



DETERMINATION OF CONVECTIVE HEAT TRANSFER COEFFICIENTS FOR EXTERIOR SURFACES OF CONCRETE BRIDGE BOX GIRDERS USING CFD CONJUGATE HEAT TRANSFER SIMULATION

Ngo Dang Quang, Nguyen Huy Cuong*

University of Transport and Communications, No 3 Cau Giay Street, Hanoi, Vietnam

ARTICLE INFO

TYPE: Research Article

Received: 07/02/2025

Revised: 04/04/2025

Accepted: 12/04/2025

Published online: 15/04/2025

<https://doi.org/10.47869/tcsj.76.3.11>

* Corresponding author

Email: nguyenhuycuong@utc.edu.vn; Tel: +84989832425

Abstract. Convective heat transfer coefficients (CHTC) play a critical role in assessing the thermal behaviour of concrete bridge structures. However, so far, these coefficients have been proposed for bridge girders without accounting for the specific section configurations and the orientation of the girder surfaces concerning wind direction. This paper presents the outcomes of a study employing computational fluid dynamics (CFD) analysis in conjunction with heat transfer simulations using Comsol Multiphysics to determine CHTC values for the outer surfaces of concrete river bridge box girders. The research considers not only wind speed and surface temperature but also takes into account the geometric parameters of the girder sections. Predictive models for CHTC are formulated based on the simulation results using mathematical regression. By employing CHTC calculated based on these predictive formulas, the temperature distribution in concrete bridge box girders is computed and subsequently compared with measured data, demonstrating a high level of agreement.

Keywords: Convective heat transfer, CFD, concrete bridge box girder, coupled heat transfer, Comsol, section geometry parameters.

@ 2025 University of Transport and Communications



XÁC ĐỊNH HỆ SỐ TRUYỀN NHIỆT ĐỐI LƯU CHO BỀ MẶT NGOÀI CỦA DẦM CẦU BÊ TÔNG DẠNG HỘP BẰNG MÔ PHỎNG ĐỘNG LỰC HỌC DÒNG CHẢY KẾT HỢP TRUYỀN NHIỆT

Ngô Đăng Quang, Nguyễn Huy Cường*

Trường Đại học Giao thông vận tải, Số 3 Cầu Giấy, Hà Nội, Việt Nam

THÔNG TIN BÀI BÁO

CHUYÊN MỤC: Công trình khoa học

Ngày nhận bài: 07/02/2025

Ngày nhận bài sửa: 04/04/2025

Ngày chấp nhận đăng: 12/04/2025

Ngày xuất bản Online: 15/04/2025

<https://doi.org/10.47869/tcsj.76.3.11>

* Tác giả liên hệ

Email: nguyenhuycuong@utc.edu.vn; Tel: +84989832425

Tóm tắt. Hệ số truyền nhiệt đối lưu (convective heat transfer coefficient – CHTC) đóng vai trò quan trọng trong việc tính toán tác động của nhiệt lên kết cấu, đặc biệt là cho kết cấu cầu bê tông. Tuy nhiên, cho đến nay, các hệ số này thường là hệ số kinh nghiệm, không tính đến cấu hình mặt cắt và hướng của các bề mặt dầm so với hướng gió. Bài báo này trình bày kết quả của một nghiên cứu sử dụng phân tích động lực học chất lỏng (computational fluid dynamic – CFD) kết hợp với mô phỏng truyền nhiệt trong phần mềm Comsol Multiphysics để xác định giá trị CHTC cho bề mặt ngoài của dầm cầu bê tông có mặt cắt dạng hộp bắc qua sông. Nghiên cứu không chỉ xem xét tốc độ gió và nhiệt độ bề mặt mà còn tính đến các thông số hình học của mặt cắt dầm. Các mô hình dự đoán CHTC được xây dựng dựa trên kết quả mô phỏng bằng phương pháp hồi quy toán học. Bằng cách sử dụng CHTC được tính toán dựa trên các công thức dự đoán này, phân bố nhiệt độ trong dầm hộp cầu bê tông được tính toán và so sánh với dữ liệu đo được, cho thấy mức độ tương thích cao.

Từ khóa: hệ số truyền nhiệt đối lưu, CFD, dầm cầu bê tông dạng hộp, truyền nhiệt kết hợp, Comsol, tham số hình học của mặt cắt.

@ 2025 Trường Đại học Giao thông vận tải

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Phân bố nhiệt trong kết cấu cầu bê tông chịu ảnh hưởng kết hợp của dẫn nhiệt, đối lưu và bức xạ sóng ngắn (bức xạ mặt trời) và bức xạ sóng dài [1]. Truyền nhiệt đối lưu, đặc trưng cho sự trao đổi năng lượng nhiệt giữa bề mặt chất rắn và môi trường chất lỏng xung quanh, đóng vai trò quan trọng trong sự phân bố nhiệt của cầu bê tông. Độ lớn của truyền nhiệt đối

lưu có thể ảnh hưởng gấp ba đến bốn lần so với trao đổi nhiệt bức xạ sóng dài [2], [3].

Định luật của Newton mô tả quá trình truyền nhiệt đối lưu, thiết lập mối liên hệ giữa nhiệt lượng toả ra trên bề mặt và chênh lệch nhiệt độ giữa bề mặt kết cấu và môi trường, được mô tả trong phương trình (1).

$$q_c = h_c T_s - T_a \quad (1)$$

Trong đó, q_c là nhiệt lượng đối lưu cho 1 đơn vị diện tích bề mặt (W/m^2), h_c là hệ số truyền nhiệt đối lưu ($\text{W/m}^2\cdot\text{K}$), T_s là nhiệt độ bề mặt (K), và T_a (K) là nhiệt độ môi trường xung quanh.

Việc xác định chính xác CHTC là rất quan trọng trong việc dự đoán sự phân bố nhiệt độ và ứng suất nhiệt của cầu. CHTC chịu ảnh hưởng của nhiều yếu tố như tốc độ gió, độ nhám bề mặt, màu sắc, độ rỗng của vật liệu và hình dạng tổng thể của kết cấu tác động đến tốc độ gió cục bộ và cường độ nhiễu loạn. Có nhiều phương pháp khác nhau để xác định CHTC và chúng có thể được chia thành ba nhóm chính là phương pháp lý thuyết, phương pháp thực nghiệm và phương pháp số [2]. Phương pháp lý thuyết dựa trên các nguyên lý của động lực học chất lỏng và truyền nhiệt, thường được áp dụng trong các điều kiện dòng chảy lý tưởng và cho các vật hình dạng đơn giản như bề mặt phẳng, hình trụ hoặc hình cầu [2], [4]. Phương pháp thực nghiệm bao gồm các thí nghiệm trong hầm gió hoặc thử nghiệm trên mô hình thực tế. Các phương pháp này chủ yếu áp dụng cho các cấu trúc đơn giản, nơi dòng chảy nằm trong lớp biên mỏng và số Reynolds ở mức trung bình ($\text{Re} = 10^3 \div 10^5$). Tuy nhiên, việc sử dụng chúng để mô hình hóa dòng không khí quanh các công trình lớn như cầu vẫn còn nhiều hạn chế [5]. Nhờ các nghiên cứu thực nghiệm, nhiều công thức kinh nghiệm và bán kinh nghiệm đã được phát triển nhằm xác lập quan hệ giữa CHTC với tốc độ gió. Đối với kết cấu cầu, công thức của Kehlbeck là một trong những công thức phổ biến nhất [2].

$$h_{c_top} = 3,83v + 4,67; \quad h_{c_bot} = 3,83v + 2,17; \quad h_{c_web} = 3,83v + 3,67; \quad h_{c_in} = 3,5 \quad (2)$$

Trong đó, $h_{c_top}, h_{c_bot}, h_{c_web}, h_{c_in}$ lần lượt là các hệ số truyền nhiệt đối lưu, tính bằng $\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$, cho các bề mặt ngoài của bản nắp, bản đáy, vách và các mặt trong của dầm hộp. v là tốc độ gió (m/s). Tuy nhiên, các công thức này chưa xét đến yếu tố hình học của mặt cắt dầm cũng như không chỉ rõ loại tốc độ gió được sử dụng.

Hiện nay, phương pháp số với việc kết hợp động lực học chất lỏng tính toán (CFD) với phân tích truyền nhiệt được ứng dụng rộng rãi để xác định CHTC. Phương pháp này có ưu điểm nổi bật như mô phỏng chính xác các hình dạng kết cấu phức tạp với độ chính xác cao. Nhiều nghiên cứu đã sử dụng CFD để mô phỏng truyền nhiệt đối lưu trong lĩnh vực công trình nhà [6]. Vollaro et al. [5] đã mô phỏng CFD bằng phương trình Reynolds-averaged Navier-Stokes (RANS) với mô hình $k-\varepsilon$ standard để xác định CHTC cho mặt tiền bên ngoài tòa nhà. Kết quả mô phỏng cho mặt tiền ngoài tại các công trình ở đô thị cho thấy sự tương quan tốt với dữ liệu thực nghiệm. Defraeye et al. [2] cũng đã phân tích CFD kết hợp với truyền nhiệt để tính toán CHTC trên bề mặt một khối lập phương trong các lớp biên rối. Kết quả so sánh với dữ liệu thực nghiệm cho thấy các mô hình CFD như SST $k-\omega$ và *realizable* $k-\varepsilon$ có thể mô phỏng chính xác các đặc điểm dòng chảy và truyền nhiệt ở mặt đón gió. Tuy nhiên, những nghiên cứu này khó có thể áp dụng trực tiếp cho cầu dầm hộp vì nhiều lý do. Cấu tạo bên ngoài của dầm hộp của cầu thường phức tạp với các cánh dạng cong-xon. Ngoài ra, giữa

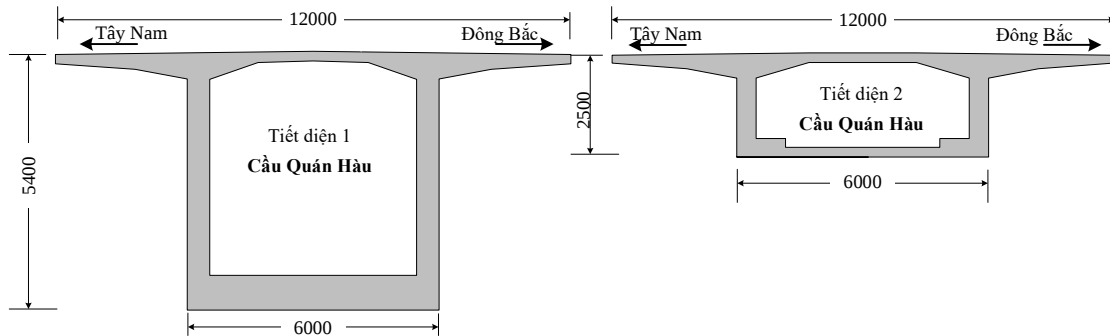
đáy dầm và mặt đất hay mặt nước thường có một khoảng trống, tạo điều kiện cho luồng khí lưu thông. Bên cạnh đó, chiều dài dầm cầu thường lớn hơn nhiều so với kích thước mặt cắt. Các yếu tố này làm cho dòng chảy của không khí quanh dầm cầu khác với xung quanh nhà.

Trong nghiên cứu này, mô phỏng CFD kết hợp với phân tích truyền nhiệt được sử dụng để tính toán CHTC cho các mặt ngoài của dầm cầu bê tông có mặt cắt dạng hộp. Mục tiêu chính của nghiên cứu là xây dựng được các công thức dự đoán CHTC cho các bề mặt khác nhau của dầm hộp, bao gồm bề mặt trên, mặt dưới, mặt thành đón gió và mặt thành khuất gió theo tốc độ gió v_{10} của TCVN 2737-2023 [7]. Kết quả nghiên cứu sẽ giúp mô hình hóa chính xác sự phân bố nhiệt độ bên trong kết cấu dầm cầu dạng hộp bằng bê tông, góp phần đảm bảo an toàn cho loại công trình hạ tầng quan trọng này.

2. MÔ PHỎNG CFD

2.1. Các mặt cắt cầu dầm hộp

Do chiều dài của dầm cầu lớn hơn nhiều so với kích thước mặt cắt, các mô phỏng trong nghiên cứu này được thực hiện trên mô hình 2D dưới dạng mặt cắt dầm. Hiện nay, một chương trình quan trắc nhiệt độ đang được triển khai tại Việt Nam nhằm theo dõi sự thay đổi nhiệt độ trong 3 cầu bê tông có mặt cắt dạng hộp, đại diện cho các vùng địa lý khác nhau. Các cầu này bao gồm cầu Vĩnh Thịnh (Sơn Tây, Hà Nội), cầu Quán Hàu (Quảng Bình) và cầu Gò Găng (Vũng Tàu). Các cầu này cũng có cấu tạo kết cấu nhịp, mặt cắt và góc phương vị khác nhau, được mô tả chi tiết trong tài liệu [8]. Việc phân tích trên các cầu này giúp đánh giá ảnh hưởng của hình dạng mặt cắt lên đặc tính truyền nhiệt đối lưu.



Hình 1. Cấu tạo mặt cắt của cầu Quán Hàu được quan trắc.

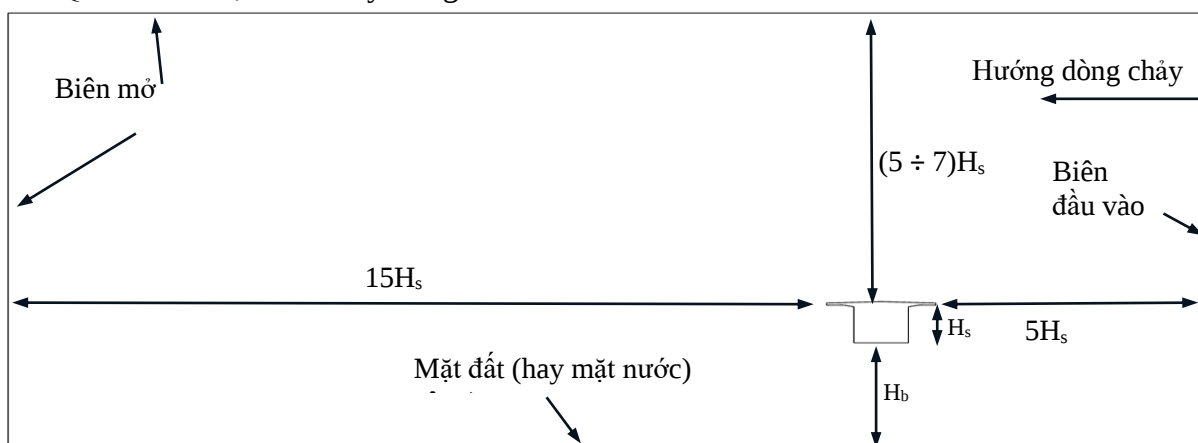
2.2. Mô hình phân tích và công cụ phần mềm

Do cấu trúc hình học phức tạp của dầm cầu, luồng không khí đi qua các mặt cắt này thường có sự nhiễu loạn mạnh và có hiện tượng phân tách dòng chảy [9]. Để mô phỏng chính xác hiện tượng này, nghiên cứu này sẽ áp dụng mô hình RANS kết hợp với mô hình dòng chảy rối *realizable k-ε*. Ưu điểm chính của mô hình *realizable k-ε* so với các mô hình dòng chảy rối khác là khả năng dự đoán chính xác tốc độ lan truyền của dòng khí xung quanh các kết cấu phức tạp như cầu và tòa nhà. Ngoài ra, mô hình này cũng có thể mô phỏng chính xác ứng xử nhiễu loạn của các lớp biên gần sát tường cứng với độ tin cậy cao nhưng vẫn đảm bảo chi phí tính toán hợp lý [5], [10].

Các mô phỏng trong nghiên cứu này được thực hiện bằng phần mềm Comsol Multiphysics phiên bản 6.3 [11]. Phần mềm này cung cấp các phương pháp số để giải quyết các phương trình chi phối truyền nhiệt và động lực học chất lỏng, bao gồm phương trình Navier-Stokes và phương trình bảo toàn năng lượng, trên miền tính toán rời rạc 2D hoặc 3D.

2.3. Miền tính toán và chia lưới

Các miền tính toán được xác định dựa trên các hướng dẫn trong [5], [12]. Theo chiều cao, biên trên của miền tính toán cách 5 lần chiều cao của mặt cắt đầm ($5H_s$) tính từ cạnh trên của mặt cắt, với H_s là chiều cao của mặt cắt đầm. Để đảm bảo sự hội tụ trong quá trình tính toán thực tế, giá trị này được thay đổi trong khoảng từ $5H_s$ đến $7H_s$. Theo hướng dòng chảy, miền tính toán được mở rộng $5H_s$ đến biên dòng chảy vào và $15H_s$ đến biên dòng chảy ra từ cạnh ngoài cùng của mặt cắt. Khoảng cách từ cạnh dưới cùng của mặt cắt đầm đến biên dưới của miền tính toán, ký hiệu là H_b , thay đổi tùy thuộc vào vị trí của các cầu thực tế và được coi là một tham số phân tích trong nghiên cứu này. Để minh họa, miền tính toán cho mặt cắt 1 của cầu Quán Hàu được trình bày trong Hình 2.



Hình 2. Miền tính toán và điều kiện biên.

Vì mô hình *realizable k-ε* sử dụng mô hình “hàm tường” để mô tả vận tốc dòng chảy gần tường, các lưới phân tử gần tường được tạo rất tỉ mỉ để đảm bảo độ phân giải của vùng biên gần tường đạt độ chính xác 11,06 đơn vị nhót tại mỗi cạnh lưới. Đây là độ phân giải cao nhất có thể đạt được thông qua mô hình hàm tường [11], đảm bảo độ chính xác của mô phỏng. Ví dụ, đối với Mặt cắt 1 của cầu Quán Hàu, với tốc độ gió $v_{10} = 10$ m/s, tổng độ dày lớp biên gần tường là $9,39 \cdot 10^{-2}$ m và độ dày lớp phân tử đầu tiên là $7,57 \cdot 10^{-5}$ m.

2.4. Các tham số đầu vào

Tốc độ gió tại biên đầu vào (inlet boundary) phụ thuộc vào độ cao và được mô tả theo phương trình (3), dựa trên mô hình được đề xuất trong TCVN 2737:2023 [7].

$$v_z = v_{10} \times 2.01 \left(\frac{z}{z_g} \right)^{2/\alpha} \quad (3)$$

Trong đó, v_z là tốc độ gió ở độ cao z so với mặt đất, v_{10} là tốc độ gió ở độ cao 10 m, z_g biểu thị độ cao gradient, tức là độ cao so với mặt đất mà ma sát bề mặt có tác động không đáng kể đến tốc độ gió và α là hệ số lũy thừa.

Trong nghiên cứu này, địa hình được coi là khu vực trống trải, bằng phẳng, với rất ít hoặc không có vật cản, không vượt quá 1,5 m thể hiện bề mặt nước sông. Theo đó, $z_g = 213,35$ m và $\alpha = 11,5$. v_{10} đóng vai trò là tham số nghiên cứu, với các giá trị trong khoảng từ 0,5 m/s đến 10 m/s. Trong mô phỏng, nhiệt độ của không khí xung quanh được giữ

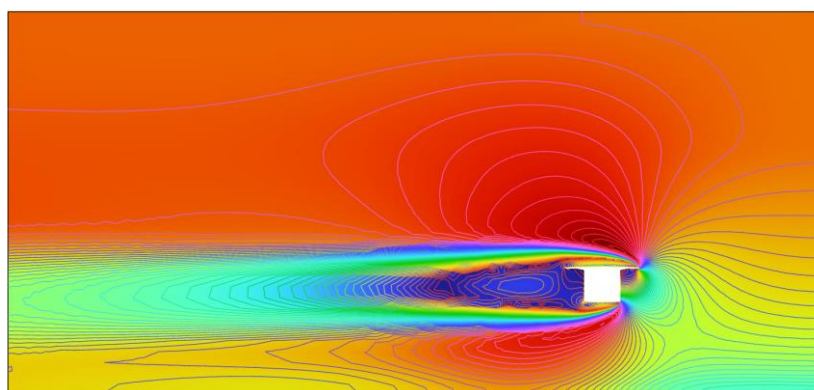
không đổi $T_a = 303,15K$. Trong khi đó, nhiệt độ tại bề mặt biên của dầm, T_s , được xem xét như một biến số nghiên cứu, dao động từ 308,15K (35°C) đến 338,15K (65°C), với bước thay đổi 10K. Cao độ của bản đáy, H_b , cũng là một tham số nghiên cứu nhằm đánh giá ảnh hưởng của tốc độ gió theo độ cao và khoảng không dưới cầu đối với CHTC. Các giá trị được khảo sát nằm trong khoảng từ 4 m, 6 m, 8 m, 10 m và 15 m.

Các bề mặt tiếp xúc giữa dầm cầu và không khí được mô hình hóa là “no-slip walls”, tức là vận tốc dòng chảy tại bề mặt tiếp xúc với tường bằng không, phản ánh điều kiện thực tế của dòng chảy gần bề mặt dầm. Bề mặt tiếp xúc giữa mặt nước sông và không khí được coi là “slip walls”, cho phép dòng khí trượt tự do trên bề mặt nước mà không có lực cản đáng kể. Các biên còn lại của miền tính toán được thiết lập là “open boundary” (biên mở), cho phép dòng khí tự do đi vào và ra khỏi miền tính toán.

3. KẾT QUẢ MÔ PHỎNG

3.1. Biểu đồ vận tốc không khí

Biểu đồ vận tốc dòng khí xung quanh mặt cắt dầm cầu được trình bày trong Hình 3 ứng với $v_{10} = 8 \text{ m/s}$ và $H_b = 10 \text{ m}$. Các biểu tượng tự cũng có thể được quan sát ở các tốc độ gió và các cao độ của bản đáy khác nhau. Dòng chảy thể hiện sự nhiễu loạn mạnh, đặc biệt tại các cạnh đón gió. Phía sau bề mặt vách đón gió, có một vùng lặng, nơi mà tốc độ dòng khí thấp hơn rõ rệt so với các mặt khác của mặt cắt dầm.



Hình 3. Biểu đồ vận tốc dòng khí trong miền tính toán của Mặt cắt 1, cầu Quán Hàu.

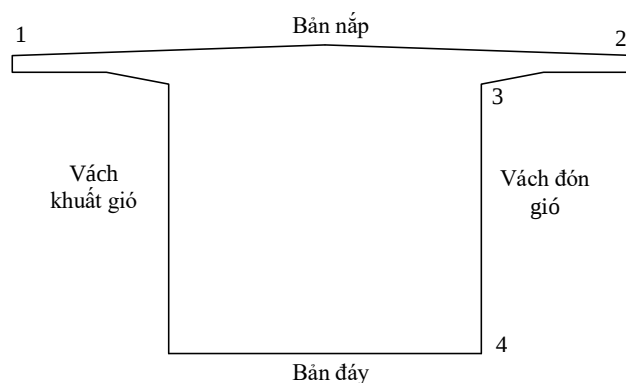
3.2. Xác định CHTC

Dựa trên (1), h_c có thể được tính toán từ dữ liệu kết quả mô phỏng:

$$h_c = \frac{q_c}{T_s - T_a} \quad (4)$$

Với T_s nhiệt độ tại bề mặt dầm, T_a là nhiệt độ của không khí xung quanh. q_c là thông lượng nhiệt pháp tuyến tại bề mặt dầm.

$$q_c = k \times \frac{dT}{dy} \quad (5)$$

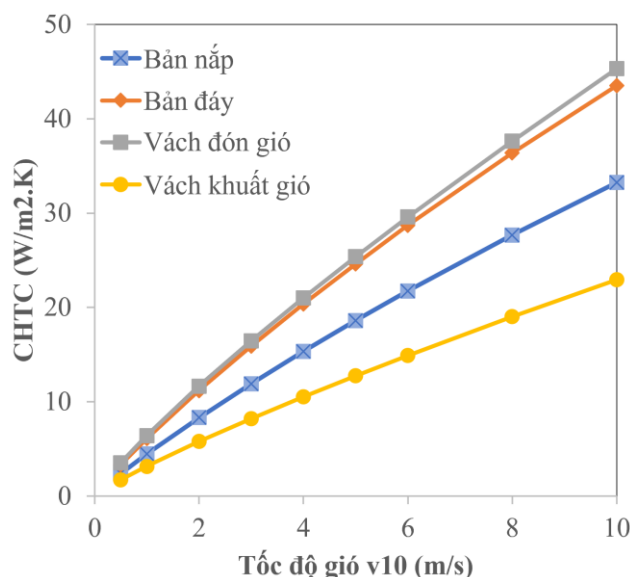


Hình 4. Vị trí của các bề mặt dầm.

Với k là độ dẫn nhiệt của không khí (W/mK) và dT/dy là gradient nhiệt độ tại bề mặt. Các giá trị này được phần mềm Comsol cung cấp trực tiếp với các tham số $kmean$ và $gradTmag$, tương ứng. Trong nghiên cứu này, CHTC trung bình cho các bề mặt ngoài của mặt cắt dầm, bao gồm bản nắp, vách đón gió, vách khuất gió và bản đáy sẽ được tính toán. Sự sắp xếp không gian của các bề mặt này được thể hiện trong Hình 4.

3.3. CHTC trên các bề mặt dầm

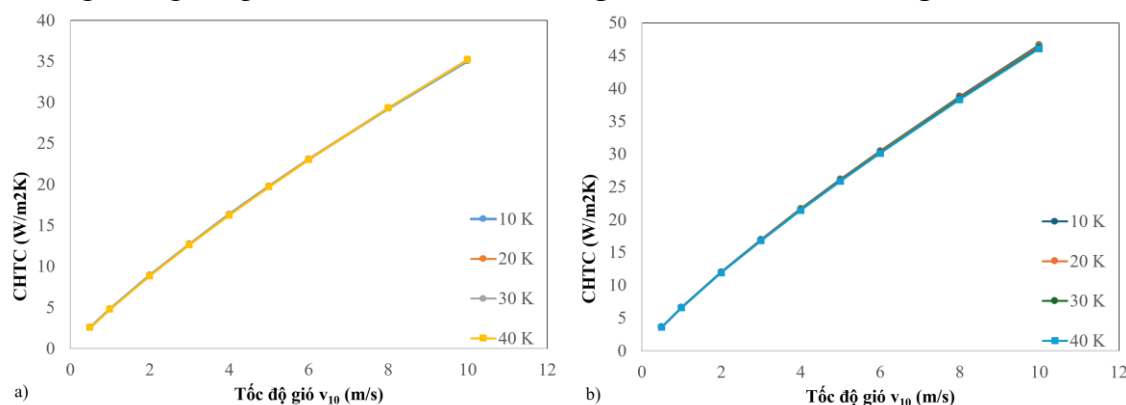
Kết quả mô phỏng cho thấy có sự khác biệt rõ rệt về CHTC trung bình của các mặt đón gió và khuất gió, cũng như giữa các bề ngoài của mặt bản nắp và bản đáy tại mỗi giá trị của tốc độ gió v_{10} . Ở mọi giá trị v_{10} , CHTC trung bình trên mặt đón gió luôn lớn hơn đáng kể so với mặt khuất gió. Tuy nhiên, sự chênh lệch giữa CHTC của bề mặt đáy dưới và của các mặt khác lại thay đổi, phụ thuộc vào độ cao của mặt cắt. Điều này sẽ được thảo luận thêm trong Mục 3.5. Để minh họa, Hình 5 trình bày sự thay đổi của CHTC trung bình trên bề mặt bản nắp, bản đáy, vách đón gió và vách khuất gió ở Mặt cắt 1 (cầu Quán Hàu) ở cao độ bản đáy 6 m.



Hình 5. Biến thiên của CHTC trung bình

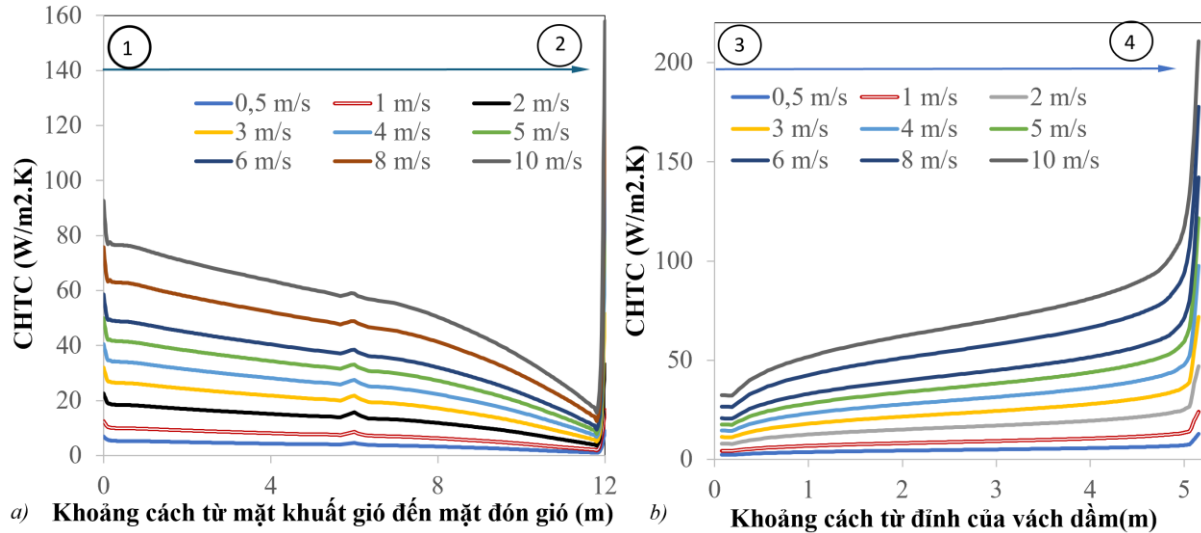
3.4. Biến thiên của CHTC theo tốc độ gió và nhiệt độ

Hình 6 minh họa sự thay đổi CHTC trung bình của mặt trên bản nắp và mặt ngoài thành hướng gió Mặt cắt 1, Cầu Quán Hàu. Các giá trị này được tính toán dựa trên tốc độ gió và chênh lệch nhiệt độ của bề mặt dầm và không khí xung quanh (ΔT). Biểu đồ cho thấy rằng ở mỗi giá trị tốc độ gió, ΔT có ảnh hưởng rất nhỏ đến giá trị CHTC. Điều này chỉ ra rằng, CHTC chịu ảnh hưởng chủ yếu từ các yếu tố như tốc độ gió và cấu tạo mặt cắt trong khi chịu ảnh hưởng không đáng kể từ chênh lệch nhiệt độ giữa bề mặt dầm và không khí.



Hình 6. Biến thiên của CHTC trung bình: (a) tại bề mặt bản nắp, và (b) tại bề mặt thành ngoài đón gió dựa trên sự chênh lệch nhiệt độ của bề mặt dầm và không khí xung quanh (ΔT).

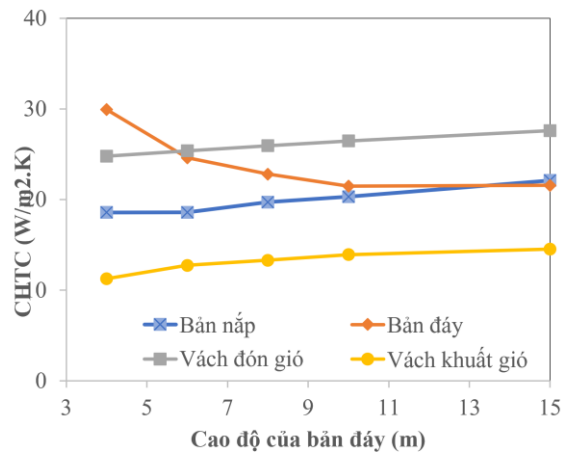
Error! Reference source not found. minh họa sự thay đổi CHTC dọc theo các cạnh của bề mặt bản nắp và vách đón gió khi $\Delta T=30K$ trong Mặt cắt 1, Cầu Quán Hàu. Các điểm từ 1 đến 4 tương ứng với các vị trí trong mặt cắt, như minh họa trong Hình 4. Dọc theo chiều dài của các cạnh này, CHTC thay đổi chậm. Tuy nhiên, tại các góc của mặt cắt dầm, đặc biệt là ở các mặt đón gió, CHTC tăng đột ngột. Hiện tượng này có thể là do độ nhiễu loạn cao trong luồng không khí tại các vị trí này, dẫn đến sự thay đổi đột ngột trong truyền nhiệt.



Hình 7. Sự thay đổi của CHTC theo chiều dài cạnh trên bề mặt: (a) bản nắp, và (b) vách đón gió.

3.5. Biến thiên của CHTC theo cao độ của bản đáy

Kết quả mô phỏng chỉ ra rằng cao độ của bản đáy, H_b , có ảnh hưởng đến CHTC của các bề mặt dầm. Trong phạm vi nghiên cứu với giá trị H_b trong khoảng từ 4 m đến 15 m, khi H_b giảm, CHTC trên bề mặt đáy tăng, nhưng CHTC trên các bề mặt khác lại giảm. Điều này có thể được giải thích bởi sự tăng tốc độ dòng khí ở dưới mặt đáy khi khoảng trống từ mặt đáy dầm đến bề mặt đất hay mặt nước giảm. Xu hướng này được quan sát trên tất cả các mặt cắt và tốc độ gió được mô phỏng. Để minh họa, Hình 8 hiển thị sự thay đổi của CHTC trung bình trên các bề mặt của Mặt cắt 1, cầu Quán Hàu, theo cao độ của bản đáy H_b ứng với tốc độ gió $v_{10} = 5$ m/s.



Hình 8. Biến thiên của CHTC trung bình trên bề mặt biên tại Mặt cắt 1, Cầu Quán Hàu, theo cao độ của bản đáy ở tốc độ gió $v_{10} = 5$ m/s.

4. PHÂN TÍCH DỮ LIỆU

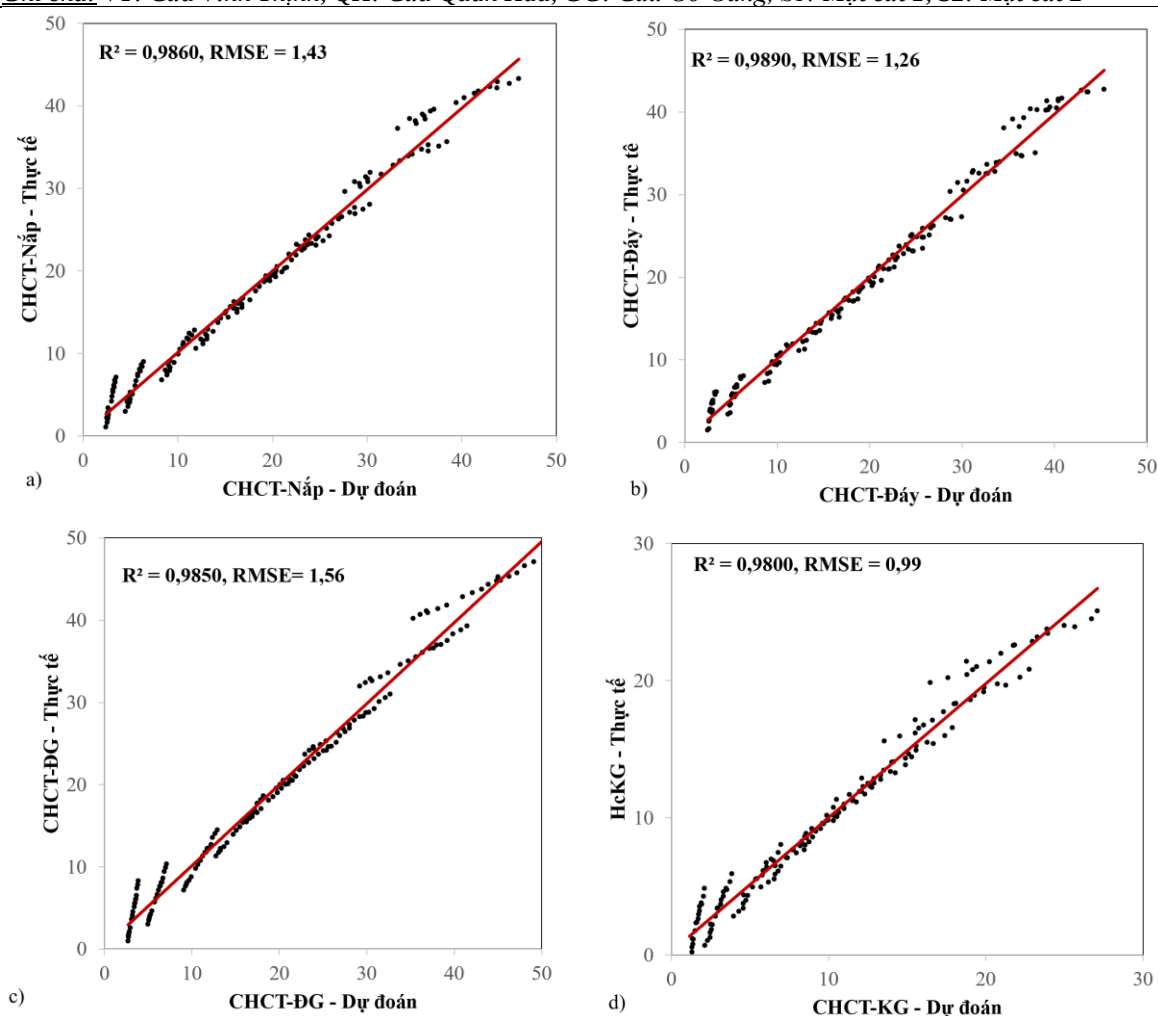
Việc phân tích dữ liệu trong nghiên cứu này được thực hiện với mục đích phát triển một số công thức cho phép tính toán CHTC trung bình cho các bề mặt ngoài của dầm cầu dựa trên dữ liệu thu được từ mô phỏng. Các tham số nghiên cứu bao gồm tốc độ gió, v_{10} ; chênh lệch nhiệt độ giữa bề mặt dầm và không khí xung quanh, ΔT ; cao độ của bản đáy, H_b ; chiều cao của mặt cắt dầm, H_s ; chiều rộng của bản nắp, B_s ; chiều rộng của bản đáy, B_b ; chiều dài của phần cong-xon, L_c ; chiều cao của vách dầm, H_w , và góc nghiêng của bề mặt vách dầm so với

bề mặt nằm ngang, φ . Các giá trị tương ứng của các tham số này được trình bày trong Bảng 1. Các mô hình dự đoán được thiết lập cho các bề mặt ngoài của dầm, bao gồm bề mặt bản nắp, bản đáy, vách đón gió và vách khuất gió với việc sử dụng phương pháp phân tích hồi quy từng bước trên công cụ phân tích JMP phiên bản 17 [13].

Bảng 1. Giá trị các tham số nghiên cứu.

Tham số	Giá trị					
v_{10} (m/giây)	0,5, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 8, 10					
ΔT (K)	10, 20, 30, 40					
H_b (m)	4, 6, 8, 10, 15					
	VT, S1	VT, S2	QH, S1	QH, S2	GG, S1	GG, S2
H_s (m)	6,4	3,0	6,0	2,6	6,2	3,0
B_t (m)	16,0	16,0	12,0	12,0	12,0	12,0
B_b (m)	7,4	8,4	6,0	6,0	5,6	6,6
L_c (m)	3,45	3,45	2,35	2,35	3,0	3,0
H_w (m)	5,6	2,15	5,16	1,8	5,48	2,34
φ (°)	80	80	90	90	80	80

Ghi chú: VT: Cầu Vĩnh Thịnh, QH: Cầu Quan Hà, GG: Cầu Gò Găng, S1: Mặt cắt 1, S2: Mặt cắt 2



Hình 9. So sánh CHTC dự đoán với CHTC thực tế đối với: (a) bề mặt bản nắp, (b) bề mặt bản đáy, (c) bề mặt vách đón gió và (d) bề mặt vách khuất gió

Các công thức dự đoán cho CHTC trung bình thu được từ phân tích hồi quy có dạng:

- Đối với bề mặt ngoài bản nắp:

$$h_{c_top} = 12,721 + 3,808v_{10} - 16,331H_s + 15,459H_w + 1,034L_c + 0,285H_b \quad (6)$$

- Đối với bề mặt ngoài bản đáy:

$$h_{c_bottom} = 12,717 + 3,853v_{10} - 21,318H_s - 1,745B_t + 2,919B_b + 22,585H_w + 3,135L_c - 0,535H_b \quad (7)$$

- Đối với bề mặt ngoài vách đón gió:

$$h_{c_ww} = 2,306 + 4,130v_{10} + 1,195H_w + 0,232H_b - 2,105L_c \quad (8)$$

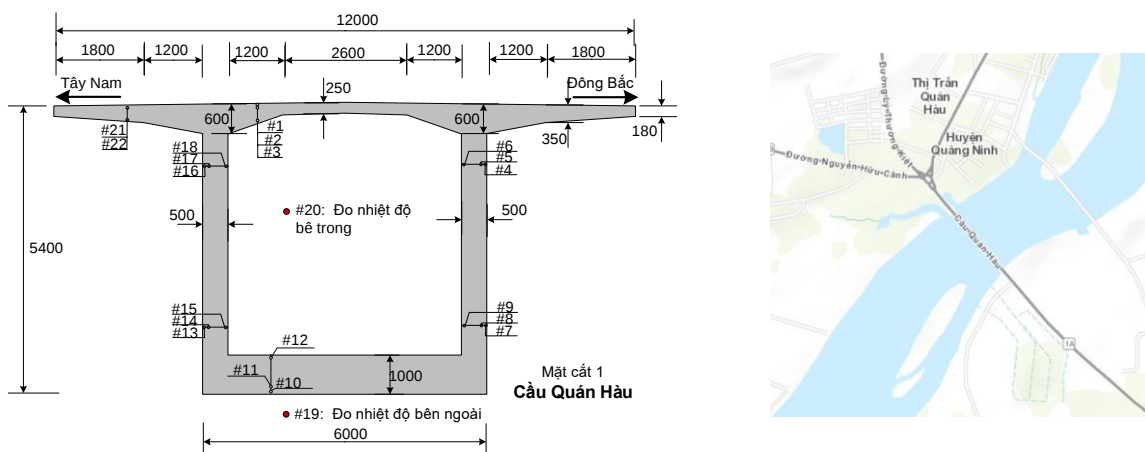
- Đối với bề mặt ngoài vách khuất gió:

$$h_{c_lw} = -0,639 + 2,129v_{10} - 1,222L_c + 0,801H_w + 0,290H_b \quad (9)$$

Sự chênh lệch nhiệt độ giữa bề mặt đầm và không khí xung quanh, ΔT , cùng với góc nghiêng của bề mặt vách đầm so với bề mặt nằm ngang φ , có ảnh hưởng không đáng kể đến CHTC và do đó không xuất hiện trong các công thức dự đoán này. Hình 9 so sánh dữ liệu mô phỏng và dữ liệu dự đoán thu được từ các công thức trên. Kết quả cho thấy rằng hệ số tương quan của tất cả các mô hình đều rất cao, chứng tỏ các mô hình này có khả năng dự đoán CHTC trung bình cho các bề mặt một cách chính xác dựa trên các tham số đầu vào.

5. KIỂM CHỨNG BẰNG KẾT QUẢ QUAN TRẮC

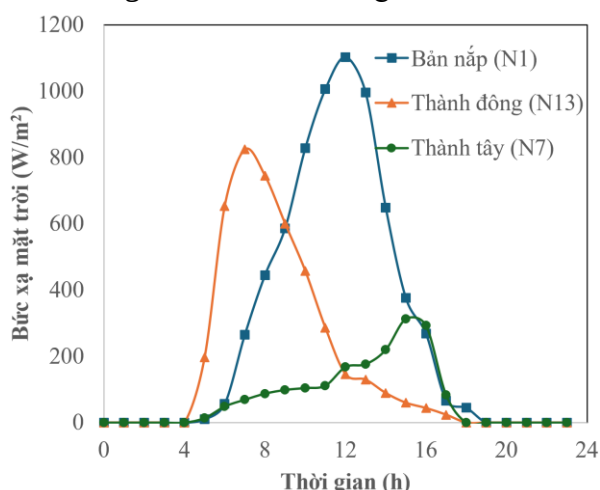
Để xác thực CHTC thu được từ dữ liệu mô phỏng, các giá trị này đã được sử dụng để tính toán phân bố nhiệt độ trên các cầu đang được quan trắc. Kết quả tính toán này, sau đó, được so sánh với dữ liệu đo thực tế. Sự phân bố nhiệt độ của Mặt cắt 1, Cầu Quán Hàu vào ngày 6 tháng 7 năm 2023 được chọn làm ví dụ minh họa. Hình 10 thể hiện cấu tạo của mặt cắt tính toán, bao gồm cả vị trí của các cảm biến nhiệt cũng như mặt bằng bố trí tổng thể của cầu. Phân bố nhiệt độ được mô phỏng bằng cách sử dụng mô đun “Heat Transfer in Solids and Fluids” kết hợp mô đun “Surface-to-Ambient Radiation” của phần mềm Comsol Multiphysics. Phân tích được thực hiện theo dạng biến thiên theo thời gian (time dependent analysis).



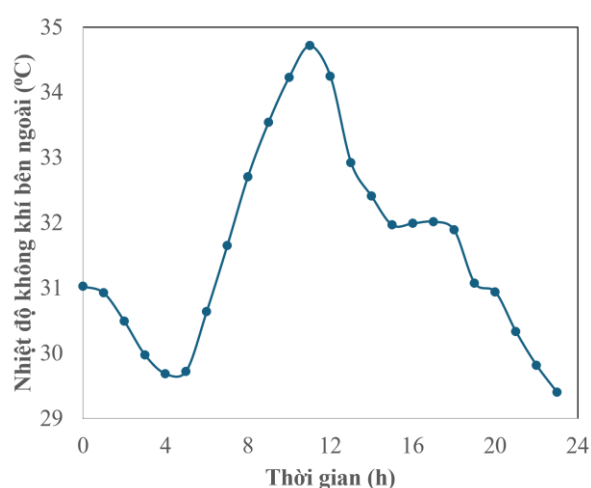
Hình 10. Cấu tạo của Mặt cắt 1 bao gồm sự sắp xếp các cảm biến nhiệt và hướng của Cầu Quán Hàu.

Giá trị của bức xạ mặt trời và nhiệt độ không khí được đo trực tiếp tại vị trí cầu. Tốc độ gió v_{10} được lấy từ dữ liệu của NASA [14] tại vị trí cầu. Tốc độ gió này cũng được kiểm

chúng với giá trị từ trạm khí tượng của sân bay Đồng Hới. Cao độ của bản đáy H_b cho Mặt cắt 1 tại thời điểm đo là khoảng 6 m. Hình 11 và Hình 12 trình bày sự thay đổi theo thời gian của tổng bức xạ mặt trời trên bề mặt bản nắp và bề mặt ngoài của dầm, tại các điểm đo N7 và N13, cùng với nhiệt độ không khí được đo tại vị trí cầu.



Hình 11. Biến thiên của tổng bức xạ mặt trời đo được ở bề mặt bản nắp, thành phía đông và phía tây.



Hình 12. Biến thiên nhiệt độ không khí đo được tại vị trí cầu.

CHTC cho bề mặt bên ngoài tại các điểm đo nhiệt độ được tính toán theo các công thức (6) đến (9) với cấu tạo mặt cắt và tốc độ gió cụ thể. Đối với bề mặt bên ngoài của vách phía đông và phía tây, CHTC được tính toán tùy thuộc vào hướng gió và cấu tạo của mặt cắt cầu. Cụ thể, thời gian này, bề mặt bên ngoài của vách phía tây được chỉ định là bề mặt đón gió, trong khi bề mặt bên ngoài của vách phía đông đóng vai trò là bề mặt khuất gió trong suốt cả ngày. CHTC cho bề mặt bên trong của dầm được lấy là $3,5 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$, như được đề xuất trong tài liệu [1]. Các giá trị CHTC được tính toán theo các công thức đề xuất (6, 7, 8, 9) – ký hiệu là ĐX – và, để so sánh, theo các công thức của Kehlbeck – ký hiệu là K, tại các điểm đo trên bề mặt bản nắp, bản đáy, vách phía đông và phía tây được liệt kê chi tiết ở Bảng 2. Có thể thấy rằng, các giá trị CHTC tính được theo các công thức đề xuất cho mặt trên và thành đón gió đều lớn hơn các giá trị tương ứng tính theo công thức của Kehlbeck. Trong khi đó, cho bản đáy, các giá trị này lại xấp xỉ bằng nhau. Hơn nữa, công thức của Kehlbeck không phân biệt thành đón gió hay khuất gió nên giá trị CHTC cho cả 2 thành này được coi là như nhau.

Bảng 2. CHTC tại các điểm đo nhiệt độ của Mặt cắt 1, Cầu Quán Hàu.

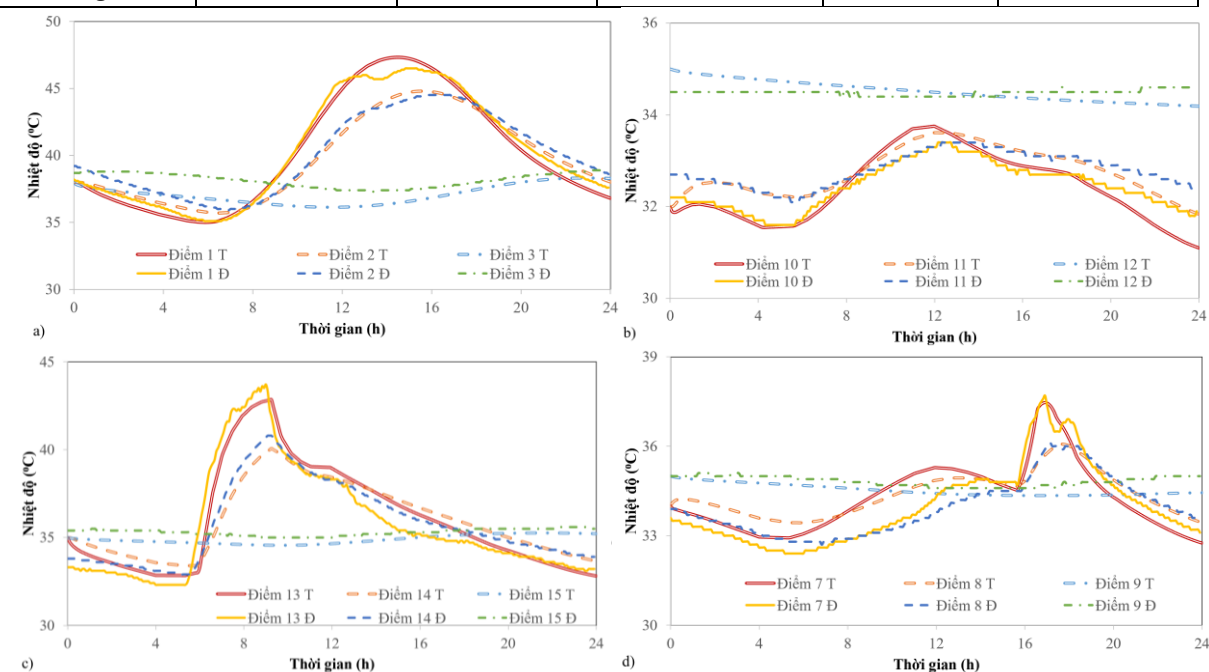
Thời gian (h)	Gió		CHTC ($\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$)							
	Hướng ($^\circ$)	$v10$ (m/s)	Bản nắp (ĐX)	Bản nắp (K)	Bản đáy (ĐX)	Bản đáy (K)	Thành tây (ĐX)	Thành tây (K)	Thành đông (ĐX)	Thành đông (K)
0	204,9	3,16	10,68	16,77	14,25	14,27	17,97	15,77	9,09	15,77
1	216,4	3,30	11,21	17,31	14,79	14,81	18,55	16,31	9,39	16,31
2	222,5	3,58	12,28	18,38	15,87	15,88	19,7	17,38	9,98	17,38
3	226,3	3,85	13,30	19,42	16,91	16,92	20,82	18,42	10,56	18,42
4	228,2	3,89	13,46	19,57	17,07	17,07	20,98	18,57	10,64	18,57
5	228,9	3,86	13,34	19,45	16,95	16,95	20,86	18,45	10,58	18,45
6	228,3	3,80	13,11	19,22	16,72	16,72	20,61	18,22	10,45	18,22
7	225,4	3,63	12,47	18,57	16,07	16,07	19,91	17,57	10,09	17,57
8	224,9	3,71	12,77	18,88	16,37	16,38	20,24	17,88	10,26	17,88
9	223,9	3,39	11,55	17,65	15,14	15,15	18,92	16,65	9,58	16,65

10	223,1	2,94	9,84	15,93	13,41	13,43	17,06	14,93	8,62	14,93
11	221	2,54	8,32	14,4	11,87	11,9	15,41	13,4	7,77	13,4
12	214,1	2,02	6,34	12,41	9,86	9,91	13,26	11,41	6,66	11,41
13	195,8	1,65	4,93	10,99	8,44	8,49	11,73	9,99	5,88	9,99
14	167,9	1,67	5,00	11,07	8,51	8,57	11,81	10,07	5,92	10,07
15	144,7	2,18	6,94	13,02	10,48	10,52	13,92	12,02	7,00	12,02
16	142	2,74	9,08	15,16	12,64	12,66	16,23	14,16	8,2	14,16
17	137,6	3,13	10,56	16,66	14,14	14,16	17,84	15,66	9,03	15,66
18	132,6	3,55	12,16	18,27	15,76	15,77	19,58	17,27	9,92	17,27
19	136	4,07	14,14	20,26	17,76	17,76	21,73	19,26	11,03	19,26
20	143,4	4,15	14,45	20,56	18,07	18,06	22,06	19,56	11,2	19,56
21	151,7	4,01	13,91	20,03	17,53	17,53	21,48	19,03	10,9	19,03
22	159,9	3,96	13,72	19,84	17,34	17,34	21,27	18,84	10,79	18,84
23	167,3	4,00	13,88	19,99	17,49	17,49	21,44	18,99	10,88	18,99

Các tính chất vật liệu cần thiết cho mô phỏng, bao gồm độ dẫn nhiệt của các vật liệu trên cầu, được trình bày ở Bảng 3. Các giá trị đối với bê tông được lấy từ khảo sát được đề cập trong [8]. Hơn nữa, độ dẫn nhiệt của bê tông trong các cây cầu đã được xác minh thông qua các thử nghiệm thực tế trên bê tông có cùng thành phần và đặc tính cơ học [8]. Tính chất nhiệt của bê tông nhựa được lấy từ báo cáo của Cục Quản lý Đường bộ Liên bang Mỹ [15].

Bảng 1. Tính chất vật liệu.

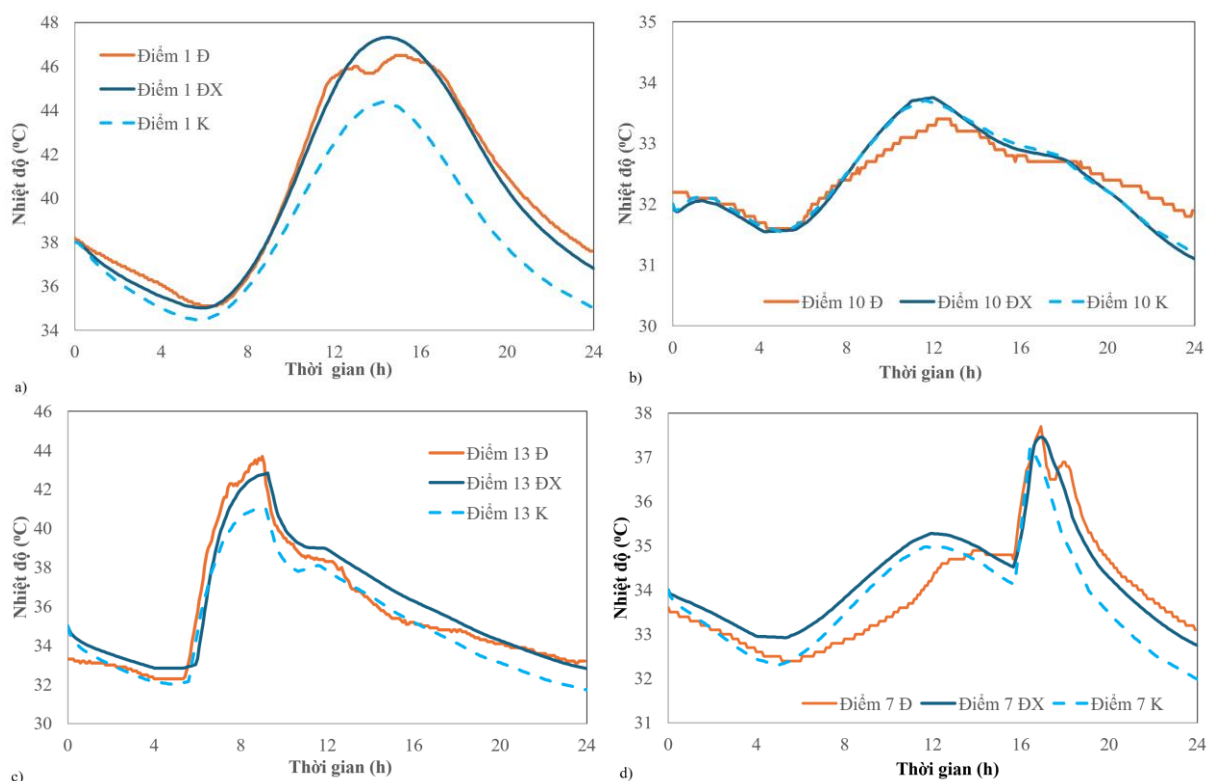
Vật liệu	Khối lượng riêng (kg/m ³)	Độ dẫn nhiệt (W/mK)	Nhiệt dung riêng (J/kg.K)	Độ phát xạ	Khả năng hấp thụ
Bê tông	2400	2,3	990	0,9	0,7
Bê tông nhựa	2000	1,7	900	0,9	0,87



Hình 13. So sánh dữ liệu nhiệt độ mô phỏng và đo được trên Mặt cắt 1, Cầu Quán Hàu: (a) Bản nấp, (b) Bản đáy, (c) Vách phía Tây và (d) Vách phía Đông (T là “Tính toán” và Đ là “Đo đạc”).

Kết quả mô phỏng cung cấp nhiệt độ cho các điểm đo trên mặt cắt dầm trong bước thời

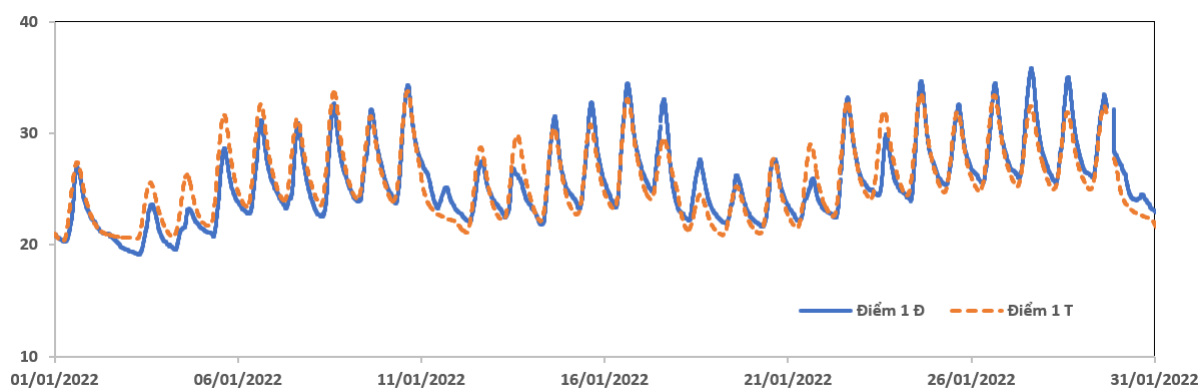
gian 5 phút, tương ứng với bước thời gian đọc dữ liệu thực tế trên các cầu. Hình 14 so sánh giá trị nhiệt độ tính toán và nhiệt độ đo được tại các điểm đo trên bản nắp, bản đáy, vách phía tây, và vách phía đông. Kết quả này cho thấy có sự phù hợp rất tốt giữa kết quả mô phỏng và kết quả đo thực tế, chứng tỏ tính chính xác và độ tin cậy của mô hình mô phỏng trong việc dự đoán sự phân bố nhiệt độ trên cầu.



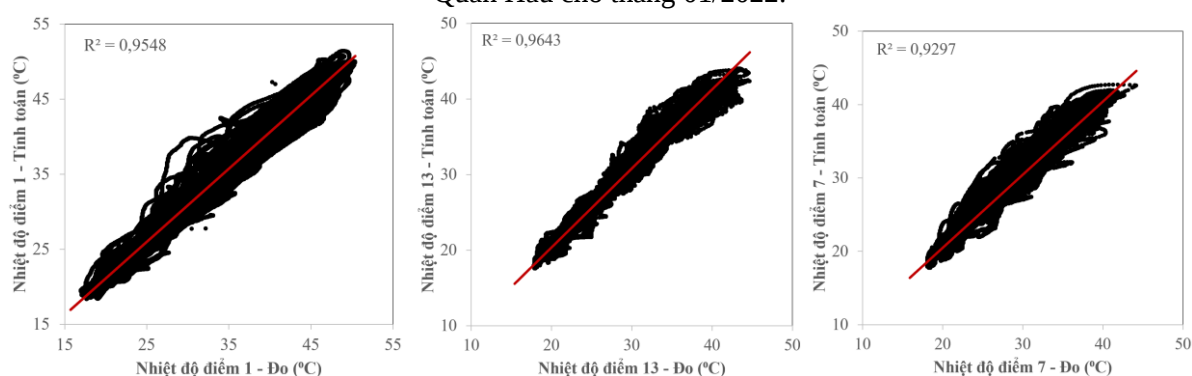
Hình 14. So sánh dữ liệu nhiệt độ đo (Đ) với dữ liệu nhiệt độ mô phỏng theo công thức đề xuất (T) và theo công thức của Kehlbeck (K) cho điểm mặt trên (a), mặt dưới (b), thành phía đông (c) và thành phía tây (d).

Tương ứng với Bảng 2, Hình 14 so sánh kết quả tính toán sự phân bố nhiệt độ tại mặt ngoài ở bản nắp, bản đáy và các thành theo các giá trị CHTC được xác định theo công thức đề xuất và theo công thức của Kehlbeck. Nhìn chung, quy luật sự phân bố nhiệt độ tính được theo cả 2 mô hình khá phù hợp với kết quả đo. Tuy nhiên, giá trị nhiệt độ cực trị mô phỏng ứng với CHTC được xác định theo công thức đề xuất gần với giá trị đo đạc hơn so với giá trị mô phỏng với CHTC được xác định theo Kehlbeck, đặc biệt là ở thành phía đông – thành khuất gió. Công thức Kehlbeck không xét đến ảnh hưởng của tốc độ không khí ở mặt khuất gió nên giá trị CHTC tương ứng có thể cao hơn giá trị thực tế và dẫn đến nhiệt độ mô phỏng của bề mặt bê tông thấp hơn giá trị đo được.

Kết hợp với số liệu về bức xạ mặt trời và tốc độ gió được cung cấp tại [29], sự phân bố nhiệt trên cầu cũng đã được tính toán mô phỏng cho cả năm 2022 với các công thức CHTC nói trên. Hình 15 so sánh dữ liệu nhiệt độ đo được và nhiệt độ mô phỏng cho bề mặt bê tông bản nắp của mặt cắt 1 cầu Quán Hàu cho tháng 1 năm 2022. Hình 16 minh họa mối quan hệ giữa dữ liệu mô phỏng và dữ liệu đo đạc trong suốt năm 2022 cho các điểm đo trên mặt cầu và 2 vách. Các kết quả so sánh này một lần nữa chứng minh tính phù hợp của các công thức xác định CHTC được đề xuất.



Hình 15. So sánh dữ liệu nhiệt độ đo được và mô phỏng tại các bề mặt bản nắp trong Mặt cắt 1, Cầu Quán Hàu cho tháng 01/2022.



Hình 16. Mối quan hệ giữa dữ liệu nhiệt độ đo được và mô phỏng tại các bề mặt bên ngoài ở Mặt cắt 1, Cầu Quán Hàu năm 2022.

6. KẾT LUẬN

Dầm cầu bê tông dạng hộp có cấu tạo mặt cắt phức tạp và điều này có thể ảnh hưởng đáng kể đến sự truyền nhiệt đối lưu trên bề mặt ngoài của chúng. Mặc dù đã có nhiều công thức thực nghiệm để tính toán hệ số truyền nhiệt đối lưu (CHTC) cho các mặt cắt cầu, nhưng hầu hết các công thức này thường bỏ qua các yếu tố quan trọng như cấu hình mặt cắt và hướng gió.

Động lực học chất lưu tính toán (CFD) là một công cụ mạnh mẽ để mô phỏng dòng chảy không khí và, khi kết hợp với phân tích truyền nhiệt, nó có thể tính toán CHTC một cách khá chính xác. Ưu điểm nổi bật nhất của phương pháp này là khả năng xử lý các hình dạng mặt cắt phức tạp, điều mà các phương pháp truyền thống khó có thể thực hiện được. Bài báo này trình bày kết quả từ một nghiên cứu nhằm xác định CHTC cho dầm hộp cầu bê tông bắc qua sông. Nghiên cứu sử dụng mô phỏng CFD kết hợp với phân tích truyền nhiệt với phần mềm Comsol Multiphysics để tính toán CHTC cho sáu mặt cắt dầm hộp riêng biệt, được lấy từ ba cầu được quan trắc nhiệt độ. Dựa trên dữ liệu mô phỏng, các công thức dự đoán CHTC đã được xây dựng, tập trung vào bề mặt ngoài của các bản nắp, bản đáy, mặt thành đón gió và mặt thành khuất gió. Các công thức này được phát triển thông qua phương pháp hồi quy từng bước. Kết quả phân tích cho thấy CHTC chủ yếu chịu ảnh hưởng bởi tốc độ gió, các thông số cấu tạo của mặt cắt và hướng gió. Trong khi đó, tác động của chênh lệch nhiệt độ giữa bề mặt dầm và không khí xung quanh đến CHTC là rất nhỏ. Các giá trị CHTC được tính toán từ các

công thức này, sau đó, được sử dụng để mô phỏng phân bố nhiệt độ trong các cầu đang được quan trắc cho những khoảng thời gian dài. Việc so sánh giữa dữ liệu mô phỏng và dữ liệu đo thực tế cho thấy mức độ tương đồng cao, chứng minh độ chính xác của các công thức trong việc dự đoán và mô phỏng sự phân bố nhiệt độ. Việc so sánh kết quả mô phỏng về nhiệt độ ứng với CHTC được tính toán theo công thức đề xuất và CHTC theo công thức của Kehlbeck cũng cho thấy, ở phạm vi nghiên cứu này, công thức đề xuất cho kết quả phù hợp hơn.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Ibrahim, Ahmed M. Three-dimensional thermal analysis of curved concrete box girder bridges. Concordia University Library, 1995.
- [2]. T.Defraeye, B.Blocken, J. Carmeliet, CFD analysis of convective heat transfer at the surfaces of a cube immersed in a turbulent boundary layer, International Journal of Heat and Mass Transfer, 53 (2010) 297-308. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2009.09.029>
- [3]. G.Maragkos; T. Beji, Review of Convective Heat Transfer Modelling in CFD Simulations of Fire-Driven Flows. Appl. Sci., 11 (2021) 5240. <https://doi.org/10.3390/app11115240>
- [4]. John H Lienhard, A Heat Transfer Textbook: 5th Edition, Courier Dover Publications, 2019.
- [5]. B.Blocken, T.Defraeye, D.Derome, J. Carmeliet, High-resolution CFD simulations for forced convective heat transfer coefficients at the facade of a low-rise building, Building and Environment, 44 (2009) 2396-2412. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2009.04.004>
- [6]. H.Montazeri, CFD analysis of forced convective heat transfer coefficients at windward building facades: Influence of building geometry, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 146 (2015) 102-116. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2015.07.007>
- [7]. TCVN 2737:2023, Loads and Actions (in Vietnamese).
- [8]. Ngo Dang Quang, Nguyen Huy Cuong, Mai Dinh Loc, Dinh Huu Tai, Le Minh Canh, Monitoring the temperature variations and simulation of their effects on stress distribution in concrete box-girder bridges at the service stage, Transport and Communications Science Journal, 73 (2022) 253-267. <https://doi.org/10.47869/tcsj.73.3.4>
- [9]. J.W. Park, Feasibility Study of Micro-Wind Turbines for Powering Wireless Sensors on a Cable-Stayed Bridge. Energies, 5 (2012) 3450-3464. <https://doi.org/10.3390/en5093450>
- [10]. P.Promvongse, P. Promthaisong, S. Skullong, Numerical heat transfer in a solar air heater duct with punched delta-winglet vortex generators, Case Studies in Thermal Engineering, 26 (2021) 101088. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2021.101088>
- [11]. Comsol, The CFD Module User's Guide (comsol.com), 2024.
- [12]. P.J. Richards, R.P. Hoxey, Appropriate boundary conditions for computational wind engineering models using the k- ϵ turbulence model, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 46 & 47 (1993) 145-153.
- [13]. https://www.jmp.com/en_us/software/predictive-analytics-software.html
- [14]. NASA Prediction Of Worldwide Energy Resources (POWER) | Data Access Viewer (DAV), POWER | DAV
- [15]. Federal Highway Administration. Pavement Thermal Performance And Contribution To Urban And Global Climate - References - Sustainable Pavement Program - Sustainability - Pavements.