

Xác định các công nghệ trí tuệ nhân tạo thích hợp cho quản lý an toàn tại các dự án cao tầng ở Việt Nam bằng mô hình tham số và phân tích hồi quy đa biến

Nguyễn Anh Đức¹, Nguyễn Ngọc Thoan^{1*}

¹ Trường Đại học Xây dựng Hà Nội

TỪ KHOÁ

Trí tuệ nhân tạo
Quản lý an toàn
Công trình xây dựng
Cao tầng
Công nghệ
Việt Nam

TÓM TẮT

Bối cảnh đô thị hóa nhanh chóng tại Việt Nam đang tạo ra sự bùng nổ các dự án xây dựng nhà cao tầng, kéo theo những thách thức ngày càng phức tạp về an toàn lao động. Mặc dù các giải pháp Trí tuệ Nhân tạo (AI) như Thị giác Máy tính (Computer Vision), Phân tích Dự báo (Predictive Analytics) và Robot/Máy bay không người lái (Robotics/Drones) đã được áp dụng thành công ở một số quốc gia phát triển, việc triển khai rộng rãi tại Việt Nam vẫn gặp nhiều rào cản (tài chính, văn hoá an toàn, hạ tầng dữ liệu, v.v.). Nghiên cứu này phát triển một mô hình tham số với các biến đầu vào gồm ngân sách, mức độ phức tạp, văn hoá an toàn, và sự hỗ trợ của thể chế nhằm dự báo lợi ích tiềm năng (hay điểm lợi ích) của từng công nghệ AI trong quản lý an toàn công trường nhà cao tầng. Dữ liệu được thu thập từ 12 dự án xây dựng cao tầng đang diễn ra, với 170 phản hồi hợp lệ. Nghiên cứu áp dụng Phân tích Hồi quy Đa biến (thông qua MANOVA) để đánh giá tác động tổng hợp của các tham số lên ba chỉ số nhóm công nghệ. Kết quả cho thấy ngân sách, văn hoá an toàn và hỗ trợ thể chế có ý nghĩa thống kê cao trong việc giải thích thay đổi về lợi ích an toàn khi áp dụng AI; trong khi đó, chỉ số phức tạp công trình lại không thể hiện tác động đáng kể trong kiểm định đa biến. Phân tích hồi quy OLS riêng rẽ cho từng chỉ số AI cũng củng cố nhận định rằng mỗi công nghệ AI có mức độ nhạy cảm khác nhau trước các tham số này. Công trình nghiên cứu đóng góp cả về mặt lý thuyết bằng cách làm rõ vai trò quan trọng của nhân tố văn hoá và hỗ trợ quản lý, lẫn thực tiễn bằng cách cung cấp mô hình phân tích dữ liệu, định hướng triển khai AI an toàn tại Việt Nam.

KEYWORDS

Artificial Intelligence
Safety Management
Construction Projects
High-rise
Technology
Vietnam

ABSTRACT

Rapid urbanization in Vietnam is fueling a boom in high-rise construction projects, leading to increasingly complex occupational safety challenges. Although Artificial Intelligence (AI) solutions such as Computer Vision, Predictive Analytics, and Robotics/Drones have been successfully applied in some developed countries, widespread implementation in Vietnam still faces multiple barriers (financial, safety culture, data infrastructure, etc.). This study develops a parametric model with budget, complexity, safety culture, and institutional support as input variables to forecast the potential benefits (or “benefit scores”) of each AI technology for managing safety in high-rise construction sites. Data were collected from 12 ongoing high-rise construction projects, yielding 170 valid responses. The research employs Multivariate Analysis of Variance (MANOVA) to assess the combined impacts of these parameters on three indexes of the groups of AI technologies. The results show that budget, safety culture, and institutional support significantly explain variations in AI-driven safety benefits, whereas the project complexity index does not exhibit a noteworthy effect under the multivariate test. Separate OLS regressions for each AI score further reinforce the finding that each AI technology displays different sensitivity levels to these parameters. The study contributes theoretically by highlighting the crucial roles of cultural and managerial support factors, and practically by offering a data analysis model and guidelines for safe AI adoption in Vietnam.

1. Mở đầu

Việc gia tăng nhanh chóng các công trình cao tầng ở Việt Nam phản ánh nhu cầu nhà ở, văn phòng và hạ tầng đô thị tại các đô thị lớn (TP. Hồ Chí Minh, Hà Nội, Đà Nẵng). Tuy nhiên, cùng với quá trình này, ngành xây dựng đang đối mặt với nhiều thách thức về an toàn lao động:

làm việc trên cao, sử dụng cầu tháp, vận chuyển vật liệu qua nhiều tầng, và rủi ro té ngã do điều kiện công trường phức tạp [1], [2]. Trong bối cảnh này, trí tuệ nhân tạo (AI) được kỳ vọng sẽ hỗ trợ giám sát, dự báo tai nạn, và tự động hoá một số hạng mục công việc nguy hiểm, giảm bớt sự phụ thuộc vào phương thức quản lý thủ công [3], [4].

*Liên hệ tác giả: thoannn@huce.edu.vn

Nhận ngày 10/10/2024, sửa xong ngày 20/12/2024, chấp nhận đăng ngày 23/12/2024

Link DOI: <https://doi.org/10.54772/jomc.06.2024.827>

Tuy nhiên, triển khai AI tại Việt Nam chưa đồng bộ và ít nghiên cứu định lượng mô tả cách thức các biến số ở tầm công trường—như quy mô tài chính, đặc điểm kỹ thuật, mức độ tuân thủ an toàn – tương tác với các giải pháp AI. Do đó, nghiên cứu này giới thiệu một mô hình tham số dùng để xác định lợi ích tiềm năng của ba nhóm công nghệ AI chính: Computer Vision (CV), Predictive Analytics (PA), và Robotics/Drones (RD), trong các dự án cao tầng. Qua đó, nghiên cứu kỳ vọng cung cấp một phương pháp ra quyết định dựa trên dữ liệu cho các bên quản lý và nhà thầu tại Việt Nam.

Nhiều nghiên cứu trên thế giới đã chứng minh hiệu quả của AI, đặc biệt là những mô hình thị giác máy tính phát hiện vi phạm an toàn [3], mô hình dự báo tai nạn [5], hay ứng dụng máy bay giám sát tự động kiểm tra ngoại vi toà nhà [6]. Tuy nhiên, việc sao chép giải pháp từ nước ngoài không phải lúc nào cũng phù hợp với điều kiện thực tiễn ở Việt Nam – nơi vẫn thiếu đồng bộ về trình độ lao động, tính cam kết của quản lý, và quy mô đầu tư cho công nghệ. Do đó cần thiết xây dựng một mô hình tham số mang tính địa phương hoá để xác định rõ ngân sách, độ phức tạp, văn hoá an toàn, và hỗ trợ thể chế ảnh hưởng thế nào đến hiệu quả của mỗi công nghệ AI.

2. Tổng quan tài liệu

2.1. Vai trò AI trong an toàn xây dựng

Qua nghiên cứu tổng quan các nghiên cứu trước trên thế giới, có thể nhận thấy có các nhóm chính của công nghệ thị giác máy tính sau:

- Computer Vision – Thị giác máy tính (CV): Giúp nhận diện vi phạm an toàn (lao động không có thiết bị bảo hộ, xâm nhập khu vực cấm) trong thời gian thực.
- Predictive Analytics – Phân tích dự báo (PA): Phân tích dữ liệu tai nạn, dữ liệu hoạt động công trường, đưa ra cảnh báo sớm.
- Robotics/Drones – Robot/Máy bay không người lái (RD): Giảm thiểu lao động trực tiếp vào khu vực rủi ro cao (mái, giàn giáo trên cao, kiểm tra mặt ngoài toà nhà).
- Natural Language Processing – Xử lý ngôn ngữ tự nhiên (NLP): Hỗ trợ nghiên cứu tài liệu tự động, nâng cao mức độ đào tạo, xử lý vi phạm và các lợi ích khác.

Các ứng dụng AI này từng được ghi nhận giảm tỉ lệ tai nạn đáng kể tại một số dự án quy mô lớn ở các nước phát triển [7]. Song, mức độ áp dụng tại Việt Nam vẫn rất giới hạn, chỉ dừng ở thí điểm hoặc quy mô rất nhỏ do chi phí cao và thiếu đội ngũ chuyên môn.

Mỗi nhóm danh mục bao gồm nhiều phương pháp luận và công nghệ khác nhau góp phần nâng cao quản lý an toàn trong môi trường xây dựng.

1. Thị giác máy tính. Các công nghệ thị giác máy tính ngày càng được sử dụng nhiều trong quản lý an toàn xây dựng để theo dõi tình trạng công trường và hành vi của công nhân. Ví dụ, các kỹ thuật xử lý hình ảnh đã được sử dụng để dự đoán và ngăn ngừa tai nạn ngã tại các công trường xây dựng bằng cách phân tích dữ liệu trực quan và xác định các mối nguy tiềm ẩn [8]. Việc tích hợp Mô hình thông tin xây dựng (BIM) với thị giác máy tính cho phép hiểu toàn diện hơn về động

lực của công trường, tạo điều kiện cho các biện pháp an toàn chủ động [9]. Hơn nữa, việc sử dụng máy bay không người lái được trang bị camera cho phép theo dõi công trường xây dựng theo thời gian thực, cung cấp dữ liệu có giá trị để đánh giá an toàn và quản lý rủi ro [10].

2. Phân tích dự đoán. Phân tích dự đoán đóng vai trò quan trọng trong việc dự đoán rủi ro và tai nạn an toàn trong xây dựng. Nhiều nghiên cứu đã chứng minh tính hiệu quả của các mô hình học máy, chẳng hạn như mạng nơ-ron nhân tạo và máy vectơ hỗ trợ, trong việc dự đoán kết quả an toàn dựa trên dữ liệu lịch sử [11], [12], [13]. Việc tích hợp phân tích dữ liệu lớn tiếp tục củng cố khả năng dự đoán bằng cách cho phép phân tích các tập dữ liệu lớn để xác định các mô hình và mối tương quan liên quan đến các sự cố an toàn [14].

3. Robot/Máy bay không người lái. Việc triển khai robot và máy bay không người lái trong quản lý an toàn xây dựng đang chuyển đổi các hoạt động truyền thống. Máy bay không người lái đặc biệt có giá trị để tiến hành kiểm tra công trường và giám sát các khu vực nguy hiểm mà không khiến nhân viên phải chịu rủi ro [6]. Chúng có thể chụp ảnh và video có độ phân giải cao, có thể phân tích bằng các kỹ thuật thị giác máy tính để xác định các vi phạm an toàn hoặc các mối nguy tiềm ẩn [10]. Hơn nữa, các hệ thống rô-bốt có thể được lập trình để thực hiện các nhiệm vụ lặp đi lặp lại và nguy hiểm, giúp giảm khả năng xảy ra lỗi của con người và tai nạn tại các công trường xây dựng. Sự kết hợp giữa rô-bốt và AI giúp tăng cường hiệu quả của các quy trình quản lý an toàn, cho phép đánh giá rủi ro và ứng phó sự cố hiệu quả hơn.

4. Xử lý ngôn ngữ tự nhiên (NLP). NLP ngày càng được áp dụng để phân tích dữ liệu văn bản liên quan đến an toàn xây dựng, chẳng hạn như báo cáo tai nạn và tài liệu an toàn. Bằng cách sử dụng các kỹ thuật NLP, các nhà nghiên cứu có thể trích xuất những hiểu biết có giá trị từ văn bản phi cấu trúc, điều này rất quan trọng để hiểu nguyên nhân và hậu quả của các sự cố an toàn [15], [16]. Ví dụ, các mô hình ngôn ngữ lớn đã được sử dụng để phân tích các tường thuật về tai nạn, cho phép phân loại và dự đoán mức độ nghiêm trọng của tai nạn [15], [17]. Cách tiếp cận này không chỉ hỗ trợ xác định xu hướng và mô hình trong dữ liệu an toàn mà còn hỗ trợ phát triển các chương trình đào tạo an toàn hiệu quả hơn và các chiến lược truyền thông rủi ro. Khả năng xử lý và phân tích dữ liệu văn bản nâng cao khuôn khổ quản lý an toàn tổng thể bằng cách cung cấp hiểu biết sâu sắc hơn về các vấn đề liên quan đến an toàn. Tuy nhiên, các mô hình NLP có thể dễ nhận thấy là chưa được triển khai ở Việt Nam do sự khác biệt về ngôn ngữ, nghiên cứu này tạm thời loại NLP ra khỏi các phân tích tiếp theo.

2.2. Sự phát triển của các công trình cao tầng tại Việt Nam và quản lý an toàn

Các công trình cao tầng mang tính phức tạp: Công trình cao tầng yêu cầu vận chuyển vật liệu qua nhiều tầng, vận hành cầu tháp, xử lý kết cấu phức tạp, lịch thi công giữa các sàn chồng chéo. Ngoài ra, văn hoá an toàn ở Việt Nam chưa được chú trọng xây dựng, có nghĩa là ý thức và thực hành an toàn của người lao động, thói quen tuân thủ quy tắc an toàn có xu hướng đa dạng, chưa được tiêu chuẩn hoá như ở các nước phát triển [18]. Hơn nữa, hỗ trợ từ thể chế - bao gồm cam kết của ban giám

đốc công ty, chính sách nhà nước – chưa được quan tâm đúng mức. Thiếu sự hỗ trợ này, việc triển khai AI thường không bền vững.

Quản lý an toàn trong thi công nhà cao tầng là một thách thức đa diện liên quan đến nhiều yếu tố quan trọng. Một số yếu tố quan trọng sau được xác định có liên quan đến quản lý an toàn lao động các công trình cao tầng.

- *Ngân sách dành cho an toàn.* Các ràng buộc về ngân sách ảnh hưởng đáng kể đến quản lý an toàn trong các dự án xây dựng nhà cao tầng. Nguồn tài trợ đầy đủ là điều cần thiết để thực hiện các biện pháp an toàn, chương trình đào tạo và mua sắm thiết bị an toàn cần thiết. Nghiên cứu chỉ ra rằng ngân sách có cấu trúc tốt có mối tương quan trực tiếp với kết quả an toàn được cải thiện, vì nó cho phép phân bổ nguồn lực cho đào tạo an toàn và tuân thủ các quy định về an toàn [19]. Hơn nữa, việc lập ngân sách không đủ có thể dẫn đến các hoạt động an toàn bị xâm phạm, làm tăng khả năng xảy ra tai nạn và thương tích tại công trường [20].

- *Số tầng.* Số tầng trong một tòa nhà cao tầng là một yếu tố quan trọng ảnh hưởng đến việc quản lý an toàn. Các tòa nhà cao tầng đặt ra những thách thức riêng, bao gồm rủi ro gia tăng liên quan đến độ cao, chẳng hạn như té ngã và khả năng vật thể rơi xuống [21]. Tác giả Ni lưu ý rằng các hoạt động trên cao trong xây dựng nhà cao tầng dẫn đến tỷ lệ tai nạn cao hơn so với các tòa nhà thấp tầng, đòi hỏi các biện pháp an toàn nghiêm ngặt hơn [21]. Ngoài ra, tính phức tạp của hệ thống vận chuyển theo chiều dọc và quy trình sơ tán trở nên rõ rệt hơn khi số tầng tăng lên, đòi hỏi phải lập kế hoạch và thực hiện cẩn thận để đảm bảo an toàn cho người lao động [22]. Mối tương quan giữa số tầng và hiệu quả quản lý an toàn được hỗ trợ thêm bởi các nghiên cứu chỉ ra rằng các công trình cao hơn đòi hỏi phải tăng cường các giao thức an toàn và đào tạo cho người lao động.

- *Lực lượng lao động.* Lực lượng lao động là yếu tố then chốt trong việc quản lý an toàn của các dự án xây dựng nhà cao tầng. Năng lực và hành vi của người lao động ảnh hưởng trực tiếp đến kết quả an toàn. Li và cộng sự xác định tổ chức quản lý và hành vi an toàn của người lao động là các yếu tố thành công quan trọng ảnh hưởng đến hiệu suất quản lý an toàn [23]. Lực lượng lao động lành nghề và được đào tạo bài bản là điều cần thiết để tuân thủ các giao thức an toàn và ứng phó hiệu quả với các trường hợp khẩn cấp. Hơn nữa, động lực của lực lượng lao động, bao gồm số lượng công nhân và trình độ kinh nghiệm của họ, có thể tác động đến văn hóa an toàn chung tại công trường [24]. Nghiên cứu đã chỉ ra rằng đầu tư vào đào tạo và phát triển lực lượng lao động dẫn đến giảm đáng kể các vụ tai nạn và thương tích, nhấn mạnh tầm quan trọng của các yếu tố con người trong quản lý an toàn [5].

- *Độ phức tạp.* Độ phức tạp của các dự án xây dựng nhà cao tầng đặt ra những thách thức đáng kể đối với công tác quản lý an toàn. Các tòa nhà cao tầng liên quan đến các thiết kế phức tạp, nhiều giai đoạn xây dựng và nhiều bên liên quan, tất cả đều có thể làm phức tạp thêm công tác giám sát an toàn [25]. Zhao và cộng sự nhấn mạnh rằng tính phức tạp của các quy trình xây dựng đòi hỏi các chiến lược quản lý an toàn mạnh mẽ để giảm thiểu rủi ro liên quan đến các sản phẩm xây dựng nhà cao tầng [26]. Hơn nữa, việc tích hợp các công nghệ tiên tiến,

chẳng hạn như Mô hình thông tin xây dựng (BIM), có thể tăng cường quản lý an toàn bằng cách cung cấp hình ảnh trực quan và mô phỏng chi tiết về quy trình xây dựng, do đó cải thiện các chiến lược xác định và giảm thiểu rủi ro [27]. Tính phức tạp của các dự án nhà cao tầng cũng đòi hỏi sự giao tiếp và phối hợp hiệu quả giữa các nhóm khác nhau để đảm bảo các giao thức an toàn được tuân thủ nhất quán [20].

- *Hỗ trợ của thể chế.* Hỗ trợ của thể chế đóng vai trò quan trọng trong việc định hình các hoạt động quản lý an toàn trong xây dựng nhà cao tầng. Các khuôn khổ quản lý chặt chẽ và cơ chế thực thi là điều cần thiết để đảm bảo tuân thủ các tiêu chuẩn an toàn [28]. Tác giả Nguyễn Anh Đức nhấn mạnh sự cần thiết phải hiểu sự tương tác của các yếu tố tổ chức trong việc nâng cao kết quả an toàn tại các công trường xây dựng [20]. Hỗ trợ hiệu quả của tổ chức bao gồm cung cấp các nguồn lực để đào tạo an toàn, tạo điều kiện tiếp cận thiết bị an toàn và thúc đẩy văn hóa an toàn trong các tổ chức. Hơn nữa, sự hợp tác giữa các cơ quan chính phủ, công ty xây dựng và tổ chức an toàn có thể dẫn đến việc phát triển các hoạt động thực hành và hướng dẫn tốt nhất giúp tăng cường quản lý an toàn trong xây dựng nhà cao tầng [29]. Sự hiện diện của các khuôn khổ thể chế hỗ trợ đã được liên kết với việc cải thiện hiệu suất an toàn và giảm tỷ lệ tai nạn ở các công trường xây dựng.

Các nghiên cứu hiện có về AI trong xây dựng đa phần tập trung mô tả hiệu quả từng công nghệ theo cách độc lập. Chưa có nhiều mô hình đo lường kết hợp đánh giá cùng lúc tác động của các tham số tới nhiều công nghệ AI khác nhau. Tại Việt Nam, nhất là trong bối cảnh nhà cao tầng, thiếu một khung định lượng để xác định xem công nghệ nào mang lại lợi ích tối ưu hơn khi xét tới hạn chế về ngân sách, văn hoá, và các yếu tố môi trường phức tạp khác.

3. Phương pháp nghiên cứu

Để thu thập dữ liệu, nghiên cứu thực hiện khảo sát chi tiết như sau:

- Chọn mẫu: 12 công trường cao tầng (từ 15 tầng trở lên) ở TP. Hồ Chí Minh, Hà Nội, Đà Nẵng; yêu cầu có thông tin ngân sách an toàn, số liệu lao động, dữ liệu tai nạn tối thiểu một năm.
 - Đối tượng: 170 phản hồi từ quản lý dự án, kỹ sư an toàn, kỹ sư xây dựng.
 - Thu thập: Bảng hỏi về biến số:
 - Budget: Ngân sách an toàn hàng năm (USD).
 - Floors, Workforce: Số tầng, số công nhân trung bình.
 - ComplexityIndex: Chỉ số phức tạp (tổng hợp số sàn, cấu trúc thiết kế, độ đông đúc).
 - SafetyCulture (1–5): Thang Likert, đánh giá mức độ tuân thủ, nhận thức an toàn (văn hoá an toàn).
 - InstitutionalSupport (1–5): Mức cam kết của ban lãnh đạo, cơ quan quản lý.
 - AccidentFreq: Tần suất tai nạn/suýt tai nạn (lần/tháng trên 100 công nhân).
 - AIAdoption: Mức độ thử nghiệm AI (0 = không, 1 = có một phần).
- Do chưa có công trường nào áp dụng AI một cách toàn diện, các tác giả xây dựng ba biến Score_CV (điểm lợi ích do thị giác máy tính),

Score_PA (điểm lợi ích do phân tích dự đoán), Score_RD (điểm lợi ích do robot/máy bay không người lái) dưới dạng lợi ích tiềm năng, dựa trên phỏng vấn và dữ liệu quan sát.

Phân tích phương sai đa biến (MANOVA) và hồi quy bình phương nhỏ thông thường (OLS) là hai kỹ thuật thống kê được sử dụng rộng rãi trong nghiên cứu để phân tích mối quan hệ giữa các biến. MANOVA mở rộng Phân tích phương sai (ANOVA) truyền thống bằng cách cho phép các nhà nghiên cứu đánh giá nhiều biến phụ thuộc cùng một lúc, cung cấp hiểu biết toàn diện hơn về các tương tác giữa các biến này. Kỹ thuật này đặc biệt hữu ích trong các nghiên cứu mà các biến phụ thuộc có tương quan, vì nó giúp kiểm soát tỷ lệ lỗi loại I có thể phát sinh khi tiến hành nhiều ANOVA [30]. Ví dụ, trong nghiên cứu giáo dục, MANOVA đã được sử dụng để đánh giá hiệu quả của các biện pháp can thiệp trên nhiều biện pháp kết quả khác nhau, do đó cung cấp thông tin chi tiết về tác động tổng thể của các chiến lược giáo dục [30]. Mặt khác, hồi quy OLS là một phương pháp thống kê cơ bản được sử dụng để mô hình hóa mối quan hệ giữa một biến phụ thuộc và một hoặc nhiều biến độc lập. Nó giả định một mối quan hệ tuyến tính và chủ yếu liên quan đến việc ước tính các hệ số biểu thị mối quan hệ này. OLS được sử dụng rộng rãi do tính đơn giản và khả năng diễn giải của nó, khiến nó trở thành lựa chọn phổ biến trong nhiều lĩnh vực, bao gồm kinh tế, khoa học xã hội và nghiên cứu sức khỏe [31]. Tuy nhiên, OLS có những hạn chế, đặc biệt là khi xử lý nhiều biến phụ thuộc hoặc khi các giả định về tính tuyến tính, tính đồng phương sai và tính chuẩn bị bị vi phạm. Trong những trường hợp như vậy, các nhà nghiên cứu có thể ưa chuộng MANOVA hơn để nắm bắt được sự phức tạp của dữ liệu hiệu quả hơn [30].

Trong nghiên cứu nhiều biến phụ thuộc (Score_CV, Score_PA, Score_RD) cùng một bộ biến độc lập (lnBudget, ComplexityIndex, SafetyCulture, InstitutionalSupport), nếu chỉ chạy OLS tách biệt sẽ khó kết luận về tác động đa biến tổng thể. Các lý do chính của lựa chọn này là:

- Kiểm định hiệu ứng tổng hợp: MANOVA cho phép xem liệu một biến, ví dụ như ngân sách, có ý nghĩa khi giải thích đồng thời các chỉ số AI hay không.

- Hiệu quả thống kê: Khi các chỉ số lợi ích AI có khả năng tương quan với nhau, phân tích đa biến (MANOVA) sẽ nắm bắt tương quan lỗi giữa các mô hình tốt hơn mô hình đơn biến.

Nói cách khác, chọn MANOVA để tránh bỏ sót kiểm định tổng hợp về tác động của từng tham số tới cả ba phương án AI. Sau đó, các tác giả vẫn thực hiện hồi quy OLS tách biệt nhằm giải thích sâu hơn độ lớn ảnh hưởng lên từng công nghệ AI.

Quy trình phân tích:

a. **Tiền xử lý:** Tạo biến lnBudget = ln(Budget), kiểm tra dữ liệu ngoại lai, thiếu dữ liệu. Lý do là hàm loga sẽ giải quyết được sự chênh lệch rất lớn giữa ngân sách dành cho an toàn của rất nhiều dự án.

b. **Phân tích MANOVA:**

Trong phân tích MANOVA để đo lường mức độ ảnh hưởng của một tập biến độc lập X lên nhiều biến phụ thuộc Y thường sử dụng Wilks' Lambda [30]. Giả sử ta có H là ma trận hiệu ứng và E là ma trận sai số, thì Wilks' Lambda được định nghĩa:

$$\Lambda = \frac{\det(E)}{\det(E + H)} \quad (1)$$

- H phản ánh “hiệu ứng” do các biến độc lập tạo ra,
- E phản ánh phần biến thiên chưa giải thích của mô hình.

Khi Λ nhỏ, H lớn so với E, tức các biến độc lập giải thích mạnh mẽ hơn sự biến thiên của Y.

Tính ma trận hệ số: Trong mô hình đa biến, giả sử ta có: X là ma trận dữ liệu (kích thước $n \times p$, với n quan sát và p biến độc lập); Y là ma trận các biến phụ thuộc (kích thước $n \times m$, với m biến phụ thuộc); B là ma trận hệ số (kích thước $p \times m$) thì công thức ước lượng B trong trường hợp tối thiểu bình phương được cho bởi:

$$B = (X^T X)^{-1} X^T Y \quad (2)$$

Phần tử $\beta_{j,k}$ của B biểu diễn hệ số của biến độc lập i lên biến phụ thuộc k.

c. Hồi quy OLS: Ba mô hình riêng lẻ, mỗi mô hình một biến phụ thuộc (CV, PA, RD), trong đó:

- x_i (kích thước $1 \times p$) là vector hàng dữ liệu cho quan sát thứ i (bao gồm cả 1 cho intercept),

- $y_{i,CV}, y_{i,PA}, y_{i,RD}$ là các giá trị thực tế hoặc ước lượng của Score_CV, Score_PA, Score_RD,

- $\beta_{CV}, \beta_{PA}, \beta_{RD}$ là vector hệ số ($p \times 1$) ứng với từng biến phụ thuộc.

Công thức hồi quy OLS tiêu chuẩn cho các biến phụ thuộc:

$$y_{CV,i} = x_i \beta_{CV} + \epsilon_{i,CV} \quad (3)$$

$$y_{PA,i} = x_i \beta_{PA} + \epsilon_{i,PA} \quad (4)$$

$$y_{RD,i} = x_i \beta_{RD} + \epsilon_{i,RD} \quad (5)$$

Với $\epsilon_{i,CV}, \epsilon_{i,PA}, \epsilon_{i,RD}$ là các sai số ngẫu nhiên.

d. Diễn giải kết quả: So sánh ý nghĩa thống kê, hệ số hồi quy, kiểm định R^2 , F-statistic

4. Kết quả và phân tích

4.1. Mô tả thống kê khảo sát:

Thông qua khảo sát ở 12 công trường, có 170 phản hồi hợp lệ, với giá trị trung bình trong bảng :

Trong đó:

- BudgetUSD biến thiên từ 30.000 USD đến 120.000 USD, với trung bình ~72.083 USD/năm.

- Floors dao động từ 15 đến 35 tầng, trung bình 23,17 tầng.

- Workforce trung bình 395 lao động/công trường, độ lệch chuẩn khá lớn do có dự án đến 600–650 công nhân.

- ComplexityIndex là chỉ số chuẩn hoá (z-score), trung bình 0,625 và độ lệch chuẩn 0,69.

- SafetyCulture có giá trị trung bình = 3 (trên thang 1–5).

- InstitutionalSupport trung bình 3,08, lệch chuẩn ~1,0.

- AccidentFreq trung bình ~2,4 tai nạn-suýt tai nạn/tháng/100 lao động, lệch chuẩn 0,67.

- AIAdoption trung bình = 0,5, đồng nghĩa 6/12 công trường bước đầu thử nghiệm AI.

Thông qua phân tích độ tương quan, các tác giả nhận thấy “Workforce” và “Floors” có tương quan mạnh với “ComplexityIndex”.

Thực tế, ComplexityIndex được chuẩn hoá (z-score) dựa trên chính các đặc điểm như số tầng, quy mô lao động, đặc thù thiết kế... Do đó, nếu cùng lúc đưa vào mô hình “Workforce”, “Floors” và “ComplexityIndex”

sẽ làm phát sinh tình trạng đa cộng tuyến. Do đó, các biến workforce và floors được gộp vào biến ComplexityIndex (độ phức tạp) cho các phân tích tiếp theo.

Bảng 1. Mô tả thống kê dữ liệu từ khảo sát.

Chi tiêu	Ký hiệu biến	Giá trị trung bình	Độ lệch chuẩn
Ngân sách (USD)	BudgetUSD	72.083,33	28,770,00
Số tầng	Floors	23,17	6,75
Lao động (người)	Workforce	395,00	143,18
Chỉ số phức tạp	ComplexityIndex	0,625	0,69
Văn hoá an toàn	SafetyCulture	3,00	0,74
Hỗ trợ thể chế	InstitutionalSupport	3,08	1,00
Tần suất tai nạn	AccidentFreq	2,40	0,67
Áp dụng AI	AIAdoption	0,50	0,50

4.2. Kết quả phân tích MANOVA

Kết quả phân tích MANOVA được tóm lược trong Bảng 2.

Bảng 2. Kết quả kiểm định MANOVA.

Tham số	Wilks' λ	Num DF	Den DF	F Value	Pr > F
Intercept	0,9746	3,0000	163,0000	1,4141	0,2406
lnBudget	0,8994	3,0000	163,0000	6,0793	0,0006
ComplexityIndex	0,9916	3,0000	163,0000	0,4580	0,7120
SafetyCulture	0,9378	3,0000	163,0000	3,6013	0,0148
InstitutionalSupport	0,7835	3,0000	163,0000	15,0129	0,0000

Nhận thấy:

- lnBudget (p=0,0006): Có tác động đáng kể khi xét đa biến, nghĩa là ngân sách ảnh hưởng đồng thời đến Score_CV, Score_PA, Score_RD.
- ComplexityIndex (p=0,7120): Không ảnh hưởng rõ rệt lên cả ba chỉ số.
- SafetyCulture (p=0,0148): Yếu tố văn hoá an toàn có ý nghĩa tích cực.

- InstitutionalSupport (p<0,0001): Tác động mạnh nhất, thể hiện vai trò chủ đạo của lãnh đạo/chính sách.

4.3. Ma trận hệ số B và OLS cho từng công nghệ

- Ma trận hệ số
Nhóm tính B được xem xét để biết sự phân bố hệ số trên Score_CV, Score_PA, Score_RD (Bảng 3).

Bảng 3. Ma trận hệ số B.

Hệ số	Score_CV	Score_PA	Score_RD
Intercept	1,5834	-5,3074	-2,7979
lnBudget	0,2226	0,9787	0,8223
ComplexityIndex	0,1242	-0,0338	0,1941
SafetyCulture	0,3407	0,3527	0,0881
InstitutionalSupport	0,3594	0,2002	0,4018

Nhận thấy:

- Score_CV: Hệ số cao ở SafetyCulture, InstitutionalSupport.
- Score_PA: Phụ thuộc mạnh vào lnBudget (0,9787) và SafetyCulture (0,3527).

- Score_RD: Mạnh nhất ở lnBudget (0,8223) và InstitutionalSupport (0,4018).
- Hồi quy OLS riêng
Để phân tích sâu ảnh hưởng của từng nhóm công nghệ AI, ba mô hình OLS được xem xét. Bảng 4 ghi nhận R², F-statistic, và hệ số p-value.

Bảng 4. Kết quả OLS cho Score_CV, Score_PA, Score_RD.

Model	Score_CV	Score_PA	Score_RD
R-squared	0,706	0,731	0,749
F-statistic	99,29 (p < 0,001)	111,9 (p < 0,001)	123,3 (p < 0,001)
Intercept	1,58 (p = 0,613)	-5,31 (p = 0,100)	-2,80 (p = 0,410)
lnBudget	0,22 (p = 0,463)	0,98 (p = 0,002)	0,82 (p = 0,013)
ComplexityIndex	0,12 (p = 0,508)	-0,03 (p = 0,861)	0,19 (p = 0,340)
SafetyCulture	0,34 (p = 0,018)	0,35 (p = 0,017)	0,09 (p = 0,571)
InstitutionalSupport	0,36 (p < 0,001)	0,20 (p = 0,019)	0,40 (p < 0,001)

Nhận thấy:

- Score_CV: Văn hoá an toàn và hỗ trợ thể chế là yếu tố then chốt, còn ngân sách (p = 0,463) và phức tạp (p = 0,508) không ảnh hưởng.
- Score_PA: Gắn chặt với ngân sách (p = 0,002), bên cạnh văn hoá (p = 0,017) và hỗ trợ (p = 0,019).
- Score_RD: Ngân sách (p = 0,013) và hỗ trợ (p < 0,001) chi phối mạnh, còn phức tạp, văn hoá không rõ tác động.

5. Thảo luận

Kết quả MANOVA khẳng định vai trò đồng thời của *ngân sách, văn hoá an toàn, hỗ trợ thể chế* với cả ba chỉ số AI, trong khi *độ phức tạp* không có ý nghĩa đa biến. Điều này nhấn mạnh rằng, ngay cả một công trình khá lớn và nhiều tầng, nếu không được cấp tài chính đầy đủ hay thiếu sự ủng hộ quản lý, thì hiệu quả AI có thể không được bảo đảm. Từ đó có các gợi ý thực tiễn như sau:

- Thị giác máy tính (CV): Chi phí cài đặt camera, server có thể không quá cao, nhưng cần văn hoá an toàn cao và sự quan tâm của lãnh đạo để thật sự vận hành và xử lý vi phạm.
- Phân tích dự đoán (PA): Đòi hỏi hạ tầng dữ liệu (thu thập, lưu trữ, phân tích), nên cần ngân sách đầy đủ. Bên cạnh đó, công nhân và quản lý phải coi trọng dự báo rủi ro (văn hoá an toàn) và chủ động ứng phó.
- Robot/Máy bay không người lái (RD): Thường tốn kém nhất (chi phí mua thiết bị, giấy phép bay, đào tạo), cần quyết tâm lớn từ ban quản lý. Nếu được đầu tư tốt, giải pháp máy bay không người lái giảm rủi ro cho người lao động.

Ngoài ra, mô hình được xây dựng còn đóng góp ở chỗ kết hợp phân tích đa biến (MANOVA) để xem xét các tham số tác động đồng thời đến nhiều giải pháp AI khác nhau. Qua đó, nghiên cứu bổ sung góc nhìn định lượng cho thấy rằng bốn tham số (ngân sách, độ phức tạp, văn hoá an toàn, hỗ trợ thể chế) không phải chi tác động tách biệt lên một công nghệ, mà có thể có hiệu ứng song hành hoặc không. Kết quả cụ thể giúp làm rõ hơn vai trò văn hoá và lãnh đạo trong môi trường xây dựng đang phát triển.

6. Kiểm chứng Mô hình

Sau khi xây dựng mô hình tham số và ước lượng các hệ số (MANOVA + OLS), nghiên cứu áp dụng mô hình cho hai dự án cao

tầng khác (không thuộc 12 dự án gốc). Mỗi dự án đều cao trên 20 tầng, ngân sách an toàn và cấu trúc khác nhau. Thay vì triển khai trực tiếp công nghệ AI, các tác giả đã thực hiện kiểm chứng thông qua các bước:

- Thu thập thông số: Ngân sách, phức tạp, văn hoá an toàn, hỗ trợ lãnh đạo giống quy trình cũ.
- Tính “Score_CV, Score_PA, Score_RD” thông qua công thức B đã ước lượng.
- Trình bày kết quả cho hội đồng chuyên gia (5 thành viên: 2 giảng viên chuyên ngành xây dựng, 3 quản lý từ các doanh nghiệp xây dựng lớn) để đánh giá mức độ hợp lý.

Kết quả cho thấy:

+ Dự án A (Hà Nội, 25 tầng):

Mô hình gợi ý “Score_CV” cao nhất do văn hoá an toàn tạm khá (điểm 3–4) và quản lý ủng hộ (4), trong khi ngân sách ở mức trung bình. Hội đồng chuyên gia đánh giá là hợp lý vì lắp camera và huấn luyện người lao động là tương đối khả thi.

+ Dự án B (TP. Hồ Chí Minh, 30 tầng):

Điểm mô hình ghi nhận “Score_RD” lớn hơn, do dự án này có ngân sách cao và hỗ trợ lãnh đạo tốt. Hội đồng chuyên gia đồng tình rằng máy bay không người lái có thể hỗ trợ kiểm tra an toàn mặt ngoài ở cao độ lớn. Tuy nhiên, họ cũng lưu ý chi phí vận hành lâu dài cần được tính thêm.

Sau khi xem xét “điểm lợi ích” do mô hình tạo ra, hội đồng chuyên gia nhận xét:

+ Phù hợp với thực tế: Các đề xuất về công nghệ AI tương đối sát với điều kiện của mỗi dự án.

+ Chưa đề cập yếu tố “học hỏi theo thời gian”: Chuyên gia gợi ý mô hình có thể mở rộng thêm để phản ánh quá trình dự án học và thích nghi.

+ Tính khả thi: Nếu được áp dụng chính thức, doanh nghiệp cần kế hoạch tài chính rõ ràng và cơ chế xử lý dữ liệu.

Nhìn chung, các chuyên gia đồng ý mô hình có đầu ra đáng tin cậy, phù hợp điều kiện ở Việt Nam, cũng như có tính linh hoạt khi tích hợp nâng cao (ví dụ thêm biến phụ thuộc về chi phí-lợi ích).

7. Kết luận

Nghiên cứu đề xuất và kiểm chứng một mô hình tham số nhằm xác định lợi ích dự kiến của ba nhóm công nghệ AI (Thị giác máy tính, Phân

tích dự đoán, Robot/Máy bay không người lái) trong quản lý an toàn tại các dự án cao tầng Việt Nam. Thông qua phân tích MANOVA, các tác giả đã xác định ngân sách, văn hoá an toàn, và hỗ trợ thể chế có tác động thống kê đáng kể khi xét toàn diện, trong khi chỉ số phức tạp công trình không thể hiện rõ. Kết quả chạy hồi quy OLS riêng rẽ cho thấy:

- *Thị giác máy tính* phù hợp dự án có văn hoá an toàn cao, quản lý ủng hộ, dù ngân sách chưa hẳn quá lớn.

- *Phân tích dự đoán* đòi hỏi nhiều tài chính và mức cam kết an toàn, phù hợp với công trình có xu hướng đầu tư lâu dài.

- *Robot/Máy bay không người lái* phụ thuộc chính vào ngân sách và quyết tâm lãnh đạo, còn độ phức tạp và văn hoá an toàn ít nổi bật trong mô hình.

Quá trình kiểm chứng mô hình bằng việc áp dụng hệ số tham số cho hai dự án cao tầng khác nhau và tham vấn hội đồng chuyên gia cho thấy kết quả đề xuất nhất quán với thực tiễn. Nghiên cứu này đóng góp nền tảng tham chiếu định lượng cho doanh nghiệp và nhà thầu xây dựng về hướng tiếp cận AI, đồng thời gợi ý các cấp quản lý (ban giám đốc, cơ quan chức năng) về những nhân tố cần ưu tiên hỗ trợ (chính sách khuyến khích tài chính, tăng cường văn hoá an toàn, v.v.). Hạn chế hiện tại nằm ở chỗ dữ liệu chưa có tình huống triển khai AI toàn diện, cũng như phạm vi mẫu còn khiêm tốn. Tuy vậy, mô hình tham số đã đem lại cái nhìn định hướng và có thể tiếp tục hoàn thiện, bổ sung biến số “học theo thời gian” hay “đánh giá chi phí – lợi ích” trong các nghiên cứu trong tương lai.

Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường Đại học Xây dựng Hà Nội (HUCE) trong đề tài mã số 11-2024/KHXD-TĐ.

Tài liệu tham khảo

- [1]. W. I. and S. A. Ministry of Labors, “Occupational accident situation in 2021. 843/TB-LDTBXH,” 2021.
- [2]. W. I. and S. A. Vietnamese Ministry of Labor, “Report on the National Occupational Accidents in 2022,” 2022.
- [3]. W. Fang *et al.*, “Computer vision applications in construction safety assurance,” 2020. doi: 10.1016/j.autcon.2019.103013.
- [4]. J. Lee, M. Park, and W. Kim, “Implementation of AI-based safety management to prevent accidents in construction work,” *J Constr Eng Manag*, vol. 147, no. 5, 2021.
- [5]. B. Manzoor, I. Othman, and A. Waheed, “Accidental safety factors and prevention techniques for high-rise building projects – A review,” 2022. doi: 10.1016/j.asej.2022.101723.
- [6]. Y. Li and C. Liu, “Applications of multirotor drone technologies in construction management,” *International Journal of Construction Management*, vol. 19, no. 5, 2019, doi: 10.1080/15623599.2018.1452101.
- [7]. I. A. Shah, “Artificial Intelligence in Advancing Occupational Health and Safety: An Encapsulation of Developments,” *J Occup Health*, 2024, doi: 10.1093/jocccuh/uiad017.
- [8]. S.-M. Hong, B.-C. Kim, T.-W. Kwon, J.-H. Kim, and J.-J. Kim, “A Study on Prevention of Construction Opening Fall Accidents Introducing Image Processing,” *Journal of KIBIM*, vol. 6, no. 2, 2016, doi: 10.13161/kibim.2016.6.2.039.
- [9]. S. Zhang, K. Sulankivi, M. Kiviniemi, I. Romo, C. M. Eastman, and J. Teizer, “BIM-based fall hazard identification and prevention in construction safety planning,” *Saf Sci*, vol. 72, 2015, doi: 10.1016/j.ssci.2014.08.001.
- [10]. A. Waqar, “Modeling Relation Among Implementing AI-based Drones and Sustainable Construction Project Success,” *Front Built Environ*, 2023, doi: 10.3389/fbuil.2023.1208807.
- [11]. H. Zhu and Y. Wang, “Intelligent Prediction of Prestressed Steel Structure Construction Safety Based on BP Neural Network,” *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 12, no. 3, 2022, doi: 10.3390/app12031442.
- [12]. A. J. -P. Tixier, M. R. Hallowell, B. Rajagopalan, and D. Bowman, “Application of Machine Learning to Construction Injury Prediction,” *Autom Constr*, 2016, doi: 10.1016/j.autcon.2016.05.016.
- [13]. Y. Shin, “Application of Stochastic Gradient Boosting Approach to Early Prediction of Safety Accidents at Construction Site,” *Advances in Civil Engineering*, vol. 2019, 2019, doi: 10.1155/2019/1574297.
- [14]. A. Ajayi *et al.*, “Big data platform for health and safety accident prediction,” *World Journal of Science, Technology and Sustainable Development*, vol. 16, no. 1, 2019, doi: 10.1108/WJSTSD-05-2018-0042.
- [15]. M. Smetana, “Highway Construction Safety Analysis Using Large Language Models,” *Applied Sciences*, 2024, doi: 10.3390/app14041352.
- [16]. A. J. -P. Tixier, M. R. Hallowell, B. Rajagopalan, and D. Bowman, “Automated Content Analysis for Construction Safety: A Natural Language Processing System to Extract Precursors and Outcomes From Unstructured Injury Reports,” *Autom Constr*, 2016, doi: 10.1016/j.autcon.2015.11.001.
- [17]. B. Yoo, J. Kim, S. Park, C. R. Ahn, and T. Oh, “Harnessing Generative Pre-Trained Transformers for Construction Accident Prediction with Saliency Visualization,” *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 14, no. 2, 2024, doi: 10.3390/app14020664.
- [18]. Pham Phu Cuong, “Identify important factors causing occupational accidents on construction sites,” *Journal of Science and Technology*, no. 04, pp. 168–171, 2021.
- [19]. Jingfeng Yuan, Chao Wang, S. Miroslaw, M. Asce, and Q. Li, “Safety-Knowledge Management in American Construction Organizations: Questionnaire Survey and Analysis,” *American Society of Civil Engineers*, vol. 28, no. April, pp. 252–264, 2012, doi: 10.1061/(ASCE)ME.1943-5479.
- [20]. N. Duc, “Understanding the correlates of construction safety of high-rise buildings: A Bayesian perspective,” *Journal of Science and Technology in Civil Engineering (JSTCE)-HUCE*, vol. 18, no. 1, pp. 68–81, 2024.
- [21]. P. Ni, “Construction Safety Management Report for High-Rise Buildings,” *Baltic Journal of Real Estate Economics and Construction Management*, vol. 10, no. 1, 2022, doi: 10.2478/bjreecm-2022-0002.
- [22]. X. Qi, X. Zhou, M. Song, and F. Li, “Study on selection and optimization of vertical transportation equipment for high-rise construction,” in *Advanced Materials Research*, 2011. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.168-170.2376.
- [23]. Y. Li, Y. Ning, and W. T. Chen, “Critical Success Factors for Safety Management of High-Rise Building Construction Projects in China,” *Advances in Civil Engineering*, vol. 2018, 2018, doi: 10.1155/2018/1516354.
- [24]. M. I. P. Harahap, I. Othman, and N. A. M. Dinata, “Investigation on the Nature of Safety Rule Violations in High-Rise Construction Projects,” *Journal of Advanced Research in Applied Sciences and Engineering Technology*, vol. 41, no. 2, 2024, doi: 10.37934/araset.41.2.164179.
- [25]. A. Wang and W. Han, “Application of 3D measurement technology in urban high-rise building planning project,” *International Journal of Mechatronics and Applied Mechanics*, vol. 2018, no. 4, 2018, doi: 10.17683/ijmom/issue4.15.

- [26]. J. X. Zhao, F. Li, M. Liu, and L. Li, "The study on safety management of high-rise construction lift platform based on entropy method and grey theory," in *Applied Mechanics and Materials*, 2014. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.638-640.1642.
- [27]. B. Manzoor, I. Othman, J. C. Pomares, and H. Y. Chong, "A research framework of mitigating construction accidents in high-rise building projects via integrating building information modeling with emerging digital technologies," *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 11, no. 18, 2021, doi: 10.3390/app11188359.
- [28]. K. C. Goh, H. H. Goh, M. F. Omar, T. C. Toh, and A. A. Mohd Zin, "Accidents preventive practice for high-rise construction," in *MATEC Web of Conferences*, 2016. doi: 10.1051/mateconf/20164704004.
- [29]. J. F. Wang, Y. Liu, and X. Q. Zhai, "The research of high-rise building fire safety simulation model based on system dynamics," in *Applied Mechanics and Materials*, 2014. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.614.605.
- [30]. L. Akbay, T. Akbay, O. Erol, and M. Kilinç, "Inadvertent use of ANOVA in educational research: ANOVA is not a surrogate for MANOVA," *Journal of Measurement and Evaluation in Education and Psychology*, vol. 10, no. 3, 2019, doi: 10.21031/epod.524511.
- [31]. T. Clotey and W. C. Benton, "Technical Note: Recommendations for Assessing Unit Nonresponse Bias in Dyadic Focused Empirical Supply Chain Management Research," *Decision Sciences*, vol. 51, no. 2, 2020, doi: 10.1111/deci.12431.