

ẢNH HƯỞNG CỦA CÁC THÔNG SỐ KHÍ HẬU ĐẾN SỰ PHÂN BỐ NHIỆT ĐỘ TRONG MẶT ĐƯỜNG BÊ TÔNG NHỰA

EFFECTS OF CLIMATIC PARAMETERS ON THE TEMPERATURE DISTRIBUTION IN ASPHALT PAVEMENT

Trần Thị Thu Thảo^{1*}, Nguyễn Hồng Hải¹, Nguyễn Quang Phúc², Huỳnh Ngọc Hùng¹, Phạm Ngọc Phương¹

¹Trường Đại học Bách khoa - Đại học Đà Nẵng

²Trường Đại học Giao thông Vận tải

*Tác giả liên hệ: ttthao@dut.udn.vn

(Nhận bài: 03/7/2022; Chấp nhận đăng: 29/8/2022)

Tóm tắt - Bài báo phân tích ảnh hưởng của các thông số khí hậu đến sự phân bố nhiệt độ trong mặt đường bê tông nhựa (BTN). Kết quả mô phỏng trên phần mềm ANSYS và so sánh với nhiệt độ quan trắc hiện trường cho thấy, phân bố nhiệt độ trong mặt đường BTN phụ thuộc các thông số khí hậu như bức xạ, nhiệt độ không khí, độ ẩm và tốc độ gió. Mô phỏng với 4 mô hình tính toán hệ số đối lưu (h_c) của các tác giả Barber, Wang, Hermansson và mô hình do nhóm nghiên cứu phát triển có xét đến ảnh hưởng của độ ẩm. Kết quả cho thấy, mô hình sử dụng hệ số h_c của nhóm nghiên cứu có sai số giữa giá trị nhiệt độ dự đoán và nhiệt độ quan trắc thực nghiệm là nhỏ nhất ở tất cả các độ sâu khảo sát. Giá trị sai số RMSE dao động từ 0,84°C đến 1,50°C. Mô hình tính toán với $h_c = 6 + 3,7U + 0,8(W - 65)$ có thể áp dụng tính toán dự đoán phân bố nhiệt độ trong mặt đường BTN cho Đà Nẵng và khu vực có khí hậu tương tự.

Từ khóa - Mô hình mô phỏng số; mặt đường bê tông nhựa; phần mềm ANSYS; dữ liệu khí hậu; phân bố nhiệt độ

1. Đặt vấn đề

Bê tông nhựa (BTN) là vật liệu được sử dụng phổ biến làm lớp mặt đường trong xây dựng đường ô tô, tuy nhiên do vật liệu tính chất đàn hồi-nhớt-dẻo nên cường độ và ổn định cường độ của mặt đường này chịu ảnh hưởng nhiều bởi nhiệt độ. Dưới tác dụng của tải trọng xe chạy, mặt đường thường xuất hiện các hư hỏng như lún vệt bánh xe khi nhiệt độ mặt đường cao hay nứt khi nhiệt độ thấp [1], [2]. Ngoài ra trong tính toán thiết kế mặt đường mềm, nhiệt độ là tham số đầu vào quan trọng để xác định đặc trưng tính toán (mô đun đàn hồi) của vật liệu mặt đường nói chung và của BTN nói riêng, đồng thời có ý nghĩa trong việc dự đoán các điều kiện làm việc về nứt và trượt của BTN [3]. Nghiên cứu xác định phân bố nhiệt trong mặt đường BTN có ý nghĩa quan trọng, giúp người kỹ sư thiết kế có thể lựa chọn vật liệu mặt đường và xác định các đặc trưng tính toán của vật liệu phù hợp với điều kiện làm việc của mặt đường.

L.Sun [4], J.Chen và cộng sự [5] cho rằng, sự phân bố nhiệt độ trong mặt đường phụ thuộc vào đặc tính nhiệt của vật liệu các lớp mặt đường và điều kiện tự nhiên khí hậu của khu vực xây dựng đường. Nghiên cứu của nhóm tác giả cũng đã cho thấy, sự phân bố nhiệt độ trong mặt đường BTN phụ thuộc vào các thông số nhiệt lý của các lớp vật liệu trong kết cấu mặt đường [4]. Điều kiện khí hậu ở mỗi khu vực xây dựng đường là khác nhau. Mỗi điều kiện khí hậu khác nhau có sự ảnh hưởng đến phân bố nhiệt độ trong mặt đường khác nhau.

Abstract - The article analyzes the influence of climate parameters on the temperature distribution in asphalt concrete pavement. The simulation results on the ANSYS software and the comparison with the experimental temperature observed show that, the temperature distribution in the asphalt pavement depends on the climatic parameters such as radiation, air temperature, humidity and wind speed. Performing simulation calculations with 4 cases of convection coefficients (h_c) of authors Barber, Wang, Hermansson and the model developed by the research team taking into account the influence of humidity. The results show that the model using the coefficient h_c of the research team has the smallest error between the predicted temperature value and the experimentally observed temperature at all survey depths. The RMSE error value ranges from 0.84°C to 1.50°C. Calculation model with $h_c = 6 + 3.7U + 0.8(W - 65)$ can be applied to predict the temperature distribution in the asphalt concrete pavement for Danang and the area with similar climates.

Key words - The numerical simulation model; asphalt concrete; ANSYS software; climate data; temperature distribution

Nghiên cứu của Barber và cộng sự [5], Wang và cộng sự [6], Hermansson và cộng sự [7], đều cho thấy hệ số đối lưu phụ thuộc tốc độ gió nhưng mức độ phụ thuộc có sự khác nhau đáng kể. Chưa có nhiều nghiên cứu tại Việt Nam liên quan đến xác định hệ số tỏa nhiệt đối lưu, do đó để áp dụng trong điều kiện khí hậu thành phố Đà Nẵng nói riêng và Việt Nam nói chung cần có các nghiên cứu xác định hệ số này cho phù hợp. Bài báo trình bày kết quả nghiên cứu ảnh hưởng của điều kiện khí hậu đến phân bố nhiệt độ trong lớp mặt đường BTN, đề xuất công thức xác định hệ số đối lưu phù hợp với điều kiện khí hậu thành phố Đà Nẵng và khu vực có khí hậu tương tự.

Nghiên cứu này là phần tiếp theo của nghiên cứu đã thực hiện [4]. Do vậy, kết cấu mặt đường và mô hình tính toán, thông số nhiệt lý của vật liệu được áp dụng tương tự. Trong nghiên cứu [4], sử dụng điều kiện biên tại mặt đường là nhiệt độ đo được từ thực nghiệm, còn trong nghiên cứu này điều kiện biên tại bề mặt của mặt đường được xác định thông qua phương trình cân bằng dòng nhiệt đến và đi tại bề mặt như trình bày ở Mục 2.1. Kết cấu mặt đường nghiên cứu gồm lớp mặt bê tông nhựa chặt cỡ hạt 12,5 (BTNC 12,5) dày 13cm trên lớp móng cấp phối đá dăm Dmax31,5 gia cố xi măng 4% (CPĐD GCXM 4%) dày 15cm và lớp móng dưới cấp phối đá dăm loại 1 Dmax 37,5 (CPĐD Dmax37,5) dày 15cm. Các dữ liệu khí hậu được thu thập tại đài khí tượng thủy văn Trung Trung bộ đặt tại đường Trưng Nữ Vương, thành phố Đà Nẵng với thời gian cùng với thời gian quan

¹ The University of Danang - University of Science and Technology (Tran Thi Thu Thao, Nguyen Hong Hai, Huynh Ngoc Hung, Pham Ngoc Phuong)

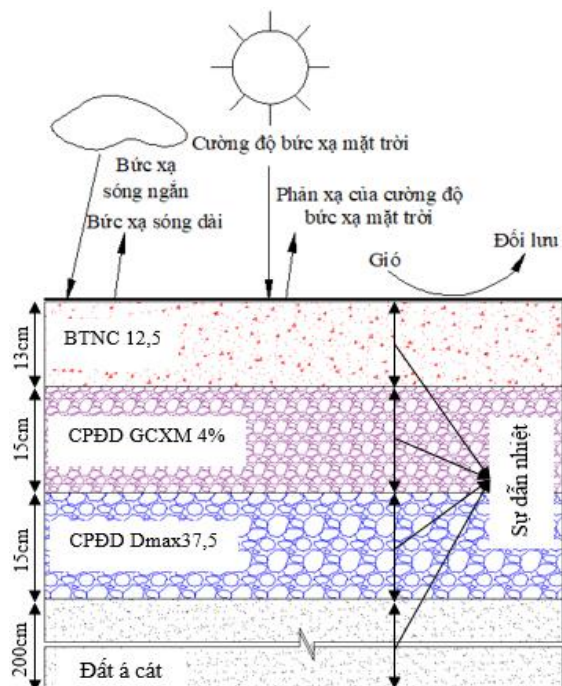
² University of Transport and Communications (Nguyen Quang Phuc)

trắc nhiệt độ mặt đường thực nghiệm. Bài báo phân tích sự ảnh hưởng của các thông số khí hậu đến sự phân bố nhiệt độ trong mặt đường bê tông nhựa chặt (BTNC). Mô hình mô phỏng số dự đoán sự phân bố nhiệt độ trong lớp BTNC phụ thuộc vào các thông số khí hậu như bức xạ, nhiệt độ không khí, độ ẩm và tốc độ gió tại các độ sâu 2cm, 5cm, 7cm, 10cm và 12cm cách bề mặt của mặt đường đã được xây dựng thông qua phần mềm ANSYS và được đối sánh với nhiệt độ quan trắc thực nghiệm ngoài hiện trường. Phân tích kết quả từ các mô hình mô phỏng số sử dụng hệ số đối lưu từ các nghiên cứu trước và tiến hành xác định hệ số đối lưu phù hợp với điều kiện khí hậu của khu vực Đà Nẵng.

2. Cơ sở lý thuyết và mô hình tính toán phân bố nhiệt

2.1. Cơ sở lý thuyết truyền nhiệt

Sự thay đổi nhiệt độ mặt đường thực chất là một quá trình vật lý tuân theo lý thuyết truyền nhiệt. Các phương thức truyền nhiệt phổ biến nhất bao gồm: Dẫn nhiệt, bức xạ và đối lưu [8], [9]. Dẫn nhiệt là phương thức truyền nhiệt chiếm ưu thế trong kết cấu mặt đường. Trong khi đó, bên trên bề mặt của mặt đường diễn ra quá trình trao đổi nhiệt giữa môi trường và mặt đường thông qua phương thức bức xạ và đối lưu (Hình 1).



Hình 1. Minh họa sự truyền nhiệt trong hệ thống môi trường mặt đường [4]

Kết cấu mặt đường ô tô có kích thước theo phương ngang và phương dọc lớn hơn nhiều so với chiều sâu nên sự truyền nhiệt của kết cấu mặt đường có thể xem là “truyền nhiệt một chiều” [8], [10]. Phương trình truyền nhiệt một chiều cho kết cấu mặt đường được viết dưới dạng như sau:

$$\lambda \frac{\partial^2 T(z, t)}{\partial z^2} = \rho \cdot c \frac{\partial T(z, t)}{\partial t} \quad (1)$$

Trong đó, $T(z, t)$ - trường nhiệt độ tại độ sâu z theo thời gian t ($^{\circ}\text{C}$); z - tọa độ theo chiều sâu lớp mặt đường (m); t - thời gian (s); λ - độ dẫn nhiệt ($\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$); ρ - khối lượng riêng (kgm^{-3}); c - nhiệt dung riêng ($\text{J kg}^{-1}\text{K}^{-1}$).

Việc quan trọng nhất trong việc giải bài toán phân bố nhiệt trong mặt đường là phải xác định các điều kiện biên tại bề mặt của mặt đường và đáy kết cấu áo đường.

$$\lambda \left. \frac{\partial T(z, t)}{\partial z} \right|_{z=0} = q_{ns} - q_{nl} - q_c \quad (2)$$

Trong đó: λ - Độ dẫn nhiệt ($\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$); q_{ns} - bức xạ mặt trời được mặt đường hấp thụ; q_{nl} - bức xạ sóng dài phát ra từ mặt đường; q_c - dòng nhiệt do đối lưu gây ra.

Theo (2), nhiệt độ mặt đường có thể được tính toán nếu xác định từng dòng nhiệt tại bề mặt mặt đường.

Dòng nhiệt do bức xạ mặt trời được xác định thông qua phương trình (3):

$$q_{ns} = (1 - \alpha) q_{solar} \quad (3)$$

Trong đó, q_{solar} là dòng bức xạ tới của mặt trời và α là hệ số albedo.

Dòng nhiệt do bức xạ sóng dài từ môi trường xung quanh được xác định theo phương trình (4):

$$q_{nl} = \varepsilon \sigma (T_{SK}^4 - T_{\infty K}^4) \quad (4)$$

Trong đó, ε là hệ số phát xạ của mặt đường; $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$ là hằng số Stefan-Boltzman; T_{SK}^4 là nhiệt độ của bề mặt mặt đường và $T_{\infty K}^4$ là nhiệt độ của môi trường quanh bề mặt của mặt đường.

Dòng nhiệt do đối lưu được xác định theo phương trình (5)

$$q_c = h_c (T_{SK} - T_{\infty K}) \quad (5)$$

Trong đó: h_c là hệ số tỏa nhiệt đối lưu.

Tại đáy kết cấu áo đường, theo nghiên cứu Minhoto và cộng sự [11], biên đoạn nhiệt sẽ được xác định ở độ sâu 2m trong lớp đất.

2.2. Mô hình tính toán phân bố nhiệt theo phương pháp phần tử hữu hạn bằng phần mềm ANSYS

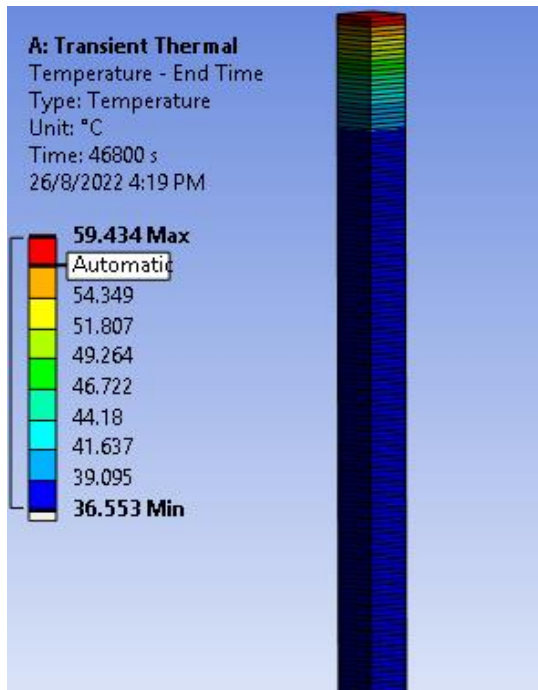
Để mô phỏng truyền nhiệt trong kết cấu, nghiên cứu sử dụng phần mềm ANSYS ACADEMIC STUDENT 2021 R2 [12]. Bài toán truyền nhiệt trong kết cấu mặt đường là bài toán truyền nhiệt một chiều có nhiệt độ thay đổi theo thời gian, với các điều kiện biên thể hiện được lấy như sau:

- Tại mặt đường: lấy theo phương trình cân bằng nhiệt (2);
- Biên đáy đoạn nhiệt: Lấy ở độ sâu 2m trong lớp đất nền (theo [11]);
- Biên xung quanh là biên đoạn nhiệt dựa trên giả định bài toán truyền nhiệt 1 chiều không ổn định theo thời gian.

Mô hình mô phỏng các lớp vật liệu tương tự kết cấu mặt đường được nhóm tác giả thực hiện ở mô hình thực nghiệm hiện trường [4] gồm: Lớp mặt trên BTNC 12,5 dày 13cm, lớp móng trên là CPĐD GCXM 4% dày 15cm, lớp móng dưới là CPĐD Dmax37,5 dày 15cm và nền đất á cát 2m (Hình 1).

Các lớp vật liệu được chia lưới với bề dày 1cm theo chiều sâu để vừa đảm bảo đủ độ chính xác [11], [13], vừa phù hợp với việc lấy dữ liệu quan trắc tại các độ sâu của mô hình thực nghiệm. Thông số nhiệt lý các lớp vật liệu sử dụng trong mô hình tính toán là giá trị thí nghiệm thực hiện trong phòng thí nghiệm ở các khoảng nhiệt độ khác nhau [4]. Nhiệt độ ban đầu của các lớp vật liệu mặt đường lấy theo nhiệt độ quan trắc thực nghiệm.

Hình 2 minh họa kết quả mô phỏng phân bố nhiệt trong kết cấu mặt đường bằng phần mềm ANSYS tại mốc thời gian muốn khảo sát.



Hình 2. Mô hình số phân bố nhiệt độ kết cấu mặt đường bằng ANSYS

2.3. Mô hình thực nghiệm

Được thi công tại vị trí gần khu G Trường Đại học Bách khoa – Đại học Đà Nẵng. Vị trí được chọn đảm bảo điều kiện thoáng đãng, không bị ảnh hưởng bóng râm, điều kiện hứng nắng lý tưởng. Đoạn thi công có diện tích $2\text{m} \times 2\text{m}$, kết cấu như Hình 1.

Cảm biến được đặt tại các vị trí bên trong bê tông nhựa có độ sâu so với mặt đường lần lượt là 2cm, 5cm, 7cm, 10cm, 12cm. Kết quả số liệu thực nghiệm được lấy theo nghiên cứu của Trần Thị Thu Thảo và cộng sự [14].

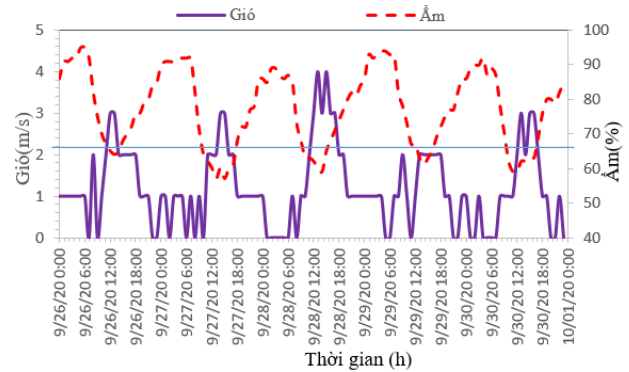
3. Ảnh hưởng của thông số khí hậu đến phân bố nhiệt độ mặt đường BTN

3.1. Số liệu khí hậu thu thập tại trạm khí tượng

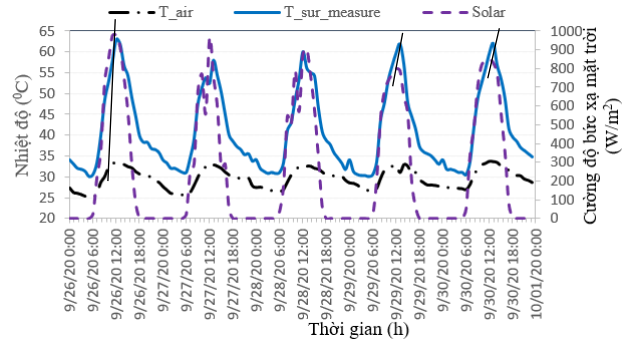
Thời gian thu thập dữ liệu khí hậu Đà Nẵng từ ngày 26/09/2020 đến ngày 30/09/2020 trùng với thời gian thu thập dữ liệu nhiệt độ mặt đường BTN. Hình 2 và 3 thể hiện kết quả dữ liệu khí hậu theo giờ của Đà Nẵng tại đài khí tượng thủy văn khu vực Trung Trung bộ ở địa chỉ 660 Trưng Nữ Vương. Đây là trạm khí tượng gần nhất với khu vực mô hình thực nghiệm quan trắc nhiệt độ mặt đường bê tông nhựa (khoảng cách theo đường chim bay gần 7km). Theo nghiên cứu [15] khoảng cách tối đa cho phép xét sự ảnh hưởng của khí hậu và nhiệt độ mặt đường là không quá 8km. Vì vậy, dữ liệu khí hậu từ trạm khí tượng này phù hợp để xét ảnh hưởng đến phân bố nhiệt độ trong mặt đường tại khu vực hiện trường nghiên cứu.

Hình 3 cho thấy, độ ẩm và tốc độ gió có quan hệ tỷ lệ nghịch, giá trị độ ẩm dao động gần giống biểu đồ hình sin, đạt giá trị cực đại vào khoảng 4 giờ sáng và giá trị cực tiểu vào khoảng 13 giờ. Trong khi tốc độ gió đạt giá trị cao nhất vào 13h và giá trị thấp nhất trùng vào thời điểm độ ẩm có giá trị cao. Nếu xét theo ý nghĩa đóng góp vào quá trình

phân bố nhiệt độ tại bề mặt của mặt đường thì tốc độ gió càng lớn sẽ làm tăng hệ số tỏa nhiệt đối lưu và mặt đường thoát nhiệt nhanh giúp cho nhiệt độ mặt đường thấp hơn. Tuy nhiên, do ảnh hưởng của độ ẩm và nhiệt độ không khí, ... diễn biến tốc độ gió trong ngày có xu hướng ngược với mức ý nghĩa đóng góp của nó cho quá trình phân bố nhiệt của mặt đường BTN. Nhận thấy, với điều kiện khí hậu của khu vực Đà Nẵng thì cả 2 thông số độ ẩm và tốc độ gió đều có ảnh hưởng đến quá trình tỏa nhiệt của mặt đường. Vì thế, khi xác định hệ số đối lưu nên cân nhắc sự ảnh hưởng đồng thời của cả 2 thông số khí hậu này.



Hình 3. Biểu đồ tương quan giữa tốc độ gió và độ ẩm



Hình 4. Biểu đồ tương quan giữa nhiệt độ không khí và cường độ bức xạ mặt trời với nhiệt độ tại bề mặt BTN

Hình 4 cho thấy, giá trị nhiệt độ không khí và cường độ bức xạ mặt trời có quan hệ tỷ lệ thuận với giá trị của nhiệt độ tại bề mặt của mặt đường BTN. Tuy nhiên, thời điểm nhiệt độ đạt giá trị cực đại của nhiệt độ bề mặt BTN trễ hơn so với nhiệt độ không khí và cường độ bức xạ mặt trời khoảng 1 giờ. Tại thời điểm nhiệt độ đạt cực trị, giá trị nhiệt độ tại bề mặt của mặt đường BTN cao hơn nhiệt độ của không khí khoảng 25°C . Điều này cho thấy, có sự đóng góp rất lớn của cường độ bức xạ mặt trời vào quá trình tăng nhiệt của mặt đường bê tông nhựa. Vào ban đêm khi không có sự xuất hiện của cường độ bức xạ mặt trời thì nhiệt độ của bề mặt đường và không khí chênh nhau không đáng kể (khoảng 5°C).

3.2. Ảnh hưởng của thông số khí hậu đến phân bố nhiệt độ mặt đường BTN

Trong nghiên cứu này các thông số cường độ bức xạ mặt trời, nhiệt độ không khí, độ ẩm và tốc độ gió được lấy từ dữ liệu đo thực nghiệm của trạm khí tượng. Hệ số albedo α được lấy theo số liệu của chương trình thiết kế mặt đường dài hạn MERRA2 đặt tại Sân bay Đà Nẵng (mã trạm 116814) [16], thời gian lấy số liệu trùng thời gian quan trắc nhiệt độ của mặt đường thực nghiệm. Riêng hệ số đối lưu có rất nhiều phương trình tính toán đã được các nghiên cứu

phát triển tùy vào khu vực nghiên cứu. Do vậy cần được kiểm chứng sự phù hợp với khí hậu của khu vực nghiên cứu và từ đó phát triển phương trình xác định hệ số đối lưu h_c để kết quả mô phỏng dự đoán nhiệt độ mặt đường BTN cho khu vực nghiên cứu có độ chính xác cao.

Có 3 trường hợp mô phỏng số được nghiên cứu với các hệ số đối lưu h_c khác nhau thể hiện ở Bảng 1. Để dễ so sánh đánh giá về tính phù hợp của hệ số đối lưu với phân bố nhiệt độ mặt đường khu vực nghiên cứu, tất cả các mô hình chỉ khác nhau về công thức xác định hệ số đối lưu, còn lại đều giống từ cách tạo mô hình mô phỏng đến giá trị thông số đầu vào.

Bảng 1. Tổng hợp công thức xác định hệ số đối lưu từ các nghiên cứu trước

Phương trình tính toán	Nghiên cứu của
$h_c = 5,678(1,3 + 1,135U^{0,75})$	Barber [5]
$h_c = 6 + 3,7U$	Wang et al [6]
$h_c = 698,24[0,00144T_m^{0,3}U^{0,7} + 0,00097(T_s - T_{air})^{0,3}]$	Hermansson [7]

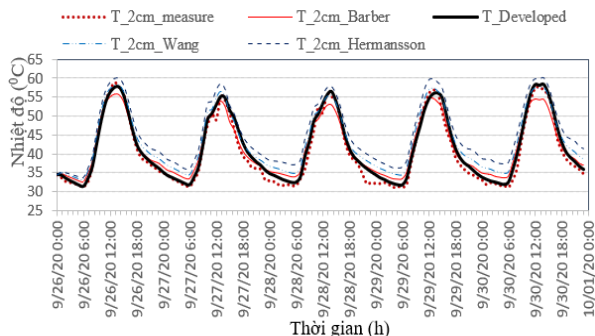
Trong đó: h_c là hệ số tỏa nhiệt đối lưu, W/m²K; U là tốc độ gió, m/s; T_m là nhiệt độ trung bình của bề mặt mặt đường (T_s) và nhiệt độ không khí (T_{air}), K và W là Độ ẩm, %.

Hình 5 đến 9 thể hiện diễn biến thay đổi nhiệt độ tại các độ sâu 2cm, 5cm, 7cm, 10cm trong lớp mặt BTN của nhiệt độ quan trắc thực tế và giá trị nhiệt độ dự đoán theo các phương trình hệ số đối lưu h_c khác nhau. Kết quả mô phỏng cho thấy, với h_c theo nghiên cứu Barber cho thấy biên độ dao động nhiệt độ BTN ở tất cả độ sâu khảo sát đều nhỏ hơn biên độ dao động nhiệt độ đo thực nghiệm (giá trị đạt nhiệt độ cao nhất bé hơn và giá trị đạt nhiệt độ thấp nhất lại cao hơn nhiệt độ đo thực nghiệm). Kết quả theo h_c của nghiên cứu Hermansson đều cho thấy, nhiệt độ dự đoán có kết quả cao hơn nhiệt độ đo thực nghiệm ở tất cả mọi thời gian và mọi độ sâu quan sát. Nhiệt độ dự đoán với h_c theo nghiên cứu của Wang cho thấy, nhiệt độ vào thời điểm ban ngày (6h đến 17h) có giá trị khá tương đồng với kết quả nhiệt độ đo thực nghiệm ở tất cả các vị trí độ sâu quan sát nhưng vào buổi tối (0h đến 5h và 18h đến 23h), nhiệt độ dự đoán lại cao hơn nhiệt độ đo thực tế. Từ 3 trường hợp mô phỏng với h_c khác nhau này cho thấy, với điều kiện khí hậu của Đà Nẵng thì h_c lấy theo nghiên cứu của Wang vào ban ngày cho kết quả phù hợp và cần hiệu chỉnh lại h_c cho thời điểm ban đêm. Như đã phân tích ở mục 3.1, đối với khí hậu Đà Nẵng vào ban đêm tốc độ gió thấp hơn ban ngày nhưng ngược lại độ ẩm cao hơn. Mà độ ẩm cũng là một biến khí hậu có liên quan đến vấn đề giảm nhiệt cho mặt đường nên cần xem xét đưa biến độ ẩm vào phương trình xác định hệ số đối lưu.

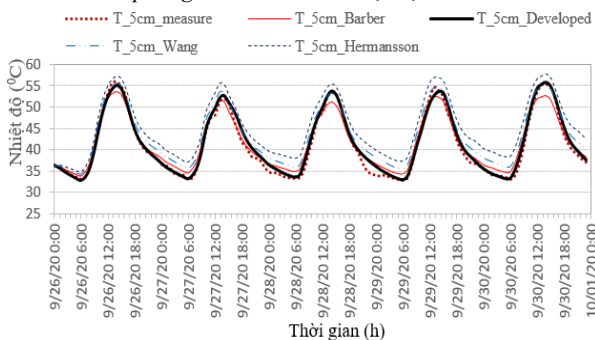
Từ phân tích trên, nghiên cứu phát triển phương trình xác định h_c trên cơ sở phương trình của Wang và đưa thêm biến độ ẩm (W) vào trên cơ sở vẫn giữ được h_c tương tự nghiên cứu Wang vào ban ngày và tăng h_c vào thời điểm ban đêm để tỏa nhiệt nhanh hơn. Hình 3 cho thấy, vào ban ngày giá trị độ ẩm dao động quanh giá trị 65% nên vào ban ngày biểu thức ($W-65$) = 0. Do vậy, xem như độ ẩm không ảnh hưởng, còn vào ban đêm trị số độ ẩm >65% nên biểu thức này sẽ giúp hệ số đối lưu tăng lên. Tiếp đó, dùng phần mềm ANSYS mô phỏng để chọn giá trị hệ số thích hợp đi kèm với biểu thức ($W-65$). Sau các lần mô phỏng nghiên cứu đã chọn được hệ số 0,8 đi kèm với biểu thức ($W-65$) cho kết quả mô phỏng

nhiệt độ gần với giá trị nhiệt độ đo ở hiện trường nhất. Do vậy, kiến nghị sử dụng công thức (6) để xác định hệ số đối lưu cho khu vực Đà Nẵng và khu vực có khí hậu tương tự.

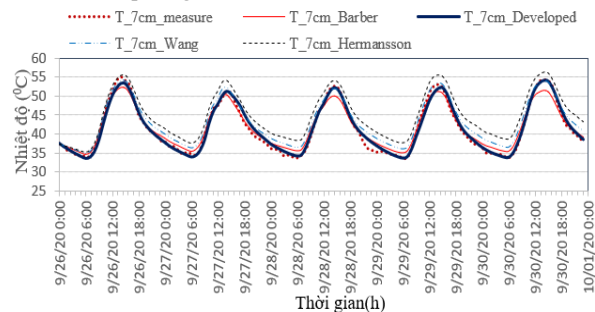
$$h_c = 6 + 3,7U + 0,8(W - 65) \tag{6}$$



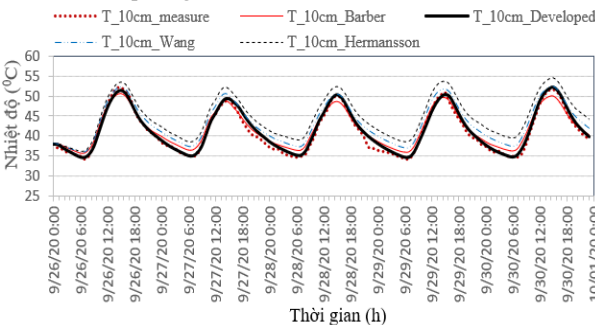
Hình 5. Biểu đồ nhiệt độ quan trắc và nhiệt độ các trường hợp mô phỏng với h_c khác nhau tại độ sâu 2cm



Hình 6. Biểu đồ nhiệt độ quan trắc và nhiệt độ các trường hợp mô phỏng với h_c khác nhau tại độ sâu 5cm



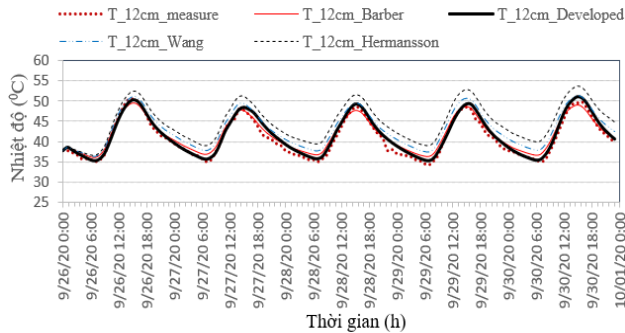
Hình 7. Biểu đồ nhiệt độ quan trắc và nhiệt độ các trường hợp mô phỏng với h_c khác nhau tại độ sâu 7cm



Hình 8. Biểu đồ nhiệt độ quan trắc và nhiệt độ các trường hợp mô phỏng với h_c khác nhau tại độ sâu 10cm

Kết quả mô phỏng từ ANSYS (Hình 5 đến Hình 9) và tính toán sai số bình phương trung bình Bảng 2 cho thấy sử dụng giá trị đối lưu xác định theo công thức (6) (trường hợp Developed) cho kết quả sai số giữa nhiệt độ tính toán mô

phông (dự đoán) và giá trị nhiệt độ quan trắc thực nghiệm là nhỏ nhất (xem Bảng 2). Giá trị sai số bình phương trung bình RMSE dao động trong phạm vi từ 0,84 °C (ở độ sâu 10cm) đến 1,50°C (ở độ sâu 2cm). Sai số giữa nhiệt độ tính toán mô phỏng của mô hình đề xuất (công thức 6) với giá trị nhiệt độ quan trắc thực nghiệm là nhỏ nhất so với 3 mô hình tính toán (Bảng 1) ở tất cả các độ sâu quan trắc.



Hình 9. Biểu đồ nhiệt độ quan trắc và nhiệt độ các trường hợp mô phỏng với h_c khác nhau tại độ sâu 12cm

Bảng 2. Sai số RMSE giữa nhiệt quan trắc thực nghiệm và nhiệt độ dự đoán từ mô hình mô phỏng với các h_c khác nhau

Độ sâu (cm)	Sai số RMSE giữa nhiệt quan trắc thực nghiệm và nhiệt độ dự đoán từ mô hình mô phỏng với các h_c khác nhau (°C)			
	Barber	Wang et al	Hermansson	Developed
2	2,12	3,12	4,89	1,50
5	1,56	2,51	4,23	1,02
7	1,33	2,07	3,71	0,90
10	1,18	2,18	3,81	0,84
12	1,18	2,38	3,99	1,00

Để so sánh kết quả phân tích từ các mô hình số và kết quả quan trắc từ mô hình thực nghiệm, tiến hành tính toán sai số bình phương trung bình (Root Mean Squared Error - RMSE) theo công thức (7):

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i^* - y_i)^2}{n}} \quad (7)$$

Trong đó, y_i là nhiệt độ xác định bằng mô hình mô phỏng tại thời điểm t_i ; y_i^* là nhiệt độ của mô hình quan trắc thực nghiệm tại thời điểm t_i .

4. Kết luận

Bài báo đã phân tích được sự ảnh hưởng của các biến khí hậu đến phân bố nhiệt độ trong mặt đường BTN. Kết quả phân tích đã chỉ ra sự ảnh hưởng của độ ẩm đến quá trình tỏa nhiệt của mặt đường làm cơ sở để đưa biến số này vào công thức xác định hệ số tỏa nhiệt đối lưu ngoài biên tốc độ gió như một số nghiên cứu trước, giúp quá trình dự đoán phân bố nhiệt độ được chính xác hơn.

Mô hình mô phỏng số dự đoán nhiệt độ theo độ sâu của mặt đường BTN phụ thuộc vào điều kiện khí hậu đã được xây dựng. Từ kết quả mô phỏng 4 trường hợp hệ số tỏa nhiệt đối lưu khác nhau, đã cho thấy trường hợp mô phỏng với hệ số tỏa nhiệt đối lưu được phát triển trong nghiên cứu này cho kết quả khả quan nhất với sai số RMSE = (0,84 ÷ 1,50)°C tùy độ sâu.

Để xét ảnh hưởng của độ ẩm đến phân bố nhiệt độ trong

mặt đường BTN, một mô hình tính toán hệ số tỏa nhiệt đối lưu $h_c = 6 + 3,7U + 0,8(W - 65)$ đã được đề xuất. Kết quả mô phỏng cho thấy, phân bố nhiệt trong mặt đường BTN sử dụng mô hình đề xuất khá phù hợp với phân bố nhiệt độ quan trắc thực nghiệm, có thể áp dụng dự báo phân bố nhiệt cho mặt đường BTN ở khu vực Đà Nẵng và các vùng khí hậu tương tự.

Phương trình xác định hệ số tỏa nhiệt đối lưu trên được khuyến nghị sử dụng cho mùa nắng nóng. Nghiên cứu xác định hệ số tỏa nhiệt đối lưu cho mùa lạnh sẽ được tiếp tục thực hiện.

Lời cảm ơn

- Trần Thị Thu Thảo được tài trợ bởi Nhà tài trợ thuộc Tập đoàn Vingroup và hỗ trợ bởi Chương trình học bổng thạc sĩ, tiến sĩ trong nước của Quỹ Đổi mới sáng tạo Vingroup (VINIF), Viện Nghiên cứu Dữ liệu lớn (VinBigdata), mã số VINIF.2021.TS.102.

- Nghiên cứu này được tài trợ bởi Quỹ Phát triển Khoa học và Công nghệ - Đại học Đà Nẵng trong đề tài có mã số B2021-DN02-05.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] N. Tapsoba, H. Baaj, C. Sauzéat, H. Di Benedetto, and M. Ech, "3D Analysis and Modelling of Thermal Stress Restrained Specimen Test (TSRST) on Asphalt Mixes with RAP and Roofing Shingles", *Constr. Build. Mater.*, vol. 120, pp. 393–402, 2016, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.05.092.
- [2] A. Hassn, A. Chiarelli, A. Dawson, and A. Garcia, "Thermal properties of asphalt pavements under dry and wet conditions", *Mater. Des.*, vol. 91, pp. 432–439, 2016, doi: 10.1016/j.matdes.2015.11.116.
- [3] AASHTO 2008, "Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide", *Natl. Cong. Highw. Res. Progr. Transp. Board Natl. Res. Council.*, p. 194, 2008.
- [4] Nguyễn Hồng Hải*, Trần Thị Thu Thảo, Hoàng Văn Tinh, Tôn Thất Bảo Nam, Hoàng Ngọc Hùng. "Phân bố nhiệt độ trong mặt đường bê tông nhựa: Thực nghiệm và mô phỏng số", *Tạp chí Khoa học và Công nghệ - Đại học Đà Nẵng*, vol. Vol. 20, N, pp. 50–55, 2022.
- [5] E. S. Barber, "Calculation of maximum pavement temperatures from weather reports", *Highw. Res. Board*, vol. 168, no. 3, pp. 1–8, 1957.
- [6] Dong Wang, Jeffery R. Roesler, P.E., "Analytical Approach to Predicting Temperature Fields in Multi-Layered Pavement Systems", *Journal of Engineering Mechanics*, 135 (4): 334–344, 2009.
- [7] Å. Hermansson, "Mathematical Model for Calculation of Pavement Temperatures", *Transp. Res. Rec.*, vol. 1764, no. Paper No. 01-3543, pp. 180–188, 2001.
- [8] Trịnh Văn Quang, *Cơ sở Truyền nhiệt*, TP Hồ Chí Minh, 2016.
- [9] D. Annaratone, *Engineering Heat Transfer*. Springer-Verlag, 2010.
- [10] M. R. Islam and R. A. Tarefder, "Determining thermal properties of asphalt concrete using field data and laboratory testing", *Constr. Build. Mater.*, vol. 67, no. PART B, pp. 297–306, 2014, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2014.03.040.
- [11] M. J. C. Minhoto, J. C. Pais, P. A. A. Pereira, and L. G. Picado-santos, "Predicting Asphalt Pavement Temperature with a Three-Dimensional Finite Element Method", *Transp. Res. Rec.*, vol. 1919, no. 1919, pp. 96–110, 2005.
- [12] ANSYS ACADEMIC STUDENT, "https://www.ansys.com/academic/students/ansys-student", 2021.
- [13] M. Z. Alavi, M. R. Pouranian, and E. Y. Hajj, "Prediction of asphalt pavement temperature profile with finite control volume method", *Transp. Res. Rec.*, vol. 2456, no. 2456, pp. 96–106, 2014, doi: 10.3141/2456-10.
- [14] T. Thao T. T. Tran, Hai H. Nguyen, Phuc Q. Nguyen, Teron Nguyen, Phuong N. Pham, and Viet T. Tran, "Developing Statistical Models to Predict Temperature Distribution in Asphalt Concrete in Danang City". *Springer Singapore*. doi: 10.1007/978-981-16-7160-9.
- [15] I. Adwan et al., "Asphalt pavement temperature prediction models: A review", *Appl. Sci.*, vol. 11, no. 9, pp. 1–19, 2021, doi: 10.3390/app11093794.
- [16] *Long-Term Pavement Performance (LTPP)*, https://infopave.fhwa.dot.gov/Data/ClimateTool?mode=country, 2020.