

NGHIÊN CỨU BỂ THỬ SỐ THỬ KÉO TÀU CÁ FAO No5a KHI CHẠY TRÊN NƯỚC TĨNH

CFD-BASED NUMERICAL SIMULATION OF THE FAO NO. 5A FISHING VESSEL TOWING TEST IN CALM WATER

Trần Đình Tứ*, Huỳnh Văn Vũ

Khoa Kỹ thuật giao thông, Trường Đại học Nha Trang

*Tác giả liên hệ: Trần Đình Tứ; Email: tutd@ntu.edu.vn

Ngày nhận bài: 17/10/2025; Ngày phản biện thông qua: 30/10/2025 ; Ngày duyệt đăng: 25/12/2025

TÓM TẮT

Nghiên cứu này trình bày kết quả ứng dụng phương pháp CFD để tạo bể thử số (numerical towing tank) thử kéo lực cản tàu FAO số hiệu 5a trên máy tính. Giải pháp số để giải hệ phương trình Reynolds-Averages Naviers-Stoke của dòng chảy nhớt có mặt thoáng chảy qua vỏ tàu là hai phần mềm CFD thương mại Simerics MP và OrCA3D Marine CFD. Có hai kết quả chính của nghiên cứu này. Kết quả thử nhất về phương pháp sử dụng bể thử số bằng công cụ OrCA3D và Simerics giúp giảm thao tác trong việc chuẩn bị mô hình hình học, chia lưới so với các phần mềm CFD tổng quát khác như Star-CMM++, Ansys Fluent, hoặc Open FOAM vì lưới và miền tính toán được tạo tự động. Kết quả thử hai về đặc điểm thủy động của dòng chảy, tại tốc độ khai thác tàu 9 knots của tàu FAO, lực cản tổng có độ sai số tương đối là 4.89% so với kết quả trong bể thử vật lý. Các biểu đồ phân bố áp suất, vận tốc của dòng chảy đều thu được dưới dạng biểu đồ màu rõ nét. Đặc biệt, biên dạng sóng trên vỏ tàu và phân bố chiều cao sóng trên mặt thoáng thu được từ bể thử tương đồng với hiện tượng sóng ngang và sóng dọc khi tàu di chuyển trong thực tế.

Từ khóa: Phân bố vận tốc, Phân bố áp suất, Computational Fluid Dynamics, free surface flow

ABSTRACT

This study presents the application of Computational Fluid Dynamics (CFD) methods to establish a numerical towing tank for the resistance test of the FAO No. 5a ship model. The numerical solution to solve the Reynolds-Averaged Navier–Stokes (RANS) equations governing viscous free-surface flow around the hull is commercial code, Simerics MP and OrCA3D Marine CFD.

The study delivers two key outcomes. First, the proposed methodology for constructing a numerical towing tank using Orca3D and Simerics reduces the overall model preparation and setup time compared with general-purpose CFD solvers such as STAR-CCM++, ANSYS Fluent, or OpenFOAM. Second, in terms of hydrodynamic performance, the total resistance obtained at the ship's service speed of 9 knots shows a relative deviation of only 4.89% compared with the experimental test data. In addition, high-resolution contour maps of pressure and velocity distributions were obtained, providing clear visualization of the flow field. Notably, the computed wave pattern along the hull and the free-surface elevation distribution exhibit strong agreement with the observed transverse and divergent wave systems generated by the ship in real operating conditions.

Keywords: Computational Fluid Dynamics (CFD); Numerical towing tank; Ship resistance; RANS equations; Free-surface flow; Hydrodynamic performance; Orca3D Marine CFD; Simerics-MP

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Dự đoán công suất hữu ích cho thiết bị đẩy của các tàu thủy là một bước quan trọng trong quá trình thiết kế tàu. Thử nghiệm mô hình tàu thu nhỏ trong bể thử kéo cung cấp các thông số về lực cản tổng và công suất của mô hình thu nhỏ, tuy nhiên phương pháp này tốn kém và mất nhiều thời gian hơn so với phương pháp CFD. Các phương pháp tính toán động lực học chất

lỏng (Computational Fluid Dynamics - CFD) không chỉ ít tốn kém hơn mà còn khá dễ dàng mô phỏng các hiện tượng vật lý mà trong thực nghiệm chưa có thiết bị để khảo sát. Tuy nhiên, do hình học phức tạp của các mô hình tàu và đặc điểm thủy động của dòng chảy xung quanh chúng, CFD vẫn còn một số hạn chế.

Khái niệm bể thử số (numerical tank) để thử kéo dự đoán lực cản vỏ tàu được hiểu là sử dụng

phương pháp CFD để xác định lực cản vỏ tàu thủy trong giai đoạn thiết kế ban đầu. Theo xu thế phát triển của phần cứng máy tính, phương pháp mô phỏng số nói chung và phương pháp dự đoán lực cản cho vỏ tàu thủy dần được sử dụng rộng rãi và xem như một phương pháp thứ ba, dần thay thế và bổ sung cho phương pháp thử kéo mô hình trong bể thử kéo mô hình vật lý.

So sánh với các tàu chuẩn (benchmark ships) là cách phổ biến để kiểm chứng kết quả mô phỏng số. Nguyên nhân chính là vì các mô hình CFD — bao gồm mô hình rối (turbulence model), mô hình dòng chảy đa pha (multiphase flow model) phải được xác thực lại cho từng đối tượng nghiên cứu mới. Hơn nữa, các mô phỏng thường mất nhiều thời gian và có thể cho kết quả dự đoán hơi thiếu chính xác, do đó phương pháp EFD (Experimental Fluid Dynamics) vẫn đáng tin cậy hơn trong các vấn đề phi tuyến (nonlinear) và những lĩnh vực nghiên cứu mới [1].

Các mô phỏng CFD dựa trên các mô hình toán học như mô hình Euler, phương trình Reynolds Averaged Navier–Stokes (RANSE), và các biến thể khác của phương trình Navier–Stokes, bao gồm Large Eddy Simulation (LES) hoặc Detached Eddy Simulation (DES), hiện nay được sử dụng phổ biến cho thử nghiệm bể thử số. Hầu hết các mô phỏng trong thử nghiệm bể kéo số sử dụng lý thuyết dòng chảy thế (Potential Flow) [2]. Việc sử dụng lý thuyết dòng chảy thế có ưu điểm là mô phỏng được sự hình thành và biến dạng của mặt tự do. Mô

phỏng hiện tượng này rất phức tạp và chỉ những phần mềm tiên tiến nhất mới có thể thực hiện được. Ngoài ra, yêu cầu tính toán của các mô hình toán học khác cao hơn nhiều so với lý thuyết dòng chảy thế [3].

Sự phát triển của năng lực tính toán đã giúp các nhà nghiên cứu trong lĩnh vực thủy động lực học tàu thủy có thể sử dụng các phương pháp dựa trên RANSE, mặc dù chúng vẫn còn thiếu khả năng mô phỏng rối, breaking wave và các hiệu ứng nhớt [4]–[6]. Trong thời gian gần đây, đã có nhiều công trình tập trung vào việc thử nghiệm và xác thực kết quả CFD và so sánh CFD với EFD. Các nghiên cứu đã công bố cho thấy độ tin cậy và chính xác giữa kết quả từ thử nghiệm trong bể kéo truyền thống và thử kéo trong bể thử số bằng mô phỏng CFD [7]–[14].

Vì vậy, nội dung bài báo này trình bày phương pháp và kết quả nghiên cứu ứng dụng bể thử số bằng phương pháp CFD để thử kéo cho mẫu tàu cá FAO khi chạy trên nước tĩnh.

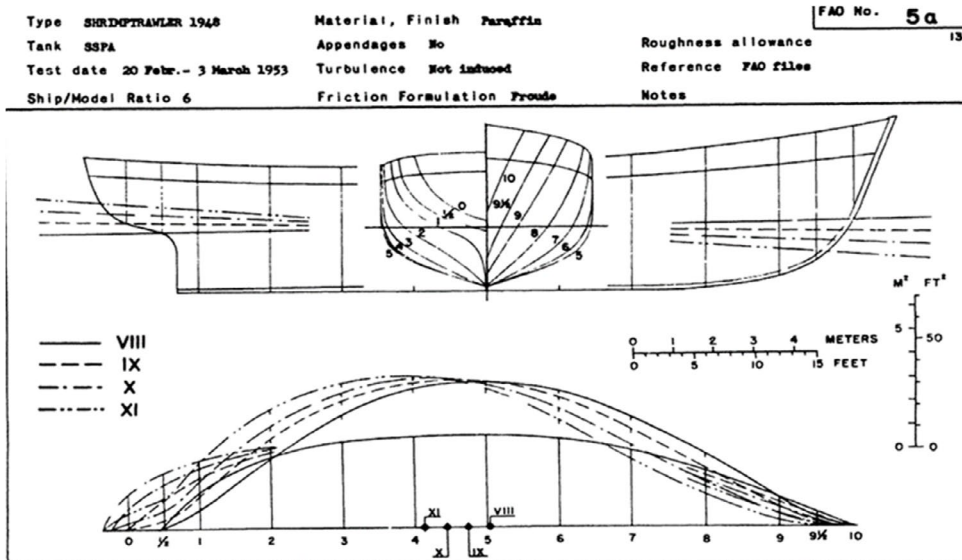
II. VẬT LIỆU VÀ PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

1. Lựa chọn mô hình tàu mô phỏng

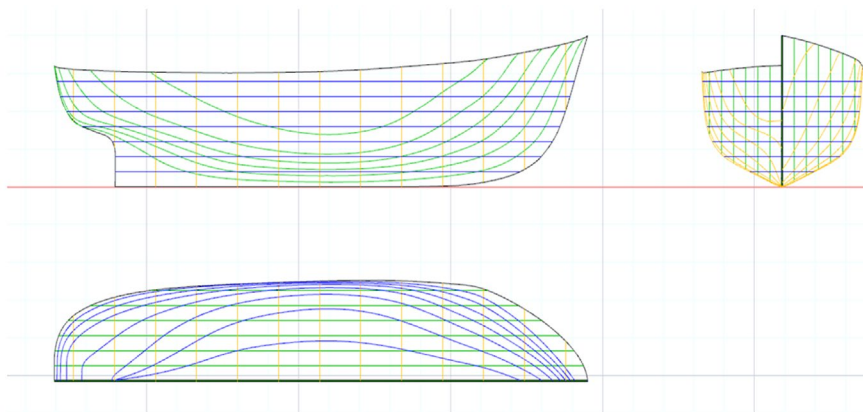
Mẫu tàu FAO [1] được lựa chọn dùng để nghiên cứu là mẫu tàu có số hiệu FAO No.5a có chiều dài lớn nhất 17.55m và mẫu này đã được thử kéo để xác định lực cản trong bể thử vật lý SSPA vào ngày 20 tháng 2 năm 1953. Mô hình vật lý được chế tạo bằng gỗ theo tỷ lệ 1:6. Các thông số cơ bản và hình dáng hình học của tàu được trình bày trong Bảng 1 và Hình 1. Hình 2 trình bày đường hình được vẽ lại bằng AutoCAD.

Bảng 1. Các thông số cơ bản của tàu FAO No.5a

Các thông số cơ bản	Ký hiệu	Đơn vị	Giá trị
Chiều dài lớn nhất	LOA	m	17.55
Chiều dài hai trụ	Lpp	m	16.03
Chiều rộng lớn nhất	Bmax	m	5.33
Chiều rộng thiết kế	Btk	m	5.01
Chiều cao mạn	D	m	4.00
Chiều chìm trung bình	d	m	1.71



Hình 1. Đặc điểm đường hình tàu FAO No 5a [7]



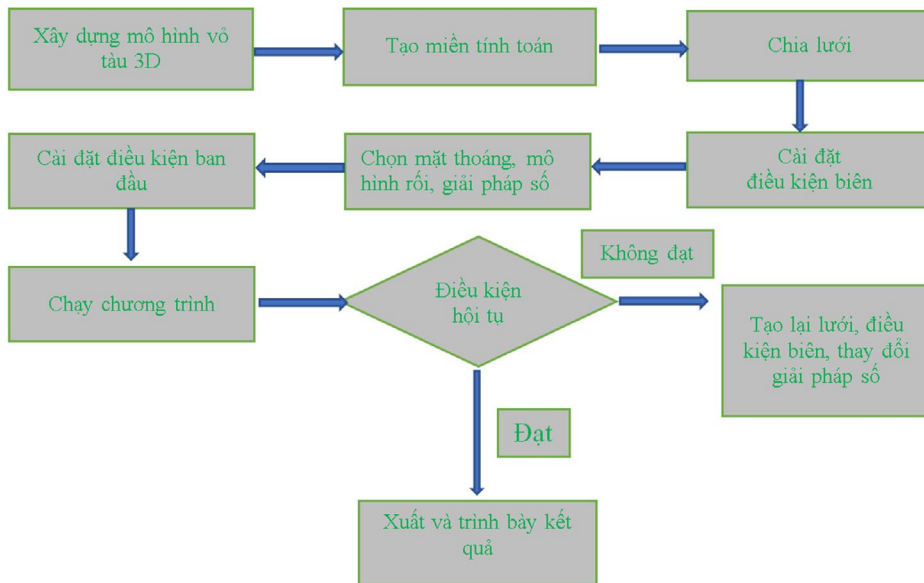
Hình 2. Đặc điểm đường hình vẽ lại trong CAD

2. Phương pháp nghiên cứu

2.1 Phương pháp CFD mô phỏng dòng lưu chất qua vỏ tàu cá

Phương pháp chính được sử dụng trong nghiên cứu này là sử dụng phần mềm Simerics MP để giải hệ phương trình chủ đạo Navier Stokes của dòng hai pha có mặt thoáng chảy qua vỏ tàu và phần mềm OrCA3D Marine để tạo mô hình hình học, tạo lưới chia, thiết lập điều kiện đầu vào cho bể thử số. Hình 3 mô tả các bước mô phỏng dòng lưu chất qua vỏ tàu bằng phương pháp CFD. Bước đầu tiên là xây dựng mô hình học vỏ tàu 3D bằng phần mềm Rhinoceros. Điều kiện sử dụng mô hình hình học

này có thể sử dụng cho bước tiếp là miền tính toán phải dưới dạng closed polysurface mesh. Sau đó trong OrCA3D Marine sẽ tạo miền tính toán, tự động chia lưới trên bề mặt vỏ tàu và miền tính toán từ mô hình 3D này. Bước tiếp theo sau khi có kích thước và lưới miền tính, phần mềm Simerics MP được sử dụng để cài đặt điều kiện biên, điều kiện ban đầu, mô hình rối, mô hình mặt thoáng, thời gian mô phỏng, môi trường chất lỏng. Tiến hành chạy chương trình, trong quá trình chạy chương trình nếu điều kiện hội tụ về vận tốc, hệ số rối đạt yêu cầu thì tiến hành xử lý và trình bày kết quả mô phỏng.

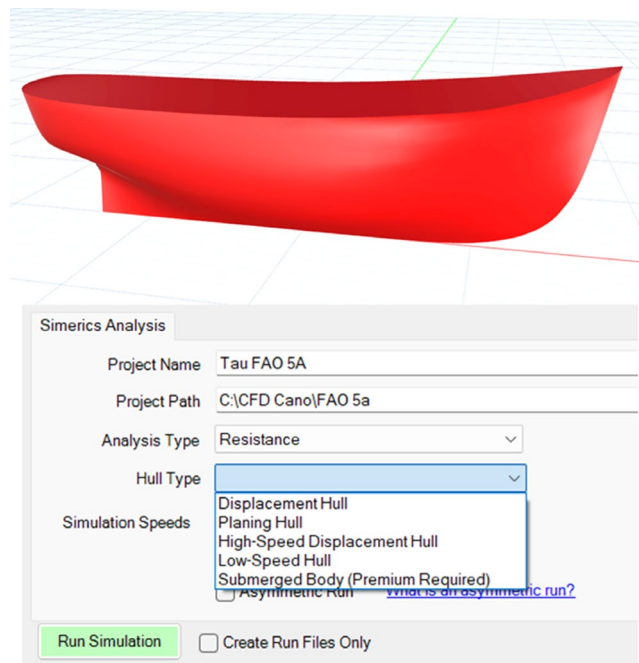


Hình 3. Các bước mô phỏng lực cản trên nước tĩnh

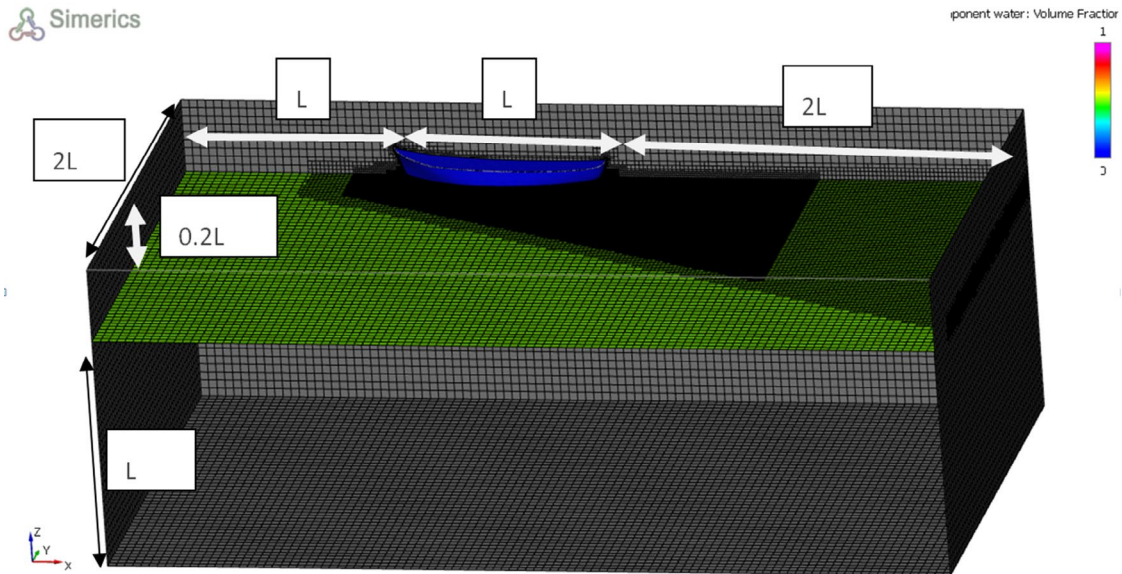
2.2 Mô hình hình học, kích thước và lưới chia miền tính toán

Hình 4 và Hình 5 trình bày mô hình 3D, kích thước bệ thử cũng như phân bố lưới chia trên mặt thoáng và bề mặt vỏ tàu trong bể thử. Trong đó L là kích thước chiều dài hai trụ $L_{pp} = 16.03$ m, loại lưới chia là lưới có cấu trúc được phân bố dày tại mặt vỏ tàu, mặt thoáng và xua dần

ra ngoài miền tính toán với tỷ lệ dần dài, $i=1,2$. Kích thước của bể thử số được lựa chọn theo tiêu chuẩn của hiệp hội bể thử thể giới ITTC [11]. Việc tạo miền tính toán và lưới chia được thực hiện tự động phù hợp với loại tàu được thử. Trong trường hợp mẫu tàu FAO thì mô hình tự động được chọn là Displacement Hull.



Hình 4. Mô hình 3D vỏ tàu cá FAO No 5a và mô hình tự động tạo lưới chia



Hình 5. Kích thước và phân bố lưới trên mặt thoáng và bề mặt vỏ tàu

2.3 Mô hình rối, phương pháp giải

Như các công bố tại [1], [8], [9], các tác giả khảo sát tính hiệu quả của mô hình rối SST k-omega kết hợp phương pháp FVM (Finite Volume Method), VOF (Volume of Fluids) trong dự đoán lực cản vỏ tàu của dòng nhớt qua vỏ tàu chạy chậm với hệ số Froude nhỏ hơn 0.5. Vì vậy trong nghiên cứu này, tác giả chọn các giải pháp số này được tích hợp trong phần mềm Simerics MP để cài đặt cho bể thử kéo số.

III. KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU

Kết quả nghiên cứu bao gồm khảo ảnh hưởng số lượng phần tử của lưới chia, và chiều dài của miền tính toán được xem như chiều dài bể thử kéo số. Khi mẫu tàu FAO số hiệu 5a khi chạy trên nước tĩnh với vận tốc khai thác $v = 4.63$ m/s tương đương $v = 9$ knots và số Froude $= 0.37$. Kết quả thu được từ bể số bao gồm giá trị như tổng lực cản và đặc điểm thủy động của dòng lưu chất như chiều cao mặt thoáng, biên dạng sóng, phân bố vận tốc và áp suất động trên bề mặt vỏ tàu và môi trường xung quanh.

1. Ảnh hưởng mật độ lưới chia

Khảo sát ảnh hưởng mật độ lưới chia là

bước đầu tiên trong quá trình lựa chọn số lượng phần tử hợp lý cho bể thử kéo số. Mục đích khảo sát này để tìm ra cài đặt chế độ tạo lưới tự động phù hợp để có kết quả hội tụ về lưới, tránh các sai số do chia lưới gây ra. Theo ITTC [16], trong phân tích hội tụ lưới, kết quả được đánh giá bằng chỉ số hội tụ, Convergence ratio R_i , và chỉ số này được định nghĩa như sau:

$$R_i = \frac{S_{i2} - S_{i1}}{S_{i3} - S_{i2}}$$

Trong đó: S_{i1} , S_{i2} , S_{i3} lần lượt là kết quả lực cản tổng của ba trường hợp lưới Fine, Normal và Coarse.

Tùy thuộc vào kết quả của chỉ số R_i các trường hợp hội tụ về lưới có thể rơi vào 3 trường hợp: Hội tụ đơn điệu (Monotonic convergence) khi $0 < R_i < 1$; Hội tụ dao động (Oscillatory convergence) khi $R_i < 0$; Không hội tụ (Divergence) khi $R_i > 1$. Kết quả phân tích hội tụ trong Bảng 2 giá trị $R_i < 0$, điều này chứng tỏ giải pháp số khi mô phỏng thỏa mãn điều kiện hội tụ về lưới.

Bảng 2. Kết quả phân tích hội tụ lưới

Mật độ lưới	Số lượng phần tử lưới (Mesh Number)	R_{T-CFD} (kN)	Giá trị hội tụ R_i
Coarse	660.438	10.05	-0.092
Normal	3.382.494	9.07	
Fine	7.522.725	9.06	

Bảng 3, Bảng 4 và Hình 4 trình bày kết quả lực cản tổng từ bề thử số cho ba trường hợp cài đặt mật độ lưới. Từ bảng giá trị này, kết quả sai số tương đối của lực cản tổng giữa trường hợp lưới Coarse và Normal là 13.62%, trong khi sai số tương đối cho trường hợp lưới Normal và Fine là 0.98%. Sai số tương đối nhỏ nhất của lực cản tổng khi so sánh với giá trị thực nghiệm từ bề thử vật lý có giá trị 4.89% cho

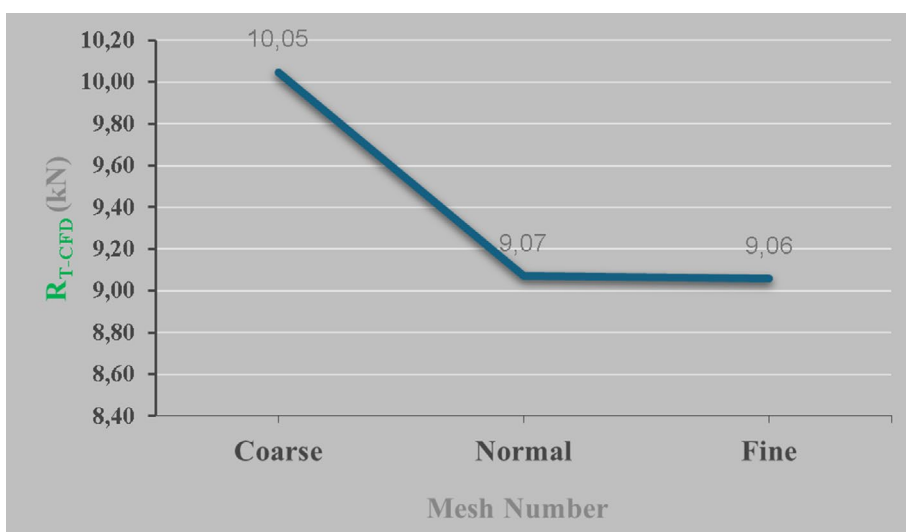
lưới Normal. Từ các kết quả này, trường hợp lưới Normal trong phần mềm Orca3D sẽ là lựa chọn hợp lý khi mô phỏng dòng chảy có mặt thoáng khi di chuyển trên nước tĩnh. Xu hướng của lực cản tổng hướng về hằng số khi tăng mật độ lưới, kết quả này chứng minh một lần nữa giá trị $RG < 0$ là tiêu chí để đánh giá mức độ hội tụ kết quả khi thử lực cản tàu cá mà không có giá trị thực nghiệm để kiểm chứng.

Bảng 3. Ảnh hưởng mật độ lưới đến lực cản tổng

Mật độ lưới	Mesh number	R_{T-CFD} (kN)	R_{Test} [7] (kN)	Sai số (%)
Coarse	660.438	10.05	9.54	5.34
Normal	3.382.494	9.07	9.54	-4.89
Fine	7.522.725	9.06	9.54	-5.04

Bảng 4. Thành phần lực cản tại vận tốc 9knots

Mật độ lưới	Mesh number	R_{T-CFD} (kN)	R_{p-CFD}	R_{v-CFD}
Normal	3.382.494	9.07	7.11	1.96

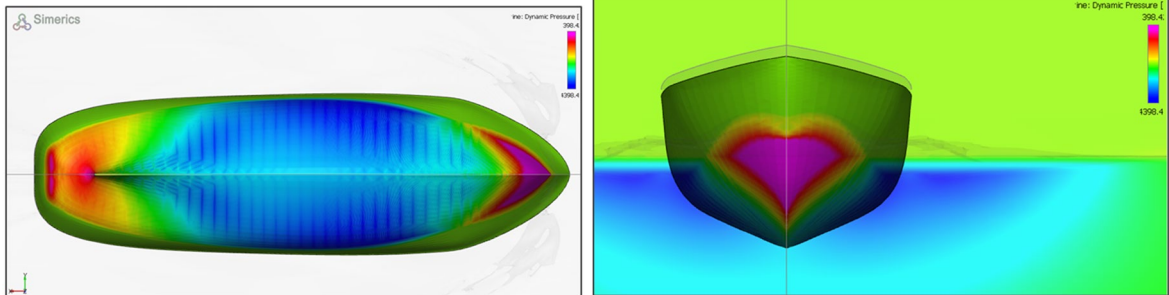


Hình 6. Đồ thị ảnh hưởng của số lượng phần tử lưới đến lực cản tổng

2. Phân bố áp suất lên bề mặt vỏ tàu

Áp suất động được định nghĩa là áp suất tạo ra bởi áp lực của chất lỏng lên bề mặt vỏ tàu khi chuyển động. Nó được tính toán dựa trên vận tốc và khối lượng riêng của chất lỏng. Khi tàu di chuyển trên mặt nước, bề mặt đáy tàu là nơi tiếp xúc trực tiếp với mặt nước do đó khu

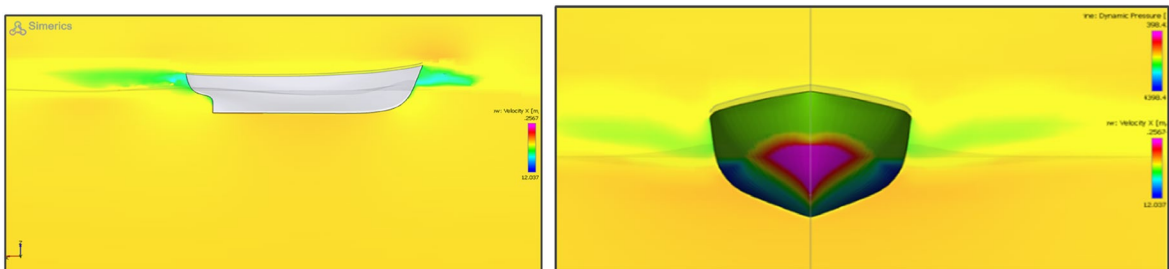
vực này chịu áp lực lớn nhất. Vì vậy bề mặt đáy tàu là khu vực được sử dụng để trình bày phân bố áp suất. Từ phổ màu trên Hình 7, phổ màu của các contour áp suất động cho thấy phân bố áp suất động lớn nhất ở khu vực đuôi tàu và phía trước mũi. Tại vùng giữa tàu là nơi phân bố áp suất nhỏ nhất.



Hình 7. Phân bố áp suất động trên bề mặt vỏ tàu

Hình 8 trình bày phân bố contour vận tốc theo phương x tại mặt cắt dọc tâm và mặt cắt ngang. Quan sát phân bố phổ màu này, ta thấy vùng xung quanh và cách xa vỏ tàu thì vận tốc tàu không có sự thay đổi và gần bằng vận tốc

tàu khi thử. Tại vùng mũi, vùng đuôi thì phổ màu có sự thay đổi, và vận tốc giảm dần và tiệm cận bằng không tại điểm mà dòng chảy tách dòng.

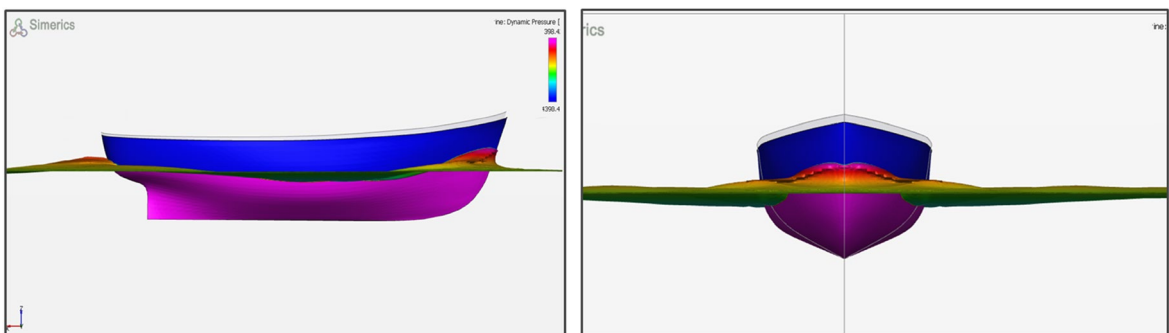


Hình 8. Phân bố vận tốc tại mặt cắt dọc tâm và mặt cắt ngang

3. Biên dạng sóng

Hình 9 trình bày biên dạng sóng thu được từ

bề thử số, từ hình này cho thấy sóng mũi, sóng đuôi được hình thành rõ ràng.

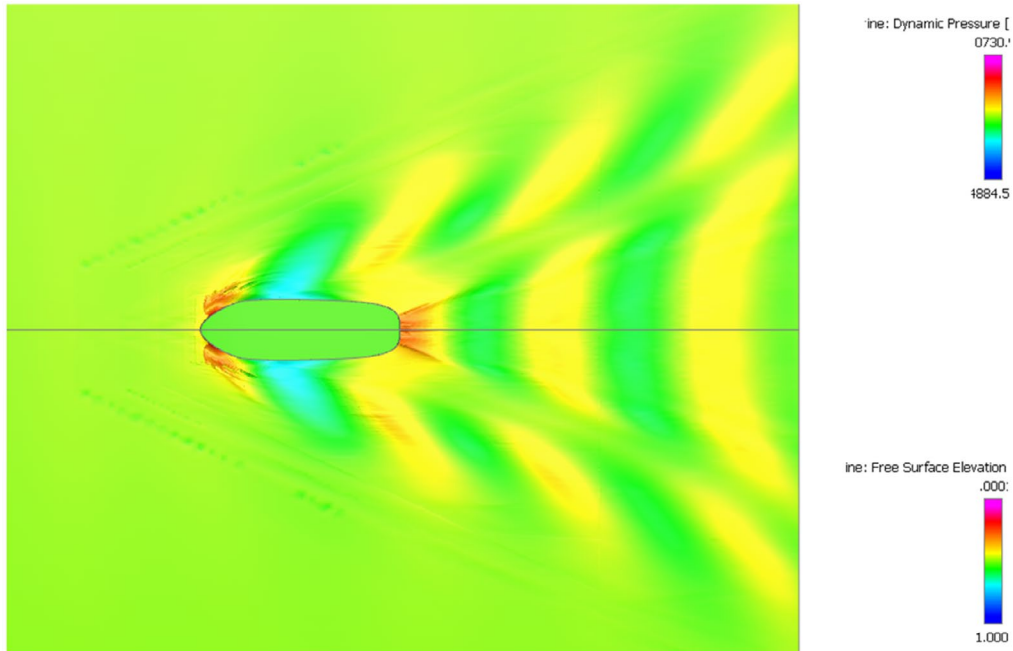


Hình 9. Biên dạng sóng trên vỏ tàu

4. Chiều cao sóng tại mặt thoáng

Hình 10 trình bày phân bố chiều cao sóng tại mặt thoáng từ bề thử số, kết quả thu được cho thấy, sóng ngang và sóng dọc được hình

thành khá rõ nét ngay sau mũi tàu và đuôi tàu. Mẫu sóng này khá phù hợp với mẫu sóng Kelvin được nhìn thấy ngoài thực tế khi tàu hoạt động trên nước tĩnh.



Hình 10. Chiều cao sóng tại mặt thoáng

IV. KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ

Kết quả nghiên cứu đã ứng dụng bề thử số bằng cách kết hợp phần mềm Simerics MP với hỗ trợ Orca3D Marine để thử kéo tàu cá FAO trên máy tính. Một số kết luận được rút ra như sau:

Sử dụng phần mềm CFD cho bề thử số có thể:

Việc sử dụng phần mềm CFD chuyên dụng cho ngành kỹ thuật tàu thủy với các lựa chọn cho loại tàu cụ thể như tàu cá là Displacement Hull giúp tự động tạo lưới chia, thể kiểm soát thông số đầu vào như lượng chiếm nước, trim. Bên cạnh đó các thao tác cài đặt như lựa chọn mô hình rối, phương pháp số cho bề thử đều được tự động giúp giảm bớt thao tác thủ công như các phần mềm CFD phổ thông khác.

Đặc điểm dòng chảy nhớt có mặt thoáng đi qua vỏ tàu

Các thông tin về đặc điểm dòng chảy nhớt có mặt thoáng đi qua vỏ tàu như phân bố áp suất động, phân bố vận tốc đều thu được dưới dạng biểu đồ màu. Biên dạng sóng khi chạy với vận tốc 9knots có sóng mũi, sóng đuôi, sóng bụng rõ nét. Phân bố chiều cao sóng tại mặt thoáng khi tàu chạy trên nước tĩnh được thu được trực quan, ở phần đuôi tàu thể hiện rõ vùng sóng ngang và sóng dọc như trong thực tế tàu di chuyển.

Lời cảm ơn

Nghiên cứu này là một phần kết quả của đề tài nghiên cứu khoa học cấp Trường (Mã số: TR2023-13-39) „Nghiên cứu bề thử số xác định sức cản tàu cỡ nhỏ“. Nhóm tác giả xin chân thành cảm ơn Trường Đại học Nha Trang đã hỗ trợ kinh phí, và cơ sở vật chất để hoàn thành nghiên cứu này.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. H. Khan, A. Ahsan, and K. A. Chauhdhry (2019), “Review of modern trend for numerical model testing in worldwide towing tanks,” *IEEE Conference on Ocean Engineering*.
2. J. H. Ferziger and M. Perić (2001), *Computational Methods for Fluid Dynamics*, 3rd ed., Springer-Verlag Berlin and Heidelberg GmbH & Co. K.
3. Y. M. Ahmed, “Numerical simulation for the free surface flow around a complex ship hull form at different Froude numbers,” *Alexandria Engineering Journal*, vol. 50, no. 3, pp. 229–235, 2011.
4. J. Ma, “A numerical study of resistance and viscous flow around typical benchmark surface ship hull,” *Scientia Sinica Physica, Mechanica & Astronomica*, vol. 41, no. 2, p. 178, 2011.
5. M. Gokce, S. Bayraktar, and O. Kinaci, “Resistance analysis of a benchmark ship – a computational application,” *18th Numerical Towing Tank Symposium*, Cortona, Italy, pp. 59–64, 2015.
6. S. Hänninen and J. Schweighofer, “Numerical investigation of the scale effect on the flow around a ship hull,” *Ship Technology Research*, vol. 53, no. 1, pp. 17–25, 2006.
7. FAO (1975), “Tank test Fishing Boats Of The World_ 1”, Jan-Olof Traung-Fishing News (Books) Ltd. _Part3 “
8. S. Neykov (2013), “Numerical Investigation of flow around an Appended ship hull”, *Dunare de jos University*.
9. Tran Dinh Tu, Chen Jiahn-Horng (2021), “Effects of Computational Geometry to the the Laminar Viscous Flow Around the Vertical Circular Cylinder”, *Proceedings of the 2nd Annual International Conference on Material, Machines and Methods for Sustainable Development (MMMS2020)*, 901-908.
10. Nasirudin, A., Utama, I. K. A. P., Sutiyo, & Priyasambada, A. K. (2023), “CFD Analysis into the Resistance Estimation of Hard-Chine Monohull using Conventional against Inverted Bows”, *CFD Letters*, 15(6), 54–64.
11. Sergio Murilo Daruis Rocha Filho, Roger Matsumoto Moreira, Marcio Zamboti Fortes, & Rafael Eitor dos Santos. (2022). “CFD Analysis of The Heave and Pitch Motion of Hull Model”, *CFD Letters*, 14(4), 14–31.
12. K. Niklas and H. Pruszek (2019), “Full-scale CFD simulations for the determination of ship resistance as a rational, alternative method to towing tank experiments,” *Ocean Engineering*, vol. 187.
13. V. Gatin, V. Vukcevic, and H. Jasak (2015), “CFD validation of a container ship in calm water and head seas,” *18th Numerical Towing Tank Symposium*, Cortona, Italy, pp. 53–58.
14. L. Larsson, F. Stern, and M. Visonneau, *Gothenburg 2010: A Workshop on Numerical Ship Hydrodynamics*, Chalmers University of Technology, Report No. R10:122.
15. ITTC, Practical Guidelines for Ship CFD Applications (2011). ITTC – Recommended Procedures and Guidelines.
16. ITTC, Uncertainty Analysis in CFD Verification and Validation Methodology and Procedures (2017). ITTC – Recommended Procedures and Guidelines.