VẬT LIỆU & XÂY DỰNG
Tạp chí Vật liệu và Xây dựng
ISSN 1859 - 381X
Website: www. jomc.vn

Ảnh hưởng của hướng bố trí và góc nghiêng tấm pin quang điện đến sản lượng điện mặt trời trên mái công trình tại Hà Nam

Phạm Chí Thành[1], Trịnh Công Tý[1*], Nguyễn Đức Hạnh[1,2]

[1] Khoa Công trình thủy, trường Đại học Xây dựng Hà Nội

[2] Viện Khoa học và Công nghệ Công trình thủy

TỪ KHOÁ

Tấm pin quang điện
Điện mặt trời áp mái
Hướng bố trí
Góc nghiêng tối ưu
Sản lượng điện
Tỉnh Hà Nam

TÓM TẮT

Điện mặt trời áp mái có khả năng tận dụng diện tích mái công trình hiện hữu để bổ sung nguồn điện tại chỗ, song hiệu quả phát điện chịu tác động đáng kể của điều kiện bức xạ và hình học bề mặt lắp đặt. Nghiên cứu đánh giá ảnh hưởng của hướng bố trí và góc nghiêng tấm pin quang điện đến sản lượng điện tại các khu vực thuộc tỉnh Hà Nam thông qua phương pháp mô phỏng. Các kịch bản được xây dựng với nhiều phương vị kết hợp các mức góc nghiêng, trong đó sản lượng điện trung bình năm được sử dụng làm chỉ tiêu đánh giá và xác định cấu hình cho hiệu quả phát điện cao nhất. Kết quả cho thấy sự kết hợp giữa phương vị và góc nghiêng tạo ra sự khác biệt rõ rệt về sản lượng điện, đặc biệt khi độ nghiêng của tấm pin tăng. Các vị trí lắp đặt có phương vị gần hướng Nam cho sản lượng cao hơn so với các phương vị lệch nhiều về phía Bắc, góc nghiêng tối ưu đối với hướng Nam dao động 12° - 13°, trong khi các phương vị Đông, Tây và phía Bắc phù hợp với góc nghiêng nhỏ. Giữa các khu vực nghiên cứu, mức sản lượng tuyệt đối có sự chênh lệch nhưng quy luật đáp ứng theo phương vị và độ nghiêng tương đối ổn định. Ngoài ra, kết quả nghiên cứu được cập nhật theo các đơn vị hành chính mới thuộc phạm vi Hà Nam cũ, qua đó cung cấp cơ sở khoa học cho lựa chọn hướng bố trí và góc nghiêng trong thiết kế hệ thống điện mặt trời áp mái trên công trình tại địa phương.

KEYWORDS

Photovoltaic panels
Rooftop solar photovoltaic
Rooftop orientation
Optimal tilt angle
Electricity yield
Ha Nam Province

ABSTRACT

Rooftop solar photovoltaic (PV) systems can utilize the existing roof areas of buildings to provide additional on-site electricity supply. However, their power generation performance is significantly influenced by solar radiation conditions and the geometry of the installation surface. This study evaluates the effects of panel orientation and tilt angle on electricity yield in different areas of Ha Nam Province using a simulation-based approach. Multiple orientation scenarios combined with different tilt angles were established, with the annual average electricity yield used as the evaluation criterion to identify the configuration providing the highest generation performance. The results show that the combination of orientation and tilt angle produces clear differences in electricity yield, particularly as the panel tilt angle increases. Installation orientations closer to the south generally produce higher electricity yields than those deviating substantially toward the north. For south-facing panels, the optimal tilt angle ranges from 12° to 13°, whereas east-, west-, and north-facing orientations are more suitable for smaller tilt angles. Across the study areas, differences are observed in the absolute electricity yield, while the response patterns to orientation and tilt angle remain relatively consistent. In addition, the research results were updated according to the new administrative units within the former Ha Nam area, thereby providing a scientific basis for selecting panel orientation and tilt angle in the design of rooftop solar PV systems for buildings in the locality.

1. Đặt vấn đề

Trong quá trình chuyển dịch sang các nguồn năng lượng ít phát thải, điện mặt trời quang điện (PV) ngày càng được quan tâm như một giải pháp bổ sung nguồn điện phân tán và khai thác hiệu quả bức xạ mặt trời tại chỗ [1, 2]. Khác với các hệ thống điện mặt trời quy mô lớn, điện mặt trời mái nhà (ĐMTMN) có khả năng tận dụng trực tiếp diện tích mái của các công trình dân dụng, công cộng, thương mại và công nghiệp, … mà không cần hình thành thêm quỹ đất cho mục đích phát điện [2, 3]. Việc tích hợp hệ thống pin quang điện vào công trình vì vậy vừa tạo ra nguồn điện tại chỗ, vừa tận dụng không gian xây dựng hiện hữu. Đối với những khu vực có tốc độ đô thị hóa và phát triển công nghiệp cao, ĐMTMN còn có ý nghĩa trong việc phân bố nguồn phát gần phụ tải, đặc biệt tại các công trình có nhu cầu sử dụng điện đáng kể vào

*Liên hệ tác giả: tytc@huce.edu.vn
Nhận ngày 11/09/2026, sửa xong ngày 28/09/2026, chấp nhận đăng ngày 29/09/2026
Link DOI: https://doi.org/10.54772/jomc.05.2026.1496

ban ngày. Tuy nhiên, hiệu quả khai thác của hệ thống không chỉ phụ thuộc vào điều kiện bức xạ của khu vực mà còn chịu ảnh hưởng trực tiếp của cấu hình lắp đặt trên mái công trình.

Trong hệ thống pin quang điện lắp đặt cố định, hướng bố trí và góc nghiêng là hai thông số hình học có quan hệ trực tiếp với khả năng tiếp nhận bức xạ trên mặt phẳng mô-đun [4-6]. Khi phương vị của tấm pin thay đổi, góc giữa bề mặt thu và hướng tới của bức xạ mặt trời cũng thay đổi theo thời gian, làm biến đổi lượng bức xạ hữu ích mà mô-đun nhận được. Tương tự, thay đổi góc nghiêng làm thay đổi hình học chiếu xạ trên bề mặt pin và do đó ảnh hưởng đến sản lượng điện trong năm [5, 6]. Về nguyên lý, một cấu hình hình học phù hợp có thể làm tăng tổng bức xạ thu nhận và nâng cao sản lượng điện. Ngược lại, cấu hình không phù hợp có thể làm giảm hiệu quả khai thác mặc dù các điều kiện về công nghệ mô-đun và bức xạ khu vực không thay đổi. Do đó, hướng và góc nghiêng cần được xem xét như các biến thiết kế quan trọng khi đánh giá hiệu quả của ĐMTMN trên công trình.

Vấn đề này trở nên phức tạp hơn đối với hệ thống lắp đặt trên mái công trình hiện hữu [7]. Trong các bài toán lý tưởng, hướng của tấm pin có thể được lựa chọn độc lập để đạt điều kiện thu bức xạ thuận lợi. Trong thực tế xây dựng, tấm pin thường phải thích ứng với hình dạng, độ dốc và phương vị của mái; khả năng xoay hoặc thay đổi đáng kể hướng bố trí có thể bị hạn chế bởi kết cấu mái, diện tích sử dụng, khoảng cách giữa các dãy pin, yêu cầu bảo trì và các yếu tố kiến trúc của công trình [8]. Vì vậy, cùng một địa điểm nhưng các công trình có hướng mái khác nhau có thể tạo ra những điều kiện khai thác bức xạ khác nhau. Đặc biệt, việc áp dụng một giá trị góc nghiêng chung cho tất cả các hướng mái có thể không phản ánh đầy đủ đặc tính làm việc của hệ thống. Bài toán phù hợp hơn đối với ĐMTMN là xác định mối quan hệ giữa phương vị mái – góc nghiêng – sản lượng điện, từ đó lựa chọn cấu hình phù hợp với từng điều kiện mái cụ thể.

Đối với tỉnh Hà Nam trước khi sắp xếp đơn vị hành chính 06/2025 (cũ), phạm vi nghiên cứu có diện tích tự nhiên khoảng 861,93 km^2, bao gồm: thành phố Phủ Lý và các huyện/ thị xã như Duy Tiên, Kim Bảng, Thanh Liêm, Bình Lục và Lý Nhân [9]; địa hình chủ yếu tương đối bằng phẳng và nằm trong vùng khí hậu nhiệt đới gió mùa miền Bắc Việt Nam. Tài nguyên bức xạ giữa các khu vực có sự khác biệt nhưng không quá lớn [10, 11], tạo điều kiện thuận lợi để tách biệt tương đối ảnh hưởng của điều kiện bức xạ nền với ảnh hưởng của cấu hình hình học lắp đặt. Đồng thời, hệ thống công trình trên địa bàn có sự đa dạng về loại hình và đặc điểm mái, từ nhà ở, công trình công cộng đến các công trình công nghiệp và dịch vụ. Sự đa dạng này dẫn đến nhiều trường hợp phương vị mái khác nhau trong thực tế, đặt ra nhu cầu xác định cấu hình lắp đặt không chỉ theo vị trí địa lý mà còn theo đặc điểm cụ thể của mái công trình.

Trong những nghiên cứu và ứng dụng ĐMTMN, góc nghiêng thường được xem xét nhằm tìm ra vị trí hình học cho phép hệ thống thu nhận lượng bức xạ lớn nhất trong một khoảng thời gian xác định [5, 12]. Tuy nhiên, đối với mái công trình, góc nghiêng không phải là một biến độc lập hoàn toàn mà có quan hệ chặt chẽ với phương vị của bề mặt lắp đặt. Một góc nghiêng có thể tạo ra hiệu quả khác nhau khi tấm pin được bố trí theo các hướng Đông, Đông Nam, Nam, Tây Nam, Tây, Tây Bắc, Bắc và Đông Bắc. Do đó, nếu chỉ xác định một góc nghiêng đại diện cho toàn bộ khu vực mà không xét đến hướng mái, kết quả có thể chưa đáp ứng yêu cầu lựa chọn cấu hình cho các công trình có điều kiện mái khác nhau, khoảng trống cần tiếp tục làm rõ là mức độ biến đổi của sản lượng theo từng tổ hợp hướng - góc nghiêng. Đây là cơ sở để chuyển từ cách tiếp cận xác định một giá trị góc nghiêng chung sang cách tiếp cận lựa chọn góc nghiêng theo từng hướng mái.

Từ yêu cầu thực tiễn đó, nghiên cứu này tập trung đánh giá ảnh hưởng của hướng bố trí và góc nghiêng tấm pin quang điện đến sản lượng điện trên mái công trình tại các khu vực thuộc tỉnh Hà Nam cũ. Sáu khu vực gồm thành phố Phủ Lý và các huyện/ thị xã Duy Tiên, Kim Bảng, Lý Nhân, Bình Lục và Thanh Liêm được lựa chọn làm các đơn vị không gian nghiên cứu. Các kịch bản được thiết lập cho tám hướng bố trí gồm: Đông, Đông Nam, Nam, Tây Nam, Tây, Tây Bắc, Bắc và Đông Bắc, kết hợp với các giá trị góc nghiêng trong phạm vi tính toán. Sản lượng điện trung bình năm được sử dụng làm chỉ tiêu đánh giá để xác định sự biến thiên của khả năng phát điện dưới các tổ hợp hình học khác nhau. Trên cơ sở đó, nghiên cứu không chỉ mô tả sự thay đổi sản lượng theo từng thông số riêng lẻ mà còn phân tích quan hệ tương tác giữa hướng và góc nghiêng, làm cơ sở xác định góc nghiêng tối ưu tương ứng với từng hướng mái.

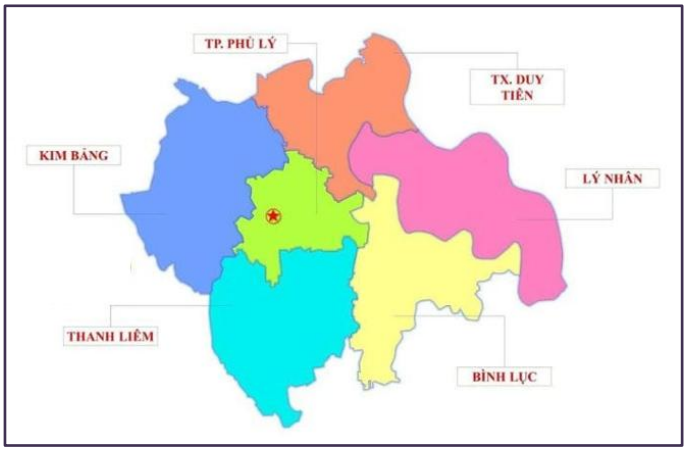
Ngoài ra, bài báo xem xét cập nhật kết quả nghiên cứu từ hệ thống đơn vị hành chính của tỉnh Hà Nam (cũ) sang các đơn vị hành chính mới thuộc tỉnh Ninh Bình [13, 14]. Việc cập nhật này có ý nghĩa đối với khả năng sử dụng kết quả trong điều kiện quản lý và quy hoạch hiện hành, đồng thời cho phép đánh giá mức độ ổn định của các kết quả nghiên cứu khi chuyển từ quy mô huyện/ thành phố sang quy mô xã, phường mới. Theo hướng tiếp cận này, nghiên cứu vừa bảo đảm tính nhất quán của chuỗi số liệu và mô hình tính toán ban đầu, vừa tăng độ phân giải không gian của kết quả phục vụ ứng dụng. Đây là cơ sở để kết quả nghiên cứu không chỉ được sử dụng nhằm nhận diện quy luật ảnh hưởng của hướng và góc nghiêng mà còn có thể phát triển thành dữ liệu tham khảo cho các bài toán đánh giá tiềm năng, lựa chọn cấu hình và thiết kế ĐMTMN tại từng khu vực cụ thể.

Mục tiêu của nghiên cứu là: (*i*) xác định và lượng hóa sự biến đổi của sản lượng điện khi thay đổi hướng bố trí và góc nghiêng tấm pin tại các khu vực nghiên cứu; (*ii*) xác định góc nghiêng tối ưu tương ứng với các hướng mái trên cơ sở sản lượng điện trung bình năm; và (*iii*) mở rộng kết quả theo các đơn vị hành chính mới thuộc địa bàn Hà Nam cũ để tăng khả năng ứng dụng trong thực tế. Kết quả nghiên cứu được kỳ vọng cung cấp cơ sở khoa học và thực tiễn cho việc lựa chọn cấu hình lắp đặt ĐMTMN trên các công trình có hướng mái khác nhau, đồng thời tạo dữ liệu tham khảo cho các nghiên cứu tiếp theo về tối ưu hóa hệ thống và đánh giá tiềm năng điện mặt trời theo không gian.

2. Khu vực và phương pháp nghiên cứu

2.1. Khu vực nghiên cứu

Khu vực nghiên cứu là phạm vi tỉnh Hà Nam (xem Hình 1), thuộc vùng đồng bằng sông Hồng, có địa hình chủ yếu tương đối bằng phẳng và nằm trong vùng khí hậu nhiệt đới gió mùa miền Bắc Việt Nam. Phạm vi nghiên cứu có diện tích tự nhiên 861,93 km^2, gồm thành phố Phủ Lý và các huyện/ thị xã Duy Tiên, Kim Bảng, Thanh Liêm, Bình Lục và Lý Nhân [9]. Đặc điểm địa hình và khí hậu của khu vực tương đối thuận lợi cho phát triển điện mặt trời trên mái công trình. Đặc biệt, sự phân bố tương đối đồng đều của tài nguyên bức xạ theo không gian cho phép tập trung đánh giá ảnh hưởng của hướng bố trí và góc nghiêng trong điều kiện các yếu tố khí hậu khu vực không biến động lớn.



Hình 1. Bản đồ tỉnh Hà Nam trước khi sắp xếp đơn vị hành chính 06/2025.

Các công trình xây dựng tại tỉnh Hà Nam có tính đa dạng về loại hình và đặc điểm hình học mái (xem Bảng 1), gắn với quá trình đô thị hóa và phát triển công nghiệp của tỉnh. Nhóm công trình dân dụng gồm: nhà ở đô thị, nhà ở nông thôn, biệt thự và chung cư, trong đó nhà ở chiếm tỷ lệ lớn về số lượng và diện tích. Mái nhà phố có thể là mái bằng hoặc mái tôn, nhà ở nông thôn thường sử dụng mái ngói với diện tích nhỏ đến trung bình, trong khi biệt thự có cả mái bằng và mái dốc lớn. Đặc điểm này tạo ra sự khác biệt về diện tích khai thác, độ dốc và hướng mái, từ đó ảnh hưởng trực tiếp đến khả năng lựa chọn vị trí và góc nghiêng lắp đặt pin quang điện.

Đối với nhóm công trình công nghiệp, mái nhà xưởng và kho hàng có quy mô lớn, thường sử dụng kết cấu mái tôn với diện tích tương đối rộng và ít bị che bóng, nên có tiềm năng cao để lắp đặt hệ thống điện mặt trời mái nhà. Bên cạnh đó, trường học, trụ sở hành chính, bệnh viện, trạm y tế, chợ và siêu thị cũng có diện tích mái có thể khai thác ở các mức độ khác nhau. Ngược lại, các công trình đình, chùa, nhà thờ thường có mái ngói lâu năm, khả năng cải tạo và gia cường kết cấu hạn chế nên tiềm năng lắp đặt thấp hơn; nhà văn hóa thôn, xã có mái tôn và thời gian sử dụng ban ngày nên có tiềm năng từ trung bình đến cao.

Mặt khác, theo kết quả đánh giá tài nguyên mặt trời được sử dụng trong nghiên cứu [10], giá trị bức xạ mặt trời trung bình năm (GHI) các khu vực dao động từ 1.349,6 đến 1.366,6 kWh/m^2/năm, trong khi sản lượng điện tiềm năng từ pin mặt trời trung bình năm (PVOUT) dao động từ 1.204,9 đến 1.215,8 kWh/kWp/năm. Giá trị trung bình toàn khu vực của GHI và PVOUT lần lượt đạt 1.359,4 kWh/m^2/năm và 1.209,4 kWh/kWp/năm, với nhiệt độ trung bình năm khoảng 23,8 °C. Do mức chênh lệch GHI và PVOUT giữa các khu vực tương đối nhỏ, sự khác biệt về điều kiện bức xạ giữa các khu vực được xem là không lớn, việc so sánh các kịch bản được thực hiện trên cùng một cơ sở phương pháp và bộ thông số mô phỏng, nhằm tập trung làm rõ ảnh hưởng của hướng bố trí và góc nghiêng đến sản lượng điện mặt trời.

Bảng 1. Đặc điểm mái [15] và tiềm năng lắp đặt điện mặt trời tại các nhóm công trình ở Hà Nam.

Nhóm công trình	Đặc điểm mái	Diện tích mái	Khả năng che bóng	Tiềm năng lắp đặt
Nhà ở đô thị	Mái bằng, mái tôn	Nhỏ, trung bình	Có thể cao	Cao
Nhà ở nông thôn	Mái ngói	Nhỏ, trung bình	Trung bình	Trung bình
Biệt thự	Mái bằng hoặc mái dốc	Trung bình, lớn	Thấp, trung bình	Cao
Chung cư	Mái tương đối lớn	Lớn	Thấp, trung bình	Cần khảo sát
Nhà xưởng KCN	Chủ yếu mái tôn	Lớn	Thấp	Rất cao
Kho hàng, logistics	Mái rộng	Lớn	Thấp	Cao
Xưởng nhỏ/ cụm CN	Mái tôn	Nhỏ, trung bình	Thấp, trung bình	Trung bình, cao
Trường học, công trình công cộng	Mái bằng/mái tôn	Trung bình, lớn	Thấp, trung bình	Cao
Chợ, siêu thị	Mái đa dạng	Trung bình, lớn	Cần khảo sát	Trung bình
Đình, chùa, nhà thờ	Mái ngói cổ	Nhỏ, trung bình	Cần khảo sát	Thấp
Nhà văn hóa	Mái tôn	Trung bình	Thấp	Trung bình, cao

(*KCN – Khu công nghiệp; CN – Công nghiệp)*

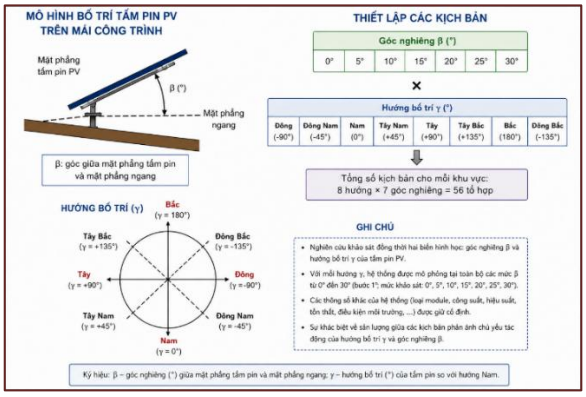
2.2. Thiết lập các kịch bản nghiên cứu về hướng bố trí và góc nghiêng tấm pin

Nghiên cứu khảo sát đồng thời hai biến hình học của hệ thống PV là góc nghiêng β (độ) và hướng bố trí g của tấm pin, minh họa trên Hình 2. Góc nghiêng được xác định là góc giữa mặt phẳng tấm pin và mặt phẳng ngang. Căn cứ vào vị trí địa lý của tỉnh Hà Nam và phạm vi góc nghiêng có khả năng áp dụng cho hệ thống ĐMTMN, các kịch bản nghiên cứu được giới hạn từ 0 ° đến 30 °, với bước tính toán $\Delta\beta = 1$ ° và lập đồ thị điển hình với với các mức góc nghiêng khảo sát 0 °, 5 °, 10 °, 15 °, 20 °, 25 ° và 30 ° [16].

Hướng bố trí được khảo sát theo tám hướng gồm: Đông (g = -90 °), Đông Nam, Nam (g = 0 °), Tây Nam, Tây (g = +90 °), Tây Bắc, Bắc (g = 180 °) và Đông Bắc. Với mỗi hướng, hệ thống được mô phỏng tại toàn bộ các mức góc nghiêng nêu trên, tạo thành 240 tổ hợp hướng và góc nghiêng cho mỗi khu vực nghiên cứu. Các thông số khác của hệ thống được giữ cố định nhằm bảo đảm sự khác biệt về sản lượng giữa các kịch bản chủ yếu phản ánh tác động của hai biến hình học. Cách thiết lập này cho phép xây dựng mối quan hệ tổng quát:

$$E = f(\beta, \gamma) \quad (1)$$

trong đó: *E là sản lượng điện riêng trung bình năm, β là góc nghiêng và γ là hướng bố trí.*



Hình 2. Minh họa thiết lập hướng và góc nghiêng của tấm PV trên mái công trình.

Mặt khác, hệ thống mô phỏng là hệ thống điện mặt trời mái nhà nối lưới, gồm 17 mô-đun công suất 625 Wp, tổng công suất DC 10,625 kWp và 03 inverter một pha công suất 3 kW, tổng công suất AC 9 kW. Các tổn thất hệ thống được giữ cố định giữa các kịch bản; hệ thống đồng thời được giả thiết không chịu ảnh hưởng của che bóng từ công trình lân cận, cây xanh hoặc thiết bị trên mái. Các giả thiết này nhằm loại bỏ ảnh hưởng của quy mô thiết bị, tổn thất và che bóng, qua đó tập trung đánh giá tác động của hướng và góc nghiêng.

2.3. Phương pháp mô phỏng và đánh giá sản lượng điện mặt trời

Sản lượng điện của hệ thống được xác định bằng phần mềm PV*SOL được phát triển bởi công ty Valentin EnergieSoftware GmbH, sử dụng dữ liệu khí tượng dài hạn được tích hợp từ cơ sở dữ liệu Meteonorm. Mô hình xem xét các thành phần bức xạ trực tiếp, khuếch tán và phản xạ trên mặt phẳng tấm pin, đồng thời xét ảnh hưởng của nhiệt độ đến quá trình chuyển đổi quang điện. Khi thay đổi hướng hoặc góc nghiêng, lượng bức xạ tới mặt phẳng pin thay đổi, dẫn đến thay đổi công suất và sản lượng điện đầu ra. Nghiên cứu lựa chọn PV*SOL do phần mềm cho phép mô phỏng theo chuỗi thời gian, thay đổi độc lập các thông số hình học của hệ thống và được sử dụng rộng rãi trong các nghiên cứu và ứng dụng thực tiễn.

Đối với mỗi tổ hợp (β, γ), hệ thống được mô phỏng với cùng cấu hình thiết bị và điều kiện khí tượng tương ứng. Kết quả được biểu diễn bằng sản lượng điện riêng trung bình năm, đơn vị *kWh/kWp/năm*, làm cơ sở so sánh giữa các phương án. Việc sử dụng sản lượng điện riêng cho phép giảm ảnh hưởng của quy mô công suất khi đánh giá hiệu quả của các cấu hình hướng và góc nghiêng khác nhau. Với mỗi hướng γ, kết quả mô phỏng được biểu diễn dưới dạng quan hệ:

$$E_\gamma = f(\beta) \quad (2)$$

Từ đó xác định xu hướng biến đổi sản lượng theo góc nghiêng và so sánh mức độ ảnh hưởng giữa các hướng. Do dữ liệu khí tượng Meteonorm đại diện cho điều kiện khí hậu dài hạn, kết quả mô phỏng được hiểu là sản lượng điện trung bình năm theo điều kiện khí tượng đại diện, không phải sản lượng thực tế của một năm cụ thể. Ngoài ra, cũng cần lưu ý rằng dữ liệu khí tượng mô phỏng có thể tồn tại sai khác so với điều kiện vận hành thực tế. Vì vậy, kết quả cần được hiểu trong phạm vi các giả thiết của mô hình.

2.4. Phương pháp xác định góc nghiêng tối ưu

Với mỗi hướng bố trí xác định, góc nghiêng tối ưu (β_{opt}) được xác định là giá trị góc trong phạm vi khảo sát làm cho sản lượng điện riêng trung bình năm đạt cực đại. Về mặt toán học, góc nghiêng tối ưu được xác định theo:

$$\beta_{opt}(\gamma) = arg \ \ max\, E\,(\beta, \gamma); \beta \in [0, 30^0] \quad (3)$$

trong đó: β_{opt} là góc nghiêng tối ưu; β là góc nghiêng khảo sát; γ là hướng bố trí mái công trình; E(β, γ) là sản lượng điện riêng trung bình năm tương ứng.

Trên cơ sở kết quả tính toán mô phỏng, đối với từng hướng bố trí, giá trị sản lượng lớn nhất trong các mức góc nghiêng khảo sát được lựa chọn làm sản lượng tối ưu của hướng đó. Sau đó, các kết quả được đối chiếu giữa tám hướng để xác định cấu hình có sản lượng cao nhất tại từng khu vực. Cách tiếp cận này cho phép xác định không chỉ góc nghiêng tối ưu mà còn lượng hóa sự khác biệt về sản lượng giữa các hướng, làm cơ sở cho việc đánh giá đồng thời ảnh hưởng của hai yếu tố trong các phần kết quả và thảo luận.

3. Kết quả nghiên cứu

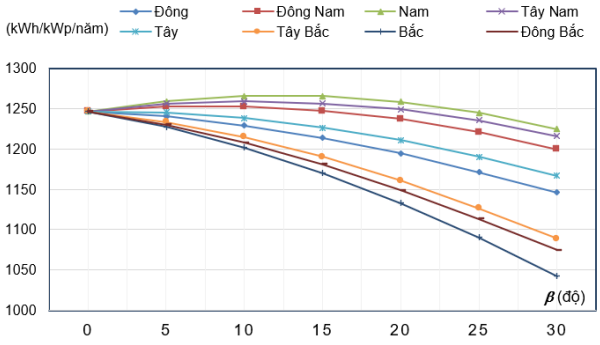
3.1. Ảnh hưởng của hướng và góc nghiêng đến sản lượng điện của tấm pin quang điện

Kết quả tính toán tại sáu khu vực nghiên cứu cho thấy sản lượng điện phụ thuộc đồng thời vào hướng bố trí và góc nghiêng của tấm pin,

với mức độ biến thiên khác nhau giữa các tổ hợp phương vị - góc nghiêng. Trên các Hình 3 đến 8, các đường biểu diễn có cùng giá trị tại góc 0° trong từng khu vực, sau đó phân hóa rõ khi góc nghiêng tăng. Điều này phản ánh vai trò của hình học bề mặt thu bức xạ: khi tấm pin được đặt nghiêng, hiệu quả tiếp nhận bức xạ thay đổi theo phương vị và góc tới của bức xạ mặt trời. Đáng chú ý, quy luật biến thiên này xuất hiện tương đối đồng nhất ở cả sáu khu vực, mặc dù mức sản lượng tuyệt đối có sự khác biệt.

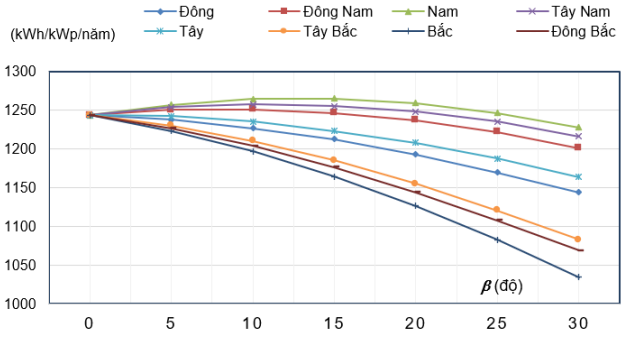
Xét trên toàn bộ phạm vi nghiên cứu, có thể nhận diện ba nhóm đáp ứng theo hướng mái. Nhóm Nam, Đông Nam và Tây Nam duy trì mức sản lượng tương đối cao khi thay đổi góc nghiêng và thường hình thành đường cong có đoạn tăng rồi giảm. Nhóm Đông và Tây có mức biến thiên nhỏ hơn ở vùng góc thấp nhưng suy giảm rõ hơn khi góc nghiêng tăng. Trong khi đó, nhóm Bắc, Đông Bắc và Tây Bắc thể hiện độ dốc giảm lớn nhất, đặc biệt từ khoảng 10 ° trở lên. Chẳng hạn tại thị xã Duy Tiên, sản lượng hướng Bắc giảm từ 1.243,3 kWh/kWp/năm ở 0 ° xuống 1.034,4 kWh/kWp/năm ở 30 °, tương ứng giảm khoảng 16,8 %; hướng Tây Bắc giảm khoảng 12,9 % trong cùng khoảng góc. Xu thế tương tự được quan sát tại huyện/ thị xã Kim Bảng, Thanh Liêm, Bình Lục và Lý Nhân.

Tại TP. Phủ Lý, Hình 3 cho thấy sự phân hóa giữa các hướng bắt đầu rõ từ góc nghiêng 5 °. Ở hướng Nam, sản lượng tăng từ 1.246,3 kWh/kWp/năm tại 0 ° lên 1.259,1 kWh/kWp/năm tại 5 ° và 1.265,4 kWh/kWp/năm tại 10 °, trong khi hướng Đông giảm còn 1.228,8 kWh/kWp/năm và hướng Bắc còn 1.201,7 kWh/kWp/năm tại cùng góc 10 °. Khi góc tăng lên 30 °, sản lượng của hướng Nam còn 1.224,8 kWh/kWp/năm, nhưng hướng Bắc giảm xuống 1.042,7 kWh/kWp/năm. Như vậy, tại Phủ Lý, sự thay đổi góc nghiêng không làm các hướng biến đổi đồng nhất mà tạo ra mức phân hóa ngày càng lớn giữa các đường đặc trưng.



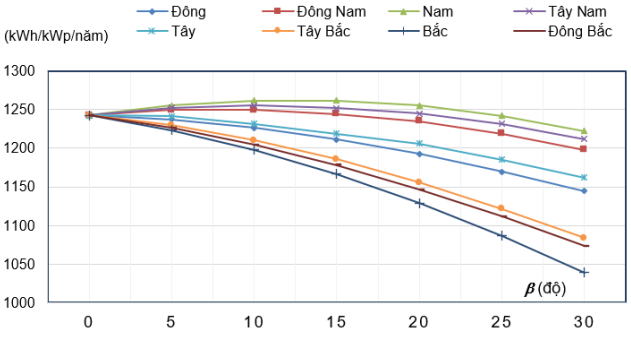
Hình 3. Biểu đồ điện năng trung bình năm theo góc nghiêng, các hướng tại TP. Phủ Lý, Hà Nam.

Đối với thị xã Duy Tiên, quy luật thể hiện tương tự Phủ Lý nhưng mức suy giảm ở các hướng bất lợi khá rõ. Tại góc 0 °, tám hướng đều có sản lượng khoảng 1.243,3 kWh/kWp/năm; đến 15 °, sản lượng hướng Nam vẫn đạt 1.264,9 kWh/kWp/năm, trong khi hướng Bắc giảm còn 1.164,4 kWh/kWp/năm và Tây Bắc còn 1.185,0 kWh/kWp/năm. Đến 30 °, mức chênh lệnh giữa hướng Nam và hướng Bắc đạt khoảng 193,1 kWh/kWp/năm (tương đương gần 15,7 %). Kết quả này cho thấy ảnh hưởng của góc nghiêng được khuếch đại khi phương vị tấm pin không còn phù hợp với quỹ đạo biểu kiến của mặt trời.



Hình 4. Biểu đồ điện năng trung bình năm theo góc nghiêng, các hướng tại TX. Duy Tiên, Hà Nam.

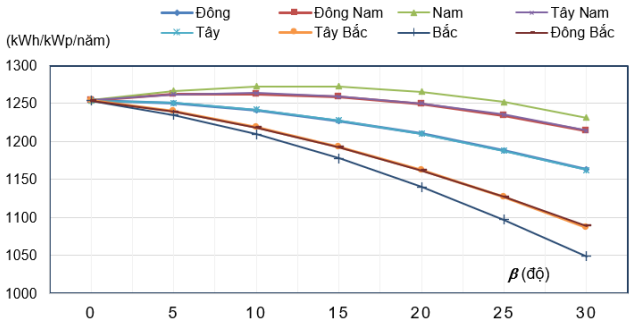
Tại thị xã Kim Bảng, các đường trên Hình 5 tiếp tục thể hiện quy luật tương tự, đồng thời cho thấy mức sản lượng nền thấp hơn một số khu vực phía Nam của tỉnh. Ở góc 0 °, sản lượng của các hướng đều đạt khoảng 1.242,5 kWh/kWp/năm; khi góc tăng lên 30 °, giá trị giảm xuống 1.144,4 kWh/kWp/năm ở hướng Đông và chỉ còn 1.039,0 kWh/kWp/năm ở hướng Bắc. Như vậy, mức giảm tương ứng khoảng 7,9 % đối với hướng Đông và 16,4 % đối với hướng Bắc. Đáng chú ý, hướng Đông Nam và Tây Nam vẫn duy trì sản lượng cao hơn các hướng Đông và Tây khi góc nghiêng nằm trong vùng góc trung bình, cho thấy ảnh hưởng của phương vị được thể hiện rõ ngay cả khi điều kiện bức xạ nền của khu vực không thay đổi.



Hình 5. Biểu đồ điện năng trung bình năm theo góc nghiêng, các hướng tại TX. Kim Bảng, Hà Nam.

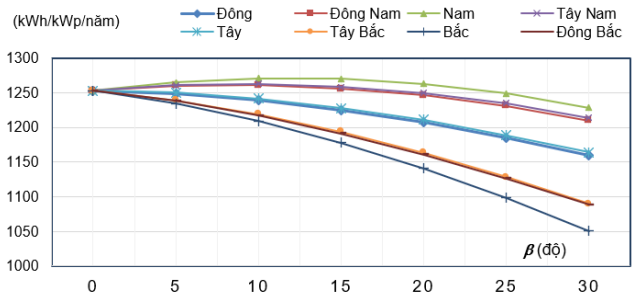
Huyện Thanh Liêm cho mức sản lượng cao hơn tương đối rõ so với các khu vực còn lại, phù hợp với chỉ số GHI và PVOUT nền cao hơn của khu vực. Tuy nhiên, Hình 6 cho thấy sự khác biệt về quy luật giữa các hướng vẫn tương tự các khu vực khác. Ở góc 0 °, sản lượng đạt 1.254,1 kWh/kWp/năm cho tất cả các hướng; tại 30 °, giá trị còn 1.163,4 kWh/kWp/năm ở hướng Đông, 1.162,4 kWh/kWp/năm ở hướng Tây và chỉ 1.048,8 kWh/kWp/năm ở hướng Bắc. Như vậy, mặc dù Thanh Liêm có nền sản lượng cao, lợi thế này không loại bỏ tác động

của hướng và góc nghiêng. Khi cấu hình hình học bất lợi, sản lượng vẫn suy giảm đáng kể.



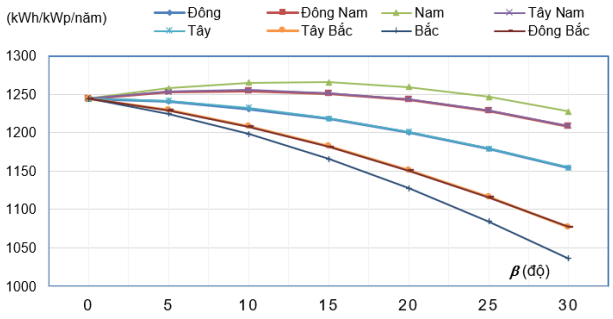
Hình 6. Biểu đồ điện năng trung bình năm theo góc nghiêng, các hướng tại H. Thanh Liêm, Hà Nam.

Xem xét tại huyện Bình Lục, Hình 7 cho thấy mức độ biến thiên rất gần với Thanh Liêm. Sản lượng tại góc 0 ° là 1.252,7 kWh/kWp/năm cho các hướng; khi tăng góc lên 30 °, hướng Đông còn 1.159,8 kWh/kWp/năm, trong khi hướng Bắc chỉ còn 1.050,9 kWh/kWp/năm. Đối với hướng Nam, sản lượng vẫn duy trì ở mức 1.228,0 kWh/kWp/năm tại 30 °. Chênh lệch giữa hướng Nam và Bắc ở góc này khoảng 177,1 kWh/kWp/năm, cho thấy sự thay đổi góc nghiêng có thể làm gia tăng đáng kể khoảng cách sản lượng giữa các phương vị. So với Thanh Liêm, các giá trị tại Bình Lục thấp hơn nhẹ, nhưng hình thái biến thiên giữa các đường gần như tương đồng.



Hình 7. Biểu đồ điện năng trung bình năm theo góc nghiêng, các hướng tại H. Bình Lục, Hà Nam.

Tại huyện Lý Nhân, Hình 8 tiếp tục xác nhận tính nhất quán của quy luật trên phạm vi tỉnh. Sản lượng tại góc 0 ° đạt 1.244,4 kWh/kWp/năm cho cả tám hướng; đến 30 °, hướng Nam đạt 1.227,4 kWh/kWp/năm, trong khi hướng Bắc giảm xuống 1.036,2 kWh/kWp/năm và Tây Bắc còn 1.076,9 kWh/kWp/năm. Như vậy, mức chênh lệch giữa hướng Nam và Bắc tại 30 ° đạt 191,2 kWh/kWp/năm, tương đương khoảng 15,6 % sản lượng hướng Nam. So với Duy Tiên, mức suy giảm ở Lý Nhân có cùng đặc trưng nhưng biên độ tuyệt đối thấp hơn, phù hợp với sự khác biệt nhỏ về điều kiện bức xạ nền giữa hai khu vực.



Hình 8. Biểu đồ điện năng trung bình năm theo góc nghiêng, các hướng tại H. Lý Nhân, Hà Nam.

So sánh sáu khu vực nghiên cứu cho thấy, hình thái đáp ứng của sản lượng điện theo hướng và góc nghiêng duy trì xu thế tương đồng giữa các khu vực, trong khi giá trị tuyệt đối thay đổi theo điều kiện tài nguyên bức xạ. Huyện Thanh Liêm và Bình Lục tạo ra mức sản lượng nền cao hơn; Kim Bảng và Duy Tiên có mức thấp hơn, còn Phủ Lý và Lý Nhân nằm trong khoảng trung gian. Tuy nhiên, sự khác biệt giữa các khu vực không làm thay đổi quy luật cơ bản thể hiện qua các đường cong trên Hình 3 đến Hình 8. Đây là cơ sở để bài báo xây dựng cách tiếp cận thống nhất trong đánh giá ảnh hưởng của hướng và góc nghiêng, đồng thời vẫn phản ánh được sự khác biệt về điều kiện tài nguyên bức xạ giữa các khu vực.

Kết quả nghiên cứu không chỉ cho thấy sản lượng thay đổi theo hướng và góc nghiêng, mà còn chỉ ra một xu thế đáp ứng nhất quán giữa các khu vực: khi góc nghiêng tăng, sự phân hóa sản lượng giữa các phương vị ngày càng rõ; đồng thời, sự khác biệt về điều kiện bức xạ giữa sáu khu vực chủ yếu làm thay đổi mức sản lượng, nhưng không làm thay đổi đáng kể hình thái đáp ứng theo hướng và góc nghiêng.

3.2. Xác định góc nghiêng tối ưu trong phạm vi khảo sát theo các hướng mái

Kết quả tổng hợp tại sáu khu vực nghiên cứu cho thấy góc nghiêng tối ưu phụ thuộc rõ rệt vào hướng mái, trong khi mức biến động giữa các khu vực có cùng hướng tương đối nhỏ. Theo thống kê tại Bảng 2, các hướng Đông, Tây Bắc, Bắc và Đông Bắc đều có góc nghiêng tối ưu bằng hoặc xấp xỉ 0 °, trong khi hướng Tây chỉ dao động 0 ° – 2 °. Đối với các hướng có xu thế thu nhận bức xạ thuận lợi hơn, góc tối ưu tăng lên: hướng Đông Nam đạt 7 ° – 9 °, Tây Nam 9 ° – 10 °, còn hướng Nam nằm trong khoảng 12 ° – 13 °. Kết quả cho thấy không tồn tại một giá trị góc nghiêng duy nhất có thể áp dụng cho mọi hướng mái, góc nghiêng cần được lựa chọn tương ứng với phương vị thực tế của bề mặt lắp đặt.

Xét riêng theo từng hướng, hướng Nam có mức độ ổn định cao nhất về góc nghiêng tối ưu, chỉ dao động 12 ° – 13 ° giữa sáu khu vực. Giá trị sản lượng tương ứng nằm trong khoảng 1.262,6 - 1.273,6 kWh/kWp/năm. Hướng Đông Nam có góc tối ưu 7 ° – 9 ° và sản lượng 1.250,0 - 1.263,3 kWh/kWp/năm; hướng Tây Nam đạt 9 ° – 10 ° với sản lượng 1.255,0 - 1.264,1 kWh/kWp/năm. Đáng chú ý, sự khác biệt giữa

góc tối ưu của Đông Nam và Tây Nam không lớn, nhưng sản lượng cực đại của từng hướng có sự sai khác nhất định, phản ánh ảnh hưởng của phân bố bức xạ trực tiếp và khuếch tán theo thời gian trong năm. Như vậy, phương vị quyết định vùng góc nghiêng phù hợp, còn điều kiện bức xạ địa phương điều chỉnh giá trị sản lượng đạt được trong vùng đó.

Sự khác biệt giữa sáu khu vực được thể hiện rõ hơn khi đối chiếu các giá trị sản lượng tại cùng một hướng. Với hướng Nam, Thanh Liêm đạt 1.273,6 kWh/kWp/năm, cao nhất trong sáu khu vực; Bình Lục đạt 1.271,3; Lý Nhân và Phủ Lý lần lượt đạt 1.266,1; Duy Tiên đạt 1.265,4 và Kim Bảng đạt 1.262,6 kWh/kWp/năm. Chênh lệch giữa Thanh Liêm và Kim Bảng khoảng 11,0 kWh/kWp/năm, tương đương chưa đến 0,9 % so với giá trị cao nhất. Trong khi đó, góc nghiêng tối ưu chỉ biến động 1 ° giữa các khu vực. Điều này cho thấy sự khác biệt không gian về tài nguyên bức xạ chủ yếu làm thay đổi mức sản lượng tuyệt đối, nhưng chưa tạo ra sự thay đổi đáng kể về cấu hình góc nghiêng tối ưu.

Bảng 2. Kết quả tính toán góc nghiêng tối ưu (b_{opt}) với các hướng công trình tại tỉnh Hà Nam.

Hướng	TP. Phủ Lý		TX. Duy Tiên		TX. Kim Bảng		H. Thanh Liêm		H. Bình Lục		H. Lý Nhân	
	b_{opt}	Điện năng	b_{opt}	Điện năng	b_{opt}	Điện năng	b_{opt}	Điện năng	b_{opt}	Điện năng	b_{opt}	Điện năng
Đông	0 °	1246,3	0 °	1243,3	0 °	1242,5	0 °	1254,1	0 °	1252,7	0 °	1244,4
Đông Nam	7 °	1253,2	8 °	1251,5	8 °	1250,0	8 °	1263,3	8 °	1261,0	9 °	1254,7
Nam	12 °	1266,1	13 °	1265,4	12 °	1262,6	12 °	1273,6	12 °	1271,3	13 °	1266,1
Tây Nam	10 °	1259,2	10 °	1257,3	10 °	1255,0	9 °	1264,1	9 °	1262,7	9 °	1255,6
Tây	2 °	1246,7	2 °	1243,7	2 °	1242,8	0 °	1254,1	1 °	1252,7	0 °	1244,4
Tây Bắc	0 °	1246,3	0 °	1243,3	0 °	1242,5	0 °	1254,1	0 °	1252,7	0 °	1244,4
Bắc	0 °	1246,3	0 °	1243,3	0 °	1242,5	0 °	1254,1	0 °	1252,7	0 °	1244,4
Đông Bắc	0 °	1246,3	0 °	1243,3	0 °	1242,5	0 °	1254,1	0 °	1252,7	0 °	1244,4

(b_{opt} là góc nghiên tối ưu; Điện năng, đơn vị kWh/kWp/năm)

Xét theo từng khu vực, TP. Phủ Lý có góc tối ưu lần lượt 0 °, 7 °, 12 °, 10 °, 2 ° đối với các hướng Đông, Đông Nam, Nam, Tây Nam, Tây và 0 ° ba hướng Tây Bắc - Bắc - Đông Bắc. Sản lượng cực đại theo các hướng tương ứng đạt từ 1.246,3 đến 1.266,1 kWh/kWp/năm. Duy Tiên có xu thế gần tương đồng, nhưng góc tối ưu của Đông Nam, Nam và các hướng phía Tây lần lượt dịch chuyển nhẹ lên 8 °, 13 ° và 10 °. Kim Bảng cũng duy trì cùng dạng phân bố, với góc Nam 12 °, Đông Nam 8 ° và Tây Nam 10 °. Những kết quả này cho thấy sự thay đổi giữa ba khu vực phía Bắc và trung tâm nghiên cứu chủ yếu nằm ở mức sản lượng, còn cấu trúc đáp ứng theo phương vị vẫn nhất quán.

Đối với Thanh Liêm, Bình Lục và Lý Nhân, kết quả tiếp tục xác nhận quy luật trên nhưng có sự khác biệt về mức sản lượng nền. Thanh Liêm và Bình Lục có sản lượng cao hơn tương đối, phù hợp với GHI và PVOUT cao hơn của hai khu vực này; góc tối ưu theo hướng Nam đều là 12 °. Lý Nhân có góc tối ưu hướng Nam là 13 °, tương tự Duy Tiên, trong khi hướng Đông Nam đạt 9 ° và Tây Nam 9 °. Đáng chú ý, tại các hướng Đông, Tây Bắc, Bắc và Đông Bắc, góc tối ưu vẫn bằng 0 ° hoặc rất gần 0 ° ở cả ba khu vực.

Một kết quả có ý nghĩa ứng dụng là góc nghiêng tối ưu giảm khi hướng mái lệch khỏi vùng phương vị Nam, từ khoảng 12 ° – 13 ° ở hướng Nam xuống 7 ° – 9 ° ở Đông Nam, 9 ° - 10 ° ở Tây Nam và về 0 ° - 2 ° ở các hướng Đông, Tây và các hướng phía Bắc. Đây không đơn thuần là sự thay đổi về giá trị hình học mà phản ánh sự thay đổi của điều kiện hình học thu nhận bức xạ trên mặt phẳng mô-đun. Do đó, đối với công trình có mái đã hình thành sẵn, việc thiết kế hệ thống PV cần bắt đầu từ xác định phương vị mái, sau đó lựa chọn góc nghiêng phù hợp thay vì áp dụng máy móc một góc cố định. Kết quả này trực tiếp bổ sung cho cách tiếp cận thường chỉ xem xét một hướng chuẩn trong các bài toán thiết kế hệ thống PV.

Sau khi thực hiện sắp xếp đơn vị hành chính năm 2025, toàn bộ tỉnh Hà Nam, Nam Định và Ninh Bình được hợp nhất thành tỉnh Ninh Bình mới; các đơn vị hành chính cấp xã mới chính thức hoạt động từ ngày 01/7/2025 [14]. Vì vậy, để bảo đảm khả năng sử dụng kết quả nghiên cứu trong điều kiện quản lý hiện nay, Bảng 3 đã chuyển kết quả tính toán từ sáu đơn vị nghiên cứu cấp huyện/thành phố trước đây sang các đơn vị hành chính cấp xã mới nằm trong phạm vi Hà Nam cũ. Kết quả cho thấy hướng Nam tiếp tục là hướng có sản lượng cao nhất trong toàn bộ các đơn vị mới, trong khi góc nghiêng chỉ nằm trong hai giá trị 12° và 13°. Đây là bằng chứng cho thấy kết luận về cấu hình hình học không phụ thuộc đáng kể vào ranh giới hành chính, mà chủ yếu được quyết định bởi điều kiện bức xạ và vị trí địa lý của khu vực.

Ở cấp xã/ phường mới, góc nghiêng 12 ° chiếm ưu thế tại phần lớn khu vực phía Nam và trung tâm của phạm vi Hà Nam cũ, trong khi giá trị 13 ° xuất hiện tại một số đơn vị thuộc khu vực Duy Tiên, Kim Thanh và Lý Nhân. Sản lượng trung bình năm dao động từ 1.261,20 đến 1.274,17 kWh/kWp/năm trong các đơn vị được tổng hợp ở Bảng 3. Giá trị lớn nhất đạt 1.274,17 kWh/kWp/năm tại xã Thanh Bình, tiếp theo là xã Thanh Liêm với 1.274,15 và xã Bình Mỹ với 1.273,61 kWh/kWp/năm; giá trị thấp nhất là 1.261,20 kWh/kWp/năm tại phường Đồng Văn. Biên độ toàn bộ khoảng 12,97 kWh/kWp/năm, chỉ tương đương khoảng 1,0% giá trị lớn nhất, cho thấy sự phân hóa không gian về sản lượng trong phạm vi Hà Nam cũ vẫn tương đối nhỏ.

Đáng chú ý, Bảng 3 cho thấy góc nghiêng tối ưu ở cấp xã/phường mới thể hiện tính nhất quán cao giữa các đơn vị khảo sát, khi toàn bộ

các đơn vị được khảo sát chỉ xuất hiện hai giá trị 12 ° và 13 °, và hướng bố trí tương ứng đều là Nam. So với Bảng 2, kết quả này không làm thay đổi quy luật đã xác định ở cấp huyện/thành phố cũ mà cung cấp độ phân giải không gian cao hơn cho ứng dụng thiết kế. Chẳng hạn, khu vực trước đây thuộc Thanh Liêm xuất hiện các giá trị 12 ° với sản lượng từ 1.269,62 đến 1.274,17 kWh/kWp/năm; khu vực Bình Lục cũng chủ yếu ở 12 °, với sản lượng đạt tới 1.273,21 kWh/kWp/năm tại xã Bình Sơn. Điều này cho thấy việc cập nhật theo địa giới mới không làm thay đổi bản chất kết quả tối ưu mà làm tăng khả năng áp dụng kết quả vào quản lý và thiết kế ở quy mô cơ sở.

Bảng 3. Tổng hợp kết quả tính toán b_{opt} theo đơn vị hành chính mới trong phạm vi tỉnh Hà Nam (cũ).

Đơn vị hành chính tỉnh Hà Nam sau sáp 7/2025 (tỉnh Ninh Bình)	Hướng tối ưu (γ)	Góc nghiêng tối ưu	Điện năng trung bình năm
		b_{opt}	kWh/kWp/năm
Phường Phủ Lý	Nam	12 °	1266,11
Phường Liêm Tuyền	Nam	12 °	1266,34
Phường Tiên Sơn	Nam	12 °	1266,70
Phường Duy Hà	Nam	13 °	1262,22
Phường Đồng Văn	Nam	13 °	1261,20
Phường Kim Thanh	Nam	13 °	1263,57
Phường Kim Bảng	Nam	12 °	1262,78
Phường Nguyễn Úy	Nam	12 °	1264,32
Phường Lê Hồ	Nam	12 °	1263,86
Phường Tam Chúc	Nam	12 °	1262,19
Phường Lý Thường Kiệt	Nam	12 °	1264,47
Phường Phù Vân	Nam	12 °	1266,11
Phường Hà Nam	Nam	13 °	1262,89
Phường Châu Sơn	Nam	12 °	1267,14
Phường Duy Tiên	Nam	13 °	1264,78
Phường Duy Tân	Nam	13 °	1263,16
Xã Lý Nhân	Nam	13 °	1266,09
Xã Nam Xang	Nam	13 °	1266,09
Xã Bắc Lý	Nam	13 °	1265,85
Xã Trần Thương	Nam	13 °	1267,01
Xã Vĩnh Trụ	Nam	13 °	1266,44
Xã Nhân Hà	Nam	13 °	1265,44
Xã Nam Lý	Nam	13 °	1271,15
Xã Bình Giang	Nam	12 °	1269,36
Xã Bình An	Nam	12 °	1271,13
Xã Bình Mỹ	Nam	12 °	1273,61
Xã Thanh Bình	Nam	12 °	1274,17
Xã Thanh Liêm	Nam	12 °	1274,15
Xã Thanh Lâm	Nam	12 °	1273,19
Xã Tân Thanh	Nam	12 °	1272,38
Xã Liêm Hà	Nam	12 °	1269,62
Xã Bình Lục	Nam	12 °	1267,73
Xã Bình Sơn	Nam	12 °	1273,21

Từ Bảng 2 và Bảng 3 có thể rút ra một đặc điểm quan trọng của nghiên cứu: góc nghiêng tối ưu có tính ổn định theo không gian nhưng biến đổi có quy luật theo hướng mái. Trong phạm vi Hà Nam cũ, sự thay đổi điều kiện bức xạ giữa các khu vực chỉ làm biến động nhỏ giá trị sản lượng, trong khi hướng mái tạo ra sự thay đổi có hệ thống về vùng góc nghiêng phù hợp. Kết quả vì vậy không chỉ cung cấp một tập

hợp các giá trị b_{opt}, mà còn hình thành cơ sở dữ liệu tra cứu theo hướng mái và đơn vị hành chính, có thể sử dụng trực tiếp trong giai đoạn lựa chọn cấu hình ban đầu cho hệ thống điện mặt trời áp mái. Đây là giá trị ứng dụng quan trọng của nghiên cứu trong bối cảnh các công trình có mái cố định, nơi hướng mái thường không thể thay đổi như đối với hệ thống điện mặt trời mặt đất.

4. Thảo luận

Kết quả nghiên cứu cho thấy mối quan hệ giữa hướng mái, góc nghiêng và sản lượng điện không thể được mô tả bằng một giá trị góc cố định cho mọi trường hợp. Trên toàn bộ sáu khu vực nghiên cứu, sự thay đổi góc nghiêng làm biến đổi sản lượng theo quy luật phụ thuộc vào phương vị của bề mặt thu bức xạ, các hướng gần Nam có xu thế duy trì sản lượng cao trong một khoảng góc tương đối rộng, trong khi các hướng lệch xa Nam nhạy hơn với sự gia tăng góc nghiêng. Kết quả này có ý nghĩa về mặt vật lý vì góc nghiêng không chỉ quyết định diện tích chiếu hiệu dụng của bức xạ mà còn thay đổi góc tới của bức xạ trực tiếp trên mặt phẳng mô-đun theo thời gian. Đáng chú ý, hình thái biến thiên sản lượng tương đối thống nhất giữa Phủ Lý, Duy Tiên, Kim Bảng, Lý Nhân, Bình Lục và Thanh Liêm, mặc dù mức sản lượng tuyệt đối có khác biệt. Điều đó cho thấy tác động của hình học lắp đặt đến sản lượng có xu thế nhất quán giữa các khu vực trong phạm vi Hà Nam cũ.

Sự khác biệt về sản lượng giữa các khu vực cần được xem xét đồng thời với điều kiện tài nguyên bức xạ địa phương. Theo dữ liệu đầu vào, GHI của sáu khu vực dao động từ 1.349,6 đến 1.366,6 kWh/m^2/năm và PVOUT từ 1.204,9 đến 1.215,8 kWh/kWp/năm, cho thấy nền tài nguyên mặt trời tương đối đồng đều nhưng vẫn tồn tại sự phân hóa không gian. Thanh Liêm và Bình Lục có PVOUT cao hơn, trong khi Kim Bảng có giá trị thấp hơn; sự khác biệt này được phản ánh trong sản lượng mô phỏng nhưng không làm thay đổi căn bản quy luật đáp ứng theo hướng và góc nghiêng. Vì vậy, có thể phân biệt hai thành phần trong kết quả: điều kiện bức xạ địa phương chi phối mức sản lượng nền, còn hình học bố trí chi phối sự phân hóa sản lượng giữa các phương án. Đây là điểm có ý nghĩa phương pháp luận, bởi nó cho phép sử dụng một khung phân tích thống nhất cho các khu vực có điều kiện bức xạ gần nhau, đồng thời vẫn bảo toàn được khác biệt địa phương trong kết quả tính toán.

Một đóng góp có tính ứng dụng của nghiên cứu là chuyển kết quả mô phỏng từ phạm vi sáu đơn vị hành chính trước đây sang các đơn vị xã, phường mới trong phạm vi Hà Nam cũ sau sắp xếp năm 2025. Bảng 3 cho thấy các đơn vị mới đều có hướng và góc cấu hình tương đối nhất quán, trong khi sản lượng trung bình năm dao động trong khoảng 1.261,20 - 1.274,17 kWh/kWp/năm. Biên độ này chỉ khoảng 12,97 kWh/kWp/năm, tương đương xấp xỉ 1% giá trị lớn nhất, cho thấy sự thay đổi địa giới hành chính không làm thay đổi đáng kể đặc trưng tài nguyên và quy luật bố trí đã xác định. Quan trọng hơn, việc thể hiện kết quả ở cấp xã/phường làm tăng khả năng sử dụng nghiên cứu trong thực tiễn, bởi quyết định đầu tư và thiết kế công trình thường được xác định tại quy mô địa phương cụ thể thay vì theo ranh giới huyện trước đây. Kết quả vì vậy có thể được xem như một cơ sở tham khảo cho lựa chọn cấu hình ban đầu của hệ thống ĐMTMN trong điều kiện mái công trình hiện hữu, đồng thời cung cấp dữ liệu nền để phát triển các bảng tra cứu hoặc công cụ hỗ trợ thiết kế theo địa điểm.

5. Kết luận

Nghiên cứu đã lượng hóa được ảnh hưởng đồng thời của hướng bố trí và góc nghiêng tấm pin quang điện đến sản lượng điện tại sáu khu vực thuộc phạm vi tỉnh Hà Nam trước khi sắp xếp đơn vị hành chính. Kết quả mô phỏng cho thấy sản lượng điện biến đổi có quy luật theo phương vị và góc nghiêng, trong đó mức độ biến thiên phụ thuộc đáng kể vào hướng của bề mặt mái. Các hướng gần Nam duy trì sản lượng tương đối cao và ít nhạy với những thay đổi nhỏ của góc nghiêng, trong khi các hướng lệch xa Nam có mức suy giảm rõ hơn khi góc nghiêng tăng. Quy luật này được xác nhận tương đối nhất quán tại Phủ Lý, Duy Tiên, Kim Bảng, Lý Nhân, Bình Lục và Thanh Liêm, cho thấy ảnh hưởng của hình học lắp đặt đến sản lượng thể hiện xu thế tương đồng giữa các khu vực trong phạm vi nghiên cứu. Đồng thời, sự khác biệt về điều kiện bức xạ giữa các khu vực chủ yếu làm thay đổi mức sản lượng tuyệt đối, nhưng không làm thay đổi căn bản dạng quan hệ giữa hướng, góc nghiêng và sản lượng điện.

Trên cơ sở kết quả tính toán mô phỏng, nghiên cứu đã xác định được quan hệ giữa góc nghiêng tối ưu và các hướng mái, qua đó xây dựng cơ sở lựa chọn cấu hình lắp đặt phù hợp với từng phương vị. Góc nghiêng tối ưu có xu hướng giảm khi hướng mái lệch khỏi vùng phương vị Nam; đối với hướng Nam, giá trị tính toán tại sáu khu vực tập trung trong khoảng 12 ° - 13 °, trong khi các hướng Đông Nam và Tây Nam có góc tối ưu thấp hơn, còn nhiều hướng phía Đông, Tây và phía Bắc có góc tối ưu rất nhỏ. Sự biến động giữa các khu vực đối với cùng một hướng không lớn, cho thấy có thể sử dụng kết quả như một cơ sở tham khảo thống nhất trong phạm vi tỉnh Hà Nam cũ, thay vì phải xây dựng một cấu hình hoàn toàn riêng biệt cho từng địa điểm.

Nghiên cứu đã chuyển kết quả từ phạm vi các đơn vị hành chính trước đây sang các đơn vị hành chính thuộc tỉnh Ninh Bình mới. Việc cập nhật này giúp kết quả nghiên cứu không chỉ có giá trị tại thời điểm xác lập mô hình mà còn phù hợp hơn với yêu cầu sử dụng dữ liệu trong điều kiện quản lý hiện hành. Kết quả ở cấp xã, phường tạo cơ sở để lựa chọn sơ bộ hướng bố trí và góc nghiêng khi nghiên cứu hoặc thiết kế hệ thống điện mặt trời áp mái cho từng khu vực cụ thể. Đồng thời, phương pháp và bộ kết quả được xây dựng trong nghiên cứu có thể được sử dụng làm dữ liệu tham khảo cho các nghiên cứu tiếp theo về đánh giá tiềm năng ĐMTMN, tối ưu hóa cấu hình hệ thống, phân tích hiệu quả kinh tế - kỹ thuật và xây dựng bản đồ tiềm năng điện mặt trời theo không gian. Tuy nhiên, các giá trị thu được cần được xem là cơ sở thiết kế ban đầu và cần tiếp tục hiệu chỉnh khi triển khai công trình thực tế trên cơ sở hình học mái, vật cản, che bóng, kết cấu chịu lực, tổn thất hệ thống và điều kiện đấu nối cụ thể.

Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được tài trợ bởi nhiệm vụ khoa học công nghệ cấp tỉnh Hà Nam (cũ) số 05/2024/HĐ-NCKH&PTCN với nhiệm vụ "*Nghiên cứu đánh giá tiềm năng điện mặt trời mái nhà trên địa bàn tỉnh Hà Nam sử dụng công nghệ ảnh viễn thám*", được thực hiện bởi Trường Đại học Xây dựng Hà Nội.

Tài liệu tham khảo

[1]. M. d. l. E. Gaëtan Masson, Izumi Kaizuka, Junko Okazaki, "Trends in PV Applications 2025," 2025.

[2]. A. A. A. Gassar and S. H. Cha, "Review of geographic information systems-based rooftop solar photovoltaic potential estimation approaches at urban scales," Applied Energy, vol. 291, p. 116817, 2021. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.116817.

[3]. V. M. Phap và nnk, "Assessment of rooftop solar power technical potential in Hanoi city, Vietnam," Journal of Building Engineering, vol. 32, p. 101528, 2020. 10.1016/j.jobe.2020.101528.

[4]. J. R. Centre. PVGIS 5 user manual [Online] Available: https://joint-research-centre.ec.europa.eu/photovoltaic-geographical-information-system-pvgis/using-pvgis-5/pvgis-5-user-manual_en.

[5]. H. Z. Al Garni, A. Awasthi, and D. Wright, "Optimal orientation angles for maximizing energy yield for solar PV in Saudi Arabia," Renewable energy, vol. 133, pp. 538-550, 2019. https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.10.048.

[6]. S. Memme and M. Fossa, "Maximum energy yield of PV surfaces in France and Italy from climate based equations for optimum tilt at different azimuth angles," Renewable Energy, vol. 200, pp. 845-866, 2022. https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.10.019.

[7]. H. Yao and Q. Zhou, "Research status and application of rooftop photovoltaic Generation Systems," Cleaner Energy Systems, vol. 5, p. 100065, 2023. 10.1016/j.cles.2023.100065.

[8]. N. Mukisa and R. Zamora, "Optimal tilt angle for solar photovoltaic modules on pitched rooftops: A case of low latitude equatorial region," Sustainable Energy Technologies and Assessments, vol. 50, p. 101821, 2022. 10.1016/j.seta.2021.101821.

[9]. Thủ tướng chính phủ. "Quyết định số 1686/QĐ-TTg ngày 26 tháng 12 năm 2023 về việc phê duyệt Quy hoạch tỉnh Hà Nam thời kỳ 2021-2030, tầm nhìn đến năm 2050", 2025.

[10]. P. C. Thành, T. C. Tý*, and N. Đ. Hạnh, "Đánh giá tiềm năng lý thuyết điện mặt trời và khả năng đáp ứng nhu cầu bổ sung nguồn điện tỉnh Hà Nam đến năm 2030," Tạp chí Vật liệu và Xây dựng-Bộ Xây dựng, vol. 16, no. 06, 2026, doi: https://doi.org/10.54772/jomc.06.2026.1459.

[11]. J. Polo et al., "Solar resources and power potential mapping in Vietnam using satellite-derived and GIS-based information," Energy conversion and management, vol. 98, pp. 348-358, 2015. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.04.016.

[12]. X. Wang, X. Gao, and Y. Wu, "Comprehensive analysis of tropical rooftop PV project: a case study in Nanning," Heliyon, vol. 9, 2023. 10.1016/j.heliyon.2023.e14131

[13]. Quốc Hội. "Nghị quyết về việc sắp xếp đơn vị hành chính cấp tỉnh ngày 12 tháng 6 năm 2025", 2025.

[14]. Ủy ban thường vụ Quốc hội. "Nghị quyết số 1674/NQ-UBTVQH15 của UBTVQH về việc sắp xếp các đơn vị hành chính cấp xã của tỉnh Ninh Bình năm 2025", 2025.

[15]. Trường Đại học Xây dựng Hà Nội, "Nghiên cứu đặc điểm các công trình xây dựng tại tỉnh Hà Nam," 2025.

[16]. Trường Đại học Xây dựng Hà Nội, "Nghiên cứu tính toán góc nghiêng tối ưu đặt tấm pin quang điện theo các hướng của mái công trình tại các huyện của tỉnh Hà Nam," 2025.