

ỨNG DỤNG PHƯƠNG PHÁP SỐ NGHIÊN CỨU ẢNH HƯỞNG CỦA HIỆN TƯỢNG XÂM THỰC ĐẾN ĐẶC TÍNH THỦY ĐỘNG LỰC HỌC CỦA PROFILE CÁNH NACA 4412

APPLICATION OF NUMERICAL METHODS TO STUDY THE EFFECTS OF CAVITATION ON THE HYDRODYNAMIC CHARACTERISTICS OF THE HYDROFOIL NACA 4412

Nguyễn Chí Công*, Phạm Thị Thuý

Trường Đại học Hàng hải Việt Nam

*Email: congnc.vck@vimaru.edu.vn

TÓM TẮT

Hiện tượng xâm thực (Cavitation) là hiện tượng chất lỏng bốc hơi cục bộ tại những vùng có áp suất thấp hơn áp suất hơi bão hòa. Khi các bong bóng hơi di chuyển đến vùng có áp suất cao hơn, chúng bị phá hủy đột ngột, tạo ra xung áp suất rất lớn phá hủy bề mặt cánh bánh công tác, gây tiếng ồn, rung động, làm giảm hiệu suất thủy lực của máy trong quá trình làm việc. Đối với profile cánh dẫn, hiện tượng xâm thực thường xuất hiện tại mặt hút, mép vào, mép thoát, nó làm giảm hệ số lực nâng, tăng hệ số lực cản, và làm tải trọng tác động lên profile dao động. Do đó, việc nghiên cứu ảnh hưởng của hiện tượng xâm thực đến đặc tính thủy động lực học của profile cánh mang ý nghĩa quan trọng trong việc tính toán thiết kế cánh của máy thủy lực cánh dẫn hoạt động với hiệu suất cao trong điều kiện có xâm thực xuất hiện. Bài báo này ứng dụng phương pháp tính toán mô phỏng số (CFD) nghiên cứu ảnh hưởng của hiện tượng xâm thực đến đặc tính thủy động lực học của profile cánh NACA 4412. Mô hình xâm thực kết hợp với mô hình rối RNG k- ϵ được sử dụng để tính toán mô phỏng quá trình hình thành, phát triển và phá hủy của bong bóng xâm thực xảy ra trên mặt hút, mép vào và mép thoát của profile cánh NACA 4412. Kết quả mô phỏng cho thấy sự xuất hiện của hiện tượng xâm thực làm giảm đáng kể hệ số lực nâng và tăng hệ số lực cản, đồng thời gây dao động áp suất lớn ở vùng mép thoát của profile cánh, tại góc đặt cánh $\alpha = 15^\circ$ hệ số lực nâng c_l của profile NACA 4412 giảm 14%, còn hệ số lực cản c_d tăng 34%.

Từ khóa: Xâm thực profile cánh; NACA 4412; CFD.

ABSTRACT

Cavitation is the phenomenon in which a liquid undergoes local vaporization in regions having pressure below the saturated vapor pressure. When the vapor bubbles are transported to regions of higher pressure, they collapse violently, generating intense pressure pulses that damage the surface of impeller blades, cause noise and vibration, and reduce the hydraulic efficiency of the machine during operation. For a hydrofoil, cavitation typically occurs on the suction side, at the leading edge, and at the trailing edge; it leads to a reduction in the lift coefficient, an increase in the drag coefficient, and induces fluctuations in the loads acting on it. Therefore, investigating the

influence of cavitation on the hydrodynamic characteristics of a hydrofoil is of great importance for the design and performance prediction of hydraulic machinery blades operating efficiently under cavitating conditions. In this study, a computational fluid dynamics (CFD) approach is employed to investigate the effects of cavitation on the hydrodynamic performance of the hydrofoil NACA 4412. The full cavitation model coupled with the RNG $k-\varepsilon$ turbulence model is used to simulate the formation, development, and collapse of cavitation bubbles occurring on the suction side, leading edge, and trailing edge of the hydrofoil NACA 4412. The simulation results indicate that the occurrence of cavitation significantly reduces the lift coefficient and increases the drag coefficient, while also causing large pressure fluctuations in the trailing-edge region of the hydrofoil. At the attack angle $\alpha = 15^\circ$, the lift coefficient C_l of the hydrofoil NACA 4412 decreases about 14%, whereas the drag coefficient C_d increases about 34%.

Keywords: Cavitation; NACA 4412; CFD.

1. GIỚI THIỆU CHUNG

Profile cánh NACA 4412, có nguồn gốc từ chương trình nghiên cứu khí động học của Ủy ban Cố vấn Quốc gia Hoa Kỳ về Hàng không vào những năm 1930, được ứng dụng rộng rãi trong nhiều lĩnh vực khí động học và thủy động lực học nhờ khả năng tạo lực nâng lớn và hiệu suất làm việc ổn định. Trong ngành hàng không, nó thường được dùng cho cánh máy bay cỡ nhỏ và máy bay huấn luyện, nơi yêu cầu đặc tính nâng tốt ở vận tốc thấp. Trong lĩnh vực năng lượng gió, profile này được sử dụng cho các cánh tua-bin nhờ khả năng tạo ra mô-men quay lớn, làm việc với hiệu suất cao với nhiều dải vận tốc gió khác nhau. Ngoài ra, NACA 4412 còn được nghiên cứu và áp dụng trong thiết kế cánh bánh công tác của các máy thủy lực cánh dẫn như bơm, tua-bin nước với yêu cầu tối ưu hóa hiệu suất và giảm tổn thất năng lượng trong quá trình hoạt động. Tuy nhiên, trong quá trình làm việc, khi áp suất chất lỏng giảm xuống thấp hơn áp suất hơi bão hòa, trên bề mặt profile cánh NACA 4412 hình thành các bóng hơi xâm thực. Các bóng hơi xâm thực này hình thành và phá hủy rất nhanh trong khoảng 10^{-6} s, áp suất tại vùng bóng hơi bị phá hủy có thể lên đến hàng trăm MPa gây hư hỏng bề

mặt cánh, tạo ra dòng chảy rối, và dao động áp suất cục bộ từ đó làm tăng lực cản tác động lên profile cánh [1-3]. Do đó, việc nghiên cứu ảnh hưởng của hiện tượng xâm thực đến đặc tính thủy động lực học của profile cánh NACA 4412 là vấn đề thời sự được quan tâm trong thời gian dài. Hiện nay, có nhiều phương pháp đã được phát triển để nghiên cứu sự hình thành, phát triển và ảnh hưởng của hiện tượng xâm thực đến đặc tính thủy động lực học của profile cánh như phương pháp lý thuyết, phương pháp thực nghiệm, phương pháp tính toán mô phỏng số... Tuy nhiên, với sự phát triển của khoa học máy tính, phương pháp tính toán mô phỏng số đã trở thành công cụ đầy sức mạnh khắc phục được những hạn chế của phương pháp nghiên cứu lý thuyết và thực nghiệm trong nghiên cứu xâm thực. Do đó, mục tiêu chính của bài báo này là ứng dụng phương pháp tính toán mô phỏng số (CFD) khảo sát ảnh hưởng của hiện tượng xâm thực đến đặc tính thủy động lực học của profile cánh NACA 4412.

2. CƠ SỞ LÝ THUYẾT

Trong nghiên cứu này, chất lỏng được coi là chất lỏng không nén được, dòng chảy bao quanh profile cánh được coi là dòng hai pha

gồm có pha lỏng và pha hơi. Đặc trưng dòng chảy được tính toán mô phỏng bằng mô hình rối RNG k-ε, cơ sở lý thuyết tính toán mô phỏng trường dòng bao quanh profile cánh là phương trình liên tục và phương trình động lượng được trình bày như sau [3, 4]:

- Phương trình liên tục:

$$\frac{\partial(\rho_m)}{\partial r} + \nabla \cdot (\rho_m \vec{v}) = 0 \quad (1)$$

- Phương trình động lượng cho dòng hỗn hợp:

$$\frac{\partial(\rho_m \vec{v}_m)}{\partial r} + \nabla \cdot (\rho_m \vec{v}_m \vec{v}_m) = -\nabla p + \nabla \cdot [\mu_m (\nabla \vec{v} + \nabla \vec{v}^T)] + \rho_m \vec{g} + \vec{F} \quad (2)$$

Trong đó, n là số pha, \vec{v}_m là véc tơ vận tốc của hỗn hợp, p là áp suất, μ_m là độ nhớt của hỗn hợp, \vec{g} véc tơ gia tốc trọng trường và \vec{F} là véc tơ lực khối. Khối lượng riêng của hỗn hợp ρ_m và phân bố thể tích hơi α được liên hệ với nhau bởi phương trình:

$$\rho_m = \alpha \rho_v + (1 - \alpha) \rho_l \quad (3)$$

Trong đó, α tỷ lệ pha hơi trong hỗn hợp; các ký hiệu m, v và l lần lượt chỉ pha hỗn hợp, pha hơi và pha lỏng.

Phần trăm thể tích pha hơi hình thành trong quá trình xâm thực được xác định theo mô hình xâm thực Schnerr & Sauer [32] như sau:

$$\frac{\partial(\alpha \rho_v)}{\partial r} + \nabla \cdot (\alpha \rho_v \vec{v}) = R_e - R_c \quad (4)$$

Trong đó, R_e và R_c lần lượt biểu thị các thành phần bay hơi và ngưng tụ. R_e và R_c được tính toán bằng công thức của Schnerr & Sauer như sau:

Khi áp suất hóa hơi của chất lỏng $P_v \geq P$:

$$R_e = \frac{\rho_v \rho_l}{\rho} \alpha (1 - \alpha) \frac{3}{\mathfrak{R}_B} \sqrt{\frac{2(P_v - P)}{3\rho_l}} \quad (5)$$

Khi $P_v \leq P$:

$$R_c = \frac{\rho_v \rho_l}{\rho} \alpha (1 - \alpha) \frac{3}{\mathfrak{R}_B} \sqrt{\frac{2(P - P_v)}{3\rho_l}} \quad (6)$$

Ở đây, P_v là áp suất hơi của chất lỏng, \mathfrak{R}_B là bán kính bóng hơi xâm thực phụ thuộc vào tỷ lệ pha hơi α và mật độ bóng hơi trong hỗn hợp và được xác định bằng công thức sau:

$$\mathfrak{R}_B = \left[\left(\frac{\alpha}{1 - \alpha} \right) \left(\frac{3}{4\pi n_b} \right) \right]^{1/3} \quad (7)$$

Số xâm thực σ (cavitation number) dùng để đánh giá khả năng xuất hiện và mức độ phát triển của hiện tượng xâm thực trong dòng chảy chất lỏng quanh vật thể được xác định theo công thức sau:

$$\sigma = \frac{P - P_v}{0.5 \times \rho \times v^2} \quad (8)$$

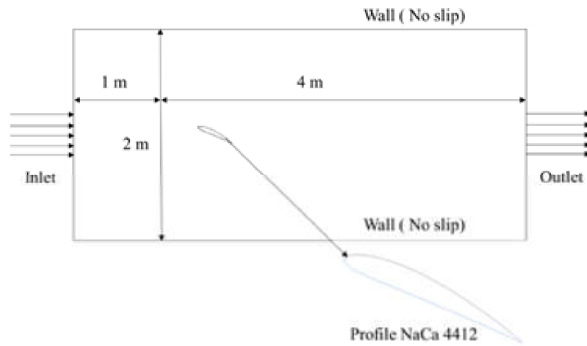
P là áp suất của dòng chất lỏng khảo sát và P_v là áp suất hơi của chất lỏng, tức là áp suất tại đó hiện tượng xâm thực bắt đầu xảy ra.

3. TÍNH TOÁN MÔ PHỎNG SỐ

3.1. Mô hình tính toán

Trong bài báo này, profile cánh NACA 4412 có chiều dài dây cung là 100 mm, độ cong đường nhân là 4 mm, và chiều dày lớn nhất $t_{\max} = 12$ mm. Miền không gian tính toán là hình chữ nhật có kích thước 5 m × 2 m được sử dụng cho quá trình mô phỏng tất cả các trường hợp xâm thực, trong đó đầu vào được bố trí cách mép vào của profile cánh 1,5 m. Để nghiên cứu ảnh hưởng của hiện tượng xâm thực đến đặc

tính thủy động lực học của profile NACA 4412, nhóm tác giả thực hiện tính toán với các góc đặt cánh α từ 0° đến 19° trong điều kiện làm việc có xâm thực và không có xâm thực.



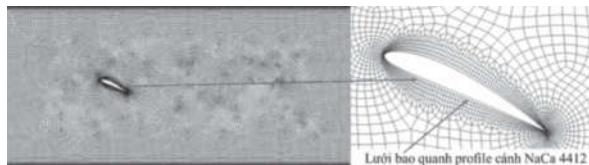
Hình 1. Miền không gian khảo sát và các điều kiện biên

3.2. Chia lưới và điều kiện biên

Để xác định được kích thước và số lượng lưới phù hợp cho các trường hợp tính toán mô phỏng nhóm, tác giả tiến hành tính toán với profile cánh NACA 4412 dưới góc đặt cánh 15° và số xâm thực $\sigma = 1$. Miền không gian tính toán sau khi chia lưới, kết quả tính toán với các số lượng lưới khác nhau trên Hình 2, Bảng 1. Kết quả tính toán trong Bảng 1 cho thấy rằng, khi số lượng lưới lớn hơn 23217 phần tử thì hệ số lực nâng của profile NACA 4412 gần như không thay đổi, hay nói cách khác là kết quả tính toán trong quá trình mô phỏng hội tụ. Do đó, để đảm bảo được độ chính xác của kết quả tính toán mô phỏng và tiết kiệm thời gian tính toán số lượng phần tử lưới là 23217 được lựa chọn cho các mô phỏng tiếp theo.

Bảng 1. Kết quả tính toán hệ số lực nâng của profile cánh NACA 4412 tại góc đặt $\alpha = 15^\circ$ với các số lượng phần tử lưới khác nhau.

STT	Số phần tử	Hệ số lực nâng c_L	STT	Số phần tử	Hệ số lực nâng c_L
1	19528	1,650	3	23217	1,655
2	21416	1,652	4	24518	1,655



Hình 2. Miền không gian tính toán sau khi chia lưới.

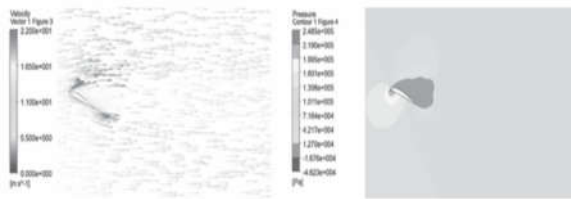
Đặc tính của dòng chảy bao quanh profile cánh được tính toán, mô phỏng gần đúng bằng phương pháp thể tích hữu hạn (FVM) trong gói phần mềm Ansys Fluent. Mô hình rối RNG k- ϵ với ưu điểm mô phỏng chính xác đặc tính của lớp biên và đặc tính của dòng chảy tự do cách xa thành rắn được sử dụng mô phỏng hiện tượng xâm thực bao quanh profile cánh, độ tin cậy của mô hình rối này đã được chứng

minh trong các bài báo [1-3, 5, 6] khi nghiên cứu đánh giá đặc tính thủy động lực học của các hydrofoil cánh. Mô hình xâm thực Schnerr & Sauer được sử dụng để mô phỏng sự chuyển pha của chất lỏng từ trạng thái lỏng sang trạng thái hơi, cho phép dự đoán chính xác sự hình thành và phá hủy của bọt hơi xâm thực trong trường dòng chảy chuyển động với vận tốc lớn. Tiêu chuẩn hội tụ được thiết lập cho các biến trong quá trình tính toán với sai số tương đối 10^{-4} .

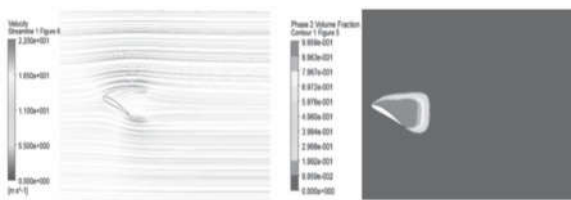
4. KẾT QUẢ VÀ PHÂN TÍCH KẾT QUẢ

4.1. Trường phân bố vận tốc, áp suất, phân bố pha quanh profile cánh

Trường phân bố vận tốc và áp suất bao quanh profile cánh NACA 4412 tại góc đặt cánh $\alpha = 15^\circ$ thể hiện rõ đặc trưng của chế độ làm việc gần ngưỡng góc đặt tới hạn (Hình 3). Tại mặt hút, dòng chảy bị tăng tốc mạnh ngay sau mép vào, tạo nên vùng vận tốc lớn, áp suất thấp do độ cong của đường nhân tương đối lớn của profile, vận tốc lớn nhất của dòng chảy tại mép vào khoảng 22 m/s. Tuy nhiên, khi tiến gần phía gần đuôi cánh xuất hiện vùng biến thiên áp suất âm làm giảm động năng của dòng chảy và dẫn đến hiện tượng tách lớp biên cục bộ vùng gần mép thoát. Ngược lại, tại mặt đẩy của profile cánh vận tốc dòng chảy có giá trị nhỏ hơn, áp suất lớn hơn so với mặt hút, sự chênh lệch áp suất giữa mặt hút và mặt đẩy trên profile cánh sinh ra lực nâng trên cánh. Càng gần phần mép thoát của profile vùng áp suất thấp càng lớn làm tăng tổn thất năng lượng, tăng lực cản, và làm tăng hiện tượng tách dòng ra khỏi mép thoát, do đó làm giảm hiệu suất thủy động lực học của profile cánh.



Hình 3. Phân bố vận tốc, áp suất quanh profile cánh NACA 4412 tại góc đặt cánh 15° .



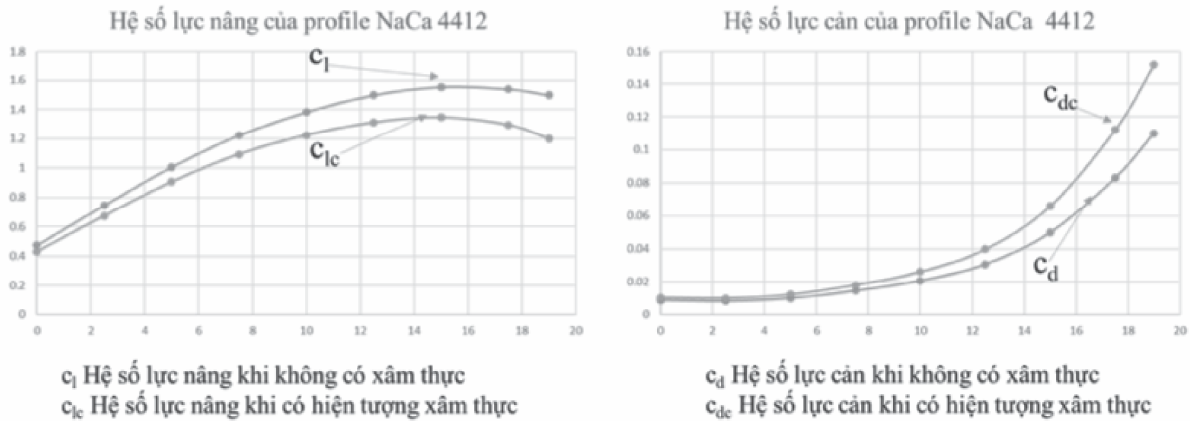
Hình 4. Đường dòng và phân bố tỷ lệ phần trăm thể tích pha hơi bao quanh profile cánh NACA 4412 tại góc đặt 15° .

Hình 4 là trường dòng và phân bố tỷ lệ phần trăm thể tích pha hơi bao quanh profile cánh tại góc đặt $\alpha = 15^\circ$. Trên mặt hút của cánh,

kéo dài từ vùng mép dẫn đến mép thoát, áp suất giảm mạnh xuống dưới áp suất hơi bão hòa, dẫn đến sự hình thành và phát triển các bóng hơi xâm thực. Tại góc đặt $\alpha = 15^\circ$, tỷ phần thể tích pha hơi trên mặt hút của profile đạt xấp xỉ 100%, hình thành một túi hơi bao phủ phần lớn bề mặt hút của cánh. Trong vùng dòng chảy gần mặt hút profile, các bóng hơi xâm thực có xu hướng mất ổn định và tách khỏi bề mặt cánh ở khu vực gần mép thoát, từ đó phát triển thành các đám mây xâm thực và lan truyền vào vùng áp suất thấp phía sau profile. Quá trình hình thành, phát triển và phá hủy của các bóng hơi xâm thực diễn ra liên tục theo thời gian khi profile làm việc ở góc đặt lớn, gây ra sự dao động mạnh của trường phân bố áp suất bao quanh cánh, làm giảm hiệu suất thủy động lực học và đồng thời gây ra dao động trong quá trình làm việc.

4.2. Ảnh hưởng của hiện tượng xâm thực đến đặc tính thủy động lực học profile cánh

Hình 5 là hệ số lực nâng, lực cản của profile cánh trong hai trường hợp làm việc không có xâm thực và có xâm thực tại các góc đặt cánh α khác nhau. Trong hai trường hợp làm việc, hệ số lực nâng của profile cánh tăng gần như tuyến tính với góc đặt α , hệ số lực nâng của profile đạt giá trị lớn nhất tại góc đặt $\alpha = 15^\circ$. Tuy nhiên, khi làm việc trong điều kiện xâm thực hệ số lực nâng của profile cánh nhỏ hơn so với trường hợp làm việc trong điều kiện không bị xâm thực, ở góc đặt cánh α càng lớn thì hệ số lực nâng giảm càng lớn. Tại góc đặt $\alpha = 0^\circ$ hệ số lực nâng c_{lc} của profile cánh làm việc trong điều kiện xâm thực nhỏ hơn hệ số lực nâng c_l khoảng 9%, tại góc đặt $\alpha = 15^\circ$ hệ số lực nâng c_{ld} thấp hơn c_l khoảng 14%.



Hình 5. Hệ số lực nâng và hệ số lực cản của profile NACA 4412 tại các góc đặt α khác nhau.

Ngược lại, trong điều kiện xâm thực hệ số lực cản c_{dc} của profile cánh luôn lớn hơn hệ số lực cản c_d trong trường hợp không có xâm thực, khi góc đặt α tăng thì hệ số lực cản tăng theo, tại góc đặt $\alpha = 19^\circ$ hệ số lực cản c_{dc} lớn hơn hệ số lực cản c_d khoảng 33%. Điều này có thể giải thích như sau, khi góc đặt cánh tăng, vùng áp suất dưới áp suất hơi bão hòa của chất lỏng trên bề mặt hút của profile cánh có diện tích tăng lên, điều này dẫn đến diện tích bề mặt cánh bị xâm thực tăng lên. Sự hình thành, phát triển các túi hơi xâm thực trong vùng này làm giảm sự chênh lệch áp suất giữa mặt hút và mặt đẩy của cánh từ đó làm giảm hệ số lực nâng của profile cánh. Đồng thời, hiện tượng xâm thực làm xuất hiện dòng chảy ngược, tăng hiện tượng tách dòng trên mặt hút của profile cánh từ đó làm tăng hệ số lực cản của profile.

5. KẾT LUẬN

Bài báo đã sử dụng mô hình rối RNG k- ϵ và mô hình xâm thực Schnerr – Sauer để nghiên cứu ảnh hưởng của hiện tượng xâm thực trên profile cánh NACA 4412 tại các góc đặt cánh, và số xâm thực khác nhau. Sự hình thành, phát triển, phá hủy của các bóng hơi xâm thực và ảnh hưởng của nó đến trường dòng chảy bao

quanh profile cũng như đặc tính của nó được phân tích chi tiết. Dưới đây là một số kết quả quan trọng của bài báo.

- Hiện tượng xâm thực có ảnh hưởng rất lớn đến đặc tính thủy động lực học của profile cánh NACA 4412, nó làm xuất hiện dòng chảy ngược, sự bất ổn định trường phân bố áp suất, và là nguyên nhân của hiện tượng tách dòng trên bề mặt hút của profile. Từ đó làm giảm hiệu suất thủy động lực học của profile, gây ra rung động trong quá trình làm việc.

- Trong điều kiện làm việc không xâm thực và có xâm thực, hệ số lực nâng của profile cánh NACA 4412 đều tăng khi góc đặt α tăng từ 0° đến 15° , sau đó giảm nhanh từ 15° đến 19° . Hệ số lực nâng của cánh làm việc trong điều kiện không xâm thực c_l luôn lớn hơn hệ số lực nâng của cánh khi làm việc trong điều kiện xâm thực c_{lc} . Tại góc đặt $\alpha = 15^\circ$, hệ số lực nâng của profile cánh làm việc trong điều kiện xâm thực giảm 14% so với làm việc trong điều kiện không có xâm thực.

- Trong cả hai điều kiện làm việc, hệ số lực cản của profile cánh đều tăng khi góc đặt cánh α tăng, quy luật tăng của hệ số lực

cản tuân theo quy luật hàm mũ. Hệ số lực cản của profile làm việc trong điều kiện không xâm thực c_d luôn nhỏ hơn trong điều kiện có xâm thực c_{dc} . Tại góc đặt $\alpha = 15^\circ$, hệ số lực cản của profile cánh làm việc trong điều kiện không xâm thực c_d nhỏ hơn so với làm việc trong điều kiện xâm thực c_{dc} là 34%.

Lời cảm ơn:

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường Đại học Hàng hải Việt Nam trong đề tài mã số: DT25-26-156. ❖

Ngày nhận bài: **12/01/2026**

Ngày phản biện: **20/01/2026**

Tài liệu tham khảo:

- [1]. Kumar, P., E. Kadivar, and O. el Moctar, “*Experimental study of cavitation control on a hydrofoil with bio-inspired riblets using proper orthogonal decomposition*”. *Ocean Engineering*, 2025. 334: p. 121500.
- [2]. Biswas, S. and R. Harish, “*Effect of unsteady cavitation on hydrodynamic performance of NACA 4412 Hydrofoil with novel triangular slot*”. *Heliyon*, 2025. 11(3): p. e42266.
- [3]. Li, H., et al., “*Suppression of unsteady cavitation around oscillating hydrofoils using spanwise obstacles near trailing edge*”. *Energy*, 2025. 330: p. 136754.
- [4]. ANSYS Fluent Theory Guide. 2013. 814.
- [5]. Kumar, P., S. Singh, and R. Reddy, “*Computational investigation of cavitating flow on 3D NACA 4412 hydrofoil with arc dimple*”. *Materials Today: Proceedings*, 2024. 103: p. 190-197.
- [6]. Wang, Y., et al., “*Effects of leading-edge protuberances geometric parameters of hydrofoils on cavitation flow field and acoustic field*”. *Ocean Engineering*, 2025. 341: p. 122612.