

NGHIÊN CỨU ẢNH HƯỞNG CỦA CÁNH VÁT GIÓ ĐỐI VỚI ỔN ĐỊNH KHÍ ĐỘNG CỦA DẦM CẦU DÂY VĂNG SỬ DỤNG PHƯƠNG PHÁP PHÂN TÍCH CFD

Nguyễn Tuấn Ngọc^a, Cù Việt Hưng^{b,*}, Phan Nguyên Phương^c,

Vũ Thị Hồng Nhung^d, Trần Tiến Dũng^e

^aCông ty TNHH Freyssinet Việt Nam, 8 đường Tràng Thi, quận Hoàn Kiếm, Hà Nội, Việt Nam

^bKhoa Cầu đường, Trường Đại học Xây dựng, 55 đường Giải Phóng, quận Hai Bà Trưng, Hà Nội, Việt Nam

^cCông ty TNHH Thương mại và Xây dựng dựng Trung Chính, Tầng 3 - Tòa nhà A1&A2,

Tổ hợp văn phòng Vinaconex1, 289A đường Khuất Duy Tiến, quận Cầu Giấy, Hà Nội, Việt Nam

^dCông ty TNHH Tư vấn Đại học Xây dựng, 55 đường Giải Phóng, quận Hai Bà Trưng, Hà Nội, Việt Nam

^eTổng Công ty Tư vấn Thiết kế Giao thông Vận tải – CTCP,

278 đường Tôn Đức Thắng, quận Đống Đa, Hà Nội, Việt Nam

Nhận ngày 01/6/2021, Sửa xong 05/11/2021, Chấp nhận đăng 08/11/2021

Tóm tắt

Vấn đề mất ổn định khí động của cầu dây văng là mối quan tâm lớn của kỹ sư trong thiết kế và phân tích kết cấu. Đối với cầu dây văng, hệ dầm mặt cắt dạng hai chữ I, chữ II hoặc hộp kín được sử dụng phổ biến. Dầm hộp kín có tính chất ổn định khí động tốt trong khi dầm tiết diện chữ II có ưu điểm là cấu tạo đơn giản và dễ thi công nhưng lại kém ổn định khí động hơn. Thông thường, các bộ phận như cánh tà (flaps), cánh vát gió (fairings), tấm cạnh (edge plates), tấm biên (side plates), tấm cản gió (baffle plates) hoặc lưới khí (gratings) được sử dụng để tăng ổn định khí động của tiết diện dầm. Bài báo này nghiên cứu ảnh hưởng của cánh vát gió đối với ổn định khí động của dầm tiết diện chữ II có tỉ lệ chiều rộng so với chiều cao $B/H = 6$ trong cầu dây văng thông qua sử dụng phương pháp mô phỏng động học chất lưu (CFD). Kết quả của nghiên cứu chỉ ra sự phù hợp của cánh vát gió đối với việc nâng cao ổn định khí động của dầm cầu dây văng tiết diện chữ II có $B/H = 6$, qua đó đánh giá và lựa chọn thông số cánh vát gió tối ưu để giảm khả năng xảy ra hiện tượng dao động tròng trành (Flutter).

Từ khoá: cánh vát gió; CFD; dầm cầu; khí động; cầu dây văng; mặt cắt chữ II.

RESEARCH ON EFFECTS OF FAIRINGS ON THE AERODYNAMIC STABILITY OF CABLE STAYED BRIDGE'S GIRDER USING THE CFD ANALYSIS METHOD

Abstract

Aerodynamic instability problems of cable stayed bridges are an important concern of engineers in the design of new bridges. Girder of the cable stayed bridge with two I-beams section or II section or closed box section are often used. The closed box sections have better aerodynamic performance. Although the II sections have the advantages of simple structure and easy construction, however, they do not necessarily have good aerodynamic stability. Commonly, flaps, fairings, edge plates, side plates, baffle plates or gratings are used to improve aerodynamic of cross sections of the cable stayed bridge's girder. In this paper, effects of fairing on aerodynamic characteristics of II section with $B/H = 6$ of cable stayed bridge decks are studied by using Computational Fluid Dynamics (CFD). Results of this study provide necessary insights into the II section deck-fairings system, thereby evaluating and choosing the optimal parameters of fairing in order to control the flutter.

Keywords: fairings; CFD; girder; aerodynamic; cable stayed bridge; II section.

[https://doi.org/10.31814/stce.huce\(nuce\)2022-16\(1V\)-01](https://doi.org/10.31814/stce.huce(nuce)2022-16(1V)-01) © 2022 Trường Đại học Xây dựng Hà Nội (ĐHXDHN)

*Tác giả đại diện. Địa chỉ e-mail: hungcv@nuce.edu.vn (Hưng, C. V.)

1. Giới thiệu

Ngày nay, cùng với sự phát triển của vật liệu, lý thuyết thiết kế và công nghệ thi công, cầu dây văng không ngừng tăng về số lượng và chiều dài nhịp; kết cấu trở nên nhẹ hơn, mềm dẻo hơn và hệ số giảm chấn bản thân ít hơn. Do vậy, cầu dây văng ngày càng dễ bị ảnh hưởng bởi tác động gió gây ra hiện tượng xoắn phân kì (torsional divergence), dao động tròn trành (flutter), dao động rung lắc (buffeting), dao động xoáy khí (vortex) và dao động tiến triển nhanh (galloping). Dao động tròn trành (Flutter) là hiện tượng mất ổn định khí động xảy ra ở các kết cấu dạng tấm mềm như cánh máy bay và dầm cầu [1]. Đây là dạng mất ổn định khí động quan trọng nhất mà kỹ sư trong thiết kế cầu dây văng đặc biệt quan tâm. Việc đánh giá mất ổn định khí động được dựa trên các đại lượng khí động. Lý thuyết tuyến tính hóa các đại lượng khí động đề xuất bởi Scanlan và Tomko [2] được nhiều nhà nghiên cứu sử dụng để đánh giá vận tốc gió giới hạn mà tại đó bắt đầu xảy ra hiện tượng dao động tròn trành [3–6].

Đặc trưng khí động thường được xác định thông qua các thí nghiệm mô hình vật lý trong hầm gió. Tuy nhiên, thí nghiệm hầm gió đòi hỏi giá thành cao, mất rất nhiều thời gian đặc biệt là trong trường hợp phải thay đổi các thông số thiết kế. Do đó, trước khi thực hiện thí nghiệm hầm gió nhằm xác định thông số hình học của kết cấu cầu, cần sử dụng mô hình số để phân tích các đặc trưng khí động học. Kawahara và Hirano [7] là những tác giả đầu tiên sử dụng phương pháp phần tử hữu hạn (Finite Element Method - FEM) để phân tích tính toán tác động gió lên mặt cắt ngang cầu. Kuroda [8] sử dụng phương pháp sai phân hữu hạn (Finite Difference Method - FDM) trong mô hình dòng chất lưu quanh dầm hộp của cầu treo nhịp lớn. Sau đó, mô hình số sử dụng các lý thuyết FEM cũng được nhiều tác giả quan tâm [9–11]. Phần lớn các tác giả này sử dụng phương trình Lagrangian-Eulerian (LE) và phương pháp mô phỏng xoáy lớn (Large Eddy Simulation - LES) vào mô hình của Smagorinsky để áp dụng cho việc mô phỏng dòng chảy rối. Larsen và Walther [12] đã sử dụng các xoáy rời rạc trong không gian hai chiều (2D) để dự đoán đặc trưng khí động của 5 dạng tiết diện cầu.

Phương pháp tính toán động học chất lưu (Computational Fluid Dynamics - CFD) là một nhánh của lĩnh vực động lực học chất lưu, được phát triển từ rất lâu và ứng dụng trong rất nhiều lĩnh vực trên thế giới. Đối với công trình cầu, CFD thường dùng để phân tích và dự đoán các đặc trưng khí động học của tiết diện dầm cầu. Ở Việt Nam, CFD được ứng dụng chủ yếu trong các nghiên cứu thuộc lĩnh vực cơ học chất lưu, thủy khí động lực học trong ngành công nghiệp chế tạo ô tô, công nghiệp chế tạo máy và số ít tác giả sử dụng phương pháp này phân tích khí động học của gió đối với công trình cầu [13–15]. Một số phần mềm phổ biến được sử dụng trong tính toán khí động học cho các công trình cầu lớn cả ở Việt Nam và trên thế giới là Ansys/CFX, Ansys/Fluent, RM Bridge/CFD và Midas/FEA-CFD. Cơ sở lý thuyết của các phần mềm này có sự khác biệt. Nếu như RM Bridge/CFD sử dụng phương pháp phân tích xoáy khí [16, 17], trong đó phân tích xoáy rời rạc là sử dụng phương pháp Lagrange để giải phương trình Navier-Stokes trong không gian 2D cho dòng chất lưu [18]; thì Midas/FEA-CFD phân tích dòng chảy hai chiều trong một lưới phần tử được sắp xếp với phương trình RANS (Reynolds average Navier-Stokes) thu được từ việc trung bình hóa Favre phương trình Navier-Stokes [19]. Hiện nay, CFD có thể được xem xét thay thế cho phương pháp thí nghiệm hầm gió đối với cầu dây văng nhịp không quá lớn vì tính ưu việt cao, chi phí thấp, cần thời gian mô phỏng tính toán ngắn nhưng cho kết quả tương đối chính xác; và đối với cầu dây văng nhịp lớn, CFD giúp lựa chọn thông số thiết kế ban đầu trước khi thí nghiệm hầm gió. Bởi vậy, CFD còn được gọi là phương pháp “hầm gió số”.

Hệ dầm cầu dây văng với tiết diện dạng hai chữ I, dạng chữ II hoặc dạng hình hộp kín thường được sử dụng, trong đó tiết diện hộp kín có khả năng ổn định khí động tốt hơn cả [12]. Mặc dù tiết diện hai chữ I và tiết diện chữ II có cấu tạo đơn giản và dễ thi công hơn nhưng lại kém ổn định khí động học.

Thông thường, các bộ phận như cánh tà (flaps), cánh vát gió (fairings), tấm cạnh (edge plates), tấm biên (side plates), tấm cản gió (baffle plates) hoặc lưới khí (gratings) được sử dụng để tăng ổn định khí động của tiết diện [20]. Một hệ thống tăng ổn định khí động bao gồm sự bổ sung cánh tà bị động được gắn vào cạnh dầm cầu đã được nghiên cứu bởi Omenzetter, Wilde và cs. [21–24]. Việc nghiên cứu các cấu kiện trên bề mặt cầu như rào chắn và/hoặc mép cầu đã được đề xuất bởi Kwon và Chang [25] để kiểm soát hiện tượng dao động tròn xoay và phản ứng của kết cấu dầm cầu do gió giật. Hiệu quả của việc sử dụng khoảng trống giữa 2 dầm của tiết diện chữ Π với mục đích tăng khả năng ổn định khí động đã được đánh giá bởi Lopes, Gomes và cs. [26].

Trong bài báo này, đặc trưng khí động của dạng tiết diện chữ Π có tỉ lệ chiều rộng với chiều cao $B/H = 6$ và hiệu quả tăng khả năng ổn định khí động của tiết diện chữ Π này bằng cánh vát gió (fairings) được nghiên cứu thông qua phương pháp tính toán động học chất lưu (CFD) hỗ trợ bởi phần mềm Midas/ FEA. Các thành phần lực dao động được phân tích để dự đoán đặc trưng mất ổn định khí động của tiết diện cầu trong trường hợp có và không sử dụng cánh vát gió. Kết quả của nghiên cứu này cho thấy hiệu quả của cánh vát gió đối với hệ dầm cầu tiết diện chữ Π có $B/H = 6$ trong việc kiểm soát hiện tượng dao động tròn xoay.

2. Cơ sở lý thuyết

Để xác định chuyển động của dầm cầu chịu tải trọng gió, cần định lượng các thành phần lực gió tác động lên dầm cầu. Với bài toán phẳng trong không gian 2D, các thành phần lực bao gồm lực cản (theo hướng gió thổi), lực nâng (vuông góc với hướng gió) và mô men gây xoắn tiết diện. Đại diện cho độ lớn các thành phần lực tác động này là các hệ số lực khí động tương ứng. Các hệ số này phụ thuộc vào dạng hình học của tiết diện dầm cầu và trạng thái dòng gió thổi đều hay rối được đặc trưng bởi hệ số Reynold. Việc mô phỏng dòng gió thổi đều hay rối trong vùng chia lưới phần tử để từ đó xác định các thông số lực khí động được tiến hành thông qua phương pháp trung bình RANS (Reynolds average Navier-Stokes).

2.1. Số Reynold

Trong cơ học chất lưu, số Reynolds (R_e) là một giá trị không thứ nguyên biểu thị tỷ số giữa lực quán tính và lực cản nhớt [27] được xác định bởi công thức (1) giúp dự đoán các trạng thái dòng chất lưu. Với giá trị của số R_e nhỏ thì dòng chất lưu có xu hướng chảy đều và với giá trị lớn thì dòng có xu hướng rối.

$$R_e = \frac{\rho u d}{\mu} \quad (1)$$

trong đó: ρ là mật độ; u là vận tốc; d là kích thước tiết diện; μ là độ nhớt.

2.2. Phương trình RANS và mô hình dòng rối

Mô hình 2D của tiết diện hệ dầm cầu được phân tích bằng phương pháp CFD dựa trên kết cấu dạng tuyến (line-like structure) với kết quả thu được là các lực khí động gồm lực nâng, lực cản và mô men. Phần mềm Midas FEA phân tích dòng chảy hai chiều trong một lưới phần tử được sắp xếp. Phương trình RANS (Reynolds average Navier-Stokes) thu được từ việc trung bình hóa Favre phương trình Navier-Stokes, dựa trên dòng chảy nhớt có thể nén hai chiều [19]. Trung bình Favre ở đây là mật độ bình quân gia quyền.

Nói một cách khác, phương trình RANS là một phương trình tổng quát cho dòng chảy rối nén và mô hình dòng rối, có thể được biểu diễn bằng một phương trình đơn như sau:

$$\frac{\partial W}{\partial t} + \frac{\partial E}{\partial x} + \frac{\partial F}{\partial y} = \frac{\partial E_v}{\partial x} + \frac{\partial F_v}{\partial y} + S \quad (2)$$

trong đó: W là véc-tơ biến số chất lưu $\{\rho, \rho u, \rho v, e, \rho s_1, \rho s_2\}^T$; E và F là đại diện véc-tơ dòng không nhớt theo hướng x và hướng y tương ứng; E_v và F_v là đại diện véc-tơ dòng nhớt; S là thành phần nguồn của mô hình dòng rối.

$$E = \{\rho u, \rho u^2 + p, \rho uv, (e + p)u, \rho u s_1, \rho u s_2\}^T \quad (3a)$$

$$F = \{\rho v, \rho uv, \rho v^2 + p, (e + p)v, \rho v s_1, \rho v s_2\}^T \quad (3b)$$

$$E_v = \left\{ 0, \tau_{xx}, \tau_{xy}, \Omega_x, (\mu_m + \sigma_{s_1} \mu_t) \frac{\partial s_1}{\partial x}, (\mu_m + \sigma_{s_2} \mu_t) \frac{\partial s_2}{\partial x} \right\}^T \quad (4a)$$

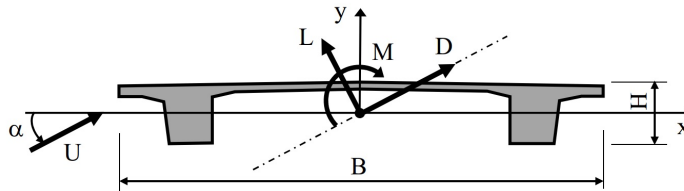
$$F_v = \left\{ 0, \tau_{yx}, \tau_{yy}, \Omega_y, (\mu_m + \sigma_{s_1} \mu_t) \frac{\partial s_1}{\partial y}, (\mu_m + \sigma_{s_2} \mu_t) \frac{\partial s_2}{\partial y} \right\}^T \quad (4b)$$

trong đó: p là áp suất khí; e là tổng năng lượng; τ_{ij} là ứng suất nhớt; Ω_i là tổng năng lượng dòng chảy; μ_m là hệ số nhớt molecular; μ_t là hệ số nhớt rối; s_1 và s_2 là các biến của hai phương trình mô hình dòng rối.

Phần mềm tính toán Midas FEA cung cấp các mô hình dòng rối, đó là mô hình $q-\omega$ của Coakley [28] và mô hình $k-\omega$ BSL(Baseline) hoặc SST (Shear-Stress Transport) của Menter [29]. (k là động năng dòng rối, $q = k^{1/2}$ là tham số cường độ dòng rối, $\omega = \varepsilon/k$ là tỉ số độ nhớt dòng rối và ε là mức độ hao tán động năng rối).

2.3. Hệ số lực khí động

Các lực khí động tác động lên hệ dầm cầu được tổ hợp từ 3 thành phần lực, đó là, lực cản (D), lực nâng (L) và mô men (M). Lực cản, lực nâng và mô men lần lượt là các thành phần lực theo hướng gió, trực hướng với gió và xoay quanh trục cầu [30]. Quy ước các thành phần lực được thể hiện trong Hình 1.



Hình 1. Định nghĩa các thành phần lực khí động

Lực cản, lực nâng và mô men trên một đơn vị dài lần lượt được thể hiện theo công thức [12]:

$$D = \frac{1}{2} \rho U^2 C_D B \quad (5)$$

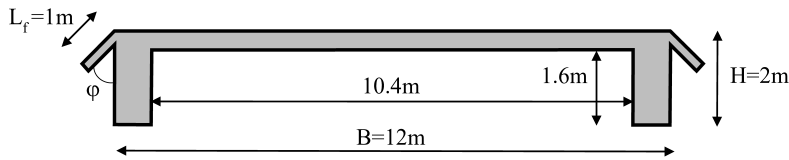
$$L = \frac{1}{2} \rho U^2 C_L B \quad (6)$$

$$M = \frac{1}{2} \rho U^2 C_M B^2 \quad (7)$$

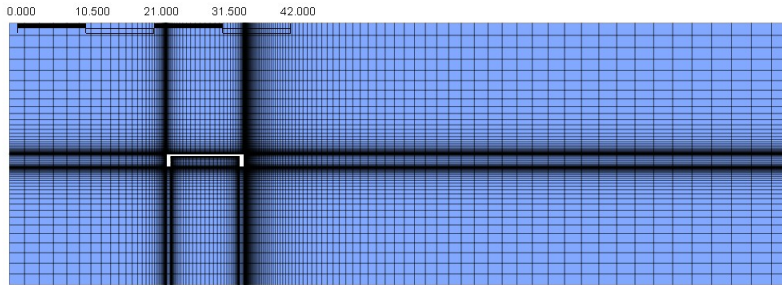
trong đó: ρ là mật độ không khí, U là vận tốc gió trung bình, H là chiều cao dầm và B là bề rộng dầm. C_D , C_L và C_M là các hệ số không thứ nguyên, lần lượt được gọi là hệ số lực cản, hệ số lực nâng và hệ số mô men.

3. Mô hình số cho tiết diện chữ II

Đối tượng được mô hình là vật cản dạng tiết diện chữ II (Hình 2) có tỉ lệ chiều rộng với chiều cao $B/H = 6$, với các kích thước tương tự như tiết diện S1 trong nghiên cứu của Lopes và cs. [26] trừ việc thay đổi bề dày sườn là 0,8 m thay vì 0,5 m. Giá trị góc hợp bởi cánh vát gió và phương đứng được thay đổi $\varphi = 0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ (tương ứng với tiết diện loại 1, 2, 3, 4, 5). Dòng gió thổi có vận tốc $U = 0,2$ m/s, góc gió thổi thay đổi từ -10° đến $+10^\circ$. Số Reynolds được sử dụng để phân tích có giá trị $Re = 0,159E6$. Mô đun tính toán CFD của phần mềm Midas/FEA được sử dụng để mô phỏng tác động gió thổi qua vật cản tiết diện chữ II. Lưới phân tích được mô phỏng dạng cấu trúc như Hình 3.



Hình 2. Tiết diện chữ II trong nghiên cứu

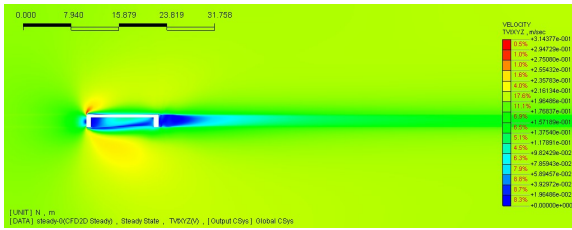


Hình 3. Mô hình chia lưới phần tử mô phỏng CFD tiết diện chữ II

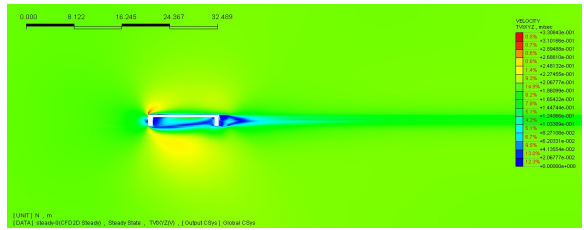
4. Kết quả phân tích mô hình

4.1. Phân tích ổn định khí động

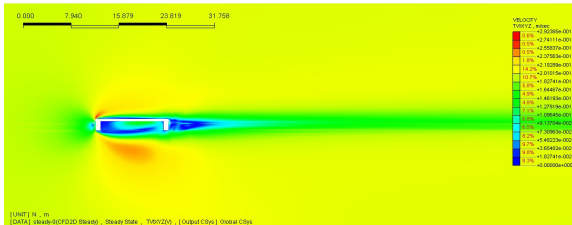
Hình 4 thể hiện phân bố vận tốc gió khi thổi qua vật cản tiết diện chữ II với các trường hợp cánh vát gió khác nhau. Vận tốc thấp có màu xanh lục, giá trị tăng dần theo thứ tự màu xanh lá, vàng và cao nhất là đỏ. Khi không có cánh vát gió, sự tách dòng xuất hiện tại các mép đón gió. Sự tách dòng này làm xuất hiện những xoáy khí tại mặt trên, mặt dưới và ở đuôi của tiết diện, gây ra các hiệu ứng lực tác dụng lên tiết diện. Khi dầm cầu được trang bị thêm cánh vát gió, vị trí tách dòng sẽ xuất hiện tại mặt trên cánh vát gió. Khi góc hợp của cánh vát gió với phương đứng tăng lên, dòng gió bám sát theo mặt trên cầu và kích thước các xoáy khí trên mặt cầu giảm đi.



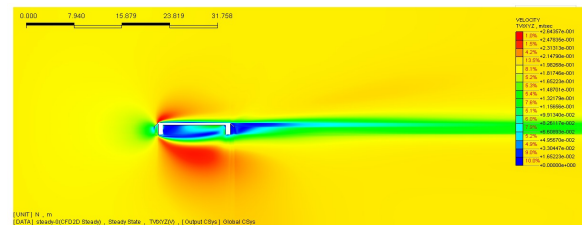
(a) Tiết diện loại 1 không có cánh vát gió



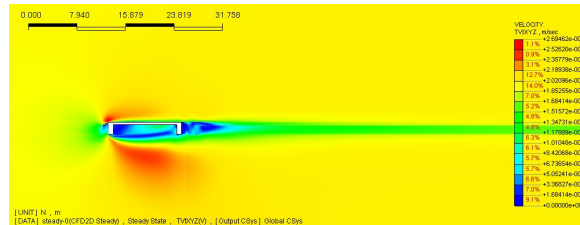
(b) Tiết diện loại 2 có cánh vát gió với góc 15°



(c) Tiết diện loại 3 có cánh vát gió với góc 30°



(d) Tiết diện loại 4 có cánh vát gió với góc 45°



(e) Tiết diện loại 5 có cánh vát gió với góc 45°

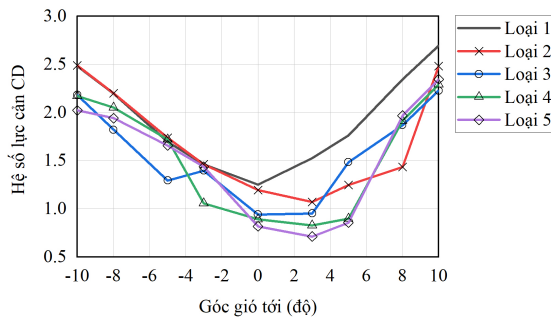
Hình 4. Mô phỏng dòng gió thổi cho tiết diện chữ Π

Kết quả hệ số lực cản C_D đối với 5 loại tiết diện được thể hiện trong Bảng 1 và Hình 5. Hệ số lực cản cho giá trị nhỏ nhất khi góc gió tới nằm trong khoảng từ 0° đến 3°. Khi không có cánh vát gió, hệ số lực cản luôn cho giá trị lớn so với các trường hợp có cánh vát gió. Khi góc gió tới bằng 0, so với tiết diện loại 1, tiết diện loại 2 có hệ số lực cản giảm khoảng 4% trong khi các trường hợp khác có hệ số lực cản giảm khoảng 25-35%. Trong trường hợp góc gió tới âm, các kết quả của tiết diện loại 2 ít chênh lệch so với tiết diện loại 1; các tiết diện 3, 4, 5 không có xu hướng giảm rõ rệt. Hiệu quả giảm lực cản gió tốt nhất khi góc gió tới trong khoảng 3-5°. Với góc gió này, hệ số lực cản tiết diện loại 2 giảm khoảng 30%, tiết diện loại 3 giảm khoảng 16-38%, tiết diện loại 4 giảm khoảng 46-49%, tiết diện loại 5 giảm khoảng 51-53%. Khi góc gió tới lớn hơn 5°, hiệu quả của cánh vát gió giảm nhưng vẫn giúp giảm lực cản trên 13% so với trường hợp không có cánh vát gió.

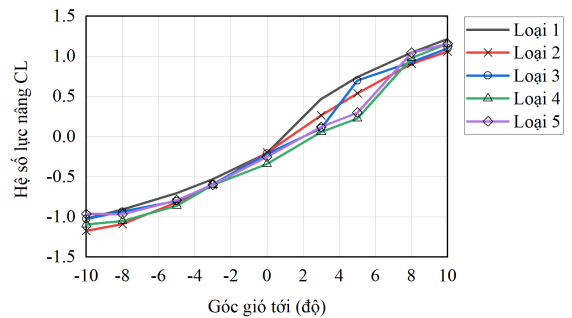
Bảng 2 và Hình 6 thể hiện giá trị hệ số lực nâng C_L đối với 5 loại tiết diện. Trường hợp góc gió tới là 0°, tiết diện loại 2 và 3 cho kết quả tương đồng với tiết diện loại 1, lực nâng trong tiết diện loại 4 và 5 tăng lần lượt khoảng 66% và khoảng 23% so với tiết diện loại 1. Với góc gió tới âm, trường hợp không có cánh vát gió cho kết quả tốt hơn, lực nâng trong các trường hợp có cánh vát gió tăng không quá 20%. Ngược lại, khi góc gió tới dương, hệ số lực nâng trong hợp không có cánh vát gió lớn hơn các trường hợp có cánh vát gió. Với góc gió tới từ 3-5°, cánh vát gió cho hiệu quả tốt nhất. So với tiết diện loại 1, lực nâng của tiết diện loại 2 giảm khoảng 27-43%, tiết diện loại 3 giảm tới 78%, tiết diện loại 4 giảm 70-88%, tiết diện loại 5 giảm 60-74%. Khi góc gió tới lớn hơn 5°, hệ số lực cản trong các trường hợp có cánh vát gió giảm không quá 14%.

Bảng 1. Hệ số lực cản C_D đối với 5 loại tiết diện

Góc gió tới	Loại 1	Loại 2	Loại 3	Loại 4	Loại 5
-10	2,483	2,491	2,184	2,172	2,023
-8	2,197	2,199	1,822	2,053	1,941
-5	1,697	1,738	1,294	1,720	1,657
-3	1,462	1,463	1,397	1,055	1,436
0	1,251	1,196	0,941	0,890	0,817
3	1,525	1,071	0,952	0,829	0,711
5	1,762	1,246	1,485	0,899	0,856
8	2,343	1,434	1,869	1,913	1,968
10	2,695	2,483	2,227	2,290	2,345



Hình 5. Kết quả các hệ số lực cản C_D



Hình 6. Kết quả các hệ số lực nâng C_L

Bảng 2. Hệ số lực nâng C_L đối với 5 loại tiết diện

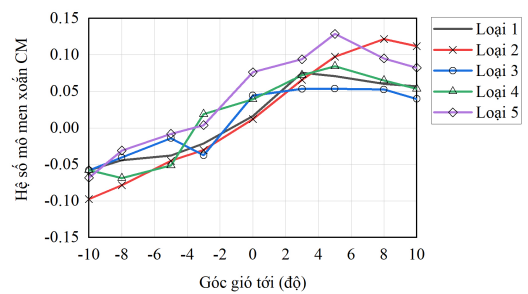
Góc gió tới	Loại 1	Loại 2	Loại 3	Loại 4	Loại 5
-10	-1,022	-1,176	-1,025	-1,095	-0,964
-8	-0,909	-1,092	-0,934	-1,051	-0,967
-5	-0,703	-0,819	-0,803	-0,863	-0,793
-3	-0,531	-0,605	-0,595	-0,604	-0,600
0	-0,205	-0,196	-0,213	-0,341	-0,252
3	0,467	0,267	0,105	0,056	0,120
5	0,742	0,539	0,700	0,226	0,299
8	1,050	0,908	0,930	0,979	1,044
10	1,217	1,062	1,099	1,159	1,156

Bảng 3 và Hình 7 thể hiện giá trị hệ số mô men xoắn C_M đối với 5 loại tiết diện. Đối với tiết diện loại 2, mô men xoắn giảm 13-27% so với tiết diện loại 1 trong trường hợp góc gió tới $0-3^\circ$ và tăng (lên đến 100%) khi góc gió tới ngoài khoảng $0-3^\circ$. Với góc gió tới bằng 0, các tiết diện 3, 4, 5 có mô men xoắn tăng so với tiết diện loại 1 lần lượt là 171%, 141%, 367%. Khi góc gió tới âm, mô men xoắn trong các tiết diện 3, 4, 5 không có xu hướng thay đổi rõ rệt so với tiết diện loại 1. Trường hợp góc gió tới dương, so với tiết diện loại 1, kết quả trong tiết diện loại 4 có ít thay đổi, tiết diện loại 3 giảm 13-30%, tiết diện loại 5 tăng 24-81%.

Bảng 3. Hệ số mô men xoắn C_M đối với 5 loại tiết diện

Góc gió tới	Loại 1	Loại 2	Loại 3	Loại 4	Loại 5
-10	-0,058	-0,098	-0,058	-0,058	-0,068
-8	-0,044	-0,078	-0,041	-0,069	-0,031
-5	-0,038	-0,045	-0,014	-0,051	-0,008
-3	-0,021	-0,030	-0,038	0,019	0,004
0	0,016	0,012	0,044	0,039	0,076
3	0,076	0,066	0,053	0,072	0,094
5	0,071	0,097	0,054	0,085	0,129
8	0,060	0,122	0,053	0,065	0,095
10	0,057	0,112	0,040	0,054	0,082

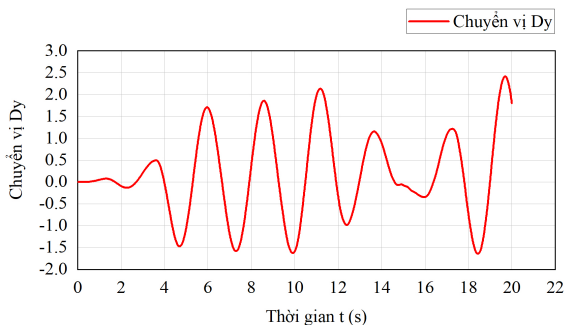
Các kết quả phân tích ổn định khí động cho thấy cánh vát gió có tác dụng làm tăng ổn định khí động của dạng tiết diện chữ II. Đối với tiết diện loại 3 (góc hợp giữa cánh vát gió và phương đứng là 30°), các hệ số lực cản, hệ số lực nâng, hệ số mô men xoắn có giá trị ít gây bất lợi hơn các loại tiết diện khác khi góc gió tới thay đổi, đồng thời cũng giảm lực khí động khi góc gió tới phù hợp.



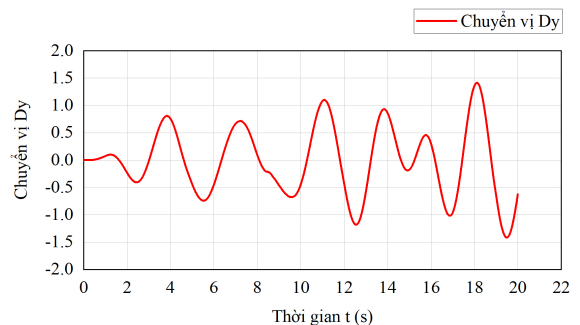
Hình 7. Kết quả các hệ số mô men xoắn C_M

4.2. Phân tích vận tốc gió giới hạn flutter

Mô phỏng gió thổi trong khoảng thời gian 20 giây ở các vận tốc tăng dần, kết quả thu được đối với tiết diện loại 1 và loại 2 lần lượt được thể hiện trong Hình 8 và Hình 9. Với tiết diện loại 1, kết quả phân tích cho thấy khi vận tốc gió dưới 90 m/s, dao động tắt dần theo thời gian. Với vận tốc gió lớn hơn 92 m/s, dao động phát triển theo thời gian dẫn đến hiện tượng mất ổn định. Đây cũng là giá trị vận tốc gió giới hạn xác định trong trường hợp này. Đối với tiết diện loại 3, mô phỏng tính toán với vận tốc gió 95 m/s cho thấy hệ vẫn chưa đạt trạng thái mất ổn định.



Hình 8. Kết quả dao động (Dy) tại vận tốc gió $U = 90$ m/s đối với tiết diện loại 1 và góc gió tới 0°



Hình 9. Kết quả dao động (Dy) tại vận tốc gió $U = 95$ m/s đối với tiết diện loại 3 và góc gió tới 0°

5. Kết luận

Bài báo đã nghiên cứu việc sử dụng phương pháp phân tích, tính toán động lực học chất lưu (CFD) để xác định ảnh hưởng của cánh vát gió (fairings) đến các giá trị lực khí động của dầm cầu dây văng tiết diện chữ Π có $B/H = 6$. Phần mềm dùng để mô hình và phân tích là Midas/FEA-CFD. Từ kết quả nghiên cứu có thể rút ra một số kết luận sau:

- Với việc trang bị thêm cánh vát gió, lực cản lên tiết diện giảm, đồng thời vận tốc gió tới hạn tăng so với trường hợp không có cánh vát gió.
- Góc hợp bởi cánh vát gió và phương đứng ảnh hưởng đến hiệu quả của cánh vát gió. Giá trị góc khác nhau sẽ gây giá trị lực khí động khác nhau cho tiết diện.
- Trường hợp góc hợp bởi cánh vát gió và phương đứng là 30° (loại 3) cho kết quả lực khí động ổn định khi góc tới của gió thay đổi.
- Khi phân tích vận tốc gió giới hạn, cánh vát gió cũng làm tăng đáng kể vận tốc gió giới hạn của tiết diện, tăng khả năng ổn định đối với dao động tròng trành (flutter).

Việc ứng dụng phương pháp CFD để phân tích và dự đoán các đặc trưng khí động học của tiết diện dầm cầu đặc biệt là đối với cầu dây văng đem lại rất nhiều hiệu quả bởi tính ưu việt, chi phí thấp, cần thời gian ngắn nhưng cho kết quả tương đối chính xác. Trong quá trình thiết kế, trước khi tiến hành thí nghiệm hầm gió đối với các công trình cầu lớn, kết cấu thanh mảnh như cầu dây văng, CFD giúp cho các kỹ sư lựa chọn được tiết diện dầm cầu hợp lý phù hợp với yêu cầu về khí động học đồng thời xác định được các hệ số khí động học, vận tốc gió tới hạn. Nhờ đó, có thể tránh được việc thay đổi các thông số thiết kế khi thí nghiệm hầm gió.

Nghiên cứu này có thể được phát triển theo một số hướng như: (i) Thay đổi dạng tiết diện, kích thước tiết diện dầm cầu, (ii) Ảnh hưởng của kích thước cánh vát gió đến hiệu quả cản gió, (iii) So sánh kết quả giữa tính toán mô phỏng số và mô hình thí nghiệm hầm gió thực tế.

Tài liệu tham khảo

- [1] Simiu, E., Yeo, D. (2019). *Wind Effects on Structures*. John Wiley & Sons, Ltd.
- [2] Scanlan, R. H., Tomko, J. J. (1971). *Airfoil and Bridge Deck Flutter Derivatives*. *Journal of the Engineering Mechanics Division*, 97(6):1717–1737.
- [3] Scanlan, R. H. (1987). *Interpreting Aeroelastic Models of Cable-Stayed Bridges*. *Journal of Engineering Mechanics*, 113(4):555–575.
- [4] Pfeil, M. S., Batista, R. C. (1995). *Aerodynamic Stability Analysis of Cable-Stayed Bridges*. *Journal of Structural Engineering*, 121(12):1784–1788.
- [5] Matsumoto, M., Kobayashi, Y., Shirato, H. (1996). *The influence of aerodynamic derivatives on flutter*. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 60:227–239.
- [6] Huang, L., Liao, H., Wang, B., Li, Y. (2009). *Numerical simulation for aerodynamic derivatives of bridge deck*. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 17(4):719–729.
- [7] Kawahara, M., Hirano, H. (1983). *A finite element method for high Reynolds number viscous fluid flow using two step explicit scheme*. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 3(2):137–163.
- [8] Kuroda, S. (1997). *Numerical simulation of flow around a box girder of a long span suspension bridge*. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 67-68:239–252.
- [9] Braun, A. L., Awruch, A. M. (2008). *Finite element simulation of the wind action over bridge sectional models: Application to the Guamá River Bridge (Pará State, Brazil)*. *Finite Elements in Analysis and Design*, 44(3):105–122.
- [10] Sarwar, M. W., Ishihara, T., Shimada, K., Yamasaki, Y., Ikeda, T. (2008). *Prediction of aerodynamic characteristics of a box girder bridge section using the LES turbulence model*. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 96(10-11):1895–1911.

- [11] Sangalli, L. A., Braun, A. L. (2020). [A fluid-structure interaction model for numerical simulation of bridge flutter using sectional models with active control devices. Preliminary results.](#) *Journal of Sound and Vibration*, 477:115338.
- [12] Larsen, A., Walther, J. H. (1998). [Discrete vortex simulation of flow around five generic bridge deck sections.](#) *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 77-78:591–602.
- [13] Mỹ, N. V., Sơn, L. Q., Hải, D. M. (2018). Nghiên cứu giải pháp tối ưu hình học của cánh vát gió đối với kết cấu nhịp cầu dây văng có tiết diện ngang hở nhằm ngăn ngừa mất ổn định khí động Flutter. *Tạp chí Xây dựng, Bộ Xây dựng*, 5:23–27.
- [14] Mỹ, N. V., Sơn, L. Q. (2017). Nghiên cứu giải pháp nâng cao ổn định khí động flutter của kết cấu cầu hệ treo bằng tấm lệch dòng. *Tạp chí Xây dựng, Bộ Xây dựng*, 12:160–164.
- [15] Mỹ, N. V., Hòa, P. D., Huỳnh, L. X. (2015). Phân tích cơ chế ổn định khí động flutter đối với kết cấu nhịp cầu hệ treo và giải pháp cải tiến cánh vát gió dạng cong lõm. *Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây Dựng (KHCVND) - ĐHXDHN*, 9(1):3–10.
- [16] Larsen, A., Walther, J. H. (1997). [Aeroelastic analysis of bridge girder sections based on discrete vortex simulations.](#) *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 67-68:253–265.
- [17] HonoréWalther, J., Larsen, A. (1997). [Two dimensional discrete vortex method for application to bluff body aerodynamics.](#) *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 67-68:183–193.
- [18] Russo, G. (1993). [A Deterministic Vortex Method for the Navier-Stokes Equations.](#) *Journal of Computational Physics*, 108(1):84–94.
- [19] Midas FEA (2016). *Analysis and algorithm manual*. MIDAS FEA, Gyeonggi, Korea.
- [20] Sakai, Y., Ogawa, K., Shimodoi, H., Saitoh, T. (1993). [An experimental study on aerodynamic improvements for edge girder bridges.](#) *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 49(1-3):459–466.
- [21] Omenzetter, P., Wilde, K., Fujino, Y. (2000). [Suppression of wind-induced instabilities of a long span bridge by a passive deck-flaps control system.](#) *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 87(1):61–79.
- [22] Omenzetter, P., Wilde, K., Fujino, Y. (2000). [Suppression of wind-induced instabilities of a long span bridge by a passive deck-flaps control system.](#) *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 87(1):81–91.
- [23] Omenzetter, P., Wilde, K., Fujino, Y. (2002). [Study of Passive Deck-Flaps Flutter Control System on Full Bridge Model. I: Theory.](#) *Journal of Engineering Mechanics*, 128(3):264–279.
- [24] Omenzetter, P., Wilde, K., Fujino, Y. (2002). [Study of Passive Deck-Flaps Flutter Control System on Full Bridge Model. II: Results.](#) *Journal of Engineering Mechanics*, 128(3):280–286.
- [25] Kwon, S.-D., Chang, S.-P. (2000). [Suppression of flutter and gust response of bridges using actively controlled edge surfaces.](#) *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 88(2-3):263–281.
- [26] Lopes, A. V., Gomes, C. D. P. C., Simões, L. M. C. (2006). [CFD Based Aerodynamic Study to Discrete Optimization of Bridge Cross Sections.](#) *III European Conference on Computational Mechanics*, Springer Netherlands, 785–785.
- [27] Stokes, G. G. (1901). [On the Effect of the Internal Friction of Fluids on the Motion of Pendulums.](#) *Mathematical and Physical Papers*, Cambridge University Press, 1–10.
- [28] Coakley, T. (1983). [Turbulence modeling methods for the compressible Navier-Stokes equations.](#) *16th Fluid and Plasmadynamics Conference*, American Institute of Aeronautics and Astronautics.
- [29] Menter, F. R. (1994). [Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications.](#) *AIAA Journal*, 32(8):1598–1605.
- [30] Scanlan, R. H. (1993). [Problematics in Formulation of Wind-Force Models for Bridge Decks.](#) *Journal of Engineering Mechanics*, 119(7):1353–1375.