

NGHIÊN CỨU MÔ PHỎNG XÁC ĐỊNH HỆ SỐ KHÍ ĐỘNG CỦA CÔNG TRÌNH NHÀ MÁI VÒM HỖ BỐN PHÍA CÓ MẶT BẰNG HÌNH CHỮ NHẬT

NUMERICAL STUDY ON WIND-INDUCED AERODYNAMIC COEFFICIENTS OF OPEN-SIDED VAULTED ROOFS WITH RECTANGULAR PLANS

Đỗ Văn Linh, Đặng Việt Tuấn - Khoa Kỹ thuật Xây dựng, Trường Đại học Giao thông Vận tải

*Tác giả liên hệ: E-mail: dvlinh@utc.edu.vn

Tóm tắt: Tải trọng gió là một trong những yếu tố quan trọng ảnh hưởng đến độ an toàn của công trình xây dựng, đặc biệt đối với kết cấu mái vòm hở bốn phía. Nghiên cứu này sử dụng mô phỏng động lực học chất lưu (Computational Fluid Dynamics - CFD) trong ANSYS Fluent để xác định hệ số khí động của loại kết cấu này. Kết quả mô phỏng cho thấy sự tương đồng cao với thí nghiệm và khẳng định độ tin cậy của phương pháp tính toán. Đồng thời, độ vồng của mái vòm (f/B) tác động đáng kể đến phân bố áp suất và hệ số khí động. Khi độ vồng tăng, áp suất dương tại chân vòm đón gió gia tăng, trong khi áp suất âm chiếm ưu thế ở mặt dưới do sự hình thành xoáy khí mạnh. Kết quả nghiên cứu cung cấp bộ dữ liệu quan trọng phục vụ tính toán tải trọng gió, góp phần tối ưu hóa thiết kế và đảm bảo an toàn cho công trình mái vòm hở.

Từ khóa: Vòm hở bốn phía, CFD, hệ số khí động, tải trọng gió, Fluent.

Abstract: Wind load is a critical factor influencing the structural safety of buildings, particularly vaulted-free roofs. This study employs Computational Fluid Dynamics (CFD) simulations using ANSYS Fluent to determine the aerodynamic coefficients of such structures. The simulation results exhibit strong agreement with wind tunnel experiments, validating the accuracy and reliability of the computational approach. The findings indicate that the vault rise-to-span ratio (f/B) significantly affects pressure distribution and aerodynamic coefficients. An increase in the rise ratio leads to higher positive pressure at the windward base of the vault, while negative pressure dominates the underside due to intensified vortex formation. The results provide essential data for wind load assessment, contributing to the optimization of structural design and the enhancement of aerodynamic stability for vaulted-free roofs.

Key words: Vaulted-free roof, CFD, aerodynamic coefficient, wind load, Fluent.

1. Đặt vấn đề

Việt Nam có đường bờ biển dài và nằm trong khu vực chịu ảnh hưởng của gió bão lớn hàng năm. Trong số các tác động môi trường lên công trình xây dựng, tải trọng gió được xem là yếu tố nguy hiểm nhất do khả năng gây thiệt hại nghiêm trọng, thậm chí có thể dẫn đến sụp đổ công trình nếu không được tính toán và kiểm soát chặt chẽ. Do đó, nghiên cứu và đánh giá tác động của tải trọng gió lên kết cấu xây dựng là nhiệm vụ cấp thiết nhằm đề xuất các biện pháp phòng ngừa và giảm thiểu rủi ro. Giá trị tải trọng gió tác dụng lên công trình không cố định mà phụ thuộc vào hình dạng và kích thước của công trình, yếu tố này được phản ánh thông qua hệ số khí động. Để xác định chính xác hệ số khí động, các nhà nghiên cứu thường sử dụng thí nghiệm ống thổi khí động với mô hình thu nhỏ của công trình thực tế. Việc tính toán đúng hệ số khí động đóng vai trò then chốt trong quá trình thiết kế, giúp đảm bảo tính an toàn và ổn định của kết cấu công trình trước tác động của gió.

Hiện nay, các kết cấu mái vòm với mặt bằng hình chữ nhật và hở cả bốn phía được ứng dụng

rộng rãi trong các công trình như mái che bãi đỗ xe, kho chứa ngoài trời, nhà chờ,... Tuy nhiên, hệ số khí động của loại kết cấu này chưa được đề cập cụ thể trong các tiêu chuẩn tải trọng hiện hành. Trên thế giới, một số nghiên cứu thực nghiệm đã được thực hiện nhằm xác định tải trọng gió tác dụng lên mái che hở bốn phía (canopy roof), bao gồm cả mái dạng vòm (vaulted canopy roof). Natalini và các cộng sự đã tiến hành thí nghiệm thổi ống gió trên mô hình nhà mái vòm không có tường với tỷ lệ 1/75, khảo sát theo các hướng gió chính 60°, 75°, và 90° để xác định ảnh hưởng của hướng gió đến hệ số khí động [1]. Uematsu và Yamamura đã nghiên cứu mô hình ống thổi khí động với tỷ lệ 1/100 cho công trình mái vòm hở bốn phía, khảo sát hệ số khí động ở các hướng gió 90° và 45°, đồng thời xem xét sự thay đổi của tỷ lệ độ vồng/nhịp nhà (f/B) [2]. Nghiên cứu tiếp theo của Ding và các cộng sự đã mở rộng phạm vi bằng cách kết hợp mô phỏng, xét đến tỷ lệ chiều dài với bề rộng nhà (L/B) bằng 1, 2, 3 và tỷ lệ độ vồng với bề rộng (f/B) từ 0,1 đến 0,4 [3]. Ngoài ra, Ding và Uematsu cũng đã tiến hành nghiên cứu mô hình ống thổi khí động cho nhà mái

vòm hở bốn phía với các kích thước phổ biến tại Nhật Bản [4]. Có thể thấy, hầu hết các nhóm tác giả đều tập trung khảo sát tác động của hướng gió và các tỷ lệ kích thước công trình đến giá trị của hệ số khí động. Tuy nhiên, để áp dụng hiệu quả vào thực tiễn thiết kế, cần có thêm các nghiên cứu chuyên sâu hơn, đặc biệt đối với công trình có kích thước đa dạng và chịu ảnh hưởng của các điều kiện khí hậu khác nhau.

Tại Việt Nam, các nghiên cứu về tải trọng gió vẫn còn hạn chế, chủ yếu tập trung vào công trình nhà cao tầng [5]. Một số nghiên cứu được thực hiện tại phòng thí nghiệm gió của Viện Khoa học Công nghệ Xây dựng do TS. Vũ Thành Trung và cộng sự thực hiện. Nhóm nghiên cứu đã tiến hành thí nghiệm thổi ống khí động trên các mô hình nhà cao tầng có mặt bằng dạng chữ H, T, U, L theo các thông số của TCVN 2737:1995, đồng thời so sánh kết quả với tiêu chuẩn GB 50009-2012 của Trung Quốc [6]. Tuy nhiên, đến nay, chưa có bất kỳ nghiên cứu nào tại Việt Nam về xác định hệ số khí động cho nhà mái dạng vòm hở bốn phía. Đồng thời, Tiêu chuẩn Tải trọng và tác động TCVN 2737:2023 [7] cũng chưa đưa ra hướng dẫn cụ thể về cho loại công trình này. Sự thiếu hụt này tạo ra khoảng trống trong thiết kế và tính toán tải trọng gió, dù trên thực tế, các công trình mái vòm hở đã được xây dựng rộng rãi trên khắp cả nước.

Thí nghiệm ống thổi khí động đòi hỏi nhân lực chất lượng cao, chi phí lớn và thời gian chuẩn bị dài. Do đó, bên cạnh các nghiên cứu thực nghiệm, phương pháp mô phỏng khí động lực học chất lưu (Computational Fluid Dynamics - CFD) bằng phần mềm phần tử hữu hạn đang trở thành một giải pháp thay thế hiệu quả và được ứng dụng rộng rãi [8]. Trong bài báo này, tác giả thực hiện nghiên cứu mô phỏng bằng phần mềm ANSYS Fluent nhằm xác định hệ số khí động cho công trình nhà mái vòm hở bốn phía với mặt bằng hình chữ nhật. Kết quả nghiên cứu cung cấp bộ dữ liệu tham khảo quan trọng, làm cơ sở cho việc tính toán chính xác tải trọng gió, giúp hạn chế các tác động bất lợi và đảm bảo an toàn, ổn định cho công trình xây dựng.

2. Thiết lập mô hình mô phỏng

2.1 Cơ sở lý thuyết mô phỏng

Nghiên cứu này sử dụng ANSYS Fluent, một phần mềm phổ biến trong mô phỏng động lực học chất lưu (Computational Fluid Dynamics - CFD) dựa trên phương pháp thể tích hữu hạn [9]. Mô hình dòng rối được mô tả bằng hệ phương trình Reynolds-Averaged Navier-Stokes (RANS), giúp mô phỏng sự vận chuyển của các đại lượng dòng chảy trung bình và mô hình hóa toàn bộ dải quy

mô của nhiễu loạn theo thời gian. Trong mô hình RANS, các biến trong phương trình Navier-Stokes tức thời được phân tách thành hai thành phần: trung bình và biến thiên. Các đại lượng quan trọng như vận tốc, áp suất và các thông số vô hướng khác của dòng chất lỏng được biểu diễn theo cách này để thuận tiện cho quá trình tính toán và mô phỏng [9].

$$u_i = \bar{u}_i + u_i' \quad (1)$$

$$\phi = \bar{\phi} + \phi' \quad (2)$$

Trong đó \bar{u} là vận tốc trung bình và u_i' là phần biến thiên của vận tốc theo ba trục tọa độ ($i=1,2,3$). Đại lượng ϕ đại diện cho các đặc trưng vật lý như áp suất hoặc năng lượng của chất lỏng. Khi thay các biểu thức này vào phương trình liên tục và phương trình động lượng tức thời, sau đó lấy trung bình theo thời gian, ta thu được phương trình động lượng trung bình trong hệ tọa độ Đề - Các như sau:

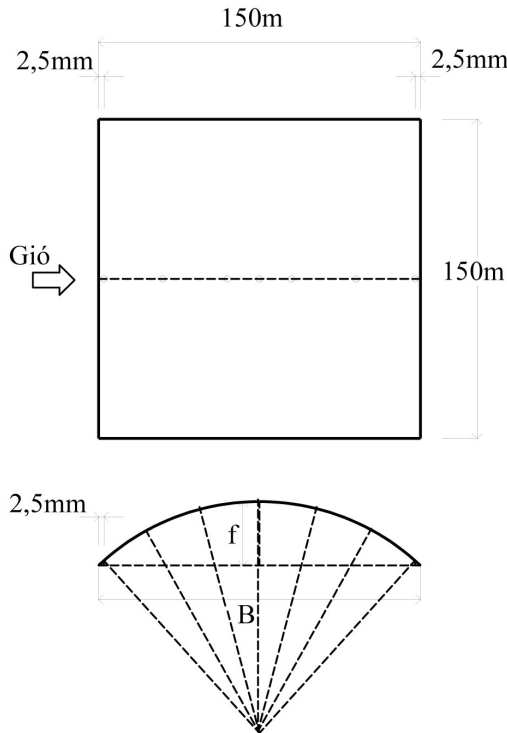
$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i) = 0 \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_i u_j) = \\ = -\frac{\partial \rho}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) \right] + \\ + \frac{\partial}{\partial x_j} (-\rho \bar{u}_i' \bar{u}_j') \end{aligned} \quad (4)$$

Trong đó ρ là mật độ không khí và μ là độ nhớt động lực học của chất lỏng. Các phương trình này được gọi là phương trình Reynolds-Averaged Navier-Stokes (RANS), có dạng tương tự như phương trình Navier-Stokes tức thời nhưng được viết dưới dạng giá trị trung bình của vận tốc và các đại lượng dòng chảy. Trong các phương trình RANS, tác động của nhiễu loạn do dòng khí được biểu diễn thông qua ứng suất Reynolds ($-\rho \bar{u}_i' \bar{u}_j'$). Trong ANSYS Fluent, ứng suất Reynolds có thể được mô hình hóa bằng các mô hình nhiễu loạn như Spalart-Allmaras, $k - \varepsilon$, $k - \omega$, hoặc Reynolds Stress Model (RSM), giúp mô phỏng chính xác hơn các đặc tính dòng chảy rối.

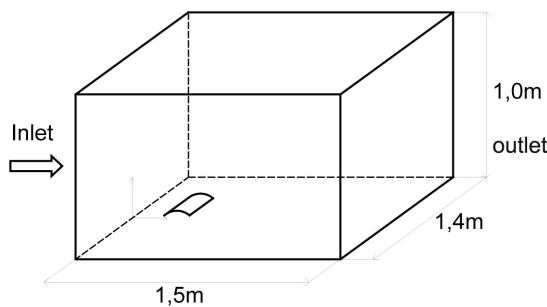
2.2 Thiết lập mô hình mô phỏng

Trong bài báo này, kích thước mô hình mái vòm hở bốn phía mặt bằng hình chữ nhật được lựa chọn theo kích thước thực được sử dụng trong thí nghiệm ống thổi khí động đã được thực hiện bởi các tác giả Yasushi và nhóm nghiên cứu [3]. Chiều dài, chiều rộng và chiều cao của mái vòm được thể hiện như trong Hình 1 với độ vồng thay đổi theo tỷ lệ $f/B = 0,1 \div 0,4$.



Hình 1. Mô hình mái vòm và điểm đo áp suất do gió

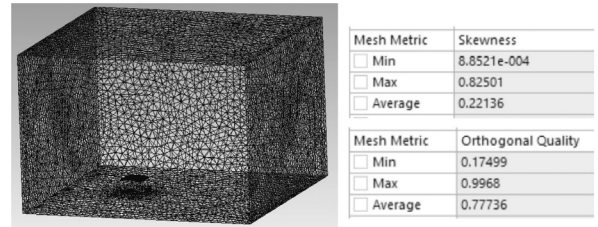
Để mô phỏng tác động của gió lên nhà có mái vòm hờ bốn phía, một vùng không gian tính toán xung quanh được xây dựng với kích thước là 1,5m x 1,4m x 1,0m. Không gian tính toán bao gồm mặt gió vào (Inlet), mặt gió ra (Outlet) và các mặt cạnh (Wall). Khoảng cách từ tâm của mô hình mái vòm với mặt biên trước (biên Inlet) là 0,475m trong khi đó mép dưới mô hình cách đáy dưới của vùng biên tính toán là 0,08m (Hình 2).



Hình 2. Không gian tính toán

Trong phần mềm Fluent, mô hình nhà mái vòm và không gian xung quanh được chia lưới nhằm tiến hành tính toán mô phỏng tác động của gió lên kết cấu. Để đảm bảo độ chính xác của mô hình đồng thời giảm thời gian tính toán, ở khu vực gần vị trí nhà mái vòm, mặt Inlet, Outlet có lưới mịn trong khi các vùng còn lại có lưới thưa (Hình 3). Trong nghiên cứu này, các mô hình được chia lưới cần thỏa mãn các điều kiện chỉ số Skewness $\leq 0,94$

và chỉ số Orthogonal quality $\geq 0,15$ nhằm đảm bảo độ chính xác trong mô phỏng.



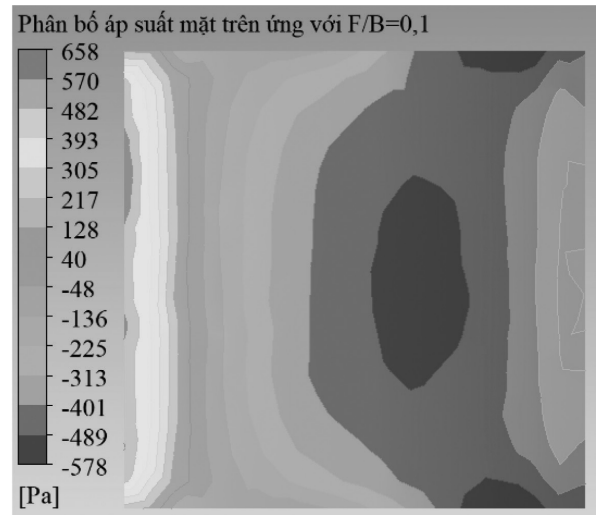
Hình 3. Chia lưới mô hình và đánh giá chất lượng lưới của mô hình

Vận tốc gió đầu vào của mô hình được lựa chọn $U = 40\text{m/s}$, tương đương với vùng gió II. Trong bài báo này, mô hình dòng rối k-epsilon và mô hình hàm tường Standard Wall Function được lựa chọn do có độ chính xác cao theo kết luận của tác giả Nguyễn Lệ Thủy [10].

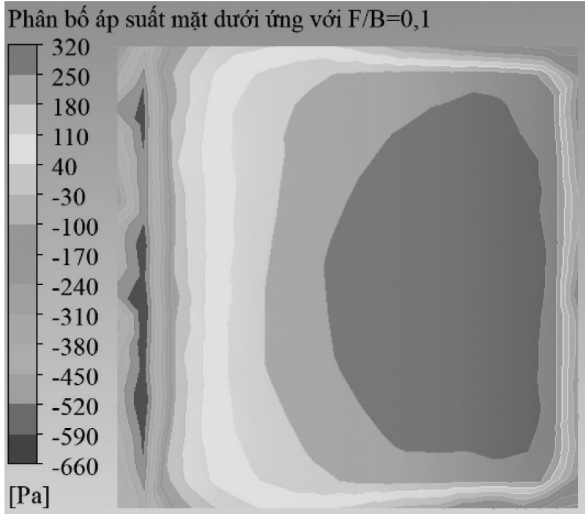
3. Kết quả mô phỏng

Trong mô hình mô phỏng, áp suất gió tác động lên bề mặt của mái vòm được đo tại các vị trí khác nhau theo đường chính giữa mái vòm như được biểu diễn tại Hình 1. Hình 4 đến Hình 7 thể hiện sự phân bố ứng suất bề mặt trên và mặt dưới của mái vòm ứng với tỷ lệ f/B là 0,1 và 0,4. Đối với mái vòm có $f/B = 0,1$, ta thấy ở mặt trên áp suất có giá trị dương ở chân vòm đón gió, sau đó giảm dần và chuyển sang giá trị âm và đạt giá trị âm lớn nhất tại phía bên kia của đỉnh vòm, sau đó áp suất âm giảm dần về chân vòm phía cuối gió (Hình 4). Đối với mặt dưới, áp suất âm xuất hiện ở chân vòm phía đón gió, sau đó giảm dần và chuyển sang áp lực dương ở phía bên kia đỉnh vòm và lại giảm dần về phía chân vòm cuối gió (Hình 5).

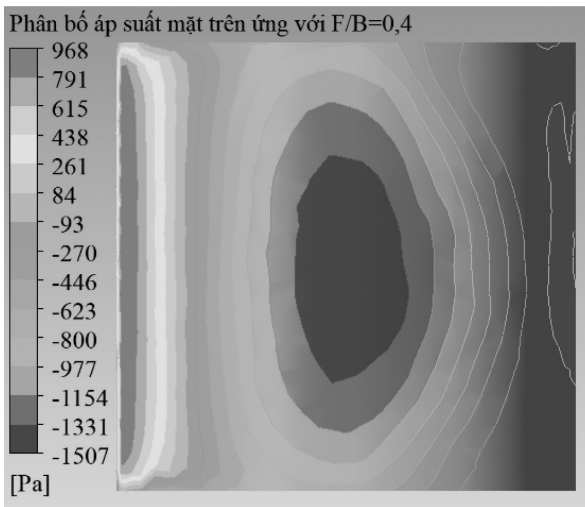
Khi độ vồng của mái vòm tăng lên $f/B=0,4$, theo Hình 6, đối với mặt trên, áp suất dương lớn hơn



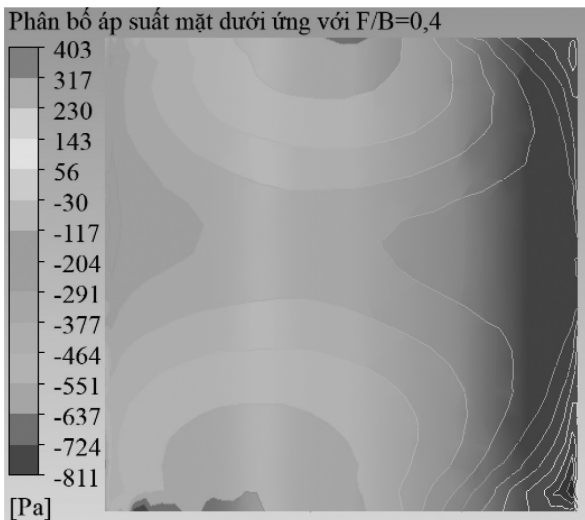
Hình 4. Phân bố áp suất mặt trên ứng với $f/B=0,1$



Hình 5. Phân bố áp suất mặt dưới ứng với f/B=0,1

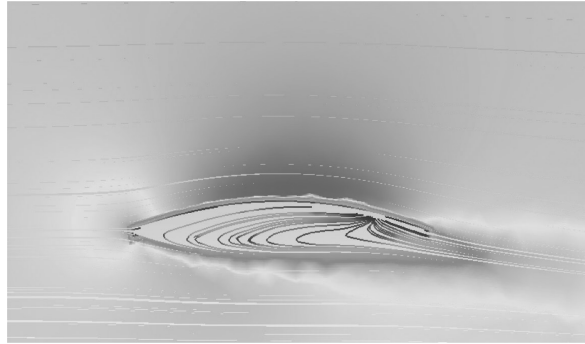


Hình 6. Phân bố áp suất mặt trên ứng với f/B=0,4

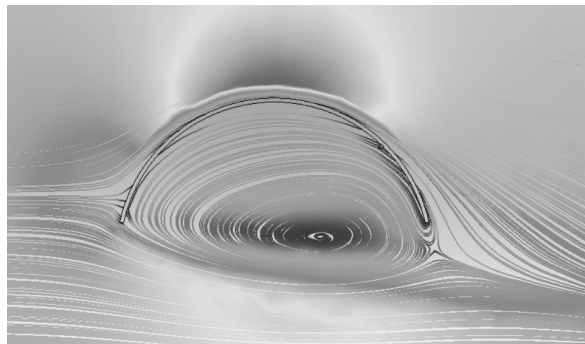


Hình 7. Phân bố áp suất mặt dưới ứng với f/B=0,4

nhiều tại chân vòm đón gió, sau đó giảm dần và đổi chiều âm và tăng lớn nhất ở sát phía bên kia đỉnh vòm rồi giảm dần về phía chân vòm cuối gió. Áp



Hình 8. Vận tốc dòng chảy trung bình ứng với tỷ số f/B=0,1



Hình 9. Vận tốc dòng chảy trung bình ứng với f/B=0,4

suất mặt dưới có giá trị âm lớn tại chân vòm đón gió, sau đó giảm dần, nhưng chỉ xuất hiện áp lực dương khi sát tới chân vòm cuối gió (Hình 7).

Điều này có thể được giải thích khi xem xét sự thay đổi của vận tốc dòng khí đi qua mái vòm có tỷ lệ f/B bằng 0,1 và 0,4 ở Hình 8 và Hình 9. Ở cả hai trường hợp, đầu tiên dòng khí bị tách ra tại chân vòm đón gió (bên trái). Sau đó một phần dòng khí cuộn lên bề mặt phía trên gây ra áp lực dương lớn tại chân vòm, rồi dần chuyển thành áp lực âm ở phía đỉnh. Trong khi đó dòng khí chảy phía dưới vòm đi xuống và gây áp lực âm ở mặt dưới chân vòm. Với mái vòm có độ vồng thấp, dòng khí này chảy thẳng đến mặt dưới bên kia đỉnh vòm và gây ra áp lực dương. Khi độ vồng tăng lên f/B=0,4, dòng khí có xu thế cuộn tròn và tạo ra xoáy khí lớn và gây ra áp lực âm ở phần lớn bề mặt dưới mái vòm. Có thể thấy rằng, độ vồng của kết cấu mái đã ảnh hưởng đến vận tốc dòng khí qua vòm và làm thay đổi sự phân bố áp suất ở mặt trên và mặt dưới vòm.

Từ giá trị áp suất đo được, hệ số khí động trên bề mặt trên và mặt dưới của mái vòm có thể được xác định theo công thức:

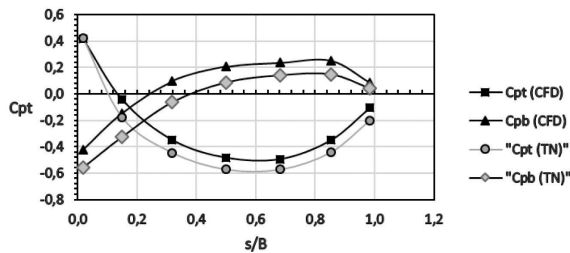
$$C_{pt} = \frac{p_t}{0,5\rho U_H^2} \quad (5)$$

$$C_{pb} = \frac{p_b}{0,5\rho U_H^2} \quad (6)$$

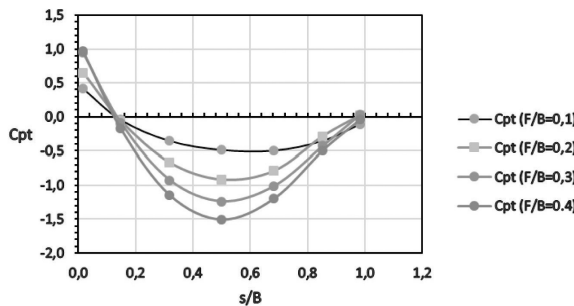
Trong đó C_{pt} , C_{pb} , p_t , p_b lần lượt là hệ số khí động

và áp suất mặt trên và mặt dưới của mái vòm;
 $\rho = 1,225\text{kg/m}^3$ là trọng lượng riêng của không khí;
 U_H là vận tốc gió tại độ cao tương ứng.

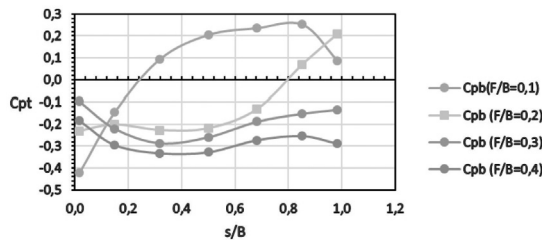
Hình 10 so sánh hệ số khí động trên đường giữa G của mái vòm (Hình 1) trong mô hình mô phỏng và thí nghiệm ống thổi khí động với mái vòm có độ vồng $f/B=0,1$ của tác giả Ding và các cộng sự [3]. Kết quả cho thấy, ở cả nghiên cứu thực nghiệm và mô phỏng CFD, hệ số khí động thay đổi từ giá trị dương sang âm ở mặt trên vòm, với giá trị lớn nhất ở vị trí đón gió. Trong khi đó, giá trị này tăng dần theo chiều dài vòm từ âm sang dương ở mặt dưới vòm. Có thể thấy rằng nghiên cứu mô phỏng có sự tương đồng với kết quả thực nghiệm.



Hình 10. Biểu đồ hệ số khí động ứng với trường hợp $f/B=0,1$ từ kết quả mô phỏng và thí nghiệm



Hình 11. Biểu đồ hệ số khí động mặt trên C_{pt}



Hình 12. Biểu đồ hệ số khí động mặt dưới C_{pb}

Hình 11 và Hình 12 thể hiện biểu đồ hệ số khí động mặt trên và mặt dưới của các mái vòm có độ vồng f/B thay đổi từ 0,1 đến 0,4. Ở mặt trên vòm, sự thay đổi hệ số khí động tương tự nhau ở tất cả các trường hợp khảo sát. Hệ số khí động thay đổi từ giá trị dương sang âm trong suốt chiều dài vòm khi độ vồng mái vòm tăng lên từ 0,1 đến 0,4. Trong khi đó, ở mặt dưới vòm, hệ số khí động ở mái vòm có độ vồng thấp $f/B=0,1$ thay đổi từ giá trị âm

ở mặt đón gió và tăng lên theo chiều dài vòm. Với trường hợp $f/B=0,2$, hệ số khí động hầu hết có giá trị âm suốt chiều dài vòm và tăng lên giá trị dương ở vị trí chân vòm phía cuối gió. Khi độ vồng vòm tăng lên đến giá trị 0,3 và 0,4, áp suất âm xuất hiện ở mặt dưới vòm do sự hình thành của cuộn xoáy gió. Do đó, hệ số khí động đều có giá trị âm trong toàn bộ chiều dài vòm. Có thể thấy rằng, hệ số khí động trên mái vòm hở bốn phía có mặt bằng hình chữ nhật phân bố phụ thuộc vào độ vồng của mái vòm và thay đổi từ chân vòm đến đỉnh vòm.

4. Kết luận

Nghiên cứu này sử dụng ANSYS Fluent để mô phỏng và tính toán hệ số khí động của nhà mái vòm hở bốn phía với mặt bằng hình chữ nhật. Kết quả cho thấy độ vồng mái vòm ảnh hưởng đáng kể đến phân bố áp suất và hệ số khí động. Khi độ vồng tăng, áp suất dương tại chân vòm đón gió lớn hơn, trong khi áp suất âm chiếm ưu thế ở mặt dưới do dòng khí tạo xoáy mạnh. Mô phỏng CFD cho kết quả tương đồng với thí nghiệm thực tế, khẳng định sự thay đổi hệ số khí động theo độ vồng và vị trí trên mái vòm. Kết quả của bài báo có thể làm cơ sở cho các nghiên cứu mở rộng nhằm tối ưu hóa thiết kế mái vòm chịu tải trọng gió trong thực tế. □

Lời cảm ơn: Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường Đại học Giao thông Vận tải (ĐH GTVT) trong đề tài có mã số T2024-XD-001.

Tài liệu tham khảo

- Natalini, M., C. Morel, and B. Natalini, Mean loads on vaulted canopy roofs. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2013. 119: p. 102-113.
- Uematsu, Y. and R. Yamamura, Wind loads for designing the main wind-force resisting systems of cylindrical free-standing canopy roofs. *Technical Transactions*, 2019. 2019(Year 2019 (116)): p. 125-136.
- Ding, W., Y. Uematsu, and L. Wen, Fundamental Characteristics of Wind Loading on Vaulted-Free Roofs. *Wind*, 2023. 3(4): p. 394-417.
- Ding, W. and Y. Uematsu, Discussion of design wind loads on a vaulted free roof. *Wind*, 2022. 2(3): p. 479-494.
- Trung, V.T., et al., Xác định tải trọng gió bằng thí nghiệm ống thổi khí động cho công tác thiết kế công trình xây dựng tại Việt Nam.
- Trung, V.T., Đ.V. Mạnh, and N.N. Huy, Xác định hệ số khí động của các dạng nhà cao tầng với tiết diện ngang hình chữ H, T, U, L theo điều kiện Việt Nam.
- BXD, Tiêu chuẩn TCVN 2737:2023 Tải trọng và tác động. 2023.
- Sharma, A., Introduction to computational fluid dynamics: development, application and analysis. 2021: Springer Nature.
- Fluent, A., Ansys fluent theory guide. Ansys Inc., USA, 2011. 15317: p. 724-746.
- Nguyen, L.T. and H.S. Nguyen, Mô phỏng bằng quảng cáo tấm lớn bằng phần mềm Ansys Fluent. *Tạp chí Xây dựng*, 2023: p. 73-79.