Tạp chí Khoa học Giao thông vận tải, Tập 73, Số 8 (10/2022), 752-768

Transport and Communications Science Journal

SIMULATION OF TEMPERATURE DISTRIBUTION IN CONCRETE BOX-GIRDER BRIDGES AT THE SERVICE STAGE

Ngo Dang Quang[1], Nguyen Huy Cuong[1*], Mai Dinh Loc[1], Dinh Huu Tai[1], Le Minh Canh[2]

[1]Faculty of Construction Engineering, University of Transport and Communications, No. 3 Cau Giay Street, Hanoi, Vietnam

[2]Faculty of Civil Engineering, Campus in Ho Chi Minh City, University of Transport and Communications, No. 450- 451 Le Van Viet Street, Thu Duc city, Ho Chi Minh City, Vietnam

ARTICLE INFO

TYPE: Research Article
Received: 25/08/2022
Revised: 28/09/2022
Accepted: 01/10/2022
Published online: 15/10/2022
https://doi.org/10.47869/tcsj.73.8.2

[*] *Corresponding author*
Email: nguyenhuycuong@utc.edu.vn; Tel: +84989832425

Abstract. Thermal actions have frequently been related to the cracking of concrete bridges. The primary source of thermal actions is the environmental effect due to solar radiation. This paper presents simulation results to determine the temperature distribution on reinforced concrete box-girder bridges during the service stage. The simulation was carried out in two steps: (a) validate with observed experimental data to check and modify the numerical model, and (b) predict the performance of structures under extreme weather scenarios with the fundamental input data taken from national regulations. In this simulation, solar radiation is particularly calculated, considering sunlight's scattering effect following the sun's orbit. The simulation results agree well with the observed experimental data and are consistent with the publications of many authors worldwide. The thermal gradient data for the box girder obtained from the simulation have some differences compared with the thermal gradient model in the design codes for bridges, especially in the negative temperature gradients and horizontal temperature gradients on the girder's web.

Keywords: monitoring, simulation, temperature variations, solar radiation, box girder, reinforced concrete.

© 2022 University of Transport and Communications

Transport and Communications Science Journal, Vol 73, Issue 8 (10/2022), 752-768

Tạp chí Khoa học Giao thông vận tải

NGHIÊN CỨU MÔ PHỎNG SỰ PHÂN BỐ NHIỆT ĐỘ TRONG DẦM CẦU BÊ TÔNG CỐT THÉP CÓ MẶT CẮT DẠNG HỘP Ở GIAI ĐOẠN KHAI THÁC

Ngô Đăng Quang[1], Nguyễn Huy Cường[1*], Mai Đình Lộc[1], Đinh Hữu Tài[1], Lê Minh Cảnh[2]

[1]Khoa Kỹ thuật xây dựng, Trường Đại học Giao thông vận tải, Số 3 Cầu Giấy, Hà Nội, Việt Nam

[2]Khoa Công trình, Phân hiệu tại Thành phố Hồ Chí Minh, Trường Đại học Giao thông vận tải, Số 450-451 Lê Văn Việt, thành phố Thủ Đức, Thành phố Hồ Chí Minh, Việt Nam

THÔNG TIN BÀI BÁO

CHUYÊN MỤC: Công trình khoa học
Ngày nhận bài: 25/08/2022
Ngày nhận bài sửa: 28/09/2022
Ngày chấp nhận đăng: 01/10/2022
Ngày xuất bản Online: 15/10/2022
https://doi.org/10.47869/tcsj.73.8.2

** Tác giả liên hệ*
Email: nguyenhuycuong@utc.edu.vn; Tel: +84989832425

Tóm tắt. Tác động của nhiệt độ là một trong những nguyên nhân gây ra nứt cho công trình cầu bê tông, đặc biệt là do ảnh hưởng từ bức xạ mặt trời. Bài báo trình bày kết quả mô phỏng xác định sự phân bố nhiệt độ trong dầm cầu bê tông cốt thép có mặt cắt dạng hộp trong giai đoạn khai thác. Việc mô phỏng được thực hiện theo hai bước là (a) mô phỏng đối chứng với số liệu quan trắc nhằm kiểm tra, hiệu chỉnh mô hình tính và (b) mô phỏng dự đoán với một số kịch bản thời tiết cực đoan với số liệu cơ bản được lấy từ Quy chuẩn xây dựng. Trong nghiên cứu mô phỏng này, bức xạ mặt trời được tính toán ở mức độ chi tiết nhất dựa trên các công bố gần đây với việc xem xét tác động của tán xạ quanh mặt trời theo đúng quỹ đạo của mặt trời. Các kết quả mô phỏng đều phản ánh đúng số liệu quan trắc và phù hợp với các công bố của nhiều tác giả trên thế giới. Các số liệu mô tả gradient nhiệt cho mặt cắt dạng hộp thu được từ kết quả mô phỏng có một số khác biệt so với mô hình gradient nhiệt của tiêu chuẩn thiết kế cầu, đặc biệt là ở mô hình gradient nhiệt âm và gradient nhiệt theo phương ngang trên thành dầm.

Từ khóa: quan trắc, mô phỏng, biến thiên nhiệt độ, bức xạ mặt trời, dầm hộp, bê tông cốt thép.

© 2022 Trường Đại học Giao thông vận tải

1 GIỚI THIỆU

Trong các dầm cầu bê tông cốt thép (BTCT) có mặt cắt dạng hộp, do không khí bên trong lòng hộp ít được trao đổi với bên ngoài nên nhiệt độ trong hộp tương đối ổn định trong khi nhiệt độ bên ngoài thay đổi liên tục theo điều kiện thời tiết và bức xạ mặt trời. Điều này dẫn đến quy luật thay đổi nhiệt độ trên các mặt cắt dầm cầu dạng hộp khác với quy luật thay đổi nhiệt độ trên dầm có mặt cắt dạng hở. Đặc biệt hơn, sự thay đổi nhiệt độ lớn còn có cả theo phương ngang trên thành dầm. Điều này đã được chứng minh trên cơ sở các kết quả quan trắc, nghiên cứu được công bố trong các công trình [1], [2], [3] , v.v. Tuy nhiên, trong tiêu chuẩn thiết kế cầu của nước ta hiện nay, TCVN 11823:2007 [4], mô hình gradient nhiệt mới chỉ xét đến sự biến thiên nhiệt độ theo phương đứng mà chưa xét đến sự biến thiên nhiệt độ theo phương ngang.

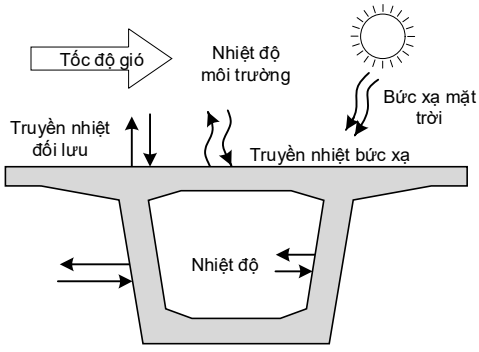
Ở nước ta, dự án đầu tiên về quan trắc nhiệt độ trên dầm cầu BTCT dạng hộp đã được triển khai từ năm 2021. Các kết quả quan trắc này ở nước ta khá phù hợp với các kết quả đã được công bố trên thế giới [5]. Tuy nhiên, với thời gian quan trắc chưa thật dài, khoảng hơn 1 năm, các số liệu thu được chưa đủ để phản ánh được ảnh hưởng của môi trường đến sự phân bố nhiệt độ trong kết cấu ở cả vòng đời của nó. Nhằm mục đích xây dựng được mô hình phân bố nhiệt độ (mô hình gradient nhiệt) cho các cầu dầm hộp ở nước ta, phương pháp mô phỏng máy tính kết hợp kết quả quan trắc đã được áp dụng. Phương pháp này cũng đã được nêu trong nhiều nghiên cứu như [6], [7], [8], v.v.

Quá trình mô phỏng được thực hiện theo hai bước là (a) mô phỏng đối chứng với kết quả đo và (b) mô phỏng dự đoán. Việc mô phỏng đối chứng với kết quả đo nhằm mục đích đánh giá tính phù hợp của mô hình để, trên cơ sở đó, thực hiện mô phỏng dự đoán. Mục đích của mô phỏng dự đoán là xác định các quy luật thay đổi nhiệt độ trong các bộ phận của dầm cầu. Công cụ mô phỏng là phương pháp phần tử hữu hạn với các phương trình truyền nhiệt phổ biến và được thực hiện trên phần mềm máy tính COMSOL Multiphysics [8]. Bên cạnh các tính chất của vật liệu, các số liệu đầu vào của bài toán truyền nhiệt như nhiệt độ không khí bên ngoài và bên trong cầu, tốc độ gió, v.v. được lấy trực tiếp từ kết quả quan trắc trong khi các số liệu về lượng bức xạ mặt trời được hiệu chỉnh từ Quy chuẩn xây dựng Việt Nam (QCXD) [5] hoặc tính toán theo các phương pháp được nêu trong [9]. Bức xạ mặt trời được xét đến bao gồm 3 thành phần là trực xạ (bức xạ trực tiếp), tán xạ và phản xạ. Tán xạ lại được chia thành "tán xạ phân bố đều" trên toàn vòm trời và "tán xạ quanh mặt trời". Trực xạ và tán xạ quanh mặt trời có hướng tác dụng thay đổi theo thời gian trong ngày.

Bài báo này trình bày phương pháp và một số kết quả mô phỏng điển hình về sự phân bố nhiệt độ (gradient nhiệt) trong dầm cầu BTCT có mặt cắt dạng hộp ở nước ta.

2 TỔNG QUAN VỀ NGUYÊN TẮC TÍNH TOÁN NHIỆT ĐỘ TRONG KẾT CẤU Ở GIAI ĐOẠN KHAI THÁC

Trong giai đoạn khai thác, sự thay đổi nhiệt độ tại các vị trí của dầm bê tông phụ thuộc vào nhiệt độ môi trường, gió và đặc biệt là bức xạ mặt trời (Hình 1). Sự phân bố nhiệt độ tại các vị trí trên



Hình 1. Các yếu tố tác động đến sự phân bố nhiệt độ trên dầm cầu.

dầm cầu trong giai đoạn khai thác có thể được tính toán bằng phương trình vi phân truyền nhiệt Fourier

(1), các phương trình điều kiện biên (2) và trạng thái ban đầu (3). Trong các phương trình này, T là nhiệt độ tại thời điểm t của điểm có toạ độ x, y, z, ρ là mật độ, c là nhiệt dung riêng, k là hệ số dẫn nhiệt của vật liệu, D_x, D_y, D_z lần lượt là côsin chỉ phương của véc tơ pháp tuyến của các bề mặt kết cấu và q là thông lượng nhiệt trao đổi qua bề mặt kết cấu. Ở giai đoạn khai thác, sự biến thiên nhiệt độ trong kết cấu bê tông chỉ do sự trao đổi nhiệt với bên ngoài sinh ra.

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}\left(k \frac{\partial T}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(k \frac{\partial T}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(k \frac{\partial T}{\partial z}\right) \tag{1}$$

$$k \frac{\partial T}{\partial x} D_x + k \frac{\partial T}{\partial y} D_y + k \frac{\partial T}{\partial z} D_z + q = 0 \tag{2}$$

$$T_{t=0} = f\left(x, y, z\right) \tag{3}$$

Theo Elbadry *và nnk.* [10] và Lu *và nnk.* [11] thông lượng nhiệt q có thể được chia thành các thành phần ứng với sự truyền nhiệt bằng bức xạ sóng ngắn, q_S, bức xạ sóng dài, q_L, và đối lưu, q_C, như sau

$$q = q_S + q_L + q_C \tag{4}$$

Đối với các công trình cầu, q_S, được xác định phụ thuộc lượng bức xạ mặt trời đến được bề mặt kết cấu và được xác định theo công thức

$$q_S = \alpha I_s \tag{5}$$

Với α là hệ số hấp thụ bức xạ của vật liệu bề mặt và I_s là tổng bức xạ mặt trời tiếp cận được bề mặt kết cấu. Cách xác định I_s sẽ được trình bày trong mục 3.2.

Thành phần q_L phản ánh sự truyền nhiệt bằng bức xạ sóng dài, được xác định theo công thức:

$$q_L = \varepsilon \sigma \left(T_s^4 - T_a^4\right) \tag{6}$$

Với ε là hệ số phát xạ nhiệt, σ là hằng số Stefan-Boltzmann, T_s là nhiệt độ bề mặt kết cấu và T_a là nhiệt độ môi trường.

Thành phần truyền nhiệt qua đối lưu giữa bề mặt kết cấu và môi trường không khí được xác

định như sau:

$$q_c = h_C\left(T_s - T_a\right) \tag{7}$$

Trong đó, h_C là hệ số truyền nhiệt qua đối lưu, phụ thuộc vào vận tốc không khí của môi trường (vận tốc gió) cũng như vị trí tương đối của bề mặt trong kết cấu.

3 XÁC ĐỊNH THAM SỐ

3.1 Tính chất của vật liệu

Các tính chất quan trọng của vật liệu cần thiết cho bài toán phân tích nhiệt bao gồm khối lượng riêng (mật độ), nhiệt dung riêng, hệ số dẫn nhiệt, hệ số hấp thụ bức xạ, hệ số phát xạ nhiệt.

Đối với bê tông kết cấu (bê tông xi măng), theo Tayşi *và nnk.* [12], trừ giá trị về khối lượng riêng, các tính chất về nhiệt của bê tông đòi hỏi các phương pháp và thiết bị thí nghiệm đặc biệt để xác định. Do đó, các giá trị này thường được lựa chọn từ các công bố khoa học. Các tác giả cũng đã liệt kê, phân tích các giá trị này. Cụ thể về các tính chất có liên quan đến phân tích nhiệt của của bê tông kết cấu được thống kê như sau

- Khối lượng riêng, ρ: thay đổi từ 2200 đến 2400 kg/m^3.
- Nhiệt dung riêng, c: thay đổi trong khoảng 753 to 1200 J/kg·°K.
- Hệ số dẫn nhiệt, k: thay đổi trong khoảng 1,0 đến 3,6 W/m·°K. Miền giá trị được sử dụng phổ biến là từ 1,3 đến 2,5 W/m·°K.
- Hệ số hấp thụ bức xạ, α: biến thiên trong khoảng 0,5 đến 0,8. Trong đó, giá trị được sử dụng phổ biến thay đổi trong khoảng từ 0,5 đến 0,7.
- Hệ số phát xạ nhiệt, ε: biến thiên trong khoảng 0,85 đến 0,95.

Tayşi *và nnk.* [12] cũng đã nghiên cứu khảo sát tham số và xác định, trong các tham số kể trên, hệ số hấp thụ bức xạ có ảnh hưởng nhiều nhất trong khi khối lượng riêng và hệ số phát xạ nhiệt có ảnh ít nhất đến sự thay đổi nhiệt độ trong dầm hộp bằng bê tông.

Pan *et al.* [13] đã có một nghiên cứu chi tiết và cho thấy, các tính chất nhiệt của *bê tông asphalt* phụ thuộc vào chất kết dính, cốt liệu cũng như trạng thái nhiệt độ. Tuy nhiên, giá trị của các tính chất này thay đổi trong một miền không lớn. Trong đó, nhiệt dung riêng thay đổi trong khoảng 800 to 1100 J/kg·K, hệ số dẫn nhiệt trong khoảng 1,56 đến 2,24 W/m·K, hệ số phát xạ nhiệt biến thiên trong khoảng 0,8 đến 1,0. Hệ số hấp thụ bức xạ nhiệt thay đổi trong khoảng 0,92 đến 1,0.

Trong nghiên cứu này, các giá trị mô tả tính chất của vật liệu được lấy ở trong miền khuyến cáo trên và được hiệu chỉnh sao cho kết quả tính toán phù hợp với kết quả đo đối chứng.

3.2 Bức xạ mặt trời

Bức xạ mặt trời đến mặt kết cấu được chia thành 3 thành phần chính là trực xạ (bức xạ trực tiếp) tán xạ và phản xạ như sau [9]:

$$I_s = I_b + I_d + I_a \tag{8}$$

Với I_b là bức xạ trực tiếp (beam radiation) và I_d là tán xạ (diffused radiation) và I_a là phản xạ từ môi trường lên kết cấu (albedo). Các nghiên cứu [9], [10], [13] và [14] đã trình bày chi tiết phương pháp xác định các đại lượng này. Bài báo này chỉ nêu các công thức sẽ được sử dụng trực tiếp trong nghiên cứu.

$$I_b = I_{sc} k_T \cos\theta \tag{9}$$

$$I_d = I_{sc}\left(0,271 - 0,294 k_T\right) \tag{10}$$

$$I_a = \left(I_b + I_d\right)\rho_a \left(\frac{1-\cos\beta}{2}\right) \tag{11}$$

$$k_T = 0,9^{k_a t_u / \sin\left(\theta_a + 0,5^\circ\right)} \tag{12}$$

Ở đây, $I_{sc} = 1360\ \mathrm{W/m^2}$ là hằng số bức xạ mặt trời – cường độ bức xạ mặt trời ở ngoài bề mặt khí quyển, k_T là hệ số truyền, xét đến sự suy giảm bức xạ mặt trời trong không khí và θ là góc giữa tia mặt trời và pháp tuyến của bề mặt kết cấu, k_a là tỷ số giữa áp suất không khí ở cao kết cấu với áp suất không khí ở cao độ mặt nước biển (Bảng 1), t_u là hệ số xét đến mức độ mây che và ô nhiễm không khí làm giảm bức xạ mặt trời và θ_a là góc cao độ mặt trời. Hệ số t_u có giá trị từ 1,8 cho bầu trời trong, không mây đến khoảng 8,0 cho bầu trời với không khí trong khu công nghiệp hay trời đầy mây [13], [14]. ρ_a là hệ số phản xạ của môi trường và được liệt kê khá chi tiết trong [14]. Một số giá trị có thể được sử dụng trong tính toán cho các công trình cầu phổ biến được liệt kê trong Bảng 2. β là góc giữa bề mặt kết cấu tính toán và mặt nằm ngang.

Bảng 1. Hệ số k_a [13].

Cao độ so với mực nước biển (m)	Hệ số k_a
0	1,0
500	0,94
1000	0,89
1500	0,84
2000	0,79

Bảng 2. Hệ số ρ_a cho một số dạng bề mặt môi trường.

Bề mặt môi trường (m)	Hệ số ρ_a
Nước lạnh	0,05 – 0,18
Cát	0,15 – 0,45
Bê tông	0,17 – 0,27

Tán xạ lại được chia thành tán xạ phân bố đều (isotropic radiation) $I_{d,iso}$ và tán xạ quanh mặt trời (circumsolar radiation), $I_{d,cs}$. Ảnh hưởng của bức xạ trực tiếp, I_b, và tán xạ quanh mặt trời, $I_{d,cs}$, phụ thuộc vào độ nghiêng và mức độ che khuất của bề mặt kết cấu. Tán xạ $I_{d,iso}$ và $I_{d,cs}$ lên bề mặt kết cấu có thể được xác định theo các công thức (13) và (14).

$$I_{d,iso} = I_d\left(1 - A_i\right)\left(\frac{1+\cos\beta}{2}\right) \tag{13}$$

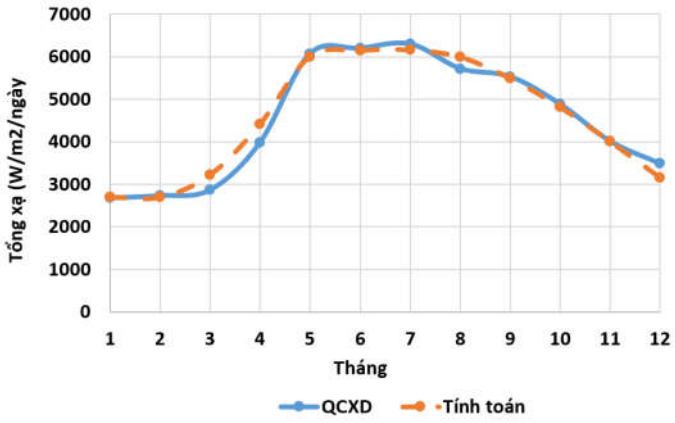
$$I_{d,cs} = I_d A_i \frac{\cos\theta}{\cos\alpha} \tag{14}$$

Trong đó, A_i là tỷ số giữa trực xạ tính trên mặt nằm ngang và hằng số bức xạ mặt trời.

Khi tính toán ảnh hưởng của bức xạ trực tiếp và tán xạ gần mặt trời lên thành dầm, phần bóng che khuất của cong xon lên thành dầm cần được xét đến. Theo [10], chiều cao khuất nắng của thành dầm do cong xon mặt cầu gây ra, h_{sh}, có thể được tính như sau

$$h_{sh} = h = l_c \frac{\tan\theta_a}{\sin\left(90 - \gamma - \gamma'\right)\sin\beta - \cos\beta\tan\theta_a} \tag{15}$$

Trong đó, l_c là chiều dài của cong xon, γ là góc phương vị của pháp tuyến của mặt thành dầm và γ' là góc phương vị của mặt trời.



Hình 2. So sánh kết quả tính toán tổng xạ trên mặt bằng với số liệu của Quy chuẩn xây dựng.

Hiện nay, QCXD [5] cung cấp giá trị trị trực xạ và tán xạ tại một số địa phương ở nước ta. Tuy nhiên, các giá trị này có dạng trung bình theo tháng nên có độ chi tiết không cao. Dựa trên các công thức chi tiết được nêu trong các tài liệu [9], [10] và [13], các tác giả của nghiên cứu này đã xây dựng một hệ thống bảng tính cho phép tính các giá trị bức xạ mặt trời theo thời gian tại các vị trí bất kỳ ở một cầu bất kỳ. Số liệu đầu vào của bảng tính bao gồm vị trí

địa lý của cầu (kinh độ, vĩ độ), cao độ so với mực nước biển, hướng của mặt kết cấu được tính, mức độ che phủ của mây hoặc tầm nhìn lên bầu trời. Độ chính xác của các số liệu từ bảng tính đã được kiểm chứng với các giá trị của QCXD (Hình 2).

3.3 Tốc độ gió

Tốc độ gió tại từng công trình cầu có thể được lấy từ số liệu ở các trạm khí tượng gần đó. QCXD [5] cũng cung cấp các giá trị về vận tốc gió trung bình ngày cho các tháng trong năm. Trong nghiên cứu này, các số liệu được sử dụng để tính toán đối chứng được lấy từ nguồn số liệu môi trường theo giờ ở các sân bay [15] gần các công trình đang được quan trắc và trong mô phỏng dự đoán, tốc độ gió được lấy theo giá trị trung bình được cung cấp trong QCXD.

3.4 Nhiệt độ không khí

Trong tính toán đối chứng, nhiệt độ không khí được lấy trực tiếp từ các giá trị quan trắc hiện trường. Trong các tính toán mô phỏng dự đoán, các giá trị cơ bản của nhiệt độ được lấy từ số liệu của QCXD [5] bao gồm nhiệt độ không khí trung bình, nhiệt độ không khí cao nhất trung bình và nhiệt độ không khí thấp nhất trung bình ứng với các kịch bản tính toán khác nhau. Trong tính toán dự đoán, sự biến thiên nhiệt độ không khí của môi trường, T_a, được mô tả bằng phương trình sau [14], [16]:

$$T_a\left(t\right) = T_{avg} + \Delta T_a \times \cos\left(2\pi\left(t - t_{T\max}\right)\Big/24\right) \tag{16}$$

Trong đó, t là thời gian trong ngày, tính bằng giờ, T_{avg} là nhiệt độ trung bình trong ngày, ΔT_a là một nửa biên độ nhiệt độ trong ngày và $t_{T\max}$ là thời điểm nhiệt độ trong ngày đạt giá trị lớn nhất.

3.5 Hệ số đối lưu

Hệ số đối lưu được sử dụng trong tính toán truyền nhiệt trên các công trình cầu có thể được xác định từ các công thức kinh nghiệm được nêu trong [12] như sau với v là vận tốc không khí.

$$h_C = 3,83v + 4,67 \tag{17}$$

$$h_C = 3,83v + 2,17 \tag{18}$$

$$h_C = 3,83v + 3,67 \tag{19}$$

$$h_C = 3,5 \tag{20}$$

Trong đó, các công thức (17), (18) và (19) áp dụng lần lượt cho mặt trên dầm, thành dầm, mặt dưới dầm và công thức (20) áp dụng trong lòng hộp.

4 PHƯƠNG PHÁP MÔ PHỎNG

4.1 Công cụ mô phỏng

Việc tính toán, mô phỏng sự biến thiên nhiệt độ bằng phương pháp phần tử hữu hạn, thực chất, là việc giải bằng phương pháp phần tử hữu hạn các phương trình vi phân nêu trên. Một số phần mềm như COMSOL [8], ANSYS, v.v. cung cấp các gói ứng dụng chuyên biệt cho bài toán mô phỏng nhiệt trong kết cấu với mô hình truyền nhiệt ổn định hoặc không ổn định, có thể áp dụng cho các bài toán thực tế. Trong nghiên cứu này, phần mềm COMSOL sẽ được sử dụng. Phần mềm này cũng đã được sử dụng có hiệu quả trong nhiều bài toán tương tự [7], [12]. COMSOL cho phép mô phỏng nhiệt kết hợp cơ học như tính toán ứng suất, biến dạng nhiệt trong mô hình 2 chiều hoặc 3 chiều [5]. Với số liệu đầu vào, COMSOL chấp nhận dạng bảng như các số liệu quan trắc về nhiệt độ không khí hay dạng phương trình như (15), (16), v.v. Để mô phỏng truyền nhiệt qua đối lưu, ngoài việc sử dụng hệ số đối lưu như được tính ở mục 3.5, COMSOL cũng cung cấp các mô hình tính toán thực tế như "đối lưu cưỡng bức", "đối lưu tự nhiên", v.v. với các hướng bề mặt khác nhau như hướng lên, hướng xuống, hướng nghiêng, v.v. Các mô hình rất phù hợp và đã được sử dụng cho bài toán mô phỏng này.

Trong nghiên cứu được nêu ở đây, mô hình tính có dạng 2 chiều biến dạng phẳng. Phần tử được sử dụng là phần tử bậc cao của COMSOL.

4.2 Các trường hợp mô phỏng

Việc mô phỏng được thực hiện với các trường hợp sau:

a) Mô phỏng đối chứng với kết quả quan trắc thực tế

Mục đích của việc mô phỏng này là kiểm tra, hiệu chỉnh lại mô hình tính cũng như các số liệu đầu vào dựa trên một số kết quả quan trắc điển hình đã được thực hiện trên các công trình cầu trong khoảng thời gian 1 năm.

b) Mô phỏng dự đoán

Mục đích của việc mô phỏng dự đoán này là xây dựng được mô hình gradient nhiệt trong các dầm cầu bê tông cốt thép có mặt cắt dạng hộp ứng với các kịch bản bức xạ mặt trời và nhiệt độ môi trường khác nhau. Cụ thể là:

i. Bức xạ mặt trời cao và nhiệt độ không khí trung bình cao (BXC-NĐTBC), mô tả tác động của môi trường trong giai đoạn thời tiết cao điểm của mùa hè.

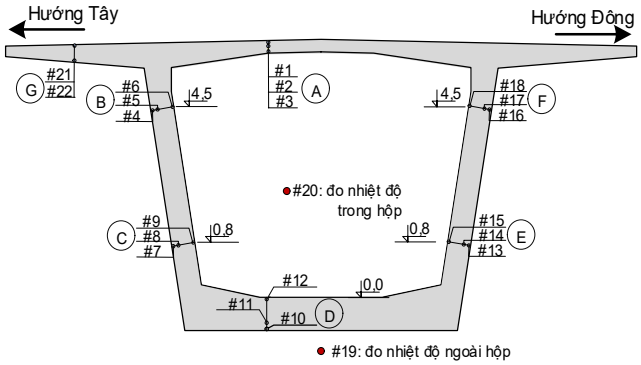
ii. Bức xạ mặt trời không đáng kể và nhiệt độ không khí thay đổi từ trung bình cao trong tháng về trung bình thấp trong tháng (NĐTBC-TBT); mô tả mô tả tác động của môi trường trong giai đoạn thời tiết thay đổi mạnh của mùa đông.

5 KẾT QUẢ MÔ PHỎNG

5.1 Mô phỏng đối chứng với kết quả quan trắc thực tế

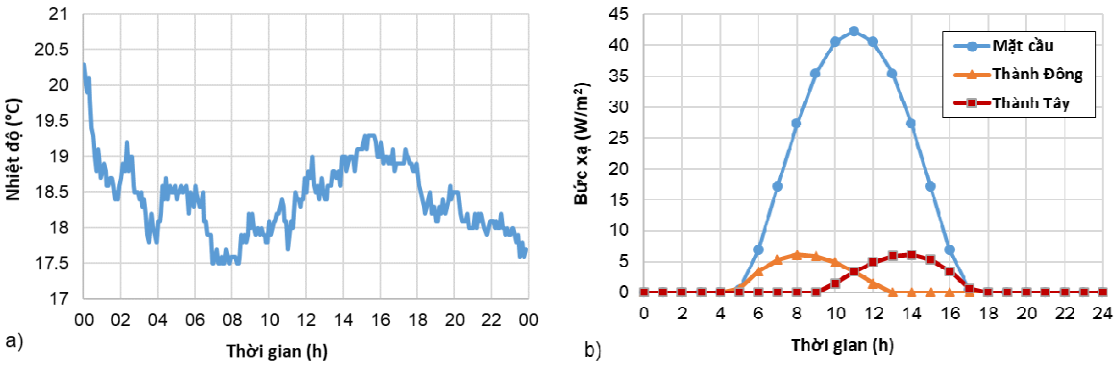
Như được nêu trong [5], một dự án quan trắc nhiệt độ trên 3 công trình cầu đại diện cho 3 vùng khí hậu xây dựng ở nước ta đã được thực hiện. Cụ thể là cầu Vĩnh Thịnh đại diện cho

vùng khí hậu miền Bắc, cầu Quán Hàu, đại diện cho vùng khí hậu miền Trung và cầu Gò Găng đại diện cho vùng khí hậu miền Nam. Với thời gian quan trắc hơn 1 năm, các kết quả thu được có thể phản ánh tương đối đầy đủ sự thay đổi nhiệt độ trong cầu qua các mùa và, do đó, có thể được sử dụng để đánh giá độ tin cậy của việc mô phỏng. Hình 3 minh hoạ cách bố trí điểm đo (cảm biến) trên một mặt cắt cầu. Tổng cộng có 20 điểm đo được bố trí thành 7 vị trí trên bản mặt cầu, thành cầu và bản đáy. Nói chung, tại mỗi vị trí, điểm đo ngoài cùng cách mặt ngoài bê tông khoảng 1 cm, điểm tiếp theo cách điểm đo ngoài 5 cm và điểm trong cùng cách mặt bê tông trong 1 cm. Bên cạnh đó, có 1 cảm biến đo nhiệt độ không khí bên ngoài và 1 cảm biến đo nhiệt độ không khí bên trong mặt cắt dầm cầu.

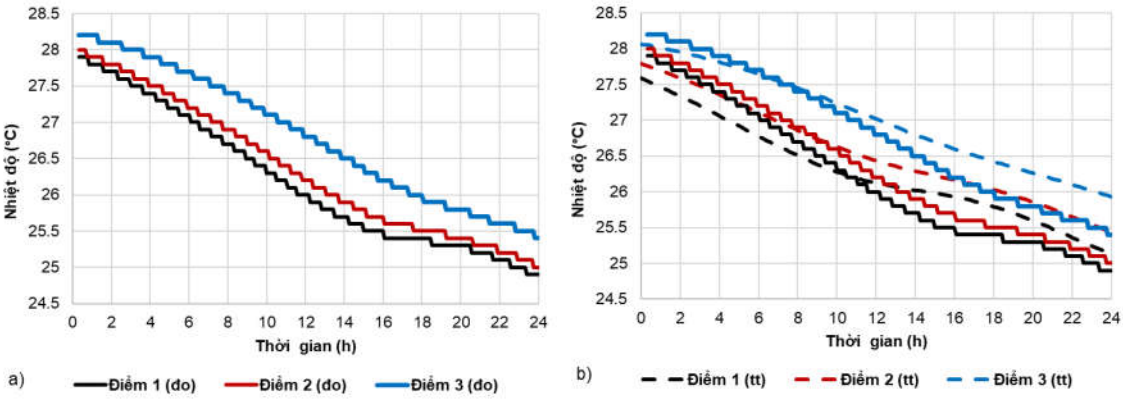


Hình 3. Sơ đồ bố trí cảm biến trên mặt cắt dầm hộp bê tông cốt thép.

a. Nhiệt độ ở cầu Vĩnh Thịnh



Hình 4. Nhiệt độ không khí ngoài trời và bức xạ tính toán ở cầu Vĩnh Thịnh.



Hình 5. So sánh nhiệt độ quan trắc (a) và tính toán (b) tại các điểm trên mặt cầu.

Ngày 17/4/2022 ở khu vực cầu Vĩnh Thịnh có đợt gió mùa mạnh làm nhiệt độ không khí giảm mạnh. Do trời đầy mây nên bức xạ mặt trời cũng rất nhỏ. Kết quả đo nhiệt độ không khí ngoài trời được thể hiện trên Hình 4a. Bức xạ mặt trời được tính toán dựa trên phương pháp được nêu trong mục 3.2 ứng với mức độ mây che phủ (tầm nhìn) được cung cấp từ số liệu của sân bay Nội Bài là trên 90% ứng với hệ số $t_u = 8$ (Hình 4b). Tốc độ gió trung bình cũng được lấy từ số liệu của sân bay Nội Bài là 1,8 m/s.

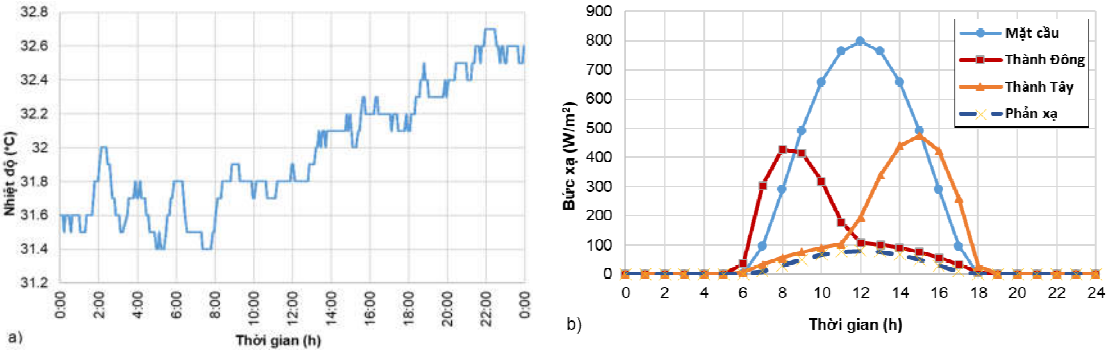
Kết quả tính toán và kết quả quan trắc cho các điểm trên bản mặt cầu được so sánh trên Hình 5. Có thể thấy rằng, kết quả mô phỏng khá phù hợp với kết quả quan trắc cả ở các giá trị tuyệt đối và quy luật biến thiên của nhiệt độ.

Bảng 3. Các tham số vật liệu của bê tông kết cấu được sử dụng trong mô hình mô phỏng.

	Bê tông kết cấu	Bê tông nhựa
Khối lượng riêng	24.000 kg/m^3	22.000 kg/m^3
Hệ số giãn nở nhiệt	10·10E^{-6}	10·10E^{-6}
Hệ số dẫn nhiệt	1,8 W/(m·°K)	1,2 W/(m·°K)
Hệ số phát xa nhiệt	0,9	0,9
Hệ số hấp thụ bức xạ	0,7	1,0

a. Nhiệt độ ở cầu Quán Hàu

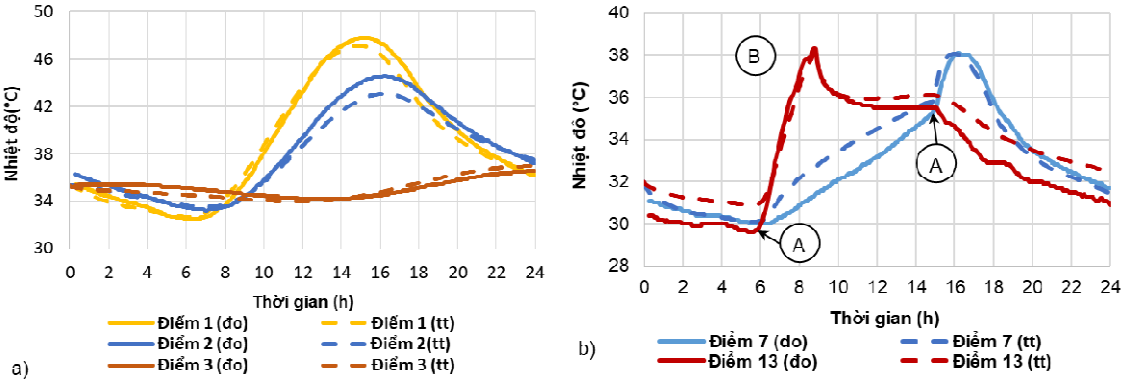
Nhiệt độ ở cầu Quán Hàu được tính ứng với ngày 26/4/2022, là ngày nắng mạnh đầu tiên trong năm ở khu vực cầu. Các thông số về vật liệu được sử dụng tương tự như ở cầu Vĩnh Thịnh (Bảng 3). Nhiệt độ không khí được lấy từ số liệu quan trắc như được thể hiện trên Hình 6a. Bức xạ mặt trời được tính toán theo tầm nhìn của bầu trời với độ che phủ của mây là 20% được cung cấp từ số liệu thời tiết của sân bay Huế được thể hiện trên Hình 6b. Tốc độ gió trung bình cũng được lấy từ nguồn số liệu này là 2,2 m/s. Hệ số phản xạ trong tính toán được lấy bằng 0,1, tương ứng với giá trị hệ số phản xạ của mặt nước theo Bảng 2.



Hình 6. Nhiệt độ không khí và tổng bức xạ mặt trời tính toán lên các mặt của cầu Quán Hàu.

Việc so sánh các kết quả tính toán và quan trắc cho một số điểm điển hình được thể hiện trên Hình 7. Có thể thấy kết quả tính toán đã phản ánh khá chính xác kết quả quan trắc ở cả những thời điểm ánh sáng mặt trời bắt đầu chiếu lên thành cầu, thời điểm ánh sáng mặt trời lên thành

cầu bị cong xon mặt cầu che khuất.



Hình 7. So sánh nhiệt độ quan trắc và tính toán tại một số điểm trên cầu: A là điểm thành cầu bắt đầu được chiếu sáng, B là điểm thành cầu bắt đầu bị cong xon che khuất.

5.2 Mô phỏng dự đoán

Để phục vụ cho mô phỏng dự đoán, một cầu có mặt cắt tương tự cầu Vĩnh Thịnh được lựa chọn do dạng mặt cắt này khá phổ biến hiện nay với thành nghiêng và bề rộng ứng với 4 làn xe chạy. Trục dọc cầu được giả định là Bắc – Nam và, tương ứng, pháp tuyến của các mặt thành cầu có hướng Đông và Tây. Giả thiết này dẫn đến bức xạ mặt trời lên thành dầm vào mùa hè là lớn nhất ở cả phía Đông (buổi sáng) và phía Tây (buổi chiều).

a. Số liệu tính toán

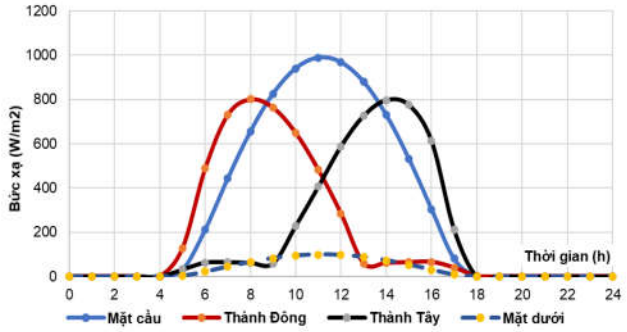
- *Trường hợp bức xạ mặt trời cao và nhiệt độ không khí trung bình cao (BXC-NĐTBC)*

Tác động lớn nhất gây biến đổi nhiệt độ trên cầu là bức xạ mặt trời. Do đó, địa điểm được lựa chọn để tính toán là Nha Trang. Đây là một trong những địa điểm có cường độ bức xạ mặt trời cao nhất nước ta [21]. Thời điểm được chọn để tính toán là ngày 15/7, là một trong những ngày có bức xạ mặt trời lớn nhất. Theo các phương pháp được nêu ở trên, tổng xạ mặt trời tính toán cho các vị trí trên dầm cầu được thể hiện trên Hình 8. Đây là các giá trị được tính ứng với mức che phủ của mây là 10% ứng với hệ số $t_u = 1,8$. Đối với mặt cầu nằm ngang, tổng xạ tính toán là 7580 W/m^2/ngày. Nhiệt độ không khí được sử dụng trong mô phỏng là giá trị trung bình cao và biên độ nhiệt độ trong ngày ứng với tháng 7 của Nha Trang, theo QCXD [5], lần lượt là 32,5 °C và 7 °C. Quy luật biến thiên nhiệt độ không khí được mô tả theo phương trình (16). Tốc độ gió trung bình được lấy là 1,7 m/s [5].

- *Trường hợp bức xạ mặt trời không đáng kể và nhiệt độ không khí thay đổi từ trung bình cao trong tháng về trung bình thấp trong tháng (NĐTBC-TBT)*

Theo số liệu được cung cấp trong QCXD [5], địa phương có mức chênh lệch lớn nhất giữa nhiệt độ không khí trung bình cao và nhiệt độ trung bình thấp trong cùng tháng là Đắc Tô với giá trị là 15,2 °C ở tháng 2. Khi tính toán với trường hợp này, nhiệt độ ban đầu của kết cấu được giả định bằng nhiệt độ trung bình cao của tháng 2 là 29,8 °C và nhiệt độ môi trường

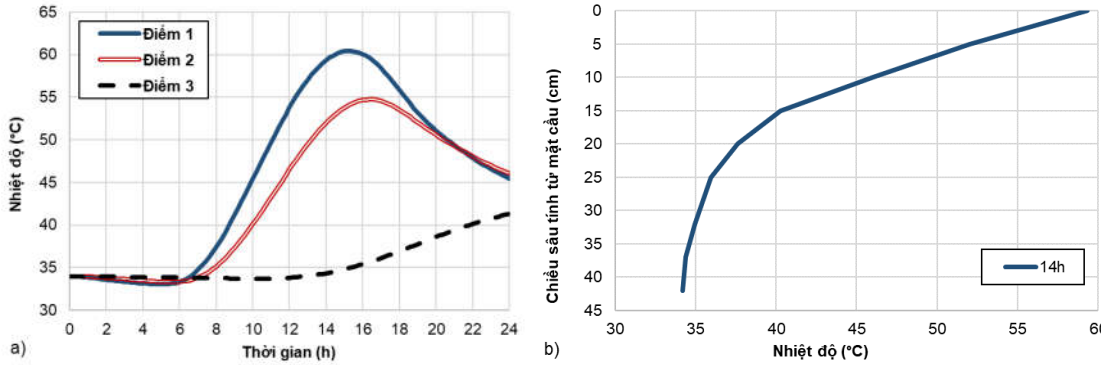
giảm về bằng nhiệt độ trung bình thấp của tháng 2 là 14,6 °C. Quy luật thay đổi nhiệt độ trong ngày cũng được mô tả theo phương trình (16) với biên độ nhiệt độ trong ngày là 15,1 °C [5].



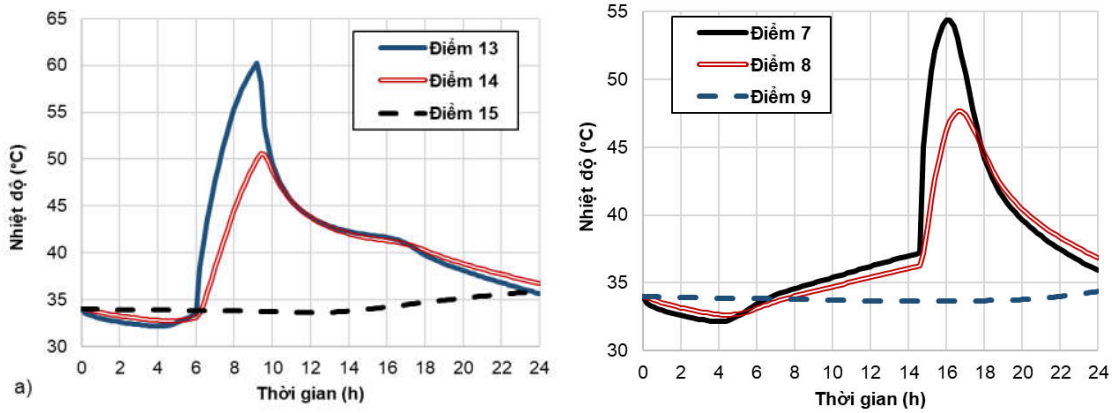
Hình 8. Tổng xạ mặt trời cho các vị trí trên dầm cầu giả định tại Nha Trang.

b. Kết quả tính toán

- *Trường hợp bức xạ mặt trời cao và nhiệt độ không khí trung bình cao (BXC-NĐTBC)*



Hình 9. (a) Sự thay đổi nhiệt độ tính toán được tại các điểm trên mặt cầu, và (b) biểu đồ thể hiện gradient nhiệt lớn nhất theo phương đứng ở trường hợp BXC-NĐTBC.



Hình 10. Nhiệt độ tính toán được tại các điểm (a) trên thành phía Đông, và (b) trên thành phía Tây ở trường hợp BXC-NĐTBC.

Các Hình 9 và Hình 10 thể hiện sự biến thiên nhiệt độ trong ngày ở các điểm tương ứng với

điểm bố trí điểm đo (cảm biến) trên cầu thực (Hình 3) ở mặt cầu, thành phía Đông và thành phía Tây. Nhìn chung, quy luật biến thiên nhiệt độ trên mô hình mô phỏng hoàn toàn tương tự như kết quả đo trên cầu thực. Tuy nhiên, do điều kiện môi trường được chọn thiên về trạng thái gây nhiệt độ lớn lên cầu nên các giá trị tuyệt đối tính được lớn hơn các giá trị đo khá nhiều. Các giá trị này, tuy vậy, cũng phù hợp với các giá trị được công bố trong [12], [14], [22], [23].

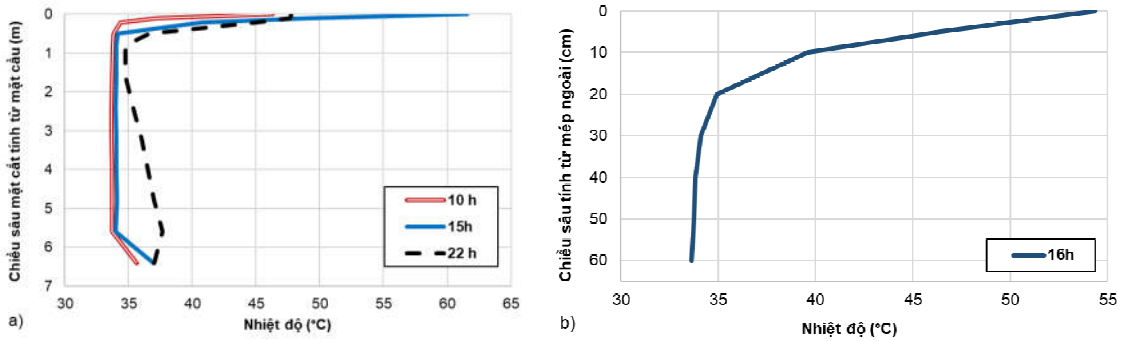
Hình 9b mô tả gradient nhiệt mô phỏng được theo phương đứng cho mặt cầu. Có thể thấy rằng quy luật biến thiên nhiệt độ khá phù hợp với mô hình của tiêu chuẩn TCVN 11823:2017 [4] dù một vài giá trị có khác biệt nhỏ. Bảng 4 và Hình 11a minh hoạ sự biến thiên nhiệt độ theo phương đứng cho toàn bộ mặt cắt cầu theo thành dầm phía Tây ở các thời điểm khác nhau trong ngày. Quy luật biến thiên nhiệt độ này khá phù hợp với các kết quả được công bố trong [14], [23], v.v. và cũng phù hợp với mô hình được nêu trong TCVN 11823:2017 [4]. Gradient nhiệt theo phương ngang trên thành dầm phía Tây ứng với thời điểm nhiệt độ mặt ngoài thành cao nhất được thể hiện trên Bảng 4 và Hình 11b. Quy luật biến thiên nhiệt độ trên thành cũng tương tự như trên mặt cầu. Gradient nhiệt lớn chỉ xảy ra trong khoảng 20 cm gần bề mặt và, từ khoảng chiều sâu 30 cm, gradient nhiệt là khá nhỏ. Phần diện tích mặt cắt chịu ảnh hưởng của gradient nhiệt lớn, do đó, là không nhiều. Sự chênh lệch nhiệt độ này cũng chỉ xảy ra trong khoảng thời gian tương đối ngắn, khoảng 1 giờ, từ 15 giờ đến 16 giờ (xem Hình 11). Do đó, nếu việc đọc dữ liệu, cả quan trắc và mô phỏng) được thực hiện với tần suất lớn thì giá trị này có thể bị bỏ qua.

Bảng 4. Một số giá trị gradient nhiệt dương mô phỏng.

Gradient nhiệt dương đứng (lúc 15h)			**Gradient nhiệt dương ngang phía Tây (16h)**		
Chiều sâu mặt cắt tính từ mặt cầu (m)	Giá trị tuyệt đối (°C)	Chênh lệch (°C)	Chiều sâu tính từ mép ngoài thành (cm)	Giá trị tuyệt đối (°C)	Chênh lệch (°C)
0	61,55	27,54	0	54,36	22,68
0,1	49,15	15,14	5	46,42	12,76
0,2	40,78	6,77	10	39,60	5,94
0,5	34,19	0,18	20	34,93	1,27
2,4	34,01	0,00	30	34,10	0,44
4,8	34,12	0,11	40	33,86	0,20
5,6	34,02	0,01	50	33,74	0,09
6,4	36,94	2,93	60	33,66	0,00

- *Trường hợp bức xạ mặt trời không đáng kể và nhiệt độ không khí thay đổi từ trung bình cao trong tháng về trung bình thấp trong tháng (NĐTBC-TBT)*

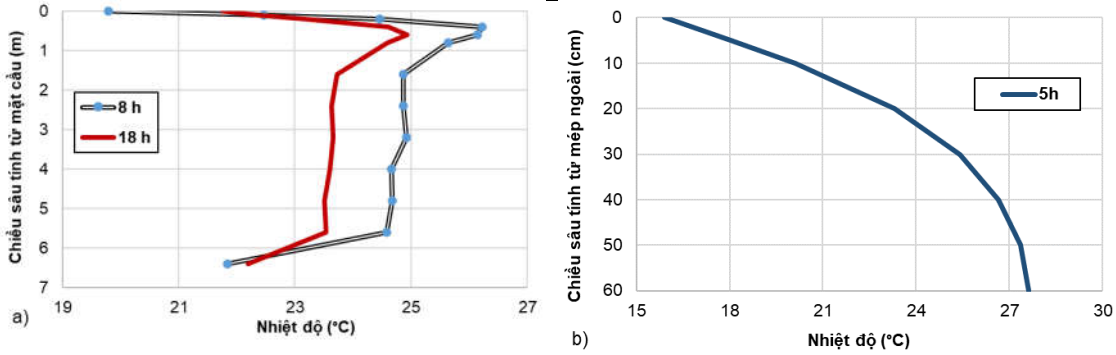
Sự thay đổi nhiệt độ ở các vị trí trên mặt cắt dầm cầu do sự thay đổi nhiệt độ môi trường là tương đối đơn điệu, như trường hợp tính toán đối chứng ở cầu Vĩnh Thịnh (mục 5.1). Do đó, với phạm vi của bài báo này, chỉ một số kết quả mô tả gradient nhiệt được trình bày như trên Bảng 5 và Hình 12. Có thể thấy rằng, khi nhiệt độ môi trường giảm mạnh, nhiệt độ bề mặt ngoài của dầm cầu cũng giảm mạnh theo, gây ra gradient nhiệt âm tương đối lớn cả theo phương đứng và phương ngang.



Hình 11. Biểu đồ mô tả gradient nhiệt (a) theo phương đứng, và (b) theo phương ngang trên thành cầu phía Tây ở trường hợp BXC-NĐTBC.

Bảng 5. Một số giá trị gradient nhiệt âm mô phỏng.

Gradient nhiệt âm đứng (8h)			**Gradient nhiệt âm ngang phía Tây (5h)**		
Chiều sâu mặt cắt tính từ mặt cầu (m)	Giá trị tuyệt đối (°C)	Chênh lệch (°C)	Chiều sâu tính từ mép ngoài thành (cm)	Giá trị tuyệt đối (°C)	Chênh lệch (°C)
0	19,79	-6,44	0	15,90	-11,74
0,1	22,47	-3,76	5	18,04	-9,60
0,2	24,45	-1,77	10	20,11	-7,52
0,5	26,23	0,00	20	23,31	-4,33
2,4	24,86	-1,36	30	25,41	-2,22
4,8	24,68	-1,54	40	26,65	-0,98
5,6	24,59	-1,64	50	27,36	-0,28
6,4	21,84	-4,39	60	27,64	0,00



Hình 12. Biểu đồ mô tả gradient nhiệt (a) theo phương đứng và (b) theo phương ngang trên thành dầm phía Tây ở trường hợp NĐTBC-TBT.

Hình 12a mô tả biến thiên nhiệt độ tính toán được theo phương đứng của mặt cắt dầm. Biểu đồ này cũng phù hợp với các kết quả được nêu trong [6], [12], v.v. cũng như kết quả quan trắc được nêu trong [5]. Kết quả này cũng cho thấy sự chưa phù hợp trong mô hình gradient nhiệt của tiêu chuẩn thiết kế cầu hiện nay [4] đối với mặt cắt dầm hộp. Trong mô hình của tiêu chuẩn, phần gradient nhiệt âm ở khu vực đáy dầm được để bằng 0. Hình 12b thể hiện sự biến thiên nhiệt độ theo phương ngang trên thành dầm. Hình này cho thấy, khi chịu sự giảm nhiệt độ môi trường, gradient nhiệt âm lớn nhất xảy ra ở trong khoảng 20 cm ngoài cùng, tương tự như ở mặt cầu và đáy dầm. Như vậy, có thể thấy rằng, dưới tác động của sự giảm nhiệt độ

môi trường, mặt cắt dầm hộp chịu gradient nhiệt âm khá đồng đều ở các phía và phần chiều dày mặt cắt bê tông chịu gradient nhiệt âm lớn là không nhiều.

6 KẾT LUẬN

Nhằm xác định gradient nhiệt trên các dầm cầu bê tông cốt thép có mặt cắt dạng hộp, bên cạnh việc quan trắc trong thời gian dài, một nghiên cứu mô phỏng đã được thực hiện. Việc mô phỏng được thực hiện theo hai bước là (a) mô phỏng đối chứng nhằm mục đích kiểm tra và hiệu chỉnh mô hình tính dựa trên các số liệu quan trắc thực tế và (b) mô phỏng dự đoán để tính toán, xác định sự phân bố nhiệt độ trên dầm cầu với các dữ liệu môi trường được chọn tương đối cực đoan. Điểm đặc biệt của mô hình mô phỏng trong nghiên cứu này là việc xem xét tác động của thành phần tán xạ phân bố quanh mặt trời đúng theo quỹ đạo của mặt trời. Bên cạnh đó, với việc sử dụng phần mềm COMSOL có hiệu suất tính toán cao nên tần suất lấy dữ liệu là đủ nhỏ để phản ánh được sự thay đổi của bức xạ mặt trời lên các bộ phận kết cấu. Dù số kịch bản mô phỏng là chưa nhiều nhưng các kết quả từ chúng đều nhất quán với các kết quả quan trắc thực địa ở nước ta và phù hợp với các công bố của nhiều nhà khoa học khác trên thế giới.

Một số kết luận chính có được từ kết quả mô phỏng là

- Sự phân bố nhiệt độ theo phương đứng trong trường hợp nhiệt độ môi trường và bức xạ mặt trời lớn, về cơ bản, phù hợp với mô hình gradient nhiệt dương của tiêu chuẩn thiết kế. Một số giá trị tuyệt đối tính toán được có khác biệt nhất định so với số liệu được khuyến nghị trong tiêu chuẩn thiết kế.
- Trong trường hợp nhiệt độ môi trường giảm cùng với bức xạ mặt trời không đáng kể, gradient nhiệt âm theo phương đứng tính toán được có ở cả vùng gần mặt trên và vùng gần mặt dưới dầm cầu. Kết quả này phù hợp với số liệu quan trắc ở trong nước cũng như các công bố ở nước ngoài nhưng có khác biệt với mô hình gradient nhiệt âm của tiêu chuẩn thiết kế cầu TCVN 11823:2017, ở đó gradient nhiệt âm ở đáy dầm được coi bằng không (=0).
- Gradient nhiệt theo phương ngang trên thành dầm có giá trị khá lớn ở vùng gần bề mặt ngoài. Trong các dầm cầu có cong xon mặt cầu lớn và thành dầm nghiêng, thời gian thành dầm chịu ảnh hưởng lớn của gradient nhiệt theo phương ngang là khá ngắn, chỉ trong khoảng 1 giờ và chiều sâu mặt cắt chịu ảnh hưởng này cũng không nhiều.
- Cần phải thực hiện các nghiên cứu, phân tích để đánh giá đầy đủ về ứng xử tổng thể và cục bộ của kết cấu dưới tác động của gradient nhiệt theo phương ngang và gradient nhiệt âm ở đáy dầm là những đại lượng chưa được phản ánh trong tiêu chuẩn thiết kế.

LỜI CẢM ƠN

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Bộ Giao thông vận tải trong đề tài mã số DT214005

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1]. R. A. Imbsen, R. A. Vandershaf, Thermal Effects in Concrete Bridge Superstructure, NCHRP Report 276, 1985.

[2]. J. Hejnic, Effect of temperature changes on prestressed concrete bridges, 7th F.I.P. Congress, New York, 1974.

[3]. S. R. Abid, N. Tayşi, M. Ozakça, Experimental analysis of temperature gradients in concrete box-girders, Construction and Building Materials, 106 (2022) 523-532. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.144

[4]. Bộ Khoa học và Công nghệ, Bộ Giao thông vận tải, TCVN 11823 - 3:2017, 2017.

[5]. Ngô Đăng Quang, Nguyễn Huy Cường, Mai Đình Lộc, Đinh Hữu Tài, Lê Minh Cảnh, Quan trắc sự biến thiên nhiệt độ và mô phỏng ảnh hưởng của chúng đến sự phân bố ứng suất trong một số cầu dầm hộp bê tông cốt thép ở giai đoạn khai thác. Tạp chí Khoa học Giao thông vận tải, 73 (2022) 253-267. https://doi.org/10.47869/tcsj.73.3.4.

[6]. J. Liu, Y. J. Liu, G. L. Liu, N. Zhang, Measurement and simulation of temperature field of concrete box girder in northwest severely cold area, Journal of Highway and Transportation Research and Development, 12 (2018) 37-45. https://doi.org/10.1061/JHTRCQ.0000638.

[7]. X.W. Sheng, T. Zhou, S. Huang, C. Cai, T. Shi, Prediction of vertical temperature gradient on concrete box-girder considering different locations in China, Case Studies in Construction Materials, 16 (2022) e01026. https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01026

[8]. COMSOL Inc, COMSOL Multiphysics Reference Manual, version 6.0, www.comsol.com.

[9]. J. A. Duffie, W. A. Beckman, Solar engineering of thermal processes, John Wiley & Sons, 2013.

[10].M. M. Elbadry, A. Ghali, Temperature variations in concrete bridges, Journal of structural engineering, 109 (1983) 2355-2374. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1983)109:10(2355)

[11].Y. Lu, D. Li, K. Wang, S. Jia, Study on solar radiation and the extreme thermal effect on concrete box girder bridges, applied sciences, 11 (2021) 6332. https://doi.org/10.3390/app11146332

[12].N. Tayşi, S. Abid, Temperature distributions and variations in concrete box-girder bridges: experimental and finite element parametric studies, Advances in Structural Engineering, 18 (2015) 469-486. https://doi.org/10.1260/1369-4332.18.4.469.

[13].W H. Dilger, A. Ghali, M. Chan, M. S. Cheung, M. A. Maes, Memperature stresses in composite box girder bridges, Journal of Structural Engineering, 109 (1983) 1460-1478.

[14].A. M. Ibrahim, Three-dimensional thermal analysis of curved concrete box girder bridges, Master thesis, Concordia University, 1995.

[15].Aviation Weather Center, Weather database, https://aviationweather.gov/ (truy cập ngày 15 tháng 7 năm 2022).

[16].COMSOL Inc, Sun's radiation effect on two coolers placed under a parasol, https://comsol.com/model/sun-s-radiation-effect-on-two-coolers-placed-under-a-parasol-12825 (truy cập ngày 15 tháng 7 năm 2022).

[17].P. Pan, S. Wu, X. Hu, Gang Liu, B. Li, Effect of material composition and environmental condition on thermal characteristics of conductive asphalt concrete, Material 10 (2017) 218. https://doi.org/10.3390/ma10030218.

[18].C. L. R. Wollman, J. E. Breen, J. Cawrse, Measurements of thermal gradients and their effects on segmental concrete bridge, Journal of Bridge Engineering, 7 (2002) 166-174. https://doi.org/10.1061/(ASCE)1084-0702(2002)7:3(166)

[19].Bộ Xây dựng, QCVN 02:2021/BXD, Quy chuẩn kỹ thuật quốc gia số liệu điều kiện tự nhiên dùng trong xây dựng, 2021.

[20].B. Gu, Z. J. Chen, X.D. Chen, Temperature gradients in concrete box girder bridge under effect of cold wave, Journal of Central South University, 21 (2014) 1227-1241. https://doi.org/10.1007/s1177101420576.

[21].Cập nhật số liệu khảo sát cường độ bức xạ mặt trời ở Việt Nam, Tạp chí Năng lượng Việt Nam (https://nangluongvietnam.vn).

[22].S. R. Abid, M. Özakça, Temperature records in concrete box-girder segment subjected to solar radiation and air temperature changes, Materials science and engineering, 870 (2020) 012074, https://doi.org/10.1088/1757-899X/870/1/012074

[23]. NDOT Research Report, Thermal gradients in the southwestern united states and the effect on bridge bearing loads, Report No. 224-14-803, May 2017.