóa trong môi trường BIM [11]. Cách tiếp cận này cho phép thiết lập các quan hệ hình học giữa các cấu kiện thông qua các tham số và thuật toán xử lý dữ liệu. Khi các tham số đầu vào thay đổi, mô hình có thể được cập nhật tự động theo các quy tắc đã được thiết lập. Phương pháp này đặc biệt phù hợp với các công trình hạ tầng có nhiều cấu kiện lặp lại hoặc có hình học phức tạp.

Trong hệ sinh thái phần mềm BIM của Autodesk, Dynamo được phát triển như một nền tảng lập trình trực quan cho phép xây dựng các thuật toán để tự động hóa quá trình mô hình hóa [7]. Dynamo hoạt động thông qua hệ thống các node được kết nối thành một chuỗi xử lý dữ liệu và hình học. Thông qua các thuật toán này, người dùng có thể xử lý dữ liệu hình học, thiết lập các mối quan hệ tham số và tự động tạo lập các phần tử BIM trong phần mềm thiết kế.

Việc ứng dụng Dynamo trong môi trường BIM giúp tự động hóa các thao tác mô hình hóa lặp lại, cải thiện tính nhất quán của mô hình và hỗ trợ cập nhật mô hình nhanh chóng khi các tham số thiết kế thay đổi. Trong lĩnh vực hạ tầng giao thông, Dynamo đã được sử dụng cho nhiều mục đích như mô hình hóa các cấu kiện có hình học phức tạp, tự động tạo lập các module kết cấu hoặc xây dựng các quy trình kiểm tra dữ liệu trong mô hình BIM.

2.3 Khoảng trống nghiên cứu

Trong những năm gần đây, nhiều nghiên cứu đã đề cập đến việc ứng dụng các phương pháp thiết kế tham số và lập trình trực quan trong môi trường BIM nhằm nâng cao hiệu quả của quá trình mô hình hóa [7,8]. Các nghiên cứu này cho thấy các quy trình dựa trên thuật toán có thể giúp giảm đáng kể thời gian mô hình hóa và cải thiện khả năng tái sử dụng quy trình thiết kế. Ngoài ra, việc thiết lập các quan hệ tham số giữa các cấu kiện cũng giúp tự động hóa quá trình tạo lập mô hình cho các công trình có hình học phức tạp [12].

Tuy nhiên, các nghiên cứu thực nghiệm tập trung vào mô hình hóa tham số cho các cấu kiện hầm giao thông vẫn còn tương đối hạn chế. Phần lớn các nghiên cứu hiện nay chủ yếu tập trung vào việc xây dựng các quy trình tự động hóa hoặc minh họa khả năng ứng dụng của các công cụ lập trình trực quan trong môi trường BIM. Đồng thời, nhiều nghiên cứu chưa xây dựng được một hệ thống chỉ tiêu đánh giá hiệu quả của các quy trình BIM tự động từ cả góc độ định lượng và định tính.

Do đó, nghiên cứu này tập trung đề xuất một quy trình BIM dựa trên Dynamo nhằm tự động hóa quá trình mô hình hóa các cấu kiện hầm giao thông, đồng thời xây dựng hệ thống chỉ tiêu đánh giá để phân tích hiệu quả của quy trình thông qua nghiên cứu dự án thực tế.

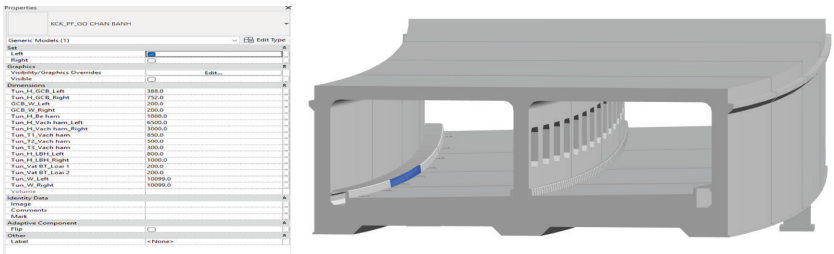
3. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

3.1 Đề xuất khung nghiên cứu tổng thể

Hình 1 trình bày khung tổng thể được đề xuất trong nghiên cứu này với cấu trúc phương pháp luận được sử dụng để đánh giá hiệu quả của quy trình BIM dựa trên Dynamo trong mô hình hóa các cấu kiện hầm giao thông. Quy trình nghiên cứu được tổ chức thành bốn bước chính. Thứ nhất, nghiên cứu được triển khai thông qua dự án thực tế là Nút giao thông An Phú nhằm đảm bảo tính thực tiễn của phương pháp đề xuất. Thứ hai, một quy trình BIM dựa trên thuật toán Dynamo được xây dựng và áp dụng để tự động hóa quá trình mô hình hóa các cấu kiện hầm trong môi trường BIM. Thứ ba, nghiên cứu xây dựng một hệ thống chỉ tiêu đánh giá hiệu suất, bao gồm các chỉ tiêu định lượng và định tính, nhằm đo lường hiệu quả của quy trình mô hình hóa. Cuối cùng, các kết quả thu được từ nghiên cứu dự án thực tế được phân tích dựa trên hệ thống chỉ tiêu này để đánh giá mức độ cải thiện về năng suất mô hình hóa, khả năng cập nhật thiết kế và mức độ chuẩn hóa quy trình. Trên cơ sở đó, nghiên cứu rút ra các hàm ý ứng dụng thực tiễn cho việc triển khai BIM tự động trong thiết kế các công trình hạ tầng giao thông.

Hình 1. Khung tổng thể của phương pháp nghiên cứu

Hình 2. Tổng quan và vị trí hầm tại nút giao An Phú



Hình 3. Hình học và cấu hình kết cấu của hầm bê tông cốt thép trong nền đất

3.2. Mô tả dự án kiểm chứng - Nút giao thông An Phú

Nghiên cứu được triển khai thông qua nghiên cứu dự án thực tế tại nút giao thông An Phú, TP.HCM, một dự án hạ tầng giao thông quy mô lớn bao gồm các hạng mục như cầu vượt, hầm chui và hệ thống tường chắn. Trong phạm vi nghiên cứu, hai hầm giao thông thuộc dự án được lựa chọn làm đối tượng kiểm chứng cho quy trình BIM dựa trên Dynamo. Hình 2 trình bày tổng quan dự án và vị trí của các hầm trong hệ thống nút giao. Hình 3 minh họa hình học và cấu hình kết cấu của hầm bê tông cốt thép thông qua các mặt cắt đặc trưng và mô hình ba chiều. Các hầm có hình học phức tạp, bao gồm các đoạn cong, đoạn xiên và nhiều cấu kiện kết cấu khác nhau, tạo điều kiện phù hợp để đánh giá khả năng áp dụng của phương pháp mô hình hóa tham số trong môi trường BIM.

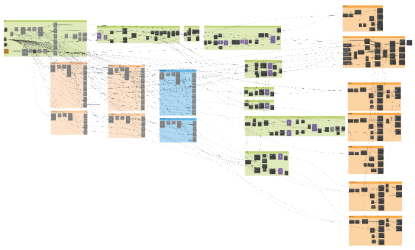
3.3 Triển khai Quy trình BIM dựa trên Dynamo

Quy trình mô hình hóa được xây dựng nhằm tự động hóa việc tạo lập các cấu kiện hầm trong môi trường BIM thông qua việc ứng dụng thuật toán trong Dynamo. Quy trình được áp dụng cho các cấu kiện hầm trong nghiên cứu, bao gồm các đoạn hầm kín, hầm hở và các module hầm được bố trí dọc theo tuyến công trình.

Về mặt kỹ thuật, quy trình được tổ chức thành ba thành phần chính. Thứ nhất, các tham số đầu vào được xác định để mô tả hình học tuyến, kích thước kết cấu và các điều kiện thiết kế cần thiết cho mô hình. Thứ hai, logic thuật toán trong Dynamo được sử dụng để xử lý dữ liệu và thiết lập các quan hệ hình học giữa các cấu kiện. Cuối cùng, dựa trên các tham số và thuật toán đã thiết lập, các phần tử BIM của hầm được tạo lập tự động trong mô hình.

Hình 4 minh họa thuật toán Dynamo được sử dụng trong nghiên cứu, cho phép tự động tạo các module hầm và cập nhật mô

hình nhanh chóng khi các tham số thiết kế thay đổi.



Hình 4. Quy trình ứng dụng BIM dựa trên Dynamo

3.4. Chỉ tiêu đánh giá hiệu suất

Để đánh giá hiệu quả của quy trình BIM dựa trên Dynamo, nghiên cứu sử dụng hệ thống chỉ tiêu định lượng và định tính (Bảng 1 và Bảng 2). Các chỉ tiêu định lượng phản ánh hiệu suất mô hình hóa, bao gồm thời gian mô hình hóa ban đầu (T1), thời gian cập nhật khi thay đổi thiết kế (T2), năng suất tạo phần tử BIM (P), Thời gian thiết lập quy trình ban đầu (E), mức độ ảnh hưởng khi thay đổi tham số (R) và khả năng tái sử dụng quy trình (W). Bên cạnh đó, sáu chỉ tiêu định tính (Q1-Q6) được sử dụng để đánh giá các khía cạnh như mức độ chuẩn hóa cấu kiện, khả năng hiểu và chuyển giao quy trình, khả năng mở rộng thuật toán, mức độ đồng bộ khi thay đổi thiết kế và độ chính xác hình học của mô hình.

Dữ liệu đánh giá được thu thập từ nhật ký thời gian làm việc của kỹ sư thiết kế và kết quả kiểm tra mô hình BIM, bao gồm phát hiện xung đột và sai lệch hình học trong quá trình mô hình.

Bảng 1. Các chỉ tiêu định lượng

Mã	Chỉ tiêu
T1	Thời gian mô hình hóa ban đầu
T2	Thời gian cập nhật khi thay đổi thiết kế
P	Số lượng phần tử được tạo ra trong một giờ
E	Thời gian thiết lập quy trình ban đầu
R	Số phần tử bị ảnh hưởng khi thay đổi tham số
W	Thời gian tái sử dụng quy trình

Bảng 2. Các chỉ tiêu định tính

Mã	Chỉ tiêu
Q1	Mức độ chuẩn hóa
Q2	Mức độ dễ hiểu của quy trình
Q3	Khả năng chuyển giao cho kỹ sư khác
Q4	Khả năng mở rộng
Q5	Khả năng đồng bộ thay đổi
Q6	Mức độ cải thiện độ chính xác hình học

4. KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU

4.1. Kết quả định lượng

Kết quả phân tích các chỉ tiêu định lượng (Bảng 3) cho thấy sự khác biệt rõ rệt về hiệu quả mô hình hóa giữa đốt hầm hở và đốt hầm kín khi áp dụng quy trình BIM dựa trên Dynamo. Đối với đốt hầm hở, tổng thời gian mô hình hóa ban đầu (T1) là 73 giờ cho 14 đốt, tương đương 5,2 giờ/đốt. Trong khi đó, đốt hầm kín cần 77 giờ cho 4 đốt, tương ứng 19,25 giờ/đốt, phản ánh mức độ phức tạp hình học và kết cấu cao hơn.

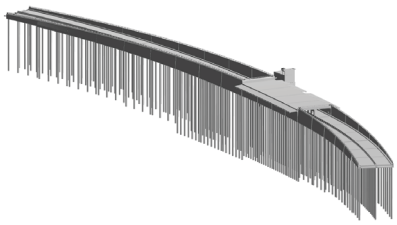
Đối với khả năng cập nhật thiết kế, tổng thời gian cập nhật mô hình (T2) của cả hai loại hầm là 18 giờ, tuy nhiên số lượng trường hợp thay đổi khác nhau. Thời gian cập nhật trung bình của đốt hầm hở là 1,29 giờ/đốt, trong khi đối với đốt hầm kín là 4,5 giờ/đốt. Kết quả này cho thấy quy trình BIM tham số giúp giảm đáng kể thời gian cập nhật mô hình so với phương pháp mô hình hóa thủ công.

Ngoài ra, các chỉ tiêu liên quan đến cấu trúc dữ liệu và quy trình (R và W) được đánh giá ở mức trung bình đến cao, cho thấy quy trình Dynamo được tổ chức với logic rõ ràng và có khả năng tái sử dụng trong các trường hợp tương tự.

Bảng 4. Chỉ tiêu năng suất mô hình hóa

Hạng mục	Đốt hầm hở	Đốt hầm kín
Hiệu suất (đốt/giờ)	0.19	0.052

Kết quả trong Bảng 4 cho thấy năng suất mô hình hóa của đốt hầm hở cao hơn đáng kể so với đốt hầm kín. Tuy nhiên, trong cả hai trường hợp, quy trình BIM dựa trên Dynamo đều cho thấy khả năng tự động hóa mô hình hóa và cập nhật thiết kế hiệu quả.



Hình 5. Mô hình hầm ứng dụng quy trình BIM dựa trên Dynamo

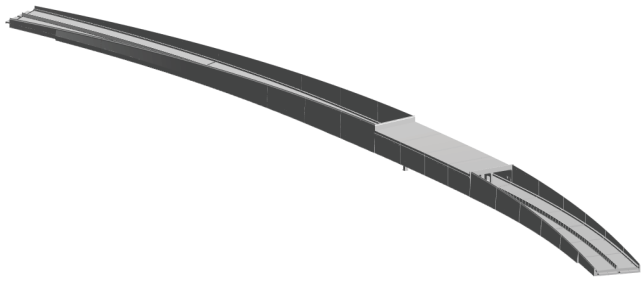
Hình 5 trình bày kết quả mô hình hóa hầm trong môi trường BIM

Bảng 3. Kết quả các chỉ tiêu định lượng

Chỉ tiêu	Nội dung đánh giá	Đốt hầm hở	Đốt hầm kín
E	Thời gian thiết lập quy trình ban đầu	38 giờ	38 giờ
T1	Tổng thời gian mô hình hóa ban đầu	73 giờ	77 giờ
	Số đốt hầm được mô hình hóa	14	4
	Thời gian trung bình / đốt	5,2 giờ/đốt	19,25 giờ/đốt
T2	Tổng thời gian cập nhật khi thay đổi thiết kế	18 giờ	18 giờ
	Số trường hợp thay đổi	14	4
	Thời gian trung bình / thay đổi	1,29 giờ/đốt	4,5 giờ/đốt
R	Mức độ minh bạch dữ liệu	Trung bình - cao	Trung bình - cao
W	Mức độ minh bạch quy trình	Cao	Cao

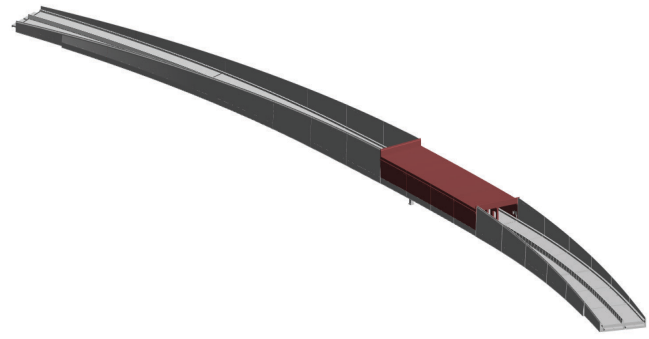
Loại hầm	Tên đốt hầm	H_Bệ hầm	H_Đỉnh hầm	H_Vách hầm trái	H_Vách hầm phải	T1_Vách hầm	T2_Vách hầm	T3_Vách hầm	W_Rộng hầm hầm trái	W_Rộng hầm phải
Hầm hở	K1	700	-	3582	3582	500	500	300	10100	10100
Hầm hở	K2	1000	-	4231	4231	1000	500	300	10100	10100
Hầm hở	K3	1000	-	4878	4878	850	500	300	10100	10100
Hầm hở	K4	1000	-	5526	5526	850	500	300	10100	10100
Hầm hở	K5	1000	-	6174	6174	850	500	300	10100	10100
Hầm hở	K6	1000	-	6822	6822	1000	500	300	10100	10100
Hầm kín	K7	1000	850	10760	10760	850	500	400	10100	10100
Hầm kín	K8	1000	850	10760	10760	850	500	400	10100	10100
Hầm kín	K9	1000	850	10760	10760	850	500	400	10100	10100
Hầm kín	K10	1000	850	10760	10760	850	500	400	10100	10100
Hầm hở	K11	1000	-	8263	8263	1000	500	300	10100	10100
Hầm hở	K12	1000	-	7615	7615	1000	500	300	10100	10100
Hầm hở	K13	1000	-	6967	6967	850	500	300	10100	10100
Hầm hở	K14	1000	-	6319	6319	850	500	300	10100	10100
Hầm hở	K15	1000	-	5671	5671	850	500	300	10100	10100
Hầm hở	K16	1000	-	5023	5023	850	500	300	10100	10100
Hầm hở	K17	1000	-	4375	4375	850	500	300	10100	10100
Hầm hở	K18	1000	-	3727	3727	1000	500	300	10100	10100
Hầm hở	K19	700	-	3079	3079	500	500	300	10100	10100

Trước khi thay đổi vách hầm trái và phải



Loại hầm	Tên đốt hầm	H_Bệ hầm	H_Đỉnh hầm	H_Vách hầm trái	H_Vách hầm phải	T1_Vách hầm	T2_Vách hầm	T3_Vách hầm	W_Rộng hầm hầm trái	W_Rộng hầm phải
Hầm hở	K1	700	-	3582	3582	500	500	300	10100	10100
Hầm hở	K2	1000	-	4231	4231	1000	500	300	10100	10100
Hầm hở	K3	1000	-	4878	4878	1000	500	300	10100	10100
Hầm hở	K4	1000	-	5526	5526	1000	500	300	10100	10100
Hầm hở	K5	1000	-	6174	6174	1000	500	300	10100	10100
Hầm hở	K6	1000	-	6822	6822	1000	500	300	10100	10100
Hầm kín	K7	1000	850	5572	5572	850	500	400	10100	10100
Hầm kín	K8	1000	850	5572	5572	850	500	400	10100	10100
Hầm kín	K9	1000	850	5572	5572	850	500	400	10100	10100
Hầm kín	K10	1000	850	5572	5572	850	500	400	10100	10100
Hầm hở	K11	1000	-	8263	8263	1000	500	300	10100	10100
Hầm hở	K12	1000	-	7615	7615	1000	500	300	10100	10100
Hầm hở	K13	1000	-	6967	6967	1000	500	300	10100	10100
Hầm hở	K14	1000	-	6319	6319	1000	500	300	10100	10100
Hầm hở	K15	1000	-	5671	5671	1000	500	300	10100	10100
Hầm hở	K16	1000	-	5023	5023	1000	500	300	10100	10100
Hầm hở	K17	1000	-	4375	4375	1000	500	300	10100	10100
Hầm hở	K18	1000	-	3727	3727	1000	500	300	10100	10100
Hầm hở	K19	700	-	3079	3079	500	500	300	10100	10100

Sau khi thay đổi vách hầm trái và phải



Hình 6. Minh họa cập nhật mô hình khi thay đổi thiết kế

sau khi áp dụng quy trình Dynamo. Mô hình 3D được tạo tự động dựa trên các tham số thiết kế, trong đó các module hầm được bố trí dọc theo tuyến và liên kết theo cấu trúc tham số, thể hiện khả năng tạo lập phần tử BIM tự động.

Hình 6 minh họa khả năng cập nhật tự động của mô hình BIM khi các tham số thiết kế thay đổi. Khi cao độ hoặc hình học tuyến được điều chỉnh, các module hầm sẽ được cập nhật tự động thông qua Dynamo kết hợp dữ liệu từ Excel. Hình 6 cũng cho thấy trạng thái mô hình trước và sau khi thay đổi, đồng thời minh họa chỉ tiêu T2 về thời gian cập nhật mô hình.

4.2. Kết quả định tính

Bên cạnh các chỉ tiêu định lượng, hiệu quả của quy trình BIM dựa trên Dynamo cũng được đánh giá thông qua sáu chỉ tiêu định tính (Q1-Q6) như Bảng 5. Các chỉ tiêu này phản ánh các khía cạnh như mức độ chuẩn hóa cấu kiện, khả năng kiểm soát thay đổi thiết kế, mức độ hỗ trợ cộng tác, quản trị mô hình, độ tin cậy của dữ liệu và hiệu quả sử dụng tài nguyên. Việc đánh giá được thực hiện thông qua checklist kiểm tra mô hình BIM áp dụng cho hai loại cấu kiện trong nghiên cứu dự án thực tế, bao gồm đốt hầm hở và đốt hầm kín.

Kết quả cho thấy mức độ chuẩn hóa cấu kiện (Q1) đạt mức cao đối với cả hai loại hầm. Các family và type được tổ chức hợp lý, cho phép tái sử dụng cấu kiện trong nhiều trường hợp hình học khác nhau. Quy trình BIM dựa trên Dynamo hỗ trợ chuẩn hóa thông qua việc thiết lập các tham số hình học và mối quan hệ tham số giữa các cấu kiện, giúp việc điều chỉnh kích thước hoặc hình dạng cấu kiện có thể thực hiện trực tiếp thông qua thay đổi tham số.

Đối với khả năng kiểm soát thay đổi thiết kế (Q2), mô hình BIM cho thấy khả năng cập nhật hình học tương đối ổn định khi các tham số thiết kế thay đổi. Quy trình Dynamo giúp duy trì logic cập nhật tham số và hạn chế sự lan truyền lỗi hình học sang các cấu kiện khác trong mô hình. Tuy nhiên, trong một số trường hợp có hình học phức tạp, vẫn cần thực hiện một số thao tác chỉnh sửa thủ công.

Về khả năng cộng tác và môi trường dữ liệu chung (Q3), kết quả đánh giá ở mức trung bình đến cao. Các quy ước đặt tên file, view và sheet được xây dựng tương đối nhất quán, giúp cải thiện khả năng chia sẻ dữ liệu trong nhóm thiết kế. Tuy nhiên, một số hoạt động trao đổi thông tin vẫn diễn ra ngoài môi trường dữ liệu chung (CDE).

Đối với quản trị mô hình và kiểm soát rủi ro (Q4), mô hình BIM đạt mức trung bình với khả năng tuân thủ các tiêu chuẩn BIM và kế hoạch triển khai BIM ở mức tương đối tốt. Việc áp dụng Dynamo góp phần giảm rủi ro kỹ thuật thông qua việc tự động hóa các thao tác hình học.

Kết quả đánh giá độ tin cậy của mô hình (Q5) cho thấy mức trung bình đến cao. Quy trình BIM dựa trên Dynamo giúp giảm lỗi tham số và đảm bảo tính nhất quán của mô

Bảng 5. Kết quả định tính

Chỉ tiêu	Nội dung đánh giá	Đốt hầm hở	Đốt hầm kín
Q1	Chuẩn hóa cấu kiện	Cao	Cao
Q2	Kiểm soát thay đổi thiết kế	Trung bình	Trung bình
Q3	Cộng tác và CDE	Trung bình - cao	Trung bình - cao
Q4	Quản trị mô hình và rủi ro	Trung bình	Trung bình
Q5	Độ tin cậy và hỗ trợ quyết định	Trung bình - cao	Trung bình - cao
Q6	Bền vững và hiệu quả tài nguyên	Trung bình	Trung bình

hình, từ đó hỗ trợ việc phân tích và so sánh các phương án thiết kế.

Cuối cùng, đối với hiệu quả sử dụng tài nguyên (Q6), mô hình BIM cho thấy khả năng kiểm soát khối lượng vật liệu và hỗ trợ tối ưu hóa hình học trong quá trình thiết kế. Tuy nhiên, các phân tích bền vững như đánh giá vòng đời công trình hoặc dữ liệu phát thải carbon vẫn chưa được tích hợp trực tiếp vào quy trình hiện tại.

5. THẢO LUẬN

Kết quả nghiên cứu cho thấy việc ứng dụng Dynamo trong môi trường BIM giúp tăng tốc quá trình mô hình hóa các cấu kiện có hình học phức tạp, đặc biệt là các cấu kiện cong và xiên thường gặp trong các công trình hầm giao thông. Quy trình BIM dựa trên Dynamo giúp giảm đáng kể các thao tác thủ công trong quá trình xây dựng và cập nhật mô hình, đồng thời cải thiện mức độ chuẩn hóa của quy trình mô hình hóa.

5.1. So sánh hiệu quả mô hình hóa giữa đốt hầm hở và đốt hầm kín

Sự khác biệt về năng suất mô hình hóa giữa đốt hầm hở và đốt hầm kín chủ yếu xuất phát từ mức độ phức tạp hình học và cấu tạo kết cấu của từng loại hầm. Các đốt hầm hở thường có cấu trúc hình học tương đối đơn giản và bao gồm các cấu kiện bê tông dạng bản và tường với hình dạng khá đồng nhất dọc theo tuyến. Điều này cho phép các tham số hình học được chuẩn hóa dễ dàng trong quy trình BIM dựa trên Dynamo, từ đó nâng cao mức độ tự động hóa trong quá trình tạo lập mô hình.

Ngược lại, đốt hầm kín thường có cấu tạo phức tạp hơn do phải tích hợp nhiều chi tiết kết cấu và hệ thống kỹ thuật bổ sung như các lỗ kỹ thuật, hệ thống thoát nước hoặc các cấu kiện liên kết. Điều này làm tăng số lượng tham số cần xử lý và yêu cầu nhiều bước kiểm soát hơn trong quá trình mô hình hóa. Tuy nhiên, kết quả nghiên cứu cho thấy phương pháp mô hình hóa tham số vẫn duy trì được tính nhất quán của mô hình và hỗ trợ kiểm soát hình học hiệu quả ngay cả đối với các cấu kiện có mức độ phức tạp cao.

5.2. Khả năng cập nhật thiết kế trong môi trường BIM tham số

Một trong những lợi thế quan trọng của phương pháp mô hình hóa tham số là khả năng cập nhật mô hình nhanh chóng khi xảy ra thay đổi thiết kế. Kết quả nghiên cứu cho thấy thời gian cập nhật mô hình (T2) đối với đốt hầm hở trung bình khoảng 1,29 giờ cho mỗi thay đổi, trong khi đối với đốt hầm kín là khoảng 4,5 giờ.

Mặc dù thời gian cập nhật đối với các cấu kiện phức tạp vẫn cao hơn, quy trình BIM dựa trên Dynamo cho phép thực hiện các thay đổi thông qua việc điều chỉnh các tham số đầu vào thay vì chỉnh sửa thủ công từng cấu kiện trong mô hình. Điều này giúp giảm đáng kể khối lượng thao tác mô hình hóa thủ công và hạn chế nguy cơ phát sinh sai sót hình học, đặc biệt trong các dự án hạ tầng có nhiều thay đổi thiết kế trong quá trình phát triển dự án.

5.3. Hiệu quả tổng thể của quy trình BIM dựa trên Dynamo

Mặc dù quy trình BIM dựa trên Dynamo yêu cầu một mức đầu tư ban đầu nhất định cho việc thiết lập quy trình (E = 38 giờ), chi phí này chủ yếu phát sinh trong giai đoạn đầu và có thể được tái sử dụng cho nhiều cấu kiện hoặc dự án tương tự. Trong nghiên cứu này, quy trình đề xuất cho thấy khả năng:

- chuẩn hóa quy trình mô hình hóa các cấu kiện hầm;
- tự động hóa việc tạo lập các phần tử BIM dựa trên tham số thiết kế;
- hỗ trợ cập nhật mô hình hiệu quả khi xảy ra thay đổi thiết kế;
- nâng cao tính minh bạch và khả năng kiểm soát của quy trình.

Nhờ cấu trúc rõ ràng, quy trình BIM dựa trên Dynamo cũng có tiềm năng chuyển giao và tái sử dụng trong các dự án hạ tầng khác như metro đô thị hoặc các nút giao thông phức tạp.

5.4. Kết quả định tính

Kết quả đánh giá định tính cho thấy quy trình BIM dựa trên Dynamo mang lại những cải thiện đáng kể trong việc chuẩn hóa cấu kiện và nâng cao độ tin cậy của mô hình BIM. Các cấu kiện được tổ chức theo cấu trúc family và type hợp lý, cho phép tái sử dụng hiệu quả trong nhiều trường hợp hình học khác nhau. Bên cạnh đó, việc thiết lập các quan hệ tham số giữa các cấu kiện giúp giảm đáng kể các lỗi hình học và đảm bảo tính nhất quán của mô hình.

Tuy nhiên, kết quả đánh giá cũng cho thấy một số hạn chế nhất định. Khả năng kiểm soát thay đổi thiết kế và quản trị mô hình vẫn phụ thuộc vào mức độ hoàn thiện của thuật toán và các quy trình quản lý dữ liệu trong dự án. Ngoài ra, mặc dù mô hình BIM hỗ trợ tốt việc kiểm soát khối lượng vật liệu và tối ưu hóa hình học, các công cụ phân tích bền vững như đánh giá vòng đời công trình (LCA) hoặc dữ liệu phát thải carbon vẫn chưa được tích hợp trực tiếp vào quy trình.

Nhìn chung, kết quả nghiên cứu cho thấy quy trình BIM dựa trên Dynamo có tiềm năng cải thiện đáng kể hiệu quả mô hình hóa và quản lý mô hình BIM trong các dự án hạ tầng giao thông, đồng thời mở ra hướng phát triển cho việc tích hợp các công cụ phân tích bền vững trong các nghiên cứu tiếp theo

VI. KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ

Nghiên cứu đã đề xuất một quy trình BIM dựa trên Dynamo nhằm tự động hóa quá trình mô hình hóa các cấu kiện hầm giao thông có hình học phức tạp. Kết quả kiểm chứng tại nút giao thông An Phú cho thấy phương pháp mô hình hóa tham số có thể nâng cao năng suất mô hình hóa, giảm thời gian cập nhật thiết kế và cải thiện mức độ chuẩn hóa của quy trình BIM. Bên cạnh đó, hệ thống chỉ tiêu đánh giá được xây dựng trong nghiên cứu cho phép xem xét hiệu quả của quy trình từ cả góc độ định lượng và định tính. Các kết quả thu được cho thấy quy trình BIM dựa trên Dynamo có tiềm năng áp dụng rộng rãi cho các dự án hạ tầng có nhiều cấu kiện lặp lại, như hầm giao thông và metro đô thị.■

LỜI CẢM ƠN

Cám ơn Công ty CP IDECO Việt Nam và Công ty TNHH Kỹ thuật và Công nghệ V7 đã hỗ trợ cho nghiên cứu này.

Ngày nhận bài: 30/01/2026

Ngày chấp nhận đăng: 28/3/2026

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1]. N. T. Thủy và H. X. Tín, "Ứng dụng BIM cho công tác chế tạo cấu kiện bê tông cốt thép đúc sẵn," Tạp chí Xây dựng, số 04/2025, ISSN 2734-9888, pp. 148-151, 2025.

[2]. N. T. Thủy và H. X. Tín, "Ứng dụng BIM-AR cho công trình cầu," Tạp chí Giao thông vận tải, vol. 64, no. 12, pp. 93-95, 2024

[3]. T. Huynh-Xuan, N. Bui, T. Ngo-Thanh, D. T. Nguyen, A. Nguyen và L. Nguyen, "Adopting Construction 4.0 to Promote Sustainability in the Mekong Delta of Vietnam: A Fuzzy Delphi Study," Journal of Industrial and Production Engineering, vol. 41, no. 4, pp. 380-396, Apr. 2024, doi:10.1080/21681015.2024.2315942

[4]. A. Salzano, M. Intignano, C. Mottola, S. A. Biancardo, M. Nicolella và G. Dell'Acqua, "Systematic Literature Review of Open Infrastructure BIM," Buildings, vol. 13, no. 7, p. 1593, Jun. 2023, doi:10.3390/buildings13071593.

[5]. M. Hedayatzadeh, S. N. Zadeh, M. A. N. Sadeghi và A. R. Ghanbari, "Use of GIS and BIM for the Integration of Tunnel Design and Construction Process in Conventional Tunneling," Underground Space, vol. 9, no. 2, pp. 257-272, 2024, doi:10.1016/j.undsp.2023.08.002.

[6]. Q. M. Waleed, R. W. A. Khan, A. Sharafat, W. A. Tanoli, M. U. Zubair và H. J. Qureshi, "Development of BIM-Based Tunnel Information Modeling Prototype for Tunnel Design," Advances in Civil Engineering, vol. 2024, Article ID 8118578, 18 pages, 2024, doi:10.1155/2024/8118578.

[7]. B. A. Boye và M. J. Wilcock,"Automated tunnel design with Dynamo and SAP2000," in Expanding Underground: Knowledge and Passion to Make a Positive Impact on the World, D. Anagnostou, A. Benardos và V. Marinos, Eds., Taylor & Francis, 2023, pp. 2398-2405, doi:10.1201/9781003348030-288.

[8]. Y. Zhou, C. Wang, B. Yuan, M. Chen và J. Lv, "Research on Visual Management Technology of Tunnel Construction Process Based on BIM Technology," Advances in Civil Engineering, vol. 2021, Article ID 9738820, 9 pages, 2021, doi:10.1155/2021/9738820.

[9]. M.-T. Do, P. P. W. Aung, K. T. D. Vo, M. Park và S. Park, "FIRE-EVSim: A BIM and 3D simulation-based framework for enhanced early fire detection in electric vehicle charging infrastructure," Developments in the Built Environment, vol. 26, p. 100889, 2026, doi:10.1016/j.dibe.2026.100889

[10]. J. C. P. Cheng và Q. Lu, "A review of the efforts and roles of the public sector for BIM adoption worldwide," Journal of Information Technology in Construction, vol. 20, pp. 442-478, 2015.

[11]. W. Solihin và C. Eastman, "Classification of rules for automated BIM rule checking development," Automation in Construction, vol. 53, pp. 69-82, May 2015, doi:10.1016/j.autcon.2015.03.003.

[12]. J. Zhang, Y. Chen, H. Liu và X. Li, "Application of parametric modeling technology in infrastructure BIM design," Automation in Construction, vol. 87, pp. 1-12, Mar. 2018, doi:10.1016/j.autcon.2017.12.017.