

PHÂN TÍCH HIỆU QUẢ GIẢM DAO ĐỘNG DO GIÓ CỦA THIẾT BỊ GIẢM CHẤN ĐIỀU CHỈNH KHỐI LƯỢNG (TMD) CHO DẦM CẦU DÂY VĂNG CÓ MẶT CẮT HÌNH CHỮ PI

Nguyễn Tuấn Ngọc^a, Bùi Quốc Bảo^b, Cù Việt Hưng^{c,*}

^aHọc viện Khoa học và Công nghệ, Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam,
số 18 đường Hoàng Quốc Việt, quận Cầu Giấy, Hà Nội, Việt Nam

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

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

Nhận ngày 05/8/2024, Sửa xong 23/10/2024, Chấp nhận đăng 25/10/2024

Tóm tắt

Với kết cấu cầu nhịp lớn, ảnh hưởng của tải trọng gió là đáng kể. Trên thế giới đã ghi nhận nhiều thiệt hại nghiêm trọng do nguyên nhân này, đe dọa trực tiếp đến tính mạng con người. Một trong các biện pháp giảm dao động hiệu quả là sử dụng thiết bị giảm chấn điều chỉnh khối lượng (Tuned Mass Damper – TMD). Để tối ưu hiệu quả giảm chấn, các thông số TMD cần được lựa chọn phù hợp với từng loại kết cấu cụ thể. Với kết cấu cầu dầm chịu tải trọng gió, các thông số đó phụ thuộc nhiều vào khối lượng và tần số dao động của dầm, lực gió tác động phụ thuộc vào dạng hình học mặt cắt ngang của dầm. Bài báo nghiên cứu dao động của một dầm thu nhỏ mặt cắt chữ PI của cầu dây văng trong trường hợp có và không gắn thiết bị TMD sử dụng phương pháp mô phỏng tương tác gió và kết cấu (Fluid Structure Interaction – FSI). Các thông số TMD khác nhau cũng được nghiên cứu, phân tích và so sánh. Kết quả cho thấy hiệu quả của TMD trong việc giảm dao động của dầm cầu dây văng dạng chữ PI. Để tối ưu hiệu quả thiết bị giảm chấn, việc nghiên cứu lựa chọn các thông số TMD là cần thiết.

Từ khóa: cầu dây văng; dầm cầu; khí động học; dao động; giảm chấn điều khiển khối lượng - TMD; giảm dao động.

ANALYSING THE EFFECTIVENESS OF TUNED MASS DAMPER (TMD) IN MITIGATING WIND-INDUCED VIBRATIONS OF PI-SECTION GIRDER OF CABLE-STAYED BRIDGE

Abstract

For large-span bridge structures, the impact of wind loads is significant. Many severe damages caused by this have been recorded worldwide, directly threatening human lives. One of the effective measures to reduce oscillations is the use of Tuned Mass Damper (TMD). To optimize the damping effect, TMD parameters need to be appropriately selected for each specific type of structure. For girder bridge structures supported wind load, these parameters largely depend on the mass and vibration frequency of girder and wind load depend on the cross-sectional shape of the girder. The paper studies the vibration of a scaled-down Pi-section girder of cable-stayed bridge, both with and without a Tuned Mass Damper (TMD) using the Fluid-Structure Interaction (FSI) simulation method. Various TMD parameters are simulated, analyzed, and compared. The results demonstrate the effectiveness of TMD in reducing the oscillations of the Pi-section girder of cable-stayed bridge. To optimize the damper's performance, it is necessary to study and select the appropriate TMD parameters.

Keywords: cable-stayed bridge; bridge girder; aerodynamic; vibration; tuned mass damper - TMD; vibration reduction.

[https://doi.org/10.31814/stce.huce2024-18\(4V\)-12](https://doi.org/10.31814/stce.huce2024-18(4V)-12) © 2024 Trường Đại học Xây dựng Hà Nội (ĐHXDHN)

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

1. Giới thiệu

Cầu nhịp lớn đặc biệt là cầu hệ dây có độ cứng kết cấu nhỏ, nhạy cảm với các loại tải trọng động như tải trọng gió. Sự cố phá hủy cầu treo dây văng Tacoma Narrow (Mỹ) năm 1940 là bước ngoặt cho việc thiết kế khí động của các kết cấu cầu hệ dây [1]. Một số công trình cầu từng xuất hiện dao động quá mức do ảnh hưởng của gió cũng đã được ghi nhận. Vào chiều ngày 5 tháng 5 năm 2020, cầu treo dây văng Humen (Trung Quốc) bất ngờ rung lắc mạnh liên tục trong hơn 2 giờ. Dao động chủ yếu theo phương thẳng đứng của mặt cầu do gió xoáy (Vortex-Induced Vibration - VIV) với tần số khoảng 20 lần/phút, biên độ lớn nhất khoảng 0,3 m và không phát hiện dao động xoắn rõ ràng. Mặc dù dao động này không gây nguy hiểm cho sự an toàn của kết cấu cầu nhưng ảnh hưởng đến tâm lý lái xe và an toàn giao thông [2]. Cầu Volgograd (Nga) có kết cấu dầm thép bản trực hướng chiều dài nhịp 155 m được đưa vào sử dụng từ tháng 10 năm 2009, và vào tháng 5 năm 2010 cầu dao động mạnh do tác động của gió với biên độ lên tới 0,4 m [3]. Các phân tích sau đó cho thấy ba dạng dao động uốn theo phương đứng đầu tiên có tần số lần lượt là 0,45 Hz, 0,57 Hz và 0,68 Hz chiếm vai trò chủ đạo. Thiết bị giảm chấn điều chỉnh khối lượng bán chủ động (Semi Active Tuned Mass Damper – STMD) được lắp đặt sau đó để giảm dao động cho cầu [3]. Cầu Rio-Niterói qua vịnh Guanabara có kết cấu phần trên là dầm hộp thép bản trực hướng chiều dài nhịp chính lên tới 300 m cũng xuất hiện dao động lớn do gió thổi khiến nhiều người phải bỏ lại phương tiện giao thông trên cầu [4]. Cũng với kết cấu dầm hộp thép bản trực hướng nhưng chiều dài nhịp là 185m, cầu Chongqi (Trung Quốc) trong quá trình thi công được phát hiện dao động do hiện tượng gió xoáy. Thiết bị giảm chấn điều chỉnh khối lượng (Tuned Mass Damper – TMD) được lắp đặt để giảm dao động cho cầu. Các số liệu quan trắc cho thấy TMD làm việc hiệu quả khi cơn bão Chan-hom đi qua gần khu vực cầu vào tháng 7 năm 2015 [5]. Cầu dây văng Komárom Danube có chiều dài nhịp chính 252 m, dầm bằng thép được lắp đặt 6 bộ TMD để giảm dao động gió xoáy. Mỗi bộ thiết bị có khối lượng $m_d = 5000$ kg, độ cứng lò xo $k = 36,5$ kN/m, hệ số cản $c = 3,4$ kNs/m [6].

Có thể thấy rằng, việc giảm dao động của cầu nhịp lớn có kết cấu thanh mảnh là rất quan trọng và một trong những biện pháp hiệu quả là sử dụng bộ giảm chấn TMD. Tiêu chuẩn thiết kế cầu đường bộ của Việt Nam TCVN 11823:2017 quy định “*Khi áp dụng thực tế, việc sử dụng các bộ giảm chấn phải được xét để kiểm soát được những tác động động học quá mức*” [7].

Đối với các cầu hệ dây nhịp lớn nhạy cảm với ảnh hưởng của tải trọng gió, thí nghiệm hầm gió nhằm xác định các đặc trưng khí động và kiểm tra khả năng ổn định của công trình là hết sức quan trọng và cần thiết. Tuy nhiên, do yêu cầu kỹ thuật phức tạp nên chi phí thí nghiệm hầm gió cao, thời gian để chế tạo mô hình kéo dài, đặc biệt là trong trường hợp thay đổi các thông số kết cấu cũng như thiết bị giảm chấn. Hiện nay, với sự phát triển mạnh mẽ của các phần mềm tính toán phần tử hữu hạn, việc mô phỏng kết cấu, phân tích các đặc trưng khí động học và thông số của thiết bị giảm chấn trước khi tiến hành thí nghiệm hầm gió là hiệu quả bởi tiết kiệm được thời gian và chi phí. Trên thế giới đã có nhiều nghiên cứu sử dụng phương pháp mô phỏng số để tối ưu hóa thông số TMD với các mô hình tải trọng gió khác nhau tác dụng lên công trình cầu [8–14].

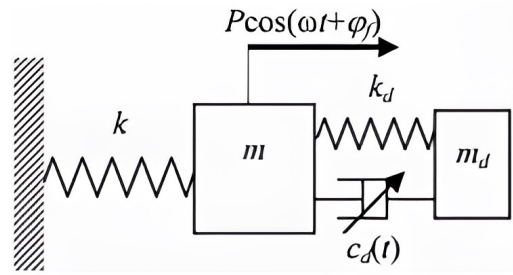
Trong bài báo này, các tác giả nghiên cứu hiệu quả giảm dao động do gió của thiết bị giảm chấn TMD cho dầm cầu dây văng có mặt cắt hình chữ II. Một dốt dầm thu nhỏ của cầu dây văng mặt cắt hình chữ II trong trường hợp có gắn TMD và không gắn TMD chịu tải trọng gió thổi được nghiên cứu. Phương pháp mô phỏng tương tác giữa gió thổi và dao động của kết cấu Fluid Structure Interaction (FSI) được sử dụng. Các thông số của TMD cũng được thay đổi để phân tích, so sánh chỉ số giảm dao động của các trường hợp nghiên cứu.

2. Cơ sở lý thuyết

2.1. Lý thuyết về TMD

Giáo sư người Đức, Hermann Frahm được cấp bằng sáng chế TMD vào năm 1909 [15]. TMD thực chất là một hệ tích hợp giữa khối lượng, lò xo với thiết bị tiêu tán năng lượng như đàn nhót hoặc chất lỏng nhót. Do yêu cầu kỹ thuật khối lượng của TMD không được ảnh hưởng nhiều đến hệ chính. TMD nói chung hiệu quả giảm dao động rõ rệt khi hệ chính có độ giảm chấn bản thân nhỏ [16].

Hình 1 mô tả kết cấu chính có khối lượng m , độ cứng k , chịu tải trọng điều hòa $P \cos(\omega t + \varphi_f)$ gắn TMD bao gồm khối lượng m_d , độ cứng k_d , hệ số cản c_d . Đặt x là chuyển vị tuyệt đối của hệ chính m , x_d là chuyển vị tương đối giữa khối lượng m_d so với kết cấu chính m . Phương trình dao động của hệ được viết như sau:



Hình 1. Mô hình tính toán cơ bản của hệ TMD

$$(m + m_d) \ddot{x} + m_d \ddot{x}_d + kx = P \cos(\omega t + \varphi_f) \quad (1)$$

$$m_d \ddot{x} + m_d \ddot{x}_d + c_d \dot{x}_d + k_d x_d = 0 \quad (2)$$

trong đó $\ddot{x}$, $\ddot{x}_d$ là đạo hàm bậc hai của x , x_d tương ứng với gia tốc; $\dot{x}_d$ là đạo hàm bậc nhất tương ứng với vận tốc.

Sử dụng các tham số chuẩn hóa sau:

$$\mu = m_d/m; \quad \omega_s = \sqrt{k/m}; \quad \alpha = \sqrt{k_d/m_d}/\omega_s \quad (3)$$

$$\zeta = c_d/(2\sqrt{k_d m_d}); \quad \tau = \omega_s t; \quad \beta = \omega/\omega_s \quad (4)$$

trong đó ω_s là tần số dao động tự nhiên kết cấu; τ là thông số thời gian không thứ nguyên với tỉ lệ ω_s^{-1} ; μ là tỷ số khối lượng TMD; ζ là tỷ số giảm chấn; β là tỷ số tần số lực.

Coi $m = 1$, phương trình (1) được viết lại dưới dạng chuẩn hóa như sau:

$$(1 + \mu) \ddot{x} + \mu \ddot{x}_d + x = P \cos(\beta \tau + \varphi_f) / k \quad (5)$$

$$\ddot{x} + \ddot{x}_d + 2\alpha \zeta \dot{x}_d + \alpha^2 x_d = 0 \quad (6)$$

Den Hartog [17] đưa ra các thông số tối ưu cho TMD như sau:

$$\alpha_p = 1/(1 + \mu); \quad \zeta_p = \sqrt{3\mu/8/(1 + \mu)} \quad (7)$$

2.2. Lý thuyết mô phỏng

Nhiều tác giả sử dụng phương pháp phần tử hữu hạn (Finite Element Method - FEM) để phân tích tính toán tác động gió lên mặt cắt ngang trong đó có Kawahara và Hirano [18]. Kuroda [19] sử dụng phương pháp sai phân hữu hạn (Finite Difference Method - FDM) mô hình dòng chất lưu quanh dầm hộp của cầu treo nhịp lớn. Mô hình số sử dụng các lý thuyết FEM cũng được nhiều tác giả quan tâm [12, 20, 21].

Các nghiên cứu chỉ ra rằng sử dụng mô phỏng xoáy lớn Large Eddy Simulation (LES) chính xác hơn so với mô hình Unsteady Reynolds-Averaged Navier-Stokes (URANS) và tốn ít tài nguyên hơn mô hình Direct Numerical Simulation (DNS), do đó phù hợp để mô phỏng các dầm cầu có dạng hình học tương đối phức tạp.

Phương trình Navier–Stokes cho dòng chảy của chất lưu:

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} = -\frac{\partial u_i u_j}{\partial x_j} + X_i - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j^2} \quad (8)$$

trong đó trường vận tốc u_i thỏa mãn phương trình liên tục:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (9)$$

trong các phương trình (8) và (9) u_i là vận tốc dòng chảy theo ba hướng trong không gian; $i = 1$ và $i = 2$ cho các hướng ngang và $i = 3$ cho hướng thẳng đứng; X_i là thành phần thứ i của lực khối; ρ là mật độ không khí; p là sự dao động áp suất; ν là độ nhớt động học của chất lỏng; t là thời gian; và x_i là tọa độ không gian. Việc tích phân số của các phương trình (8) và (9) thông qua mô hình DNS. Đối với LES, các phương trình (8) và (9) cần được lọc theo không gian, và khi đó phương trình (8) được viết lại như sau:

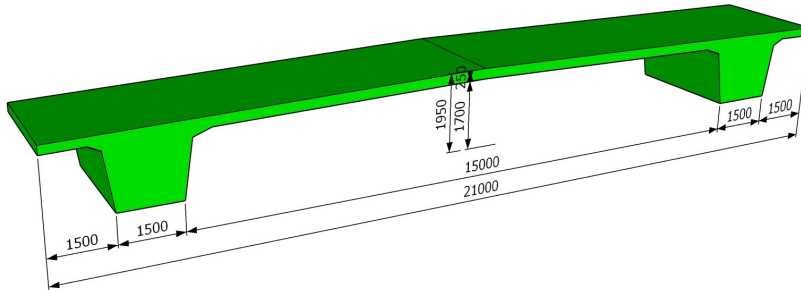
$$\frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial t} = -\frac{\partial \tilde{u}_i \tilde{u}_j}{\partial x_j} - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \frac{g_i}{T_0} \tilde{\theta} - f \varepsilon_{ij} \tilde{u}_j - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial \tilde{p}}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 \tilde{u}_i}{\partial x_j^2} \quad (10)$$

trong đó $\tilde{u}_i$ và $\tilde{u}_j$ là vận tốc trung bình tại thang lọc, τ_{ij} là ứng suất Sub-Grid Scale (SGS stress) được xác định bằng $\tau_{ij} = \overline{u_i u_j} - \tilde{u}_i \tilde{u}_j$ với $\overline{u_i u_j}$ là vận tốc tại thang nhỏ hơn mức lọc, g_i là gia tốc trọng trường khác 0 (chỉ theo hướng x_3), T_0 là nhiệt độ, $\tilde{\theta}$ là nhiệt độ tiềm năng, f là tham số Coriolis.

3. Phân tích dao động do gió của dầm cầu dây văng mặt cắt chữ II gắn TMD sử dụng phương pháp phần tử hữu hạn (FEM) và động lực học chất lưu (CFD)

3.1. Đối tượng nghiên cứu

Một dầm cầu với mặt cắt ngang có dạng chữ II của một công trình cầu dây văng thực tế tại Việt Nam được lựa chọn để nghiên cứu hiệu quả của TMD trong việc giảm dao động của kết cấu do tác động của gió (Hình 2).



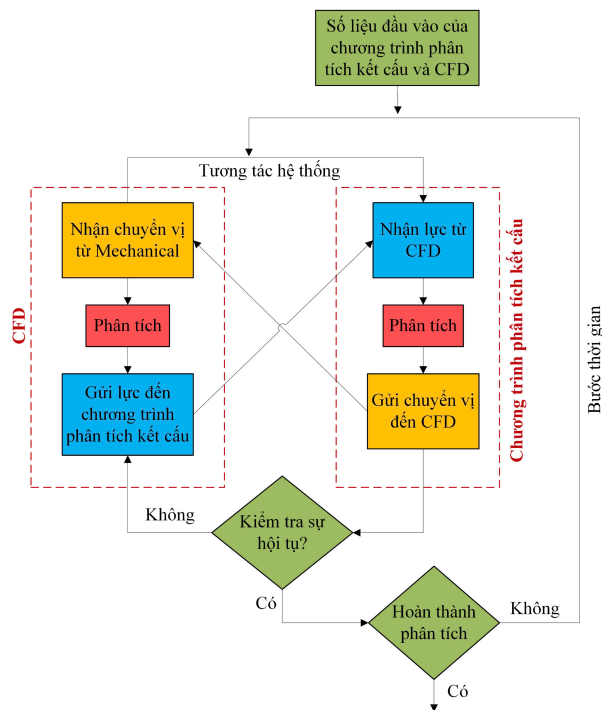
Hình 2. Mặt cắt ngang dầm cầu nghiên cứu

3.2. Mô phỏng

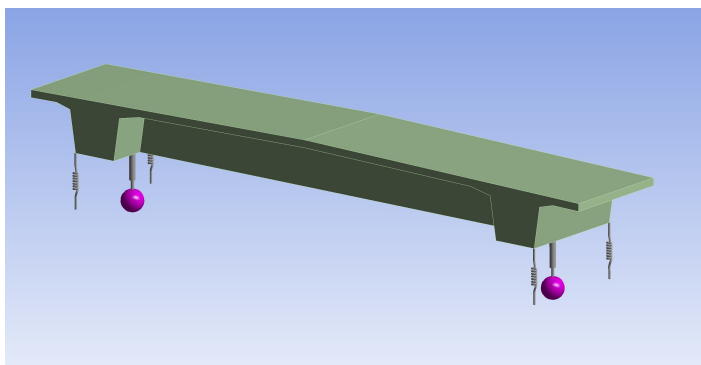
Để mô phỏng tác động của gió đối với một công trình cầu dây văng bằng phương pháp động lực học chất lưu (Computational Fluid Dynamics - CFD), ba mô hình thường được sử dụng: (i) Mô hình toàn bộ kết cấu cầu với dầm cầu, tháp cầu, dây văng; (ii) Mô phỏng một dầm cầu với các kích thước hình học cơ bản, điều kiện biên là các lò xo (spring) đặc trưng cho độ cứng kết cấu dầm cầu và dây văng; (iii) Mô phỏng trong mặt phẳng 2D với kích thước hình học của mặt cắt. Mô hình toàn bộ kết cấu cầu sẽ tiêu tốn lượng lớn tài nguyên của máy tính, yêu cầu cấu hình máy tính rất cao. Trong khi

đó, mô phỏng đốt dầm và mô hình tính toán phẳng 2D có số lượng chia lưới phần tử ít hơn. Vì vậy, cấu hình máy tính sử dụng để mô phỏng thấp hơn và thời gian tính toán nhanh hơn.

Trong bài báo này, các tác giả sử dụng hai mô đun phân tích kết cấu Transient Structural và phân tích động lực học chất lưu CFX của phần mềm ANSYS để mô phỏng đốt dầm. Hai mô đun này được kết nối với nhau thông qua mô đun System Coupling. Tiếp xúc trên bề mặt kết cấu dầm cầu và phần chất lưu được mô tả bởi loại điều kiện biên Fluid Solid Interface trong mô đun Transient Structural. Trong mô đun chất lưu CFX, bề mặt dầm cầu được mô tả là loại điều kiện biên kiểu tường (wall) với tùy chọn Kết đôi hệ thống – System Coupling. Tại mỗi thời điểm, chất lưu (gió thổi) được mô phỏng bằng mô đun CFX, từ đó xác định được vận tốc gió tại các điểm và áp suất gió tác dụng lên đốt dầm khiến đốt dầm chuyển động thay đổi vị trí thông qua mô phỏng trong mô đun Transient Structural. Vị trí đốt dầm khi đó trở thành điều kiện biên kiểu tường cho bước tính tiếp theo của CFX. Sơ đồ khối quá trình phân tích được thể hiện trên Hình 3, mô hình đốt dầm được thể hiện trên Hình 4.

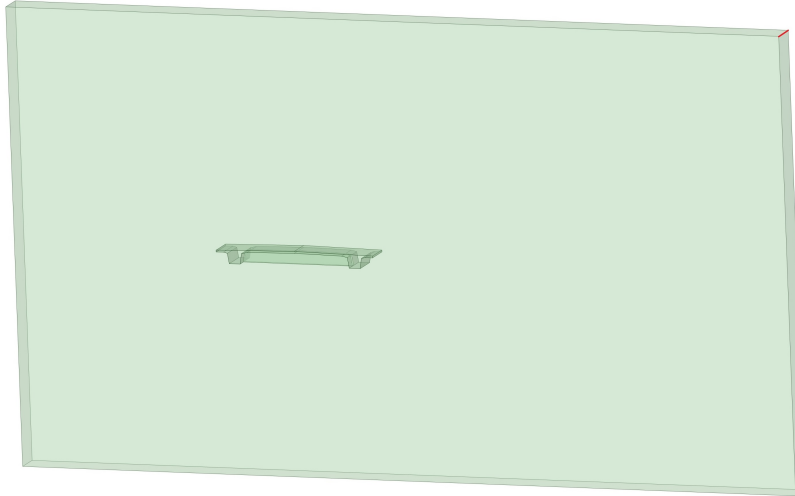


Hình 3. Sơ đồ khối quá trình phân tích



Hình 4. Mô hình đốt dầm cầu gắn thiết bị giảm chấn TMD

Kích thước vùng không gian mô phỏng chất lưu là $(2800 \times 1600 \times 100)$ mm như thể hiện trên Hình 5. Mặt gió vào (Inlet) ở bên trái, mặt gió ra (Outlet) ở bên phải, mặt hở (Opening) ở trên và dưới, mặt đối xứng (Symmetry) là hai mặt phẳng vuông góc với đốt dầm.



Hình 5. Vùng không gian mô phỏng chất lưu

Đốt dầm được mô phỏng với tỉ lệ 1/37,5 chiều dài 100 mm, khối lượng đốt dầm $m = 0,766$ kg, vận tốc gió 4 m/s, đốt dầm được đỡ bởi 4 lò xo có độ cứng $k = 50$ N/m, tổng độ cứng 200 N/m. Nghiên cứu này không xét đến chuyển động của dầm cầu theo hướng gió thổi. Vì vậy, một điều kiện biên giới hạn chuyển vị theo phương gió thổi bằng không được sử dụng. Độ cứng lò xo theo phương đứng và xoắn được xác định dựa trên tần số dao động đứng và dao động xoắn của kết cấu thực quy đổi về mô hình theo tỉ lệ $\sqrt{n}$ với n là tỷ lệ hình học mô hình. Tuy nhiên, mục tiêu của nghiên cứu này là so sánh hiệu quả giảm dao động giữa trường hợp có gắn TMD và không gắn TMD. Bởi vậy, độ cứng lò xo của đốt dầm cầu được lựa chọn và giữ không đổi giữa các trường hợp.

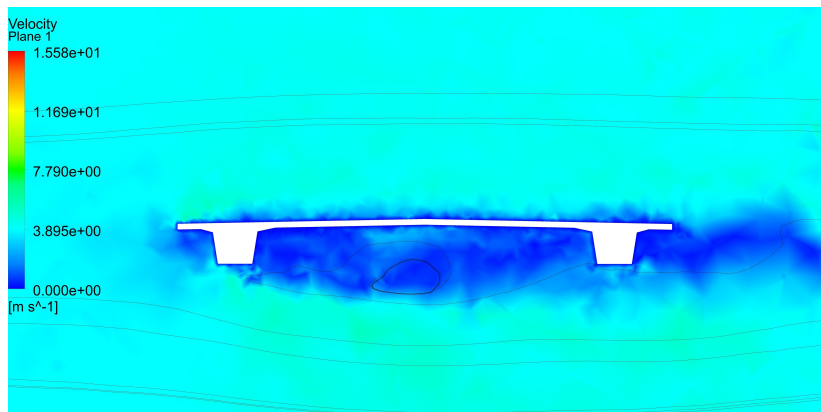
Thời gian mô phỏng 10 s, bước thời gian 0,001 s. Mô hình gió rối WALE (Wall Adapting Local Eddy Viscosity) thuộc nhóm LES được sử dụng [22]. Tại mỗi bước thời gian, phương trình Navier–Stokes được tính toán trong miền không gian xung quanh đốt dầm, từ đó xác định được vận tốc gió tại các điểm, áp suất gió tác dụng lên đốt dầm. Các thành phần lực nâng, mô men xoắn khiến đốt dầm chuyển vị theo phương thẳng đứng và xoay. Thành phần lực cản gây chuyển vị của đốt dầm theo hướng gió thổi không nằm trong nghiên cứu này. Do hiện tượng gió xoáy, lực đứng và mô men xoắn có độ lớn thay đổi theo thời gian, với tần số f tùy theo kích thước dầm H , vận tốc gió U và hệ số Strouhal S_t [8].

$$f = \frac{S_t U}{H} \quad (11)$$

Khi tần số gió xoáy gần với tần số dao động riêng của kết cấu, hiện tượng cộng hưởng xuất hiện. Để giảm dao động dầm cầu, hai bộ thiết bị giảm chấn TMD được gắn tại hai bên của đốt dầm. Thiết bị giảm chấn TMD bao gồm khối lượng tập trung, lò xo có độ cứng, và thành phần cản. Dựa theo công thức (7), các trường hợp nghiên cứu được tiến hành với sự thay đổi các hệ số của TMD (Bảng 1). Trường hợp không gắn thiết bị TMD được kí hiệu là TH0. Với giá trị của tỷ số khối lượng $\mu = 7\%$, $k_d = 6,1141$ N/m được ký hiệu là TH1 và khi thay đổi hệ số cản sẽ có các trường hợp TH1a, TH1b, TH1c. Tương tự như vậy với $\mu = 5\%$ và $\mu = 3\%$ có các trường hợp TH2a, TH2b, TH2c và TH3a, TH3b, TH3c.

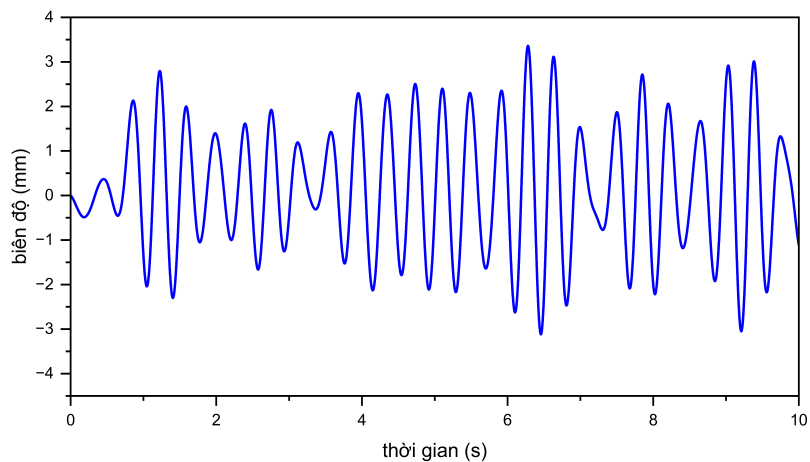
Bảng 1. Tham số của TMD trong các trường hợp nghiên cứu

Trường hợp	μ	k_d (N/m)	c_d (Ns/m)
TH0	-	-	-
TH1a	7%	6,1141	0,1268
TH1b	7%	6,1141	0,0634
TH1c	7%	6,1141	0,2536
TH2a	5%	4,5351	0,0788
TH2b	5%	4,5351	0,0394
TH2c	5%	4,5351	0,1575
TH3a	3%	2,8278	0,0377
TH3b	3%	2,8278	0,0188
TH3c	3%	2,8278	0,0753

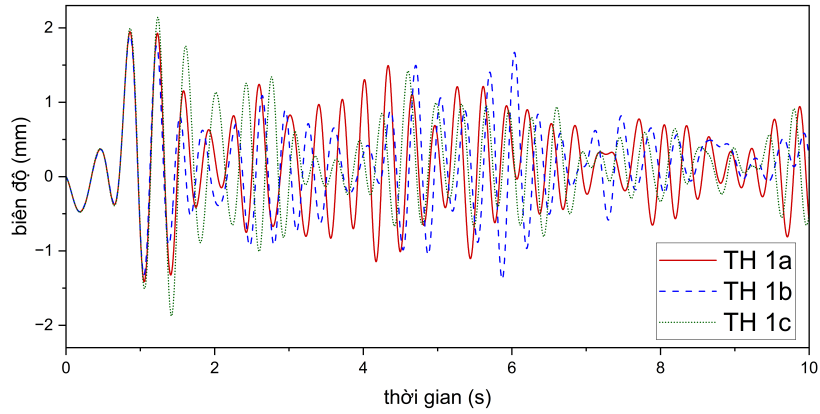


Hình 6. Phân bố vận tốc gió quanh đốt dầm cầu

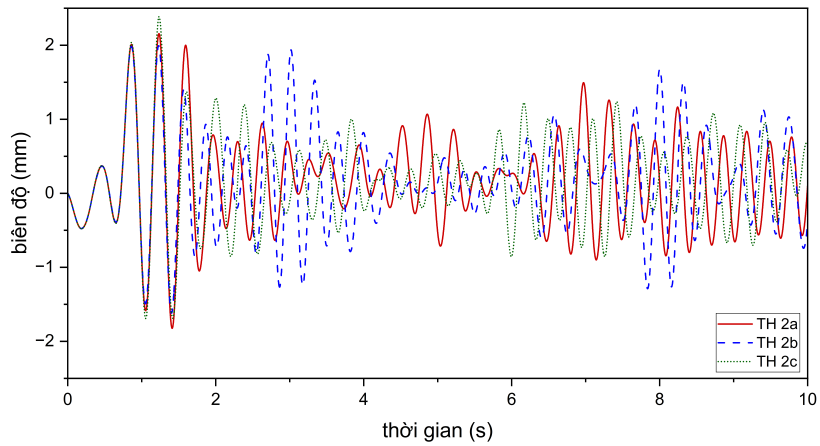
Hình 6 thể hiện sự phân bố vận tốc gió xung quanh đốt dầm. Có thể thấy rằng, khi gió đi qua vật cản, xuất hiện các vùng vận tốc gió thay đổi không đều, dẫn đến áp suất khí động thay đổi tác dụng lên dầm hình thành các lực cản, lực nâng, mô men xoắn. Tần số lực tác dụng và tần số gió xoáy phụ thuộc vào dạng hình học, kích thước vật cản, vận tốc gió.



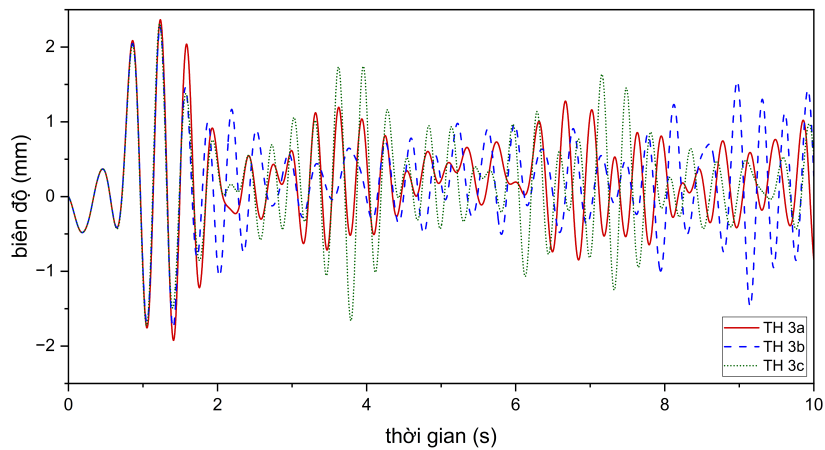
Hình 7. Kết quả dao động của TH0



Hình 8. Kết quả dao động của TH1a, TH1b và TH1c



Hình 9. Kết quả dao động của TH2a, TH2b và TH2c



Hình 10. Kết quả dao động của TH 3a, TH 3b và TH 3c

Để xét đến chuyển vị tịnh tiến kết hợp xoay của dầm, các kết quả dao động được xét tại vị trí mép trên ngoài cùng bên trái của mặt cắt. Biểu đồ dao động của kết cấu dầm trường hợp TH0 ($\mu = 0\%$) được thể hiện trên Hình 7, Các kết quả dao động trường hợp với $\mu = 7\%$ được tổ hợp trên Hình 8, $\mu = 5\%$ trên Hình 9 và với $\mu = 3\%$ trên Hình 10.

Hiệu quả giảm dao động của TMD χ được đánh giá thông qua tỷ số giữa giá trị độ lệch chuẩn của dịch chuyển trong trường hợp có sử dụng TMD (σ_{TMD}) so với khi không sử dụng TMD (σ).

$$\chi = \frac{\sigma_{TMD}}{\sigma} \quad (12)$$

với x_{i_TMD} là chuyển vị đốt dầm có gắn TMD ở thời điểm mô phỏng thứ i ; x_{tb_TMD} là giá trị trung bình của các giá trị x_{i_TMD} . Tương tự, x_i là chuyển vị đốt dầm không gắn TMD ở thời điểm mô phỏng thứ i ; x_{tb} là giá trị trung bình của các giá trị x_i ; n là số lượt thời điểm mô phỏng, bằng 10000 tương ứng thời gian mô phỏng 10 s và bước thời gian 0,001 s. Công thức xác định độ lệch chuẩn và giá trị trung bình [23]:

$$\sigma_{TMD} = \sqrt{\sum_1^n \frac{(x_{i_TMD} - x_{tb_TMD})^2}{n}}; \quad \sigma = \sqrt{\sum_1^n \frac{(x_i - x_{tb})^2}{n}} \quad (13)$$

$$x_{tb_TMD} = \sum_1^n \frac{x_{i_TMD}}{n}; \quad x_{tb} = \sum_1^n \frac{x_i}{n} \quad (14)$$

Có thể thấy rằng tất cả các trường hợp gắn TMD đều có hiệu quả giảm dao động của dầm cầu trên 50% so với trường hợp không gắn TMD. Tỷ số khối lượng càng lớn, hiệu quả TMD càng cao. Tỷ số khối lượng được xét là 7%, 5% và 3%, hiệu quả giảm chấn trung bình tương ứng 57,80%, 54,93%, 54,46%. Tuy nhiên, tỷ số khối lượng lớn đồng nghĩa với khối lượng TMD tăng, gây tăng khối lượng trên công trình, khó khăn trong việc lắp đặt liên kết TMD với công trình. Việc thay đổi hệ số cản c_d làm thay đổi hiệu quả giảm dao động của TMD và không phải hệ số cản tính theo công thức của Den Hartog là tối ưu trong mọi trường hợp. Tuy nhiên, công thức này vẫn có thể được sử dụng để lựa chọn các thông số ban đầu của TMD. Trong các trường hợp mô phỏng, trường hợp TH1c có hiệu quả giảm dao động tốt nhất đạt 59,55% và trường hợp TH3c kém hiệu quả nhất khi chỉ đạt 52,46%.

4. Kết luận

Bài báo nghiên cứu dao động của dầm cầu dây văng mặt cắt chữ II dưới tác động của tải trọng gió, trong trường hợp gắn và không gắn TMD, sử dụng phương pháp mô phỏng tương tác gió và kết cấu. Kết quả nghiên cứu cho thấy, việc sử dụng TMD là một giải pháp kỹ thuật phù hợp để giảm dao động do gió cho dầm cầu dây văng. Thông qua các phân tích và so sánh, có thể rút ra một số kết luận như sau:

- TMD hiệu quả trong việc giảm dao động gió xoáy. Các thông số thiết bị TMD cần được lựa chọn phụ thuộc vào thông số kết cấu dầm cầu. Tỷ số khối lượng càng cao, hiệu quả giảm dao động của TMD càng cao. Tuy nhiên, việc tăng khối lượng của TMD cũng ảnh hưởng đến nội lực trong kết cấu. Do đó khi phân tích kết cấu cần kể đến khối lượng của thiết bị giảm chấn.

- Hệ số cản tối ưu của TMD theo công thức của Den Hartog có thể lựa chọn để tăng hiệu quả giảm dao động.

- Giới hạn nghiên cứu của bài báo là chỉ mô phỏng một đốt dầm cầu dây văng mặt cắt chữ II thu nhỏ có chiều cao không thay đổi, bỏ qua ảnh hưởng của dây văng và thông số thiết bị TMD được lựa chọn tương ứng với dạng dao động đứng đầu tiên. Dao động gió xoáy có thể xảy ra ở các vận tốc gió khác nhau, tương ứng với các tần số riêng khác nhau, nên việc mô phỏng gió thổi lên toàn bộ kết cấu cầu cần được xem xét nghiên cứu. Để giải được bài toán này đòi hỏi tiêu tốn lượng lớn tài nguyên của máy tính, yêu cầu cấu hình máy tính rất cao, thời gian phân tích dài.

Tài liệu tham khảo

- [1] Zhang, Y., Cardiff, P., Keenahan, J. (2021). [Wind-Induced Phenomena in Long-Span Cable-Supported Bridges: A Comparative Review of Wind Tunnel Tests and Computational Fluid Dynamics Modelling](#). *Applied Sciences*, 11(4):1642.
- [2] Zhao, L., Ge, Y. (2020). Emergency measures for vortex-induced vibration of human bridge. *Mater. Res*, 9:25–28.
- [3] Weber, F., Distl, J., Mašlanka, M. (2013). Semi-Active TMD Concept for Volgograd Bridge. *Topics in Dynamics of Civil Structures, Volume 4*, Springer New York, 79–88.
- [4] Battista, R. C., Pfeil, M. S. (2000). [Reduction of vortex-induced oscillations of Rio-Niterói bridge by dynamic control devices](#). *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 84(3):273–288.
- [5] Sun, Z., Zou, Z., Ying, X., Li, X. (2020). [Tuned Mass Dampers for Wind-Induced Vibration Control of Chongqi Bridge](#). *Journal of Bridge Engineering*, 25(1).
- [6] Szabó, G., Völgyi, I., Kenéz, Á. (2022). [Vibration Assessment of a New Danube Bridge at Komárom](#). *Periodica Polytechnica Civil Engineering*.
- [7] TCVN 11823:2017. *Thiết kế cầu đường bộ*. Bộ Khoa học và Công nghệ, Việt Nam.
- [8] 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.
- [9] Mannini, C., Šoda, A., Voß, R., Schewe, G. (2010). [Unsteady RANS simulations of flow around a bridge section](#). *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 98(12):742–753.
- [10] de Miranda, S., Patruno, L., Ricci, M., Ubertini, F. (2015). [Numerical study of a twin box bridge deck with increasing gap ratio by using RANS and LES approaches](#). *Engineering Structures*, 99:546–558.
- [11] Hallak, P. H., Pfeil, M. S., de Oliveira, S. R. C., Battista, R. C., de Sampaio, P. A. B., Bezerra, C. M. N. (2013). [Aerodynamic behavior analysis of Rio-Niterói bridge by means of computational fluid dynamics](#). *Engineering Structures*, 56:935–944.
- [12] 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.
- [13] Bayat, E., Bayat, M., Hafezzadeh, R. (2021). Numerical performance assessment of Tuned Mass Dampers to mitigate traffic-induced vibrations of a steel box-girder bridge. *Structural Engineering and Mechanics*, 78(2):125–134.
- [14] Mokrani, B., Tian, Z., Alaluf, D., Meng, F., Preumont, A. (2017). [Passive damping of suspension bridges using multi-degree of freedom tuned mass dampers](#). *Engineering Structures*, 153:749–756.
- [15] Frahm, H. (1911). *Device for damping vibrations of bodies*. Google Patents.
- [16] Anh, N. Đ., Việt, L. Đ. *Giảm dao động bằng thiết bị tiêu tán năng lượng*. Nhà xuất bản Khoa học tự nhiên và Công nghệ.
- [17] Balachandran, B., Magrab, E. B. (1956). *Vibrations*. McGraw-Hill Book Company, Inc., New York.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] Nicoud, F., Ducros, F. (1999). [Subgrid-scale stress modelling based on the square of the velocity gradient tensor](#). *Flow, Turbulence and Combustion*, 62(3):183–200.
- [23] Strømmen, E. N. (2010). *Theory of Bridge Aerodynamics*. Springer Berlin Heidelberg.