

Khảo sát số sự truyền nhiệt trong tấm bê tông xi măng mặt đường ô tô bằng phương pháp phần tử hữu hạn

Numerical investigation of heat transfer in cement concrete pavement slabs using the Finite Element Method

Nguyễn Văn Dương¹, Thịnh Văn Thanh^{1,2*}, Hoàng Hồng Phán¹ và Phạm Tôn Hiệp¹

¹ Khoa Công trình, Trường Sĩ quan Công binh;

² Khoa Công trình, Trường Đại học Thủy Lợi;

*Tác giả liên hệ: Thanhz756@gmail.com

■ Nhận bài: 25/12/2025 ■ Sửa bài: 06/02/2026 ■ Duyệt đăng: 08/03/2026

DOI: <https://doi.org/10.66195/mtu.2026.16.156>

TÓM TẮT

Bài báo tập trung nghiên cứu sự truyền nhiệt trong tấm bê tông xi măng của mặt đường ô tô thông qua phân tích số bằng phương pháp phần tử hữu hạn. Mục tiêu của nghiên cứu nhằm làm rõ đặc điểm phân bố trường nhiệt trong tấm bê tông dưới tác động của điều kiện nhiệt môi trường, đồng thời đánh giá ảnh hưởng của chiều dày tấm đến sự biến thiên nhiệt theo phương dày. Mô hình tính toán được xây dựng và triển khai trên phần mềm Code_Aster, cho phép mô phỏng chi tiết quá trình truyền nhiệt không ổn định trong kết cấu mặt đường. Kết quả phân tích cho thấy chiều dày tấm bê tông có ảnh hưởng đáng kể đến dạng phân bố và gradient nhiệt, đặc biệt trong vùng gần bề mặt chịu tác động trực tiếp của môi trường. Các kết quả thu được góp phần làm sáng tỏ quy luật truyền nhiệt trong mặt đường bê tông xi măng, đồng thời cung cấp cơ sở khoa học phục vụ phân tích ứng suất nhiệt và thiết kế, đánh giá kết cấu mặt đường trong điều kiện khí hậu thực tế.

Từ khóa: Mặt đường bê tông xi măng; truyền nhiệt; phương pháp phần tử hữu hạn; Phân tích nhiệt; Mô phỏng số

ABSTRACT

This paper presents a numerical investigation of heat transfer in cement concrete pavement slabs using the finite element method. The primary objective of the study is to clarify the thermal distribution characteristics within concrete slabs subjected to environmental thermal conditions, with particular emphasis on the influence of slab thickness on through-thickness temperature profiles. A detailed numerical model is developed and implemented in Code_Aster to simulate the transient heat transfer process in rigid pavement structures. The simulation results indicate that slab thickness significantly affects both the temperature distribution and thermal gradients, especially in regions close to the slab surface directly exposed to environmental actions. The findings provide valuable insight into the thermal behavior of cement concrete pavements and establish a scientific basis for subsequent thermal stress analysis, structural assessment, and the design of rigid pavements under realistic climatic conditions.

Keywords: Cement concrete pavement; heat transfer; finite element method; Numerical simulation; Thermal analysis

1. GIỚI THIỆU

Trong quá trình khai thác, mặt đường bê tông xi măng chịu ảnh hưởng trực tiếp của các yếu tố nhiệt môi trường như bức xạ mặt trời và sự biến thiên nhiệt độ không khí theo chu kỳ

ngày đêm. Các tác động này gây ra sự truyền nhiệt trong tấm bê tông, dẫn đến phân bố nhiệt độ không đồng đều theo chiều dày tấm và ảnh hưởng đến trạng thái làm việc của kết cấu mặt đường [1, 2]. Do đó, việc khảo sát đặc điểm

truyền nhiệt trong tấm bê tông xi măng có ý nghĩa quan trọng đối với phân tích và đánh giá kết cấu mặt đường. Nhiều công trình nghiên cứu trước đây đã tiếp cận vấn đề truyền nhiệt trong bê tông xi măng bằng các mô hình giải tích hoặc mô phỏng số [3, 4]. Tuy nhiên, các nghiên cứu này thường sử dụng những giả thiết đơn giản hóa về điều kiện biên nhiệt hoặc tập trung vào một số trường hợp hình học nhất định, do đó chưa phản ánh đầy đủ ảnh hưởng của sự thay đổi chiều dày tấm và điều kiện nhiệt môi trường đặc trưng. Bên cạnh đó, các nghiên cứu khảo sát số sử dụng phần mềm phần tử hữu hạn mã nguồn mở cho bài toán truyền nhiệt trong tấm bê tông xi măng mặt đường vẫn còn hạn chế, đặc biệt trong điều kiện khí hậu Việt Nam [5].

Xuất phát từ những vấn đề trên, bài báo này tiến hành khảo sát số sự truyền nhiệt trong tấm bê tông xi măng mặt đường ô tô bằng phương pháp phần tử hữu hạn, sử dụng phần mềm Code Aster. Nghiên cứu tập trung phân tích đặc điểm phân bố nhiệt trong tấm theo chiều dày dưới tác động của điều kiện nhiệt môi trường, qua đó cung cấp cơ sở tham khảo cho các nghiên cứu và ứng dụng tiếp theo trong lĩnh vực mặt đường bê tông xi măng.

2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

Hiện nay ở Việt Nam, những hướng dẫn tính toán ứng suất nhiệt trong quy trình tính toán mặt đường cứng đường ô tô là kết quả của các nghiên cứu sự truyền nhiệt trong mặt đường theo quy luật truyền nhiệt một chiều. Khi đó, sự thay đổi nhiệt độ theo chu kỳ ngày đêm và theo chiều sâu trong tấm bê tông xi măng mặt đường được xác định bằng cách giải phương trình vi phân truyền nhiệt Fourier [6, 7].

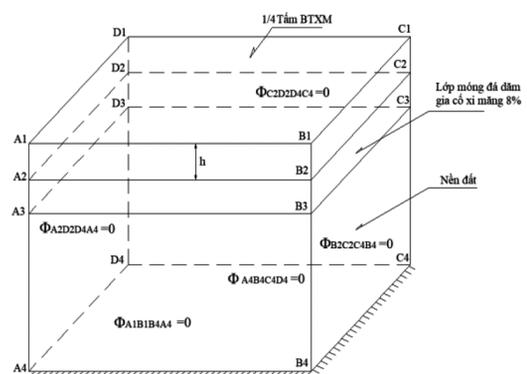
$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \tag{1}$$

Trong đó: T là nhiệt độ trong tấm bê tông tại độ sâu z và thời điểm $\tau(^{\circ}c)$; τ là thời điểm nghiên cứu (giờ); z là chiều sâu kể từ bề mặt ($z = 0$) đến điểm cần xét (m); a là hệ số khuếch tán nhiệt của bê tông xi măng ($m^2/giờ$), nó phụ thuộc vào đặc điểm, tính chất, trạng thái của các loại vật liệu sử dụng trong kết cấu mặt đường và môi trường làm việc của tấm bê tông xi măng mặt đường.

Nghiên cứu này sử dụng phương pháp phần tử hữu hạn (Finite Element Method - FEM) để khảo sát số sự truyền nhiệt trong kết cấu mặt đường bê tông xi măng dưới tác động của điều kiện nhiệt môi trường. Phương pháp này cho phép mô phỏng bài toán truyền nhiệt không ổn định với hình học và điều kiện biên phức tạp, phù hợp cho các bài toán khảo sát trường nhiệt trong kết cấu mặt đường cứng. Đối tượng khảo sát là hệ kết cấu gồm tấm bê tông xi măng - lớp móng - nền đất, trong đó trọng tâm phân tích là đặc điểm phân bố trường nhiệt độ và gradient nhiệt theo chiều dày tấm bê tông [8].

2.1. Mô hình hình học và kết cấu khảo sát:

Tấm bê tông xi măng được giả thiết có kích thước mặt bằng (5,0×4,5) m, đặt trên lớp móng cấp phối đá dăm gia cố xi măng và nền đất tự nhiên bên dưới (Hình 1).



Hình 1. Mô hình hình học và điều kiện biên nhiệt của kết cấu khảo sát

Chiều dày tấm bê tông được thay đổi trong khoảng từ 16 cm đến 40 cm nhằm khảo sát ảnh hưởng của thông số này đến đặc điểm truyền nhiệt, đồng thời bao quát phạm vi ứng dụng cho cả mặt đường ô tô và mặt đường sân bay.

Do tính đối xứng của hình học và điều kiện biên, chỉ một phần tư diện tích của mô hình kết cấu được sử dụng trong quá trình mô phỏng nhằm giảm khối lượng tính toán mà vẫn đảm bảo phản ánh chính xác đặc điểm truyền nhiệt của hệ kết cấu.

Các thông số nhiệt - vật lý của từng lớp kết cấu được xác định trên cơ sở các tài liệu đã công bố về truyền nhiệt trong bê tông xi măng và được sử dụng thống nhất trong toàn bộ quá trình khảo sát (Bảng 1).

Bảng 1: Thông số nhiệt - vật lý các lớp kết cấu [9]

Lớp kết cấu	Chiều dày (cm)	Hệ số giãn nở nhiệt α (1/°C)	Hệ số truyền dẫn nhiệt λ (W/(m.K))	Nhiệt dung riêng C_p (J/kg.K)	Khối lượng riêng ρ (kg/m ³)
Tấm bê tông xi măng	16÷40	10^{-5}	2,33	872	2400
Móng cấp phối đá dăm gia cố xi măng 8%	25	7.10^{-6}	2,1	837	2000
Nền đất		5.10^{-6}	0,9	837	1800

2.2. Mô hình phần tử hữu hạn và điều kiện biên bài toán:

Bài toán truyền nhiệt không ổn định ba chiều được khảo sát bằng phần tử khối 8 nút trên phần mềm Code_Aster. Phần mềm này là công cụ phần tử hữu hạn mã nguồn mở đã được ứng dụng rộng rãi trong phân tích truyền nhiệt và cơ học kết cấu xây dựng, bảo đảm độ tin cậy cho các kết quả mô phỏng số [10].

Điều kiện biên nhiệt được thiết lập theo chu kỳ ngày đêm của nhiệt độ không khí, đại diện cho điều kiện khí hậu Miền Nam, số liệu được lấy từ trạm Xuân Lộc, Tp Hồ Chí Minh và nghiên cứu của PGS Nguyễn Duy Đồng [11]. Nhiệt độ tại bề mặt tấm bê tông và các mặt bên của tấm được gán theo quy luật biến thiên theo thời gian trong ngày. Mặt đáy của mô hình được giả thiết không có dòng nhiệt truyền qua, với chiều sâu mô hình là 1,5m, trong khi các mặt đối xứng và mặt bên của hệ móng - nền được áp dụng điều kiện dòng nhiệt vuông góc bằng không [12].

Nhiệt độ ban đầu của toàn bộ hệ kết cấu được giả thiết bằng với nhiệt độ bề mặt thấp nhất trong ngày, tương ứng với thời điểm 5 giờ sáng.

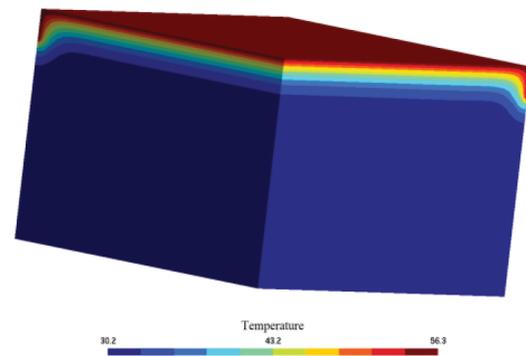
3. KẾT QUẢ KHẢO SÁT VÀ THẢO LUẬN

3.1. Quy trình khảo sát số

Quá trình khảo sát số được thực hiện thông qua mô phỏng truyền nhiệt không ổn định trong kết cấu mặt đường bê tông xi măng bằng phương pháp phần tử hữu hạn cho các chiều dày tấm 20cm, 30cm và 40 cm (Hình 2).

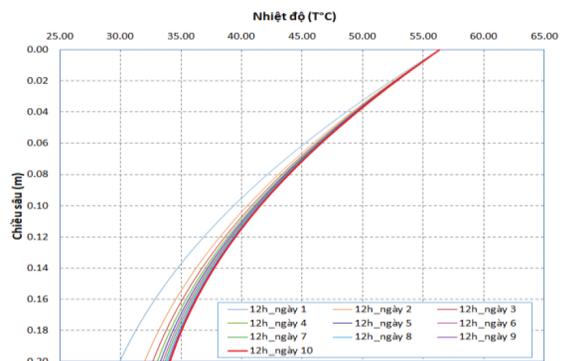
Mô hình được tính toán cho nhiều chu kỳ ngày đêm liên tiếp nhằm bảo đảm trường nhiệt trong hệ kết cấu đạt trạng thái lặp ổn định và không còn chịu ảnh hưởng của điều kiện ban

đầu. Sự ổn định của trường nhiệt được đánh giá thông qua phân bố nhiệt độ theo chiều sâu kết cấu tại các chu kỳ khảo sát, trong đó sự sai khác giữa các chu kỳ liên tiếp là không đáng kể (Hình 3).



Hình 2. Phân bố nhiệt độ tại thời điểm 12 giờ - tấm dày 20cm

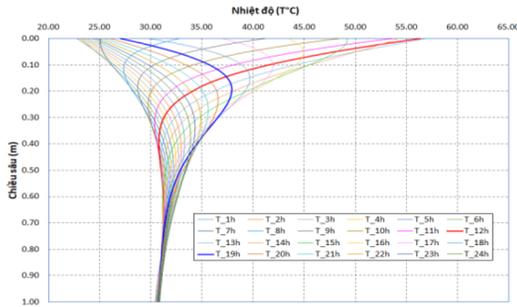
Sau khi trường nhiệt đạt trạng thái ổn định, các kết quả mô phỏng được trích xuất tại chu kỳ khảo sát cuối cùng để phục vụ phân tích.



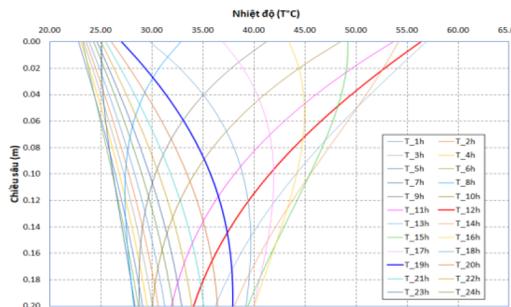
Hình 3. Phân bố nhiệt độ theo chiều sâu của kết cấu trong các chu kỳ khảo sát

Trường nhiệt độ trong hệ kết cấu được thể hiện thông qua phân bố nhiệt độ theo chiều sâu tại các thời điểm đặc trưng trong ngày. (Hình 4a,b) phản ánh đặc điểm truyền nhiệt từ

bề mặt tấm bê tông dày 20 cm xuống các lớp kết cấu bên dưới.



a. Đối với hệ kết cấu



b. Đối với tấm bê tông xi măng

Hình 4. Phân bố nhiệt độ theo chiều sâu - tấm dày 20 cm

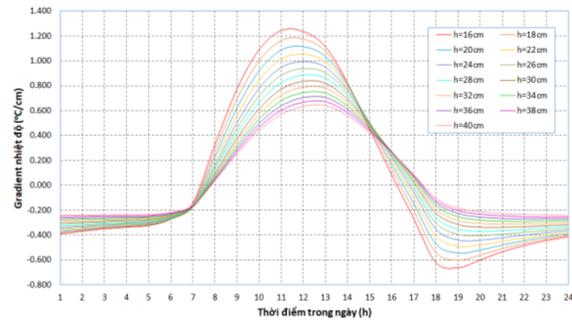
Có thể thấy rằng các quá trình truyền nhiệt trong tấm có chiều dày 30cm và 40cm cũng diễn ra tương tự như đối với tấm có chiều dày 20cm. Tuy nhiên, các thời điểm diễn ra chênh

lệch nhiệt độ lớn nhất giữa mặt và đáy tấm có sự thay đổi. Chẳng hạn đối với tấm dày 30cm, các thời điểm này là 12h và 21h, còn đối với tấm dày 40cm là 13h và 24h.

Trên cơ sở kết quả phân bố nhiệt độ, chênh lệch nhiệt độ giữa bề mặt và đáy tấm bê tông được xác định tại các thời điểm khảo sát khác nhau nhằm đánh giá xu hướng biến thiên nhiệt trong chu kỳ ngày đêm (Bảng 2).

Cuối cùng, gradient nhiệt độ đại diện theo chiều dày tấm bê tông được xác định từ các kết quả mô phỏng (Hình 5) và tổng hợp cho các trường hợp chiều dày khác nhau (Bảng 3).

Các giá trị này được sử dụng làm chỉ tiêu khảo sát nhằm phân tích ảnh hưởng của chiều dày tấm đến đặc điểm truyền nhiệt trong kết cấu mặt đường bê tông xi măng [13].



Hình 5. Biến thiên gradient nhiệt độ trong tấm bê tông xi măng theo thời gian đối với các chiều dày khác nhau

Bảng 2: Chênh lệch nhiệt độ giữa bề mặt và đáy tấm bê tông tại các thời điểm khảo sát

Thời điểm	Thời gian (giờ)	ΔT (°C) - 16 cm	ΔT (°C) - 20 cm	ΔT (°C) - 24 cm	ΔT (°C) - 30 cm	ΔT (°C) - 35 cm	ΔT (°C) - 40 cm
Rạng sáng	5	-5.17	-6.27	-7.23	-8.33	-8.97	-9.38
Buổi sáng	9	12.38	12.43	12.08	11.29	10.65	10.11
Giữa trưa	12	19.77	22.27	23.87	25.06	25.36	25.35
Buổi chiều	15	7.18	9.83	12.1	14.64	15.01	16.88
Hoàng hôn	18	-9.93	-9.42	-8.45	-6.72	-5.36	-4.23
Ban đêm	22	-7.73	-8.89	-9.59	-9.95	-9.80	-9.42

Bảng 3: Gradient nhiệt độ đại diện theo chiều dày tấm bê tông

Chiều dày tấm (cm)	Gradient nhiệt lớn nhất (°C/m)	Thời điểm xuất hiện (giờ)
16	124.3	11
20	111.3	12
24	99.4	12
30	83.5	12
35	72.5	13
40	64.0	13

3.2. Kết quả khảo sát

Kết quả khảo sát số cho thấy sự truyền nhiệt trong tấm bê tông xi măng chịu ảnh hưởng rõ rệt của điều kiện nhiệt môi trường và chiều dày tấm. Trường nhiệt trong tấm biến thiên theo chiều dày trong chu kỳ ngày đêm, phản ánh đặc trưng truyền nhiệt không ổn định của kết cấu mặt đường bê tông xi măng.

3.3. Thảo luận

Phân tích kết quả cho thấy khi chiều dày tấm tăng, xu hướng biến thiên của gradient nhiệt theo chiều dày có sự thay đổi đáng kể, thể hiện vai trò của yếu tố hình học trong bài toán truyền nhiệt. Nhận xét này phù hợp với các xu hướng đã được ghi nhận trong một số nghiên cứu trước về truyền nhiệt trong mặt đường bê tông xi măng [14, 15].

Bảng 3: So sánh xu hướng gradient nhiệt theo chiều dày tấm bê tông xi măng với một số nghiên cứu

Phương pháp khảo sát	Phạm vi chiều dày tấm	Điều kiện nhiệt	Xu hướng gradient nhiệt
FEM 3D - Code_Aster	16-40 cm	Chu kỳ ngày đêm - TP.HCM	Gradient giảm khi chiều dày tăng
FEM	20-30 cm	Khí hậu ôn đới	Gradient phụ thuộc chiều dày
FEM	20-35 cm	Điều kiện Việt Nam	Gradient biến thiên theo bề dày
Mô hình số	15-30 cm	Điều kiện chuẩn	Gradient không tuyến tính
FEM 3D	18-40 cm	Chu kỳ nhiệt ngày đêm	Gradient giảm theo chiều dày

4. KẾT LUẬN

Bài báo đã trình bày một khảo sát số về sự truyền nhiệt trong tấm bê tông xi măng mặt đường ô tô bằng phương pháp phần tử hữu hạn. Mô hình phần tử hữu hạn ba chiều được xây dựng trên phần mềm Code_Aster cho phép mô phỏng đặc điểm phân bố nhiệt trong tấm bê tông dưới tác động của điều kiện nhiệt môi trường theo chu kỳ ngày đêm. Kết quả khảo sát cho thấy trường nhiệt trong tấm biến thiên theo chiều dày và chịu ảnh hưởng đáng kể của chiều dày tấm bê tông xi măng. Xu hướng biến thiên của gradient nhiệt theo chiều dày được làm rõ thông qua phân tích và so sánh với các nghiên cứu trước, trên cơ sở định tính về xu hướng phân bố nhiệt. Các kết quả thu được cung cấp cơ sở tham khảo cho các nghiên cứu tiếp theo và góp phần hỗ trợ việc xem xét, lựa chọn giả thiết nhiệt trong

Về mặt quy luật thay đổi của gradient nhiệt độ trung bình lớn nhất theo chiều dày tấm, giảm dần khi chiều dày tấm bê tông tăng lên và ngược lại. Điều này có thể được giải thích do sự khác nhau của mô hình tính toán, cũng cần nhấn mạnh rằng, một mô hình truyền nhiệt ba chiều sẽ phản ánh được chính xác hơn sự truyền nhiệt nền mặt đường trong thực tế.

Các nghiên cứu tiếp theo có thể mở rộng khảo sát số này bằng cách xem xét ảnh hưởng của các điều kiện nhiệt môi trường khác nhau hoặc tích hợp bài toán truyền nhiệt với phân tích cơ học nhằm đánh giá toàn diện hơn trạng thái làm việc của kết cấu mặt đường bê tông xi măng. (Bảng 4) trình bày so sánh xu hướng gradient nhiệt theo chiều dày tấm giữa nghiên cứu này và các công trình đã công bố [16 - 20].

phân tích và thiết kế kết cấu mặt đường bê tông xi măng.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] T. Nishizawa, M. Koyanagawa, Y. Takeuchi, K. Kubo, and T. Yoshimoto (2017). Thermal stress calculation method for concrete pavement based on temperature prediction and finite element method analysis, *Transportation Research Board, Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2640, 104-114, DOI:10.3141/2640-12
- [2] Trần N.H. and Phạm D.T (2022). Research on thermal state and stress distribution in concrete pavement slabs using finite element analysis. *Tạp chí điện tử Khoa học và Công nghệ Giao thông*, 2(1), 23-35.
- [3] C.F. Wang, D.B. Ji, Z.Q. Yi, and L. Liu (2010). Analysis of high-permeable concrete

- pavement heat transfer mechanism. *Advanced Materials Research*, 168-170, 859-863.
- [4] L.Q. Tran and D.T. Pham (2023). Dự báo sự phân bố nhiệt độ trong mặt đường bằng mô phỏng số. *Journal of Science and Technique: Section on Special Construction Engineering*, 6(1).
- [5] L.M. Jiji and A.H. Danesh-Yazdi (2024). Heat Conduction, 4th ed. Cham, Switzerland: Springer, DOI: 10.1007/978-3-031-43740-3
- [6] A.T. Papagiannakis and E.A. Masad (2024). Pavement Design and Materials, 2nd ed. Hoboken, NJ, USA: Wiley.
- [7] R.B. Mallick and T. El-Korchi (2023). Pavement Engineering: Principles and Practice, 4th ed. Boca Raton, FL, USA: CRC Press.
- [8] A.A. Siddique, M.N. Amin, and K. Khan (2017). Numerical simulation of transient heat transfer in concrete pavement slabs under environmental loading. *Construction and Building Materials*, 155, 371-382.
- [9] S. Chatti and I. Lee (2019). Three-dimensional finite element analysis of thermal behavior in rigid pavements, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 31(6), 04019072.
- [10] EDF R&D, Code_Aster—Sổ tay lý thuyết (2020). Phân tích nhiệt, Phiên bản 14.6. Paris, Pháp.
- [11] Nguyễn Duy Đồng (2007). Nghiên cứu sự làm việc của mặt đường cứng sân bay trong điều kiện nhiệt độ Việt Nam, Luận án tiến sĩ, Hà Nội.
- [12] J. Roesler, H. Wang, and A.R. Al-Qadi (2018). Modeling of temperature gradients in concrete pavements considering climatic conditions, *International Journal of Pavement Engineering*, 19(4), 305-316.
- [13] Y. Qin, Z. Leng, and F. Gu (2022). Numerical investigation of thermal responses of concrete pavement slabs under daily temperature cycles, *Road Materials and Pavement Design*, 23(5), 1094-1110.
- [14] J.R. Kim, S.H. Lee, and J.Y. Park (2018). Numerical investigation of temperature distribution in concrete pavement slabs under environmental loading, *Construction and Building Materials*, 165, 510-521.
- [15] Y. Qin, H. Wang, and Z. Chen (2022). Three-dimensional finite element analysis of temperature gradients in concrete pavements, *International Journal of Pavement Engineering*, 23(6), 1894-1906.
- [16] Q. Shen, J. Chen, C. Yue, H. Cao, C. Chen, and W. Qian (2023). Investigation on the Through-Thickness Temperature Gradient and Thermal Stress of Concrete Box Girders, *Buildings*, 13(11), 2882, DOI: 10.3390/buildings13112882
- [17] Y. Liu, Z. Zhang, H. Wang, and J. Li (2023). Temperature variation and distribution in underground concrete sidewall: On-site monitoring and finite simulation, *J. Build. Eng.*, 76, 107145, DOI: 10.1016/j.job.2023.107145
- [18] M.B. Nayeem (2025). Effect of temperature distribution and thermal gradient on steel-concrete composite structures, *Can. J. Chem. Eng.*, DOI: 10.1139/cjce-2024-0251
- [19] Sana Ullah, Peng Wu, Ting Peng, Zujin Fan, Tianhao Long, and Yuan Li (2025). Numerical Analysis of Temperature and Stress Fields in Mass Concrete Based on Average Forming Temperature Method, arXiv preprint.
- [20] M. Zhai et al., (2025). Temperature Field and Temperature Effects for Concrete Box Girder Bridge under Solar Radiation, *Sensors*, 25(16), DOI: 10.3390/s25165036