



PREDICTION OF TEMPERATURE DISTRIBUTION IN CEMENT-TREATED BASES CONSIDERING THE INFLUENCE OF RUBBER AGGREGATES AND ASPHALT LAYER THICKNESS

Thao Thi Thu Tran^{1*}, Phuong Ngoc Pham¹, 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: 06/07/2023

Revised: 12/09/2023

Accepted: 11/10/2023

Published online: 15/10/2023

<https://doi.org/10.47869/tcsj.74.8.12>

* *Corresponding author*

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

Abstract. Studying the temperature distribution in cement-treated bases (CTB) during the operational phase is significant for analyzing the behavior of pavement structures under actual working conditions. The paper presents numerical simulation-based outcomes of temperature distribution in CTB, in which rubber aggregates with sizes ranging from 3 mm to 6 mm were used to replace the conventional aggregates sized 0.425 mm to 9.5 mm at varying volume percentages of 0%, 5%, 10%, and 20%. Furthermore, the effect of asphalt layer thickness variations of 6 cm, 8 cm, 10 cm, 12 cm, 14 cm, 16 cm, 18 cm, and 20 cm on such temperature distribution are explored. The findings demonstrate a substantial reduction in temperature fluctuation amplitude within CTB incorporating rubber aggregates, surpassing 30% compared to the control CTB. Furthermore, an Artificial Neural Network model is developed to predict the temperature in the CTB, considering the influence of asphalt layer thickness and the partial substitution of graded aggregates with waste rubber. The model exhibits promising prediction results, with the minimal deviation between the predicted and simulated temperatures, as achieved by a low root mean square error (RMSE) of 0.25°C and a high coefficient of determination (R^2) of 0.9939.

Keywords: cement-treated bases, rubber aggregates, temperature distribution estimation, Artificial Neural Networks, numerical simulation.



DỰ BÁO PHÂN BỐ NHIỆT ĐỘ LỚP MÓNG CẤP PHỐI ĐÁ DĂM GIA CỔ XI MĂNG CÓ XÉT ĐẾN ẢNH HƯỞNG CỦA CỐT LIỆU CAO SU VÀ CHIỀU DÀY TẦNG MẶT BÊ TÔNG NHỰA

Trần Thị Thu Thảo^{1*}, Phạm Ngọc Phương¹, 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: 06/07/2023

Ngày nhận bài sửa: 12/09/2023

Ngày chấp nhận đăng: 11/10/2023

Ngày xuất bản Online: 15/10/2023

<https://doi.org/10.47869/tcsj.74.8.12>

* Tác giả liên hệ

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

Tóm tắt. Nghiên cứu phân bố nhiệt độ trong lớp cấp phối đá dăm gia cố xi măng (CPĐD GCXM) trong quá trình khai thác rất có ý nghĩa cho việc phân tích các ứng xử của kết cấu mặt đường trong điều kiện làm việc thực tế. Bài báo trình bày kết quả mô phỏng số phân bố nhiệt độ trong lớp móng CPĐD GCXM có đá dăm cỡ hạt 0,425 mm đến 9,5 mm được thay thế bằng cao su phế thải có cỡ hạt 3mm đến 6mm theo các phần trăm thể tích 0%, 5%, 10% và 20% ứng với chiều dày lớp bê tông nhựa thay đổi lần lượt 6cm, 8cm, 10cm, 12cm, 14cm, 16cm, 18cm và 20cm. Kết quả nghiên cứu cho thấy biên độ dao động nhiệt độ trong CPĐD GCXM có sử dụng cao su phế thải giảm đáng kể, lên đến trên 30% so với CPĐD GCXM đối chứng. Ngoài ra, nghiên cứu đã phát triển mô hình mạng nơron nhân tạo để dự báo nhiệt độ trong lớp CPĐD GCXM có xét đến ảnh hưởng của chiều dày tầng mặt bê tông nhựa và hàm lượng cao su phế thải thay thế cốt liệu đá dăm. Mô hình có kết quả dự báo rất khả quan với sai số giữa nhiệt độ dự báo và mô phỏng số rất nhỏ $RMSE=0,25^{\circ}C$ và hệ số xác định rất cao $R^2=0,9939$.

Từ khóa: cấp phối đá dăm gia cố xi măng, cốt liệu cao su phế thải, dự báo phân bố nhiệt độ, mạng nơron nhân tạo, mô phỏng số.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Vật liệu cấp phối đá dăm gia cố xi măng (CPĐD GCXM) có nhiều ưu điểm như ổn định nước, cường độ cao giúp tiết kiệm vật liệu xây dựng đường. Lớp móng CPĐD GCXM thích hợp với các tuyến đường trục chính, đường cao tốc, đường có nhiều xe nặng và lưu lượng xe chạy lớn, đường lãn, sân đỗ cho mặt đường sân bay và đặc biệt được sử dụng trong điều kiện làm việc của mặt đường có chế độ thủy nhiệt bất lợi [1,2]. Thêm nữa, thời gian gần đây các tuyến đường cao tốc được xây dựng ngày càng nhiều nên nguồn vật liệu cung cấp cho xây dựng đường rất khó khăn, việc sử dụng lớp móng CPĐD GCXM cũng là một giải pháp nhằm giảm áp lực cho việc cung ứng vật tư trong xây dựng đường.

Tuy nhiên lớp móng CPĐD GCXM có nhược điểm là có thể xuất hiện vết nứt do co ngót và dẫn đến nứt phản ánh lan truyền lên tầng mặt bê tông nhựa (BTN). Vết nứt trong lớp CPĐD GCXM thường xuất hiện sớm trong quá trình bảo dưỡng hoặc trong quá trình khai thác [3]. Khi vết nứt xuất hiện trong lớp móng gia cố và độ mở rộng đạt đến một mức độ nhất định sẽ ứng xử như một khe nối và ứng suất tập trung ở đáy lớp BTN sẽ xuất hiện tại vị trí này. Sự co giãn của lớp móng gia cố do ảnh hưởng của sự thay đổi nhiệt độ hay sự tác dụng của tải trọng nặng có thể làm cho chiều rộng của các khe nứt tăng lên. Khi ứng suất kéo ở đáy lớp BTN vượt quá cường độ chịu kéo cho phép, làm xuất hiện vết nứt phản ánh. Một số nghiên cứu cho rằng để hạn chế việc nứt phản ánh từ lớp móng CPĐD GCXM lên tầng mặt BTN cần xem xét cấu tạo bề dày lớp BTN cho hợp lý và cũng khuyến nghị tùy thuộc vào khí hậu từng vùng miền để đưa ra chiều dày lớp BTN [4]. TCCS 38:2022 [5] quy định tổng chiều dày tối thiểu của BTN trên lớp CPĐD GCXM. Do vậy, việc xác định phân bố nhiệt độ trong CPĐD GCXM có xét đến dự thay đổi chiều dày tầng mặt BTN sẽ cung cấp cơ sở dữ liệu cho việc nghiên cứu ứng xử của kết cấu mặt đường (KCMĐ) có lớp móng CPĐD GCXM dưới sự ảnh hưởng của nhiệt độ. Từ đó, góp phần tìm ra các giải pháp giúp hạn chế hiện tượng nứt phản ánh cho KCMĐ nửa cứng.

Sử dụng cốt liệu cao su nghiền từ lốp xe để làm chất độn thay thế một phần cốt liệu đá dăm trong CPĐD GCXM là một giải pháp được đề xuất gần đây nhằm tăng khả năng kháng nứt cho loại móng đường này [6–9]. Phạm Ngọc Phương và cộng sự [8] đã sử dụng cốt liệu cao su với kích thước 3 mm đến 6 mm thay thế cho cốt liệu đá dăm có kích thước 0,425 mm đến 9,5 mm trong cấp phối đá dăm Dmax25 gia cố 4% xi măng với tỷ lệ phần trăm thay thế theo thể tích 0%, 5%, 10% và 20%. Kết quả khảo sát các thông số nhiệt lý (độ dẫn nhiệt, độ khuếch tán nhiệt và nhiệt dung riêng) cho thấy hàm lượng cốt liệu cao su cao hơn sẽ làm giảm độ dẫn nhiệt, độ khuếch tán nhiệt và nhiệt dung riêng của vật liệu CPĐD GCXM. Nghiên cứu cũng chỉ ra rằng sử dụng cao su thay thế một phần cốt liệu đá dăm giúp giảm nhiệt độ và dao động nhiệt trong CPĐD GCXM, điều này góp phần hạn chế hiện tượng nứt do co ngót nhiệt [8].

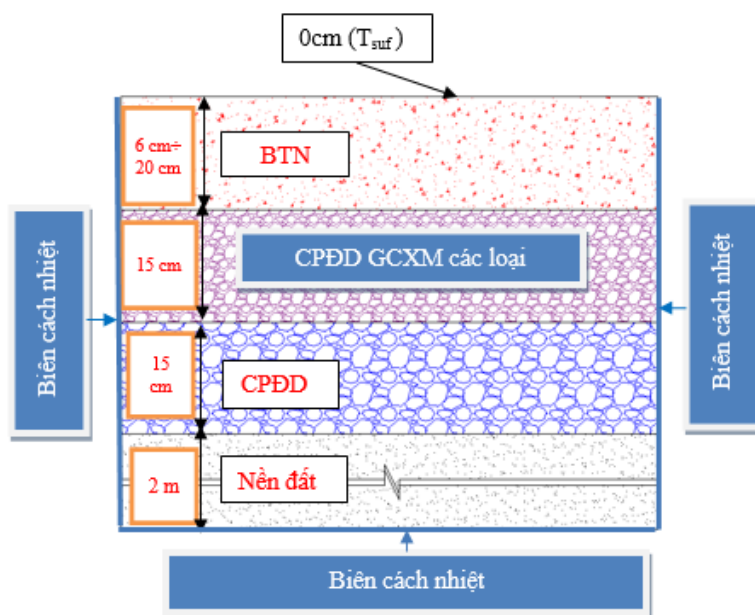
Nghiên cứu này tập trung dự báo trường phân bố nhiệt độ (theo thời gian và theo độ sâu) trong lớp móng gia cố khi chiều dày BTN thay đổi từ 6-20 cm và phần trăm thể tích cốt liệu cao su thay thế cốt liệu đá dăm kích thước 0,425-9,5mm thay đổi là 0%, 5%, 10% và 20% trong cấp phối đá dăm Dmax25 gia cố 4% xi măng. Dữ liệu phân bố nhiệt độ trong CPĐD GCXM ứng với các trường hợp nghiên cứu được thu thập bằng mô phỏng số thông qua phần mềm ANSYS tương tự như các nghiên cứu có trước [2,8,10]. Từ cơ sở dữ liệu này, sử dụng phương pháp mạng nơron nhân tạo (ANN) (phương pháp được đánh giá cho kết quả rất khả quan trong dự báo phân bố nhiệt độ KCMĐ [1,11,12]) để dự báo trường nhiệt độ phân bố trong lớp CPĐD GCXM có xét đến ảnh hưởng của thể tích cốt liệu cao su phê thải thay thế cốt liệu đá dăm trong thành phần cấp phối hạt lớp móng gia cố và sự thay đổi chiều dày của tầng mặt BTN.

2. XÂY DỰNG CƠ SỞ DỮ LIỆU MÔ HÌNH ANN

2.1. Các trường hợp nghiên cứu

Mô hình của KCMĐ sử dụng trong nghiên cứu được thể hiện ở Hình 1. Dữ liệu xây dựng mô hình dự báo phân bố nhiệt độ trong lớp CPĐĐ GCXM được lấy từ kết quả mô phỏng số thông qua phần mềm ANSYS. Tiến hành nghiên cứu mô phỏng với 32 trường hợp với tổ hợp của 8 bề dày lớp BTN (6cm, 8cm, 10cm, 12cm, 14cm, 16cm, 18cm và 20cm) và 4 loại CPĐĐ GCXM có tỷ lệ phần trăm cao su phế thải (cỡ hạt 3mm đến 6mm) thay thế đá dăm (cỡ hạt 0,425 mm đến 9,5 mm) theo thể tích lần lượt 0%, 5%, 10% và 20%. Các loại CPĐĐ GCXM này đã được đánh giá chất lượng và xác định các thông số nhiệt lý trong nghiên cứu [8].

Ở mỗi trường hợp kết quả nhiệt độ tại 6 độ sâu (0cm, 3cm, 6cm, 9cm, 12cm, 15cm) cách bề mặt trên của lớp CPĐĐ GCXM được thu thập, quá trình mô phỏng được tiến hành với dữ liệu nhiệt độ bề mặt BTN thu thập từ thực nghiệm trong 5 ngày (từ 26/9/2020 đến 30/9/2020) với tần suất 10 phút/lần. Như vậy tổng cộng bộ số liệu quan sát thu được gồm $(32 \times 6 \times ((5 \times 24 \times 60)/10)) = 138240$ quan sát. Dữ liệu này được sử dụng để xây dựng mô hình dự báo trường phân bố nhiệt độ (theo chiều sâu và theo thời gian) trong lớp CPĐĐ GCXM có xét đến ảnh hưởng của chiều dày lớp BTN và tỷ lệ cao su phế thải thay thế cốt liệu đá dăm.



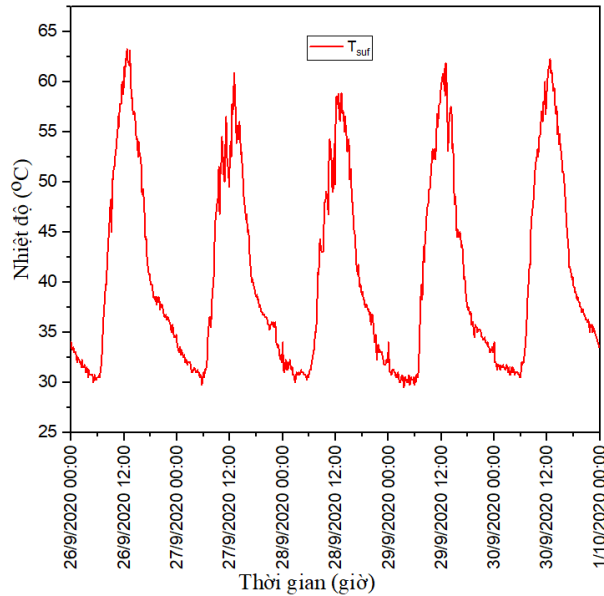
Hình 1. Mô hình KCMĐ sử dụng trong mô hình mô phỏng số.

2.2. Mô hình phân bố nhiệt độ trong KCMĐ nửa cứng theo phương pháp phần tử hữu hạn bằng phần mềm ANSYS

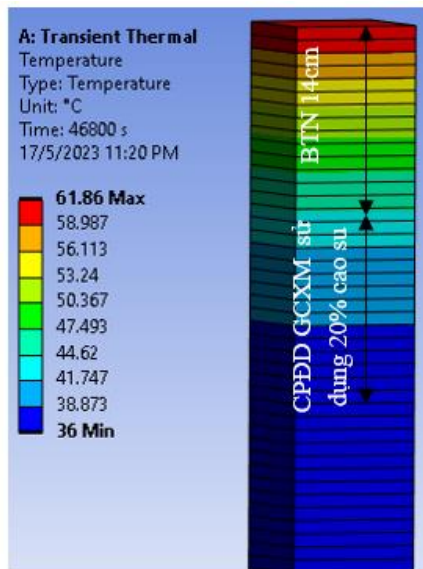
Quá trình truyền nhiệt trong KCMĐ tuân thủ theo nguyên lý của bài toán truyền nhiệt một chiều không ổn định theo thời gian [13]. Để phân tích ảnh hưởng của chiều dày tầng mặt BTN và thể tích cốt liệu cao su phế thải ảnh hưởng đến phân bố nhiệt độ trong lớp CPĐĐ GCXM, nghiên cứu sử dụng phương pháp mô phỏng số thông qua phần mềm ANSYS ACADEMIC STUDENT 2022 R2 với mô đun Workbench 2022 R2.

KCMĐ sử dụng trong mô phỏng được thể hiện ở Hình 1, gồm các lớp vật liệu: (i) lớp mặt BTN thay đổi từ 6 cm đến 20 cm; (ii) lớp móng trên bằng CPĐĐ GCXM dày 15cm; (iii) lớp móng dưới CPĐĐ và nền đất dày 2m.

Các điều kiện biên của bài toán truyền nhiệt trong KCMĐ được lấy như sau: (i) nhiệt độ tại bề mặt của KCMĐ lấy theo dữ liệu nhiệt độ đo thực tế của KCMĐ trong 5 ngày (từ ngày 26/9/2020 đến 30/9/2020) với tần suất đọc dữ liệu 10 phút/lần như nghiên cứu [14], thể hiện ở Hình 2; (ii) biên đáy đoạn nhiệt lấy ở độ sâu 2m trong nền đất như nghiên cứu của Minhoto [15]; (iii) bài toán truyền nhiệt một chiều nên biên xung quanh là biên đoạn nhiệt.



Hình 2. Nhiệt độ đo đạc thực nghiệm tại bề mặt của KCMĐ từ ngày 26/9/2020 đến ngày 30/9/2020.



Hình 3. Hình ảnh phân bố nhiệt độ trong KCMĐ lúc 13h00 ngày 29/6/2020, với CPĐĐ GCXM dày 14cm có sử dụng 20% cao su thay thế cốt liệu đá dăm.

Quá trình truyền nhiệt trong KCMĐ được xem như truyền nhiệt một chiều theo độ sâu KCMĐ nên các phần tử được chia lưới theo độ sâu và không chia theo phương ngang để tốc độ giải bài toán nhanh mà vẫn đảm bảo độ chính xác. Mỗi phần tử có kích thước 1 cm theo chiều sâu (xem Hình 3). Chiều dày phần tử tương tự nghiên cứu của Alavi và cộng sự [16] và dày hơn của nghiên cứu Herb và cộng sự (sử dụng bề dày 2 cm) [17]. Phần tử kích thước dày 1 cm sử dụng loại phần tử khối “SOLID279” gồm 20 nút. Để mô phỏng bề mặt tiếp xúc giữa các lớp

vật liệu sử dụng đồng thời cặp phần tử “TARGE170” và “CONTA174”. Mô hình mô phỏng ANSYS đã được kiểm chứng trong nghiên cứu [2].

Giá trị thông số nhiệt lý (hệ số dẫn nhiệt λ và nhiệt dung riêng C) của BTN, CPĐD GCXM, CPĐD và nền đất được lấy theo nghiên cứu của nhóm tác giả [8]. Các đặc tính nhiệt lý của các loại CPĐD GCXM thể hiện ở Bảng 1 có giá trị phụ thuộc vào nhiệt độ làm việc thực tế của vật liệu và được xác định từ việc sử dụng thiết bị được phát triển bởi Trần Thị Thu Thảo và cộng sự [2]. CPĐD GCXM truyền thống có các giá trị thông số nhiệt lý tăng khi nhiệt độ tăng. Trong khi đó, hàm lượng cao su tăng hoặc nhiệt độ tăng làm giảm độ dẫn nhiệt và nhiệt dung riêng của CPĐD-cao su GCXM [8]. Khi nhiệt độ các CPĐD GCXM nằm trong khoảng giữa các mốc nhiệt độ trong Bảng 1 thì giá trị thông số nhiệt lý sẽ được nội suy. Thông số nhiệt lý của các loại vật liệu còn lại thể hiện ở Bảng 2.

Bảng 1. Thông số nhiệt lý của các loại CPĐD GCXM với tỷ lệ phần trăm thể tích cao su phế thải thay thế cốt liệu đá dăm khác nhau [8].

| Thông số nhiệt lý | Nhiệt độ CPĐD GCXM (°C) | | | | |
|-----------------------------------|-------------------------|---------|---------|---------|---------|
| | 40 | 45 | 50 | 55 | 60 |
| CPĐD λ (W/m.°C) | 0,899 | 1,023 | 1,146 | 1,270 | 1,393 |
| GCXM C (J/kg.°C) | 1280,70 | 1330,59 | 1372,54 | 1408,31 | 1439,16 |
| 0%CS ρ (kg/m ³) | 2265 | | | | |
| CPĐD λ (W/m.°C) | 1,442 | 1,342 | 1,242 | 1,142 | 1,042 |
| GCXM C (J/kg.°C) | 2032,26 | 1726,46 | 1469,70 | 1251,07 | 1062,65 |
| 5%CS ρ (kg/m ³) | 2294 | | | | |
| CPĐD λ (W/m.°C) | 1,113 | 1,049 | 0,985 | 0,921 | 0,857 |
| GCXM C (J/kg.°C) | 1780,24 | 1493,33 | 1263,27 | 1074,68 | 917,28 |
| 10%CS ρ (kg/m ³) | 2184 | | | | |
| CPĐD λ (W/m.°C) | 1,003 | 0,930 | 0,856 | 0,783 | 0,709 |
| GCXM C (J/kg.°C) | 1748,54 | 1424,53 | 1170,41 | 965,78 | 797,46 |
| 20%CS ρ (kg/m ³) | 2174 | | | | |

Bảng 2. Thông số nhiệt lý của BTN, cấp phối đá dăm và nền đất [8].

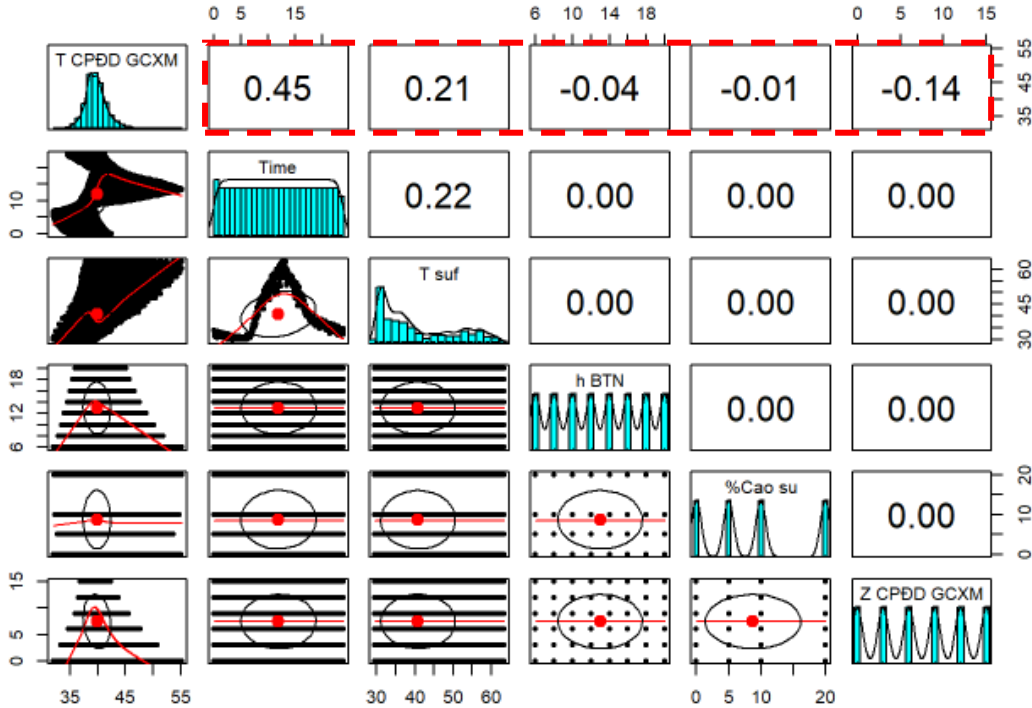
| Lớp vật liệu | ρ (kg/m ³) | λ (W/ (m. °C)) | C (J/(kg. °C)) |
|--------------|-----------------------------|------------------------|------------------|
| BTN | 2530 | 1,63 | 712 |
| CPĐD | 2200 | 1,8 | 964 |
| Nền đất | 1299 | 1,1 | 840 |

3. PHÁT TRIỂN MÔ HÌNH ANN DỰ BÁO PHÂN BỐ NHIỆT TRONG LỚP CẤP PHỐI ĐÁ DĂM GIA CỐ XI MĂNG

3.1. Phân tích tương quan các biến số trong mô hình

Sử dụng phần mềm phân tích thống kê R để phân tích tương quan giữa nhiệt độ phân bố trong CPĐD GCXM ($T_{CPĐD GCXM}$, °C) và các biến số đầu vào dự kiến trong mô hình dự báo phân bố nhiệt độ, gồm: mốc thời gian trong ngày cần khảo sát nhiệt độ tính theo số thực (Time, giờ), ví dụ 13h30 thì giá trị của Time là 13,5 giờ; nhiệt độ tại bề mặt của KCMĐ (T_{suf} , °C); chiều dày lớp BTN (h_{BTN} , cm), thể tích của cốt liệu cao su thay thế cốt liệu đá dăm (% cao su); độ sâu cách bề mặt lớp CPĐD GCXM cần khảo sát nhiệt độ ($Z_{CPĐD GCXM}$, cm). Biến thời gian trong ngày (Time) và biến độ sâu vị trí cần quan trắc nhiệt độ trong CPĐD GCXM ($Z_{CPĐD GCXM}$) là các biến số giúp xác định được trường nhiệt độ trong CPĐD GCXM theo không gian và thời

gian. Nhiệt độ tại bề mặt của KCMĐ (T_{suf}) được sử dụng làm điều kiện biên tại bề mặt của bài toán truyền nhiệt theo phương pháp số. Biến T_{suf} cũng là một biến số đầu vào của mô hình dự báo phân bố nhiệt, khi nhiệt độ T_{suf} thay đổi thì nhiệt độ của CPĐD GCXM cũng thay đổi với tương quan thuận (Hình 4). Kết quả từ Hình 4 cũng cho thấy chiều dày lớp BTN (h_{BTN}) có tương quan nghịch với phân bố nhiệt độ trong CPĐD GCXM, chiều dày lớp BTN càng lớn nhiệt độ trong CPĐD GCXM càng nhỏ. Ngoài ra, Hình 4 còn cho thấy tỷ lệ cao su phế thải thay thế cốt liệu đá dăm có tương quan tỷ lệ nghịch với nhiệt độ CPĐD GCXM.



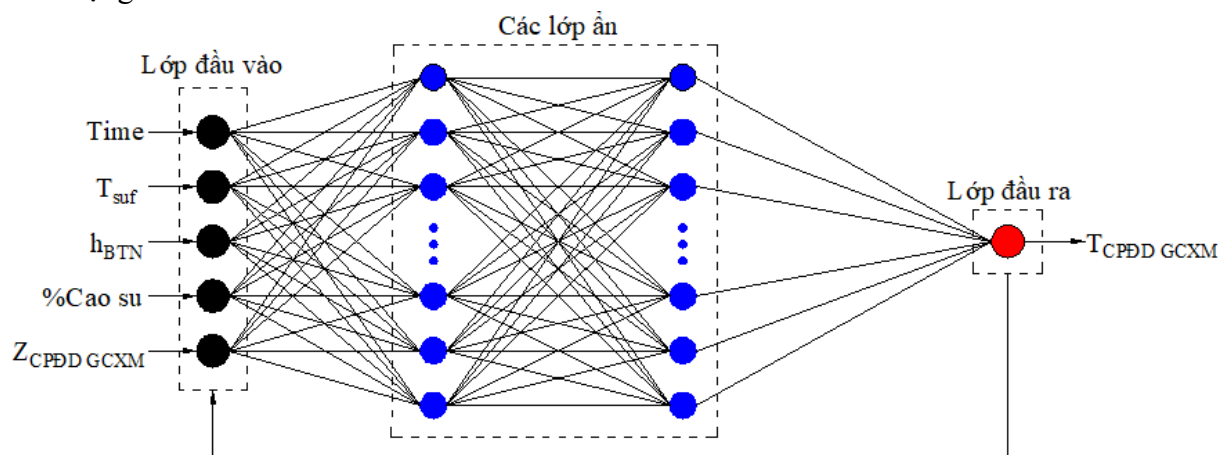
Hình 4. Biểu đồ phân tích tương quan giữa nhiệt độ CPĐD GCXM và các biến số đầu vào.

3.2. Kiến trúc mạng ANN

Cấu trúc của ANN gồm 3 phần: lớp đầu vào (Input Layer), các lớp ẩn (Hidden Layer) và lớp đầu ra (Output Layer) như thể hiện ở Hình 5. Lớp đầu vào là lớp có kết nối với thế giới bên ngoài, sẽ nhận thông tin từ thế giới bên ngoài. Lớp ẩn gồm các nơron nhận dữ liệu đầu vào từ các nơron ở lớp trước đó và chuyển đổi các dữ liệu này cho các lớp xử lý tiếp theo. 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.

Trong nghiên cứu này, lớp đầu vào gồm các nơron nhận dữ liệu là 5 tham số đầu vào bao gồm: Thời gian muốn khảo sát nhiệt độ (Time), nhiệt độ tại bề mặt của KCMĐ (T_{suf}), chiều dày lớp BTN (h_{BTN}), tỷ lệ thể tích của cốt hạt cao su thay thế cốt liệu đá dăm (%Cao su), độ sâu cách bề mặt lớp CPĐD GCXM ($Z_{CPĐD GCXM}$). Lớp đầu ra có 1 biến chính là nhiệt độ của CPĐD GCXM ($T_{CPĐD GCXM}$) như minh họa ở Hình 5. Hiện chưa có một quy tắc cụ thể nào trong việc lựa chọn số nơron tối ưu tại các lớp ẩn. Trong nghiên cứu này, cấu trúc ANN được phân tích gồm 1 và 2 lớp ẩn với số nơron trong mỗi lớp ẩn thay đổi từ 10 đến 20, sử dụng thuật toán lan truyền ngược sai số (cascade-forward backpropagation network) và hàm truyền dạng phi tuyến sigmoid. Đầu tiên, dữ liệu đầu vào được truyền từ lớp đầu vào đến các lớp ẩn để tính toán dữ liệu đầu ra. Tiếp đó, tín hiệu lỗi được tính toán từ sai số giữa dữ liệu đầu vào và dữ liệu ước

lượng sẽ được lan truyền ngược lại từ lớp ra đến các lớp trước đó để hiệu chỉnh các trọng số của mạng nơron.



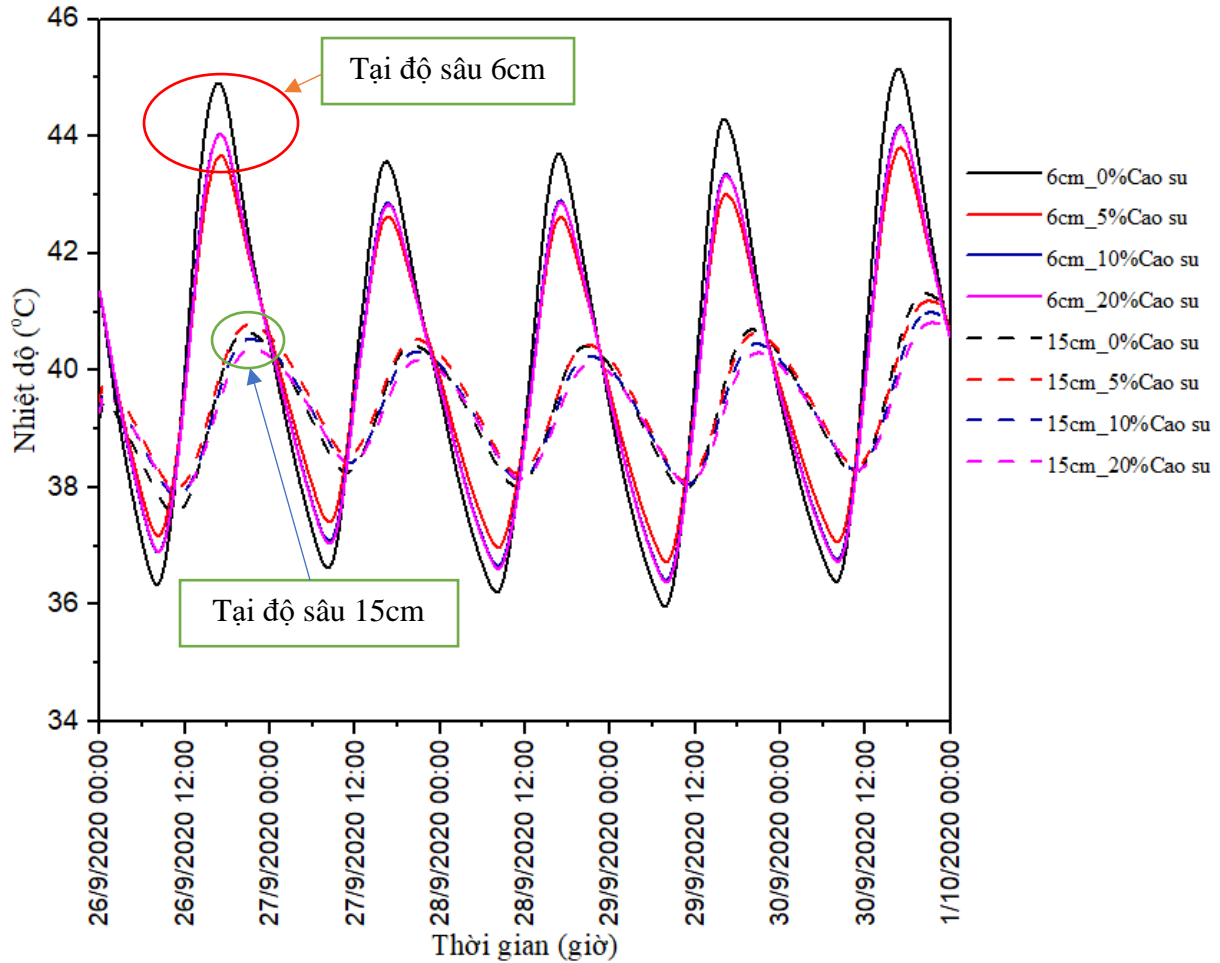
Hình 5. Mô hình cấu trúc mạng ANN nghiên cứu.

Số liệu nhiệt độ mô phỏng số bằng ANSYS tại các độ sâu 0cm, 3cm, 6cm, 9cm, 12cm, 15cm cách bề mặt lớp CPĐD GCXM được thu thập với tần suất 10 phút/lần của 32 trường hợp nghiên cứu ở mục 2.2 được dùng để phân tích xây dựng mô hình mạng nơron. Trước khi huấn luyện mô hình ANN, tất cả giá trị của các tham số đầu vào và đầu ra sẽ được tiêu chuẩn hóa trong phạm vi $[-1, 1]$ và được thiết lập các ma trận đầu vào và đầu ra. Trong tổng số 138240 quan sát của toàn bộ dữ liệu thu thập từ mô phỏng số, sẽ sử dụng 70% cho việc học (training), 15% cho việc xác thực (validation) và 15% còn lại cho việc kiểm tra (testing). Các tham số khác được sử dụng để huấn luyện mô hình bao gồm sai số dừng lặp là 10^{-5} và số lần lặp tối đa là 1000. Mô hình ANN tối ưu được chọn khi sai số toàn phương trung bình (Mean Squared Error – MSE) có giá trị nhỏ nhất, hệ số tương quan hồi quy R lớn nhất và hệ số xác định R^2 lớn nhất.

4. KẾT QUẢ MÔ HÌNH VÀ BÀN LUẬN

4.1. Phân bố nhiệt trong các loại CPĐD GCXM theo mô phỏng số

Hình 6 thể hiện diễn biến nhiệt độ của các loại CPĐD GCXM sử dụng hàm lượng cốt liệu cao su thay thế khác nhau tại các độ sâu 6cm và 15cm khi lớp mặt BTN dày 10cm. Kết quả từ Hình 6 cho thấy sử dụng cao su phế thải (cỡ hạt 3mm đến 6mm) thay thế đá dăm (cỡ hạt 0,425 mm đến 9,5 mm) trong thành phần cấp phối hạt đã giúp CPĐD GCXM giúp giảm biên độ dao động nhiệt độ trong ngày đêm ở mỗi độ. Nhiệt độ cao nhất và thấp nhất ở mỗi độ sâu có giá trị lần lượt thấp hơn và cao hơn CPĐD GCXM không sử dụng cao su phế thải. Quy luật này diễn ra tương tự khi thay đổi chiều dày lớp BTN (xem Hình 7). Điều này rất có lợi đến ứng xử trong lớp CPĐD GCXM ở giai đoạn khai thác, giúp lớp vật liệu này chịu sự tác động của ứng suất nhiệt ít hơn. Càng gần bề mặt lớp CPĐD GCXM thì hàm lượng thay thế 5% cao su cho kết quả giảm biên độ dao động nhiệt độ và nhiệt độ cao nhất ở mỗi độ sâu tốt nhất nhưng càng vào sâu bên trong lớp CPĐD GCXM thì hàm lượng cao su thay thế 20% cho kết quả giảm biên độ dao động nhiệt độ và nhiệt độ lớn nhất hiệu quả hơn. Quy luật này cũng giống nhau ở tất cả các bề dày lớp phủ BTN khác nhau (xem Bảng 3). Điều này có khả năng do nhiệt độ phân bố tại mỗi độ sâu của CPĐD GCXM khác nhau và thông số nhiệt lý của các loại CPĐD GCXM lại phụ thuộc vào nhiệt độ với mức độ khác nhau.



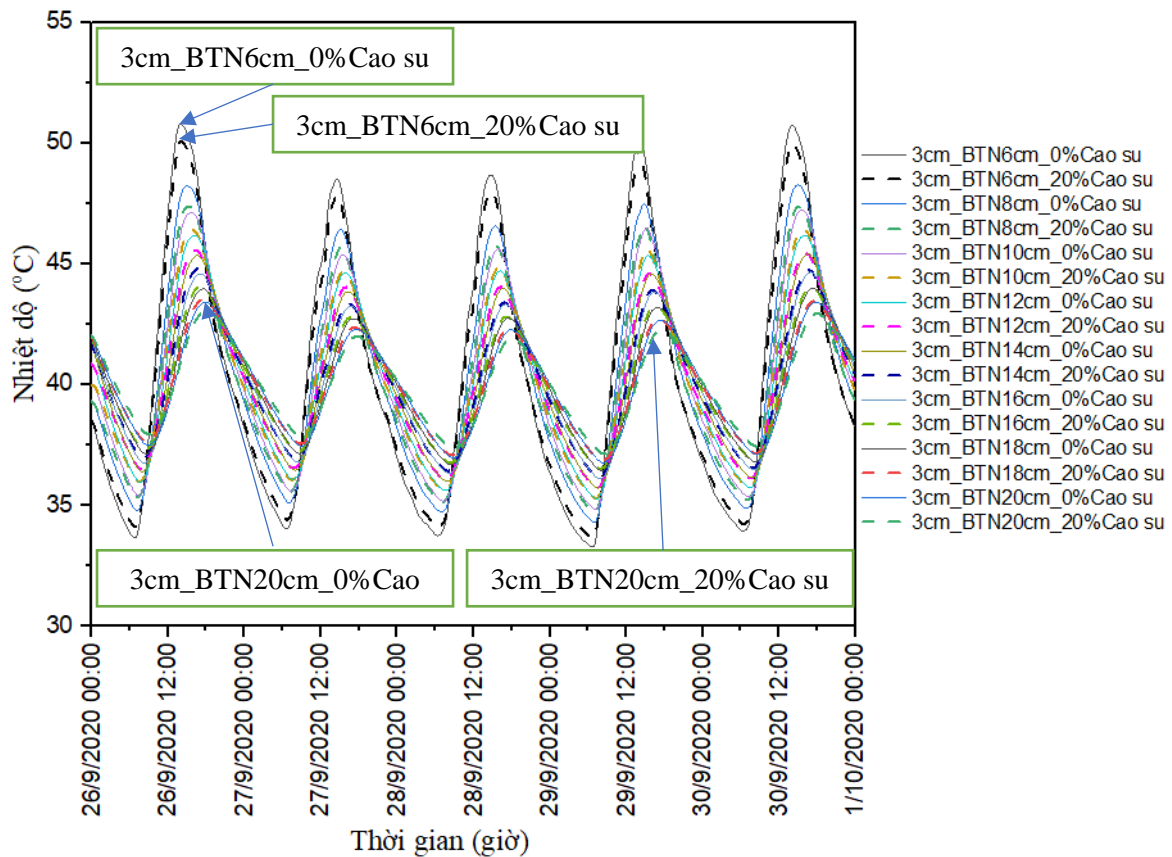
Hình 6. Diễn biến nhiệt độ ở độ sâu 6cm và 15cm của CPĐĐ GCXM các loại khi chiều dày BTN 10cm.

Bảng 3. Phân tích phân bố nhiệt trong lớp CPĐĐ GCXM khi tỷ lệ cao su thay thế và bề dày lớp BTN khác nhau.

| Độ sâu CPĐĐ GCXM (cm) | Bề dày BTN (cm) | Biên độ dao động nhiệt độ trung bình ngày ở CPĐĐ GCXM (°C) | | | | Độ giảm biên độ dao động nhiệt CPĐĐ-cao su GCXM so với cấp phối đối chứng (0% cao su) (%) | | |
|-----------------------|-----------------|--|------|------|------|---|------|------|
| | | 0% | 5% | 10% | 20% | 5% | 10% | 20% |
| 3 | 6 | 17,5 | 14,8 | 16,1 | 16,4 | 18,2 | 8,5 | 6,6 |
| | 8 | 14,0 | 11,3 | 12,4 | 12,7 | 23,3 | 12,2 | 10,3 |
| | 10 | 12,4 | 9,8 | 11,0 | 11,1 | 26,2 | 13,5 | 11,4 |
| | 12 | 11,0 | 8,6 | 9,6 | 9,8 | 27,6 | 13,9 | 11,1 |
| | 14 | 9,7 | 7,5 | 8,4 | 8,6 | 29,7 | 15,4 | 12,4 |
| | 16 | 8,6 | 6,5 | 7,4 | 7,6 | 30,9 | 16,1 | 13,1 |
| | 18 | 7,5 | 5,8 | 6,5 | 6,7 | 30,6 | 15,9 | 12,8 |
| | 20 | 6,7 | 5,1 | 5,8 | 5,9 | 29,9 | 15,4 | 12,4 |
| 15 | 6 | 5,4 | 4,7 | 4,5 | 4,2 | 14,7 | 19,8 | 28,8 |
| | 8 | 4,3 | 3,7 | 3,6 | 3,3 | 14,1 | 18,9 | 28,2 |
| | 10 | 3,7 | 3,2 | 3,1 | 2,9 | 16,6 | 19,5 | 28,1 |

| Độ sâu CPĐĐ GCXM (cm) | Bề dày BTN (cm) | Biên độ dao động nhiệt độ trung bình ngày ở CPĐĐ GCXM (°C) | | | | Độ giảm biên độ dao động nhiệt CPĐĐ-cao su GCXM so với cấp phối đối chứng (0% cao su) (%) | | |
|-----------------------|-----------------|--|-----|-----|-----|---|------|------|
| | | 0% | 5% | 10% | 20% | 5% | 10% | 20% |
| | 12 | 3,2 | 2,7 | 2,7 | 2,5 | 18,8 | 19,8 | 27,6 |
| | 14 | 2,9 | 2,4 | 2,4 | 2,3 | 20,4 | 19,7 | 26,8 |
| | 16 | 2,6 | 2,2 | 2,2 | 2,1 | 20,6 | 19,0 | 25,4 |
| | 18 | 2,3 | 1,9 | 2,0 | 1,9 | 21,9 | 19,2 | 25,2 |
| | 20 | 2,1 | 1,7 | 1,7 | 1,6 | 23,2 | 19,8 | 25,9 |

Kết quả tính toán ở Bảng 3 cho thấy việc sử dụng cao su phế thải thay thế một phần cỡ hạt trong thành phần cấp phối đã giúp CPĐĐ GCXM giảm được biên độ dao động nhiệt trong ngày đêm, với giá trị độ giảm biên độ dao động có lúc lên đến trên 30% so với CPĐĐ GCXM đối sánh. Vì vậy, có thể nói việc sử dụng cao su phế thải trong CPĐĐ GCXM là một giải pháp làm giảm chênh lệch nhiệt độ trong lớp CPĐĐ GCXM rất hiệu quả.

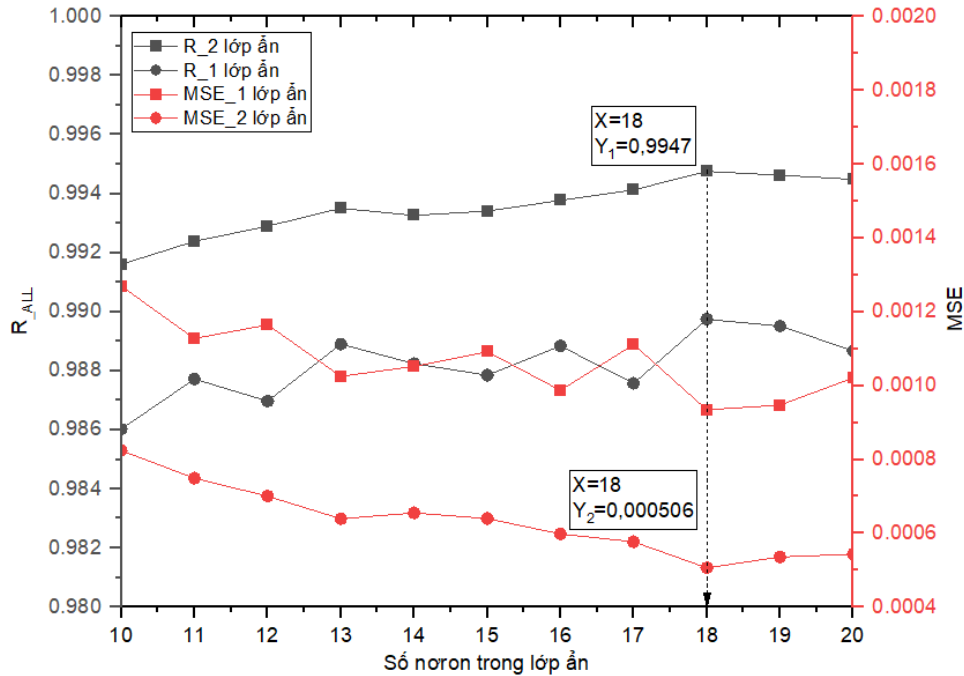


Hình 7. Diễn biến nhiệt độ tại độ sâu 3cm trong CPĐĐ GCXM Sử dụng 0% và 20% cao su khi chiều dày lớp BTN khác nhau.

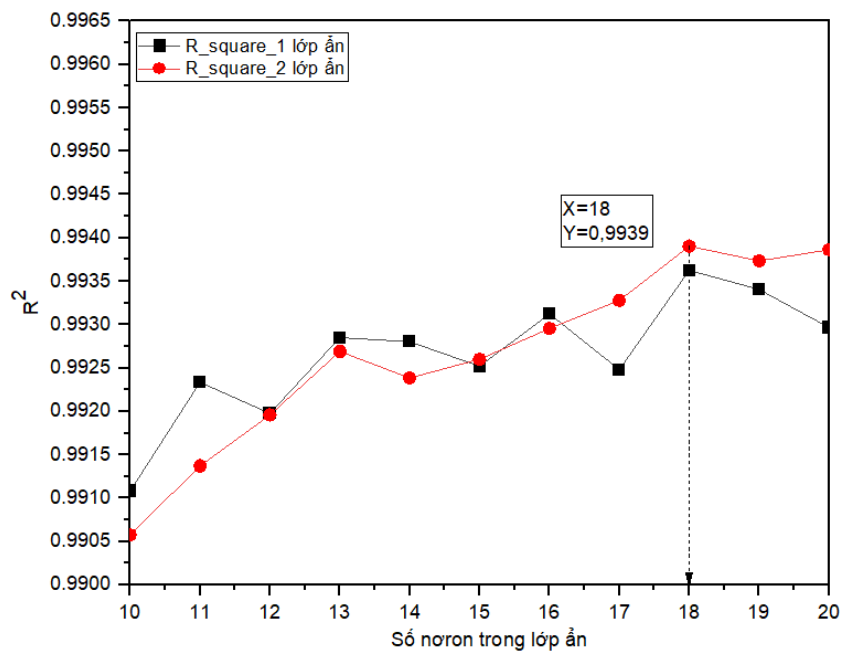
4.2. Dự báo phân bố nhiệt độ theo ANN

Mô hình ANN dự báo trường phân bố nhiệt độ trong lớp CPĐĐ GCXM theo không gian và thời gian trong ngày có xét đến sự ảnh hưởng của chiều dày lớp mặt BTN (thay đổi từ 6cm đến 20cm) và cốt liệu đá dăm có kích cỡ hạt từ 0,425 mm đến 9,5 mm được thay thế bởi cao su phế thải có cỡ hạt từ 3mm đến 6mm theo tỷ lệ phần trăm thể tích từ 0% đến 20%, cho kết quả dự báo rất khả quan. Mô hình này sử dụng 5 biến đầu vào gồm: Thời điểm trong ngày muốn khảo sát nhiệt

độ (Time), nhiệt độ tại bề mặt của KCMĐ ($T_{\text{suf}} = 29,5^{\circ}\text{C} \div 63,25^{\circ}\text{C}$), chiều dày lớp BTN ($h_{\text{BTN}} = 6\text{cm} \div 20\text{cm}$), tỷ lệ thể tích của cốt hạt cao su thay thế cốt liệu đá dăm (%Cao su = 0% ÷ 20%), độ sâu cách bề mặt lớp CPĐĐ GCXM ($Z_{\text{CPĐĐ GCXM}} = 0\text{cm} \div 15\text{cm}$). Ngoài ra cần lưu ý mô hình dự báo nhiệt độ này được áp dụng khi thời tiết không có mưa và bề dày lớp CPĐĐ GCXM không quá 15cm. Hình 8 và Hình 9 cho thấy, kết quả dự báo tốt nhất tại mô hình có 2 lớp ẩn và số neuron trong mỗi lớp ẩn là 18, với hệ số tương quan $R=0,9947$, $\text{MSE}=0,000506$ và $R^2=0,9939$.

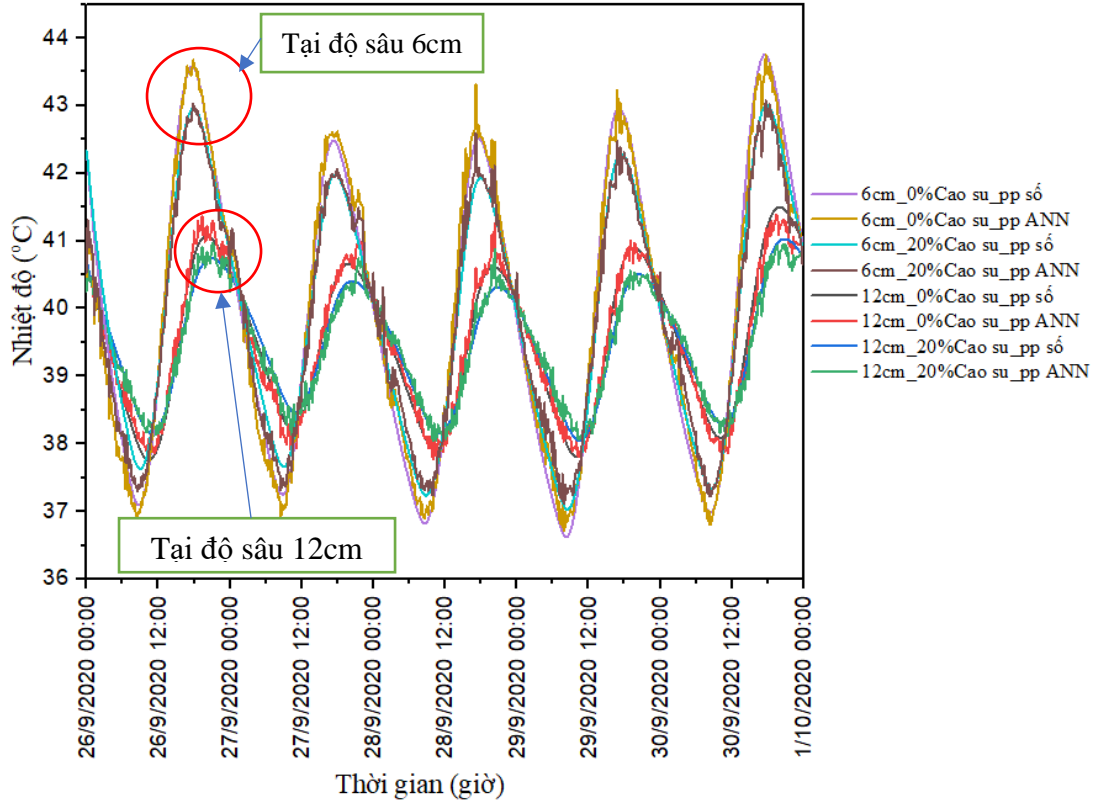


Hình 8. Biểu đồ tương quan giữa MSE và hệ số tương quan R theo số neuron trong lớp ẩn.



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

Hình 10 thể hiện diễn biến nhiệt độ của kết quả dự báo theo ANN và mô phỏng số tại độ sâu 6cm và 12cm của CPĐD GCXM 0% cao su và 20% cao su khi BTN dày 14cm. Kết quả tại Hình 10 cho thấy, đường diễn biến nhiệt độ dự báo theo ANN và theo mô phỏng số tại các độ sâu ở các trường hợp nghiên cứu gần như trùng nhau.



Hình 10. Diễn biến nhiệt độ giữa kết quả dự báo theo ANN và mô phỏng số tại độ sâu 6cm và 12cm của CPĐD GCXM 0% cao su và 20% cao su khi BTN dày 14cm.

Để so sánh đánh giá kết quả của mô hình dự báo mạng nơ-ron, tiến hành tính toán sai số trung bình bình phương gốc (RMSE) giữa nhiệt độ đo thực tế và nhiệt độ dự toán từ mô hình ANN 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 là nhiệt độ xác định bằng mô hình dự báo ANN; y_i^* là nhiệt độ từ của mô phỏng số bằng ANSYS.

Kết quả mô hình dự báo phân bố nhiệt độ trong CPĐD GCXM bằng phương pháp mạng ANN có độ chính xác rất cao với hệ số xác định $R^2=0,9939$ và sai số trung bình bình phương gốc giữa nhiệt độ dự báo theo ANN và nhiệt độ mô phỏng số nhỏ, $RMSE=0,25^\circ\text{C}$. Chi tiết kết quả tính sai số RMSE của 32 trường hợp nghiên cứu khác nhau tại các độ sâu 0cm, 3cm, 6cm, 9cm, 12cm và 15cm trong CPĐD GCXM tương ứng với từng phần trăm cao su phế thải thay thế cốt liệu đá dăm được thể hiện ở Bảng 4. Kết quả cho thấy giá trị sai số RMSE của các trường hợp có giá trị rất nhỏ ($RMSE = 0,13^\circ\text{C}$ đến $0,4^\circ\text{C}$).

Bảng 4. Sai số RMSE giữa kết quả dự báo từ mạng nơron và dữ liệu từ mô phỏng số.

| Tỷ lệ cao su (%) | Độ sâu CPĐD GCXM (cm) | Sai số RMSE của từng trường hợp CPĐD GCXM theo chiều dày lớp BTN | | | | | | | |
|------------------|-----------------------|--|------|------|------|------|------|------|------|
| | | 6cm | 8cm | 10cm | 12cm | 14cm | 16cm | 18cm | 20cm |
| 0 | 0 | 0,40 | 0,37 | 0,37 | 0,34 | 0,35 | 0,34 | 0,34 | 0,34 |
| | 3 | 0,36 | 0,32 | 0,32 | 0,31 | 0,32 | 0,30 | 0,29 | 0,29 |
| | 6 | 0,31 | 0,27 | 0,28 | 0,28 | 0,28 | 0,24 | 0,24 | 0,23 |
| | 9 | 0,28 | 0,24 | 0,24 | 0,23 | 0,21 | 0,18 | 0,17 | 0,17 |
| | 12 | 0,27 | 0,23 | 0,20 | 0,18 | 0,16 | 0,16 | 0,14 | 0,14 |
| | 15 | 0,32 | 0,27 | 0,24 | 0,22 | 0,22 | 0,22 | 0,20 | 0,19 |
| 5 | 0 | 0,36 | 0,32 | 0,31 | 0,30 | 0,30 | 0,30 | 0,30 | 0,31 |
| | 3 | 0,30 | 0,26 | 0,26 | 0,27 | 0,28 | 0,27 | 0,27 | 0,27 |
| | 6 | 0,25 | 0,22 | 0,22 | 0,24 | 0,25 | 0,22 | 0,22 | 0,22 |
| | 9 | 0,22 | 0,20 | 0,20 | 0,21 | 0,19 | 0,16 | 0,16 | 0,17 |
| | 12 | 0,22 | 0,19 | 0,17 | 0,15 | 0,14 | 0,13 | 0,13 | 0,14 |
| | 15 | 0,26 | 0,21 | 0,18 | 0,18 | 0,18 | 0,18 | 0,17 | 0,17 |
| 10 | 0 | 0,38 | 0,35 | 0,35 | 0,33 | 0,33 | 0,33 | 0,32 | 0,33 |
| | 3 | 0,33 | 0,29 | 0,29 | 0,29 | 0,30 | 0,29 | 0,28 | 0,29 |
| | 6 | 0,26 | 0,24 | 0,25 | 0,26 | 0,26 | 0,23 | 0,23 | 0,23 |
| | 9 | 0,22 | 0,21 | 0,21 | 0,22 | 0,20 | 0,17 | 0,17 | 0,17 |
| | 12 | 0,21 | 0,18 | 0,17 | 0,15 | 0,14 | 0,13 | 0,13 | 0,13 |
| | 15 | 0,25 | 0,21 | 0,18 | 0,18 | 0,18 | 0,18 | 0,17 | 0,17 |
| 20 | 0 | 0,39 | 0,36 | 0,37 | 0,34 | 0,35 | 0,34 | 0,33 | 0,34 |
| | 3 | 0,33 | 0,29 | 0,30 | 0,30 | 0,31 | 0,30 | 0,29 | 0,29 |
| | 6 | 0,27 | 0,24 | 0,25 | 0,27 | 0,27 | 0,24 | 0,24 | 0,24 |
| | 9 | 0,22 | 0,21 | 0,22 | 0,22 | 0,21 | 0,17 | 0,17 | 0,17 |
| | 12 | 0,20 | 0,18 | 0,16 | 0,15 | 0,14 | 0,13 | 0,13 | 0,13 |

5. KẾT LUẬN

Bài báo trình bày kết quả mô phỏng phân bố nhiệt độ trong CPĐD GCXM của 32 trường hợp nghiên cứu. CPĐD GCXM có đá dăm cỡ hạt 0,425 mm đến 9,5 mm được thay thế bằng cao su phế thải có cỡ hạt 3mm đến 6mm theo các phần trăm thể tích 0%, 5%, 10% và 20% ứng với chiều dày lớp BTN thay đổi lần lượt 6cm, 8cm, 10cm, 12cm, 14cm, 16cm, 18cm và 20cm. Một số kết luận chính được rút ra như sau:

- Mô phỏng số cho thấy biên độ dao động nhiệt độ trong CPĐD GCXM có sử dụng cao su giảm đáng kể, lên đến trên 30% so với CPĐD GCXM đối chứng. Do đó, sử dụng cao su phế thải để thay thế một phần cỡ hạt trong CPĐD GCXM là một giải pháp làm giảm chênh lệch nhiệt độ trong lớp CPĐD GCXM hiệu quả.

- Đã phát triển mô hình ANN dự báo nhiệt độ trong CPĐD GCXM ($T_{CPĐD GC-XM}$) với 5 biến đầu vào gồm thời gian muốn khảo sát nhiệt độ (Time), nhiệt độ tại bề mặt của KCMĐ (T_{suf}), chiều dày lớp BTN (h_{BTN}), tỷ lệ thể tích của cỡ hạt cao su thay thế cốt liệu đá dăm (%Cao su), độ sâu cách bề mặt lớp CPĐD GCXM ($Z_{CPĐD GCXM}$). Kết quả sai số giữa nhiệt độ dự báo và mô phỏng số rất nhỏ, $RMSE=0,25^{\circ}C$ và hệ số xác định $R^2=0,9939$. Mô hình này áp dụng trong phạm vi: thời tiết không có mưa, nhiệt độ $T_{suf} = 29,5^{\circ}C \div 63,5^{\circ}C$, CPĐD GCXM có đá

dầm cỡ hạt 0,425 mm đến 9,5 mm được thay thế bằng cao su phế thải có cỡ hạt 3mm đến 6mm theo phần trăm thể tích từ 0% đến 20% và bề dày lớp BTN thay đổi trong khoảng từ 6cm đến 20cm.

- Mô hình dự báo nhiệt độ bằng phương pháp ANN được phát triển có ưu điểm dự báo được trường phân bố nhiệt độ trong CPĐD GCXM theo cả không gian (độ sâu) và thời gian với kết quả sai số nhỏ và giúp dự báo được phân bố nhiệt độ trong CPĐD GCXM khi hàm lượng cao su thay thế khác các tỷ lệ 0%, 5%, 10% và 20%. Điều này giúp giảm bớt việc phải thí nghiệm các thông số nhiệt lý trong phòng khi sử dụng tỷ lệ cao su thay thế khác các tỷ lệ như trên và giúp đưa ra kết quả dự báo phân bố nhiệt độ nhanh hơn.

LỜI CẢM ƠN

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Quỹ Phát triển khoa học và công nghệ Quốc gia (NAFOSTED) trong đề tài mã số 107.01-2020.12.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Thao .T.T. Tran, Teron . Nguyen, Phuong .N. Pham, Hai .H. Nguyen, Phuc .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>
- [2]. Thao .T.T. Tran, Hai .H. Nguyen, Phuong .N. Pham, Teron . Nguyen, Phuc. Q. Nguyen, Hung .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/10.1080/14680629.2023.2170270>
- [3]. J. Gao, P. Jin, Y. Sheng, P. An, A case study on crack propagation law of cement stabilised macadam base, *Int. J. Pavement Eng.*, 21 (2020) 516–523. <https://doi.org/10.1080/10298436.2018.1492135>
- [4]. Phạm Huy Khang, Trần Thị Thúy, Một số vấn đề cần chú ý khi sử dụng móng cứng và nửa cứng trong kết cấu mặt đường ô tô và sân bay ở Việt Nam, *Tạp Chí Giao Thông Vận Tải*, 2017.
- [5]. TCCS 38 : 2022/TCĐBVN, Áo đường mềm - Các yêu cầu và chỉ dẫn thiết kế, Tổng Cục Đường Bộ Việt Nam, (2022) 1–73.
- [6]. P.N. Pham, Y. Zhuge, A. Turatsinze, A. Toumi, R. Siddique, Application of rubberized cement-based composites in pavements: Suitability and considerations, *Constr. Build. Mater.*, 223 (2019) 1182–1195. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.08.007>
- [7]. Phạm Ngọc Phương, Lê Minh Trung, Huỳnh Huy Hoàng, Trần Thị Thu Thảo, Nguyễn Thanh Cường, Lê Đức Châu, Ảnh hưởng của cốt liệu cao su đến tính chất cơ lý của cấp phối đá dăm-cao su gia cố xi măng, *Tạp Chí Khoa học Công nghệ Xây dựng - ĐHXDHN*, 15 (2021) 68–78. [https://doi.org/10.31814/stce.huce\(nuce\)2021-15\(7v\)-07](https://doi.org/10.31814/stce.huce(nuce)2021-15(7v)-07).
- [8]. Phuong N. Pham, Thao T.T. Tran, Phat Nguyen, Tuan A. Truong, Rafat Siddique, Yue Liu, Yan Zhuge, Rubberized cement-stabilized aggregates_ Mechanical performance, thermal properties, and effect on temperature fluctuation in road pavements, *Transp. Geotech.*, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2023.100982>
- [9]. Phạm Ngọc Phương, Nguyễn Văn Tài, Trần Thị Thu Thảo, Đánh giá tính chất cơ học của cấp phối đá dăm gia cố xi măng có trộn thêm cốt liệu cao su ở phòng thí nghiệm và ngoài hiện trường, *Transp. Tạp Chí Khoa học Giao thông vận tải*, 73 (2022) 735–751. <https://doi.org/10.47869/tcsj.73.8.1>
- [10]. Nguyễn Hồng Hải, Trần Thị Thu Thảo, Hoàng Văn Tinh, Tôn Thất Bảo Nam, Huỳnh 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. 20, N (2022) 50–55. <https://jst-ud.vn/jst-ud/article/view/7778>.
- [11]. Trần Thị Thu Thảo, Nguyễn Hồng Hải, Nguyễn Quang Phúc, Dự báo nhiệt độ bê tông nhựa phục vụ thí nghiệm đo vòng đàn hồi bằng cần Benkelman dựa trên dữ liệu phân tích theo mạng nơron nhân

tạo, Tạp Chí Khoa học Giao thông vận tải, 74 (2023) 292–306. <https://doi.org/10.47869/tcsj.74.3.5>

[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].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>.

[14].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. <https://doi.org/10.1007/978-981-16-7160-9>.

[15].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>.

[16].M.Z. Alavi, M.R. Pouranian, E.Y. Hajj, Prediction of asphalt pavement temperature profile with finite control volume method, *Transp. Res. Rec*, 2456 (2014) 96–106. <https://doi.org/10.3141/2456-10>

[17].W. Herb, R. Velasquez, H. Stefan, M.O. Marasteanu, T. Clyne, Simulation and characterization of asphalt pavement temperatures, *Road Mater. Pavement Des*, 10 (2009) 233–247. <https://doi.org/10.1080/14680629.2009.9690190>.