

NGHIÊN CỨU ẢNH HƯỞNG CỦA TỶ SỐ CHIỀU DÀI TRÊN ĐƯỜNG KÍNH ĐẾN LỰC CẢN TÀU NGẦM BẰNG PHƯƠNG PHÁP CFD

NUMERICAL STUDY EFFECT OF LENGTH ON DIAMETER RATIO ON SUBMARINE RESISTANCE BY CFD METHOD

TRẦN THỂ NAM

Phòng Khoa học - Công nghệ, Trường Đại học Hàng hải Việt Nam

Email liên hệ: thenam@vimaru.edu.vn

DOI: <https://doi.org/10.65154/jmst.2025.i84.905>**Tóm tắt**

Bài báo trình bày kết quả nghiên cứu ảnh hưởng của tỷ số chiều dài trên đường kính (L/D) đến lực cản tàu ngầm khi chạy ở hai tốc độ khác nhau bằng phương pháp CFD. Trước hết, mô hình tàu ngầm DARPA SUBOFF được sử dụng để kiểm tra độ tin cậy của kết quả mô phỏng so với kết quả thực nghiệm. Tiếp đó, 04 phương án hình dáng tàu ngầm có tỷ số L/D khác nhau được xây dựng trên cơ sở giữ nguyên thể tích tàu, góc côn đuôi và đặc điểm hình dáng phía mũi tàu so với phương án gốc ban đầu. Kết quả mô phỏng tính toán cho thấy, trong dải tỷ số L/D khảo sát, mức độ ảnh hưởng của chúng đến lực cản tàu dao động từ -3,07% đến 6,80% so với phương án L/D ban đầu và không phụ thuộc vào tốc độ tàu. Thành phần lực cản thay đổi lớn nhất khi thay đổi tỷ số L/D là lực cản áp suất. Ngoài ra bài báo còn phân tích sự khác nhau về dòng chảy bao quanh tàu ngầm để giải thích bản chất dẫn tới sự thay đổi các thành phần lực cản tàu khi thay đổi tỷ số L/D .

Từ khóa: Tàu ngầm, tỷ số L/D , lực cản, CFD.

Abstract

The paper discusses the influence of the length-to-diameter ratio (L/D) on submarine resistance at two different speeds using the CFD method. First, the DARPA SUBOFF submarine model was employed to verify and validate the simulation results against experimental data. Subsequently, four submarine hull form configurations with different L/D ratios were generated while maintaining the same volume, stern cone angle, and bow shape characteristics as the initial model. The simulation results indicate that, within the investigated range of L/D ratios, their impact on total resistance varies from -3.07% to 6.80% compared to the initial ratio L/D configuration and is independent of submarine speed. Among

the resistance components, pressure resistance exhibits the largest variation with changes in L/D . In addition, the paper analyzes the differences in the surrounding flow field to explain the underlying mechanisms leading to variations in the resistance components when the L/D ratio is altered.

Keywords: Submarine, Ratio L/D , resistance, CFD.

1. Mở đầu

Một trong những bài toán rất quan trọng trong thiết kế tàu nói chung và tàu ngầm nói riêng đó là tối ưu hóa hình dáng tàu dưới góc độ tối thiểu hóa lực cản và nâng cao tương tác giữa thân tàu và thiết bị đẩy (tăng hệ số dòng theo, giảm hệ số lực hút) nhằm mục đích tăng tốc độ chuyển động của tàu khi cho trước công suất của máy chính hay giảm được công suất máy chính khi cho trước tốc độ tàu. Ngoài ra, lực cản tàu còn ảnh hưởng đến độ ồn thủy âm do việc tách lớp biên) [1] từ đó ảnh hưởng đến hiệu quả làm việc của các sensor,.. Như vậy có thể nói rằng phần lớn các thông số khai thác của tàu ngầm đều liên quan đến lực cản. Chính vì vậy, để nâng cao được các thông số kỹ-chiến thuật cho tàu trong khai thác thì bài toán tối ưu hóa hình dáng thân tàu dưới góc độ tối thiểu hóa lực cản có ý nghĩa hết sức quan trọng.

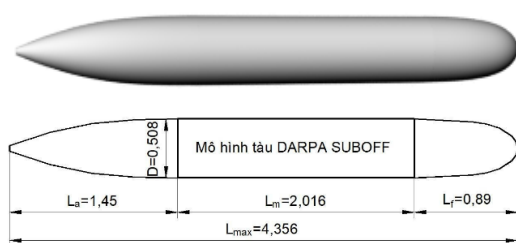
Trong nghiên cứu của mình Gertler [2] đã đưa ra 5 thông số hình học ảnh hưởng lớn đến lực cản tàu và cần phải tối ưu cho tàu ngầm nhằm mục đích tối thiểu hóa lực cản tàu gồm: Tỷ số giữa chiều dài trên đường kính thân tàu (L/D); Hình dáng mũi tàu; Hình dáng tháp chỉ huy; Hệ số béo lặn trụ; Vị trí của sườn lớn nhất. Trong đó, tỷ số L/D là thông số thủy động học quan trọng ảnh hưởng đến lực cản tàu [2]. Theo các nghiên cứu, tỷ số L/D tối ưu, tại đó lực cản tàu nhỏ nhất phụ thuộc vào hình dáng thân tàu ngầm. Ví dụ, Đối với các tàu ngầm có hình dạng giọt nước không có phần nhô, các kết quả nghiên cứu của Martin Renilson [1] chỉ ra rằng tỷ số L/D tối ưu dưới góc độ

tối thiểu hóa lực cản khi tàu chạy ngầm nằm trong dải từ 6,0 đến 7,0. Đối với tàu ngầm có dạng hình lăng trụ tại khu vực giữa tàu, tỷ số L/D tối ưu nằm trong dải từ 7,0 đến 10,0 [3]. Đối với các tàu ngầm có hình dạng kết hợp giữa hình giọt nước và hình lăng trụ chiếm phần lớn chiều dài tàu thì giá trị L/D tối ưu ở vào khoảng $L/D=8,0$ [1]. Tuy nhiên các nghiên cứu nêu trên chưa giải thích bản chất vật lý dẫn tới sự thay đổi lực cản tàu khi thay đổi tỷ số L/D .

Ở trong nước, việc nghiên cứu ảnh hưởng của L/D đến lực cản tàu ngầm còn hạn chế. Chính vì vậy, nghiên cứu sẽ tiến ảnh hưởng của tỷ số L/D đến lực cản thân tàu trần (không bao gồm phần nhô) cũng như giải thích chi tiết bản chất vật lý dẫn tới sự thay đổi lực cản tàu khi thay đổi tỷ số L/D . Mô hình tàu ngầm được lựa chọn trong nghiên cứu này là tàu ngầm DARPA SUBOFF ở dạng tỷ lệ mô hình.

2. Giới thiệu về tàu ngầm DARPA SUBOFF

Tàu ngầm DARPA SUBOFF do Phòng Carderock thuộc Trung tâm Naval Surface Warfare Center và bể thử Hydronautics Ship thiết kế và thử nghiệm. Hình dáng tàu trần của tàu được trình bày trên Hình 1 [4]. Tàu có chiều dài và đường kính lớn nhất lần lượt là 4,356m và 0,508m. Tỷ số $L/D=8,575$. Tàu có tổng thể tích và diện tích mặt ướt lần lượt là $0,708m^3$ và $5,998m^2$.



Hình 1. Hình dáng tàu trần của tàu ngầm DARPA SUBOFF

3. Phương án thay đổi tỷ số L/D và trường hợp tính

- Để xác định ảnh hưởng của tỷ số L/D đến lực cản tàu, ta sẽ giữ nguyên tổng thể tích thân tàu trần ở các phương án L/D khác nhau của tàu. Nghĩa là thể tích thân tàu là một hằng số và chỉ có tỷ số L/D của tàu là thay đổi.

- Để đảm bảo cho các điều kiện về thủy động là như nhau giữa các phương án về tỷ số L/D của tàu thì góc côn đuôi và đặc điểm hình dáng phía mũi tàu là như nhau giữa các phương án L/D (đảm bảo dòng chảy phía mũi tàu và đuôi tàu tương đồng với phương án ban đầu).

Để làm được điều này, các tỷ số l_f/D và l_a/D (l_f - là chiều dài phần mũi, l_a - là chiều dài phần đuôi tàu) sẽ giữ nguyên so với phương án cơ sở ban đầu.

Với các giả thiết như trên, để nghiên cứu ảnh hưởng của tỷ số L/D đến lực cản tàu để từ đó xác định được tỷ số L/D tối ưu dưới góc độ tối thiểu hóa lực cản tàu, tác giả sử dụng 5 mô hình với các thông số về kích thước như trên Bảng 1.

Bảng 1. Thông số hình học của các mô hình được sử dụng trong nghiên cứu ảnh hưởng của L/D đến lực cản tàu ngầm

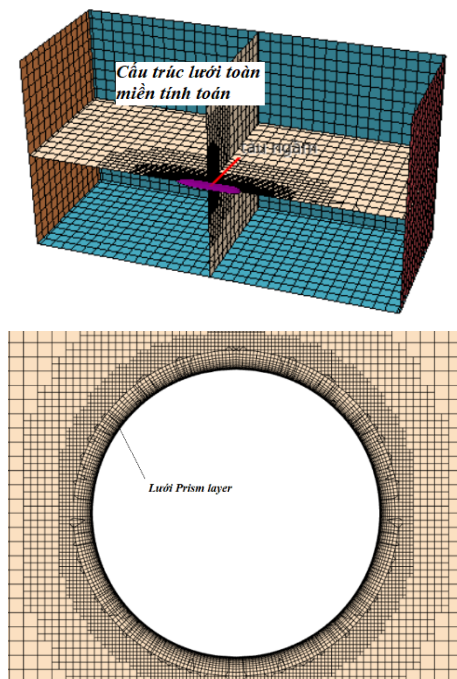
Thông số	Phương án tính toán				
	1	2	3	4	5
$L (m)$	3,115	3,742	4,356	4,952	5,508
$D (m)$	0,661	0,566	0,506	0,467	0,437
$V (m^3)$	0,708	0,708	0,708	0,708	0,708
$S (m^2)$	5,21	5,73	6,21	6,63	7,01
L/D	4,710	6,660	8,570	10,610	12,620
$l_f (m)$	1,163	0,996	0,890	0,821	0,769
$l_a (m)$	1,894	1,622	1,450	1,338	1,252
l_f/D			1,759		
l_a/D			2,866		

Việc nghiên cứu ảnh hưởng của tỷ số L/D đến lực cản tàu sẽ thực hiện ở trạng thái tàu lặn dưới nước do đây là trạng thái khai thác và tác chiến chính của tàu. Tàu chạy ở 2 tốc độ là 3,05 và 8,23 m/s để có thể so sánh kết quả tính toán với kết quả thử mô hình trong bể thử cũng như đánh giá ảnh hưởng của tốc độ tàu tới tỷ số L/D tối ưu nếu có.

4. Thiết lập mô phỏng

Ở chế độ chạy ngầm hoàn toàn dưới nước, do không chịu ảnh hưởng của mặt thoáng chất lỏng chính vì vậy miền tính toán của tàu sẽ chỉ có một pha là nước [5]. Trong trường hợp này, kích thước miền tính toán được xác định như sau [6]: Tổng chiều dài miền tính toán được thiết lập dài gấp 4,5 lần chiều dài tàu. Trong đó, phần phía trước của miền tính toán được bố trí cách mũi tàu $1,5L$, còn phần phía sau kéo dài thêm $3,0L$ tính từ đuôi tàu. Chiều rộng miền tính toán được chọn bằng 2,5 lần chiều dài tàu, tính từ mặt phẳng dọc tâm. Khoảng cách từ thân tàu theo chiều cao đến biên phía trên và biên dưới của miền tính toán được lấy bằng 9 lần chiều cao mạn tàu. Trong bài toán dự báo lực cản tàu ngầm ở chế độ chạy ngầm, các điều kiện biên được thiết lập như sau: Mặt trước của bể thử ảo áp dụng điều kiện là velocity inlet, mặt sau sử dụng điều kiện biên là pressure outlet, các mặt trên, dưới và hông được gán symmetry plane. Lưới lực diện được

sử dụng trong mô phỏng để phân chia miền chất lỏng thành các thể tích hữu hạn, lưới prism layer được sử dụng để giải lớp biên bao quanh thân tàu ngầm. Số lớp lưới prism layer, cũng như khoảng cách của lớp lưới lắng trụ đầu tiên đến tường được lựa chọn để đảm bảo giá trị Y^+ trung bình là 30 cho tất cả 5 phương án xem xét. Lưới được tinh chỉnh cục bộ tại các vùng quan trọng như gần thân tàu để có thể mô phỏng chính xác dòng chảy quanh thân tàu. Đối với bài toán mô phỏng tính toán so sánh, loại lưới, kích thước lưới, cách chia lưới được thiết lập như nhau giữa các phương án L/D .



Hình 2. Kết quả chia lưới

Mô hình vật lý được sử dụng ở đây là mô hình chất lỏng thực RANSE (Reynolds-Averaged Navier-Stokes Equations), với dòng chảy unsteady. Để đóng phương trình RANSE, mô hình dòng rối *realizable k-ε two-layer* được lựa chọn. Đây là một trong những mô hình đã được kiểm chứng về độ tin cậy khi áp dụng cho tính toán lực cản của tàu thủy nói chung và tàu ngầm nói riêng [7].

5. Kết quả và thảo luận

5.1. Xác định sự hội tụ của lưới

Việc kiểm tra sự hội tụ của lưới được thực hiện với thân tàu ngầm DARPA SUBOFF tại vận tốc tàu $V=8,23\text{m/s}$ với 3 kích thước lưới khác nhau, gồm lưới thô, lưới cỡ trung và lưới mịn thay đổi theo tỷ lệ $r_G = \sqrt{2}$ do ITTC khuyến nghị trong các nghiên cứu về hội tụ của lưới [8], tương ứng với số lượng ô lưới lần

lượt là 1,15, 2,07 và 3,73 triệu ô lưới. Tỷ số hội tụ của lưới (R_G) được định nghĩa để cung cấp các thông tin về sự hội tụ hoặc phân kỳ của nghiệm được xác định theo biểu thức [8]:

$$R_G = \frac{\varepsilon_{21}}{\varepsilon_{32}} \quad (1)$$

Trong công thức (1), $\varepsilon_{21} = S_2 - S_1$ là sự khác nhau giữa kết quả tính toán lực cản khi sử dụng lưới cỡ trung và lưới mịn; $\varepsilon_{32} = S_3 - S_2$ là sự khác nhau giữa kết quả tính toán lực cản khi sử dụng lưới thô và lưới cỡ trung. Tùy thuộc vào dấu và biên độ của R_G , sẽ có 3 trường hợp xảy ra gồm: Hội tụ đơn điệu khi $0 < R_G < 1$; hội tụ phân kỳ khi $R_G < 0$ và không hội tụ khi $R_G > 1$.

Kết quả nghiên cứu sự hội tụ của lưới được thể hiện trên Bảng 2. Dựa trên kết quả thu được, ta thấy tỷ số hội tụ $R_G = 0,75 < 1$ nghĩa là ở đây lưới có sự hội tụ đơn điệu. Sai số giữa lực cản tàu tính toán khi sử dụng lưới cỡ trung và lưới mịn so với kết quả thực nghiệm ($R=576,9\text{ N}$ [4]) lần lượt là 1,80% và 1,09% (rất nhỏ). Chính vì vậy, để tiết kiệm thời gian tính toán nhóm tác giả sử dụng lưới cỡ trung để tiến hành tính toán so sánh lực cản tàu ở các phương án L/D khác nhau. Kết quả so sánh giữa mô phỏng số và thực nghiệm về lực cản của tàu DARPA SUBOFF tại hai tốc độ khác nhau, với kích thước lưới cỡ trung, được trình bày trong Bảng 3. Sai số giữa kết quả mô phỏng và thực nghiệm được ghi nhận dưới 2,0%, cho thấy độ tin cậy cao của mô hình tính toán.

Bảng 2. Bảng tính toán sự hội tụ của lưới tại tốc độ $V=8,23\text{m/s}$

Các thông số	Ký hiệu	Giá trị
Lực cản tàu [N]	S_1 (lưới mịn)	570,6
	S_2 (lưới cỡ trung)	566,5
	S_3 (lưới thô)	560,9
Tỷ số hội tụ [-]	R_G	0,75

Bảng 3. Bảng so sánh kết quả tính toán và thực nghiệm

Tốc độ tàu [m/s]		3,05	8,23
Lực cản tàu [N]	Tính toán	86,2	566,5
	Thực nghiệm	87,4	576,9
% sai số [%]		1,37	1,80

5.2. Ảnh hưởng của L/D đến lực cản tàu

Kết quả tính toán lực cản tàu tại các tỷ số L/D khác nhau, cùng với sự so sánh với phương án cơ sở (L/D ban đầu) nhằm đánh giá mức độ biến thiên lực cản theo tỷ số L/D ở hai tốc độ khảo sát được trình bày trong Bảng 4 và các Hình từ 3 đến 8. Trong đó, các ký

hiệu R_T , R_F và R_P lần lượt biểu thị lực cản toàn phần, lực cản ma sát và lực cản áp suất của tàu. Các đại lượng ΔR_T , ΔR_F và ΔR_P thể hiện phần trăm thay đổi tương ứng của các thành phần lực cản so với phương án cơ sở. Tỷ lệ phần trăm thay đổi này được xác định theo công thức (2).

$$\Delta R = \frac{R_{L/D} - R_0}{R_0} \times 100\% \quad (2)$$

Ở đây R_0 là lực cản tàu ứng với phương án L/D ban đầu, $R_{L/D}$ là lực cản ứng với các phương án L/D nghiên cứu.

Bảng 4. Kết quả tính toán và so sánh lực cản tàu ngầm tại các tỷ số L/D khác nhau so với phương án cơ sở

Đại lượng	Phương án tỷ số L/D				
	4,71	6,66	8,57	10,61	12,62
Tốc độ $V=3,05$ m/s					
R_P [N]	11,54	7,67	6,39	5,62	5,31
R_F [N]	72,02	75,78	79,81	83,43	86,65
R_T [N]	83,57	83,45	86,20	89,05	91,96
ΔR_P [%]	80,69	20,06	0,00	-12,10	-16,88
ΔR_F [%]	-9,76	-5,05	0,00	4,54	8,56
ΔR_T [%]	-3,06	-3,19	0,00	3,30	6,68
Tốc độ $V=8,23$ m/s					
R_P [N]	75,14	50,42	41,97	37,10	34,55
R_F [N]	473,95	497,17	524,53	548,50	570,44
R_T [N]	549,08	547,59	566,50	585,60	604,98
ΔR_P [%]	79,01	20,12	0,00	-11,61	-17,69
ΔR_F [%]	-9,64	-5,22	0,00	4,57	8,75
ΔR_T [%]	-3,07	-3,34	0,00	3,37	6,79

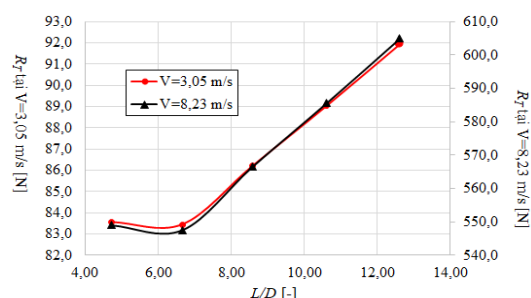
Dựa trên kết quả thu được trong Bảng 4 và các Hình từ 3 đến 8 ta có thể đưa ra một số nhận xét sau:

- Mức độ ảnh hưởng của tỷ số L/D đến lực cản tàu không phụ thuộc vào tốc độ tàu (xem Hình 6, 7 và 8).

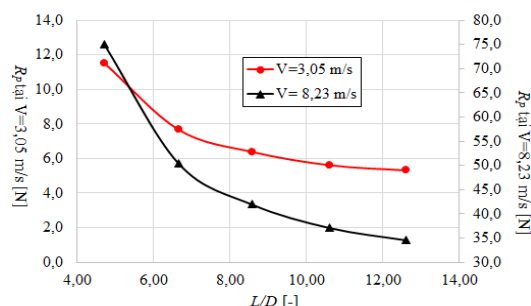
- Trong dải tỷ số L/D khảo sát, mức độ ảnh hưởng của chúng đến lực cản tàu dao động từ -3,07% đến 6,80% so với phương án L/D ban đầu. Giá trị L/D tối ưu dưới góc độ lực cản tàu nằm trong dải từ 5,0 đến 7,0. Khi tỷ số L/D lớn hơn 7,0, lực cản tàu tăng lên rất nhanh (xem Hình 3 và 6).

- Thành phần lực cản chủ yếu của tàu ngầm là thành phần lực cản ma sát. Trong dải L/D khảo sát, R_F chiếm từ 86,2% đến 94,2% lực cản tàu.

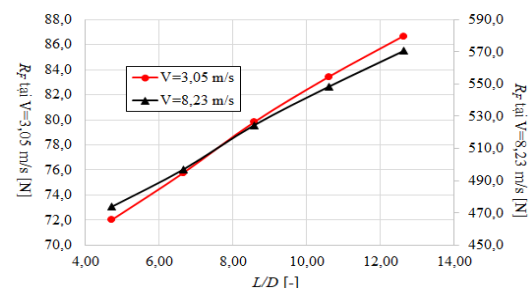
- Ảnh hưởng của tỷ số L/D đến sự thay đổi thành phần lực cản áp suất lớn hơn rất nhiều so với thành phần lực cản ma sát. Cụ thể, với dải tỷ số L/D khảo sát từ 4,71 đến 12,62, R_P thay đổi từ +80% đến -17% so



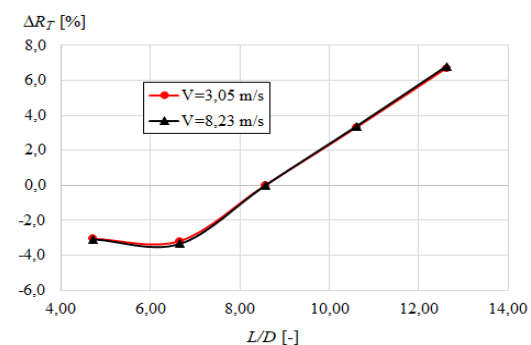
Hình 3. Ảnh hưởng của tỷ số L/D đến lực cản tàu tại các tốc độ khác nhau



Hình 4. Ảnh hưởng của tỷ số L/D đến thành phần lực cản áp suất tại các tốc độ khác nhau



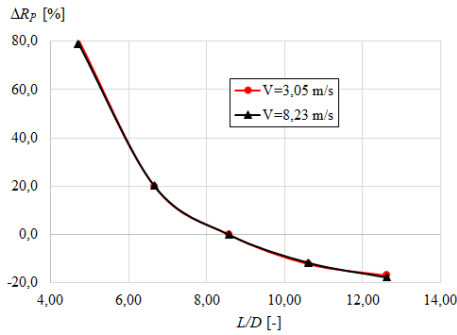
Hình 5. Ảnh hưởng của tỷ số L/D đến thành phần lực cản ma sát tại các tốc độ khác nhau



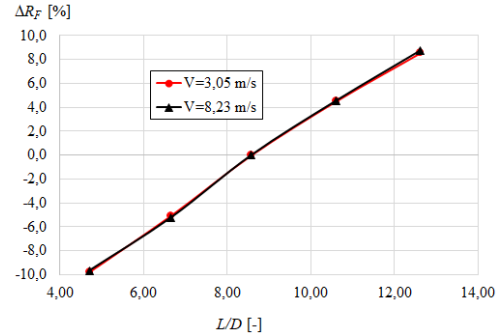
Hình 6. Phần trăm thay đổi lực cản tàu khi thay đổi tỷ số L/D

với phương án ban đầu trong khi R_F chỉ thay đổi trong dải từ -9,7 đến +8,7%.

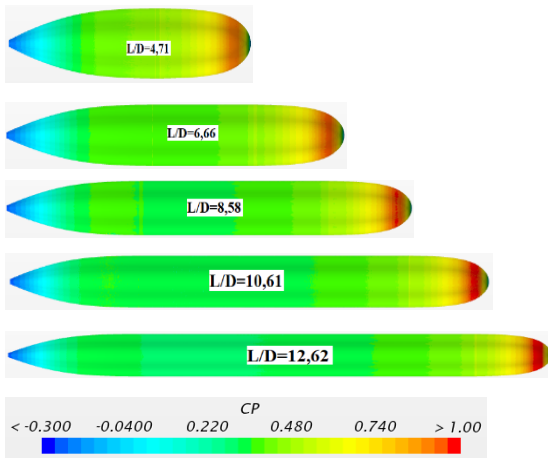
- Thành phần lực cản áp suất giảm dần khi tỷ số



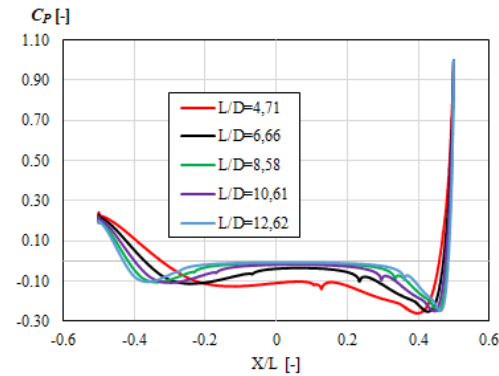
Hình 7. Phần trăm thay đổi thành phần lực cản áp suất khi thay đổi tỷ số L/D



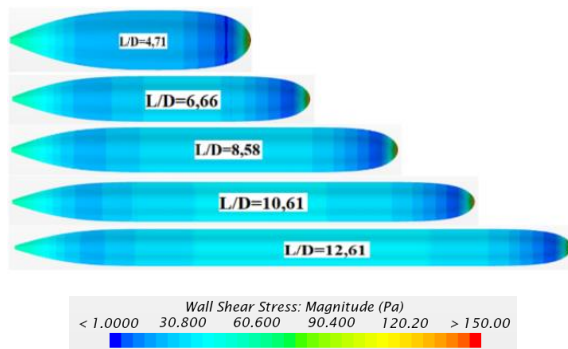
Hình 8. Phần trăm thay đổi thành phần lực cản ma sát khi thay đổi tỷ số L/D



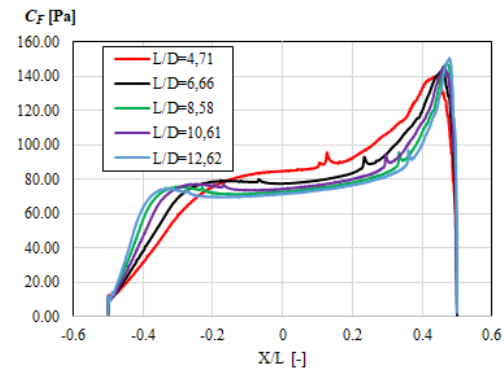
Hình 9. Sự khác nhau về C_p trên bề mặt tàu ngầm khi thay đổi tỷ số L/D tại $V=8.23\text{ m/s}$



Hình 10. Sự khác nhau về C_p tại vị trí mặt cắt $Z=0$



Hình 11. Sự khác nhau về C_f trên bề mặt tàu ngầm khi thay đổi tỷ số L/D tại $V=8.23\text{ m/s}$



Hình 12. Sự khác nhau về C_f tại vị trí mặt cắt $Z=0$ trên bề mặt tàu ngầm khi thay đổi tỷ số L/D

L/D tăng, điều này hoàn toàn phù hợp với các nghiên cứu định tính được nêu trong tài liệu [1]. Mức độ thay đổi R_p phụ thuộc vào tỷ số L/D . R_p thay đổi rất lớn khi tỷ số L/D nhỏ và ngược lại. Cụ thể khi $L/D=4.71$, R_p tăng lên gần 80% so với phương án L/D ban đầu, còn trường hợp $L/D=12.62$, R_p chỉ giảm đi gần 17% so với phương án L/D ban đầu.

- Thành phần lực cản ma sát tăng dần khi tỷ số L/D tăng, kết quả này phù hợp với các nghiên cứu của Renilson [1].

Ảnh hưởng của tỷ số L/D đến lực cản tàu ngầm có thể được giải thích một phần thông qua sự khác nhau trong phân bố áp suất (C_p) và ứng suất tiếp (C_f) trên bề mặt tàu ngầm như được thể hiện trên các Hình từ 9

đến 12. Cụ thể, như có thể quan sát thấy trên Hình 9 và 10, giá trị C_F biến thiên mạnh khi tỷ số L/D giảm và ngược lại. Đây là nguyên nhân lý giải cho sự việc R_F giảm dần khi tăng tỷ số L/D .

Sự thay đổi thành phần lực cản ma sát có thể được giải thích một phần thông qua sự thay đổi về diện tích mặt ướt và khi thay đổi L/D . Như ta có thể thấy trên Bảng 1, diện tích mặt ướt tăng dần khi tỷ số L/D tăng. Cụ thể, phương án $L/D=4,71$ có diện tích mặt ướt nhỏ hơn 16,1% so với phương án ban đầu, trong khi phương án $L/D=12,62$ có diện tích mặt ướt lớn hơn 12,9% so với phương án ban đầu. Dựa trên lý thuyết thủy động lực học [1, 9] R_F thay đổi tỷ lệ thuận và cùng bậc với diện tích mặt ướt. Nghĩa là, nếu bỏ qua sự thay đổi về C_F thì R_F sẽ thay đổi trong dải từ -6,1% đến +12,9% so với phương án ban đầu với L/D thay đổi tương ứng từ 4,71 đến 12,62. Tuy nhiên trên thực tế mức độ thay đổi R_F là nhỏ hơn giá trị trên, cụ thể chỉ thay đổi trong dải từ -9,7% đến +8,7% so với phương án ban đầu. Điều này được giải thích là do sự khác nhau về C_F trên bề mặt tàu ngầm khi thay đổi L/D . Như chúng ta có thể quan sát thấy trên Hình 11 và 12, tại đuôi tàu vị trí từ X/L từ -0,5 đến gần 0,2 giá trị C_F giảm dần khi tỷ số L/D giảm. Tại vị trí X/L từ -0,2 đến gần 0,5 (mũi tàu), giá trị C_F tăng dần khi tỷ số L/D giảm. Đây chính là nguyên nhân dẫn tới việc lực cản ma sát của tàu giảm khi tăng tỷ số L/D . Kết quả là mức độ thay đổi R_F nhỏ hơn so với mức độ thay đổi diện tích mặt ướt.

6. Kết luận

Trên cơ sở nghiên cứu ảnh hưởng của tỷ số L/D đến lực cản tàu ngầm, bài báo đã đạt được các kết quả sau:

- Đã đưa ra được các con số định lượng về mức độ ảnh hưởng của L/D đến lực cản tàu. Trên cơ sở đó giúp người thiết kế xác định được phương án L/D tối ưu cho tàu dưới góc độ lực cản.
- Đã chỉ ra được, mức độ ảnh hưởng của tỷ số L/D đến lực cản tàu không phụ thuộc vào tốc độ tàu.
- Thành phần lực cản thay đổi lớn nhất khi thay đổi tỷ số L/D là thành phần lực cản áp suất. Cụ thể khi $L/D=4,71$, R_P tăng lên gần 80% và giảm đi gần 17,0% khi $L/D=12,62$ so với phương án L/D ban đầu.
- Việc phân tích sự khác nhau về đặc điểm dòng chảy bao quanh tàu ngầm khi thay đổi tỷ số L/D cho phép giải thích được bản chất vật lý dẫn tới sự thay đổi lực cản tàu ngầm khi thay đổi tỷ số L/D .

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Renilson, M. (2015), *Submarine hydrodynamics*. Springer.
- [2] Joubert, P. (2006), *Some aspects of submarine design. Part 2. Shape of a submarine 2026*, Defence science and Technology organisation Victoria (Australia).
- [3] Moonesun, M., et al. (2016), *Optimum L/D for submarine shape*.
- [4] Summary of DARPA Suboff Experimental Program Data. *Naval Surface Warfare Center, Carderock Division (NSWCCD)*.
- [5] Pan, Y.-c., H.-x. Zhang, and Q.-d. Zhou (2012), *Numerical prediction of submarine hydrodynamic coefficients using CFD simulation*. Journal of Hydrodynamics, Vol.24(6), pp.840-847.
- [6] Trần Ngọc Tú, N.T.H.H., Phạm Thị Thanh Hải (2021), *Nghiên cứu tính toán lực cản tàu ngầm bằng phương pháp CFD*. Tạp chí Khoa học Công nghệ Hàng hải, Số đặc biệt tháng 10(2021), tr.09-13.
- [7] Yong, Z., et al. (2015), *Turbulence model investigations on the boundary layer flow with adverse pressure gradients*. Journal of Marine Science and Engineering, Vol.14(2), pp.170-174.
- [8] *ITTC-Quality Manual 7.5-03-01-01*, 2008 (<https://www.ittc.info/media/8153/75-03-01-01.pdf>).
- [9] Larsson, L. and H.C. Raven, *Ship resistance and flow. 2010: The Society of Naval Architects and Marine Engineers*, SNAME, The Principles of Naval Architecture Series, ISBN: 978-0-939773-76-3.

Ngày nhận bài:	07/10/2025
Ngày nhận bản sửa:	05/11/2025
Ngày duyệt đăng:	07/11/2025