



EVALUATING THE COMBINED EFFECT COEFFICIENTS OF UNIFORM TEMPERATURE AND VERTICAL LINEAR TEMPERATURE GRADIENT ON REINFORCED CONCRETE BOX GIRDER BRIDGES USING BIVARIATE EXTREME VALUE ANALYSIS AND COPULA MODELS

Ngo Dang Quang, Nguyen Huy Cuong*

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

ARTICLE INFO

TYPE: Research Article

Received: 16/05/2025

Revised: 07/06/2025

Accepted: 11/06/2025

Published online: 15/06/2025

<https://doi.org/10.47869/tcsj.76.5.13>

* *Corresponding author*

Email: nguyenhuycuong@utc.edu.vn; Tel: +84989832425

Abstract. Thermal effects on structural components cause both translational displacements (expansion and contraction) and rotational movements. When these displacements are restrained, as in statically indeterminate structures, they generate internal forces. Therefore, accurately determining the magnitude of thermal effects is critically important. In structural calculations, thermal actions are usually divided into two components: uniform temperature across the cross-section and vertical linear temperature gradient. In addition to defining values for each component, design standards also introduce “combination coefficients” between them. However, the methods for combining these components and the recommended coefficient values vary. While TCVN 13594:2022 proposes a direct combination coefficient between uniform and gradient temperature components, TCVN 11823:2017 recommends coefficients depending on the limit state under consideration. This study presents a method to determine the combination coefficient between uniform temperature and vertical temperature gradient effects on reinforced concrete box girder bridges during the service stage. The approach is based on field measurement data and bivariate extreme value analysis using copula models, allowing for a more realistic representation of the joint occurrence and correlation of thermal components in operational bridge structures.

Keywords: Combination coefficient, thermal effect, box girder bridge, bivariate extreme value analysis, copula.

@ 2025 University of Transport and Communications



XÁC ĐỊNH HỆ SỐ TỔ HỢP TÁC ĐỘNG CỦA NHIỆT ĐỘ ĐỀU VÀ GRADIENT NHIỆT ĐỨNG TRÊN CÁC DẦM CẦU DẠNG HỘP BÊ TÔNG CỐT THÉP DỰA TRÊN PHÂN TÍCH CỰC TRỊ HAI BIẾN BẰNG MÔ HÌNH COPULA

Ngô Đăng Quang, Nguyễn Huy Cường*

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: 16/05/2025

Ngày nhận bài sửa: 07/06/2025

Ngày chấp nhận đăng: 11/06/2025

Ngày xuất bản Online: 15/06/2025

<https://doi.org/10.47869/tcsj.76.5.13>

* Tác giả liên hệ

Email: nguyenhuycuong@utc.edu.vn; Tel: +84989832425

Tóm tắt. Tác động nhiệt trên các kết cấu xây dựng gây chuyển vị tịnh tiến (co, giãn) và chuyển vị xoay. Nếu các chuyển vị này bị kiểm chế như trong các kết cấu siêu tĩnh, chúng sẽ làm phát sinh nội lực. Việc xác định chính xác các giá trị của tác động nhiệt, do đó, là rất quan trọng. Trong tính toán, nhiệt trên các cấu kiện thường được chia thành nhiệt độ đều trên mặt cắt và gradient nhiệt. Bên cạnh các giá trị tương ứng cho từng thành phần tác động này, các tiêu chuẩn thiết kế cũng đề xuất các “hệ số tổ hợp” giữa chúng. Mặc dù vậy, cách xem xét tổ hợp các tác động thành phần này cũng như các giá trị của hệ số tổ hợp cũng khác nhau. Trong khi TCVN 13594:2022 đề xuất hệ số tổ hợp trực tiếp giữa thành phần nhiệt phân bố đều và gradient nhiệt, TCVN 11823:2017, lại khuyến cáo các hệ số cho tác động nhiệt phụ thuộc vào trạng thái giới hạn. Nghiên cứu này trình bày cách xác định hệ số tổ hợp cho các thành phần nhiệt độ đều và gradient nhiệt trên các dầm cầu dạng hộp bằng bê tông cốt thép ở giai đoạn khai thác dựa trên số liệu đo đạc hiện trường và phân tích cực trị hai biến bằng mô hình copula.

Từ khóa: Hệ số tổ hợp, tác động nhiệt, cầu dầm hộp, phân tích cực trị hai biến, copula.

@ 2025 Trường Đại học Giao thông vận tải

1. GIỚI THIỆU

Nhiệt là một trong những tác động quan trọng, có ảnh hưởng lớn đến sự làm việc của kết cấu, đặc biệt là kết cấu cầu, trong giai đoạn khai thác. Nhiệt gây chuyển vị, bao gồm cả chuyển vị tịnh tiến và chuyển vị xoay, ảnh hưởng đến sự làm việc của các bộ phận như khe co

giãn, gối cầu. Bên cạnh đó, trong các kết cấu siêu tĩnh, kể cả nội siêu tĩnh và ngoại siêu tĩnh, tác động nhiệt sẽ làm phát sinh nội lực. Ở các dầm cầu bê tông có mặt cắt dạng hộp, nhiệt được coi là một trong các nguyên nhân chính gây nứt ở bản mặt cầu [1].

Nhằm mục đích tính toán, tác động nhiệt được chia thành thành phần nhiệt độ đều và thành phần nhiệt chênh lệch (gradient nhiệt) như đề xuất trong các tiêu chuẩn thiết kế cầu TCVN 11823:2017 [2], TCVN 13594:2022 [3]. Bên cạnh các giá trị cực trị về nhiệt độ đều, T_u , gradient nhiệt, T_g , các tiêu chuẩn cũng đồng thời khuyến nghị các cách tổ hợp tác động của chúng. TCVN 11823:2017 khuyến nghị xem xét tác động của T_u và T_g một cách riêng rẽ và tổ hợp chúng với các hệ số tổ hợp tải trọng tương ứng theo các trạng thái giới hạn (Bảng 1).

Bảng 1. Hệ số tổ hợp tác động nhiệt của TCVN 11823:2017 và AASHTO LRFD 2007.

Trạng thái giới hạn	Hệ số cho T_u	Hệ số cho T_g
Các trạng thái giới hạn cường độ và đặc biệt	0,5 hoặc 1,2	0
Các trạng thái sử dụng	1,0 hoặc 1,2	1,0 khi không xét hoạt tải 0,5 khi có xét hoạt tải

Trong khi đó, TCVN 13594:2022 lại xem xét tác động đồng thời của T_u và T_g với các hệ số tổ hợp riêng để thành giá trị tác động nhiệt T_k trước khi xem xét tác động này ở các trạng thái giới hạn (1).

$$\begin{aligned} T_k &= \Delta T_M + \omega_N \Delta T_N \\ T_k &= \omega_M \Delta T_M + \Delta T_N \end{aligned} \quad (1)$$

Trong đó, $\omega_N = 0,35$ và $\omega_M = 0,75$. T_M ở đây là thành phần gradient nhiệt và T_N là nhiệt độ đều.

Mặc dù có các giá trị khuyến cáo nhưng các tiêu chuẩn cũng đồng thời cho phép các dự án được sử dụng giá trị khác cho các hệ số này một cách phù hợp. Do nguồn gốc biên dịch nên cách tổ hợp tác động của TCVN 11823:2017 kế thừa từ AASHTO LRFD 2007 [4] và của TCVN 13594:2022 là của Eurocode 1 [5]. Các giá trị tiêu chuẩn của tải trọng nhiệt trong TCVN 13594:2022 và EuroCode được tính với chu kỳ trở lại là 50 năm. Trong khi đó, TCVN 11823:2017 và AASHTO LRFD 2007 không nêu rõ chu kỳ trở lại của tác động này [6], [7]. Mặc dù vậy, các nghiên cứu được nêu trong [7] cho thấy, thành phần gradient nhiệt dương theo phương đứng của AASHTO LRFD tương ứng với chu kỳ trở lại 100 năm.

Kết quả phân tích cực trị hai biến bằng mô hình copula cho T_u và T_g dựa trên số liệu quan trắc nhiệt độ ở một số dầm cầu bê tông cốt thép có mặt cắt dạng hộp cho thấy, cực trị của hai thành phần này có xu hướng xảy ra gần như đồng thời. Trên cơ sở đó, nghiên cứu này đề xuất các hệ số tổ hợp của chúng.

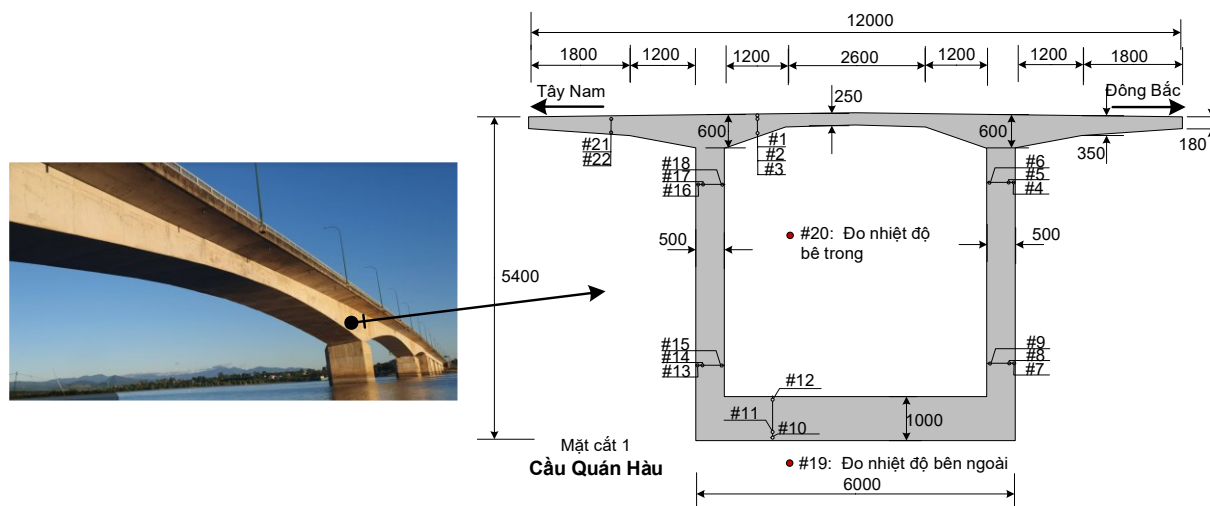
Theo tiêu chuẩn TCVN 13594:2022, gradient nhiệt, T_g , có thể được tính toán theo 2 mô hình: gradient nhiệt tuyến tính và gradient nhiệt phi tuyến. Để thuận lợi cho việc tính toán và so sánh, T_g trong nghiên cứu này được giới hạn ở gradient nhiệt tuyến tính theo phương đứng. Nghiên cứu cũng được giới hạn ở việc xem xét T_g dương và T_u dương.

2. QUAN TRẮC NHIỆT ĐỘ

Một dự án quan trắc nhiệt độ trên 3 cầu có dầm bê tông cốt thép có mặt cắt dạng hộp được thực hiện liên tục từ tháng 8 năm 2021 đến nay [1]. Các cầu này bao gồm cầu Vĩnh Thịnh ở Sơn Tây, Hà Nội, cầu Quán Hàu ở Quảng Bình và cầu Gò Găng ở Vũng Tàu. Chúng

đại diện cho 3 vùng khí hậu khác nhau. Bên cạnh tính đại diện cho vị trí địa lý và vùng khí hậu, các cầu cũng có cấu tạo hình học của dầm và phương bố trí trên mặt bằng khác nhau. Cầu Vĩnh Thịnh có hướng Đông Bắc – Tây Nam, cầu Quán Hàu có hướng Tây Bắc – Đông Nam và cầu Gò Găng có hướng Đông – Tây. Cầu Vĩnh Thịnh có công xon cánh lớn và thành nghiêng, cầu Quán Hàu có thành đứng và cầu Gò Găng có công xon cánh ngắn và thành xiên.

Trên mỗi cầu có 2 mặt cắt được lựa chọn để bố trí cảm biến nhiệt độ. Một mặt cắt ở gần gối với chiều cao mặt cắt lớn và mặt cắt còn lại ở giữa nhịp với chiều cao mặt cắt nhỏ. Tại mỗi mặt cắt có 18 cảm biến nhiệt được bố trí để đo nhiệt độ trong bê tông và 1 cảm biến đo nhiệt độ không khí trong lòng dầm cũng như 1 cảm biến đo nhiệt độ không khí ở ngoài dầm cầu. Hình 1 mô tả cách bố trí cảm biến nhiệt độ trên dầm cầu. Dữ liệu nhiệt độ được thu thập với tần suất 5 phút và được chuyển lên máy chủ nhờ công nghệ điện toán đám mây. Cho đến nay, đã có gần 2.000.000 số liệu nhiệt độ trên các cầu nói trên được thu thập.



Hình 1. Sơ đồ bố trí cảm biến trên cầu Quán Hàu.

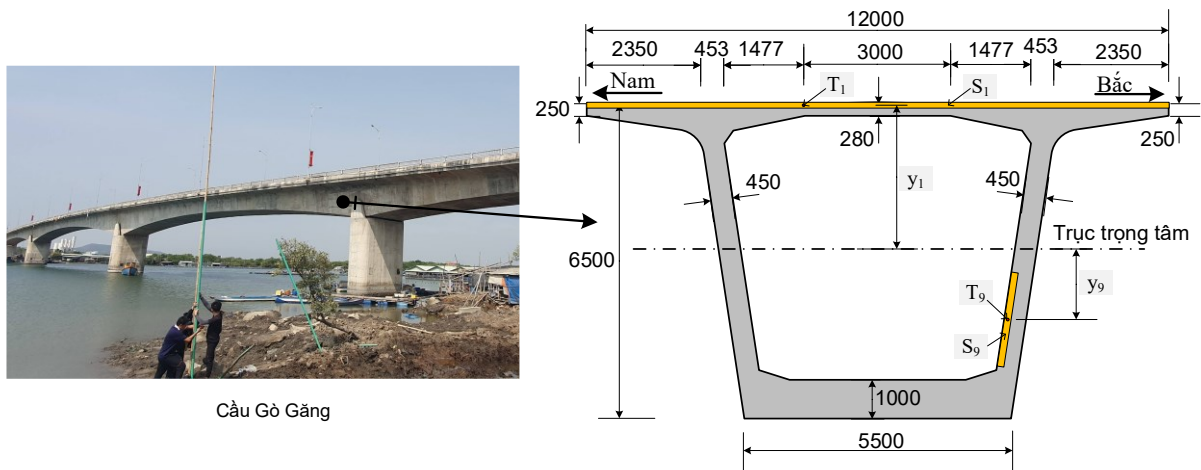
3. TÍNH TOÁN NHIỆT ĐỘ ĐỀU VÀ GRADIENT NHIỆT ĐỘ TUYẾN TÍNH THEO PHƯƠNG ĐỨNG

Nhiệt độ đều trên mặt cắt T_u và gradient nhiệt độ tuyến tính T_g theo phương đứng được tính toán lần lượt theo các công thức được xây dựng dựa trên [1] như sau:

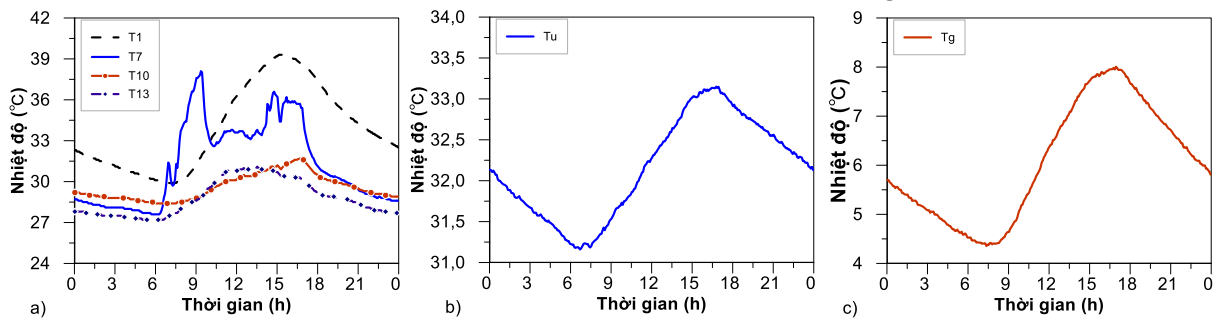
$$T_u = \frac{\sum_{i=1}^n T_i S_i}{S} \quad (2)$$

$$T_g = \frac{\sum_{i=1}^n T_i S_i y_i}{I} h \quad (3)$$

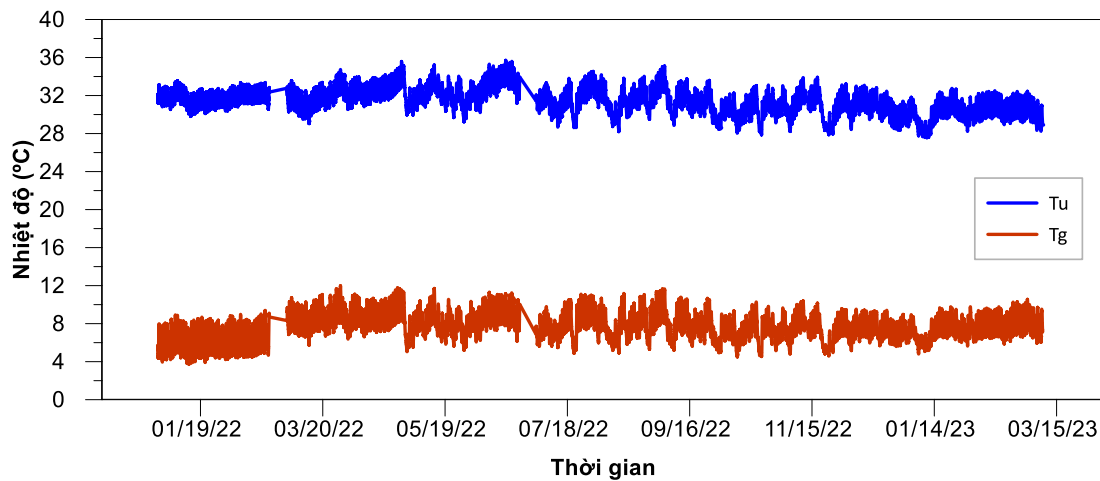
Trong đó, T_i là nhiệt độ tại diện tích của phần mặt cắt S_i , y_i là khoảng cách từ trọng tâm của S_i đến trục trọng tâm của mặt cắt theo phương đứng, S là diện tích, I là mô men quán tính và h là chiều cao của mặt cắt.



Hình 2. Cách xác định các tham số để tính T_u , T_g .



Hình 3. (a) Nhiệt độ tại một số điểm trên mặt cắt, (b) T_u và (c) T_g trên mặt cắt gần gối, cầu Gò Găng, ngày 29/12/2021.



Hình 4. Biểu đồ biến thiên T_u và T_g ở mặt cắt gần gối, cầu Gò Găng.

Trong nghiên cứu này, T_i là nhiệt độ tại các điểm bố trí cảm biến, S_i là diện tích “vùng ảnh hưởng” của T_i . Hình 2 minh họa cách xác định các giá trị cho các công thức nêu trên. Hình 3 trình bày nhiệt độ ở một số điểm đo và kết quả tính toán T_u và T_g cho mặt cắt gần gối ở cầu Gò Găng, ngày 29/12/2021. Hình 4 thể hiện sự biến thiên của T_u và T_g trên cầu Gò Găng trong khoảng thời gian từ 29/12/2021 đến 12/3/2023.

4. PHÂN TÍCH TÁC ĐỘNG ĐỒNG THỜI CỦA NHIỆT ĐỘ ĐỀU VÀ GRADIENT NHIỆT ĐỘ TUYẾN TÍNH THEO PHƯƠNG ĐỨNG

4.1 Tổng quan về phân phối cực trị đa biến và copula

Có nhiều phương pháp để xác định sự kết hợp của các hiệu ứng tải trọng, như phương pháp trùng hợp đỉnh, quy tắc của Turkstra [8], quy tắc của Ferry Borges và Castanheta, v.v. Tuy nhiên, các phương pháp này đòi hỏi dữ liệu phải có quy mô lớn và nhất là phải được thu thập trong thời gian dài. Ở nghiên cứu này, nhiệt độ trên các công trình cầu mới chỉ thu thập được trong thời gian khoảng 3 năm nên các phương pháp trên không áp dụng được. Thay vào đó, lý thuyết cực trị đa biến sẽ được sử dụng vì nó có thể ngoại suy ra ngoài phạm vi dữ liệu thu thập được [9].

Lý thuyết Cực trị (extreme value theory) cung cấp hai cách tiếp cận để lấy mẫu các sự kiện cực trị, cụ thể là: phương pháp *Giá trị cực đại từng khối* (Block Maxima - BM) sử dụng phân phối Giá trị Cực trị Tổng quát (Generalized Extreme Value - GEV) và phương pháp *Giá trị vượt ngưỡng* (Peak over Threshold - POT) sử dụng phân phối Pareto tổng quát (Generalized Pareto - GPD). Trong phương pháp Giá trị cực đại từng khối, thời gian lấy mẫu được chia thành các khối có độ dài nhất định, và giá trị lớn nhất trong mỗi khối được lấy mẫu. Trong khi đó, với phương pháp *Giá trị vượt ngưỡng*, tất cả các giá trị đỉnh được lấy mẫu, và các giá trị vượt quá một ngưỡng nhất định được sử dụng để mô hình hóa các cực trị [8].

Quá trình phân tích cực trị đa biến thường được chia thành hai phần: suy luận các phân phối biên và suy luận cấu trúc phụ thuộc tổng thể [10], [11]. Dutfoy và cộng sự [10] cũng chỉ ra rằng các mô hình được sử dụng để mô tả cấu trúc phụ thuộc tổng thể được lựa chọn dựa trên đặc điểm phụ thuộc của tập dữ liệu. Theo Tilloy và cộng sự [12] sự phụ thuộc cực trị của hai tập dữ liệu có thể được phân loại thành phụ thuộc tiệm cận (asymptotic dependence) và độc lập tiệm cận (asymptotic independence).

Để đánh giá mức độ phụ thuộc của các tập dữ liệu, các thước đo phụ thuộc cực trị χ và $\bar{\chi}$ được giới thiệu bởi Coles và cộng sự [13], cùng với hệ số phụ thuộc đuôi η được Ledford và Tawn [14] đề xuất, có thể được áp dụng [10], [12]. Một cặp chỉ số χ và $\bar{\chi}$ cho phép phân biệt giữa phụ thuộc tiệm cận và độc lập tiệm cận. Nếu $\bar{\chi}=1$ và $0 < \chi \leq 1$, thì tập dữ liệu hai biến là phụ thuộc tiệm cận, và χ đo lường mức độ của mỗi phụ thuộc này. Ngược lại, nếu $-1 \leq \bar{\chi} < 1$ và $\chi=0$, thì các biến là độc lập tiệm cận, $\bar{\chi}$ cung cấp một chỉ số về mức độ của mỗi liên hệ: ($\bar{\chi} = -1$ cho liên hệ âm mạnh, và $\bar{\chi} = 1$ tương ứng với liên hệ dương mạnh). Hệ số phụ thuộc đuôi η có giá trị trong khoảng $[0:1]$. η có giá trị càng gần 1 thì hai tập dữ liệu càng có tính phụ thuộc đuôi mạnh và ngược lại.

Trong suy luận cấu trúc phụ thuộc tổng thể, *copula* là một phương pháp hiệu quả. Có thể mô tả copula là phân phối hàm đồng thời hay hàm phân phối hiệp biến từ các hàm phân phối biên của các biến ngẫu nhiên 1 chiều và để mô tả sự phụ thuộc giữa các biến ngẫu nhiên [15], [7]. Phương pháp này cho phép lựa chọn các phân phối biên một cách linh hoạt. Có nhiều mô hình copula khác nhau như Gauss, Student, Clayton, Gumbel, Tawn, Frank, Joe, v.v. Mỗi mô hình phù hợp với một cấu trúc dữ liệu đa biến nhất định. Việc lựa chọn mô hình copula, do đó, phải được dựa trên các tiêu chí đánh giá sự phù hợp như AIC (Akaike Information Criterion), BIC (Bayesian Information Criterion).

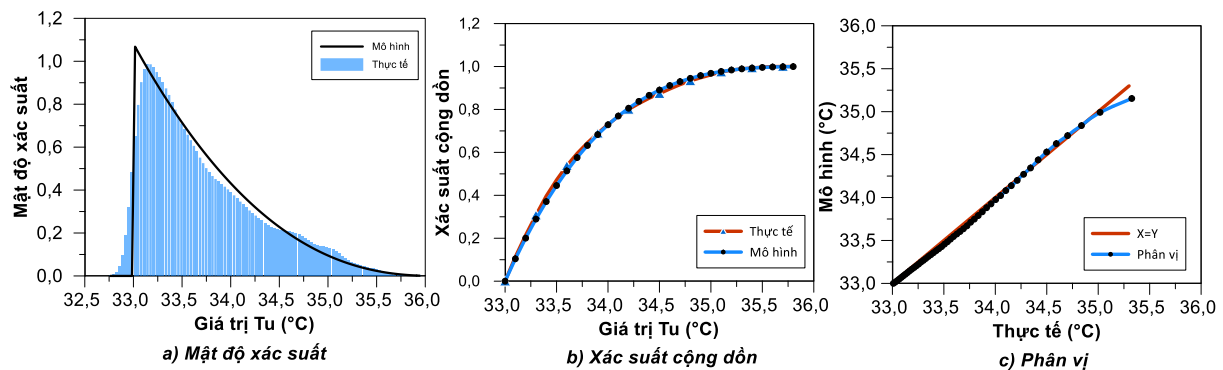
4.2 Phân tích tác động đồng thời của nhiệt độ đều và gradient nhiệt độ tuyến tính theo phương đứng dựa trên copula

a. Lựa chọn phân phối biên

Phân phối biên được lựa chọn là phương pháp *Giá trị vượt ngưỡng* (Peak over Threshold - POT) sử dụng phân phối Pareto tổng quát (Generalized Pareto - GPD) do mô hình này phù hợp với các dạng bài toán liên quan đến tính toán cực trị và đã được chứng minh là phù hợp nhiệt độ trên công trình cầu [16-18]. Các tham số của phân phối Pareto tổng quát bao gồm ngưỡng (threshold), u , dạng (shape), σ , và tỷ lệ (scale), ξ . Các tham số này được xác định dựa trên các tiêu chí về độ phù hợp của mô hình và dữ liệu. Các kết quả tính toán tham số của T_u và T_g cho mặt cắt gần gối của các cầu Vĩnh Thịnh, Quán Hàu và Gò Găng được thể hiện trên Bảng 2. Các tham số này đã được kiểm tra bằng các chuẩn Anderson-Darling và Cramer-von Mises với giá trị p-value lớn hơn 0,13 để đảm bảo có giá trị thống kê. Cực trị ứng với xác suất vượt $p=0,02$ và 0,01 ứng với chu kỳ trở lại là 50 năm và 100 năm cho các thành phần kể trên cũng được tính toán và liệt kê trong Bảng 2. Chu kỳ trở lại 50 năm ứng với TCVN 13594:2022 (Euro Code 1) và chu kỳ 100 năm cho các công trình cần mức độ an toàn cao hơn và cũng ứng với AASHTO LRFD, như được nêu trong [7].

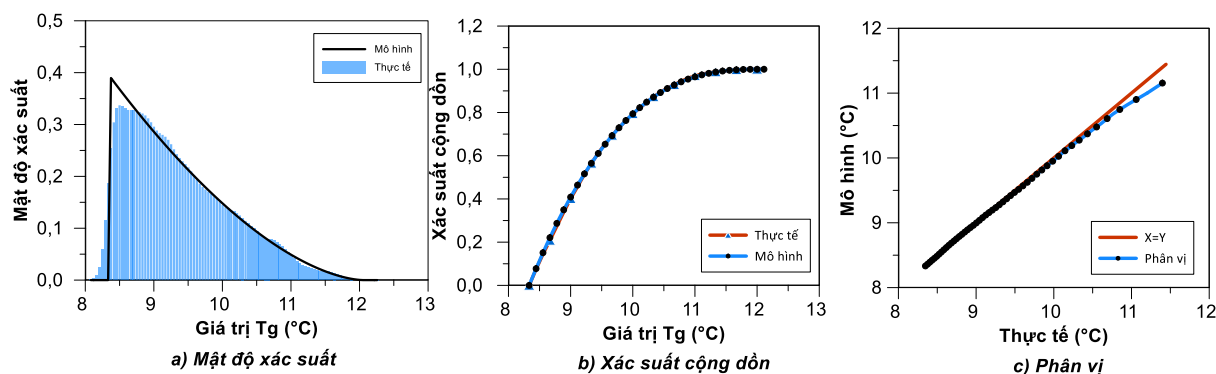
Bảng 2. Tham số của hàm phân phối Pareto tổng quát cho T_u và T_g của mặt cắt gối của các cầu đã quan trắc.

	Ngưỡng (u)	Dạng (σ)	Tỷ lệ (ξ)	Cực trị với $p=0,02$	Cực trị với $p=0,01$
Vĩnh Thịnh – T_u	36	0,80	-0,25	38,89	38,94
Vĩnh Thịnh – T_g	5,56	0,46	-0,25	7,60	7,61
Quán Hàu – T_u	34	1,10	-0,37	38,72	38,73
Quán Hàu – T_g	9,44	2,92	-0,48	12,77	12,78
Gò Găng – T_u	33	0,80	-0,25	35,69	35,70
Gò Găng – T_g	8,33	0,95	-0,33	12,09	12,11



Hình 5. So sánh sự phân phối của dữ liệu theo mô hình GPD và dữ liệu quan trắc của T_u ở mặt cắt gần gối, cầu Gò Găng.

Hình 5 và Hình 6 so sánh dự phân bố dữ liệu quan trắc và dữ liệu theo mô hình GPD cho T_u và T_g của mặt cắt gần gối ở cầu Gò Găng. Có thể thấy rằng, mô hình GPD khá phù hợp để mô tả dữ liệu cực trị của hai tập dữ liệu này.



Hình 6. So sánh sự phân phối của dữ liệu theo mô hình GPD và dữ liệu quan trắc của T_g ở mặt cắt gần gôi, cầu Gò Gông.

b. Lựa chọn mô hình copula

Mô hình copula phù hợp cho các tập dữ liệu phụ thuộc vào mức độ phụ thuộc cực trị hay phụ thuộc đuôi. Trong nghiên cứu này, mức độ phụ thuộc cực trị của các tập dữ liệu được định lượng qua các tham số χ , $\bar{\chi}$ và η ở mức 1% dữ liệu cao nhất. Bảng 3 cung cấp kết quả tính toán các hệ số này cho các cặp dữ liệu T_u và T_g ở các cầu đang được quan trắc nhiệt độ dựa trên các gói phân tích thống kê *mev* [19], *POT* [20], *exTremes* [21] trong ngôn ngữ R. Số liệu trong bảng này cho thấy, cả 3 cặp dữ liệu đều có tính phụ thuộc đuôi cao.

Bảng 3. Các hệ số phụ thuộc cực trị của các cặp dữ liệu T_u & T_g .

Cặp dữ liệu T_u & T_g	χ	$\bar{\chi}$	η
Vĩnh Thịnh	0,62	0,83	0,92
Quán Hầu	0,63	0,82	0,91
Gò Gông	0,45	0,70	0,85

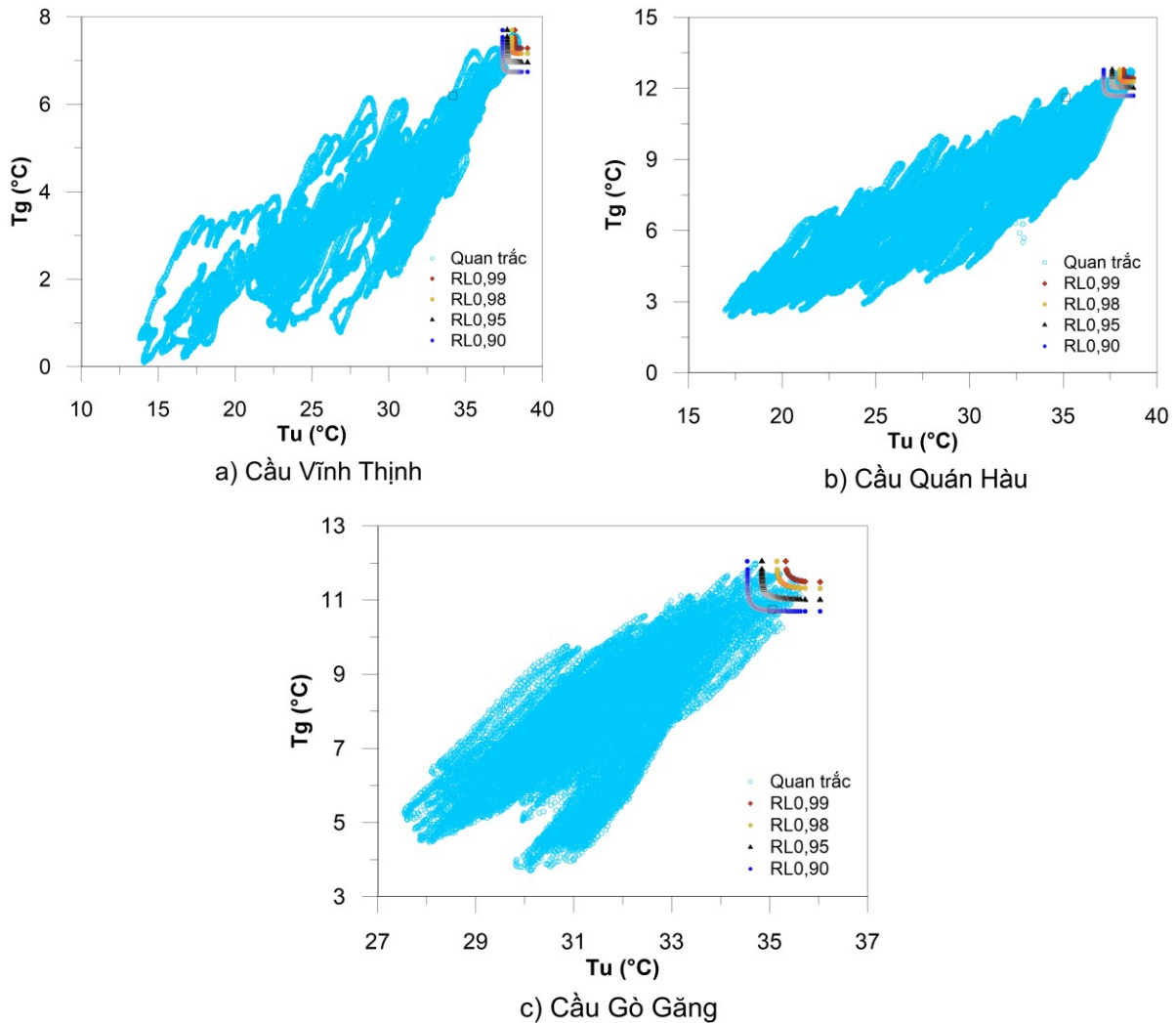
Các mô hình copula cho các cặp dữ liệu T_u và T_g được lựa chọn dựa trên các hàm tối ưu được cung cấp trong các gói *copula* [22] và *VineCopula* [23] của R. Theo đó, cặp T_u và T_g cho cầu Vĩnh Thịnh và cầu Quán Hầu được tính toán bằng mô hình *Gumbel copula*, trong khi đó, cho cầu Gò Gông là *Tawn copula*. Các tham số chính của các mô hình copula này được liệt kê trong Bảng 4. Trong đó, θ là tham số kiểm soát mức độ phụ thuộc tổng quát giữa hai tập dữ liệu (hai biến) được xem xét. $\theta = 1$ khi 2 biến độc lập và θ càng lớn thể hiện sự phụ thuộc giữa chúng càng mạnh. Giá trị θ ở cả 3 mô hình đều lớn chứng tỏ các cặp T_u và T_g đều có tính phụ thuộc tương đối mạnh đến mạnh. δ phản ánh sự bất đối xứng của 2 cặp dữ liệu. Với $\delta = 0,77$, cặp T_u và T_g ở cầu Gò Gông được dự đoán có tính phụ thuộc mạnh hơn ở đuôi trên (upper tail) so với đuôi dưới (lower tail). τ là thước đo mức độ phụ thuộc giữa hai tập dữ liệu, có giá trị trong khoảng $[-1, 1]$. τ càng gần 1, sự phụ thuộc của 2 biến càng lớn. Ở đây, cả 3 cặp dữ liệu đều có τ khá lớn, đặc biệt là ở cầu Vĩnh Thịnh và cầu Quán Hầu, thể hiện mức độ phụ thuộc khá mạnh giữa T_u và T_g . Giá trị τ cũng giải thích tính phù hợp của mô hình *Gumbel copula* cho các cặp dữ liệu ở cầu Vĩnh Thịnh và cầu Quán Hầu và mô hình *Tawn copula* cho cặp dữ liệu ở cầu Gò Gông.

Bảng 4. Tham số của mô hình copula.

Cặp dữ liệu T_u & T_g	Mô hình copula	θ	δ	τ
Vĩnh Thịnh	Gumbel	2,68	-	0,66
Quán Hầu	Gumbel	3,68	-	0,73
Gò Gông	Tawn	2,71	0,77	0,52

c. Tính toán giá trị trở lại song biến

Theo mô hình copula, giá trị trở lại song biến được xác định với xác suất hay chu kỳ trở lại cho trước. Trong nghiên cứu này, giá trị trở lại song biến cho xác suất trở lại bằng 0,1; 0,05; 0,02 và 0,01 tương ứng với chu kỳ trở lại 10 năm, 20 năm, 50 năm và 100 năm được tính toán. Để minh họa, các đường “đồng mức” giá trị trở lại song biến (bivariate return level curves) cho các cặp T_u và T_g cho các cầu Vĩnh Thịnh, Quán Hàu và Gò Găng được thể hiện trên Hình 7.



Hình 7. Phân bố dữ liệu và giá trị trả về song biến cho T_u và T_g ở: (a) cầu Vĩnh Thịnh, (b) cầu Quán Hàu và (c) cầu Gò Găng.

Đường đồng mức giá trị trở lại song biến của các cặp dữ liệu T_u và T_g với chu kỳ trở lại 50 năm và 100 năm cho 3 cầu đang được quan trắc được thể hiện trên Hình 8 và Hình 9. Các điểm được đánh dấu o trên hình ứng với các cặp dữ liệu mà tổng của chúng là lớn nhất. Bảng 5 so sánh giá trị trở lại song biến T_u và T_g để cho tổng của chúng lớn nhất và cực trị biên tương ứng với các chu kỳ trở lại 50 năm và 100 năm. Có thể thấy rằng, khi tổng song biến T_u và T_g lớn nhất, T_u và T_g bằng khoảng 94% đến 100% cực trị biên. Hay, nói cách khác, trên các cầu đang được quan trắc, với chu kỳ lặp lại 100 năm, các cực trị của T_u và T_g gần như xảy ra đồng thời. Hệ số tổ hợp cho T_u và T_g , do đó, có thể được lấy bằng 1 mà không quá

thiên về an toàn, nghĩa là

$$T_k = \gamma_{Tu} T_u + \gamma_{Tg} T_g \quad (4)$$

Với $\gamma_{Tu} = \gamma_{Tg} = 1$, T_u và T_g lần lượt là cực trị biên của nhiệt độ đều dương và gradient nhiệt đứng dương.

Ví dụ áp dụng cho cầu Gò Găng với xác suất vượt 0,02 hay chu kỳ trở lại 50 năm:

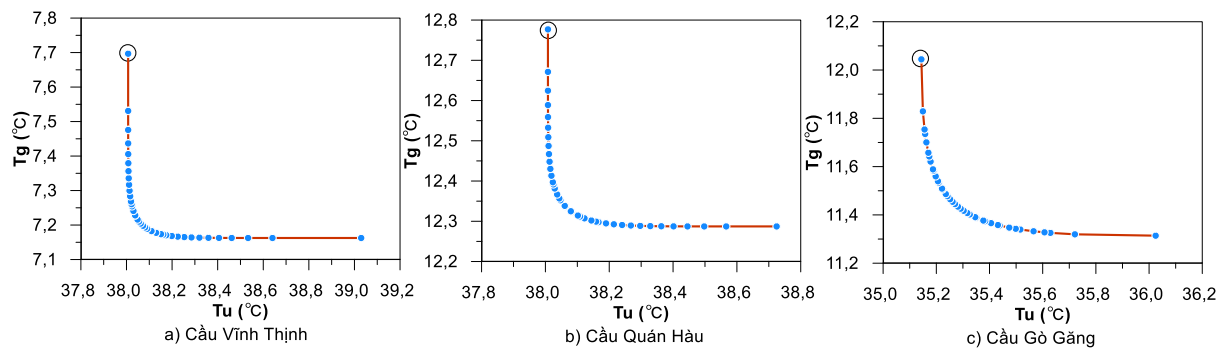
- Tính theo 13594-3: 2022 (Euro Code 1)

$$\begin{aligned} T_k &= \max \left\{ \begin{aligned} &\Delta T_M + \omega_N \Delta T_N \\ &\omega_M \Delta T_M + \Delta T_N \end{aligned} \right\} \\ &= \max \left\{ \begin{aligned} &12,09 + 0,35 \times 35,69 \\ &0,75 \times 12,09 + 35,69 \end{aligned} \right\} \\ &= 44,75 \text{ } ^\circ C \end{aligned}$$

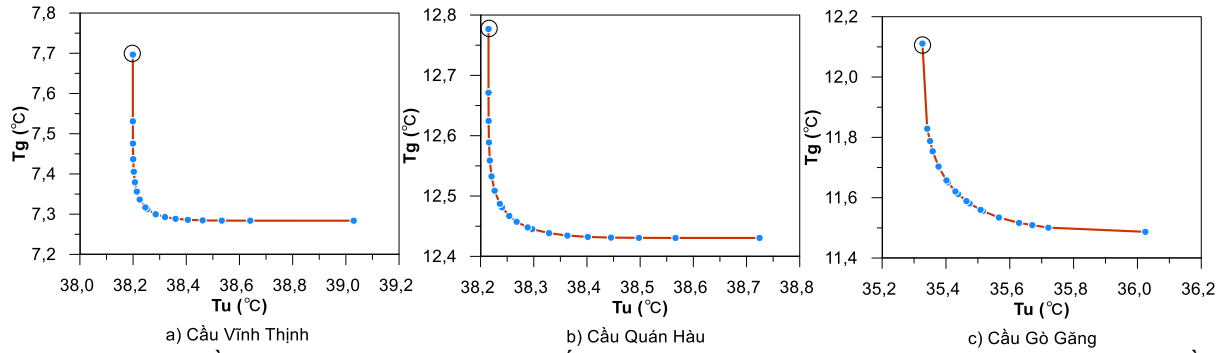
- Tính theo công thức đề xuất

$$\begin{aligned} T_k &= \gamma_{Tu} \Delta T_M + \gamma_{Tg} \Delta T_N \\ &= 1 \times 12,09 + 1 \times 35,69 \\ &= 47,78 \text{ } ^\circ C \end{aligned}$$

Do TCVN 11823-3:2017 và AASHTO LRFD không xét tổ hợp tác động đồng thời nên không được so sánh trực tiếp ở đây.



Hình 8. Đường đồng mức giá trị trở lại song biến T_u và T_g ứng với chu kỳ trở lại 50 năm của: (a) cầu Vĩnh Thịnh, (b) cầu Quán Hàu và (c) cầu Gò Găng.



Hình 9. Đường đồng mức giá trị trở lại song biến T_u và T_g ứng với chu kỳ trở lại 100 năm của: (a) cầu Vĩnh Thịnh, (b) cầu Quán Hâu và (c) cầu Gò Găng

Bảng 5 So sánh giá trị trở lại song biến T_u và T_g với cực trị biên tương ứng.

T_u & T_g	Chu kỳ trở lại 50 năm			Chu kỳ trở lại 100 năm		
	Giá trị khi tổng song biến lớn nhất (T_{50_max})	Cực trị biên (T_{50_b})	Tỷ lệ T_{50_max}/T_{50_b}	Giá trị khi tổng song biến lớn nhất (T_{100_max})	Cực trị biên (T_{100_b})	Tỷ lệ T_{100_max}/T_{100_b}
Cầu Vĩnh Thịnh						
Tu	38,89	38,89	1	38,94	38,94	1
Tg	7,17	7,60	0,94	7,28	7,61	0,95
Cầu Quán Hâu						
Tu	38,00	38,72	0,98	38,20	38,73	0,98
Tg	12,76	12,77	1	12,78	12,78	1
Cầu Gò Găng						
Tu	35,14	35,69	0,98	35,32	35,70	0,99
Tg	12,03	12,09	1	12,11	12,11	1

5. KẾT LUẬN

Trong tính toán, thiết kế, tác động nhiệt lên các kết cấu xây dựng thường được chia thành nhiệt độ đều và gradient nhiệt. Các thành phần này được tổ hợp thành một tác động duy nhất hoặc xem xét riêng biệt trong các tổ hợp tải trọng của các trạng thái giới hạn. Các tiêu chuẩn thiết kế khác nhau khuyến cáo các hệ số tổ hợp khác nhau. Tiêu chuẩn TCVN 11823-3:2017 và AASHTO LRFD 2007 xem xét thành phần nhiệt độ đều và gradient nhiệt một cách riêng rẽ theo các tổ hợp tải trọng khác nhau. Trong khi đó, TCVN 13594-3:2022 và Euro Code 1 lại xem xét tổ hợp tác động của chúng với các hệ số tổ hợp nhất định.

Dựa trên việc phân tích số liệu quan trắc thực tế, giá trị nhiệt độ đều và gradient nhiệt cho ba dầm cầu bê tông cốt thép có mặt cắt dạng hộp ở ba vùng địa lý khác nhau ở nước ta đã được tính toán. Các phân phối biên cho từng biến nhiệt độ đều và gradient nhiệt được mô tả bằng mô hình phân phối Pareto tổng quát cho (GPD). Dựa trên các phân phối biên này, các cực trị của từng thành phần ứng với các chu kỳ trở lại sẽ được tính toán. Để tính toán tác động đồng thời của cả 2 thành phần nhiệt độ đều và gradient nhiệt các mô hình copula đã được lựa

chọn dựa trên các tiêu chí về tính phù hợp đặc biệt là tính phụ thuộc đuôi.

Kết quả tính toán cho thấy, với chu kỳ trở lại 50 năm và 100 năm, các cực trị của nhiệt độ đều dương và gradient nhiệt dương theo phương đứng có xu hướng xảy ra gần như đồng thời. Nghĩa là, ở cùng mức xác suất, khi một giá trị đạt cực trị, giá trị còn lại cũng gần như đạt cực trị.

Điều này dẫn đến hệ quả là, khi cần xét tác động đồng thời của hai thành phần nhiệt độ đều dương và gradient nhiệt dương theo phương, hệ số tổ hợp tải trọng đều có thể lấy bằng 1,0 mà không quá thiên về an toàn theo công thức sau.

$$T_k = \gamma_{Tu} T_u + \gamma_{Tg} T_g$$

Với $\gamma_{Tu} = \gamma_{Tg} = 1$, T_u là nhiệt độ đều dương và T_g là gradient nhiệt đứng dương.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Ngô Đăng Quang, Nguyễn Huy Cường, Mai Đình Lộc, Đinh Hữu Tài, Lê Minh Cảnh, Quan trắc sự biến thiên nhiệt độ và mô phỏng ảnh hưởng của chúng đến sự phân bố ứng suất trong một số cầu dầm hộp bê tông cốt thép ở giai đoạn khai thác, Tạp chí Khoa học Giao thông vận tải, 73.3 (2022).
- [2]. TCVN 13594-3: 2022, Thiết kế cầu đường sắt khổ 1435 mm, vận tốc đến 350 km/h, Phần 3: Tải trọng và tác động.
- [3]. TCVN 11823-3:2017, Thiết kế cầu đường bộ, Phần 3: Tải trọng và tác động.
- [4]. AASHTO, AASHTO LRFD Bridge Design Specifications, SI Units, 4th Edition, 2007.
- [5]. BSI, BS EN 1991-1-5:2003, Eurocode 1: Actions on Structures – Part 1-5: General Actions – Thermal Actions, British Standards Institution, 2003.
- [6]. J. He, H. Xin, Y. Wang, J.A.F.O. Correia, Effect of temperature loading on the performance of a prestressed concrete bridge in Oklahoma: probabilistic modelling, Structures, 34 (2021) 1429-1442. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.08.007>
- [7]. Q. Chen, Effects of thermal loads on texas steel bridges, PhD. Dissertation, The University of Texas at Austin, 2008.
- [8]. C.J. Turkstra, Theory of structural safety, SM Study No. 2, Solid Mechanics Division, University of Waterloo, Waterloo, Ontario, 1970.
- [9]. D.Q. Ngo, H.C. Nguyen, Monitoring and analysis of temperature distribution in reinforced concrete bridge box girders in Vietnam, Case Studies in Construction Materials, 20 (2024) e02857. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2024.e02857>.
- [10]. A. Dutfoy, S. Parey, N. Roche, Multivariate Extreme Value Theory – A tutorial with applications to hydrology and meteorology, Dependence Modeling, 2 (2014) 30–48.
- [11]. J. Beirlant, Y. Goegebeur, J. Teugels, Statistics of extremes – theory and applications, John Wiley & Sons, Ltd., Chichester, 2004.
- [12]. A. Tilloy, B.D. Malamud, H. Winter, A. Joly-Laugel, Evaluating the efficacy of bivariate extreme modelling approaches for multi-hazard scenarios, Natural Hazards and Earth System Sciences, 20 (2020) 2091–2117.
- [13]. S. Coles, J. Heffernan, J. Tawn, Dependence measures for extreme value analyses. Extremes, 2 (1999) 339–365. <https://doi.org/10.1023/A:1009963131610>
- [14]. S. Coles, J.E. Heffernan, J.A. Tawn, Dependence Measure for Extreme Value Analyses, Extremes, 12 (1999) 25–41.
- [15]. Trần Thanh Thủy, Trần Thực, Huỳnh Thị Lan Hương, Nguyễn Xuân Hiền, Lê Văn Tuấn, Nguyễn

Thành Công, Ứng dụng Copula trong xác định phân bố đồng thời đa thiên tai do bão kèm mưa lớn và mưa sau bão, Tạp chí Khoa học Biến đổi Khí hậu, 14 (2020) 6.

[16].F. Zheng, S. Westra, M. Leonard, S.A. Sisson, Modeling Dependence between Extreme Rainfall and Storm Surge to Estimate Coastal Flooding Risk, Water Resources Research, 50 (2014) 2050–2071. <https://doi.org/10.1002/2013WR014616>

[17].G.D. Zhou, T.H. Yi, B. Chen, H. Zhang, A generalized pareto distribution-based extreme value model of thermal gradients in a long-span bridge combining parameter updating, Advances in Structural Engineering, 20 (2016) 1–12. <https://doi.org/10.1177/1369433216660010>

[18].Y. Ren, Z. Zhu, Z. Fan, Q. Huang, Estimation of extreme cable forces of cable-stayed bridges based on monitoring data and random vehicle models, Advances in Civil Engineering, 11 (2021) 1-15. <https://doi.org/10.1155/2021/8897427>.

[19].CRAN: Package mev (<https://cran.r-project.org/web/packages/mev/index.html>)

[20].CRAN: Package POT (<https://cran.r-project.org/web/packages/POT/index.html>)

[21].CRAN: Package extRemes (<https://cran.r-project.org/web/packages/extRemes/index.html>)

[22].CRAN: Package copula (<https://cran.r-project.org/web/packages/copula/index.html>)

[23].CRAN: Package VineCopula (<https://cran.r-project.org/web/packages/VineCopula/index.html>)