

NGHIÊN CỨU TÍNH TOÁN LỰC CẢN TÀU NGẦM BẰNG PHƯƠNG PHÁP CFD

NUMERICAL PREDICTION RESISTANCE OF A SUBMARINE USING CFD METHOD

TRẦN NGỌC TÚ*, NGUYỄN THỊ HẢI HÀ, PHẠM THỊ THANH HẢI

Khoa Đóng tàu, Trường Đại học Hàng hải Việt Nam

*Email liên hệ: tutn.dt@vamaru.edu.vn

Tóm tắt

Bài báo trình bày kết quả mô phỏng, tính toán lực cản tàu ngầm hoạt động tại chế độ chạy ngầm bằng phương pháp CFD (computational fluid dynamic). Ảnh hưởng của kích thước lưới đến kết quả mô phỏng tính toán lực cản tàu được đề cập đến trong bài báo. Kết quả mô phỏng có sự so sánh với kết quả thử mô hình trong bể thử để khẳng định độ tin cậy của kết quả mô phỏng tính toán. Ngoài ra bài báo còn đưa ra các hình ảnh về đường dòng bao quanh thân tàu ngầm ở các tốc độ khác nhau, phục vụ cho các bài toán khác nhau như tối ưu hóa thiết kế hình dáng tàu ngầm. Mô hình tàu ngầm được sử dụng trong nghiên cứu là mô hình tàu ngầm DARPA SUBOFF của Mỹ.

Từ khóa: Lực cản, tàu ngầm, CFD, DARPA SUBOFF.

Abstract

The paper presents numerical simulation results of the submarine resistance in submerged condition by Computational Fluid Dynamics (CFD) method. Otherwise, the influence of the mesh size on the simulation results is also mentioned. A comparison of the simulation results and the test results in the towing tank is made to confirm the reliability of the calculated simulation results. Moreover, the article also provides details of flow around submarine like pressure distribution and skin friction on the hull surface of submarine, which serves to many different problems such as in optimizing the hull form of submarine to minimize its resistance. The submarine model employed in this study is the US submarine model DARPA SUBOFF.

Keywords: Resistance, submarine, CFD, DARPA SUBOFF.

1. Mở đầu

Một trong những bài toán rất quan trọng trong thiết

kế tàu nói chung và thiết tàu ngầm nói riêng đó là bài toán xác định lực cản tàu bởi nó là thông số đầu vào trong thiết kế hệ thiết bị đẩy, xác định công suất của máy chính để tàu đạt được tốc độ thiết kế đề ra, ngoài ra nó còn phục vụ cho nhiều bài toán khác như bài toán tối ưu hóa hình dáng thân tàu ngầm dưới góc độ tối thiểu hóa lực cản.

Việc ứng dụng CFD vào trong việc mô phỏng tính toán các bài toán thủy động lực học của tàu nói chung và bài toán tính toán lực cản tàu ngầm nói riêng đã được nhiều nhà nghiên cứu trên thế giới áp dụng. Công trình [1] của tác giả Budak, Gokhan và Beji, Serdar nghiên cứu tính toán lực cản tàu ngầm và ảnh hưởng của sự thay đổi các phương án hình dáng khác nhau đến lực cản tàu trong việc xác định hình dáng tối ưu cho tàu. Đối tượng nghiên cứu của nhóm tác giả là mô hình tàu ngầm DARPA-SUBOFF của Mỹ. Kết quả tính toán được đối sánh với kết quả thử trong bể thử để khẳng định độ tin cậy của kết quả thu được. Công trình [2] của tác giả Mark Bettle, Serge L. Toxopeus nghiên cứu mô phỏng tính toán ảnh hưởng của nước nông đến các thông số thủy động của tàu ngầm Walrus bằng CFD. Kết quả mô phỏng ở một số trạng thái có sự đối sánh với kết quả thực nghiệm và đều cho kết quả rất tốt so với kết quả thử. Công trình [3] của nhóm tác giả Pan Yu-cun, Zhang Huai-xin nghiên cứu tính toán các thông số thủy động của tàu ngầm ở chế độ lặn sâu dưới nước bằng CFD. Mô hình tàu ngầm DARPA-SUBOFF của Mỹ được nhóm tác giả sử dụng làm đối tượng nghiên cứu trong nghiên cứu của mình. Kết quả mô phỏng thu được rất sát so với kết quả đo đạc trong bể thử.

Như vậy, có thể nói với sự phát triển mạnh mẽ của máy tính điện tử cũng như của các phần mềm tính toán CFD mà ngày nay CFD đã trở thành một công cụ hiện đại cho phép người thiết kế giải quyết được các bài toán thủy động lực học phức tạp với kết quả chính xác hơn rất nhiều so với việc sử dụng các công thức bán thực nghiệm. Chính vì vậy, bài báo này sẽ sử dụng CFD với sự hỗ trợ của bộ giải Star-CCM+ để mô phỏng dòng chảy bao quanh thân tàu và tính toán lực cản ngầm DARPA-SUBOFF của Mỹ.

2. Mô phỏng

2.1. Mô hình tàu ngầm

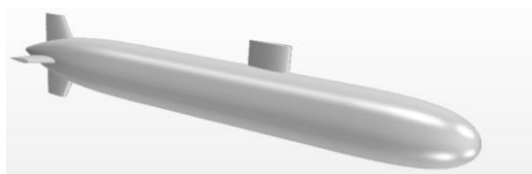
Mô hình tàu ngầm được sử dụng trong nghiên cứu này là mô hình tàu ngầm DARPA SUBOFF do Phòng Carderock thuộc Trung tâm Naval Surface Warfare center (CDNSWC) và bể thử Hydronautics Ship (HSMB) tiến hành thiết kế và thử nghiệm. Các số liệu thử lực cản của mô hình tàu ngầm DARPA SUBOFF được dùng cho việc kiểm nghiệm kết quả tính toán lực cản tàu bằng CFD cũng như phục vụ cho việc phân tích dòng chảy quanh tàu ngầm. Các thông số chủ yếu, hình dáng 3D của tàu DARPA SUBOFF được trình bày trên Bảng 1, các kết quả thử mô hình của tàu này có trong tài liệu [4].

2.2. Các thông số đầu vào

Việc mô phỏng dòng bao quanh thân tàu ngầm được thực hiện trong điều kiện giống như điều kiện trong mô hình tàu trong bể thử cụ thể với khối lượng riêng của nước $\rho=998,67\text{kg/m}^3$, độ nhớt động học của nước $\nu=1,080.10^{-6}\text{m}^2/\text{s}$, độ nhám bề mặt $0\mu\text{m}$, dải tốc độ tàu từ $3,05\text{m/s}$ đến $9,15\text{m/s}$ [4].

Bảng 1. Bảng các thông số chủ yếu của mô hình tàu ngầm DARPA SUBOFF

Các thông số của tàu	Ký hiệu	Giá trị
Chiều dài tàu lớn nhất của mô hình tàu	L_{max} (m)	4,356
Đường kính thân mô hình tàu	D (m)	0,508
Chiều dài của đài chỉ huy mô hình tàu	L_{sail} (m)	0,368

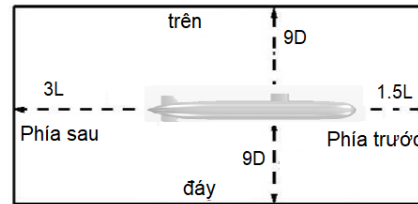


Hình 1. Hình dáng hình học 3D của tàu ngầm DARPA SUBOFF

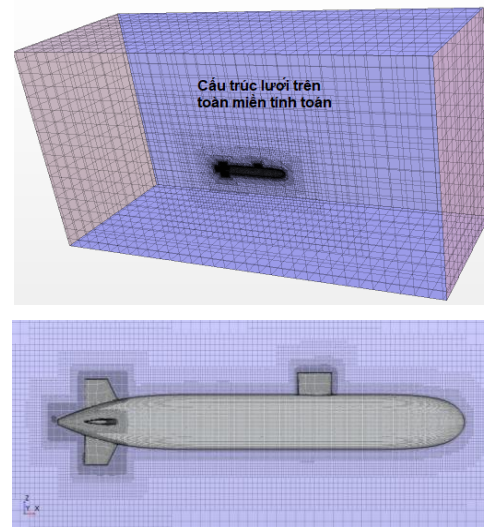
2.3. Thiết lập tính toán

Khi tàu ngầm chạy ngầm trong vùng nước sâu (khoảng cách từ đáy tàu ngầm đến đáy biển lớn hơn $\frac{1}{2}$ lần chiều dài tàu và khoảng cách từ điểm cao nhất trên đài chỉ huy đến mặt thoáng lớn hơn $\frac{1}{3}$ lần chiều dài tàu [5]) sẽ không tồn tại ảnh hưởng của mặt thoáng cũng như ảnh hưởng của độ sâu đến lực cản tàu [5]. Trong trường hợp này miền chất lỏng tính toán sẽ chỉ có một pha là pha lỏng (nước) [6]. Khi đó, kích thước của miền chất lỏng tính toán được xác định như

trên Hình 2. Cụ thể, chiều dài của bể thử ảo có kích thước gấp 4,5 lần chiều dài tàu. Trong đó, khoảng cách theo chiều dài phía trước tàu của bể thử nằm cách mũi tàu một đoạn $1,5L$; khoảng cách theo chiều dài nằm phía sau tàu của bể thử ảo nằm cách đuôi tàu một đoạn $3,0L$. Chiều rộng của bể thử ảo có kích thước bằng 2,5 lần chiều dài tàu tính từ mặt phẳng dọc tâm tàu. Phía trên và phía dưới của bể thử ảo nằm cách tàu một đoạn bằng 9 lần chiều cao mạn của tàu.



Hình 2. Kích thước bể thử ảo ở chế độ tàu chạy ngầm



Hình 3. Kết quả chia lưới

Điều kiện biên được sử dụng trong bài toán dự báo lực cản tàu ngầm ở chế độ chạy ngầm được lựa chọn như sau: đối với bể thử ảo, phía trước sẽ sử dụng điều kiện biên 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). Đối với tàu ngầm loại điều kiện biên được sử dụng là tường không trượt (No-slip wall). Sau khi đã tạo được bể thử ảo. Bước tiếp theo là tiến hành bài toán chia lưới. Ở đây, loại lưới lục diện được sử dụng để chia miền chất lỏng ra thành các thể tích hữu hạn, lưới lăng trụ được sử dụng để giải lớp biên bao quanh tàu ngầm loại, lưới bề mặt được sử dụng để chia bề mặt thân tàu ngầm ra thành các bề mặt hữu hạn. Ở đây, số lớp lưới lăng trụ được sử dụng là 6 lớp với độ dày của lớp lưới lăng trụ

đầu tiên cách tường là 0,0025m để giá trị Y^+ trung bình là 80. 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 3. Mô hình vật lý được sử dụng trong mô phỏng dòng bao quanh tàu ngầm là mô hình chất lỏng thực RANSE (phương trình Navier-Stokes trung bình theo Reynolds) với dòng chảy đều do dòng chảy đến tàu ngầm khi hoạt động ở chế độ chạy ngầm là dòng chảy đều. Mô hình dòng rối được sử dụng trong bài báo là mô hình dòng rối realizable $k-\epsilon$ two layer. Đây là một trong những mô hình dòng rối cho kết quả tin cậy trong tính toán lực cản tàu nổi chung và tàu ngầm nói riêng [7].

3. Tính toán và phân tích kết quả thu được

3.1. Xác định sự hội tụ của lưới

Xác định sự hội tụ của lưới là bước đầu tiên trong tính toán bằng CFD, mục đích của việc làm này là để tránh các sai số do việc chia lưới gây ra. Việc xác định sự hội tụ của lưới được tiến hành tại tốc độ tàu $V=3,05\text{m/s}$ với 3 kích thước lưới khác nhau thay đổi với tỷ lệ $r_G = \sqrt{2}$ (Đây là giá trị do ITTC đề xuất khi nghiên cứu về sự hội tụ của lưới [8]). Trong mô phỏng tính toán tàu ngầm DARPA SUBOFF số lượng lưới được sử dụng trong xác định sự hội tụ được thể hiện trên Bảng 2.

Bảng 2. Số lượng lưới được sử dụng trong nghiên cứu sự hội tụ của lưới

Mật độ lưới	Kích thước lưới, m	Số lượng lưới, triệu lưới
Lưới thô	0,05m	0,75
Lưới cỡ trung	0,035m	1,42
Lưới mịn	0,025m	2,66

Sự thay đổi về kết quả tính thu được khi sử dụng các lưới có kích thước khác nhau được xác định theo biểu thức:

$$\epsilon_{12} = (S_1 - S_2) / S_1; \epsilon_{23} = (S_2 - S_3) / S_2 \quad (1)$$

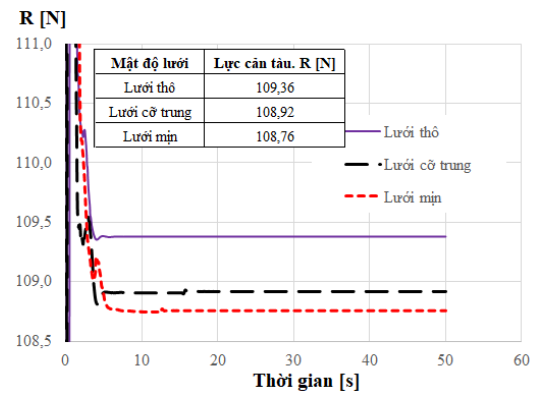
Ở đây: S_1, S_2, S_3 - là kết quả tính toán lực cản tàu ngầm khi sử dụng các kích thước lưới khác nhau lần lượt là lưới mịn, lưới cỡ trung và lưới thô.

Sự hội tụ của kết quả mô phỏng được đánh giá dựa trên biểu thức (2). Tùy thuộc vào dấu và giá trị của R_k , sẽ có 3 trường hợp xảy ra gồm:

- Hội tụ đơn điệu $0 < R_k < 1$;
- Hội tụ phân kỳ $R_k < 0$;
- Không hội tụ $R_k > 1$.

$$R_k = \frac{\epsilon_{12}}{\epsilon_{23}} \quad (2)$$

Trên Hình 4 trình bày ảnh hưởng của kích thước lưới đến kết quả tính toán lực cản tàu ngầm DARPA SUBOFF khi chạy với vận tốc $V=3,05\text{m/s}$. Từ kết quả nghiên cứu sự hội tụ của lưới trên Hình 4, ta thấy rằng sự chênh lệch kết quả giữa lưới thô và lưới cỡ trung là 0,4%, trong khi chênh lệch giữa lưới cỡ trung và lưới mịn chỉ là 0,15%. Nghĩa là ở đây có sự hội tụ đơn điệu về lưới. Bên cạnh đó, có thể nói rằng sự chênh lệch ở đây là tương đối nhỏ. Chính vì vậy trong các tính toán tiếp theo nhóm tác giả sẽ sử dụng lưới cỡ trung để tính toán lực cản tàu ngầm DARPA SUBOFF.

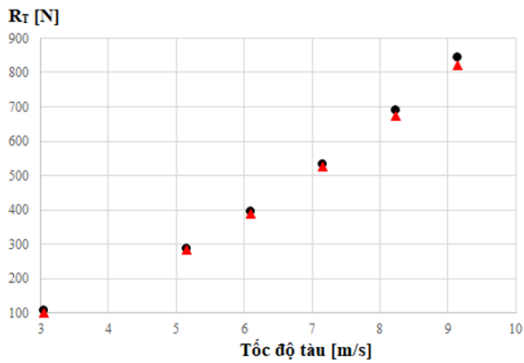


Hình 4. Kết quả nghiên cứu sự hội tụ của lưới tại tốc độ $V=3,05\text{m/s}$

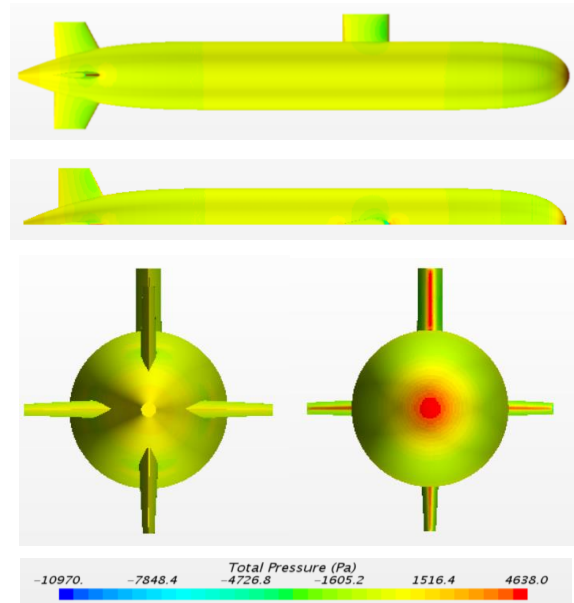
3.2. Kết quả tính toán lực cản tàu ngầm DARPA SUBOFF

Bảng 3. Kết quả dự báo lực cản tàu ngầm tại các tốc độ khác nhau có đối sánh với kết quả thử

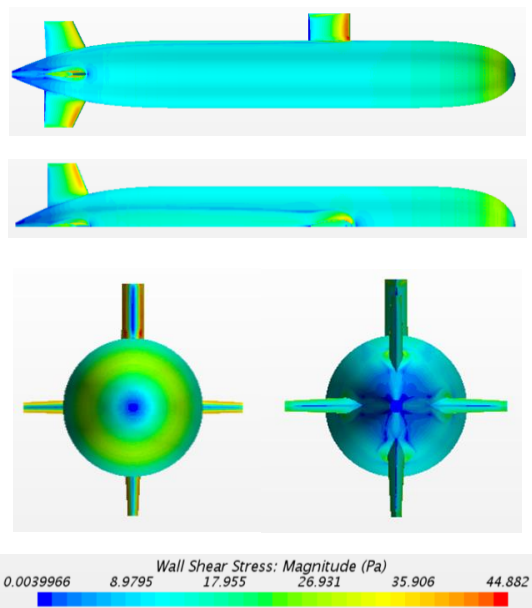
STT	V [m/s]	Kết quả mô phỏng R [N]	Kết quả thử R [N]	% sai số
1	3,050	108,92	102,3	-6,47
2	5,144	288,00	283,8	-1,48
3	6,100	395,74	389,2	-1,68
4	7,160	531,68	526,6	-0,96
5	8,230	690,48	675,6	-2,20
6	9,151	843,40	821,1	-2,72



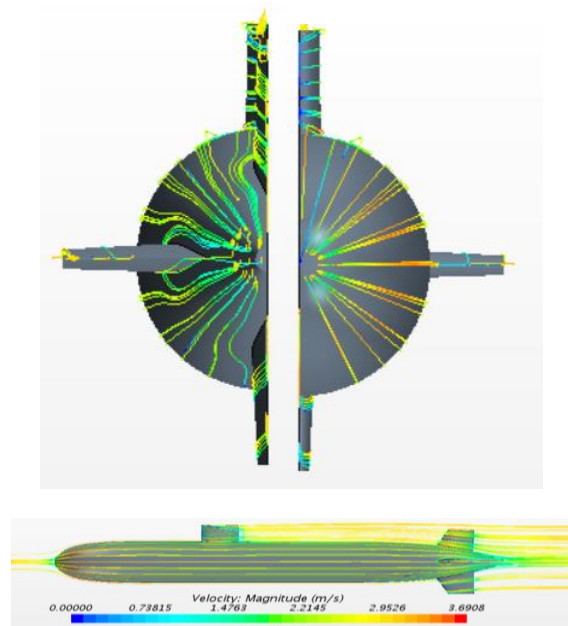
Hình 5. So sánh giữa kết quả tính toán và thử mô hình khi tàu chạy ở các tốc độ khác nhau



Hình 7. Phân bố áp suất dọc thân tàu tại tốc độ $V=3,05\text{ m/s}$



Hình 6. Phân bố ứng suất tiếp dọc thân tàu tại tốc độ $V=3,05\text{ m/s}$



Hình 8. Hình dáng và tốc độ đường dòng (streamline) dọc thân tàu tại tốc độ $V=3,05\text{ m/s}$

Sử dụng mật độ lưới cỡ trung vào trong tính toán lực cản tàu ngầm *DARPA SUBOFF* ở các dải tốc độ khác nhau, nhóm tác giả thu được kết quả tính toán như trên Bảng 3. Từ Bảng 3, ta thấy rằng, kết quả dự báo lực cản tàu ngầm bằng CFD khá sát so với kết quả thử mô hình. Sai số giữa giữa kết quả tính toán và kết quả thử nằm trong dải từ 0,96% đến 6,47%.

Các hình ảnh về phân bố áp suất, ứng suất tiếp,

đường dòng dọc thân tàu khi tàu chạy tại tốc độ 3,05m/s được biểu diễn trên Hình 6, 7 và 8.

4. Kết luận

Bài báo đã thành công trong việc ứng dụng CFD vào trong mô phỏng, tính toán lực cản tàu ngầm hoạt động ở chế độ chạy ngầm. Kết quả mô phỏng, tính toán thu được rất gần với kết quả thử mô hình (Sai số dao động trong dải từ 0,96 đến 6,47%). Bên cạnh đó,

bài báo còn chỉ ra sự ảnh hưởng của kích thước lưới đến kết quả mô phỏng thu được, đưa ra một số hình ảnh về phân bố áp suất và ứng suất trên bề mặt thân tàu, đường dòng bao quanh thân tàu khi chuyển động. Đây là các hình ảnh rất quan trọng trong việc phân tích đường dòng phục vụ cho các bài toán khác trong tối ưu hóa thiết kế thân tàu ngầm.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Budak, G. and S. Beji, *Computational resistance analyses of a generic submarine hull form and its geometric variants*. Journal of Ocean Technology, Vol.11(2). 2016.
- [2] Bettle, M., S.L. Toxopeus, and A. Gerber, *Calculation of bottom clearance effects on Walrus submarine hydrodynamics*. International Shipbuilding Progress, Vol.57(3-4): pp.101-125. 2010.
- [3] Pan, Y.-c., H.-x. Zhang, and Q.-d. Zhou, *Numerical prediction of submarine hydrodynamic coefficients using CFD simulation*. Journal of Hydrodynamics, Ser. B, Vol.24(6): pp.840-847. 2012.
- [4] *Summary of DARPA Suboff Experimental Program Data*. Naval Surface Warfare Center, Carderock Division (NSWCCD).
- [5] Zhang, N., H.-C. Shen, and H.-z.J.C.L. Yao, *Numerical simulation of flow around submarine operating close to the bottom or near surface*. Journal of Ship Mechanics, Vol.11(4): pp.498-507. 2007.
- [6] Pan, Y.-c., H.-x. Zhang, and Q.-d. Zhou, *Numerical prediction of submarine hydrodynamic coefficients using CFD simulation*. Journal of Hydrodynamics, Vol.24(6): pp.840-847. 2012.
- [7] Yong, Z., et al., *Turbulence model investigations on the boundary layer flow with adverse pressure gradients*. Journal of Marine Science and Engineering, Vol.14(2): pp.170-174, 2015.
- [8] ITTC-Quality Manual 7.5-03-01-01, 2008 (<https://www.ittc.info/media/8153/75-03-01-01.pdf>).

Ngày nhận bài:	28/6/2021
Ngày nhận bản sửa lần 1:	04/8/2021
Ngày nhận bản sửa lần 2:	20/8/2021
Ngày duyệt đăng:	23/8/2021