

Nghiên cứu tính toán lực cản tàu ngầm ở các chế độ khai thác khác nhau bằng phương pháp CFD

■ **KS. HÀ MẠNH CƯỜNG; TS. LÊ MINH THỤ**

Viện Kỹ thuật Hải quân

■ **PGS. TS. TRẦN NGỌC TỬ^(*)**

Trường Đại học Hàng hải Việt Nam

Email: ^(*)tutn.dt@vimaru.edu.vn

TÓM TẮT: Bài báo sử dụng phương pháp CFD vào trong mô phỏng, tính toán lực cản tàu ngầm ở 3 chế độ gồm: Chế độ chạy nổi, chế độ chạy ngầm sát mặt nước và chế độ chạy ngầm hoàn toàn ở các tốc độ khác nhau. Sự thay đổi các thành phần lực cản tàu khi chạy ở 3 chế độ khác nhau được đưa ra và phân tích trong bài báo. Ngoài ra, bài báo còn đưa ra các hình ảnh về dòng chảy bao quanh thân tàu ngầm để làm rõ hơn sự thay đổi lực cản tàu khi chạy ở các chế độ khác nhau. Kết quả mô phỏng ở chế độ chạy ngầm hoàn toàn của tàu cho sai số rất nhỏ so với kết quả thử mô hình trong bể thử. Mô hình tàu ngầm được sử dụng trong nghiên cứu là mô hình tàu ngầm DARPA SUBOFF.

TỪ KHÓA: Lực cản, tàu ngầm, CFD, chế độ chuyển động.

ABSTRACT: The paper uses CFD method to predict the submarine resistance in three different operating regimes: emerged, near free surface and submerged at different speeds. The variation in resistance components under three different operating regimes is provided and analyzed in this paper. Moreover, the paper also provides images of the flow around the submarine's hull to further clarify to change the ship's resistance component in different regimes. The numerical obtained results show that, the simulation results in submerged regime show good agreement with experimental data. The submarine model used in this study is the DARPA SUBOFF submarine model.

KEYWORDS: Resistance, submarine, CFD, operating condition.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Việc xác định lực cản tàu với độ chính xác cần thiết là bài toán hết sức quan trọng trong thiết kế tàu nói chung và tàu ngầm nói riêng bởi nó liên quan đến việc thiết kế đúng chong chóng, lựa chọn đúng công suất máy cần thiết để tàu đạt được tốc độ thiết kế đề ra.

Đối với tàu ngầm trong quá trình khai thác, nó có thể hoạt động ở ba chế độ khác nhau gồm: Chế độ chạy nổi

trên mặt nước, chế độ ngầm chạy sát mặt nước (chế độ kính tiềm vọng) và chế độ chạy ngầm hoàn toàn dưới nước. Ứng với mỗi chế độ khai thác khác nhau của tàu thì mối quan hệ giữa các lực cản thành phần của tàu sẽ khác nhau. Ví dụ, khi tàu ngầm chạy ở chế độ nổi hoặc chạy ngầm sát mặt nước sẽ xuất hiện thành phần lực cản sóng do ảnh hưởng của mặt thoáng chất lỏng trong khi chạy ở chế độ ngầm thì không có thành phần lực cản này [1].

Việc ứng dụng CFD vào trong việc mô phỏng tính toán lực cản tàu ngầm đã được nhiều tác giả trên thế giới thực hiện [2-7]. Tác giả Dogancan Uzun cùng các cộng sự [3] đã tiến hành nghiên cứu ảnh hưởng của rong rêu hà bám đến sự thay đổi các thành phần lực cản, công suất có ích và dòng theo của tàu ngầm hoạt động ở chế độ chạy ngầm. Kết quả nghiên cứu được nhóm tác giả đối sánh với kết quả thử trong bể thử ở trường hợp tàu không có độ nhám. Tác giả Dong Li cùng các cộng sự [7] đã tiến hành mô phỏng tính toán lực cản tàu ngầm khi hoạt động ở chế độ sát mặt nước với các độ sâu khác nhau. Kết quả nghiên cứu đưa ra sự thay đổi về lực cản, hình dáng sóng, phân bố áp suất trên bề mặt thân tàu ngầm khi chạy gần mặt nước với các độ sâu khác nhau.

Bài báo này, trên cơ sở kế thừa các kết quả nghiên cứu đi trước sẽ tiến hành mô phỏng tính toán lực cản tàu ngầm ở ba chế độ khai thác như đã nêu ở trên bằng phương pháp CFD. Sự thay đổi về các thành phần lực cản và dòng chảy bao quanh tàu ngầm khi chạy ở các chế độ khác nhau sẽ được chỉ ra và phân tích trong nghiên cứu này. Đối tượng nghiên cứu được sử dụng trong bài báo này là mô hình tàu ngầm DARPA-SUBOFF.

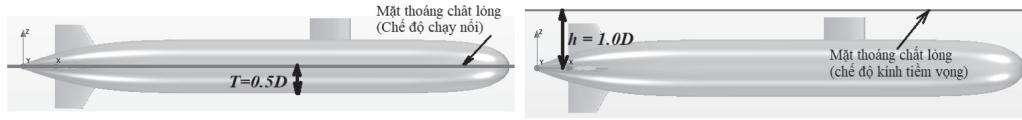
2. MÔ PHỎNG, TÍNH TOÁN LỰC CẢN TÀU NGẦM Ở CÁC CHẾ ĐỘ KHAI THÁC KHÁC NHAU

2.1. Giới thiệu về mô hình tàu ngầm DARPA-SUBOFF

Mô hình tàu ngầm DARPA SUBOFF do Phòng Carderock thuộc Trung tâm Naval Surface Warfare center và bể thử Hydronautics Ship tiến hành thiết kế và thử nghiệm. Tàu có các thông số chủ yếu như sau: Chiều dài 4,356 m, đường kính thân tàu 0,508 m, chiều dài của đài chỉ huy là 0,368 m. Hình dáng 3D của tàu DARPA SUBOFF được trình bày trên *Hình 2.1*, các kết quả thử mô hình của tàu này ở chế độ chạy ngầm được đưa ra trong tài liệu [8].

2.2. Các trường hợp tính

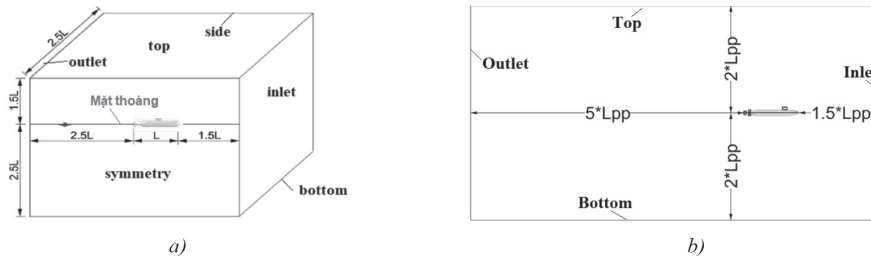
Trong nghiên cứu này, nhóm tác giả thực hiện việc mô phỏng chế độ nổi ở chiều chìm bằng 1/2 chiều cao thân chính của tàu, chế độ chạy sát mặt nước với độ sâu bằng chiều cao thân chính (tính từ gốc tọa độ) và chế độ chạy ngầm được thể hiện như trên Hình 2.1. Dải tốc độ tính toán: Tính toán ở 5 tốc độ gồm: 3,05, 5,144, 6,1, 7,16 và 8,23 m/s. Tàu chạy trên nước tính với khối lượng riêng của nước $\rho = 998,67 \text{ kg/m}^3$ và độ nhớt động học của nước là $\nu = 1,080.10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$.



Hình 2.1: Mô hình tàu ngầm và các trường hợp tính ở trạng thái chạy nổi và chạy ở chế độ sát mặt nước

2.3. Thiết lập mô phỏng số

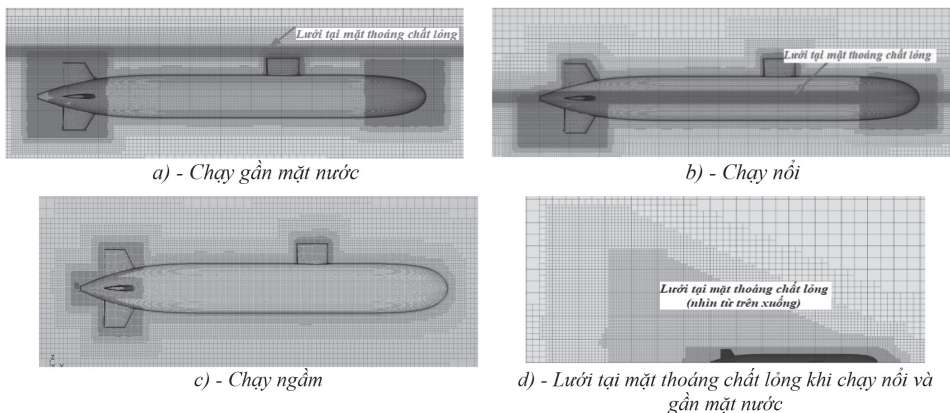
Đối với bài toán mô phỏng tính toán lực cản tàu ngầm khi chạy nổi và chạy ở chế độ sát mặt nước miền chất lỏng tính toán sẽ gồm có 2 pha (lỏng và khí). Khi đó, kích thước miền tính toán sẽ được xác định giống như đối với bài toán tính toán lực cản cho tàu nổi thông thường. Theo đó, kích thước miền tính toán được xác định theo hướng dẫn của Hiệp hội Bể thử quốc tế (ITTC) [9] là một hàm số phụ thuộc vào chiều dài tàu như thể hiện trên Hình 2.2a. Trong trường hợp tàu chạy ngầm (khoảng cách từ đáy tàu ngầm đến đáy biển lớn hơn 1/2 lần chiều dài tàu và khoảng cách từ điểm cao trên đài chỉ huy đến mặt thoáng lớn hơn 1/3 lần chiều dài tàu [10]). Lúc này ảnh hưởng của mặt thoáng cũng như ảnh hưởng của độ sâu đến lực cản tàu là bằng 0 [10]. Trong trường hợp này, miền tính toán sẽ chỉ có một pha là pha lỏng (nước) [11, 12] và kích thước của miền tính toán được xác định như trên Hình 2.2b [11].



Hình 2.2: Kích thước miền tính toán khi tàu áp dụng cho trường hợp tàu ngầm hoạt động ở 3 chế độ khác nhau

Loại điều kiện biên được áp dụng với miền tính toán trong tính toán lực cản tàu ngầm ở chế độ chạy nổi và chế độ sát mặt nước lựa chọn như sau: Biên phía trước (inlet), biên phía trên (top) và phía dưới (bottom) sẽ sử dụng điều kiện biên là tốc độ dòng đến (velocity inlet), biên phía sau - áp suất đầu ra (pressure outlet), mặt đối xứng (symmetry) và biên phía hông (side) - mặt đối xứng (symmetry plane) [7]. Loại điều kiện biên áp dụng đối với miền tính toán khi tàu chạy ngầm là: Biên phía trước là tốc độ dòng đến (velocity inlet), phía sau - áp suất đầu ra (pressure outlet), phía trên, dưới, mặt hông - mặt đối xứng (symmetry plane) [4]. Loại điều kiện biên được áp dụng đối với tàu ngầm là tường không trượt (No-slip wall).

Loại lưới được sử dụng để chia miền chất lỏng ra thành các thể tích hữu hạn là lưới lục diện, lưới lăng trụ được sử dụng để mô phỏng lớp biên bao quanh tàu ngầm, lưới bề mặt được sử dụng để chia bề mặt thân tàu ngầm ra thành các bề mặt hữu hạn. Lưới sẽ được làm mịn tại các vị trí quan trọng như (khu vực gần thân tàu, khu vực mũi, đuôi và đài chỉ huy). Kết quả sau khi chia lưới được trình bày trên Hình 2.3. Mô hình vật lý được sử dụng trong mô phỏng dòng bao quanh tàu ngầm là mô hình chất lỏng thực RANSE. Mô hình dòng rối được sử dụng trong bài báo là mô hình dòng rối SST K-omega bởi theo [4] đây là một trong những mô hình dòng rối cho kết quả gần với kết quả thử nhất so với việc sử dụng các mô hình dòng rối khác. Phương pháp thể tích chất lỏng được sử dụng để mô phỏng tương tác giữa hai pha nước và không khí khi tàu hoạt động ở chế độ chạy nổi và chế độ sát mặt nước.



Hình 2.3: Kết quả chia lưới

3. KẾT QUẢ MÔ PHỎNG

Kết quả mô phỏng tính toán lực cản tàu ngầm ở 3 chế độ khai thác khác nhau được trình bày trên *Bảng 3.1* và các hình từ 3.1 đến 3.4, trong đó có sự so sánh kết quả tính toán với kết quả thử trong bể thử ở chế độ chạy ngầm (các ký hiệu R_T , R_F , R_P ở đây lần lượt là lực cản toàn phần, lực cản ma sát và lực cản áp suất). Từ kết quả thu được trên *Bảng 3.1* và các Hình từ 3.1 đến 3.4, ta có thể đưa ra một số nhận xét sau:

Bảng 3.1. Bảng kết quả tính toán lực cản tàu ngầm ở 3 chế độ có sự so sánh với kết quả thử

V [m/s]	Kết quả mô phỏng tính toán									Kết quả thử	% sai số
	Chạy ngầm			Chạy nổi			Chạy kính tiềm vọng			Chạy ngầm	
	R_T [N]	R_F [N]	R_P [N]	R_T [N]	R_F [N]	R_P [N]	R_T [N]	R_F [N]	R_P [N]	R_T [N]	
3,05	105,80	89,05	16,75	167,560	47,48	120,08	239,47	90,64	148,83	102,30	3,42
5,10	286,38	237,98	48,40	359,012	199,75	159,27	449,50	241,60	207,90	283,80	0,91
6,10	394,98	328,51	66,47	466,726	290,96	175,76	512,14	329,80	182,34	389,20	1,48
7,16	528,73	438,20	90,53	599,478	402,97	196,51	614,49	443,35	171,13	526,60	0,40
8,23	684,55	566,52	118,03	765,500	512,37	253,13	751,72	573,38	178,34	675,60	1,32

- Kết quả tính toán mô phỏng lực cản tàu ở chế độ chạy ngầm rất gần so với kết quả thử mô hình trong bể thử với sai số nằm trong dải từ 0,4 đến 3,42%.

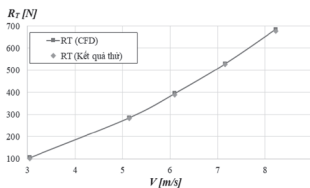
- Dưới cùng một tốc độ, lực cản toàn phần của tàu khi chạy ngầm nhỏ hơn so với khi chạy nổi và chạy sát mặt nước.

- Khi tàu chạy ở chế độ ngầm, thành phần lực cản chính của tàu là thành phần lực cản ma sát (chiếm trên 80% lực cản toàn phần của tàu), điều này hoàn toàn phù hợp với kết quả nghiên cứu được chỉ ra trong [1].

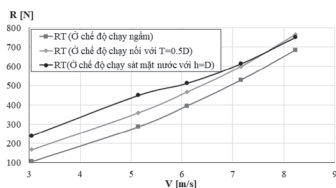
- Thành phần lực cản áp suất ở chế độ chạy ngầm nhỏ hơn so với khi tàu chạy ở chế độ chạy nổi và chế độ sát mặt nước. Điều này được giải thích là do khi tàu chạy ở chế độ chạy nổi và sát mặt nước, thành phần lực cản áp suất của tàu ngoài thành phần nhớt còn có thêm thành phần tạo sóng do ảnh hưởng của mặt thoáng chất lỏng, từ đó dẫn tới thành phần lực cản áp suất ở hai chế độ này lớn hơn so với chế độ chạy ngầm (*Hình 3.4*). Ngoài ra, trên *Hình 3.4* ta còn quan sát thấy bước sóng cản áp suất tại tốc độ 5,1 m/s khi tàu chạy ở chế độ sát mặt nước. Kết quả này hoàn toàn trùng khớp với các kết quả nghiên cứu trong các công trình [13, 14].

- Thành phần lực cản ma sát ở chế độ chạy nổi nhỏ hơn so với ở chế độ chạy ngầm và sát mặt nước. Trong đó, chế độ sát mặt nước và chạy ngầm lực cản ma sát có giá trị gần như nhau (*Hình 3.3*). Điều này có thể được giải thích một phần là do thành phần lực cản này phụ thuộc vào diện tích mặt vỏ tàu. Ở chạy ngầm và chạy sát mặt nước, diện tích mặt ướt vỏ tàu là giống nhau và lớn hơn so với diện tích mặt ướt vỏ tàu khi chạy nổi.

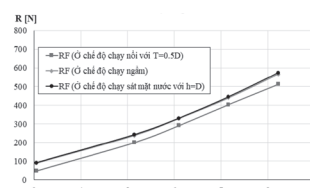
Các hình ảnh về sự khác nhau ở đường dòng bao quanh thân tàu, phân bố áp suất động, ứng suất tiếp ở ba chế độ chuyển động khác nhau và hình dáng sóng do tàu tạo ra khi chuyển động ở chế độ chạy nổi và sát mặt nước được biểu diễn trên các *Hình từ 3.5 đến 3.8* có thể giải thích cho sự khác nhau về lực cản tàu ngầm khi chạy ở các chế độ khác nhau.



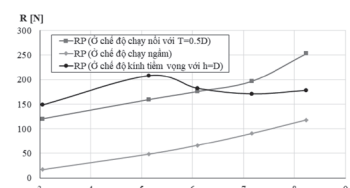
Hình 3.1: So sánh giữa kết quả tính toán bằng phương pháp CFD với kết quả thử mô hình ở chế độ chạy ngầm



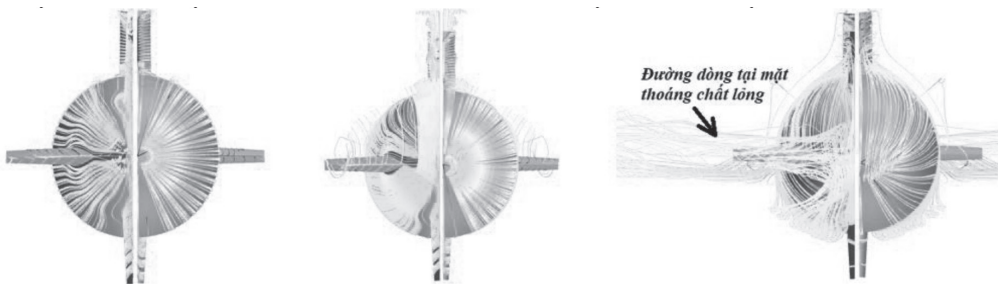
Hình 3.2: Đồ thị quan hệ giữa lực cản toàn phần với tốc độ tàu ở 3 chế độ khai thác khác nhau



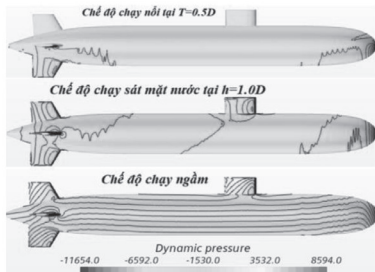
Hình 3.3: Đồ thị quan hệ giữa lực cản ma sát với tốc độ tàu ở 3 chế độ khai thác khác nhau



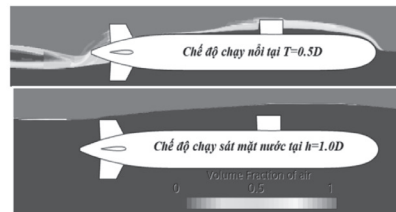
Hình 3.4: Đồ thị quan hệ giữa lực cản áp suất với tốc độ tàu ở 3 chế độ khai thác khác nhau



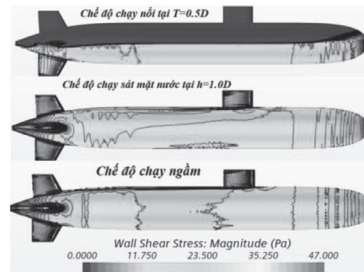
Hình 3.5: Sự khác nhau về đường dòng bao quanh tàu ngầm khi chạy ở các chế độ khác nhau tại tốc độ V = 6,1 m/s



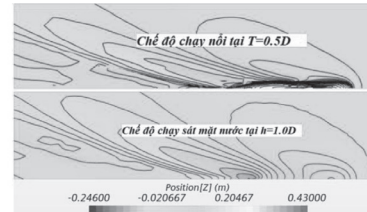
Hình 3.6: Sự khác nhau trong phân bố áp suất động khi tàu chạy ở các chế độ khác nhau tại tốc độ $V = 3,05$ m/s



Hình 3.8: Tương tác giữa hai pha nước và không khí khi tàu chạy nổi và sát mặt nước tại tốc độ $V = 6,1$ m/s



Hình 3.7: Sự khác nhau trong phân bố ứng suất tiếp khi tàu chạy ở các chế độ khác nhau tại tốc độ $V = 3,05$ m/s



Hình 3.9: Hình dáng sóng do tàu tạo ra khi chạy nổi và sát mặt nước tại tốc độ $V = 6,1$ m/s

4. KẾT LUẬN

Bài báo đã ứng dụng thành công CFD vào trong tính toán lực cản tàu ngầm hoạt động ở 3 chế độ khác nhau. Sự khác nhau trong thiết lập mô phỏng tính toán khi tàu chạy ở 3 chế độ khác nhau được đề cập đến trong bài báo. Kết quả mô phỏng tính toán thu được ở chế độ chạy ngầm rất gần với kết quả thử mô hình (sai số dao động trong dải từ 0,4 đến 3,42%). Phân tích sự thay đổi các thành phần lực cản của tàu chỉ ra rằng, dưới cùng một tốc độ, lực cản toàn phần của tàu khi chạy ngầm nhỏ hơn so với khi chạy nổi và chạy sát mặt nước; dưới ảnh hưởng của mặt thoáng chất lỏng dẫn đến thành phần lực cản áp suất ở chế độ chạy nổi và chế độ sát mặt nước lớn hơn so với chế độ chạy ngầm. Ngược lại, thành phần lực cản ma sát ở chế độ chạy nổi nhỏ hơn so với ở chế độ chạy ngầm và sát mặt nước. Trong đó, chế độ sát mặt nước và chạy ngầm, lực cản ma sát có giá trị gần như nhau.

Tài liệu tham khảo

[1]. Renilson, M. (2015), *Submarine hydrodynamics*, Springer.
 [2]. Zhang, N., H.-C. Shen and H.-z.J.C.L. Yao (2007), *Numerical simulation of flow around submarine operating close to the bottom or near surface*, Journal of Ship Mechanics, 11(4), pp.498-507.
 [3]. Uzun, D., et al. (2021), *A cfd study: Influence of biofouling on a full-scale submarine*, Applied Ocean Research, 109, p.102561.
 [4]. Tu, T.N., et al. (2022), *Numerical Study on the Effect of Turbulence Models on RANSE Computation of Flow Around Submarine*, in 2022 9th NAFOSTED Conference on Information and Computer Science (NICS), IEEE.
 [5]. Pan, Y.-c., H.-x. Zhang and Q.-d. Zhou (2012), *Numerical prediction of submarine hydrodynamic coefficients using CFD simulation*, Journal of Hydrodynamics, 24(6), pp.840-847.
 [6]. Moonesun, M., Y. Korol and H. Dalayeli (2015), *CFD analysis on the bare hull form of submarines for*

minimizing the resistance, International Journal of Maritime Technology, 3, pp.1-16.

[7]. Li, D., et al. (2021), *Numerical investigation on the wave interferences of submerged bodies operating near the free surface*, International Journal of Naval Architecture Ocean Engineering, 13, pp.65-74.

[8]. Naval Surface Warfare Center, Carderock Division (NSWCCD), *Summary of DARPA Suboff Experimental Program Data*.

[9]. ITTC, *ITTC - Recommended Procedures and Guidelines 7.5-03-02-04*, Practical Guidelines for Ship Resistance CFD; ITTC - *Recommended Procedures and Guidelines 7.5-03-02-04*, Practical Guidelines for Ship Resistance CFD, 2014; Available from: <https://itcc.info/media/4198/75-03-02-04.pdf>.

[10]. Zhang, N., H.-C. Shen and H.-z. Yao (2007), *Numerical simulation of flow around submarine operating close to the bottom or near surface*, Chuanbo Lixue (Journal of Ship Mechanics), 11(4), pp.498-507.

[11]. Pan, Y.-c., H.-x. Zhang and Q.-d. Zhou (2012), *Numerical prediction of submarine hydrodynamic coefficients using CFD simulation*, Journal of Hydrodynamics, Ser. B, 24(6), pp.840-847.

[12]. Sezen, S., et al. (2018), *Investigation of self-propulsion of DARPA Suboff by RANS method*, Ocean Engineering, 150, pp.258-271.

[13]. Chen, J., et al. (2022), *Study on resistance characteristics of submarine near water surface*, in MATEC Web of Conferences, EDP Sciences.

[14]. Shariati, S.K. and S.H. Mousavizadegan (2017), *The effect of appendages on the hydrodynamic characteristics of an underwater vehicle near the free surface*, Applied Ocean Research, 67, pp.31-43.

Ngày nhận bài: 19/3/2024

Ngày nhận bài sửa: 02/4/2024

Ngày chấp nhận đăng: 25/4/2024