



PREDICTING ASPHALT TEMPERATURE FOR ELASTIC MODULUS TESTING USING BENKELMAN BEAM BASED ON DATA ANALYSIS USING ARTIFICIAL NEURAL NETWORK

Thao Thi Thu Tran^{1*}, Hai Hong Nguyen¹, Phuc Quang Nguyen²

¹The University of Danang – University of Science and Technology, 54 Nguyen Luong Bang Str., Danang City, Viet Nam

²University of Transport and Communications, No 3 Cau Giay Street, Hanoi, Vietnam

ARTICLE INFO

TYPE: Research Article

Received: 26/02/2023

Revised: 03/04/2023

Accepted: 14/04/2023

Published online: 15/04/2023

<https://doi.org/10.47869/tcsj.74.3.5>

* *Corresponding author*

Email: ttthao@dut.udn.vn; Tel: +84983821513

Abstract. Accurately predicting the temperature distribution in asphalt concrete (AC) is essential for assessing the strength and durability of flexible pavements. This study reports the temperature measurements in a 13cm-thick AC and develops a prediction model for the temperature distribution using an artificial neural network (ANN) approach. The ANN model is used to estimate temperature data at a depth of 4cm in AC, which is then used to develop a regression model for predicting the temperature of AC at 4cm depth, necessary for elastic modulus testing with a Benkelman beam. The ANN model shows high accuracy in predicting the temperature distribution in AC, with an R^2 value of 0.996 and an RMSE of 0.582°C. The regression models for predicting the temperature of AC at a depth of 4cm also demonstrate promising results, with RMSE errors ranging from 0.847°C to 1.367°C, depending on the number of input variables required by the model.

Keywords: temperature distribution, Artificial Neural Networks, hot mix asphalt concrete, in situ temperature monitoring, statistical model.



DỰ ĐOÁN NHIỆT ĐỘ BÊ TÔNG NHỰA PHỤC VỤ THÍ NGHIỆM ĐO VĨNG ĐÀN HỒI BẰNG CẦN BENKELMAN DỰA TRÊN DỮ LIỆU PHÂN TÍCH THEO MẠNG NƠON NHÂN TẠO

Trần Thị Thu Thảo^{1*}, Nguyễn Hồng Hải¹, Nguyễn Quang Phúc²

¹Trường Đại học Bách khoa – Đại học Đà Nẵng, Số 54 Nguyễn Lương Bằng, Đà Nẵng, Việt Nam

²Trường 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: 26/02/2023

Ngày nhận bài sửa: 03/04/2023

Ngày chấp nhận đăng: 14/04/2023

Ngày xuất bản Online: 15/04/2023

<https://doi.org/10.47869/tcsj.74.3.5>

* Tác giả liên hệ

Email: ttthao@dut.udn.vn; Tel: 84983821513

Tóm tắt. Việc dự đoán phân bố nhiệt độ trong mặt đường bê tông nhựa (BTN) có ý nghĩa rất lớn cho công tác xác định cường độ và tuổi thọ của mặt đường BTN trong điều kiện thực tế. Bài báo trình bày kết quả quan trắc nhiệt độ BTN từ mô hình thực nghiệm kết cấu mặt đường mềm có lớp bê tông nhựa dày 13cm. Nhiệt độ quan trắc được sử dụng để xây dựng mô hình dự đoán phân bố nhiệt độ BTN theo phương pháp mạng nơon nhân tạo (ANN). Sau đó dữ liệu nhiệt độ tại độ sâu 4cm của BTN được ước tính từ mô hình ANN sẽ được sử dụng để phát triển mô hình hồi quy dự đoán nhiệt độ BTN tại độ sâu 4cm, phục vụ cho thí nghiệm đo độ võng đàn hồi bằng cần Benkelman. Kết quả nghiên cứu cho thấy, mô hình mạng nơon nhân tạo cho kết quả dự đoán phân bố nhiệt độ trong lớp BTN có độ chính xác rất cao với $R^2=0,996$ và $RMSE=0,582^\circ C$. Các mô hình hồi quy dự đoán nhiệt độ BTN tại độ sâu 4cm cũng cho kết quả rất khả quan, sai số RMSE giữa các mô hình hồi quy và phân tích ANN có giá trị từ $0,847^\circ C$ đến $1,367^\circ C$ tùy thuộc số lượng biến số đầu vào mà mô hình yêu cầu.

Từ khóa: phân bố nhiệt độ, mạng nơon nhân tạo, bê tông nhựa nóng, quan trắc nhiệt độ mặt đường thực tế, mô hình hồi quy.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Nghiên cứu dự đoán phân bố nhiệt trong BTN đã và đang được quan tâm rất nhiều. Có thể nói trong giai đoạn khai thác, nhiệt độ là yếu tố có ảnh hưởng lớn đến chất lượng và tuổi thọ của mặt đường BTN. Ngoài ra, nhiệt độ là thông số thiết yếu để xác định các thông số thiết kế cơ bản của BTN khi thiết kế kết cấu mặt đường như mô đun đàn hồi và để dự đoán các điều kiện làm về việc nứt và trượt BTN [1]. Hiện nay, trong tài liệu hướng dẫn thiết kế kết cấu mặt đường theo cơ học thực nghiệm (MEPDG) đã tích hợp các ảnh hưởng của nhiệt độ mặt đường lên các đặc tính của vật liệu và của toàn bộ kết cấu mặt đường [2].

Các nghiên cứu dự đoán nhiệt độ trong KCMĐ có thể chia thành hai hướng nghiên cứu chính: (i) Hướng nghiên cứu dựa trên lời giải của lý thuyết truyền nhiệt [3–7]; (ii) Hướng nghiên cứu theo phương pháp thực nghiệm hồi quy [8–10]. Hướng nghiên cứu theo hướng thực nghiệm có ưu điểm đơn giản trực quan nên ngày càng được sử dụng phổ biến [11]. Với ưu điểm giải quyết được các mô hình phi tuyến nhiều biến phức tạp và có độ chính xác cao, mô hình mạng nơ ron nhân tạo gần đây được nhiều tác giả trên thế giới nghiên cứu áp dụng để mô hình hóa, phân tích dự đoán nhiệt độ của vật liệu KCMĐ.

Trên thế giới đã có một số nghiên cứu dự đoán phân bố nhiệt độ sử dụng mạng nơ ron nhân tạo. Abo-Hashema [12], đã đề xuất mạng ANN dự đoán nhiệt độ lớp bê tông nhựa dựa trên nhiệt độ không khí, kết hợp với thông số nhiệt độ bề mặt của KCMĐ. Kết quả nghiên cứu của Abo-Hashema, khi sử dụng biến đầu vào là nhiệt độ không khí trung bình ngày hôm trước, nhiệt độ bề mặt và nhiệt độ tại các độ sâu trong KCMĐ cho kết quả hệ số tương quan $R=0,985$ và sai số chuẩn $SE=1,3^{\circ}\text{C}$ còn khi chỉ sử dụng biến đầu vào chỉ có nhiệt độ không khí cho kết quả hệ số tương quan $R=0,965$; $SE=2,34^{\circ}\text{C}$. Nghiên cứu của B. Matic, D. Matic, S. Sremac, N. Radovic [13] dự đoán nhiệt độ KCMĐ tối đa và tối thiểu dựa vào nhiệt độ bề mặt và độ sâu Z cho thấy, sai số tuyệt đối trung bình (MAE) giữa nhiệt độ quan trắc thực tế và nhiệt độ dự đoán khi sử dụng mô hình ANN, với nhiệt độ tối thiểu $MAE=0,648^{\circ}\text{C}$ và với nhiệt độ tối đa $MAE=0,67,46^{\circ}\text{C}$. Nghiên cứu này cũng đã kết luận các mô hình dự đoán dựa trên ANN có độ chính xác cao hơn so với mô hình phân tích hồi quy trước đó.

Tại Việt Nam, Thao T.T. Tran và cộng sự đã ứng dụng mạng nơ ron nhân tạo (ANN) để dự đoán phân bố nhiệt độ cho lớp cấp phối đá dăm gia cố xi măng với thông số đầu vào là nhiệt độ không khí, độ sâu và có xét đến ảnh hưởng của phương pháp bảo dưỡng, cụ thể trong 3 trường hợp bảo dưỡng khác nhau, gồm: bao bố tưới ẩm, vải địa tưới ẩm và nhũ tương tưới thấm [14]. Kết quả nghiên cứu cho thấy mô hình đề xuất dựa trên ANN có độ chính xác rất cao với hệ số tương quan $R\geq 0,96$ và sai số toàn phương trung bình $MSE \approx 0,0038$ là khá nhỏ. Vì vậy, phương pháp ANNs có thể nói là một phương pháp tiếp cận mới và có độ chính xác cao trong việc nghiên cứu phân bố nhiệt cho KCMĐ.

Phân bố nhiệt độ trong mặt đường phụ thuộc điều kiện khí hậu và đặc điểm vật liệu của từng khu vực [11]. Vì thế, các nghiên cứu đã có ở các nước có khí hậu lạnh như Châu Âu và Châu Mỹ sẽ thiếu chính xác cho điều kiện khí hậu nhiệt đới như Việt Nam. Do vậy, cần nghiên cứu mô hình dự đoán phân bố nhiệt trong mặt đường cho khu vực này. Bài báo này trình bày kết quả nghiên cứu dự đoán phân bố nhiệt độ theo hướng thực nghiệm thống kê. Các cảm biến nhiệt được gắn ở độ sâu bên trong để thu thập nhiệt độ lớp BTN, tương tự như trong nghiên cứu [15], để thu thập nhiệt độ thực tế của BTN. Số liệu quan trắc nhiệt độ BTN được thu thập liên tục trong năm 2021. Nghiên cứu sử dụng phương pháp mạng nơ ron nhân tạo để phân tích xây dựng mô hình dự đoán phân bố nhiệt trong lớp BTN. Sau đó ứng dụng để lấy số liệu xây dựng mô hình dự đoán nhiệt độ phục vụ cho thí nghiệm đo độ võng đàn hồi bằng cần Benkelman.

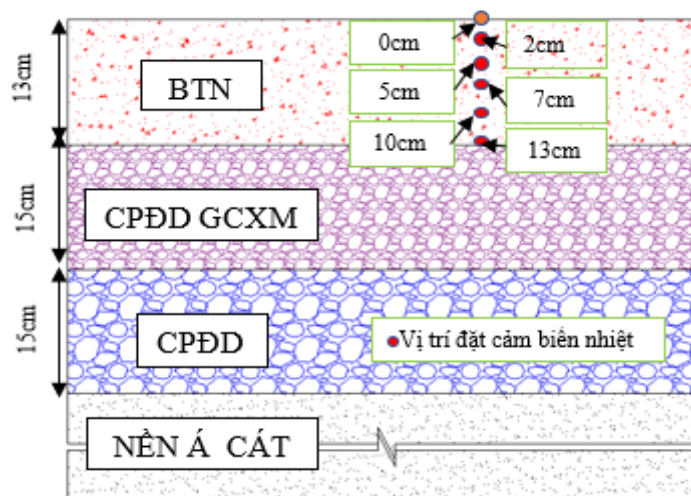
Nhiệt độ mặt đường BTN tại độ sâu 4cm là thông số cần thiết cần cung cấp cho thí nghiệm đo độ võng theo TCVN 8867:2011 [16]. Vì vậy, nghiên cứu đề xuất mô hình dự đoán nhiệt độ BTN tại độ sâu 4cm dựa trên nhiệt độ đo tại bề mặt (T_{suf}), nhiệt độ không khí (T_{air}), nhiệt độ không khí trung bình ngày hôm trước (T_{avg}), giúp rút ngắn thời gian thí nghiệm và tránh việc khoan lỗ mặt đường BTN như phương pháp đã dùng trước đây.

2. MÔ HÌNH DỰ ĐOÁN PHÂN BỐ NHIỆT BÊ TÔNG NHỰA

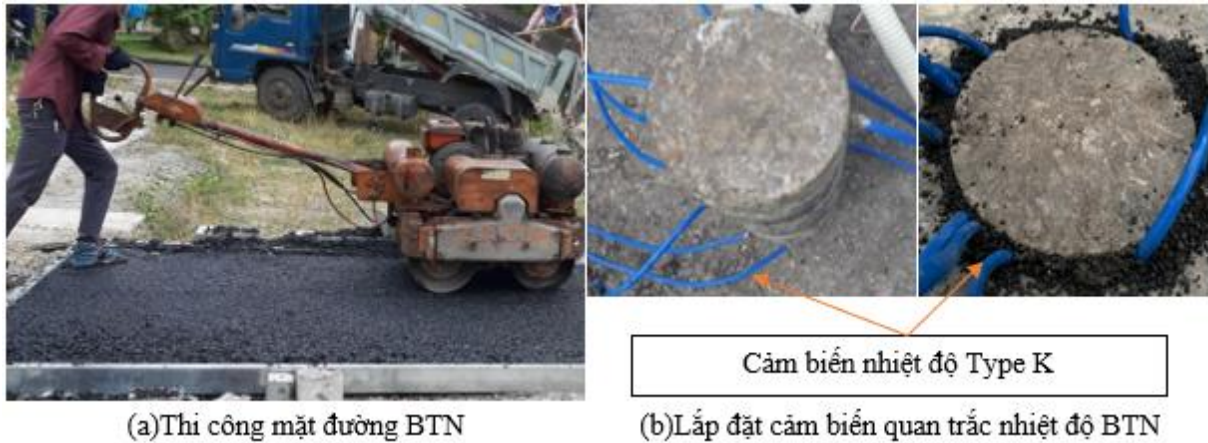
2.1. Mô hình thực nghiệm

Mô hình thực nghiệm được triển khai tại trường Đại học Bách khoa – Đại học Đà Nẵng, trên diện tích 2m x 2m, kết cấu các lớp vật liệu mặt đường thể hiện như Hình 1 gồm: Bê tông nhựa chặt đường kính hạt danh định 12,5 dày 13 cm; Cấp phối đá dăm gia cố xi măng Dmax 31,5 gia cố 4% xi măng dày 15 cm; Cấp phối đá dăm loại 1 Dmax 37,5 gia cố xi măng dày 15 cm; nền đường á cát. Các loại vật liệu đã được thi công và kiểm tra đạt chất lượng yêu cầu của tiêu chuẩn TCVN 8819-2011 [17] và TCVN 8858-2011 [18], như đã trình bày trong nghiên cứu [1]. Một số hình ảnh thi công và lắp đặt cảm biến quan trắc nhiệt độ thể hiện như Hình 2. Để đo nhiệt độ trong BTN, các cảm biến cặp nhiệt điện Type K được gắn vào mạch đọc Arduino mega 2560 và IC MAX6675. Thiết bị đã được hiệu chuẩn với thiết bị thương mại TDS303 và kết quả kiểm định T-test cho thấy số liệu đọc từ 2 thiết bị không có sự khác biệt.

Dữ liệu nhiệt độ được ghi tự động với tần suất 10 phút/lần và kết quả được gửi đồng thời lên trang web <https://thingspeak.com/> và thẻ nhớ của thiết bị. Các cảm biến nhiệt được gắn ở độ sâu cách bề mặt của mặt đường: 0cm, 2cm, 5cm, 7cm, 10cm và 13cm, để thu thập nhiệt độ thực tế của BTN. Thời gian quan trắc nhiệt độ đảm bảo phản ánh đầy đủ dữ liệu đặc trưng nhiệt độ cả năm (từ ngày 18/01/2021 đến ngày 23/12/2021). Trong bộ số liệu này, để tránh dữ liệu nhiễu ảnh hưởng đến kết quả mô hình, nhiệt độ vào các ngày mưa sẽ được loại bỏ do khi có dòng nước mưa sẽ làm mát bề mặt của mặt đường, dẫn đến dòng nhiệt tại bề mặt của mặt đường bị xáo trộn và phân bố nhiệt độ sẽ không theo quy luật. Bộ số liệu sau khi lọc dữ liệu nhiễu còn lại tổng số 138816 quan sát, số liệu này được dùng để phát triển mô hình dự đoán trường nhiệt độ phân bố trong mặt đường BTN theo không gian và thời gian.



Hình 1. Kết cấu mặt đường thi công thực nghiệm.



Hình 2. Một số hình ảnh thi công và lắp đặt cảm biến quan trắc nhiệt độ tại mô hình thực nghiệm.

2.2. Ứng dụng mạng nơ ron nhân tạo xây dựng mô hình dự đoán phân bố nhiệt mặt đường bê tông nhựa

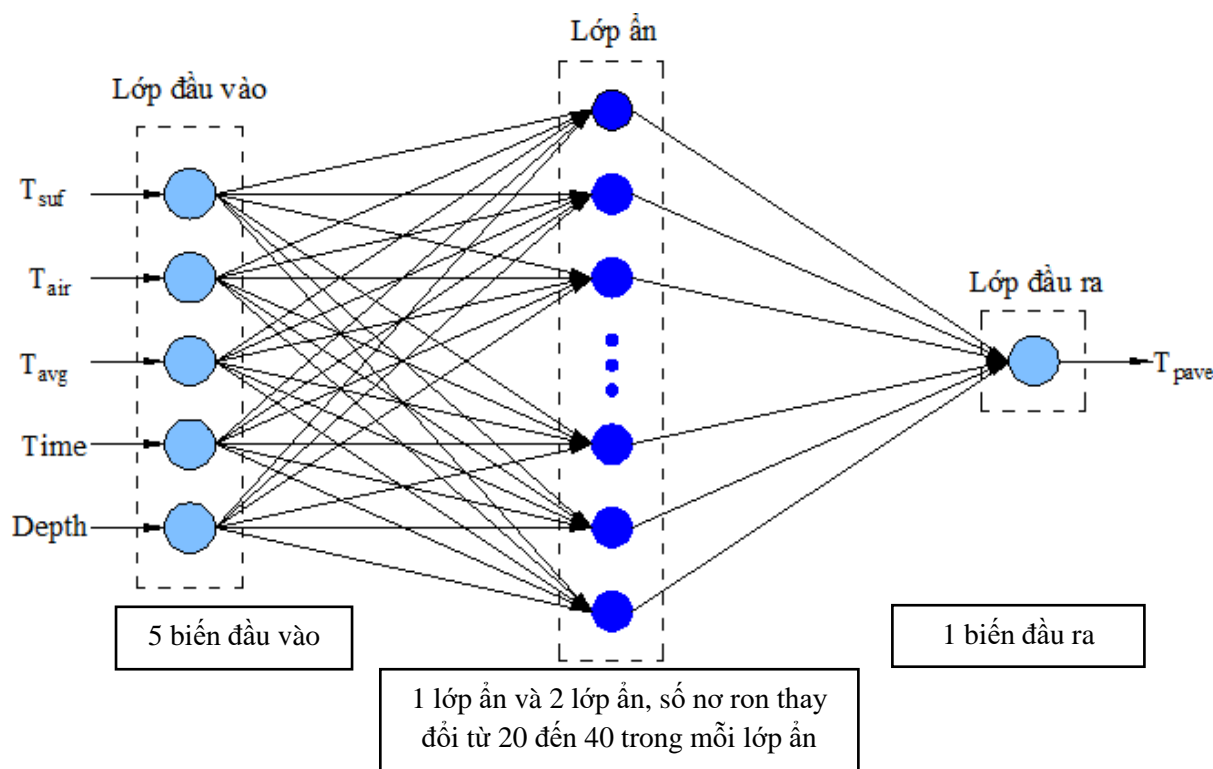
Mạng nơ ron nhân tạo, Artificial Neural Network (ANN) gọi tắt là mạng nơ ron, là một mô hình xử lý thông tin phỏng theo cách thức xử lý thông tin của các hệ nơ ron sinh học. Nó được tạo nên từ một số lượng lớn các phần tử (gọi là phần tử xử lý hay nơ ron) kết nối với nhau thông qua các liên kết (gọi là trọng số liên kết) làm việc như một thể thống nhất để giải quyết một vấn đề cụ thể nào đó [19]. Phương pháp này có thể mô hình hóa phi tuyến nhiều biến phức tạp và có độ chính xác cao nên được nhiều tác giả trên thế giới nghiên cứu áp dụng.

Cấu trúc của ANN gồm 3 phần: lớp đầu vào (Input Layer), các lớp ẩn (Hidden Layer) và lớp đầu ra (Output Layer). Lớp đầu vào là lớp có kết nối với thế giới bên ngoài, sẽ nhận thông tin từ thế giới bên ngoài. Lớp ẩn không có kết nối với thế giới bên ngoài, nó chỉ kết nối với lớp đầu vào và lớp đầu ra. Lớp đầu ra sẽ cung cấp đầu ra của mạng ANN cho thế giới bên ngoài sau khi thông tin vào được mạng xử lý.

Theo nghiên cứu [20], phân bố nhiệt trong kết cấu mặt đường phụ thuộc vào nhiệt độ tại bề mặt của mặt đường và sự dẫn truyền nhiệt bên trong kết cấu mặt đường. Nhiệt độ tại bề mặt của mặt đường (T_{suf}) có thể được tính toán thông qua các dòng nhiệt đến và đi tại mặt đường [21] hoặc được đo trực tiếp. Với hướng nghiên cứu thực nghiệm thống kê dự đoán phân bố nhiệt độ mặt đường, nhiệt độ không khí (T_{air}) là biến khí hậu được đánh giá có ảnh hưởng nhiều đến phân bố nhiệt trong các mô hình dự đoán phân bố nhiệt độ [11,22]. Ngoài ra, nghiên cứu [15,20] cho thấy trường độ trong mặt đường BTN thay đổi theo độ sâu (Depth) của BTN và diễn biến theo thời gian trong ngày (Time) rất khác nhau.

Do vậy trong nghiên cứu này, phương pháp ANN sử dụng biến đầu vào cho mô hình dự đoán nhiệt độ trong BTN (T_{pave}) gồm các biến sau: Nhiệt độ đo được tại bề mặt (T_{suf}), nhiệt độ không khí (T_{air}), nhiệt độ không khí trung bình ngày hôm trước (T_{avg}) đại diện cho lịch sử của nhiệt độ BTN, độ sâu cách bề mặt của vị trí cần quan trắc nhiệt độ (Depth) và mốc thời gian trong ngày lúc quan trắc nhiệt độ (Time). Nghiên cứu [14], sử dụng mạng nơ ron để dự đoán phân bố nhiệt trong giai đoạn bảo dưỡng lớp cấp phối đá dăm gia cố xi măng với 1 lớp ẩn cho kết quả tương đối phù hợp. Nghiên cứu [12], lựa chọn mô hình 2 lớp ẩn với 25 nơ ron trong mỗi lớp ẩn. Vì vậy nghiên cứu này khảo sát cấu trúc mạng nơ ron gồm 1 lớp ẩn và 2 lớp ẩn. Lớp đầu ra có 1 biến chính là nhiệt độ của BTN (T_{pave}) như minh họa ở Hình 3. Trong nghiên cứu này, cấu trúc ANN tối ưu được lựa chọn bằng cách thay đổi số nơ ron trong lớp ẩn từ 20 đến 40, sử dụng thuật toán lan truyền ngược sai số (cascade-forward backpropagation network) cùng

hàm truyền dạng phi tuyến sigmoid. Kết quả mô hình ANN tối ưu được chọn khi sai số toàn phương trung bình (mean squared error - MSE) có giá trị nhỏ nhất và hệ số tương quan hồi quy (R) lớn nhất.



Hình 3. Mô hình cấu trúc mạng ANN nghiên cứu.

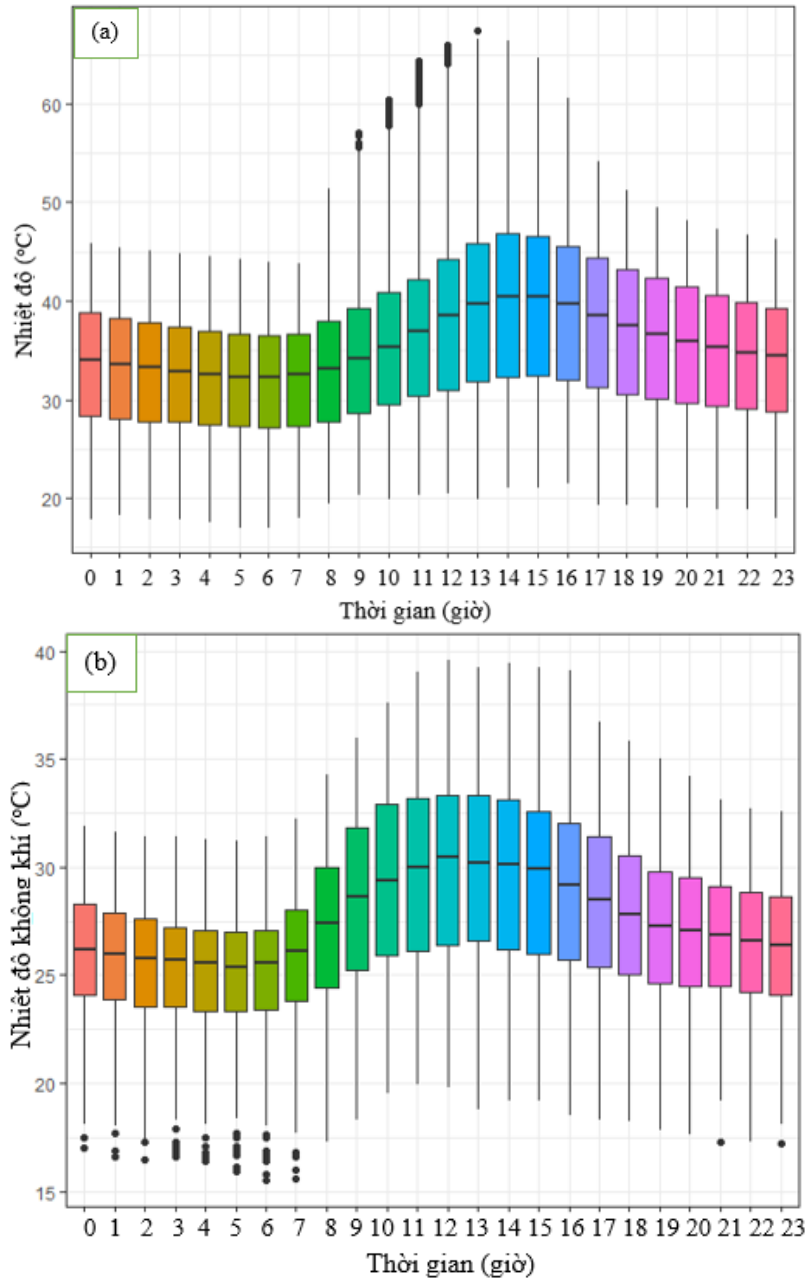
Dữ liệu nhiệt độ đo ở bề mặt của BTN và tại các độ sâu 2cm, 5cm, 7cm, 10cm, 13cm của mô hình thực nghiệm được dùng để phân tích xây dựng mô hình mạng nơron. Trong tổng số 138816 quan sát của toàn bộ dữ liệu quan trắc nhiệt độ lớp BTN, sẽ sử dụng 70% cho việc học (training), 15% cho việc xác thực (validation) và 15% còn lại cho việc kiểm tra (test). Nhiệt độ không khí (T_{air}) được thu thập tại đài khí tượng thủy văn khu vực Trung Trung bộ, địa chỉ 660 đường Trưng Nữ Vương, thành phố Đà Nẵng. Đây là trạm khí tượng gần nhất với khu vực mô hình thực nghiệm quan trắc nhiệt độ KCMĐ bê tông nhựa (khoảng cách theo đường chim bay gần 7km). Khoảng cách tối đa cho phép xét sự ảnh hưởng của khí hậu và nhiệt độ KCMĐ là không quá 8km [23]. Thời gian thu thập dữ liệu nhiệt độ không khí từ ngày 18/01/2021 đến ngày 23/12/2021 trùng với thời gian thu thập dữ liệu nhiệt độ KCMĐ. Tần suất thu thập dữ liệu nhiệt độ không khí 1 giờ/lần (theo tần suất lớn nhất có thể của Trạm). Nhiệt độ không khí trung bình ngày hôm trước (T_{avg}) được tính toán theo dữ liệu nhiệt độ không khí đã có.

3. PHÂN TÍCH KẾT QUẢ VÀ BÀN LUẬN

3.1. Kết quả quan trắc nhiệt độ mặt đường và nhiệt độ không khí

Kết quả diễn biến nhiệt độ theo giờ trong ngày của toàn bộ dữ liệu nhiệt độ BTN quan trắc và nhiệt độ không khí thu thập tại trạm khí tượng Đà Nẵng thể hiện ở Hình 4. Kết quả cho thấy nhiệt độ trong lớp BTN nằm trong khoảng 17 °C đến 67,4 °C. Trong ngày thời điểm mặt đường đạt nhiệt độ cao từ 11 giờ đến 15 giờ. Nhiệt độ không khí nằm trong khoảng 15°C đến 40°C. Thời điểm trong ngày nhiệt độ không khí có giá trị cao là từ 10 giờ đến 15 giờ. Cả nhiệt độ

không khí và nhiệt độ BTN đều có diễn biến thay đổi theo thời gian trong ngày rất lớn và diễn biến của 2 thông số này khá tương đồng nhau. Kết quả này trùng với nhận xét của nghiên cứu [11].

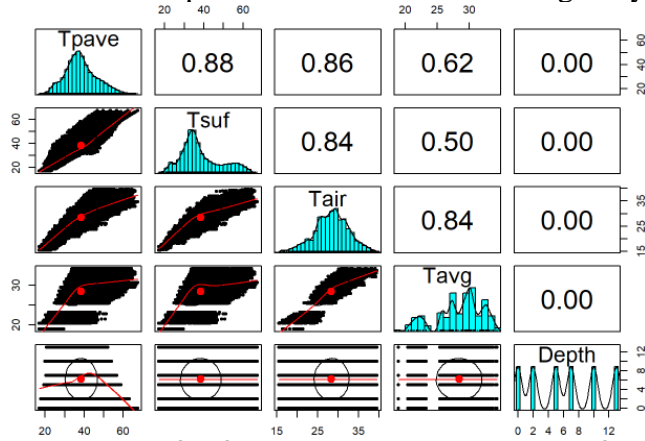


Hình 4. Thay đổi nhiệt độ theo giờ từ kết quả quan trắc: (a) nhiệt độ BTN; (b) nhiệt độ không khí.

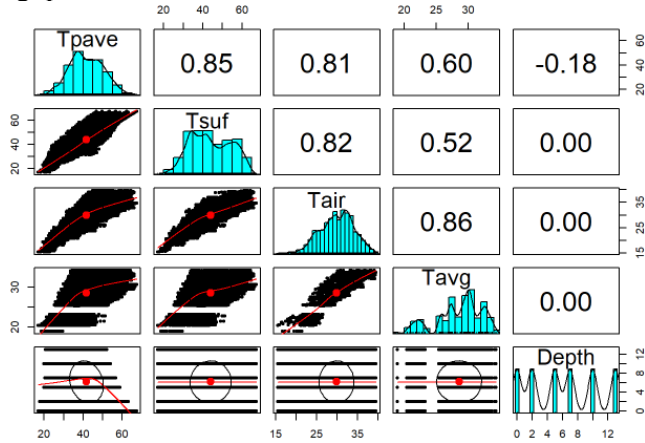
3.2. Tương quan các biến số trong mô hình dự đoán phân bố nhiệt độ

Biểu đồ tương quan giữa biến mục tiêu nhiệt độ trong BTN (T_{pave}) với các biến đầu vào thể hiện ở Hình 5,6 và 7. Kết quả cho thấy, nếu xét chung toàn bộ số liệu theo tất cả thời gian trong ngày ($0 \text{ giờ} \leq \text{Time} < 24$), biến độ sâu Depth không ảnh hưởng đến biến T_{pave} . Tuy nhiên khi xét theo khoảng thời gian ban ngày ($6 \text{ giờ} \leq \text{Time} \leq 18$), biến độ sâu có tương quan tỉ lệ nghịch với nhiệt độ T_{pave} và theo khoảng thời gian vào ban đêm ($0 \text{ giờ} \leq \text{Time} < 6 \text{ giờ}$ và $18 \text{ giờ} < \text{Time} < 24 \text{ giờ}$), biến độ sâu có tương quan tỉ lệ nghịch với biến T_{pave} . Mặc dù biến độ sâu hệ số tương quan

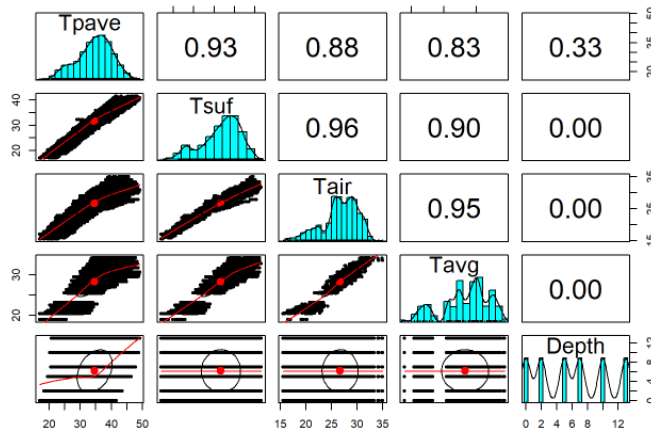
với nhiệt độ mặt đường bê tông nhựa T_{pave} thấp tuy nhiên nó rất cần thiết để thể hiện chính xác diễn biến nhiệt độ trong BTN theo thời gian ứng với từng độ sâu. Vì vậy, sử dụng biến độ sâu Depth để đưa vào mô hình cần tích hợp cùng biến thời gian Time. Biến nhiệt độ T_{suf} có giá trị tương quan với nhiệt độ T_{pave} cao nhất. Vì vậy biến T_{suf} là biến cần thiết nhất để đưa vào mô hình. Ngoài ra các biểu đồ này cũng cho thấy biến T_{suf} có giá trị tương quan với biến T_{air} và T_{avg} gần tương đồng với biến T_{pave} . Do vậy, trong một số trường hợp việc xác định giá trị thông số biến T_{air} và T_{avg} khó khăn thì có thể phát triển mô hình theo hướng khuyết 2 biến này.



Hình 5. Biểu đồ tương quan các biến số và nhiệt độ BTN với toàn bộ số liệu ($0 \text{ giờ} \leq \text{Time} < 24$).

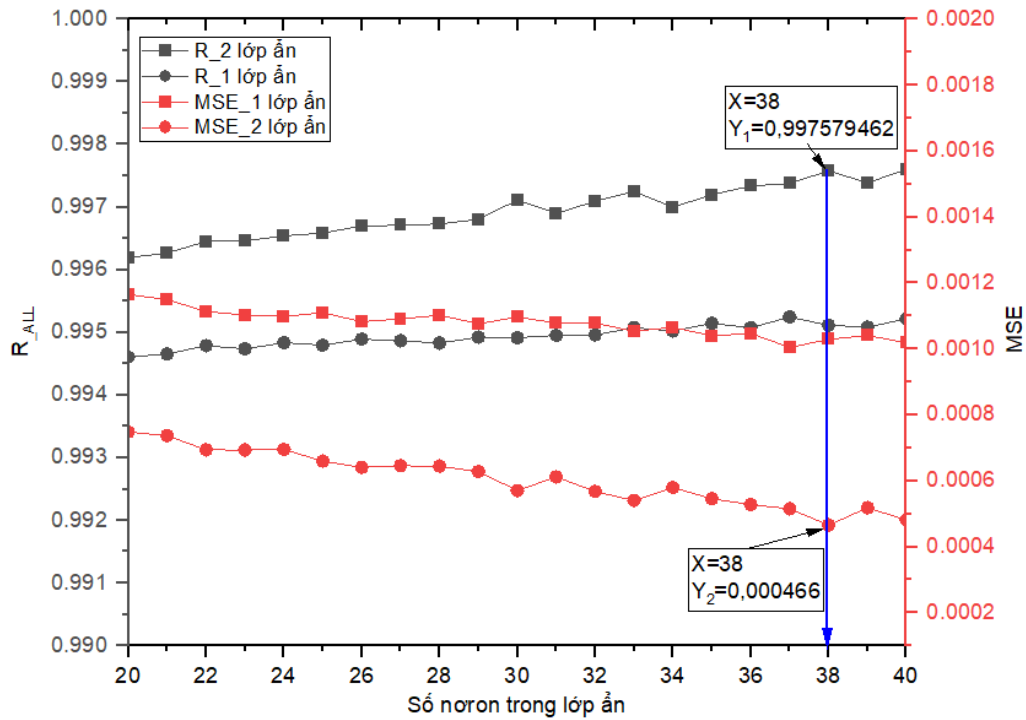


Hình 6. Biểu đồ tương quan các biến số và nhiệt độ BTN với dữ liệu vào ban ngày ($6 \text{ giờ} \leq \text{Time} \leq 18$).

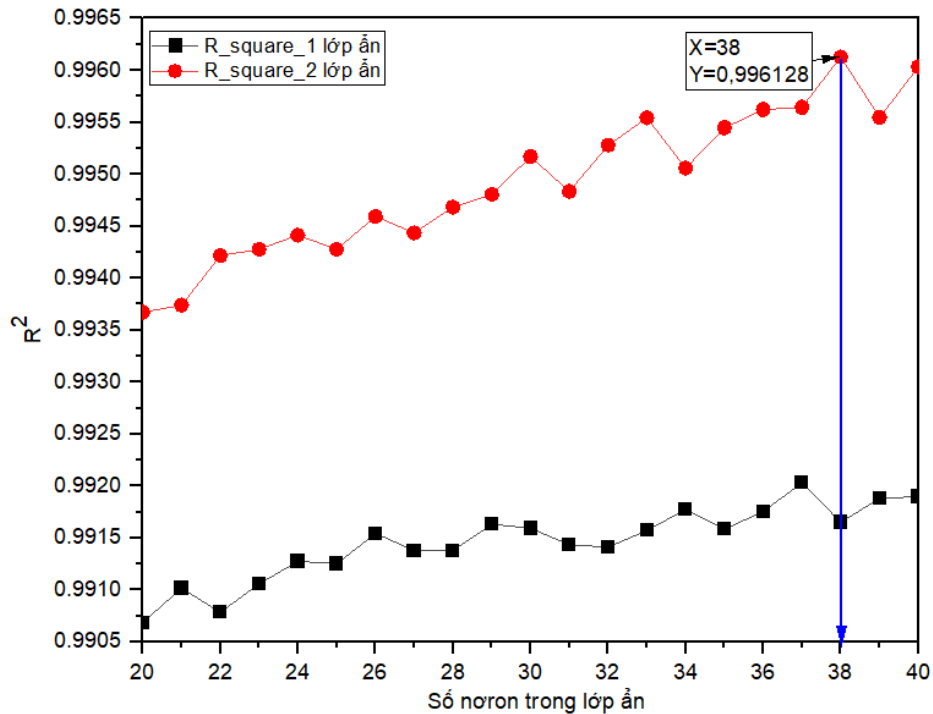


Hình 7. Biểu đồ tương quan các biến số và nhiệt độ BTN với dữ liệu ban đêm ($0 \text{ giờ} \leq \text{Time} < 6 \text{ giờ}$ và $18 \text{ giờ} < \text{Time} < 24 \text{ giờ}$).

3.3. Kết quả dự đoán phân bố nhiệt độ theo mạng nơron



Hình 8. Biểu đồ tương quan giữa sai số MSE và hệ số tương quan R theo số nơron trong lớp ẩn.



Hình 9. Biểu đồ tương quan giữa hệ số xác định R^2 và số nơron trong lớp ẩn.

Hình 8 và Hình 9 cho thấy mô hình đạt kết quả tốt nhất với mô hình có 2 lớp ẩn và 38 nơron trong các lớp ẩn. Với hệ số tương quan $R=0,997579$, $MSE=0,000466$ và $R^2 =0,996128$. Để so sánh đánh giá kết quả của mô hình dự đoán mạng nơron, tiến hành tính toán sai số trung bình

biên phương gốc (RMSE) giữa nhiệt độ đo thực tế và nhiệt độ dự toán từ mô hình mạng nơ ron nhân tạo như công thức (1).

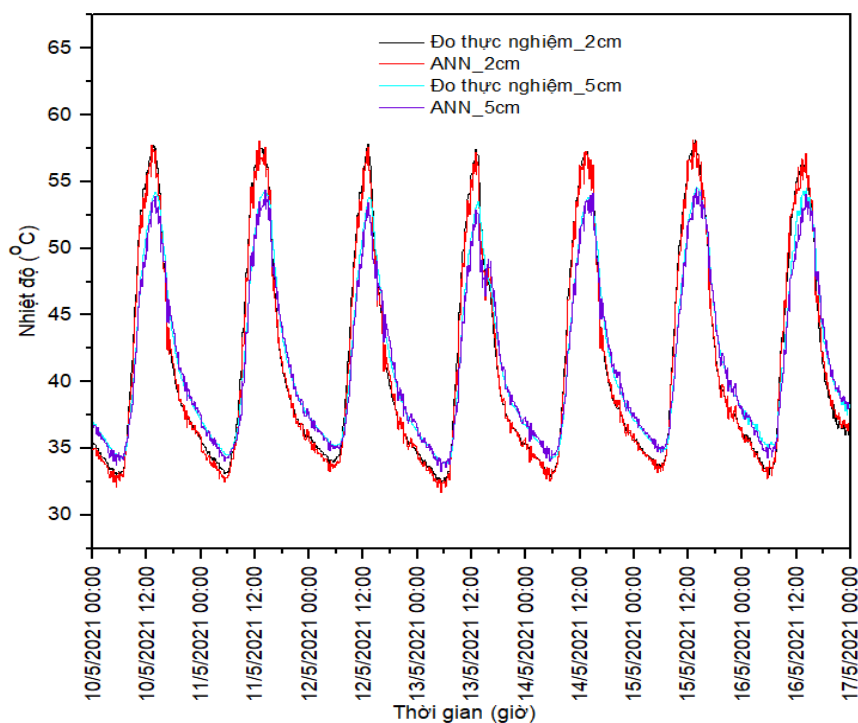
$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i^* - y_i)^2}{n}} \quad (1)$$

Trong đó: y_i - nhiệt độ xác định bằng mô hình dự đoán; y_i^* - nhiệt độ của mô hình quan trắc thực nghiệm.

Kết quả mô hình dự đoán phân bố nhiệt có độ chính xác rất cao với $R^2=0,996128$ và sai số trung bình bình phương gốc với nhiệt độ đo thực tế $RMSE=0,582^\circ C$. Kết quả sai số RMSE tại các độ sâu thể hiện ở Bảng 1. Kết quả này tốt hơn nghiên cứu Abo-Hashema [12]. Kết quả nghiên cứu của Abo-Hashema, khi sử dụng biến đầu vào là nhiệt độ không khí trung bình ngày hôm trước, nhiệt độ bề mặt và nhiệt độ tại các độ sâu trong BTN cho kết quả hệ số tương quan $R=0,985$ và $SE=1,3^\circ C$. Để kết quả so sánh giữa dự đoán theo ANN và đo thực nghiệm trực quan hơn, tiến hành vẽ biểu đồ đại diện diễn biến nhiệt độ tại độ sâu 2cm và 5cm của 7 ngày (từ ngày 10/05/2021 đến ngày 16/05/2021) thể hiện ở Hình 10. Kết quả trên Hình 10 cho thấy kết quả dự đoán theo ANN gần như trùng khớp với kết quả đo thực nghiệm.

Bảng 1. Sai số RMSE giữa kết quả dự đoán từ mạng nơ ron và nhiệt độ quan trắc thực tế

Sai số RMSE giữa nhiệt độ dự đoán từ mạng nơ ron và nhiệt độ đo thực tế ở các độ sâu (°C)						
0cm	2cm	5cm	7cm	10cm	13cm	
0,369	0,519	0,626	0,669	0,641	0,665	



Hình 10. Diễn biến nhiệt độ tại độ sâu 2cm và 5cm giữa kết quả dự đoán theo ANN và đo thực nghiệm.

4. ỨNG DỤNG MÔ HÌNH DỰ ĐOÁN NHIỆT ĐỘ CHO THÍ NGHIỆM ĐO VĨNG BẰNG CẦN BENKELMAN

Kết quả nghiên cứu ở mục 3.3. cho thấy mô hình mạng nơron nhân tạo cho kết quả có độ chính xác cao, có thể dự đoán được nhiệt độ BTN theo các độ sâu trong BTN (Depth, cm) theo thời gian trong ngày (Time, h) nếu biết được nhiệt độ bề mặt (T_{suf} , °C), nhiệt độ không khí tại thời điểm đo (T_{air} , °C) và nhiệt độ không khí trung bình của ngày trước đó (T_{avg} , °C). Nhiệt độ tại độ sâu 4cm của BTN phục vụ cho thí nghiệm đo vũng bằng cần Benkelman có thể dự đoán được từ mô hình ANN này. Tuy nhiên, để việc dự đoán nhiệt độ tại độ sâu 4cm (T_{4cm}) phục vụ thí nghiệm đo độ vũng bằng cần Benkelman có tính ứng dụng cao, dễ áp dụng thực tế. Nghiên cứu tiếp tục đề xuất mô hình hồi quy phi tuyến dự đoán nhiệt độ tại độ sâu 4cm. Căn cứ vào khả năng thu thập dữ liệu đầu vào cho mô hình dự đoán, nghiên cứu đề xuất 3 mô hình với số lượng biến đầu vào khác nhau: (i) Trường hợp 1 sử dụng biến đầu vào gồm T_{suf} , T_{air} , T_{avg} và Time; (ii) Trường hợp 2 sử dụng biến đầu vào gồm: T_{suf} , T_{air} và Time; (iii) Trường hợp 3 sử dụng biến đầu vào gồm: T_{suf} và Time. Nhiệt độ BTN ở độ sâu 4 cm được xác định từ mô hình dự đoán mạng nơron sẽ được dùng làm dữ liệu đối sánh. Kết quả thống kê của các mô hình dự đoán thể hiện ở Bảng 2.

Mô hình 1:

$$T_{4cm} = b_1 + b_2T_{suf} + (b_3T_{suf} + b_4T_{air} + b_5T_{avg})\cos(2\pi Time/24 + b_6) \quad (2)$$

Mô hình 2:

$$T_{4cm} = b_1 + b_2T_{suf} + (b_3T_{suf} + b_4T_{air})\cos(2\pi Time/24 + b_5) \quad (3)$$

Mô hình 3:

$$T_{4cm} = b_1 + b_2T_{suf} + b_3T_{suf}\cos(2\pi Time/24 + b_4) \quad (4)$$

Bảng 2. Số liệu phân tích thống kê của các mô hình dự đoán.

Mô hình	Hệ số	Giá trị ước lượng của các hệ số	SE	p-value	R ²	RMSE (°C)
Mô hình 1	b ₁	1,7249	0,037841	0	0,99	0,847
	b ₂	0,97883	0,0011162	0		
	b ₃	0,37073	0,0023983	0		
	b ₄	-0,12649	0,0087801	7,5615e-47		
	b ₅	-0,25659	0,0064424	0		
	b ₆	0,62535	0,0030849	0		
Mô hình 2	b ₁	1,9399	0,038003	0	0,99	0,877
	b ₂	0,97388	0,0011136	0		
	b ₃	0,43172	0,0019583	0		
	b ₄	-0,46488	0,0025644	0		
	b ₅	0,61874	0,0031471	0		
Mô hình 3	b ₁	4,1478	0,054981	0	0,975	1,37
	b ₂	0,89492	0,0014732	0		
	b ₃	0,079738	0,0003927	0		
	b ₄	0,65567,4	0,0060829	0		

Trong đó: T_{4cm} là nhiệt độ BTN tại độ sâu 4cm; T_{suf} là nhiệt độ tại bề mặt (°C); T_{air} là nhiệt độ không khí tại thời điểm đo T_{suf} (°C); T_{avg} là nhiệt độ trung bình ngày hôm trước (°C). Time là thời gian tại thời điểm đo tính theo số thập phân (giờ), ví dụ thời điểm đo là 15 giờ 30 phút thì $Time = 15 + 30/60 = 15,5$ giờ. Các đối số trong hàm cos là radian.

Để đánh giá hiệu quả của các mô hình đã xây dựng, tiến hành so sánh với mô hình của các nghiên cứu trước như mô hình của Bells được đề xuất trong AASHTO T317 [24] và mô hình của Al-Abdul Wahhab và cộng sự [25], cụ thể như phương trình (5) và (6).

Mô hình của AASHTO T317 [24]:

$$T_{pave} = 0,95 + 0,892T_{suf} + (\log(\text{Depth}) - 1,25)(-0,448T_{suf} + 0,621T_{avg} + 1,83A + 0,042 T_{suf}B) \quad (5)$$

Trong đó: T_{pave} là nhiệt độ của BTN; A và B được xác định như Bảng 3; Depth là độ sâu cách mặt đường của vị trí quan trắc (mm); các biến số khác tương tự như mô hình của nghiên cứu.

Bảng 3. Hướng dẫn lựa chọn các tham số tính toán từ mô hình Bells

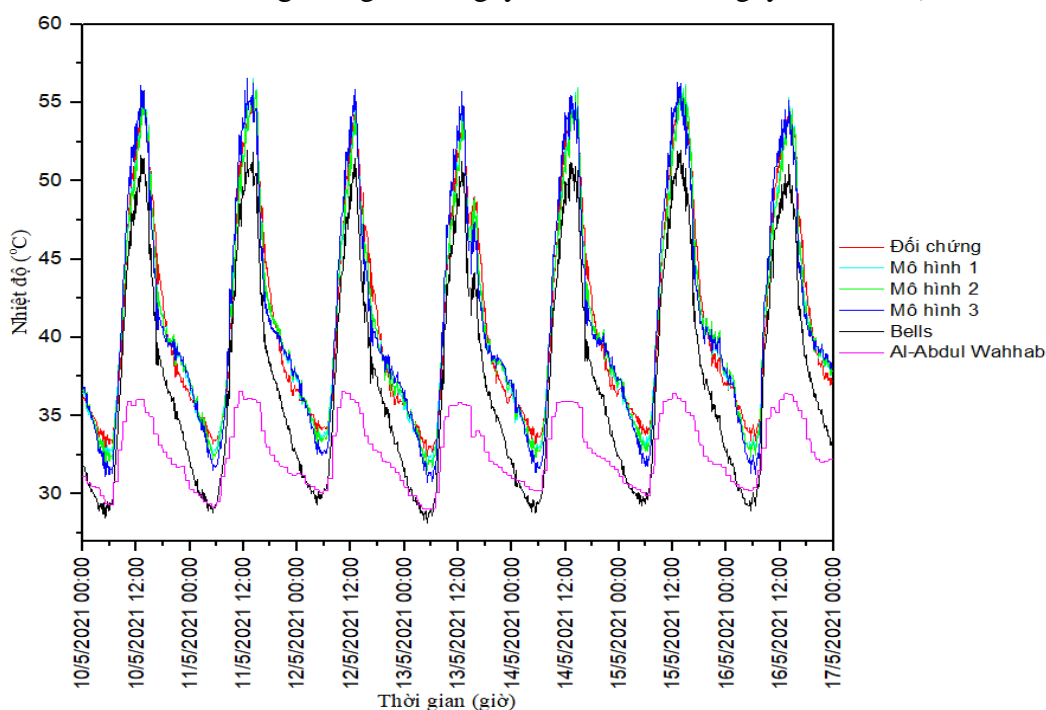
Thời gian của ngày (Time), giờ	A	B
0,0 < Time < 3,0	$\text{Sin}((\text{Time} + 24 - 15,5)*20)$	$\text{Sin}((\text{Time}+24 - 13,5 *20)$
3,0 < Time < 5,0	$\text{Sin}((\text{Time} + 24 - 15,5)*20)$	-1
5,0 < Time < 9,0	-1	-1
9,0 < Time < 11,0	-1	$\text{Sin}((\text{Time} - 13,5)*20)$
11,0 < Time < 24,0	$\text{Sin}((\text{Time}-15,5)*20)$	$\text{Sin}((\text{Time} - 13,5)*20)$

Mô hình của Al-Abdul Wahhab và cộng sự [25]:

$$T_{pave} = 3,714 + 1,006T_{air} - 0,146\text{Depth} \quad (6)$$

Trong đó: T_{pave} là nhiệt độ của BTN; Depth là độ sâu cách mặt đường của vị trí quan trắc (cm); các biến số khác tương tự như mô hình của nghiên cứu.

Hình 11 minh họa kết quả dự đoán phân bố nhiệt tại độ sâu 4cm trong lớp BTN từ các mô hình phân tích dự đoán trong thời gian từ ngày 10/5/2021 đến ngày 16/5/2021).



Hình 11. So sánh diễn biến nhiệt độ tại độ sâu 4cm của các mô hình.

Kết quả đồ thị tương quan cho thấy các mô hình dự đoán của nghiên cứu có độ tương quan với nhiệt độ đối chứng tốt hơn mô hình của Bells và Al-Abdul Wahhab, sự sai khác lớn nhiệt độ dự đoán từ các nghiên cứu trước có thể do điều kiện khí hậu mỗi khu vực có sự khác biệt và mô hình Al-Abdul Wahhab và cộng sự [25] chưa kể được diễn biến nhiệt độ theo thời gian trong ngày và thiếu biến đầu vào quan trọng là nhiệt độ bề mặt T_{suf} .

Kết quả tính toán sai số căn quân phương RMSE của nhiệt độ BTN tại 4cm giữa kết quả dự đoán từ mạng nơron với các mô hình hồi quy phi tuyến theo các nghiên cứu được thể hiện ở Bảng 4. Kết quả từ Bảng 4 cho thấy, các mô hình nghiên cứu cho kết quả gần tương đương với nhiệt độ dự đoán từ ANN, với sai số RMSE khá nhỏ RMSE = 0,847 °C với mô hình 1, RMSE=0,877 °C với mô hình 2 và RMSE=1,367 °C với mô hình 3. Các kết quả này nhỏ hơn nhiều so với mô hình Bells (RMSE=3,539 °C), mô hình Al-Abdul Wahhab (RMSE=8,317 °C).

Bảng 4. Sai số RMSE giữa kết quả dự đoán từ mạng nơron và các mô hình hồi quy.

Sai số RMSE của các mô hình dự đoán (°C)				
Mô hình 1	Mô hình 2	Mô hình 3	Mô hình Bells [24]	Mô hình Al-Abdul Wahhab và cộng sự [25]
0,847	0,877	1,367	3,539	8,317

5. KẾT LUẬN

Bài báo trình bày kết quả quan trắc nhiệt độ mặt đường BTN thực nghiệm trong 12 tháng của năm 2021 ở Đà Nẵng. Kết quả quan trắc nhiệt độ cho thấy nhiệt độ trong lớp BTN nằm trong khoảng 17 °C đến 67,4 °C. Nhiệt độ trong lớp BTN có diễn biến thay đổi theo thời gian trong ngày và theo độ sâu rất khác nhau.

Số liệu quan trắc nhiệt độ thực tế đã được sử dụng để xây dựng mô hình dự đoán nhiệt độ theo mạng nơron nhân tạo. Kết quả dự đoán nhiệt độ mặt đường bê tông nhựa theo mạng nơron nhân tạo được đối sánh và cho thấy mô hình có độ chính xác rất cao với $R^2=0,996$ và RMSE=0,582°C.

Nghiên cứu đã áp dụng kết quả dự đoán mô hình mạng nơron nhân tạo để xây dựng mô 3 hình hồi quy phi tuyến dự đoán nhiệt độ BTN tại độ sâu 4cm với các trường hợp thông số đầu vào khác nhau, phục vụ cho thí nghiệm xác định độ võng đàn hồi bằng cần Benkelman. Các mô hình này cũng đã được đối sánh với các nghiên cứu trước và cho thấy rất hiệu quả. Kết quả tính toán sai số giữa nhiệt độ dự đoán từ các mô hình hồi quy phi tuyến đã xây dựng và nhiệt độ dự đoán từ mô hình mạng nơron rất nhỏ, RMSE = 0,847 °C với mô hình 1, RMSE=0,877 °C với mô hình 2 và RMSE=1,367 °C với mô hình 3. Người sử dụng có thể cân nhắc sử dụng một trong ba mô hình đã dự đoán để áp dụng cho thí nghiệm của mình tùy điều kiện dữ liệu biến đầu vào thu thập được.

LỜI CẢM ƠN

Trần Thị Thu Thảo được tài trợ bởi Chương trình học bổng đào tạo thạc sĩ, tiến sĩ trong nước của Quỹ Đổi mới sáng tạo Vingroup (VINIF), mã số VINIF.2022.TS119.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1]. T.T.T. Tran, H.H. Nguyen, P.N. Pham, T. Nguyen, Q. Phuc, H.N. Huynh, Temperature-related thermal properties of paving materials : experimental analysis and effect on thermal distribution in semi-rigid pavement, Road Mater. Pavement Des, 2023. <https://doi.org/10.1080/146740629.2023.2170270>

- [2]. AASHTO 2008, Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide, Natl. Coop. Highw. Res. Progr. Transp. Board Natl. Res. Counc, (2008) 194.
- [3]. C. Yavuzturk, K. Ksaibati, A.D. Chiasson, Assessment of temperature fluctuations in asphalt pavements due to thermal environmental conditions using a two-dimensional, transient finite-difference approach, *J. Mater. Civ. Eng*, 17 (2005) 465–475. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(2005\)17:4\(465\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2005)17:4(465))
- [4]. M.J.C. Minhoto, J.C. Pais, P.A.A. Pereira, L.G. Picado-Santos, Predicting asphalt pavement temperature with a three-dimensional finite element method, *Transp. Res. Rec*, (2005) 96–110. <https://doi.org/10.3141/1919-11>
- [5]. J. Chen, M. Zhang, H. Wang, L. Li, Evaluation of thermal conductivity of asphalt concrete with heterogeneous microstructure, *Appl. Therm. Eng*, 84 (2015) 367,4–374. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.03.070>
- [6]. B. Athukorallage, T. Dissanayaka, S. Senadheera, D. James, Performance analysis of incorporating phase change materials in asphalt concrete pavements, *Constr. Build. Mater*, 164 (2018) 419–432. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.226>
- [7]. J. Basheer Sheeba, A. Krishnan Rohini, Structural and Thermal Analysis of Asphalt Solar Collector Using Finite Element Method, *J. Energy*, 2014 (2014) 1–9. <https://doi.org/10.1155/2014/602087>
- [8]. H.F. Hassan, A.S. Al-Nuaimi, R. Taha, T.M.A. Jafar, Development of Asphalt Pavement Temperature Models for Oman, *J. Eng. Res. [TJER]*, 2 (2005) 32. <https://doi.org/10.24200/tjer.vol2iss1pp32-42>
- [9]. I.M.A. Ariawan, B.S. Subagio, B.H. Setiadji, Development of asphalt pavement temperature model for tropical climate conditions in West Bali region, *Procedia Eng*, 125 (2015) 474–480. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.11.126>
- [10]. J. Chao, Z. Jinxi, Prediction Model for Asphalt Pavement Temperature in High-Temperature Season in Beijing, *Adv. Civ. Eng*. 2018, 2018. <https://doi.org/10.1155/2018/1837952>
- [11]. J. Chen, H. Wang, P. Xie, Pavement temperature prediction: Theoretical models and critical affecting factors, *Appl. Therm. Eng*, 158 (2019) 113755. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.113755>
- [12]. M.A. Abo-Hashema, Modeling pavement temperature prediction using artificial neural networks, *Airf. Highw. Pavement 2013 Sustain. Effic. Pavements - Proc. 2013 Airf. Highw. Pavement Conf*, (2013) 490–505. <https://doi.org/10.1061/9780784413005.039>
- [13]. P.V. B. Matic, D. Matic, S. Sremac, N. Radovic, A Model For The Pavement Temperature Prediction At Specified Depth Using Neural Networks, *Metal*, 52 (2013) 505–508.
- [14]. T.T.T. Tran, T. Nguyen, P.N. Pham, H.H. Nguyen, P.Q. Nguyen, Thermal distribution in cement-treated base: Effect of curing methods and temperature estimation using Artificial Neural Networks, *Constr. Build. Mater*, 279 (2021) 122528. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122528>
- [15]. T. T. T. Tran, H. H. Nguyen, P. Q. Nguyen, T. Nguyen, P. N. Pham, V.T. Tran, *Developing Statistical Models to Predict Temperature Distribution in Asphalt Concrete in Danang City*, Springer Singapore, 2022, 567-574. <https://doi.org/10.1007/978-981-16-7160-9>
- [16]. TCVN 8867 : 2011, Áo đường mềm - Xác định mô đun đàn hồi chung của kết cấu bằng cần đo võng Benkelman, Bộ Khoa Học và Công Nghệ, 2011.
- [17]. TCVN 8819-2011, Bê tông nhựa nóng - Yêu cầu thi công và nghiệm thu, Bộ khoa học và công nghệ, 2011.
- [18]. TCVN 8858-2011, Móng cấp phối đá dăm và cấp phối thiên nhiên gia cố xi măng trong kết cấu áo đường ô tô - Thi công và nghiệm thu, Bộ Khoa Học và Công Nghệ, 2021.
- [19]. Nguyễn Chính Kiên, Nguyễn Tiến Cường, Nguyễn Tuấn Anh, Ứng dụng mạng nơron nhân tạo vào bài toán dự báo, *Đề Tài Cơ Sở Viện Cơ Học*, 2017.
- [20]. Nguyễn Hồng Hải, Trần Thị Thu Thảo, Hoàng Văn Tĩnh, Tôn Thất Bảo Nam, Huỳnh Ngọc Hùng, Phân bố nhiệt độ trong mặt đường bê tông nhựa: Thực nghiệm và mô phỏng số, *Tap Chí Khoa Học và Công Nghệ - Đại Học Đà Nẵng*, 20 (2022) 50–55. <https://jst-ud.vn/jst-ud/article/view/7778>
- [21]. Trần Thị Thu Thảo, Nguyễn Hồng Hải, Nguyễn Quang Phúc, Huỳnh Ngọc Hùng, Phạm Ngọc Phương, Ảnh hưởng của các thông số khí hậu đến sự phân bố nhiệt độ trong mặt đường bê tông nhựa,

Tạp Chí Khoa Học và Công Nghệ - Đại Học Đà Nẵng, 20 (2022) 1–5. <https://jst-ud.vn/jst-ud/article/view/7987>

[22].Lijun Sun, Structural Behavior of Asphalt Pavements, Structural Behavior of Asphalt Pavements. (2016) 1045. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-849908-5.00007-9>

[23].I. Adwan, A. Milad, Z.A. Memon, I. Widyatmoko, N.A. Zanuri, N.A. Memon, N.I.M. Yusoff, Asphalt pavement temperature prediction models: A review, Appl. Sci, 11 (2021) 1–19. <https://doi.org/10.3390/app11093794>

[24].AASHTO Designation: T 317-04 (2013) 1., Standard Test Method for Prediction of Asphalt-Bound Pavement Layer Temperatures

[25].Hamad I. Al-Abdul Wahhab, Ibrahim M. Asi, Rezaqallah H. Ramadhan, Modeling Resilient Modulus and Temperature Correction for Saudi Roads, J. Mater. Civ. Eng, (2001) 8–11. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(2001\)13:4\(298\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2001)13:4(298))