



PROPOSING A MODEL TO DETERMINE TEMPERATURE IN ASPHALT PAVEMENT STRUCTURES IN THE HANOI AREA WHEN MEASURING THE REBOUND DEFLECTION USING THE BENKELMAN BEAM

Tran Thi Cam Ha, Nguyen Quang Phuc*, Luong Xuan Chieu

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

ARTICLE INFO

TYPE: Research Article

Received: 04/06/2024

Revised: 26/07/2024

Accepted: 08/08/2024

Published online: 15/08/2024

<https://doi.org/10.47869/tcsj.75.6.4>

* *Corresponding author*

Email: nguyenquangphuc@utc.edu.vn; Tel: +84985578929

Abstract. Temperature in asphalt concrete (AC) layers has a great influence on the strength of pavement structures. When measuring pavement rebound deflection using the Benkelman beam according to TCVN 8867:2011, the pavement surface temperature is determined at a depth of 40 mm from the pavement surface. Globally, many models have been developed to predict temperature distribution within asphalt concrete pavement layers to reduce testing time and avoid the need to drill holes on the pavement surface. In Vietnam, research has been conducted to build a model predicting temperature distribution within AC layers in the Danang area. This paper presents the results of developing a model to predict temperature distribution within AC layers for the purpose of conducting Benkelman beam rebound deflection tests in the Hanoi area. The research findings show that the experimental regression model predicts the AC temperature at various depths H (mm) based on surface AC temperature with high reliability ($R^2 = 99.79\%$), which can be referenced when measuring rebound deflection using the Benkelman beam.

Keywords: Benkelman beam, temperature distribution, regression model, asphalt concrete, pavement structure, Hanoi area.

@ 2024 University of Transport and Communications



ĐỀ XUẤT MÔ HÌNH XÁC ĐỊNH NHIỆT ĐỘ TRONG KẾT CẤU MẶT ĐƯỜNG BÊ TÔNG NHỰA KHU VỰC HÀ NỘI KHI ĐO ĐỘ VỒNG ĐÀN HỒI BẰNG CẦN BENKELMAN

Trần Thị Cẩm Hà, Nguyễn Quang Phúc*, Lương Xuân Chiêu

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

THÔNG TIN BÀI BÁO

CHUYÊN MỤC: Công trình khoa học

Ngày nhận bài: 04/06/2024

Ngày nhận bài sửa: 26/07/2024

Ngày chấp nhận đăng: 08/08/2024

Ngày xuất bản Online: 15/08/2024

<https://doi.org/10.47869/tcsj.75.6.4>

* Tác giả liên hệ

Email: nguyenquangphuc@utc.edu.vn; Tel: +84985578929

Tóm tắt. Nhiệt độ trong các lớp bê tông nhựa ảnh hưởng rất lớn đến cường độ của kết cấu mặt đường. Khi đo độ võng mặt đường bằng cần Benkelman theo TCVN 8867:2011, nhiệt độ mặt đường bê tông nhựa (BTN) được xác định ở vị trí độ sâu 40 mm tính từ bề mặt đường. Trên thế giới đã có nhiều nghiên cứu xây dựng mô hình phân bố nhiệt độ trong các lớp BTN để giảm thời gian thí nghiệm, tránh việc phải đục các lỗ trên mặt đường. Ở Việt Nam, đã có nghiên cứu xây dựng mô hình dự đoán phân bố nhiệt trong lớp BTN ở khu vực Đà Nẵng. Bài báo trình bày kết quả xây dựng mô hình dự đoán phân bố nhiệt trong lớp BTN phục vụ cho thí nghiệm đo độ võng đàn hồi bằng cần Benkelman ở khu vực Hà Nội. Kết quả nghiên cứu cho thấy mô hình hồi quy thực nghiệm dự đoán nhiệt độ BTN ở các độ sâu H (mm) dựa vào nhiệt độ bề mặt BTN có độ tin cậy cao ($R^2 = 99,79\%$) có thể tham khảo khi đo độ võng đàn hồi bằng cần Benkelman.

Từ khóa: Cần Benkelman, phân bố nhiệt độ, mô hình hồi quy, bê tông nhựa, kết cấu mặt đường, Hà Nội.

@2024 Trường Đại học Giao thông vận tải

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Bê tông nhựa (BTN) là loại vật liệu nhạy cảm với nhiệt độ, các chỉ tiêu cơ lý của nó sẽ thay đổi khi nhiệt độ thay đổi. Trong các tiêu chuẩn tính toán thiết kế kết cấu áo đường (KCAĐ) hiện hành ở Việt Nam, nhiệt độ BTN là yếu tố được xét đến khi xác định các thông số đầu vào của BTN [1,2]. Khi thiết kế kết cấu áo đường mềm bằng phương pháp cơ học thực

nghiệm (MEPDG), ảnh hưởng của nhiệt độ mặt đường cũng được xét đến trên đặc tính của vật liệu và của cả kết cấu áo đường [3]. Nhiệt độ cũng là yếu tố ảnh hưởng trực tiếp đến chất lượng và tuổi thọ của các lớp BTN nói riêng và kết cấu áo đường nói chung trong suốt quá trình khai thác.

Trong công tác nghiệm thu KCAĐ mềm hoặc đánh giá cường độ mặt đường cũ để phục vụ thiết kế KCAĐ tăng cường, mô đun đàn hồi của mặt đường được xác định từ kết quả đo độ võng đàn hồi bằng cần Benkelman là một thông số cần được xác định. Nhiệt độ mặt đường BTN khi đo độ võng bằng cần Benkelman theo TCVN 8867:2011 [4] được xác định ở vị trí độ sâu 40 mm tính từ bề mặt KCAĐ. Để tránh việc phải khoan lỗ trên mặt đường BTN cũng như rút ngắn thời gian thí nghiệm việc dự đoán phân bố nhiệt trong KCAĐ nói chung, trong lớp BTN nói riêng là cần thiết. Trên thế giới đã có tiêu chuẩn [5] và nhiều nghiên cứu dự đoán phân bố nhiệt độ lớp BTN dựa trên nhiệt độ không khí, nhiệt độ bề mặt của KCAĐ. Các mô hình dự đoán phân bố nhiệt trong KCAĐ được đưa ra dựa trên kết quả nghiên cứu thực nghiệm [6-9] hoặc dựa trên lời giải của bài toán lý thuyết truyền nhiệt [10-14]. Ở Việt Nam, Trần Thị Thu Thảo và các cộng sự đã nghiên cứu thực nghiệm đưa ra mô hình dự đoán phân bố nhiệt trong lớp BTN phục vụ cho thí nghiệm đo độ võng đàn hồi bằng cần Benkelman ở khu vực Đà Nẵng [15]. Tuy nhiên, phân bố nhiệt độ trong KCAĐ phụ thuộc vào đặc điểm vật liệu và điều kiện khí hậu của từng khu vực [9] vì vậy vẫn rất cần các nghiên cứu về vấn đề này ở các khu vực khác nhau. Bài báo trình bày kết quả quan trắc nhiệt độ không khí, nhiệt độ mặt đường và nhiệt độ ở các độ sâu trong KCAĐ khu vực Hà Nội trong 6 ngày trong thời kỳ nắng nóng, từ ngày 29/5/2015 đến ngày 10/6/2015. Từ đó đề xuất mô hình hồi quy xác định nhiệt độ trong lớp BTN theo nhiệt độ bề mặt đường và độ sâu tính từ mặt đường.

2. PHÂN TÍCH LUẬN CHỨNG LỰA CHỌN THIẾT BỊ ĐO NHIỆT

Để có thể xác định tự động và chính xác được nhiệt độ không khí, nhiệt độ bề mặt đường và nhiệt độ trong các lớp mặt đường, nhóm nghiên cứu tiến hành phân tích để lựa chọn thiết bị đo áp dụng.

2.1 Lựa chọn cảm biến nhiệt độ sử dụng

Hiện nay có rất nhiều loại cảm biến đo nhiệt độ khác nhau như: Cặp nhiệt điện, nhiệt điện trở, điện trở oxit kim loại, cảm biến nhiệt bán dẫn, nhiệt kế bức xạ,... và việc lựa chọn chúng phụ thuộc vào rất nhiều yếu tố: Độ chính xác, khoảng nhiệt, tốc độ phản ứng, môi trường (hóa học, vật lý, hay điện) và giá thành. Nhóm nghiên cứu lựa chọn cảm biến nhiệt độ với tiêu chí ưu tiên sau:

- Độ chính xác: Yêu cầu $\pm 0,1$ độ C;
- Sự linh hoạt, có thể lắp ráp dễ dàng;
- Giới hạn khoảng nhiệt cần đo: Đảm bảo đo được ở dải nhiệt độ 0-80 độ C;
- Giá thành: Phù hợp với kinh phí nghiên cứu;
- Có thể kết nối được với máy đo tự động hiện có tại Việt Nam;
- Độ bền: Đảm bảo không bị hư hỏng khi đặt trong hỗn hợp bê tông nhựa nóng;

Từ những phân tích trên nhóm nghiên cứu lựa chọn cảm biến kiểu cặp nhiệt điện kiểu K là loại phù hợp với các yêu cầu nêu trên.

2.2. Lựa chọn máy đo

Đề đo được nhiệt độ từ các đầu đo cảm biến K, nhóm nghiên cứu lựa chọn máy đo đa kênh TDS 302 của hãng Tokyo Sokki Kenkyujo có thể đo cùng lúc 10 kênh đo, khả năng lấy mẫu 1 giây/1 kết quả (Hình 1). Đây là thiết bị có độ tin cậy cao có thể hoạt động liên tục phục vụ quan trắc dài ngày (loại thiết bị này được chuyên gia Nhật Bản sử dụng quan trắc nhiều năm liên tục cầu Bãi Cháy cho kết quả chính xác và ổn định).



Hình 1. Máy đo TDS 302.

3. THIẾT KẾ VÀ LẮP ĐẶT HỆ THỐNG QUAN TRẮC TẠI HÀ NỘI

3.1. Thiết kế hệ thống quan trắc tại Hà Nội

Điểm thử nghiệm trên phố Cầu Giấy hướng đi từ Cầu Giấy đi Kim Mã, trước Trường Đại học Giao thông vận tải và gần Viện Khoa học Công nghệ Giao thông vận tải. Đường đang khai thác, mặt đường bê tông nhựa có các lớp: BTN hạt mịn dày 5 cm, BTN hạt trung dày 7 cm, và các lớp móng cấp phối đá dăm. Điểm thử nghiệm đảm bảo không bị che khuất, không bị ảnh hưởng của các phương tiện đi lại, gần nguồn điện cung cấp cho máy đo. Điểm thử nghiệm đảm bảo có thể quan trắc liên tục và lâu dài. Tọa độ điểm đo: Kinh độ 105,80°E; Vĩ độ 21,03°N.

Máy đo đa kênh tự động đo và ghi lại giá trị nhiệt độ với độ chính xác $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$. Các đầu đo nhiệt K có độ chính xác $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$ đặt trong kết cấu, trên bề mặt đường và trên độ cao 2 m so với mặt đường để đo nhiệt độ không khí.

3.2. Trình tự lắp đặt hệ thống quan trắc trong kết cấu mặt đường

- Xác định vị trí, xác định tọa độ điểm đo.
- Khoan lỗ đường kính 150 mm đặt đầu đo, khoan lỗ đường kính 70 mm chứa các dây dẫn đầu đo nhiệt. Đo chiều sâu lỗ khoan, dùng đèn khò làm khô lỗ khoan.
- Đám chặt lớp BTN nóng đáy lỗ khoan đến cao độ điểm đo thứ nhất.
- Đặt đầu đo thứ nhất ở độ sâu chính xác, rải bê tông nhựa nóng và đầm chặt.
- Tiếp tục đặt các đầu đo tiếp theo, đặt đầu đo trên bề mặt đường.
- Hoàn thiện bề mặt bằng BTN nóng, quét nhựa nóng và dùng cát xoa trên bề mặt để đảm bảo màu mặt đường đồng nhất xung quanh.

- Đặt treo đầu đo cao 2m trong râm để đo nhiệt độ không khí.
- Đặt máy đo, nối dây đo với máy, nối điện nguồn, kiểm tra và hiệu chỉnh nhiệt độ.
- Mỗi vị trí đầu đo nhiệt đều có 5-9 đầu đo, trong đó những vị trí đặc biệt như đo nhiệt độ bề mặt đường, nhiệt độ không khí có nhiều đầu đo để đánh giá chính xác.
 - + Đầu đo M_0 sát mặt đường
 - + Đầu đo M_1 sâu dưới mặt đường 20 mm
 - + Đầu đo M_2 sâu dưới mặt đường 50 mm
 - + Đầu đo M_3 sâu dưới mặt đường 90 mm
 - + Đầu đo M_4 sâu dưới mặt đường 115 mm
 - + Đầu đo M_5 đo nhiệt độ không khí theo chuẩn quốc tế cách mặt đường 2000 mm.
- Thời gian và thời điểm đo: Đo 6 ngày 30/5/2015; 01/6/2015; 03/6/2015; 04/6/2015; 09/6/2015; và 10/6/2015. Đo tự động liên tục trong ngày từ 8h00 đến 17h00, cứ 5 phút lấy số liệu 1 lần.



Vị trí thử nghiệm



Khoan lỗ đặt đầu đo

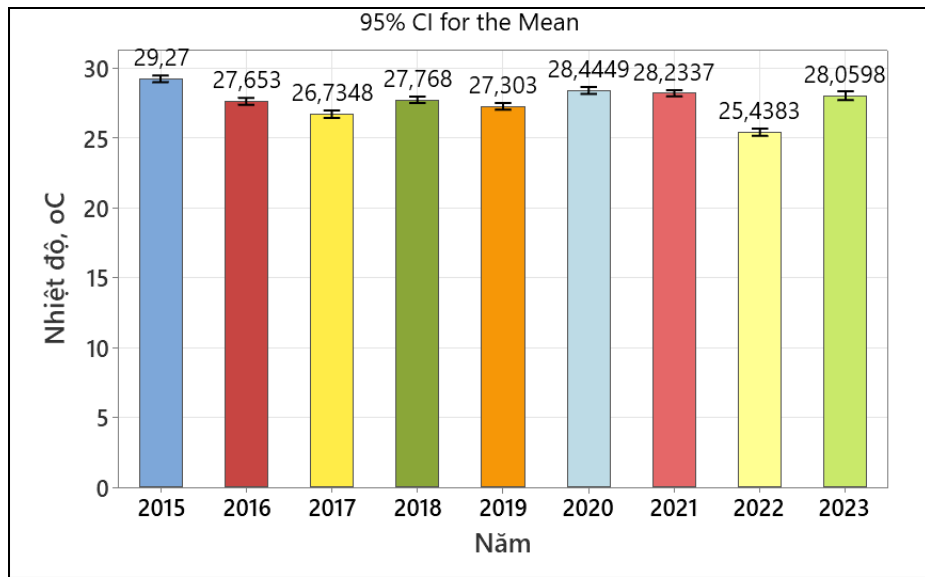
Hình 2. Thiết lập điểm quan trắc nhiệt độ Hà Nội.

Nghiên cứu thực nghiệm được thực hiện tháng 5/2015, để đánh giá mức độ thay đổi của nhiệt độ từ 2015 đến 2023 sử dụng mô hình nhiệt độ MERRA2 của NASA đã được chương trình nghiên cứu chiến lược đường bộ Hoa Kỳ (LTPP) sử dụng để thiết kế kết cấu mặt đường theo MEPDG [16]. Hình 3 thể hiện nhiệt độ trung bình tháng 5 (tháng thử nghiệm) của từng năm từ 2015 đến 2023. Hình 3 cho thấy năm 2015 (năm thử nghiệm) có nhiệt độ trung bình tháng 5 cao nhất và giữa các năm có sự chênh lệch nhiệt độ trung bình nhưng sự chênh lệch này không lớn và với độ tin cậy 95% thì chênh lệch này không có ý nghĩa thống kê. Như vậy các số liệu đo được từ tháng 5/2015 sử dụng được để xây dựng mô hình.

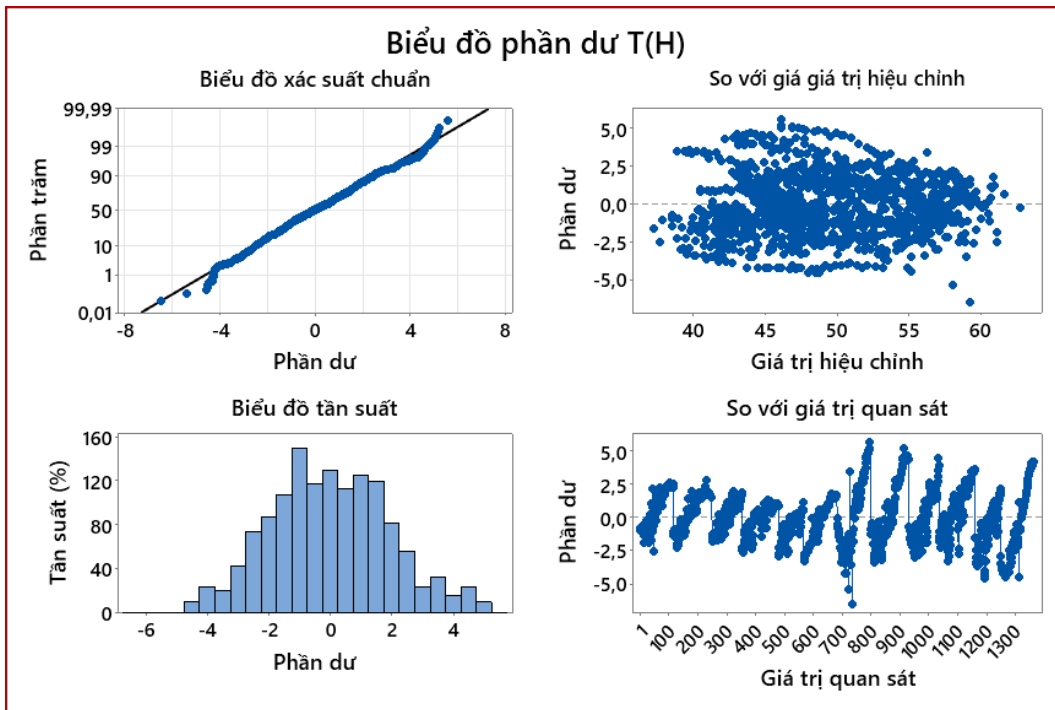
4. XỬ LÝ SỐ LIỆU QUAN TRẮC NHIỆT ĐỘ TRONG KẾT CẤU ÁO ĐƯỜNG

Kết quả tổng hợp 6 ngày được 688 bộ số liệu của 6 đầu đo từ M_0 đến M_5 . Biểu đồ phân dư (Hình 4) cho thấy phân dư tuân theo quy luật phân bố chuẩn, các giá trị ngẫu nhiên, không theo quy luật và phân bố đều hai bên qua đường “0” như vậy thỏa mãn các điều kiện áp dụng phương pháp thống kê thực nghiệm. Xử lý số liệu bằng MiniTAB được bộ giá trị lớn nhất của nhiệt độ đo được ở các vị trí chiều sâu: Nhiệt độ không khí 42,45°C; Nhiệt độ mặt đường

66,8°C; Nhiệt độ ở độ sâu 20mm là 62,7°C; Nhiệt độ ở độ sâu 50mm là 59,8°C; Nhiệt độ ở độ sâu 90mm là 57,0°C; Nhiệt độ ở độ sâu 115mm là 54,4°C.



Hình 3. Biểu đồ nhiệt độ trung bình tháng 5, °C



Hình 4. Biểu đồ phân tích điều kiện áp dụng phương pháp thống kê.

Sử dụng các số liệu đo nhiệt ở các đầu đo M_0 , M_1 và M_2 để xây dựng mô hình nhiệt độ ở độ sâu H (mm) tính từ bề mặt KCAD theo nhiệt độ mặt đường khi đo độ võng đàn hồi bằng cần đo võng Benkelman. Theo [4], để tránh hiện tượng bức xạ nhiệt của mặt trời tới cần đo võng Benkelman và hiện tượng đầu đo, cần đo bị lún vào mặt đường nhựa ở nhiệt độ cao gây

ảnh hưởng tới độ chính xác của kết quả đo, không đo vãng vào khoảng thời gian nhiệt độ mặt đường lớn hơn 40°C. Vì vậy, mô hình hồi quy dự đoán nhiệt độ lớp BTN được xây dựng với nhiệt độ mặt đường không vượt quá 40°C để đảm bảo không ảnh hưởng tới độ chính xác của kết quả đo độ vãng. Kết quả xây dựng được phương trình hồi quy (1):

$$T_{(H)} = 1,0942 T_{md} - 3,29 \log(H+25) \tag{1}$$

Trong đó:

$T_{(H)}$: Nhiệt độ trong lớp bê tông nhựa ở chiều sâu H (mm) tính từ bề mặt đường (°C);

T_{md} : Nhiệt độ mặt đường (°C).

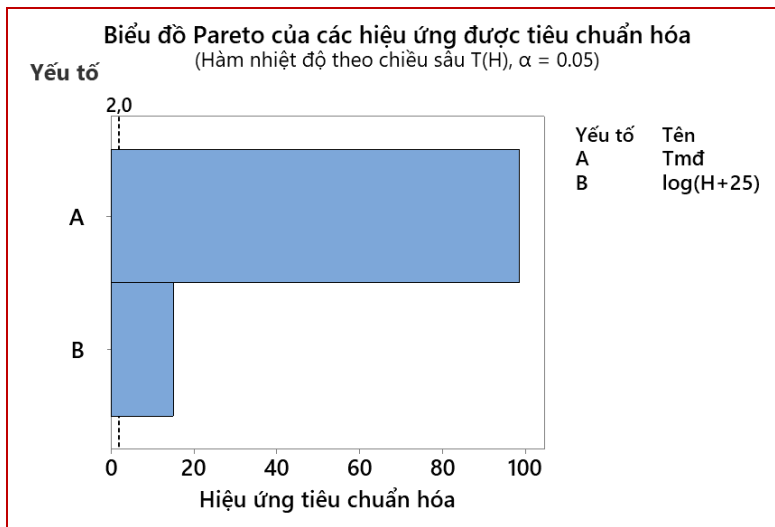
Kết quả phân tích phương sai ANOVA trong Bảng 1 cho thấy mô hình đã thiết lập ở công thức (1) khớp với dữ liệu thể hiện có $R^2 = 99,79\%$, các hệ số đều có ý nghĩa thống kê $p\text{-value} < 0,05$, Lack-of-Fit = 0,058 > 0,05.

Bảng 1. Phân tích phương sai ANOVA đánh giá mô hình nhiệt độ.

Source (nguồn)	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Regression (Hồi quy)	2	335251	167625	46793,12	0,000
T_{md}	1	2271	2271	634,06	0,000
$\log(H+25)$	1	35	35	9,75	0,002
Error (Sai số)	196	702	4		
Lack-of-Fit (Tích tương thích phương trình hồi quy)	88	371	4	1,37	0,058
Pure Error (Sai số thuần)	108	331	3		
Total (Tổng)	198	335953			

Kết quả

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
1,89269	99,79%	99,79%	99,79%



Hình 5. Biểu đồ Pareto các yếu tố ảnh hưởng nhiệt độ mặt đường ở độ sâu H - T(H).

Biểu đồ Pareto ở Hình 5, đường thẳng đứng đều cắt qua tất cả các hàng, thể hiện 2 biến T_{md} và $\log(H+25)$ đều có ảnh hưởng đến nhiệt độ mặt đường ở độ sâu H tính từ bề mặt mặt đường

$T(H)$ có ý nghĩa thống kê. Trong đó ảnh hưởng của $T_{mđ}$ nhiều hơn so với ảnh hưởng của $\log(H+25)$ đến nhiệt độ ở độ sâu H .

Ví dụ từ phương trình (1) nếu nhiệt độ mặt đường đo bằng nhiệt kế hồng ngoại là 25°C; 30°C; 35°C; 40°C thì thay vào mô hình ứng với chiều sâu 40 mm có được nhiệt độ $T(40)$ tương ứng lần lượt là 21,39°C; 26,86°C; 32,33°C; 37,80°C.

5. KẾT LUẬN, KIẾN NGHỊ

Trên cơ sở các kết quả quan trắc nhiệt độ ngoài hiện trường, kết quả mô hình hóa nhiệt độ mặt đường nghiên cứu đưa ra kết luận và kiến nghị:

- Kết quả quan trắc nhiệt độ cho thấy tại cùng một thời điểm, nhiệt độ trong lớp BTN giảm dần theo chiều sâu, tuy nhiên ở độ sâu đến 115 mm nhiệt độ lớp BTN vẫn cao hơn nhiệt độ không khí. Khi nhiệt độ cao nhất trong không khí là 42,45°C thì tại bề mặt lớp BTN nhiệt độ ghi nhận được lên tới 66,8°C (cao hơn 24,35°C) và tại chiều sâu 115 mm của lớp BTN là 54,4°C.
- Nghiên cứu đã sử dụng số liệu quan trắc thực tế tại Hà Nội xây dựng được mô hình hồi quy dự đoán nhiệt độ trong lớp BTN ở các vị trí độ sâu khác nhau theo nhiệt độ trên mặt đường với độ chính xác cao ($R^2 = 99,79\%$). Khi đo độ võng bằng cần Benkelman theo TCVN 8867:2011 trên địa bàn Hà Nội, người đo có thể tham khảo, sử dụng mô hình này để xác định nhiệt độ BTN ở vị trí độ sâu 40 mm từ nhiệt độ bề mặt tại thời điểm đo.
- Trong quá trình đo có thể tiếp tục so sánh nhiệt độ xác định theo mô hình và nhiệt độ xác định bằng phương pháp truyền thống để đánh giá, hiệu chỉnh nếu có sự chênh lệch nhiều.
- Kiến nghị tiếp tục nghiên cứu ở nhiều vùng khác nhau để xây dựng mô hình tổng quát nhiệt độ trong các lớp bê tông nhựa theo khu vực (vĩ độ), nhiệt độ mặt đường, chiều sâu tính từ mặt đường.

LỜI CẢM ƠN

Tác giả xin chân thành cảm ơn Trung tâm KHCNGTVT, Trường Đại học GTVT đã hỗ trợ trong quá trình nghiên cứu thực nghiệm.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Tổng cục Đường bộ Việt Nam, TCCS 38, Áo đường mềm – Các yêu cầu và chỉ dẫn thiết kế, 2022
- [2]. Tổng cục Đường bộ Việt Nam, TCCS 37, Áo đường mềm – Yêu cầu và chỉ dẫn thiết kế theo chỉ số kết cấu SN, 2022.
- [3]. AASHTO 2008, Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide, Natl. Coop. Highw. Res. Progr. Transp. Board Natl. Res. Counc, (2008) 194.
- [4]. 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.
- [5]. AASHTO Designation: T 317-04 (2013), Standard Test Method for Prediction of Asphalt-Bound Pavement Layer Temperatures.

- [6]. H.F. Hassan, A.S. Al-Nuaimi, R. Taha, T.M.A. Jafar, Development of Asphalt Pavement Temperature Models for Oman, *J. Eng. Res.*, 2 (2005) 32. <https://doi.org/10.24200/tjer.vol2iss1pp32-42>
- [7]. 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>
- [8]. 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>
- [9]. 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>
- [10]. 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))
- [11]. 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>
- [12]. J. Chen, M. Zhang, H. Wang, L. Li, Evaluation of thermal conductivity of asphalt concrete with heterogeneous microstructure, *Appl. Therm. Eng.*, 84 (2015) 368–374. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.03.070>
- [13]. 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>
- [14]. 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>
- [15]. Trần Thị Thu Thảo, Nguyễn Hồng Hải, Nguyễn Quang Phúc, Dự đoán nhiệt độ bê tông nhựa phục vụ thí nghiệm đo độ võng 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>
- [16]. <https://infopave.fhwa.dot.gov/Tools/MEPDGInputsFromMERRA>, accessed May 20, 2024