

KHUNG PHƯƠNG PHÁP TÍCH HỢP BIM-FEA HƯỚNG TỚI THIẾT KẾ KẾT CẤU BỀN VỮNG VÀ QUẢN LÝ VÒNG ĐỜI CÔNG TRÌNH

THS NGUYỄN VY THANH, THS THẠCH VŨ ĐÌNH VI | ĐẠI HỌC TRÀ VINH

TÓM TẮT

Trong bối cảnh ngành xây dựng chịu áp lực kép từ yêu cầu phát triển hạ tầng và giảm phát thải carbon, việc tích hợp Mô hình Thông tin Công trình (BIM) và Phân tích Phần tử Hữu hạn (FEA) nổi lên như một giải pháp chiến lược để tối ưu hóa hiệu suất kết cấu và bền vững vòng đời công trình. Nghiên cứu này thực hiện đánh giá tổng quan chuyên sâu, phân tích so sánh các công trình về BIM truyền thống và BIM-FEA theo bốn tiêu chí: tối ưu hóa năng lượng, quản lý rác thải, giảm phát thải carbon và nâng cao an toàn kết cấu. Kết quả cho thấy BIM-FEA giúp tăng mức tiết kiệm năng lượng từ 10-15% lên 20-30%, giảm rác thải thêm 8-10% và giảm carbon hàm chứa từ 15-20% lên 18-28%, đồng thời cho phép sử dụng an toàn vật liệu xanh hoặc tái chế. Trên cơ sở đó, nghiên cứu đề xuất khung phương pháp ba giai đoạn (thiết kế, thi công, vận hành-bảo trì) cùng các ứng dụng phân tích cơ học nâng cao nhằm hỗ trợ kỹ sư và nhà quản lý ra quyết định hướng tới xây dựng xanh, tuần hoàn và chống chịu khí hậu. Từ khóa: BIM; FEA; kỹ thuật kết cấu; xây dựng bền vững; tối ưu hóa năng lượng; quản lý rác thải; giảm phát thải carbon.

ABSTRACT

In the context of the construction industry facing dual pressures from infrastructure development and carbon emission reduction, the integration of Building Information Modeling (BIM) and Finite Element Analysis (FEA) has emerged as a strategic solution to optimize structural performance and ensure the sustainability of the building lifecycle. This study conducts an in-depth overview, comparing traditional BIM and BIM-FEA projects based on four criteria: energy optimization, waste management, carbon emission reduction, and structural safety enhancement. The results show that BIM-FEA increases energy savings from 10-15% to 20-30%, reduces waste by an additional 8-10%, and reduces carbon embodied emissions from 15-20% to 18-28%, while also enabling the safe use of green or recycled materials. Based on this, the study proposes a three-stage methodology framework (design, construction, operation-maintenance) along with advanced mechanical analysis applications to support engineers and managers in making decisions towards green, circular, and climate-resilient building.

Keywords: BIM; FEA; structural engineering; sustainable building; energy optimization; waste management; carbon emission reduction.

GIỚI THIỆU

Ngành xây dựng hiện đóng góp khoảng 38% tổng lượng phát thải CO₂ toàn cầu, trong đó phần lớn bắt nguồn từ năng lượng vận hành của công trình và lượng carbon hàm chứa trong vật liệu xây dựng (IPCC, 2022). Trước áp lực ngày càng gia tăng của các cam kết giảm phát thải, yêu cầu tiết kiệm tài nguyên và thách thức từ biến đổi khí hậu khắc nghiệt, nhu cầu về các công cụ hỗ trợ ra quyết định mang tính hệ thống, tích hợp và có khả năng mô phỏng chính xác hiệu suất kết cấu trong suốt vòng đời công trình trở nên cấp thiết. Mô hình Thông tin Công trình (BIM) đã phát triển mạnh mẽ từ một công cụ mô hình hóa hình học 3D đơn thuần thành một nền tảng quản lý dữ liệu toàn diện, bao gồm thông tin về hình học, thuộc tính vật liệu, chi phí, tiến độ và vòng đời (Eastman, C, et al., 2018). Tuy nhiên, các khả năng phân tích nâng cao về cơ học kết cấu trong BIM truyền thống vẫn còn hạn chế, đặc biệt ở các bài toán yêu cầu mô phỏng phi tuyến, phân tích động lực học, đánh giá độ mỏi vật liệu, phá hủy cấu kiện, hoặc các tương tác phức tạp giữa nhiệt-cơ và dòng chảy-kết cấu (fluid-structure interaction, FSI) dưới tác động của môi trường khắc nghiệt.

Việc tích hợp BIM với các công cụ Phân tích Phần tử Hữu hạn (FEA) tiên tiến như ABAQUS hay ANSYS mang lại khả năng vượt trội trong việc mô phỏng chính xác ứng xử kết cấu ở cấp độ chi tiết và đa vật lý. Thông qua đó, kỹ sư có thể đánh giá ứng suất, biến dạng, và các cơ chế hư hỏng tiềm ẩn của công trình dưới nhiều kịch bản tải trọng thực tế, bao gồm gió bão, động đất, biến đổi nhiệt độ lớn và tác động của môi trường ăn mòn. Quan trọng hơn, FEA cho phép tối ưu hóa thiết kế kết cấu nhằm giảm thiểu việc sử dụng vật liệu không cần thiết, tinh chỉnh hệ số an toàn dựa trên các phân tích định lượng thay vì các giả định bảo thủ, từ đó giảm đáng kể lượng carbon hàm chứa mà vẫn bảo đảm độ bền và khả năng chống chịu của công trình (Bathe, K.J., 2006). Điều này đặc biệt quan trọng trong bối cảnh ngành xây dựng đang đẩy mạnh sử dụng vật liệu nhẹ, vật liệu tái chế hoặc các loại vật liệu xanh có tính chất cơ học khác biệt so với vật liệu truyền thống.

Bài báo này hướng tới hai mục tiêu chính. Thứ nhất, tiến hành phân tích định lượng và so sánh hiệu quả giữa quy trình BIM truyền thống và khung tích hợp BIM-FEA dựa trên ba tiêu chí bền vững then chốt: hiệu quả năng lượng, quản lý rác thải xây dựng và

giảm phát thải carbon hàm chứa. Thứ hai, đề xuất một khung phương pháp tích hợp ba giai đoạn - thiết kế, thi công và vận hành-bảo trì - nhằm khai thác tối đa giá trị dữ liệu BIM kết hợp phân tích cơ học nâng cao từ FEA, hướng tới phát triển kỹ thuật kết cấu bền vững, an toàn và thích ứng tốt với biến đổi khí hậu.

TỔNG QUAN NGHIÊN CỨU VÀ PHÂN TÍCH SO SÁNH

Trong hơn hai thập kỷ qua, Mô hình Thông tin Công trình (Building Information Modeling - BIM) đã trải qua quá trình phát triển vượt bậc, từ một công cụ mô hình hóa hình học 3D thuần túy phục vụ trực quan hóa thiết kế, trở thành một nền tảng quản lý dữ liệu tích hợp, kết nối thông tin hình học, thuộc tính vật liệu, tiến độ, chi phí và thậm chí cả dữ liệu vận hành trong vòng đời công trình (Volk et al., 2014). BIM không chỉ đóng vai trò như một "ngân hàng dữ liệu" phục vụ phối hợp liên ngành mà còn được khai thác mạnh mẽ để hỗ trợ các mục tiêu bền vững. Các nghiên cứu hiện tại có thể phân thành ba nhóm chính: (i) tối ưu hóa hiệu quả năng lượng, (ii) quản lý và giảm rác thải xây dựng, và (iii) giảm phát thải carbon hàm chứa.

Ở nhóm thứ nhất, liên quan đến tối ưu hóa hiệu quả năng lượng, nhiều công trình nghiên cứu (Ghaffarianhoseini et al., 2016; Azhar, 2011) cho thấy BIM, khi kết hợp với các phần mềm mô phỏng năng lượng như EnergyPlus hoặc IES VE, có thể dự báo và tối ưu hóa tiêu thụ năng lượng, giúp đạt mức tiết kiệm 10-15% so với phương pháp thiết kế truyền thống. Tuy nhiên, một hạn chế đáng kể là các mô hình này thường giả định điều kiện khí hậu tĩnh và ổn định, chưa phản ánh được các yếu tố biến động lớn về nhiệt độ, độ ẩm và tải trọng gió cục bộ do tác động của biến đổi khí hậu. Sự thiếu sót này đặc biệt nghiêm trọng đối với các công trình ở khu vực nhạy cảm khí hậu, nơi các tải trọng môi trường biến thiên theo mùa và ngày càng trở nên bất thường. Ehsan.K, et al., (2023) đã khắc phục khoảng trống này bằng cách tích hợp BIM với Phân tích Phần tử Hữu hạn (FEA), cho phép thực hiện đồng thời phân tích nhiệt-cơ (thermo-mechanical analysis). Cách tiếp cận này giúp đánh giá chính xác ứng suất nhiệt, biến dạng và độ bền của các cấu kiện nhẹ hoặc cách nhiệt, đảm bảo vừa duy trì hiệu quả năng lượng ở mức 20-30% vừa bảo toàn an toàn kết cấu trước các tác động gió lớn và biến dạng nhiệt không mong muốn.

Ở nhóm thứ hai, liên quan đến quản lý và giảm rác thải xây dựng, các ứng dụng BIM truyền thống đã cho thấy khả năng giảm 12-15% lượng rác thải thông qua dự toán vật liệu chính xác, lập kế hoạch tiến độ hợp lý và áp dụng module tiến chế (prefabrication) (Won & Cheng, 2017). Tuy nhiên, nghiên cứu của Annelise Nairne Schamne, et al (2024) và Won, J, et al., (2017) chỉ ra rằng một nguyên nhân gây lãng phí vật liệu đáng kể là các hư hỏng cấu kiện trong quá trình lắp dựng do không lường trước các trạng thái ứng lực tạm thời và biến dạng võng khi chịu tải trọng thi công. Bằng cách áp dụng BIM-FEA để mô phỏng chi tiết quy trình lắp dựng, phân tích nội lực tạm thời và dự báo biến dạng võng, các kỹ sư có thể phát hiện sớm các nguy cơ hư hỏng và điều chỉnh biện pháp thi công trước khi xảy ra sự cố. Phương pháp này giúp giảm thêm 8-10% rác thải so với BIM thuần túy, đồng thời nâng cao an toàn lao động và giảm chi phí khắc phục sự cố.

Nhóm thứ ba tập trung vào giảm phát

thải carbon, trong đó BIM thường được kết hợp với Phân tích Vòng đời (Life Cycle Assessment - LCA) để định lượng và tối ưu hóa carbon hàm chứa trong vật liệu (Soust-Verdaguer et al., 2017). Các nghiên cứu điển hình chứng minh rằng khi BIM được tích hợp với FEA, kỹ sư có thể mô phỏng chính xác ứng xử cơ học của vật liệu tái chế, vật liệu nhẹ hoặc các loại vật liệu xanh có cường độ cơ học thấp hơn so với vật liệu truyền thống. Nhờ đó, hệ số an toàn không cần thiết có thể được giảm xuống, khối lượng vật liệu được tối ưu hóa, giúp cắt giảm tới 28% carbon hàm chứa mà vẫn duy trì an toàn kết cấu - một kết quả vượt trội so với mức giảm 15-20% của BIM-LCA truyền thống.

Tổng hợp các bằng chứng định lượng thu được, Bảng 1 cho thấy việc tích hợp BIM-FEA thể hiện những ưu thế rõ rệt trên các chỉ tiêu bền vững chủ chốt, bao gồm hiệu quả năng lượng, giảm thiểu chất thải, nâng cao mức độ an toàn kết cấu và kéo dài tuổi thọ công trình. Những cải thiện này cho thấy tiềm năng của khung tích hợp trong việc hỗ trợ các chiến lược thiết kế định hướng hiệu năng, phù hợp với xu hướng nghiên cứu hiện đại trong lĩnh vực kỹ thuật kết cấu và cơ học.

Sự khác biệt này bắt nguồn từ ba yếu tố: (i) BIM-FEA khai thác dữ liệu hình học và vật liệu sâu hơn cho phân tích kết cấu, (ii) mô phỏng kết hợp nhiều kịch bản tải trọng và biến đổi môi trường, (iii) khả năng điều chỉnh thiết kế sớm dựa trên kết quả phân tích đa mục tiêu. Tuy

nhien, BIM-FEA đòi hỏi nguồn lực kỹ thuật cao, chi phí phần mềm lớn và khối lượng dữ liệu lớn, gây thách thức cho các doanh nghiệp nhỏ và trung bình.

KHUNG PHƯƠNG PHÁP ĐỀ XUẤT

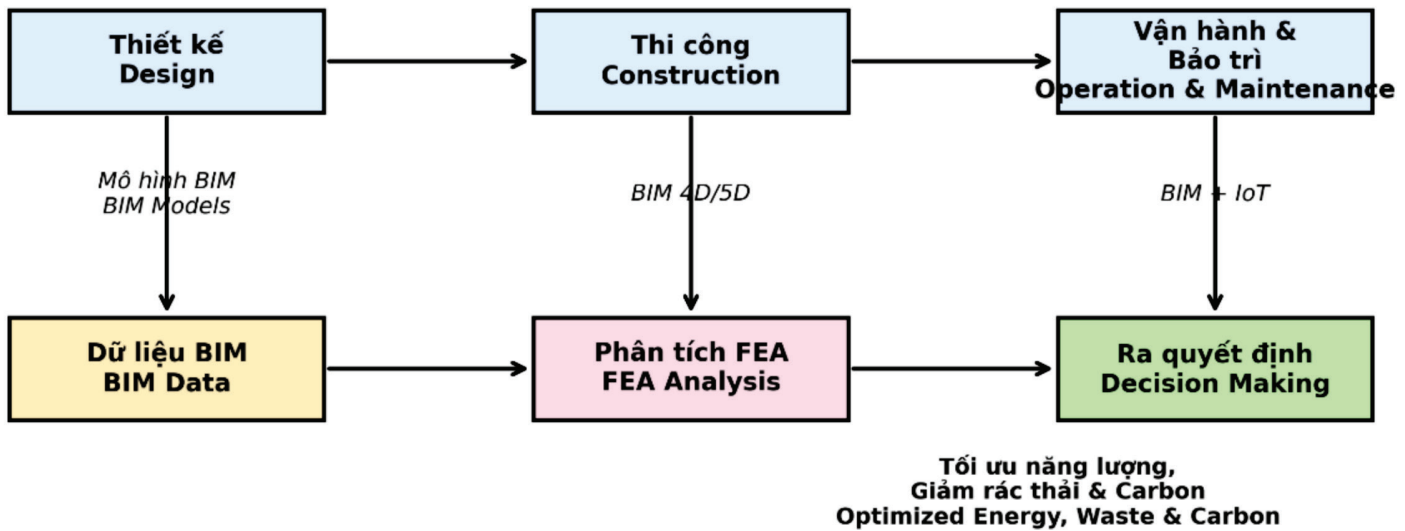
Dựa trên phân tích tổng hợp các công trình nghiên cứu trước đây, đặc biệt là các hướng tiếp cận tích hợp BIM và FEA trong kỹ thuật kết cấu bền vững (Volk et al., 2014; Zhen Liu, et al., 2022; Ehsan Kamel et al., 2023), nghiên cứu này đề xuất một khung phương pháp tích hợp BIM-FEA bao quát ba giai đoạn chính của vòng đời công trình: thiết kế, thi công và vận hành-bảo trì, với dữ liệu BIM được duy trì xuyên suốt, đồng bộ và liên tục cập nhật để phục vụ các phân tích cơ học nâng cao.

Giai đoạn thiết kế

Mô hình BIM đạt mức độ chi tiết tối thiểu LOD \geq 300, bao gồm đầy đủ dữ liệu hình học 3D, thuộc tính vật liệu (module đàn hồi, cường độ nén-kéo, hệ số giãn nở nhiệt, độ bền mỏi), điều kiện biên và dữ liệu môi trường (nhiệt độ, độ ẩm, tải trọng gió, động đất). Thông qua các giao thức trao đổi dữ liệu tiêu chuẩn như IFC4 hoặc gbXML, mô hình này được xuất sang các phần mềm FEA tiên tiến như ABAQUS hoặc ANSYS, cho phép thực hiện đa dạng các loại phân tích: phân tích tĩnh-động tuyến tính và phi tuyến, phân tích nhiệt-cơ học ghép (thermo-mechanical coupling), phân tích tương tác dòng chảy-kết cấu (fluid-structure interaction, FSI) và phân

Mục tiêu bền vững	BIM truyền thống	BIM-FEA	Cải thiện tuyệt đối	Nguồn chính
Tiết kiệm năng lượng	10-15%	20-30%	+10-15%	Ghaffarianhoseini et al. (2016); Ehsan Kamel et al., (2023)
Giảm rác thải	12-15%	20-25%	+8-10%	Annelise Nairne Schamne, et al. (2024), Won, J, et al., (2017)
Giảm carbon hàm chứa	15-20%	18-28%	+3-8%	Zhen Liu, et al. (2022)
Độ an toàn kết cấu	Ít đánh giá	Đánh giá đầy đủ	—	Ehsan Kamel et al., (2023)

Bảng 1. So sánh định lượng giữa BIM truyền thống và BIM-FEA theo nhóm mục tiêu bền vững



Hình 1. Khung tích hợp BIM-FEA cho xây dựng bền vững

tích ổn định cục bộ-tổng thể. Các mô phỏng này giúp kỹ sư dự báo chính xác phản ứng kết cấu dưới nhiều kịch bản tải trọng môi trường khắc nghiệt như gió bão theo tiêu chuẩn ASCE 7-22, động đất theo Eurocode 8, hoặc biến thiên nhiệt độ lớn do biến đổi khí hậu. Kết quả phân tích hỗ trợ quá trình tối ưu hóa cấu hình kết cấu, lựa chọn vật liệu xanh/tái chế phù hợp, và giảm carbon hàm chứa thông qua việc điều chỉnh hệ số an toàn dựa trên dữ liệu mô phỏng thay vì giả định bảo thủ.

Giai đoạn thi công

Mô hình BIM 4D (kết hợp tiến độ) và 5D (kết hợp chi phí) được liên kết với FEA để mô phỏng chi tiết trình tự lắp dựng, phân tích ứng lực tạm thời, biến dạng vòng và trạng thái ứng suất của các cấu kiện trong từng bước thi công. Điều này đặc biệt hữu ích với các dự án có sử dụng cấu kiện tiền chế, kết cấu thép khẩu độ lớn hoặc kết cấu bê tông ứng lực trước. FEA cho phép đánh giá ảnh hưởng của các yếu tố như dung sai chế tạo, độ không thẳng ban đầu và va đập trong quá trình cấu lắp (Annelise Nairne Schamne, et al., 2024; Won, J, et al., 2017), từ đó nhận diện sớm nguy cơ nứt, võng quá mức hoặc mất ổn định cục bộ. Các kết quả này cung cấp cơ sở khoa học để điều chỉnh biện pháp thi công, bố trí thiết bị nâng hạ tối ưu, giảm thiểu lãng phí vật liệu và nâng cao an toàn công trường, giúp giảm thêm 8-10% rác thải xây dựng so với BIM thuần túy.

Giai đoạn vận hành-bảo trì

BIM được tích hợp với hệ thống quản lý tòa nhà (BMS) và mạng cảm biến IoT/SHM (Structural Health Monitoring) để thu thập dữ liệu vận hành thời gian thực về tải trọng sử dụng, dao động, nhiệt độ, độ ẩm và các chỉ số ăn mòn. Dữ liệu này được đồng bộ và cập nhật vào mô hình FEA, cho phép dự báo chính xác quá trình biến dạng, phát triển vết nứt, mỏi vật liệu và suy giảm khả năng chịu lực (Ahmed Ehab, et al., 2024; Giuseppe Desogus, et al., 2021). Kỹ thuật này hình thành nền tảng digital twin phục vụ predictive maintenance - lập kế hoạch bảo trì dự báo tối ưu dựa trên mô hình vật lý-dữ liệu, giúp kéo dài tuổi thọ công trình, giảm chi phí bảo trì và cắt giảm phát thải carbon liên quan đến sửa chữa hoặc thay thế.

Hình 1 mô tả trực quan luồng dữ liệu giữa BIM và FEA ở cả ba giai đoạn, làm rõ các điểm tích hợp dữ liệu, quy trình phân tích và đầu ra chính phục vụ cho quá trình ra quyết định chiến lược trong quản lý vòng đời công trình bền vững.

KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

Kết quả tổng hợp từ nhiều nghiên cứu gần đây (Ghaffarianhoseini et al., 2016; Annelise Nairne Schamne, et al., 2024; Won, J, et al., 2017; Zhen Liu, et al. 2022; Ahmed Ehab, et al., 2024) cho thấy việc tích hợp Mô hình Thông tin Công trình (BIM) với Phân tích Phần tử Hữu hạn

(FEA) mang lại những cải thiện định lượng đáng kể so với quy trình BIM truyền thống trên các tiêu chí bền vững và hiệu suất kết cấu.

Về hiệu quả năng lượng, mức tiết kiệm trung bình tăng từ 10-15% ở BIM thuần túy lên 20-30% khi triển khai BIM-FEA nhờ khả năng thực hiện phân tích nhiệt-cơ ghép (thermo-mechanical coupling) và tối ưu hóa hình thức kết cấu dựa trên các kịch bản tải trọng và điều kiện môi trường biến động (Ahmed Ehab, et al., 2024).

Đối với quản lý rác thải xây dựng, tỷ lệ giảm tăng từ 12-15% lên 20-25% nhờ khả năng mô phỏng chính xác quy trình lắp dựng, đánh giá ứng lực tạm thời và biến dạng vòng trong từng giai đoạn thi công, từ đó giúp phát hiện hạn chế hư hỏng cấu kiện và hao hụt vật liệu (Annelise Nairne Schamne, et al., 2024; Won, J, et al., 2017).

Về giảm phát thải carbon hàm chứa, mức cắt giảm tăng từ 15-20% ở BIM-LCA truyền thống lên 18-28% khi tích hợp FEA, nhờ khả năng tối ưu hóa cấu hình vật liệu và điều chỉnh hệ số an toàn dựa trên phân tích phi tuyến và mô phỏng cơ học chính xác, cho phép áp dụng an toàn vật liệu nhẹ, vật liệu tái chế hoặc vật liệu xanh mà vẫn đảm bảo khả năng chịu lực lâu dài (Zhen Liu, et al., 2022). Ngoài ra, lợi ích bổ sung quan trọng của BIM-FEA là nâng cao đáng kể

độ an toàn kết cấu thông qua khả năng phân tích phi tuyến, phân tích động lực học và phân tích mỏi, vốn là các yêu cầu then chốt trong thiết kế kết cấu chống chịu với các điều kiện khí hậu khắc nghiệt. Những cải thiện này được thể hiện trực quan trong Hình 2, minh họa mức tăng hiệu quả định lượng ở từng tiêu chí so với BIM truyền thống.

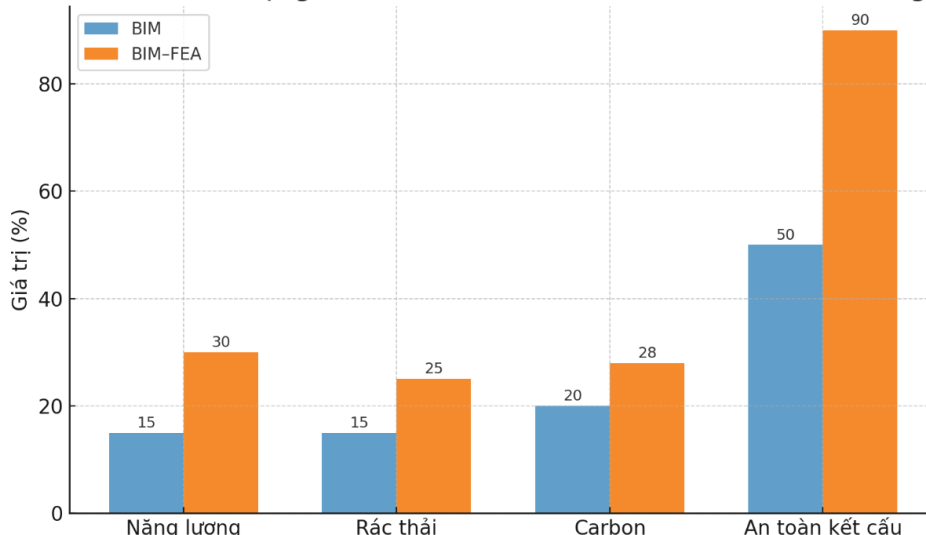
Tuy nhiên, quá trình triển khai BIM-FEA trong thực tiễn vẫn đối mặt với một số rào cản, bao gồm thiếu chuẩn dữ liệu bền vững toàn diện (ví dụ, bộ tiêu chuẩn ISO 19650 hiện chưa bao quát đầy đủ các thông số cơ học đặc thù của vật liệu xanh), chi phí đầu tư ban đầu cho hạ tầng phần mềm-phần cứng và đào tạo nhân sự, cũng như nhu cầu nhân lực am hiểu đồng thời cả BIM và FEA. Trong bối cảnh đó, sự phát triển nhanh chóng của các công nghệ điện toán đám mây, trí tuệ nhân tạo (AI) và Internet vạn vật (IoT) được kỳ vọng sẽ giảm thiểu đáng kể các rào cản này, mở ra khả năng ứng dụng rộng rãi BIM-FEA trong quản lý vòng đời công trình bền vững trong tương lai gần.

KẾT LUẬN

Tổng hợp các kết quả và phân tích so sánh cho thấy BIM-FEA là một bước tiến quan trọng trong kỹ thuật kết cấu hướng tới mục tiêu bền vững, không chỉ cải thiện các chỉ số môi trường như tiết kiệm năng lượng, giảm rác thải và giảm carbon hàm chứa, mà còn bổ sung yếu tố đánh giá và tối ưu hóa an toàn kết cấu - một khía cạnh cốt lõi thường bị bỏ qua trong các nghiên cứu BIM truyền thống. Khung phương pháp ba giai đoạn được đề xuất cho phép khai thác tối đa dữ liệu BIM trong suốt vòng đời công trình, hỗ trợ kỹ sư và nhà quản lý đưa ra quyết định chính xác, giảm thiểu rủi ro và tối ưu hóa nguồn lực.

Dù vẫn tồn tại các thách thức về chuẩn hóa dữ liệu, chi phí và năng lực nhân sự, xu hướng hội tụ công nghệ số như AI, digital twin và blockchain sẽ mở ra cơ hội nâng cao hiệu quả và minh bạch trong quản lý xây dựng. Do đó, BIM-FEA không chỉ là một công cụ phân tích, mà còn là nền tảng chiến lược để ngành xây dựng chuyển đổi sang mô hình phát triển xanh, tuần hoàn và có khả năng chống chịu cao trước biến đổi khí hậu./.

So sánh tác động của BIM và BIM-FEA tới các tiêu chí bền vững



Hình 2. So sánh tác động của BIM và BIM-FEA tới các tiêu chí bền vững

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- Ahmed Ehab, Mazkour A. Mahdi, Arfa El-Heloty (2024). "BIM Maintenance System with IoT Integration: Enhancing Building Performance and Facility Management." *Civil Engineering Journal* 10(6):1953-1973, June 2024. DOI:10.28991/CEJ-2024-010-06-015.
- Annelise Nairne Schamne, et al (2024). "BIM in construction waste management: A conceptual model based on the industry foundation classes standard." *Automation in Construction*. Volume 159, March 2024, 105283. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2024.105283>.
- Bathe, K.J. (2006). *Finite Element Procedures*. Prentice Hall, New Jersey. <https://soaneemrana.org/onewebmedia/Finite%20Element%20Procedures%20in%20Engineering%20Analysis%20Bathe%20K.J.pdf>.
- Bernardette Soust-Verdaguer, et al. (2017). "Critical review of bim-based LCA method to buildings." *Energy and Buildings*. Volume 136, 1 February 2017, Pages 110-120. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.12.009>.
- Eastman, C., Teicholz, P., Sacks, R., & Liston, K. (2018). *BIM Handbook: A Guide to Building Information Modeling for Owners, Managers, Designers, Engineers and Contractors*. 2nd Ed., Wiley, New Jersey. https://www.benardmaka.com/wp-content/uploads/2021/11/BIM-Handbook_-_A-Guide-to-Building-Information-Modeling-for-Owners-Designers-Engineers-Contractors-and-Facility-Managers-Wiley-2018.pdf
- Ehsan Kamel, Ali Kazemian (2023). "BIM-integrated thermal analysis and building energy modeling in 3D-printed residential buildings." *Energy and Buildings*. Volume 279, 15 January 2023, 112670. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.112670>.
- Ghaffarianhoseini, A., et al. (2016). "Building Information Modelling (BIM) uptake: Clear benefits, understanding its implementation, risks and challenges." *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 75, 1046-1053. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.083>.
- Giuseppe Desogus, et al (2021). "BIM and IoT Sensors Integration: A Framework for Consumption and Indoor Conditions Data Monitoring of Existing Buildings." *Sustainability* 2021, 13(8), 4496; <https://doi.org/10.3390/su13084496>.
- IPCC (2022). *Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/>.
- Jongsung Won, Jack CP Cheng (2017). "Identifying potential opportunities of building information modeling for construction and demolition waste management and minimization." *Automation in Construction*. Volume 79, July 2017, Pages 3-18. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2017.02.002>.
- Rebekka Volk, Julian Stengel, Frank Schultmann (2014). "Building Information Modeling (BIM) for existing buildings - Literature review and future needs." *Automation in Construction*, Volume 38, March 2014, Pages 109-127. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2013.10.023>.
- Salman Azhar (2011). "Building Information Modeling (BIM): Trends, Benefits, Risks, and Challenges for the AEC Industry." *Leadership and Management in Engineering*. Volume 11, Issue 3. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)LM.1943-5630.0000127](https://doi.org/10.1061/(ASCE)LM.1943-5630.0000127)
- Zhen Liu, et al. (2022). "Building Information Modeling (BIM) Driven Carbon Emission Reduction Research: A 14-Year Bibliometric Analysis." *Int J Environ Res Public Health*, 2022 Oct 6;19(19):12820. doi:10.3390/ijerph191912820.