

Mô hình xác định khả năng chịu xoắn dầm bê tông cốt thép được gia cường bằng tấm FRP bọc ngoài

Nguyễn Vĩnh Sáng^{1*}, Nguyễn Anh Dũng¹, Nguyễn Ngọc Thắng¹

¹ Trường Đại học Thủy lợi

TỪ KHOÁ

Mô men xoắn
Cường độ xoắn
Biến dạng hiệu dụng
Góc nghiêng
Mô hình thanh chống-giằng

TÓM TẮT

Các thành phần kết cấu bê tông cốt thép (BTCT), đặc biệt là dầm công xôn, dầm cầu, dầm cong và dầm chịu tải lệch tâm có thể chịu tải xoắn đáng kể. Đã có nhiều nghiên cứu sâu rộng về việc gia cường kết cấu BTCT và tấm polyme cốt sợi (FRP) được sử dụng phổ biến để gia cường kết cấu chịu xoắn. Do đó, một số hướng dẫn thiết kế khả năng chịu xoắn cho kết cấu BTCT được tăng cường bằng vật liệu FRP bọc ngoài dựa trên lý thuyết giàn cân bằng như như fib Bulletin 90, NCHRP Report 655 và CNR-DT 200/2013. Hai thông số ảnh hưởng đáng kể đến dự báo khả năng chịu xoắn gồm biến dạng hiệu dụng và góc nghiêng của vết nứt chính bê tông cũng được đề cập. Tuy nhiên, sự không đồng thuận giữa các tiêu chuẩn và hướng dẫn kỹ thuật hiện hành trong việc xác định biến dạng hiệu dụng. Bên cạnh đó, góc nghiêng dựa trên các tiêu chuẩn và hướng dẫn kỹ thuật được quy định cho kết cấu BTCT chịu xoắn. Một mô hình chống-giằng được đề xuất trong nghiên cứu này được sử dụng để tính toán góc nghiêng này. Để đánh giá các phương pháp thiết kế trong các tiêu chuẩn và hướng dẫn kỹ thuật, 35 mẫu thử được gia cường bằng CFRP và GFRP được thu thập trong các nghiên cứu thực nghiệm trước đây. Kết quả tính toán cho thấy mô hình tính toán theo các tiêu chuẩn và hướng dẫn kỹ thuật kết hợp với phương pháp chống - giằng thiên về an toàn trong dự báo khả năng chống xoắn.

KEYWORDS

Torque
Torsional strength
Effective strain
Incline angle
Strut - and - tie model

ABSTRACT

Reinforced concrete (RC) structural members, especially cantilever beams, bridge girders, curved beams, and eccentrically loaded beams, may be subjected to significant torsional loading. Although extensive research has been done on the strengthening of RC structures, fiber-reinforced polymer (FRP) laminates are commonly used to strengthen torsional structures. Therefore, some torsional design guidelines for RC structures strengthened with external FRP sheets were based on the equilibrium truss theory, such as fib Bulletin 90, NCHRP Report 655, and CNR-DT 200/2013. Two parameters that significantly influence the prediction of torsional capacity, namely the effective strain and the inclination angle of the main concrete crack, were also mentioned. However, there was no consensus among current standards and technical guidelines in determining the effective strain. In addition, the inclination angle was prescribed based on standards and technical guidelines for RC structures subjected to torsion. A strut-and-tie model proposed in this study was used to calculate this inclination angle. To evaluate the design methods in the standards and technical guidelines, 35 specimens strengthened with CFRP and GFRP sheets were collected in previous experimental studies. The calculation results showed that the calculation model, according to the standards and technical guidelines combined with the strut-and-tie method, was conservative in predicting the torsional resistance.

1. Giới thiệu

Trong những thập kỷ gần đây, việc sửa chữa và gia cường cho các công trình nhà và cầu bê tông cốt thép (BTCT) ngày càng trở nên phổ biến. Tuy nhiên, sự phát triển nhanh chóng của đường bộ và đường sắt, cải thiện công năng trong các tòa nhà, sự cải tiến các tiêu chuẩn thiết kế hiện hành, thi công xây dựng xảy ra sự cố, ăn mòn cốt thép, công tác bảo trì và bảo dưỡng công trình không đúng quy cách tạo nên nhu cầu cải thiện khả năng chịu lực của kết cấu để tăng tuổi thọ sử

dụng [1]. Các cấu kiện kết cấu BTCT thường được gia cường để tăng khả năng chịu uốn, cắt hoặc nén tùy thuộc vào điều kiện tác động của tải trọng và loại kết cấu. Trong một số trường hợp, các cấu kiện kết cấu BTCT chịu mô men xoắn đáng kể như dầm đỡ ban công, các bản sàn có dạng công xôn, dầm cong, cầu thang xoắn trong công trình dân dụng hoặc các dầm cầu trên đường cong nằm thì khả năng chịu xoắn cần được tăng cường [2]. Theo đó, cần có các phương pháp và quy định thiết kế để tăng cường xoắn cho dầm BTCT.

Có nhiều tiêu chuẩn và hướng dẫn tính toán tấm FRP để tăng cường độ bền của các cấu kiện BTCT nhằm chịu các loại tải trọng khác

*Liên hệ tác giả: sangnv@tlu.edu.vn

Nhận ngày 26/10/2024, sửa xong ngày 24/02/2025, chấp nhận đăng ngày 25/02/2025

Link DOI: <https://doi.org/10.54772/jomc.02.2025.794>

nhau như uốn, cắt, nén dọc trục và động đất [3, 4]. Tuy nhiên, một số ít tiêu chuẩn và hướng dẫn kỹ thuật về dự báo khả năng chịu xoắn khi sử dụng tấm FRP gia cường kết cấu BTCT như fib Bulletin 90 [5], NCHRP Report 655 [6] và CNR-DT 200/2013 [7]. Những hướng dẫn thiết kế này sử dụng biến dạng hiệu dụng của FRP và lý thuyết giàn cân bằng để dự báo khả năng chống xoắn của các dầm được tăng cường. Hơn nữa, khả năng chịu xoắn của cấu kiện được tăng cường bằng tổng khả năng chịu xoắn của thành phần BTCT và đóng góp của FRP bọc ngoài. Trong đó, khả năng chịu xoắn của thành phần BTCT được xác định theo các tiêu chuẩn ACI 318-19 [8], EN 1992-1-1:2004 [9] và AASHTO LRFD [10]. Ngoài ra, tiêu chuẩn thiết kế ACI 440.2R-17 [11] được sử dụng rộng rãi lại không đưa ra hướng dẫn cụ thể về việc tăng cường độ bền xoắn trong thiết kế. Nguyên nhân có thể đến từ việc thiếu thông tin về đặc tính của các phần tử BTCT được gia cường bằng tấm FRP bọc ngoài [3, 4]. Một trong những thông số ảnh hưởng đáng kể đến việc dự báo sự đóng góp vào khả năng chịu xoắn của FRP liên kết bên ngoài đó là biến dạng hiệu dụng của tấm FRP. Theo quy định của ACI 440.2R-17 [11], giá trị này không được vượt quá 0,004 để tránh hiện tượng mất liên kết giữa FRP và cốt liệu bê tông nền. Ngoài ra, góc nghiêng của thanh chống bê tông (vết nứt chính của bê tông do xoắn) là một thông số ảnh hưởng trực tiếp đến kết quả tính toán dự báo khả năng chống xoắn cho cấu kiện BTCT được tăng cường cần được xem xét. Đặc biệt, các tiêu chuẩn hiện hành chưa đưa ra chỉ dẫn cụ thể để xác định góc nghiêng này cho cấu kiện được gia cường bằng FRP bọc ngoài chịu xoắn [5-7]. Giá trị này được khuyến cáo sử dụng trong cấu kiện BTCT chịu xoắn theo các tiêu chuẩn ACI 318-19 [8], EN 1992-1-1:2004 [9] và AASHTO LRFD [10] không xem xét đến ảnh hưởng của FRP. Trong thực tế, các nghiên cứu trước đây đã sử dụng giả thiết góc nghiêng bằng 45° cho cấu kiện chịu xoắn thuần túy để dự đoán đóng góp vào khả năng chịu xoắn của vật liệu composite FRP bọc ngoài [12-15].

Trong nghiên cứu này, trình bày mô hình dự báo khả năng chịu xoắn khi sử dụng tấm FRP gia cường kết cấu BTCT theo các tiêu chuẩn và hướng dẫn kỹ thuật gồm fib Bulletin 90 [5], NCHRP Report 655 [6] và CNR-DT 200/2013 [7]. Mô hình thanh chống - giằng cũng được đề xuất sử dụng trong nghiên cứu này để xác định góc nghiêng bê tông, qua đó đánh giá khả năng chịu xoắn của cấu kiện BTCT được tăng cường bằng vật liệu FRP bọc ngoài. Ba mươi lăm mẫu thử nghiệm của các nghiên cứu trước đây được thu thập, để đánh giá với các mô hình tính toán theo các tiêu chuẩn và hướng dẫn kỹ thuật hiện hành.

2. Mô hình phân tích theo các tiêu chuẩn và hướng dẫn kỹ thuật

Các lý thuyết và thông số kỹ thuật của các tiêu chuẩn hiện hành trong thiết kế khả năng chịu xoắn của dầm BTCT được gia cường bằng FRP bọc ngoài được tóm tắt như sau [16]:

2.1. Theo hướng dẫn fib Bulletin 90 [5]

Các thông số kỹ thuật của fib Bulletin 90 [5] dựa trên các nguyên lý của lý thuyết giàn cân bằng (equilibrium truss theory). Cấu hình duy

nhất được xem xét là cấu hình bọc hoàn toàn theo dài hoặc liên tục dọc theo dọc trục cấu kiện (bọc 4 mặt liên tục xung quanh chu vi tiết diện) theo fib Bulletin 90 [5]. Hơn nữa, các sợi FRP phải được định hướng một góc 90° so với trục dọc của cấu kiện và không giới hạn khoảng cách tối đa của dải FRP [5]. Theo fib Bulletin 90, khả năng chịu xoắn của cấu kiện được gia cường được xác định qua phương trình sau:

$$T_u = \min(T_s + T_f, T_c) \quad (1)$$

trong đó, T_u là khả năng chịu xoắn danh nghĩa của cấu kiện được tăng cường; T_s là khả năng chịu xoắn của cốt thép đai ở giai đoạn tải trọng giới hạn bằng cách giả định rằng cốt thép thép bị chảy dẻo và được tính toán theo EN1992-1-1:2004 [9]; T_f là sức khả năng chịu xoắn của FRP bọc ngoài; và T_c là khả năng chịu xoắn của thanh chống bê tông chịu nén, theo EN 1992-1-1:2004 được xác định như sau:

$$T_c = 2v\alpha_{cw}f'_cA_c t_{eq} \sin \alpha \cos \alpha \quad (2)$$

trong đó, t_{eq} là độ dày thành mỏng hiệu dụng; f'_c là cường độ chịu nén của bê tông; A_c là diện tích mặt cắt ngang; α là góc nghiêng của thanh chống bê tông đối với trục dọc cấu kiện nằm trong khoảng $22^\circ \leq \alpha \leq 45^\circ$ [5]; v là hệ số suy giảm cường độ đối với bê tông bị nứt của thanh chống bê tông chịu nén. Các giá trị đề xuất cho v dựa trên EN 1992-1-1:2004 [9] được đưa ra bởi các phương trình (2) và α_{cw} được lấy bằng 1,0 cho bê tông cốt thép không dự ứng lực. EN 1992-1-1:2004 khuyến nghị rằng độ dày thành mỏng hiệu dụng, t_{eq} nên được lấy là A_c/p_c , trong đó p_c chu vi bên ngoài của mặt cắt ngang [5].

$$v = 0,6[1 - f'_c/250] \quad (3)$$

Đối với cấu kiện có mặt cắt ngang hình chữ nhật, khả năng chịu xoắn đóng góp bởi tấm FRP được bằng biểu thức (4).

$$T_f = \frac{2w_f t_f}{s_f} b h f_{fe} \cot(\alpha) \quad (4)$$

trong đó, w_f và t_f lần lượt là chiều rộng FRP và độ dày hiệu dụng của FRP; s_f là khoảng cách từ đường tâm đến đường tâm của dải FRP dọc theo chiều dài dầm; và f_{fe} là ứng suất kéo hữu hiệu FRP. Giá trị độ dày hữu hiệu của FRP t_f được tính theo số lớp FRP được gia cường trên bề mặt bê tông và được mô tả bởi biểu thức (5). Ứng suất hữu hiệu FRP, f_{fe} phụ thuộc vào sơ đồ tăng cường, và đối với trường hợp sơ đồ bao bọc hoàn toàn, được tính bằng biểu thức (6) [5].

$$t_f = \begin{cases} n t_o K_{hin} = 1,2,3 \\ n^{0,85} t_o K_{hin} \geq 4 \end{cases} \quad (5)$$

$$f_{fe} = K_R a_t f_{fd} \quad (6)$$

trong đó n là số lớp FRP; t_o là chiều dày một lớp FRP; a_t là hệ số tải trọng dài hạn và được khuyến nghị bằng 0,8; K_R là hệ số có tính đến sự phân bố ứng suất không đồng đều trong FRP do sự uốn cong của các sợi ở các góc của mặt cắt ngang và được tính bằng phương trình (7); f_{fd} là cường độ hữu hiệu FRP thiết kế được xác định bằng f_{fu}/γ_{FRP} ; trong đó f_{fu} là cường độ cực hạn của FRP và γ_{FRP} là hệ số an toàn của vật liệu FRP, được xem xét tùy thuộc vào phương pháp ứng dụng của vật liệu FRP và phân loại cấu kiện theo EN 1992-1-1:2004 [9]. Hệ số an toàn này được lấy lần lượt là 1,5 và 1,25 cho các cấu kiện “chính” và “phụ” [5].

$$K_R = \begin{cases} 0,5 \frac{R_c}{50} \left(2 - \frac{R_c}{50}\right) & K_{hi} R_c < 50mm \\ 0,5 & K_{hi} R_c \geq 50mm \end{cases} \quad (7)$$

trong đó R_c là bán kính tại các góc của cấu kiện được bao bọc hoàn toàn.

Ngoài ra, T_s là khả năng chịu xoắn của cốt thép đai theo EN1992-1-1:2004 [9] được xác định bởi phương trình:

$$T_s = \frac{2A_k A_v f_{yt}}{s} \cot \alpha \quad (8)$$

trong đó A_v và f_{yt} tương ứng là diện tích một nhánh đai và cường độ chảy dẻo của cốt thép đai; s là khoảng cách cốt đai; A_k là diện tích phần ống thành mỏng hiệu dụng.

2.2. Theo hướng dẫn kỹ thuật NCHRP Report 655 [6]

Giống như fib Bulletin 90, cấu hình bọc gia cường duy nhất được NCHRP Report 655 cho phép bao bọc hoàn toàn [6]. Theo hướng dẫn này, sức kháng xoắn tính toán T_u đối với cấu kiện được tăng cường được xác định thông qua hệ số giảm cường độ của cho mặt cắt ngang tiết diện ϕ và của FRP là ϕ_{frp} , được thể hiện như sau [6]:

$$T_u = \phi T_e + \phi_{frp} T_f \quad (9)$$

trong đó, hệ số giảm cường độ ϕ và ϕ_{frp} có giá trị không đổi lần lượt là 0,9 và 0,65 theo quy định của NCHRP Report 655 [6]; T_e là khả năng chịu xoắn danh nghĩa của mặt cắt ngang tiết diện được xác định ở Mục 5.8.3.6 theo tiêu chuẩn AASHTO LRFD [10]; và T_f là khả năng xoắn được cung cấp bởi tấm FRP, xác định bởi biểu thức (10) [6].

$$T_f = \frac{N_{frp}^e d_f \alpha_t b h}{s_f} \quad (10)$$

trong đó, d_f là chiều cao hiệu dụng của FRP; N_{frp}^e và α_t là cường độ hiệu dụng trên một đơn vị bề rộng của tấm FRP và hệ số không thử nguyên, được biểu thị bằng các phương trình (11) và (12) [6] tương ứng.

$$f_{fe} = f_{fs} + \frac{1}{2}(f_{fw} - f_{fs}) \quad (11)$$

$$\alpha_t = 0,66 + 0,33 \frac{h}{b} \leq 1,5 \quad (12)$$

trong đó, f_{fs} là cường độ chịu kéo của tấm FRP tương ứng với biến dạng 0,004; f_{fw} là cường độ chịu kéo được lấy bằng giá trị nhỏ nhất của f_{fs} và $0,5f_f$, với f_f là cường độ chịu kéo danh nghĩa của FRP [6].

2.3. Theo tiêu chuẩn thiết kế CNR-DT 200/2013 [7]

Mô hình thiết kế CNR-DT 200/2013 dựa trên các điều kiện cân bằng và được giới hạn trong trường hợp sơ đồ được bao bọc hoàn toàn [7]. Khả năng chịu xoắn của cấu kiện được gia cường biểu thị bằng cường độ tối thiểu của ba thành phần bao gồm cốt thép dọc và cốt thép đai (ngang) cũng như các thanh chống bê tông chịu nén như phương trình (13) dưới đây:

$$T_u = \min(T_s + T_f, T_t, T_c) \quad (13)$$

trong đó, T_s và T_t là khả năng chịu xoắn của cốt thép đai và cốt thép dọc tương ứng, được xác định trong tiêu chuẩn EN1992-1-1:2004 [9]; T_f là khả năng chịu xoắn của FRP và được biểu thị bằng biểu thức (14) [7]. CNR-DT 200/2013 cũng nêu rõ rằng nếu phương trình (14) bị hạn chế bởi khả năng chịu xoắn của T_b , việc gia cường chịu xoắn sẽ không được thực hiện do không đủ khả năng chịu lực theo phương dọc [7].

$$T_f = \frac{1}{\gamma_{rd}} 2f_{fe} t_f b h \frac{w_f}{s_f} \cot(\alpha) \quad (14)$$

trong đó, γ_{rd} là hệ số an toàn ở trạng thái giới hạn được lấy bằng 1,2; α được định trong khoảng từ 22° đến 45°. Ứng suất hiệu dụng của FRP f_{fe} được xác định như sau:

$$f_{fe} = f_{fd} \left[1 - \frac{1}{6} \frac{l_e \sin \beta}{\min(0,9d_f, h)} \right] + \frac{1}{2} (\phi_R f_{fd} - f_{fd}) \left[1 - \frac{1}{6} \frac{l_e \sin \beta}{\min(0,9d_f, h)} \right] \quad (15)$$

trong đó, f_{fd} là cường độ thiết kế của FRP được xác định bởi biểu thức (16); β là góc nghiêng của sợi so với dọc trục cấu kiện; l_e là chiều dài bám dính hiệu quả theo CNR-DT 200/2013: Mục 4; d_f là chiều cao hiệu dụng của tiết diện; ϕ_R là hệ số bán kính góc được tính theo phương trình (17); và f_{fd} là cường độ thiết kế cực hạn của FRP có xét đến hệ số suy giảm cường độ của FRP và ảnh hưởng của môi trường theo CNR-DT 200/2013.

$$\gamma_{fd} = \frac{1}{\gamma_{FRP}} \sqrt{\frac{2E_f \Gamma_{fd}}{t_f}} \quad (16)$$

$$\phi_R = 0,2 + 1,6 \frac{R_c}{b} \quad (17)$$

trong đó, γ_{FRP} lấy bằng 1,10 đối với tấm FRP bọc hoàn toàn theo CNR-DT 200/2013: Mục 5 [7]; E_f là mô đun đàn hồi của FRP; và Γ_{fd} là giá trị thiết kế của năng lượng phá hoại được xác định bởi CNR-DT 200/2013: Mục 4 [7]. Các kết quả thử nghiệm trước đây đã chỉ ra rằng sự hư hỏng của các dải FRP được bọc hoàn toàn không bị chi phối bởi việc bong tách FRP do cơ chế “tiếp xúc tới hạn – contact critical” [7]. Vì vậy, giá trị 1,10 là hợp lý đối với γ_{FRP} đối với cấu hình bọc hoàn toàn của FRP trong gia cường kết cấu.

3. Biến dạng hiệu dụng và góc nghiêng

3.1. Xác định biến dạng hiệu dụng

Một trong những thông số ảnh hưởng trực tiếp đến khả năng tính toán đóng góp vào khả năng chịu xoắn của tấm FRP bọc ngoài là biến dạng hiệu dụng của tấm. Thông số này là chủ đề của nhiều nghiên cứu sâu rộng trong lĩnh vực gia cường FRP do tầm quan trọng của nó [3, 17]. Tuy nhiên, do các nghiên cứu được tiến hành cụ thể về xoắn còn hạn chế nên các hướng dẫn gia cường hiện tại cho các cấu kiện chịu xoắn dựa vào các mối quan hệ được đề xuất cho biến dạng hiệu dụng của FRP chịu cắt. Điều đáng chú ý là thiếu sự đồng thuận về xác định biến dạng hiệu dụng của FRP theo các tiêu chuẩn và hướng dẫn khác nhau fib Bulletin 90 [5], CNR-DT200/2013 [7] và NCHRP report 655 [6].

Sau khi gia cường, các tiêu chuẩn bao gồm một số quy trình và ràng buộc chặt chẽ để đảm bảo tính toàn vẹn về cấu trúc của các phần tử BTCT chịu lực cắt [4]. Sự tương tác giữa bê tông và FRP là yếu tố quan trọng trong việc đánh giá và tối ưu hóa khả năng chịu tải của cấu kiện BTCT. Như đã đề cập ở trên, biến dạng hiệu dụng của sợi FRP là một trong những yếu tố ảnh hưởng đáng kể. Tuân theo ACI 440.2R-17 [11] yêu cầu biến dạng tối đa cho phép đối với các cấu kiện BTCT chịu cắt sử dụng kỹ thuật FRP để gia cường độ không vượt quá 0,004 để ngăn chặn sự bong tách sớm giữa vật liệu liên kết và cốt bê tông nền. Trong khi đó, điều quan trọng cần lưu ý là cả hướng dẫn và thông số kỹ thuật của fib Bulletin 90 [5] và CNR-DT200/2013 chỉ đề cập đến việc sự kháng xoắn cung cấp bởi FRP bọc ngoài, không áp đặt bất kỳ

hạn chế nào đối với giá trị biến dạng hiệu dụng này. Ngoài ra, thông số kỹ thuật của báo cáo NCHRP 655 [6] không xem xét biến dạng gây ra do mất khả năng liên kết của cốt liệu bê tông trong quá trình thiết kế [4]. Trong nghiên cứu này, giá trị biến dạng hiệu dụng của sợi FRP được xác định theo ba tiêu chuẩn và hướng dẫn khác nhau bao gồm fib Bulletin 90 [5], CNR-DT200/2013 [7] và NCHRP report 655 [6]. Bằng cách sử dụng phương trình tính toán ứng suất hiệu dụng (11) và (12) rồi chia cho mô đun đàn hồi của sợi FRP (E_f), thu được biến dạng hiệu dụng này.

3.2. Xác định góc nghiêng theo mô hình chống - giằng

Góc nghiêng của thanh chống bê tông (α) là thông số rất quan trọng ảnh hưởng đáng kể đến khả năng chịu xoắn của cấu kiện BTCT [3, 4]. Góc nghiêng trong trường hợp này tuân thủ các hướng dẫn riêng biệt cho các cấu kiện BTCT dưới tác dụng xoắn thuần túy [8, 9]. Tuy nhiên, tiêu chí để xác định khả năng chống xoắn của các bộ phận BTCT được gia cường và trang bị thêm bằng vật liệu tổng hợp FRP liên kết bên ngoài không chỉ rõ cách xác định góc nghiêng này, đã được trình bày trong nghiên cứu trước đây [3, 4]. Ba tiêu chuẩn thường được sử dụng để xác định ảnh hưởng của vật liệu tổng hợp FRP đến khả năng chịu xoắn của dầm BTCT được gia cường gồm fib Bulletin 90 [5], CNR-DT200/2013 [7] và NCHRP report 655 [6]. Đóng góp của FRP (T_f) vào khả năng chịu xoắn theo tiêu chuẩn và hướng dẫn đều chịu ảnh hưởng trực tiếp bởi góc nghiêng của bê tông (α) [5, 7]. Nhưng tiêu chuẩn NCHRP report 655 [6], theo phương trình (10) không xét đến góc nghiêng và chỉ tập trung vào cấu hình bọc gia cường và biến dạng hiệu dụng của FRP. Ngoài ra, hướng dẫn fib Bulletin 90 [5] và CNR-DT200/2013 [7] được phát triển dựa trên các nguyên tắc được nêu trong ACI 318-19 [8] và EN 1992-1-1:2004 [9] khi xác định góc α . Các tiêu chuẩn này quy định rằng phạm vi góc nghiêng của các cấu kiện BTCT chịu xoắn được giới hạn bởi $1,0 \leq \cot(\alpha) \leq 2,5$. Mặt khác, các khái niệm được quy định trong báo cáo NCHRP 655 tương thích với các thông số kỹ thuật trong tiêu chuẩn cho cầu đường cao tốc AASHTO LRFD [10] để đánh giá khả năng chống cắt và xoắn. Do đó, giá trị chính xác của α cho ước tính bởi báo cáo NCHRP 655 được tính toán và giới hạn với $\cot(\alpha) \leq 1,8$ [10]. Tuy nhiên, trong thiết kế và tính toán thực tế theo nhiều nghiên cứu trước đây góc nghiêng α thường lấy bằng 45° khi tính toán thiết kế theo các tiêu chuẩn này để xác định khả năng chịu xoắn thuần túy cho dầm BTCT được gia cường bằng FRP [12, 17]. Trong nghiên cứu này, mô hình thanh chống - giằng được đề xuất để tính toán góc nghiêng này của dầm BTCT xoắn được gia cường bằng FRP (xem Hình 1). Mô hình này được cấu tạo bởi các thanh chống bê tông theo phương nghiêng, cốt thép dọc và cốt thép đai cũng như FRP bọc ngoài đóng vai trò là thanh chịu kéo theo cả hai phương dọc và đứng. Hai phương trình cân bằng theo phương thẳng đứng và phương ngang được suy ra như sau:

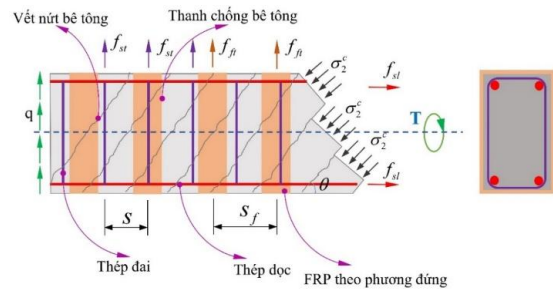
$$\frac{F_{st}}{s} + \frac{F_{ft}}{s_f} = q \tan \alpha \quad (18)$$

$$\frac{F_{sl}}{P_h} + \frac{F_{fl}}{P_h} = q \cot \alpha \quad (19)$$

Chia phương trình (18) cho phương trình (19) ta được $\tan(\alpha)$ dưới đây:

$$\tan \alpha = \frac{\frac{F_{st}}{s} + \frac{F_{ft}}{s_f}}{\frac{F_{sl}}{P_h} + \frac{F_{fl}}{P_h}} \quad (20)$$

trong đó, q là ứng suất trong dòng chảy cắt trong ống thành mỏng tương đương; F_{st} và F_{ft} lần lượt là lực kéo trong cốt đai và tấm FRP theo phương vuông góc với trục dầm; F_{sl} và F_{fl} lần lượt là lực kéo trong cốt thép dọc và tấm FRP theo phương dọc trục của dầm; và P_h là chu vi của dầm tiết diện.



Hình 1. Mô hình thanh chống - giằng cho dầm BTCT gia cường bằng FRP chịu xoắn thuần túy.

4. Đánh giá mô hình

4.1. Dữ liệu thực nghiệm

Tổng cộng có 35 mẫu thử nghiệm được thu thập của các nghiên cứu thực nghiệm được thực hiện trước đây [2, 18-22]. Trong đó có 24 mẫu thử được gia cường bằng tấm CFRP với các cấu hình bọc dài và hoàn toàn, hướng sợi 90° so với dọc trục dầm, các mẫu thử còn lại được gia cường bằng tấm GFRP. Biến dạng hiệu dụng của sợi theo các tiêu chuẩn và hướng dẫn kỹ thuật được tính toán bằng cách sử dụng công thức (11) và (12) chia cho mô đun đàn hồi của sợi FRP (E_f), đã trình bày ở Mục 3.1. Tương tự, góc nghiêng của vết nứt chính bê tông trong nghiên cứu này sử dụng phương pháp chống - giằng để xác định, bằng cách cân bằng lực kéo theo hai phương đứng và dọc thông qua hệ thức (20). Từ đó, việc tính toán khả năng chịu xoắn của các dầm BTCT được tăng cường bằng FRP bọc ngoài theo các tiêu chuẩn và hướng dẫn kỹ thuật trong NCHRP report 655 [6], fib Bulletin 90 [5] và CNR-DT200/2013 [7].

4.2. So sánh kết quả của mô hình và thực nghiệm

Bảng 1 trình bày tóm tắt kết quả tính toán góc nghiêng từ mô hình thanh chống-giằng và kết quả tính toán theo các tiêu chuẩn và hướng dẫn kỹ thuật khác nhau, kết quả được so sánh với nghiên cứu thực nghiệm về cường độ chịu xoắn. Bảng 1 cho thấy góc nghiêng α thu được từ mô hình chống - giằng nằm trong khoảng $36,1^\circ$ đến $62,6^\circ$. Giá trị của góc nghiêng này phụ thuộc vào cấu hình bọc, đặc trưng cơ học của vật liệu FRP sử dụng và số lớp. Ví dụ như mẫu thử C-3V-20 [18] với 3 lớp CFRP cường độ cao, cho góc nghiêng lớn nhất bằng

62,6°; ngược lại mẫu thử G-1V-25 [18] với 01 lớp GFRP có cường độ và mô đun đàn hồi thấp với khoảng cách 250 mm cho góc nghiêng nhỏ nhất là 36,1°. Hơn nữa, góc nghiêng này vẫn đảm bảo trong phạm vi khuyến cáo của các tiêu chuẩn ACI 318-19 [8] và EN 1992-1-1:2004 [9] cho cấu kiện BTCT chịu xoắn.

Bảng 1 cũng cho thấy các mô hình tính toán theo các tiêu chuẩn và hướng dẫn kỹ thuật kết hợp với mô hình thanh chống - giằng trong dự báo khả năng chịu xoắn của cấu kiện dầm BTCT được gia cường bằng vật liệu FRP bọc ngoài thiên về an toàn, thể hiện qua cả ba tiêu chuẩn và hướng dẫn kỹ thuật có ước tính thấp hơn khá nhiều so với kết quả thực nghiệm. Tiêu chuẩn CNR-DT200/2013 [7] có hệ số trung bình thấp nhất so với thực nghiệm cùng độ lệch chuẩn lần lượt là 0,43 và 0,13. Trái lại, theo hướng dẫn kỹ thuật NCHRP report 655 [6] cho hệ số trung bình cao nhất nhưng cũng chỉ đạt 0,58 và độ lệch chuẩn tương ứng là 0,15. Trong khi đó, theo tiêu chuẩn fib Bulletin 90 [5] có hệ số trung bình so với thực nghiệm và độ lệch chuẩn lần lượt là 0,45 và 0,12. Kết quả dự báo thấp hơn thực nghiệm có thể đến từ việc mô hình tính toán của các tiêu chuẩn được đơn giản hóa khi không xét đến hiệu ứng chống nở hông của bê tông do FRP bọc ngoài bao quanh chu vi tiết diện làm tăng khả năng chịu nén của thanh chống bê tông, qua đó làm tăng khả năng chịu xoắn [23].

5. Kết luận

Nghiên cứu đã trình bày mô hình tính toán cường độ chịu xoắn của dầm bê tông cốt thép được tăng cường bằng vật liệu FRP bọc

ngoài dựa trên mô hình giàn cân bằng trong các tiêu chuẩn và hướng dẫn kỹ thuật gồm fib Bulletin 90, NCHRP Report 655 và CNR-DT 200/2013. Mô hình thanh chống - giằng cũng được đề xuất sử dụng để xác định góc nghiêng chính của vết nứt bê tông, qua đó tính toán khả năng chịu xoắn. Tổng cộng có 35 mẫu thử nghiệm của các nghiên cứu thực nghiệm trước đây được thu thập có cấu hình bọc dài và liên tục với hướng sợi 90°, số lớp sợi khác nhau, bằng vật liệu CFRP và GFRP để đánh giá với các mô hình tính toán theo các tiêu chuẩn và hướng dẫn kỹ thuật hiện hành.

Từ kết quả phân tích, một số kết luận được rút ra như sau:

- Mô hình thanh chống - giằng để xác định góc nghiêng của bê tông phụ thuộc vào cấu hình bọc, đặc trưng vật liệu và số lớp sợi. Kết quả tính toán góc nghiêng cho thấy nằm trong khoảng quy định của các tiêu chuẩn hiện hành.
- Mô hình tính toán theo các tiêu chuẩn và hướng dẫn kỹ thuật hiện hành kết hợp với mô hình thanh chống - giằng trong dự báo khả năng chịu xoắn của cấu kiện dầm BTCT được gia cường bằng vật liệu FRP bọc ngoài thiên về an toàn. Tiêu chuẩn CNR-DT200/2013 và fib Bulletin 90 có hệ số trung bình và độ lệch chuẩn tương ứng là 0,43 và 0,13; 0,45 và 0,12. Trái lại, theo hướng dẫn kỹ thuật NCHRP Report 655 cho hệ số trung bình cao nhất, đạt 0,58 và độ lệch chuẩn thu được bằng 0,15.
- Trong các nghiên cứu tương lai, cần xây dựng mô hình xét đến ảnh hưởng của chống nở hông bê tông do FRP bọc ngoài bao quanh chu vi tiết diện, qua đó ước tính khả năng chịu xoắn được chính xác hơn.

Bảng 1. Tóm tắt kết quả tính toán so với thực nghiệm.

Tham khảo	Mẫu thử	Thí nghiệm $T_{u,exp}$ (kN.m)	Góc nghiêng θ (độ)	fib Bulletin 90 [5] (kN.m)		NCHRP 655 [6] (kN.m)		CNR-DT200/2013 [7] (kN.m)	
				$T_{u,cal}$	$T_{u,cal}/T_{u,exp}$	$T_{u,cal}$	$T_{u,cal}/T_{u,exp}$	$T_{u,cal}$	$T_{u,cal}/T_{u,exp}$
Ghobarah và cộng sự [2]	C1	32,1	61,5	13,10	0,41	19,16	0,60	11,60	0,36
	C2	24,93	55,3	12,46	0,50	15,96	0,64	11,50	0,46
	C4	28,27	57,8	12,62	0,45	13,06	0,46	11,46	0,41
	C5	23,96	53,5	12,41	0,52	15,44	0,64	11,59	0,48
Ameli và cộng sự [21]	G1	33,81	58,6	13,93	0,41	19,16	0,57	15,08	0,45
	G2	23,48	57,8	12,57	0,54	17,33	0,74	13,75	0,59
	CFE	28,0	53,1	13,05	0,47	16,45	0,59	11,25	0,40
	CFE2	36,5	61,3	16,20	0,44	19,57	0,54	13,58	0,37
	CFS	21,7	44,9	11,31	0,52	12,13	0,56	10,11	0,47
	GFE	26,3	41,0	10,78	0,41	11,03	0,42	9,52	0,36
	GFE2	31,1	48,8	11,91	0,38	13,24	0,43	9,99	0,32
Chalioris và cộng sự [20]	GFS	19,9	34,8	10,46	0,53	10,88	0,55	9,67	0,49
	Ra-F (1)	4,868	52,9	1,99	0,41	2,66	0,55	1,66	0,34
	Ra-F (2)	6,65	61,9	2,81	0,42	2,96	0,45	2,34	0,35
	Rb-F(1)	10,05	59,0	3,56	0,35	9,41	0,94	2,97	0,30
	Rb-Fs200(1)	9,32	49,6	2,52	0,27	5,31	0,57	2,10	0,23
	Rb-Fs300(1)	7,52	49,6	2,52	0,33	4,85	0,64	2,10	0,28
	B3	8,3	56,4	2,65	0,32	2,40	0,29	1,90	0,23

Tham khảo	Mẫu thử	Thí nghiệm $T_{u,exp}$ (kN.m)	Góc nghiêng θ (độ)	fib Bulletin 90 [5] (kN.m)		NCHRP 655 [6] (kN.m)		CNR-DT200/2013 [7] (kN.m)	
				$T_{u,cal}$	$T_{u,cal}/T_{u,exp}$	$T_{u,cal}$	$T_{u,cal}/T_{u,exp}$	$T_{u,cal}$	$T_{u,cal}/T_{u,exp}$
Hiệu NT và Cường LT [19]	B4	7,9	56,4	2,65	0,33	2,40	0,30	1,90	0,24
	B5	8,4	59,6	2,82	0,34	2,70	0,32	1,94	0,23
	B6	8,5	59,6	2,82	0,33	2,70	0,32	1,94	0,23
Mohammad [22]	CW1	29,48	59,6	15,24	0,52	22,15	0,75	19,31	0,65
	CW2	36,04	59,6	15,24	0,42	22,15	0,61	19,31	0,54
Soluit và cộng sự [18]	G-1V-15	5,5	40,4	3,00	0,55	2,89	0,53	2,88	0,52
	G-1V-20	4,33	37,8	2,97	0,69	2,91	0,67	2,88	0,66
	G-2V-20	5,16	44,5	3,09	0,60	2,99	0,58	2,94	0,57
	G-3V-20	6,39	49,0	3,27	0,51	3,29	0,51	3,08	0,48
	G-1V-25	3,85	36,1	2,97	0,77	2,95	0,77	2,89	0,75
	C-1V-15	6,53	53,2	3,51	0,54	3,79	0,58	2,97	0,46
	C-1V-20	5,5	49,8	3,31	0,60	3,36	0,61	2,85	0,52
	C-2V-20	6,53	58,0	3,91	0,60	4,78	0,73	3,23	0,50
	C-3V-20	7,22	62,6	4,45	0,62	6,41	0,89	3,62	0,50
	C-1V-25	4,68	47,2	3,19	0,68	3,14	0,67	2,79	0,60
Trung bình				0,48		0,58		0,43	
Độ lệch chuẩn (COV)				0,12		0,15		0,13	

Lời cảm ơn

Nguyễn Vĩnh Sáng được tài trợ bởi Chương trình học bổng đào tạo thạc sĩ, tiến sĩ trong nước của Quỹ Đổi mới sáng tạo Vingroup (VINIF), mã số VINIF. 2024.TS.091.

Tài liệu tham khảo

- [1]. Chandan C. Gowda, J. A. O. B., Maurizio Guadagnini. (2019). Experimental study of torsional strengthening on thin walled tubular reinforced concrete structures using NSM-CFRP laminates. *Composite Structures*. 208(15): 585-599. doi:<https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.10.050>
- [2]. Ghobarah, A., M. N. Ghorbel, and S. E. Chidiac. (2002). Upgrading torsional resistance of reinforced concrete beams using fiber-reinforced polymer. *Journal of Composites for Construction*. 6(4): 257-263. doi:[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0268\(2002\)6:4\(257\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0268(2002)6:4(257))
- [3]. Mahshid Abdoli, D. M., Mohamadrza Eftekar, Alireza Saljoughian. (2024). Torsional strengthening of T-shaped RC members with FRP composites using EBROG method: Experimental investigation and analysis. *Construction and Building Materials*. 437: 136829. doi:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.136829>
- [4]. Mahshid Abdoli, D. M., Mohammadreza Eftekar. (2024). Aggregate interlock and effective strain of FRP-strengthened flanged RC members subjected to torsion: Experimental evaluation and analytical modeling. *Construction and Building Materials*. 437: 136865. doi:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.136865>
- [5]. Fib-bulletin-90. (2019). *Externally applied FRP reinforcement for concrete structures*. Lausanne, Switzerland: CEB- FIP.
- [6]. Abdul-Hamid Zureick, B. R. E., Andrzej S. Nowak, Dennis R. Mertz, Thanasis C. Triantafillou. (2010). *Recommended Guide Specification for the Design of*

Externally Bonded FRP Systems for Repair and Strengthening of Concrete Bridge Elements. Transportation Research Board.

- [7]. CNR-DT200/2013. (2013). *Guide for the design and construction of externally bonded FRP Systems for Strengthening Existing Structures*. CNR-DT200. Rome, Italy.
- [8]. ACI-318-19. (2019). *Building code requirements for structural concrete and commentary* American Concrete Institute, Farmington Hills, MI.
- [9]. 1992-1-1:2004, E. (2004). *Design of Concrete Structures, Reinforced Concrete Standards; Reinforced Concrete Construction Standards*. European Committee for Standardization.
- [10]. AASHTO-LRFD. (2014). *Bridge Design Specifications*. American Association of State Highway and Transportation Officials.
- [11]. 440.2R-17. (2017). *Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures*. American Concrete Institute (ACI).
- [12]. Meyyada Y. Alabdulhady, L. H. S., Christian Carloni. (2017). Torsional behavior of RC beams strengthened with PBO-FRCM composite – An experimental study. *Engineering Structures*. 136: 393-405. doi:<https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2017.01.044>
- [13]. Shen, K., S. Wan, Y. Mo, and Z. Jiang. (2017). Theoretical analysis on full torsional behavior of RC beams strengthened with FRP materials. *Compos. Struct*. 183: 347-357. doi:<https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.03.084>
- [14]. Meyyada Y. Alabdulhady, L. H. S. (2019). Analytical Study on the Torsional Behavior of Reinforced Concrete Beams Strengthened with FRCM Composite. *Journal of Composites for Construction*. 23: 2. doi:[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CC.1943-5614.0000927](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000927)
- [15]. Yingbo Zhu, K. S., Alessandro Fascetti, Shui Wan, John C. Brigham, Jundong Fu. (2022). Torsional repair of damaged single-box multi-cell composite box-girder with corrugated steel webs using CFRP. Part II: Theoretical investigation. *Composite Structures*. 301: 116204. doi:<https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2022.116204>

- [16]. Mahshid Abdoli, D. M., Mohamadreza Eftekhari. (2023). Ultimate torsional resistance and failure modes of FRP-strengthened reinforced concrete members: A nonlinear design model. *Engineering Structures*. 283: 115867. doi:<https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2023.115867>
- [17]. Meyyada Y. Alabdulhady, L. H. S. (2019). Torsional strengthening of reinforced concrete beams with externally bonded composites: A state of the art review. *Construction and Building Materials*. 205: 148–163. doi:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.01.163>
- [18]. Ahmed K. Soluit, M. A. M., Khaled M. El-Sayed, Soliman H. Shalaby. (2007). Torsional behavior of RC beams strengthened with fiber reinforced polymer sheets. *Engineering Research Journal*. 114: 102-119.
- [19]. Hiếu, N. T., Cường, L.T. (2018). Experimental study on the strengthening efficiency of reinforced concrete beams under torsion using CFRP sheets. *Khoa học Kỹ thuật và Công nghệ*. 60(3): 30-35.
- [20]. Chalioris, C. E. (2007). Tests and analysis of reinforced concrete beams under torsion retrofitted with FRP strips. *Computational Methods and Experimental Measurements XIII* 46: 633-642. doi:10.2495/CMEM070631
- [21]. Mehran Ameli, H. R. R., Peter F. Dux. (2007). Behavior of FRP strengthened reinforced concrete beams under torsion. *J. Compos. Constr.* 11(2): 192–200. doi:[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0268\(2007\)11:2\(192\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0268(2007)11:2(192))
- [22]. Mohammad Reza Mohammadizadeh, M. J. F. (2008). Torsional Behaviour of High-Strength Concrete Beams Strengthened Using CFRP Sheets; an Experimental and Analytical Study. *Civil Engineering*. 16(4): 321-330.
- [23]. ACI-445.1R-12. (2012). *Report on torsion in structural concrete (ACI 445.1R-12)*. American Concrete Institute, Farmington Hills, MI.

Phụ lục I

Bảng 2. Dữ liệu về BTCT của các mẫu thử trong nghiên cứu trước đây.

Tham khảo	Mẫu thử	b (mm)	h (mm)	f_c' (MPa)	n	$\emptyset_{fl}$ (mm)	f_{yl} (MPa)	$\emptyset_{st}$ (mm)	s (mm)	f_{yt} (MPa)	$T_{u,exp}$ (kN.m)	$T_{RC, control}$ (kN.m)
Ghobarah và cộng sự [2]	C1	150	350	37	4	11,3+16	409	6,32	70	456.8	32,10	19,45
	C2	150	350	37	4	11,3+16	409	6,32	70	456.8	24,93	19,45
	C4	150	350	37	4	11,3+16	409	6,32	70	456.8	28,27	19,45
	C5	150	350	37	4	11,3+16	409	6,32	70	456.8	23,96	19,45
	G1	150	350	37	4	11,3+16	413	6,32	70	567	33,81	19,67
	G2	150	350	37	4	11,3+16	409	6,32	70	456.8	23,48	19,67
Ameli và cộng sự [21]	CFE	150	350	39	4	16	502	6	80	251	28,00	15,00
	CFE2	150	350	39	4	16	502	6	80	251	36,50	15,00
	CFS	150	350	39	4	16	502	6	80	251	21,70	15,00
	GFE	150	350	39	4	16	502	6	80	251	26,30	15,00
	GFE2	150	350	39	4	16	502	6	80	251	31,10	15,00
	GFS	150	350	39	4	16	502	6	80	251	19,90	15,00
Chalioris và cộng sự [20]	Ra-F (1)	100	200	27.5	4	8	560	-	-	-	4,87	2,39
	Ra-F (2)	100	200	27.5	4	8	560	-	-	-	6,65	2,39
	Ra-Fs150(2)	100	200	27.5	4	8	560	-	-	-	3,02	2,39
	Rb-F(1)	150	300	28.8	4	8	560	-	-	-	10,05	2,39
	Rb-Fs200(1)	150	300	28.8	4	8	560	-	-	-	9,32	2,39
	Rb-Fs300(1)	150	300	28.8	4	8	560	-	-	-	7,52	2,39
Hiếu NT và Cường LT [19]	B3	150	200	20	4	10	325	6	100	240	8,30	6,05
	B4	150	200	20	4	10	325	6	100	240	7,90	6,05
	B5	150	200	20	4	10	325	6	100	240	8,40	6,05
	B6	150	200	20	4	10	325	6	100	240	8,50	6,05
Mohammad [22]	CW1	150	350	79,12	4	14	480	8	80	397	29,48	18,71
	CW2	150	350	74.95	4	14	480	8	80	397	36,04	18,71
Soluit và cộng sự [18]	G-1V-15	150	200	30	4	10	398	6	175	290	5,50	2,75
	G-1V-20	150	200	30	4	10	398	6	175	290	4,33	2,75
	G-2V-20	150	200	30	4	10	398	6	175	290	5,16	2,75
	G-3V-20	150	200	30	4	10	398	6	175	290	6,39	2,75
	G-1V-25	150	200	30	4	10	398	6	175	290	3,85	2,75
	C-1V-15	150	200	30	4	10	398	6	175	290	6,53	2,75
	C-1V-20	150	200	30	4	10	398	6	175	290	5,50	2,75
	C-2V-20	150	200	30	4	10	398	6	175	290	6,53	2,75
	C-3V-20	150	200	30	4	10	398	6	175	290	7,22	2,75
	C-1V-25	150	200	30	4	10	398	6	175	290	4,68	2,75

Bảng 3. Dữ liệu về FRP của các mẫu thử trong nghiên cứu trước đây.

Tham khảo	Mẫu thử	Loại FRP	n_f	t_f (mm)	w_f (mm)	s_f (mm)	E_f (GPa)	f_{fu} (MPa)	ε_{fu} (%)	$T_{f,exp}$ (kN.m)
Ghobarah và cộng sự [2]	C1	CFRP	1	0,165	100	100	252	4300	1,63	12,65
	C2	CFRP	1	0,165	100	200	252	4300	1,63	5,48
	C4	CFRP	1	0,165	200	300	252	4300	1,63	8,82
	C5	CFRP	1	0,165	100	250	252	4300	1,63	4,51
	G1	GFRP	1	0,353	100	100	87	1317	1,47	14,14
	G2	GFRP	1	0,353	100	200	87	1317	1,47	3,81
Ameli và cộng sự [21]	CFE	CFRP	1	0,165	100	100	243.8	3943	1,67	13,00
	CFE2	CFRP	2	0,165	100	100	243.8	3943	1,67	21,50
	CFS	CFRP	1	0,165	100	200	243.8	3943	1,67	6,70
	GFE	GFRP	1	0,154	100	100	72.72	3373	2,10	11,30
	GFE2	GFRP	2	0,154	100	100	72.72	3373	2,10	16,10
	GFS	GFRP	1	0,154	100	200	72.72	3373	2,10	4,90
Chalioris và cộng sự [20]	Ra-F(1)	CFRP	1	0,11	100	100	230	3900	1,5	2,48
	Ra-F(2)	CFRP	2	0,11	100	100	230	3900	1,5	4,26
	Ra-Fs150(2)	CFRP	2	0,11	150	300	230	3900	1,5	7,66
	Rb-F(1)	CFRP	1	0,11	100	100	230	3900	1,5	6,93
	Rb-Fs200(1)	CFRP	1	0,11	200	400	230	3900	1,5	5,13
	Rb-Fs300(1)	CFRP	1	0,11	300	600	230	3900	1,5	2,25
Hiếu NT và Cường LT [19]	B3	CFRP	1	0,4	100	200	96.9	1778	1,85	1,85
	B4	CFRP	1	0,4	100	200	96.9	1778	1,85	2,35
	B5	CFRP	1	0,4	100	200	96.9	1778	1,85	2,45
	B6	CFRP	1	0,4	100	200	96.9	1778	1,85	10,86
Mohammad [22]	CW1	CFRP	1	0,176	100	100	240	3800	1,55	17,42
	CW2	CFRP	2	0,176	100	100	240	3800	1,55	2,75
Soluit và cộng sự [18]	G-1V-15	GFRP	1	0,130	100	150	72	2200	1,50	1,58
	G-1V-20	GFRP	1	0,130	100	200	72	2200	1,50	2,41
	G-2V-20	GFRP	2	0,130	100	200	72	2200	1,50	3,64
	G-3V-20	GFRP	3	0,130	100	200	72	2200	1,50	1,10
	G-1V-25	GFRP	1	0,130	100	250	72	2200	1,50	3,78
	C-1V-15	CFRP	1	0,130	100	150	230	3500	1,50	2,75
	C-1V-20	CFRP	1	0,130	100	200	230	3500	1,50	3,78
	C-2V-20	CFRP	2	0,130	100	200	230	3500	1,50	4,47
	C-3V-20	CFRP	3	0,130	100	200	230	3500	1,50	1,93
	C-1V-25	CFRP	1	0,130	100	250	230	3500	1,50	12,65