

ĐẠI HỌC ĐÀ NẴNG  
TRƯỜNG ĐẠI HỌC BÁCH KHOA  
KHOA CƠ KHÍ GIAO THÔNG

# ĐỒ ÁN TỐT NGHIỆP

NGÀNH: KỸ THUẬT TÀU THỦY

ĐỀ TÀI:

PHÂN TÍCH ĐẶC TÍNH THỦY ĐỘNG LỰC HỌC CỦA  
TÀU NGẦM DARPA SUBOFF BẰNG PHƯƠNG PHÁP CFD

Nhóm sinh viên thực hiện:

**Nguyễn Đức Trọng** Lớp: 19KTTT MSSV: 103190201

**Trần Bá Sỹ** Lớp: 19KTTT MSSV: 103190199

Giảng viên hướng dẫn: TS. Nguyễn Văn Minh

Giảng viên phản biện: TS. Nguyễn Văn Triều

Đà Nẵng, 12/2023

# TÓM TẮT

Tên đề tài: **Phân tích đặc tính thủy động lực học của tàu ngầm DARPA SUBOFF bằng phương pháp CFD**

Sinh viên thực hiện: **Nguyễn Đức Trọng**

Số thẻ SV:**103190201** Lớp: **19KTTT**

Sinh viên thực hiện: **Trần Bá Sỹ**

Số thẻ SV:**103190199** Lớp: **19KTTT**

Đề án này được thực hiện để mô phỏng đặc tính thủy động lực học của tàu ngầm DARPA SUBOFF bằng phương pháp CFD. Qua đề tài này giúp chúng em vận dụng kiến thức đã được học áp dụng tính toán sức cản của tàu ngầm khi thay đổi vận tốc, độ sâu; lực và momen thủy động tại các góc dạt và góc chúi qua đó đánh giá ảnh hưởng của các yếu tố thủy động lực học đến hoạt động của tàu ngầm.

Gồm có 6 chương:

Chương 1. Tổng quan về đề tài

Chương 2. Cơ sở lý thuyết của phương pháp CFD

Chương 3. Xây dựng mô hình 3D tàu ngầm DARPA SUBOFF

Chương 4. Tính toán thủy động lực học tác dụng lên tàu ngầm trong tính toán sức cản

Chương 5. Tính toán thủy động lực học tác dụng lên tàu ngầm khi điều động

Chương 6. Kết luận

## NHIỆM VỤ ĐỒ ÁN TỐT NGHIỆP

TT	Họ tên sinh viên	Số thẻ SV	Lớp	Ngành
01	Nguyễn Đức Trọng	103190201	19KTTT	Kỹ thuật tàu thủy
02	Trần Bá Sỹ	103190199	19KTTT	Kỹ thuật tàu thủy

1. Tên đề tài đồ án:

Phân tích đặc tính thủy động lực học của tàu ngầm DARPA SUBOFF bằng phương pháp CFD

2. Đề tài thuộc diện:  Có ký kết thỏa thuận sở hữu trí tuệ đối với kết quả thực hiện

3. Các số liệu và dữ liệu ban đầu:

- Dữ liệu thực nghiệm của tàu ngầm DARPA SUBOFF
- Kích thước chủ yếu của tàu ngầm DARPA SUBOFF

Nội dung các phần thuyết minh và tính toán:

### Chương 1. Tổng quan về đề tài

- 1.1 Giới thiệu về tàu ngầm DARPA SUBOFF
- 1.2 Mục tiêu nghiên cứu
- 1.3 Phương pháp và nội dung nghiên cứu

### Chương 2. Cơ sở lý thuyết của phương pháp CFD

- 2.1 Giới thiệu về phương pháp CFD
- 2.2 Các phương trình chủ đạo
- 2.3 Các phương pháp mô phỏng dòng rối
- 2.4 Ứng dụng của phương pháp CFD

### Chương 3. Xây dựng mô hình 3D tàu ngầm DARPA SUBOFF

- 3.1 Thu thập dữ liệu
- 3.2 Xây dựng mô hình 3D

### Chương 4. Tính toán thủy động lực học tác dụng lên tàu ngầm trong tính toán sức cản

- 4.1 Tính toán sức cản của tàu ngầm ở các vận tốc khác nhau

4.2 Tính toán sức cản của tàu ngầm ở các độ sâu khác nhau

### **Chương 5. Tính toán thủy động lực học tác dụng lên tàu ngầm khi điều động**

5.1 Tính toán thủy động lực học tác dụng lên tàu ngầm ở các góc dạt khác nhau

5.2 Tính toán thủy động lực học tác dụng lên tàu ngầm ở các góc chúi khác nhau

### **Chương 6. Kết luận**

a. Phần chung:

TT	Họ tên sinh viên	Nội dung
01	Nguyễn Đức Trọng	Chương 1: Tổng quan về đề tài Chương 2: Cơ sở lý thuyết của phương pháp CFD
02	Trần Bá Sỹ	Chương 3: Xây dựng mô hình 3D tàu ngầm DARPA SUBOFF Chương 6: Kết luận

b. Phần riêng:

TT	Họ tên sinh viên	Nội dung
01	Nguyễn Đức Trọng	Chương 4. Tính toán thủy động lực học tác dụng lên tàu ngầm trong tính toán sức cản 4.1. Tính toán sức cản của tàu ngầm ở các vận tốc khác nhau 4.2. Tính toán sức cản của tàu ngầm ở các độ sâu khác nhau
02	Trần Bá Sỹ	Chương 5. Tính toán thủy động lực học tác dụng lên tàu ngầm khi điều động 5.1. Tính toán thủy động lực học tác dụng lên tàu ngầm ở các góc dạt khác nhau 5.2. Tính toán thủy động lực học tác dụng lên tàu ngầm ở các góc chúi khác nhau

4. Các bản vẽ, đồ thị ( ghi rõ các loại và kích thước bản vẽ ):

a. Phần chung:

TT	Họ tên sinh viên	Nội dung
01	Nguyễn Đức Trọng	- Bản vẽ tuyến hình tàu ngầm DARPA SUBOFF (A0)

TT	Họ tên sinh viên	Nội dung
02	Trần Bá Sỹ	- Bản vẽ ứng dụng phương pháp CFD trong tính toán thủy động lực học của tàu ngầm DARPA SUBOFF (A0)

*b. Phần riêng:*

TT	Họ tên sinh viên	Nội dung
01	Nguyễn Đức Trọng	- Bản vẽ sức cản của tàu ngầm ở các vận tốc khác nhau (A0) - Bản vẽ sức cản của tàu ngầm ở các độ sâu khác nhau (A0)
02	Trần Bá Sỹ	- Bản vẽ phân tích thủy động lực học tác dụng lên tàu ngầm ở các góc dạt khác nhau (A0) - Bản vẽ phân tích thủy động lực học tác dụng lên tàu ngầm ở các góc chúi khác nhau (A0)

5. <i>Họ tên người hướng dẫn:</i>	<i>Phần/ Nội dung:</i>
TS. Nguyễn Văn Minh	Toàn bộ đồ án

6. Ngày giao nhiệm vụ đồ án: 03/09/2023

7. Ngày hoàn thành đồ án: 17/12/2023

*Đà Nẵng, ngày tháng năm 2023*

**Trưởng Bộ môn**

**Người hướng dẫn**

**TS. TRẦN VĂN LUẬN**

**TS. NGUYỄN VĂN MINH**

## LỜI NÓI ĐẦU

Với sự tiến bộ của khoa học kỹ thuật ngày nay, các bài toán liên quan đến các đặc tính thủy động lực học đang dần được số hóa để giảm thời gian tính toán và hoàn thiện từ đó rút ngắn thời gian chế tạo hay nghiên cứu ra những công nghệ mới. Đối với lĩnh vực tàu thủy, việc mô phỏng số đối với các bài toán đặc tính thủy động lực học cực kỳ quan trọng, vì nó cho phép đưa ra các thông số nhanh chóng mà có khi tính toán thông thường mất rất nhiều thời gian. Vì vậy trong đề tài này “Phân tích đặc tính thủy động lực học của tàu ngầm DARPA SUBOFF bằng phương pháp CFD” dựa trên các cơ sở lý thuyết đã được công nhận và cho phép ứng dụng cho phép tính toán nhanh chóng và tương đối chính xác. Qua đề tài này, giúp chúng em củng cố kiến thức đã được học trong thời gian trên giảng đường ở trường và trong quá trình thực hiện đề tài cũng giúp chúng em có kỹ năng trong việc vận dụng kiến thức, tìm hiểu những công cụ liên quan để giúp ích cho việc thực hiện đồ án cũng như công việc sau này là về mô phỏng CFD. Vì đây là lần đầu thực hiện một đồ án liên quan đến mô phỏng nên chúng em không thể tránh khỏi những thiếu sót, mong các thầy cô bỏ qua. Em xin chân thành cảm các thầy cô đã giúp chúng em hoàn thành và chỉ bảo tận tình trong quá trình thực hiện đồ án này. Cuối cùng, em xin chân thành cảm ơn thầy TS. Nguyễn Văn Minh đã hướng dẫn nhóm em thực hiện, hoàn thành đồ án một cách tốt nhất trong suốt quá trình và qua những lời nhận xét và chỉ bảo tận tình của thầy giúp chúng em hoàn thiện kiến thức cũng như bản thân mình hơn.

Đà Nẵng, ngày      tháng      năm 2023

Sinh viên thực hiện

Trần Bá Sỹ

Nguyễn Đức Trọng

## **CAM ĐOAN**

Nhóm gồm 2 thành viên: Nguyễn Đức Trọng và Trần Bá Sỹ xin cam đoan:

- Đồ án tốt nghiệp này là thành quả của nghiên cứu hoàn toàn dựa trên cơ sở lý thuyết rõ ràng và dựa trên các thực nghiệm được công bố và công nhận; được thực hiện dưới sự hướng dẫn trực tiếp của giáo viên hướng dẫn thầy TS. Nguyễn Văn Minh.
- Đồ án này là công trình mới, không sao chép từ bất kỳ đồ án tương tự nào.
- Tất cả các nguồn tham khảo trong đồ án đều được trích dẫn trong báo cáo và danh mục tài liệu tham khảo.
- Chúng tôi xin chịu trách nhiệm hoàn toàn nếu có bất kỳ vi phạm nào liên quan đến sao chép không hợp lệ hoặc vi phạm quy chế của nhà trường.

Sinh viên thực hiện

Trần Bá Sỹ

Nguyễn Đức Trọng

## MỤC LỤC

TÓM TẮT	
NHIỆM VỤ ĐỒ ÁN	
LỜI NÓI ĐẦU.....	i
CAM ĐOAN.....	ii
MỤC LỤC .....	iii
DANH SÁCH CÁC HÌNH.....	vi
DANH SÁCH CÁC BẢNG .....	xiii
Chương 1. Tổng quan về đề tài .....	1
1.1 Giới thiệu về tàu ngầm DARPA SUBOFF.....	1
1.2 Mục tiêu nghiên cứu .....	2
1.3 Phương pháp và nội dung nghiên cứu .....	11
1.3.1 Đối tượng nghiên cứu.....	11
1.3.2 Phương pháp nghiên cứu .....	11
1.3.3 Nội dung nghiên cứu .....	12
Chương 2. Cơ sở lý thuyết của phương pháp CFD .....	13
2.1 Giới thiệu về phương pháp CFD .....	13
2.2 Các phương trình chủ đạo .....	13
2.2.1 Phương trình bảo toàn khối lượng – phương trình liên tục .....	14
2.2.2 Phương trình bảo toàn động lượng .....	17
2.2.3 Phương trình bảo toàn năng lượng .....	20
2.3 Các phương pháp mô phỏng dòng rối .....	21
2.3.1 Giới thiệu về dòng rối.....	21
2.3.2 Phương pháp mô phỏng rối trực tiếp DNS (Direct Numerical Simulation) .....	21
2.3.3 Phương pháp mô phỏng rối với các xoáy lớn LES (Large Eddy Simulation) .....	22

2.3.4 Phương pháp mô phỏng rối trung bình RANS (Reynolds-Averaged Navier-Stokes) .....	22
2.4 Ứng dụng của phương pháp CFD.....	24
Chương 3. Xây dựng mô hình 3D tàu ngầm DARPA SUBOFF.....	25
3.1 Thu thập dữ liệu.....	25
3.2 Xây dựng mô hình 3D .....	25
3.2.1 Phần thân tàu ngầm đối xứng .....	25
3.2.2 Phần đài quan sát.....	31
3.2.3 Phần vây đuôi .....	33
Chương 4. Tính toán thủy động lực học tác dụng lên tàu ngầm trong tính toán sức cản .....	43
4. 1 Tính toán sức cản của tàu ngầm ở các vận tốc khác nhau.....	43
4.1.1 Điều kiện mô phỏng – các thông số đầu vào.....	43
4.1.2 Không gian miền tính toán .....	44
4.1.3 Lưới tính toán .....	45
4.1.4 Thiết lập tính toán.....	49
4.1.5. Kết quả và bàn luận .....	57
4.2 Tính toán sức cản của tàu ngầm ở các độ sâu khác nhau .....	66
4.2.1 Điều kiện mô phỏng – các thông số đầu vào.....	66
4.2.2 Không gian miền tính toán .....	67
4.2.3 Phương pháp VOF ( Volume of Fluids).....	69
4.2.4 Lưới tính toán .....	69
4.2.5 Thiết lập tính toán.....	71
4.2.6 Kết quả và bàn luận .....	78
Chương 5. Tính toán thủy động lực học tác dụng lên tàu ngầm khi điều động .....	88
5.1 Tính toán thủy động lực học tác dụng lên tàu ngầm ở các góc dạt khác nhau....	88
5.1.1 Các thông số đầu vào.....	88
5.1.2 Các điều kiện tính toán.....	88

5.1.3 Quy trình tính toán mô phỏng bằng phần mềm Ansys – modul Fluid Flow (Fluent) .....	90
5.1.4 Kết quả và bàn luận .....	100
5.2 Tính toán thủy động lực học tác dụng lên tàu ngầm ở các góc chúi khác nhau	121
5.2.1 Các thông số đầu vào.....	121
5.2.2 Các điều kiện tính toán.....	122
5.2.3 Quy trình tính toán mô phỏng tàu ngầm ở các góc chúi khác nhau bằng phần mềm Ansys – modul Fluid Flow (Fluent) .....	124
5.2.4 Kết quả và bàn luận .....	132
5.2.5 Tính toán hệ số thủy động lực học của tàu ngầm DARPA SUBBOFF .....	145
Chương 6. Kết luận.....	150
6.1 Kết luận.....	150
6.2 Kết quả thu được .....	150
Tài liệu tham khảo .....	151

## DANH SÁCH CÁC HÌNH

Hình 1.1 Trường hợp mô hình SUBOFF được sử dụng cho đề tài .....	1
Hình 1.2 Vị trí tương đối của đài quan sát và vây đuôi theo chiều dài tàu ngầm .....	2
Hình 2.1 Mô tả hạt chất lưu và hướng theo tọa độ Descartes .....	14
Hình 2.2 Lưu lượng chất lỏng vào ra của phần tử chất lưu.....	15
Hình 2.3 Các thành phần ứng suất tác dụng lên phần tử chất lưu theo phương x.....	18
Hình 3.1 Kích thước chủ yếu mô hình tàu ngầm .....	25
Hình 3.2 Mô hình 3D tàu ngầm 3D được xây dựng.....	40
Hình 3.3 Tuyến hình tàu Darpa Suboff.....	41
Hình 4.1 Kích thước miền không gian hình chiếu đứng .....	44
Hình 4.2 Kích thước miền không gian hình chiếu bằng.....	45
Hình 4.3 Đồ thị so sánh kết quả sức cản của 2 lưới .....	46
Hình 4.4 Lưới tính toán miền không gian chất lỏng .....	47
Hình 4.5 Lưới trên bề mặt tàu ngầm và lưới xung quanh tàu .....	48
Hình 4.6 Chất lượng lưới trong phần mềm .....	49
Hình 4.7 Khởi động phần mềm và chọn module Fluid Flow.....	50
Hình 4.8 Module DesignModeler.....	50
Hình 4.9 Import tàu ngầm Darpa Suboff vào DesignModeler .....	51
Hình 4.10 Thiết lập miền tính toán.....	51
Hình 4.11 Hoàn thành phần thiết lập mô hình hình học.....	52
Hình 4.12 Thiết lập lưới miền chất lỏng .....	53
Hình 4.13 Thiết lập lưới xung quanh tàu ngầm.....	53
Hình 4.14 Đặt tên các biên .....	54
Hình 4.15 Giao diện module Setup, Solution và Results .....	54
Hình 4.16 Thiết lập mô hình dòng rối SST k - $\omega$ .....	55
Hình 4.17 Thiết lập chất lỏng mô phỏng.....	55
Hình 4.18 Thiết lập vận tốc .....	56
Hình 4.19 Cài đặt giá trị .....	56

Hình 4.20 So sánh kết quả mô phỏng CFD với thực nghiệm.....	57
Hình 4.21 Phân bố áp suất tại $V=3,0507$ (m/s) .....	59
Hình 4.22 Phân bố áp suất tại $V=5,1444$ (m/s) .....	59
Hình 4.23 Phân bố áp suất tại $V=6,0962$ (m/s) .....	60
Hình 4.24 Phân bố áp suất tại $V=7,1611$ (m/s) .....	60
Hình 4.25 Phân bố áp suất tại $V=8,2311$ (m/s) .....	60
Hình 4.26 Phân bố áp suất tại $V=9,1520$ (m/s) .....	61
Hình 4.27 Phân bố áp suất mũi và đuôi $V=3,05$ m/s.....	61
Hình 4.28 Vị trí tiếp giáp thân giữa $V=9,15$ m/s.....	62
Hình 4.29 Phân bố vận tốc trên các lớp biên xung quanh tàu tại $V=3,0507$ (m/s) .....	63
Hình 4.30 Phân bố vận tốc trên các lớp biên xung quanh tàu tại $V=5,1444$ (m/s) .....	63
Hình 4.31 Phân bố vận tốc trên các lớp biên xung quanh tàu tại $V=6,0962$ (m/s) .....	63
Hình 4.32 Phân bố vận tốc trên các lớp biên xung quanh tàu tại $V=7,1611$ (m/s) .....	64
Hình 4.33 Phân bố vận tốc trên các lớp biên xung quanh tàu tại $V=8,2311$ (m/s) .....	64
Hình 4.34 Phân bố vận tốc trên các lớp biên xung quanh tàu tại $V=9,1520$ (m/s) .....	64
Hình 4.35 Vị trí các mặt cắt của phân bố vận tốc tại $V=3,05$ m/s .....	65
Hình 4.36 Mặt cắt A-A .....	65
Hình 4.37 Mặt cắt B-B .....	65
Hình 4.38 Mặt cắt C-C .....	66
Hình 4.39 Kích thước miền không gian hình chiếu đứng .....	68
Hình 4.40 Kích thước miền không gian hình chiếu bằng.....	68
Hình 4.41 Lưới tính toán miền không gian chất lỏng .....	70
Hình 4.42 Lưới trên bề mặt tàu ngầm và lưới xung quanh tàu .....	70
Hình 4.43 Chất lượng lưới trong phần mềm .....	71
Hình 4.44 Xây dựng miền tính toán .....	72
Hình 4.45 Chia lưới cho mô phỏng .....	72
Hình 4.46 Đặt tên cho các mặt phẳng.....	73
Hình 4.47 Thiết lập gia tốc trọng trường.....	74
Hình 4.48 Thiết lập chất lỏng mô phỏng.....	74
Hình 4.49 Thiết lập VOF .....	75
Hình 4.50 Chọn chất lưu cho 2 pha.....	75

Hình 4.51 Thiết lập vận tốc và độ sâu đầu vào .....	76
Hình 4.52 Thiết lập độ sâu đầu ra.....	76
Hình 4.53 Thiết lập miền chất lưu nước tính toán.....	77
Hình 4.54 Cài đặt giá trị .....	77
Hình 4.55 So sánh kết quả mô phỏng CFD với thực nghiệm.....	78
Hình 4.56 Biểu đồ so sánh sự thay đổi sức cản khi thay đổi độ sâu .....	79
Hình 4.57 Phân bố vận tốc tại Trường hợp 3 .....	81
Hình 4.58 Phân bố vận tốc tại Trường hợp 6 .....	81
Hình 4.59 Sóng trên mặt thoáng do tàu ngầm gây ra Trường hợp 1 .....	82
Hình 4.60 Sóng trên mặt thoáng do tàu ngầm gây ra Trường hợp 2.....	82
Hình 4.61 Sóng trên mặt thoáng do tàu ngầm gây ra Trường hợp 3.....	83
Hình 4.62 Sóng trên mặt thoáng do tàu ngầm gây ra Trường hợp 4.....	83
Hình 4.63 Sóng trên mặt thoáng do tàu ngầm gây ra Trường hợp 5.....	84
Hình 4.64 Sóng trên mặt thoáng do tàu ngầm gây ra Trường hợp 6.....	84
Hình 4.65 Đồ thị chiều cao sóng bề mặt Trường hợp 1 .....	85
Hình 4.66 Đồ thị chiều cao sóng bề mặt Trường hợp 2 .....	85
Hình 4.67 Đồ thị chiều cao sóng bề mặt Trường hợp 3 .....	86
Hình 4.68 Đồ thị chiều cao sóng bề mặt Trường hợp 4 .....	86
Hình 4.69 Đồ thị chiều cao sóng bề mặt Trường hợp 5 .....	87
Hình 4.70 Đồ thị chiều cao sóng bề mặt Trường hợp 6 .....	87
Hình 5.1 Kích thước miền tính toán .....	89
Hình 5.2 Điều kiện biên miền tính toán .....	90
Hình 5.3 Khởi động Ansys – module Fluid Flow (Fluent) .....	91
Hình 5.4 Các bước thiết lập mô hình tàu ngầm.....	91
Hình 5.5 Miền tính toán.....	92
Hình 5.6 Các bước chia lưới tính toán .....	93
Hình 5.7 Kích thước lưới Skewness.....	94
Hình 5.8 Kích thước lưới Orthogonal .....	94
Hình 5.9 Tên của các biên và tường .....	94
Hình 5.10 Giao diện Fluent Launcher .....	95
Hình 5.11 Lựa chọn mô hình và môi trường tính toán.....	96

Hình 5.12 Thiết lập môi trường tính toán Water-liquid .....	97
Hình 5.13 Thiết lập các điều kiện biên.....	97
Hình 5.14 Thiết lập phương pháp giải.....	98
Hình 5.15 Thiết lập điều kiện hội tụ.....	98
Hình 5.16 Khởi tạo tính toán .....	99
Hình 5.17 Thiết lập số bước thời gian tính toán.....	99
Hình 5.18 Đồ thị lực dọc tàu ngầm .....	102
Hình 5.19 Đồ thị lực ngang tác dụng lên tàu ngầm.....	102
Hình 5.20 Đồ thị moment quay của tàu ngầm.....	103
Hình 5.21 Phân bố áp suất của tàu ngầm tại góc dạt 0 độ.....	103
Hình 5.22 Phân bố áp suất của tàu ngầm tại góc dạt 2 độ.....	104
Hình 5.23 Phân bố áp suất tại góc dạt 4 độ .....	104
Hình 5.24 Phân bố áp suất của tàu ngầm tại góc dạt 6 độ.....	105
Hình 5.25 Phân bố áp suất của tàu ngầm tại góc dạt 8 độ.....	105
Hình 5.26 Phân bố áp suất của tàu ngầm tại góc dạt 10 độ.....	106
Hình 5.27 Phân bố áp suất của tàu ngầm tại góc dạt 12 độ.....	106
Hình 5.28 Phân bố áp suất quanh tàu ngầm tại góc dạt 0 độ.....	107
Hình 5.29 Phân bố áp suất quanh tàu ngầm tại góc dạt 2 độ.....	107
Hình 5.30 Phân bố áp suất quanh tàu ngầm tại góc dạt 4 độ.....	108
Hình 5.31 Phân bố áp suất quanh tàu ngầm tại góc dạt 6 độ.....	108
Hình 5.32 Phân bố áp suất quanh tàu ngầm tại góc dạt 8 độ.....	109
Hình 5.33 Phân bố áp suất quanh tàu ngầm tại góc dạt 10 độ.....	109
Hình 5.34 Phân bố áp suất quanh tàu ngầm tại góc dạt 12 độ.....	110
Hình 5.35 Phân bố áp suất của mũi và đuôi tại góc dạt 0 độ .....	110
Hình 5.36 Phân bố áp suất của mũi và đuôi tại góc dạt 2 độ .....	110
Hình 5.37 Phân bố áp suất của mũi và đuôi tại góc dạt 4 độ .....	111
Hình 5.38 Phân bố áp suất của mũi và đuôi tại góc dạt 6 độ .....	111
Hình 5.39 Phân bố áp suất của mũi và đuôi tại góc dạt 8 độ .....	111
Hình 5.40 Phân bố áp suất của mũi và đuôi tại góc dạt 10 độ .....	112
Hình 5.41 Phân bố áp suất của mũi và đuôi tại góc dạt 12 độ .....	112
Hình 5.42 Phân bố áp suất của đài quan sát tại góc dạt 0 độ .....	112

Hình 5.43 Phân bố áp suất của đài quan sát tại góc dạt 2 độ .....	113
Hình 5.44 Phân bố áp suất của đài quan sát tại góc dạt 4 độ .....	113
Hình 5.45 Phân bố áp suất của đài quan sát tại góc dạt 6 độ .....	113
Hình 5.46 Phân bố áp suất của đài quan sát tại góc dạt 8 độ .....	114
Hình 5.47 Phân bố áp suất của đài quan sát tại góc dạt 10 độ .....	114
Hình 5.48 Phân bố áp suất của đài quan sát tại góc dạt 12 độ .....	114
Hình 5.49 Phân bố vận tốc của tàu ngầm tại góc dạt 0 độ .....	115
Hình 5.50 Phân bố vận tốc của tàu ngầm tại góc dạt 2 độ .....	115
Hình 5.51 Phân bố vận tốc của tàu ngầm tại góc dạt 4 độ .....	116
Hình 5.52 Phân bố vận tốc của tàu ngầm tại góc dạt 6 độ .....	116
Hình 5.53 Phân bố vận tốc của tàu ngầm tại góc dạt 8 độ .....	116
Hình 5.54 Phân bố vận tốc của tàu ngầm tại góc dạt 10 độ .....	117
Hình 5.55 Phân bố vận tốc của tàu ngầm tại góc dạt 12 độ .....	117
Hình 5.56 Đường dòng tại góc dạt 0 độ .....	118
Hình 5.57 Phân bố đường dòng tại góc dạt 2 độ .....	118
Hình 5.58 Phân bố đường dòng tại góc dạt 4 độ .....	119
Hình 5.59 Phân bố đường dòng tại góc dạt 6 độ .....	119
Hình 5.60 Phân bố đường dòng tại góc dạt 8 độ .....	120
Hình 5.61 Phân bố đường dòng tại góc dạt 10 độ .....	120
Hình 5.62 Phân bố đường dòng tại góc dạt 12 độ .....	121
Hình 5.63 Miền tính toán hình chiếu đứng.....	122
Hình 5.64 Miền tính toán hình chiếu bằng.....	123
Hình 5.65 Điều kiện biên.....	123
Hình 5.66 Các bước thiết lập mô hình tàu ngầm.....	125
Hình 5.67 Tàu ngầm tại góc chúi 6 độ .....	125
Hình 5.68 Miền tính toán.....	126
Hình 5.69 Các bước chia lưới tính toán .....	126
Hình 5.70 Các bước chia lưới tính toán .....	127
Hình 5.71 Kích thước lưới tính toán Skewness.....	128
Hình 5.72 Kích thước lưới tính toán Orthogonal .....	128
Hình 5.73 Tên của các biên và tường .....	129

Hình 5.74 Thiết lập môi trường và mô hình tính toán.....	130
Hình 5.75 Thiết lập các điều kiện biên.....	131
Hình 5.76 Đồ thị lực dọc tàu ngầm .....	132
Hình 5.77 Đồ thị momen lắc dọc tàu ngầm.....	133
Hình 5.78 Đồ thị lực nâng tàu ngầm .....	133
Hình 5.79 Phân bố áp suất của tàu ngầm tại góc chúi 0 độ.....	134
Hình 5.80 Phân bố áp suất của tàu ngầm tại góc chúi 2 độ.....	134
Hình 5.81 Phân bố áp suất của tàu ngầm tại góc chúi 4 độ.....	135
Hình 5.82 Phân bố áp suất của tàu ngầm tại góc chúi 6 độ.....	135
Hình 5.83 Phân bố áp suất của tàu ngầm tại góc chúi 8 độ.....	136
Hình 5.84 Phân bố áp suất của tàu ngầm tại góc chúi 10 độ.....	136
Hình 5.85 Phân bố áp suất quanh tàu ngầm tại góc chúi 2 độ.....	137
Hình 5.86 Phân bố áp suất quanh tàu ngầm tại góc chúi 4 độ.....	137
Hình 5.87 Phân bố áp suất quanh tàu ngầm tại góc chúi 6 độ.....	138
Hình 5.88 Phân bố áp suất quanh tàu ngầm tại góc chúi 8 độ.....	138
Hình 5.89 Phân bố áp suất quanh tàu ngầm tại góc chúi 10 độ.....	139
Hình 5.90 Phân bố áp suất của mũi và đuôi tại góc chúi 2 độ .....	139
Hình 5.91 Phân bố áp suất của mũi và đuôi tại góc chúi 4 độ .....	139
Hình 5.92 Phân bố áp suất của mũi và đuôi tại góc chúi 6 độ .....	140
Hình 5.93 Phân bố áp suất của mũi và đuôi tại góc chúi 8 độ .....	140
Hình 5.94 Phân bố áp suất của mũi và đuôi tại góc chúi 10 độ .....	140
Hình 5.95 Phân bố áp suất của đài quan sát tại góc chúi 2 độ .....	141
Hình 5.96 Phân bố áp suất của đài quan sát tại góc chúi 4 độ .....	141
Hình 5.97 Phân bố áp suất của đài quan sát tại góc chúi 6 độ .....	141
Hình 5.98 Phân bố áp suất của đài quan sát tại góc chúi 8 độ .....	142
Hình 5.99 Phân bố áp suất của đài quan sát tại góc chúi 10 độ .....	142
Hình 5.100 Phân bố vận tốc của tàu ngầm tại góc chúi 2 độ .....	142
Hình 5.101 Phân bố vận tốc của tàu ngầm tại góc chúi 4 độ .....	143
Hình 5.102 Phân bố vận tốc của tàu ngầm tại góc chúi 6 độ .....	143
Hình 5.103 Phân bố vận tốc của tàu ngầm tại góc chúi 8 độ .....	144
Hình 5.104 Phân bố vận tốc của tàu ngầm tại góc chúi 10 độ .....	144

Hình 5.105 Đồ thị lực thủy động không thứ nguyên $X'$ tại các góc dạt .....	147
Hình 5.106 Đồ thị momen thủy động không thứ nguyên $N'$ tại các góc dạt .....	147
Hình 5.107 Đồ thị lực thủy động không thứ nguyên $Y'$ tại các góc dạt .....	148
Hình 5.108 Đồ thị lực thủy động không thứ nguyên $X'$ tại các góc chúi .....	149
Hình 5.109 Đồ thị lực thủy động không thứ nguyên $Z'$ tại các góc chúi.....	149
Hình 5.110 Đồ thị momen thủy động không thứ nguyên $M'$ tại các góc chúi.....	149

## **DANH SÁCH CÁC BẢNG**

Bảng 3.1 Dữ liệu tàu ngầm Darpa Suboff (David Taylor Research Center).....	25
Bảng 3.2 Bán kính phần mũi theo chiều dài tàu.....	26
Bảng 3.3 Bán kính phần thân ống .....	29
Bảng 3.4 Bán kính phần đuôi theo chiều dài.....	30
Bảng 3.5 Bán kính phần chóp theo chiều dài .....	31
Bảng 3.6 Tọa độ profil phần phía trước đài quan sát .....	31
Bảng 3.7 Tọa độ profil phần giữa.....	32
Bảng 3.8 Tọa độ profil phần đuôi.....	33
Bảng 3.9 Bảng tọa độ profil vây đuôi phần lớn bên trong .....	34
Bảng 3.10 Bảng tọa độ profil vây đuôi phần nhỏ bên ngoài .....	37
Bảng 3.11 Bảng trị số tuyến hình tàu ngầm Darpa Suboff.....	42
Bảng 4.1 Thông số đầu vào .....	43
Bảng 4.2 Các trường hợp vận tốc thử nghiệm.....	43
Bảng 4.3 Miền tính toán theo ITTC 2008 .....	45
Bảng 4.4 Kích thước lưới và số phần tử từng lưới.....	46
Bảng 4.5 Tiêu chuẩn đánh giá chất lượng lưới Skewness.....	48
Bảng 4.6 Kết quả mô phỏng và so sánh với thực nghiệm .....	57
Bảng 4.7 Tính chuyên sức cản tàu ngầm mô hình sang mô hình tàu thật.....	59
Bảng 4.8 Thông số đầu vào .....	67
Bảng 4.9 Các trường hợp thử nghiệm .....	67
Bảng 4.10 Kích thước miền chất lỏng.....	68
Bảng 4.12 So sánh kết quả sức cản dựa trên thực nghiệm và mô phỏng .....	78
Bảng 4.13 Chiều cao sóng trên bề mặt và bước sóng trên mặt thoáng .....	80
Bảng 5.1 Các thông số đầu vào .....	88
Bảng 5.2 Tiêu chuẩn đánh giá chất lượng lưới Orthogonal .....	90
Bảng 5.3 Bảng so sánh giữa lưới tính toán và tiêu chuẩn Skewness .....	93
Bảng 5.4 Kết quả tính toán từ CFD .....	100
Bảng 5.5 Kết quả lực thủy động không thứ nguyên.....	101
Bảng 5.6 Các thông số đầu vào .....	122

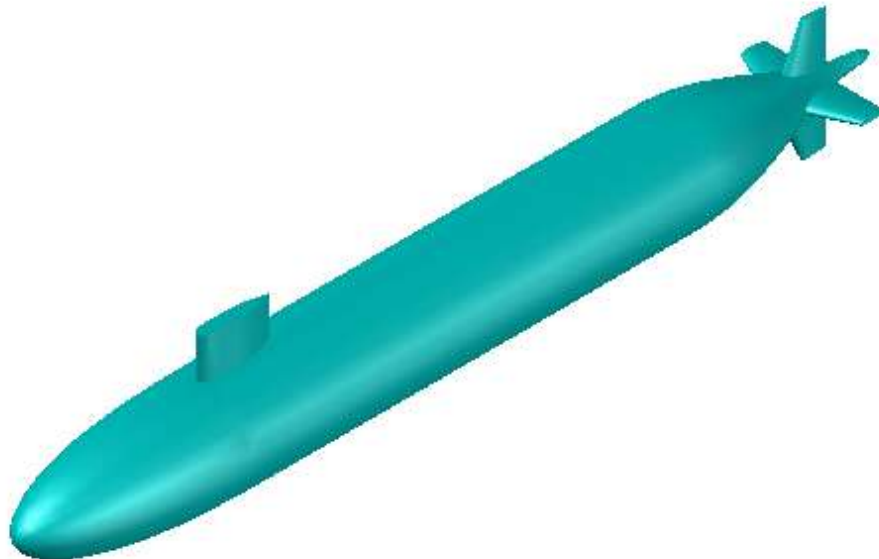
Bảng 5.7 Bảng so sánh giữa kích thước lưới tính toán và tiêu chuẩn Skewness .....	127
Bảng 5.8 Kết quả tính toán từ CFD .....	132
Bảng 5.9 Hệ số thủy động lực học của tàu ngầm DARPA SUBBOFF .....	145
Bảng 5.10 Lực thủy động tại các góc dạt khác nhau .....	146
Bảng 5.11 Lực thủy động tại các góc chúi khác nhau .....	148

## CHƯƠNG 1. TỔNG QUAN VỀ ĐỀ TÀI

### 1.1 Giới thiệu về tàu ngầm DARPA SUBOFF

Tàu ngầm là loại tàu thiết yếu và chuyên dụng được vận hành bởi lực lượng hải quân của nhiều nước để phục vụ mục đích an ninh ở vùng biển quốc gia đồng thời nó cũng giúp con người có thể khám phá các sinh vật ở dưới đại dương và nó còn có thể được sử dụng vào mục đích cứu hộ, quan sát, du lịch,... Chính vì vậy thiết kế thủy động lực của các dạng thân tàu và động cơ đẩy là một trong những mối quan tâm chính của các kiến trúc sư hải quân nhằm cải thiện hiệu suất thủy động lực về mặt lực cản, lực đẩy, khả năng cơ động, độ ổn định và khả năng tàng hình.

Tàu ngầm DARPA SUBOFF là mô hình tàu SUBOFF được nghiên cứu và phát triển từ Cơ quan chỉ đạo các dự án nghiên cứu Quốc phòng tiên tiến DARPA (Defense Advanced Research Projects Agency) [1]. Mô hình được sử dụng cho đề tài dựa trên là mẫu 5470 – 5471 có kích thước giống nhau và khác nhau vị trí vòi áp suất bề mặt, mô hình này bao gồm phần thân tàu ngầm, đài quan sát và 4 vây đuôi tàu ngầm được bố trí như Hình 1.1.

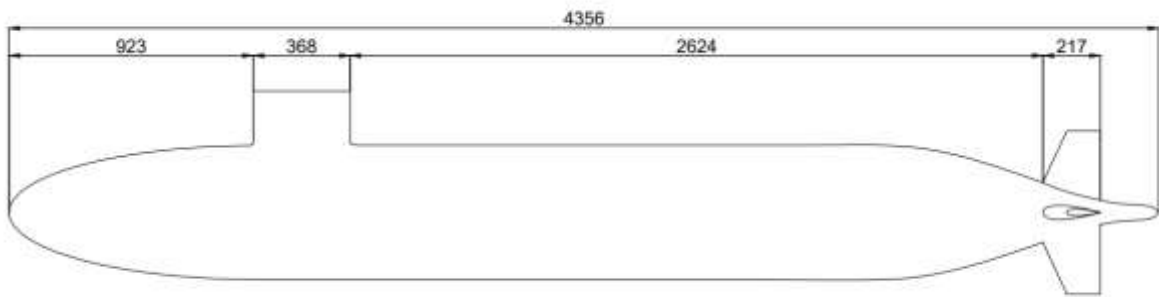


Hình 1.1 Trường hợp mô hình SUBOFF được sử dụng cho đề tài

❖ **Kích thước chủ yếu của mô hình tàu ngầm:**

Mô hình DARPA SUBOFF này được sử dụng model 5470 – 5471 [1] và có các kích thước chủ yếu sau:

- Phần thân tàu có chiều dài tổng thể là 4,356m bao gồm: phần thân trước dài 1,016m, chiều dài phần thân giữa hình trụ là 2.229m, chiều dài phần sau tàu là 1,111m và chiều dài phần đuôi là 0,095m.
- Phần đài quan nằm ở mép trên thân dài 0,368m và cách vị trí mũi tàu ngầm theo phương dọc tàu là 1 đoạn 0,924m.
- Phần vây đuôi bao gồm 4 vây đuôi giống hệt nhau được gắn ở vị trí điểm mép trên  $0^\circ$  và lần lượt là  $90^\circ$ ,  $180^\circ$  và  $270^\circ$ .



Hình 1.2 Vị trí tương đối của đài quan sát và vây đuôi theo chiều dài tàu ngầm

## 1.2 Mục tiêu nghiên cứu

Mục tiêu chung của đề tài là nghiên cứu và phân tích đặc tính thủy động lực học của tàu ngầm DARPA SUBOFF bằng phương pháp CFD. Phương pháp này sẽ được sử dụng để đánh giá các yếu tố thủy động lực học tác động lên tàu ngầm, bao gồm lực cản và các yếu tố thủy tĩnh. Để đạt được mục tiêu này, trước hết nghiên cứu sẽ sử dụng phương pháp lý thuyết để xác định các thông số của mô hình, bao gồm kích thước, hình dạng, khối lượng và trọng tâm của tàu ngầm DARPA SUBOFF. Sau đó, phương pháp mô phỏng CFD sẽ được sử dụng để tính toán và phân tích dòng chảy lưu chất xung quanh tàu ngầm. Kết quả tính toán từ mô phỏng CFD sẽ cung cấp thông tin về lực thủy động lực học tác động lên tàu trong các trường hợp cụ thể như tàu bị chúi mũi hoặc bị dạt. Từ đó, nghiên cứu sẽ so sánh kết quả tính toán với dữ liệu thực tế để kiểm tra độ chính xác và tin cậy của phương pháp CFD.

Ngoài ra, đề tài này còn tính toán xây dựng phương trình chuyển động của tàu ngầm Darpa Suboff. Để đơn giản hóa phương trình chuyển động của tàu ngầm trong 6 bậc tự do ta cho gốc tọa độ tàu G trùng với trọng tâm CG và các trục tọa độ của tàu tương ứng với trục quán tính. Theo định luật II Newton ta có: Gia tốc của một vật cùng hướng với lực tác dụng lên vật và độ lớn của gia tốc tỉ lệ thuận với độ lớn của lực và tỉ lệ nghịch với khối lượng của vật. Do đó, ta có công thức sau:

$$\vec{F} = m\vec{a}$$

Trong đó:

- F là độ lớn của lực (N)
- m là khối lượng của tàu ngầm (kg)
- a là gia tốc của tàu ngầm (m/s<sup>2</sup>)

Từ định luật trên ta có phương trình chuyển động của các lực và momen như sau:

$$X = m[\dot{u} - vr + wq - x_G(q^2 + r^2) + y_G(pq - \dot{r}) + z_G(pr + \dot{q})] \quad (1.1)$$

$$Y = m[\dot{v} - wp + ur - y_G(r^2 + p^2) + z_G(qr - \dot{p}) + x_G(qp + \dot{r})] \quad (1.2)$$

$$Z = m[\dot{w} - uq + vp - z_G(p^2 + q^2) + x_G(rp - \dot{q}) + y_G(rq + \dot{p})] \quad (1.3)$$

$$K = I_x \dot{p} + (I_z - I_y)qr - (\dot{r} + pq)I_{xz} + (r^2 - q^2)I_{yz} + (pr - \dot{q})I_{xy} + m[y_G(\dot{w} - uq + vp) - z_G(\dot{v} - wp + ur)] \quad (1.4)$$

$$M = I_y \dot{q} + (I_x - I_z)rp - (\dot{p} + qr)I_{xy} + (p^2 - r^2)I_{zx} + (qp - \dot{r})I_{yz} + m[z_G(\dot{u} - vr + wq) - x_G(\dot{w} - uq + vp)] \quad (1.5)$$

$$N = I_z \dot{r} + (I_y - I_x)pq - (\dot{q} + rp)I_{yz} + (q^2 - p^2)I_{xy} + (rq - \dot{p})I_{zx} + m[x_G(\dot{v} - wp + ur) - y_G(\dot{u} - vr + wq)] \quad (1.6)$$

Để có thể tính được các tọa độ chuyển động của tàu, các phương trình chuyển động được tiến hành đạo hàm riêng sau đó quy về dạng không thứ nguyên:

$$X = \begin{bmatrix} \frac{\rho}{2} L^4 [X'_{qq} q^2 + X'_{rr} r^2 + X'_{rp} rp] + \frac{\rho}{2} L^3 [X'_{\dot{u}} \dot{u} + X'_{vr} vr + X'_{wq} wq] \\ + \frac{\rho}{2} L^2 [X'_{vv} v^2 + X'_{ww} w^2] + \frac{\rho}{2} L^2 [X'_{\delta r \delta r} u^2 \delta_r^2 + X'_{\delta s \delta s} u^2 \delta_s^2 + X'_{\delta b \delta b} u^2 \delta_b^2] \\ -(W - B) \sin \theta + F_{xp} + \frac{\rho}{2} L^3 [X'_{\dot{u}} \dot{u} + X'_{vr} vr + X'_{wq} wq] \\ + \frac{\rho}{2} L^2 [X'_{vv} v^2 + X'_{ww} w^2] \end{bmatrix} \quad (1.7)$$

$$Y = \begin{bmatrix} \frac{\rho}{2} L^4 [Y'_{\dot{r}} \dot{r} + Y'_{\dot{p}} \dot{p} + X'_{r|r} r|r| + Y'_{pq} pq] + \frac{\rho}{2} L^3 [Y'_{ur} ur + Y'_{up} up + Y'_{\dot{v}} \dot{v} + Y'_{wp} wp] \\ + \frac{\rho}{2} L^2 [Y'_{*} u^2 + Y'_{uv} uv + Y'_{v|v|R} v|(v^2 + w^2)^{1/2}] + \frac{\rho}{2} L^2 [Y'_{\delta r} u^2 \delta_r + Y'_{\delta r \eta} u^2 \delta_r (\eta - \frac{1}{C}) C] \\ - \frac{\rho}{2} C_d \int_L h(x) v(x) \{ [w(x)]^2 + [v(x)]^2 \}^{1/2} dx - \frac{\rho}{2} L \overline{C_L} \int_{x_2}^{x_1} w(x) \bar{v}_{FW}(t - \tau[x]) dx \\ +(W - B) \cos \theta \sin \phi \end{bmatrix} \quad (1.8)$$

$$Z = \begin{bmatrix} \frac{\rho}{2} L^4 [Z'_{\dot{q}} \dot{q} \rightarrow + Z'_{pp} p^2 + Z'_{rr} r^2 + Z'_{rp} rp + Z'_{q|q} q|q|] \\ + \frac{\rho}{2} L^3 [Z'_{\dot{w}} \dot{w} + Z'_{uq} uq + Z'_{vp} vp] \\ + \frac{\rho}{2} L^2 [Z'_{0} u^2 + Z'_{w} uw + Z'_{|w|} u|w| + Z'_{ww} |w(v^2 + w^2)^{1/2}|] + Z'_{vv} v^2 \\ + \frac{\rho}{2} L^2 [Z'_{\delta s} u^2 \delta_s + Z'_{\delta b} u^2 \delta_b + Z'_{\delta s \eta} u^2 \delta_s (\eta - \frac{1}{C}) C] \\ - \frac{\rho}{2} L \overline{C_L} \int_{x_2}^{x_1} v(x) \bar{v}_{FW}(t - \tau[x]) dx + (W - B) \cos \theta \cos \phi \end{bmatrix} \quad (1.9)$$

$$M = \left[ \begin{array}{l} \frac{\rho}{2} L^5 [M'_{\dot{q}} \dot{q} + M'_{rp} rp] + \frac{\rho}{2} L^4 [M'_{\dot{w}} \dot{w} + M'_{uq} uq] \\ + \frac{\rho}{2} L^3 [M'_{*u} u^2 + M'_{uw} uw + M'_{w|w|R} w|(v^2 + w^2)^{1/2}] \\ + \frac{\rho}{2} L^3 [M'_{|w|} u|w| + M'_{ww} |w|(v^2 + w^2)^{1/2}] \\ + \frac{\rho}{2} L^3 [M'_{\delta_s} u^2 \delta_s + M'_{\delta_b} u^2 \delta_b + M'_{\delta_{s\eta}} u^2 \delta_s (\eta - \frac{1}{C}) C] \\ + \frac{\rho}{2} C_d \int_L xb(x)w(x) \{ [w(x)]^2 + [v(x)]^2 \}^{1/2} \\ - \frac{\rho}{2} LC_L \int_{x_2}^{x_1} xv(x) \bar{v}_{FW}(t - \tau[x]) dx \\ - (x_G W - x_B B) \cos \theta \cos \phi - (z_G W - Z_B B) \sin \theta \end{array} \right] \quad (1.10)$$

$$K = \left[ \begin{array}{l} \frac{\rho}{2} L^5 [k'_{\dot{p}} \dot{p} + k'_{\dot{r}} \dot{r} + k'_{qr} qr + k'_{p|p|} p|p|] \\ + \frac{\rho}{2} L^4 [k'_{up} up + k'_{ur} ur + k'_{\dot{v}} \dot{v} + k'_{wp} wp] \\ + \frac{\rho}{2} L^3 [k'_{*u} u^2 + k'_{vR} uv + K'_i uv_{FW}(t - \tau_T)] \\ + \frac{\rho}{2} L^3 [k'_{\delta_r} u^2 \delta_r + k'_{\delta_{r\eta}} u^2 \delta_r (\eta - \frac{1}{C}) C] \\ + \frac{\rho}{2} L^3 (u^2 + v^2_S + w^2_S [k'_{4S} \sin 4\phi_S + k'_{8S} \sin 8\phi_S]) \\ + \frac{\rho}{2} L^2 z'_1 \bar{C}_L \int_{x_2}^{x_1} w(x) \bar{V}_{FW}(t - \tau[x]) dx \\ + (y_G w - y_B B) \cos \theta \cos \phi - (z_G w - z_B B) \cos \theta \sin \phi - Q_p \end{array} \right] \quad (1.11)$$

$$N = \left[ \begin{array}{l} \frac{\rho}{2} L^5 \left[ N'_{\dot{r}} \dot{r} + N'_{\dot{p}} \dot{p} + N'_{pq} pq \right] \\ + \frac{\rho}{2} L^4 \left[ N'_{up} up + N'_{ur} ur + N'_{\dot{v}} \dot{v} \right] \\ + \frac{\rho}{2} L^3 \left[ N'_{*u} u^2 + N'_{uv} uv + N'_{v|v|R} v \left| (v^2 + w^2)^{1/2} \right| \right] \\ + \frac{\rho}{2} L^3 \left[ N'_{\delta r} u^2 \delta_r + N'_{\delta r \eta} u^2 \delta_r \left( \eta - \frac{1}{C} \right) C \right] \\ - \frac{\rho}{2} C_d \int_L x h(x) v(x) \left\{ [w(x)]^2 + [v(x)]^2 \right\}^{1/2} dx \\ - \frac{\rho}{2} L \bar{C}_L \int_{x_2}^{x_1} x w(x) \bar{v}_{FW}(t - \tau[x]) dx \\ + (x_G W - x_B B) \cos \theta \sin \phi + (y_G W - y_B B) \sin \theta \end{array} \right] \quad (1.12)$$

Trong đó:

- $\dot{u}$ ,  $\dot{v}$ ,  $\dot{w}$ : là gia tốc tuyến tính (m/s<sup>2</sup>)
- $u$ ,  $v$ ,  $w$ : là vận tốc tuyến tính (m/s)
- $\dot{p}$ ,  $\dot{q}$ ,  $\dot{r}$ : là gia tốc góc (degrees/s<sup>2</sup>)
- $\Delta X = \Delta X_1 + \frac{\Delta X_2}{(\Delta X_3 + \log_{10} u)^2}$
- $C = C_6 + (C_7 + C_8 \Delta X)^{1/2}$
- $U = (u^2 + v^2 + w^2)^{1/2}$
- $X'_{ww} = \frac{X_{ww}}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot L^2}$  là hệ số không thứ nguyên của  $X$  đạo hàm bậc 2 theo  $ww$
- $X'_{wq} = \frac{X_{wq}}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot L^3}$  là hệ số không thứ nguyên của  $X$  đạo hàm bậc 2 theo  $qw$
- $X'_{vw} = \frac{X_{vw}}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot L^2}$  là hệ số không thứ nguyên của  $X$  đạo hàm bậc 2 theo  $vw$
- $X'_{vr} = \frac{X_{vr}}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot L^3}$  là hệ số không thứ nguyên của  $X$  đạo hàm bậc 2 theo  $vr$

- $X_{rr}' = \frac{X_{rr}}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot L^4}$  là hệ số không thứ nguyên của  $X$  đạo hàm bậc 2 theo  $rr$
- $X_{wq}' = \frac{X_{wq}}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot L^3}$  là hệ số không thứ nguyên của  $X$  đạo hàm bậc 2 theo  $qw$
- $x_G' = \frac{x_G}{L}$  là hoành độ của trọng tâm  $G$
- $w' = \frac{w}{U}$  là thành phần không thứ nguyên vận tốc  $w$  theo  $x$
- $v' = \frac{v}{U}$  là thành phần không thứ nguyên vận tốc  $w$  theo  $y$
- $\dot{q}' = \frac{\dot{q} \cdot L^2}{U^2}$  là thành phần không thứ nguyên gia tốc góc so với trục  $y$
- $q' = \frac{q \cdot L}{U}$  là thành phần không thứ nguyên vận tốc góc so với trục  $y$
- $N_v' = \frac{N_v}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot L^3}$  là hệ số không thứ nguyên của  $N$  đạo hàm bậc 2 theo  $uv$
- $N_r' = \frac{N_r}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot L^4}$  là hệ số không thứ nguyên của  $N$  đạo hàm bậc 2 theo  $ur$
- $N' = \frac{N}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot L^3 \cdot U^2}$  là hệ số không thứ nguyên của moment theo trục  $z$
- $M_{ww}' = \frac{M_{ww}}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot L^3}$  là hệ số không thứ nguyên của momen theo hàm  $\left| w(v^2 + w^2)^{1/2} \right|$
- $M_{|w|wR}' = \frac{M_{|w|wR}}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot L^3}$  là hệ số không thứ nguyên của momen theo hàm  $w \left| (v^2 + w^2)^{1/2} \right|$
- $M_{|w|}' = \frac{M_{|w|}}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot L^3}$  là hệ số không thứ nguyên của momen theo hàm  $u|w|$

- $M_{\dot{w}}' = \frac{M_{\dot{w}}}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot L^4}$  là hệ số không thứ nguyên của momen theo hàm  $\dot{w}$
- $M_w' = \frac{M_w}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot L^3}$  là hệ số không thứ nguyên của momen theo hàm  $uw$
- $M_{rp}' = \frac{M_{rp}}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot L^5}$  là hệ số không thứ nguyên của momen theo hàm  $rp$
- $M_{\dot{q}}' = \frac{M_{\dot{q}}}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot L^5}$  là hệ số không thứ nguyên của momen theo hàm  $\dot{q}$
- $M_q' = \frac{M_q}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot L^4}$  là hệ số không thứ nguyên của momen theo hàm  $uq$
- $M_*' = \frac{M_*}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot L^3}$  là hệ số không thứ nguyên của momen theo hàm  $u^2$
- $M' = \frac{M}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot L^3 \cdot U^2}$  là hệ số không thứ nguyên của momen thủy động theo trục  $y$
- $m' = \frac{m}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot L^3}$  là hệ số không thứ nguyên của khối lượng
- $K_{vR}' = \frac{K_{vR}}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot L^3}$  là hệ số không thứ nguyên của momen  $K$  đạo hàm theo  $uv$
- $K_{\dot{r}}' = \frac{K_{\dot{r}}}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot L^5}$  là hệ số không thứ nguyên của momen  $K$  đạo hàm theo  $\dot{r}$
- $K_r' = \frac{K_r}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot L^4}$  là hệ số không thứ nguyên của momen  $K$  đạo hàm theo  $ur$
- $K_{qr}' = \frac{K_{qr}}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot L^5}$  là hệ số không thứ nguyên của momen  $K$  đạo hàm theo  $qr$

- $I_x' = \frac{I_x}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot L^5}$  là hệ số không thứ nguyên của momen quán tính theo phương  $x$
- $I_y' = \frac{I_y}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot L^5}$  là hệ số không thứ nguyên của momen quán tính theo phương  $y$
- $I_z' = \frac{I_z}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot L^5}$  là hệ số không thứ nguyên của momen quán tính theo phương  $z$
- $I_{xy}' = \frac{I_{xy}}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot L^5}$  là hệ số không thứ nguyên của tích số momen quán tính theo phương  $x$  và  $y$
- $I_{yz}' = \frac{I_{yz}}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot L^5}$  là hệ số không thứ nguyên của tích số momen quán tính theo phương  $y$  và  $z$
- $I_{zx}' = \frac{I_{zx}}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot L^5}$  là hệ số không thứ nguyên của tích số momen quán tính theo phương  $x$  và  $z$
- $X' = \frac{X}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot L^2 \cdot U^2}$  là hệ số không thứ nguyên lực dọc theo phương  $x$
- $Y' = \frac{Y}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot L^2 \cdot U^2}$  là hệ số không thứ nguyên lực ngang theo phương  $y$
- $Z' = \frac{Z}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot L^2 \cdot U^2}$  là hệ số không thứ nguyên lực theo phương  $z$
- $Y_r' = \frac{Y_r}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot L^3}$  là hệ số không thứ nguyên lực dọc theo phương  $y$  đạo hàm theo  $ur$

- $Y_{\dot{r}}' = \frac{Y_{\dot{r}}}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot L^4}$  là hệ số không thứ nguyên lực dọc theo phương y đạo hàm theo  $\dot{r}$
- $Y_v' = \frac{Y_v}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot L^2}$  là hệ số không thứ nguyên lực dọc theo phương y đạo hàm theo  $uv$
- $Y_{\dot{v}}' = \frac{Y_{\dot{v}}}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot L^3}$  là hệ số không thứ nguyên lực dọc theo phương y đạo hàm theo  $\dot{v}$
- $Y_{v|v|R}' = \frac{Y_{v|v|R}}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot L^2}$  là hệ số không thứ nguyên lực dọc theo phương y đạo hàm theo  $v \left| (v^2 + w^2)^{\frac{1}{2}} \right|$
- $Z_*' = \frac{Z_*}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot L^2}$  là hệ số không thứ nguyên lực theo phương z đạo hàm theo  $u^2$
- $Z_q' = \frac{Z_q}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot L^3}$  là hệ số không thứ nguyên lực theo phương z đạo hàm theo  $uq$
- $Z_{\dot{q}}' = \frac{Z_{\dot{q}}}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot L^4}$  là hệ số không thứ nguyên lực theo phương z đạo hàm theo  $\dot{q}$
- $Z_{vp}' = \frac{Z_{vp}}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot L^3}$  là hệ số không thứ nguyên lực theo phương z đạo hàm theo  $vp$
- $Z_w' = \frac{Z_w}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot L^2}$  là hệ số không thứ nguyên lực theo phương z đạo hàm theo  $uw$

### **1.3 Phương pháp và nội dung nghiên cứu**

#### **1.3.1 Đối tượng nghiên cứu**

Đối tượng nghiên cứu chính của đề tài là tàu ngầm khi hoạt động dưới biển. Tuy nhiên, để giới hạn phạm vi của đề tài, nghiên cứu sẽ tập trung vào các trường hợp sau:

- Tàu ngầm được giả định là hoạt động ở chế độ bơi, nghĩa là không tiếp xúc với mặt nước và không chịu tác động của sóng biển. Trong trường hợp này, tàu ngầm sẽ không phải đối mặt với các yếu tố thủy động lực học liên quan đến sóng biển như lực nâng và lực kéo.
- Độ sâu của nghiên cứu không bị hạn chế. Tuy nhiên, độ sâu của tàu ngầm trong các trường hợp được giả định sẽ ảnh hưởng đến các yếu tố thủy động lực học liên quan đến lực cản.
- Chất lỏng là nước biển, có độ nhớt và không nén được. Điều này có nghĩa là các tính chất vật lý của chất lỏng sẽ được giữ nguyên trong quá trình tính toán và mô phỏng.

#### **1.3.2 Phương pháp nghiên cứu**

Để nghiên cứu các đặc tính thủy động lực học của tàu ngầm, có thể sử dụng phương pháp lý thuyết và mô phỏng CFD để tiến hành phân tích và tính toán. Phương pháp lý thuyết bắt đầu từ việc phân tích đặc điểm hình học của tàu ngầm DARPA SUBOFF và xác định bản chất vật lý của bài toán mô phỏng dòng lưu chất chuyển động quanh tàu. Từ đó, các giả thiết và điều kiện ràng buộc có thể được áp đặt vào mô hình. Sau đó, thông số của mô hình được xác định dựa trên các thông tin về tàu ngầm DARPA SUBOFF. Các thông số này bao gồm kích thước, hình dạng, và các thông số vật lý như khối lượng, trọng tâm, và độ cản của tàu. Tiếp theo, phương pháp mô phỏng CFD được sử dụng để tính toán dòng chảy lưu chất xung quanh tàu ngầm. Phương pháp này sử dụng giải thuật số để giải quyết các phương trình Navier-Stokes và phương trình liên quan để mô phỏng dòng chảy lưu chất. Kết quả tính toán từ mô phỏng CFD sẽ cung cấp thông tin về lực thủy động lực học tác động lên tàu trong các trường hợp cụ thể như tàu bị chúi mũi hoặc bị dạt. Đầu tiên là sử dụng phương pháp lý thuyết bắt đầu từ việc phân tích đặc điểm hình học tàu tính toán và bản chất vật lý bài toán mô phỏng dòng lưu chất chuyển động quanh tàu ngầm, từ đó áp đặt các giả thiết và điều kiện ràng buộc trong

trường hợp này là tàu ngầm DARPA SUBOFF, dựa vào đó làm cơ sở để xác định các thông số của mô hình và sử dụng phương pháp mô phỏng CFD phù hợp để tính toán.

### **1.3.3 Nội dung nghiên cứu**

Nghiên cứu về các đặc tính thủy động lực học có thể tập trung vào các khía cạnh sau:

- Ảnh hưởng của vận tốc và độ sâu đến sức cản tác động lên tàu ngầm: Nghiên cứu này có thể xem xét cách vận tốc và độ sâu của tàu ngầm ảnh hưởng đến lực cản mà nó gặp phải trong môi trường nước.
- Ảnh hưởng của lực thủy động lực học đối với tàu trong trường hợp chúi mũi hoặc bị dạt: Nghiên cứu này có thể tìm hiểu các yếu tố thủy động lực học, chẳng hạn như lực nâng và sức cản và các ảnh hưởng đến tàu khi tàu bị chúi mũi hoặc bị dạt.

Nghiên cứu này sẽ giúp hiểu rõ hơn về các ảnh hưởng vận tốc, độ sâu, các góc dạt và góc chúi đến hoạt động của tàu ngầm học trong môi trường nước, từ đó cung cấp thông tin quan trọng cho việc thiết kế và điều khiển tàu ngầm hiệu quả.

## **CHƯƠNG 2. CƠ SỞ LÝ THUYẾT CỦA PHƯƠNG PHÁP CFD**

### **2.1 Giới thiệu về phương pháp CFD**

CFD (Computational Fluid Dynamics) là một phương pháp tính toán số được sử dụng để mô phỏng và phân tích các tình huống chuyển động của chất lỏng và khí. Nó dựa trên việc sử dụng các phương trình định lượng, như phương trình Euler và Navier-Stokes, để mô tả các quá trình chuyển động của chất lỏng và khí. Phương pháp CFD áp dụng các phương pháp tính toán số để giải quyết các phương trình định lượng này. Bằng cách chia không gian mô phỏng thành một lưới hữu hạn các điểm và áp dụng các phương pháp tính toán số như phương pháp Finite Difference, Finite Volume hoặc Finite Element, CFD có thể tính toán các thông số quan trọng như áp suất, vận tốc, nhiệt độ và các đặc tính khác của chất lỏng và khí trong không gian mô phỏng.

### **2.2 Các phương trình chủ đạo**

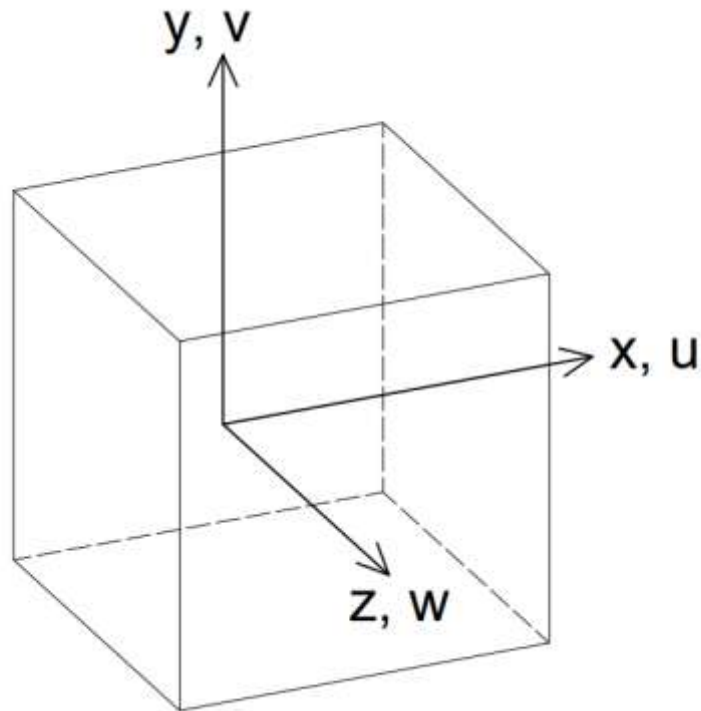
CFD về cơ bản dựa trên các phương trình chủ đạo của động lực học chất lỏng, chúng mô tả và biểu diễn các phương trình toán học về các định luật bảo toàn vật lý [3]. CFD dựa trên 3 nguyên lý vật lý cơ bản áp dụng cho hầu hết động lực học chất lỏng đó là:

- Định luật bảo toàn khối lượng
- Định luật II Newton
- Định luật bảo toàn năng lượng

Dựa trên 3 định luật trên thì CFD áp dụng đưa ra 3 phương trình chủ đạo tương ứng là:

- Phương trình bảo toàn khối lượng – liên tục
- Phương trình bảo toàn động lượng
- Phương trình bảo toàn năng lượng

Đầu tiên, các định luật sẽ được thể hiện dựa trên việc xét chất lỏng ở đơn vị cơ sở, ở đây là xét trên hạt chất lưu cơ sở hình lập phương và có các cạnh bằng 1 [3].



Hình 2.1 Mô tả hạt chất lưu và hướng theo tọa độ Descartes

Tìm hiểu các khái niệm được ứng dụng gồm áp suất  $p$ , trọng lượng riêng chất lỏng  $\rho$ , các vector vận tốc trong không gian  $u, v, w$  đều phụ thuộc vào các đại lượng tọa độ  $x, y, z$  và thời gian  $t$  nên các đại lượng này ngầm hiểu là  $p = p(x, y, z, t)$ ,  $\rho = \rho(x, y, z, t)$ ,  $u = u(x, y, z, t)$ ,  $v = v(x, y, z, t)$ ,  $w = w(x, y, z, t)$ .

### **2.2.1 Phương trình bảo toàn khối lượng – phương trình liên tục**

Phương trình bảo toàn khối lượng được phát biểu là tỷ lệ tăng khối lượng trong một phần tử chất lưu bằng tổng khối lượng đi vào và khối lượng đi ra trong một phần tử chất lưu đó [4].

Phương trình bảo toàn khối lượng được biểu diễn như sau [3]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (2.1)$$

Trong đó:

- $\frac{\partial \rho}{\partial t}$  là đạo hàm của khối lượng riêng chất lỏng trên thời gian: thể hiện sự thay đổi mật độ chất lỏng tại một thời điểm cụ thể.

–  $\frac{\partial(\rho u)}{\partial x}, \frac{\partial(\rho v)}{\partial y}, \frac{\partial(\rho w)}{\partial z}$  là đạo hàm của khối lượng riêng chất lỏng với vận tốc theo các hướng  $x, y, z$ : thể hiện sự thay đổi khối lượng khi có sự ra vào của các dòng vật chất.

Theo định luật bảo toàn khối lượng ta có:

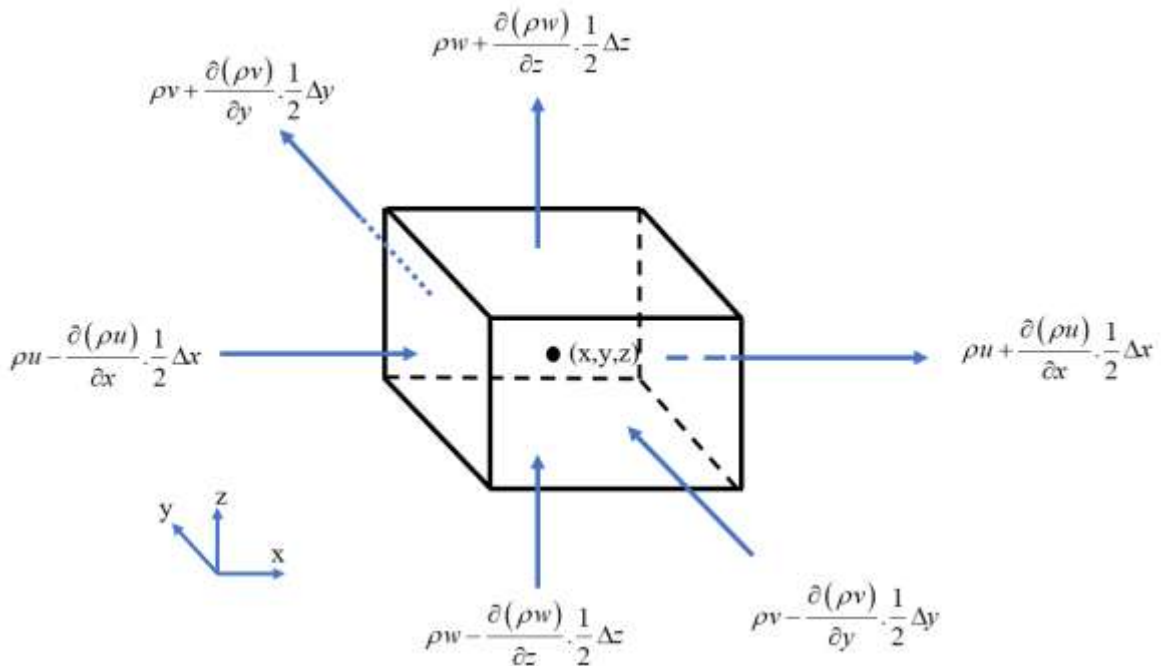
Tốc độ tăng khối lượng của phần tử chất lưu là đạo hàm của mật độ chất lưu trên một đơn vị thời gian:

$$\frac{\delta}{\delta t}(\rho \cdot \Delta x \Delta y \Delta z) = \frac{\delta \rho}{\delta t} \Delta x \Delta y \Delta z \quad (2.2)$$

Trong đó:

+  $\rho$ : Khối lượng riêng của chất lỏng  $\left(\frac{kg}{m^3}\right)$

+  $\delta x \delta y \delta z$ : Thể tích của phần tử chất lưu



Hình 2.2 Lưu lượng chất lỏng vào ra của phần tử chất lưu

Lưu lượng khối vào ra của một phần tử chất lưu có tọa độ  $(x,y,z)$  cho dòng chảy theo phương  $x$  là:

$$m = \rho U \cdot \Delta y \cdot \Delta z \quad (2.3)$$

Lưu lượng khối tại 2 mặt vào ra của phần tử chất lưu theo phương  $x$  là:

$$\left( \rho u - \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} \cdot \frac{1}{2} \Delta x \right) \cdot (\Delta y \Delta z); \left( \rho u + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} \cdot \frac{1}{2} \Delta x \right) \cdot (\Delta y \Delta z) \quad (2.4)$$

Tương tự đối với phương y và z ta có:

$$\text{Theo phương y: } \left( \rho v - \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} \cdot \frac{1}{2} \Delta y \right) \cdot (\Delta x \Delta z); \left( \rho v + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} \cdot \frac{1}{2} \Delta y \right) \cdot (\Delta x \Delta z) \quad (2.5)$$

$$\text{Theo phương z: } \left( \rho w - \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} \cdot \frac{1}{2} \Delta z \right) \cdot (\Delta x \Delta y); \left( \rho w + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} \cdot \frac{1}{2} \Delta z \right) \cdot (\Delta x \Delta y) \quad (2.6)$$

Vậy lưu lượng khối giữa dòng vào và dòng ra của một phần tử chất lưu là:

$$\begin{aligned} & \left( \rho u - \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} \cdot \frac{1}{2} \Delta x \right) \cdot (\Delta y \Delta z) - \left( \rho u + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} \cdot \frac{1}{2} \Delta x \right) \cdot (\Delta y \Delta z) \\ & + \left( \rho v - \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} \cdot \frac{1}{2} \Delta y \right) \cdot (\Delta x \Delta z) - \left( \rho v + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} \cdot \frac{1}{2} \Delta y \right) \cdot (\Delta x \Delta z) \\ & + \left( \rho w - \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} \cdot \frac{1}{2} \Delta z \right) \cdot (\Delta x \Delta y) - \left( \rho w + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} \cdot \frac{1}{2} \Delta z \right) \cdot (\Delta x \Delta y) \\ & = \rho u \cdot \Delta y \Delta z - \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} \cdot \frac{1}{2} \Delta x \Delta y \Delta z - \rho u \cdot \Delta y \Delta z - \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} \cdot \frac{1}{2} \Delta x \Delta y \Delta z \\ & + \rho v \cdot \Delta x \Delta z - \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} \cdot \frac{1}{2} \Delta y \Delta x \Delta z - \rho v \cdot \Delta x \Delta z - \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} \cdot \frac{1}{2} \Delta y \Delta x \Delta z \\ & + \rho w \cdot \Delta x \Delta y - \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} \cdot \frac{1}{2} \Delta z \Delta x \Delta y - \rho w \cdot \Delta x \Delta y - \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} \cdot \frac{1}{2} \Delta z \Delta x \Delta y \\ & = - \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} \Delta x \Delta y \Delta z - \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} \Delta x \Delta y \Delta z - \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} \Delta x \Delta y \Delta z \end{aligned} \quad (2.7)$$

Từ công thức (2.2) và (2.6) ta suy ra phương trình bảo toàn khối lượng là:

$$\frac{\delta \rho}{\delta t} \Delta x \Delta y \Delta z = - \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} \cdot \Delta x \Delta y \Delta z - \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} \cdot \Delta x \Delta y \Delta z - \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} \cdot \Delta x \Delta y \Delta z \quad (2.8)$$

$$\Rightarrow \frac{\delta \rho}{\delta t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (2.9)$$

Vì đây là chất lỏng không nén được nên mật độ chất lỏng không thay đổi theo thời gian do đó phương trình (2.10) sẽ trở thành:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (2.10)$$

### 2.2.2 Phương trình bảo toàn động lượng

Phương trình bảo toàn động lượng được phát biểu là tỷ lệ tăng động lượng trong một phần tử chất lưu bằng tổng các lực tác dụng lên phần tử chất lưu đó bao gồm lực mặt và lực khối [4]. Lực mặt là lực tác động của một vật lên một bề mặt và được tính bằng tích của áp suất với diện tích bề mặt tiếp xúc giữa vật và bề mặt đó. Lực khối là lực tác động lên một vật do trọng lượng của nó và được tính bằng tích của khối lượng của vật và gia tốc trọng trường. Dựa vào Hình 3.1 ta có xác định được trên các mặt của hình lập phương các ứng suất pháp  $\sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \sigma_{zz}$  theo các hướng  $x, y, z$  và các ứng suất tiếp  $\tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx}$  của các mặt lập phương song song với các mặt  $xy, yz, xz$ .

Phương trình bảo toàn động lượng được biểu diễn như sau [3]:

– Theo phương  $x$ :

$$\rho \frac{Du}{Dt} = \frac{-\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + \sum F_x^B \quad (2.11)$$

– Theo phương  $y$ :

$$\rho \frac{Dv}{Dt} = \frac{-\partial p}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + \sum F_y^B \quad (2.12)$$

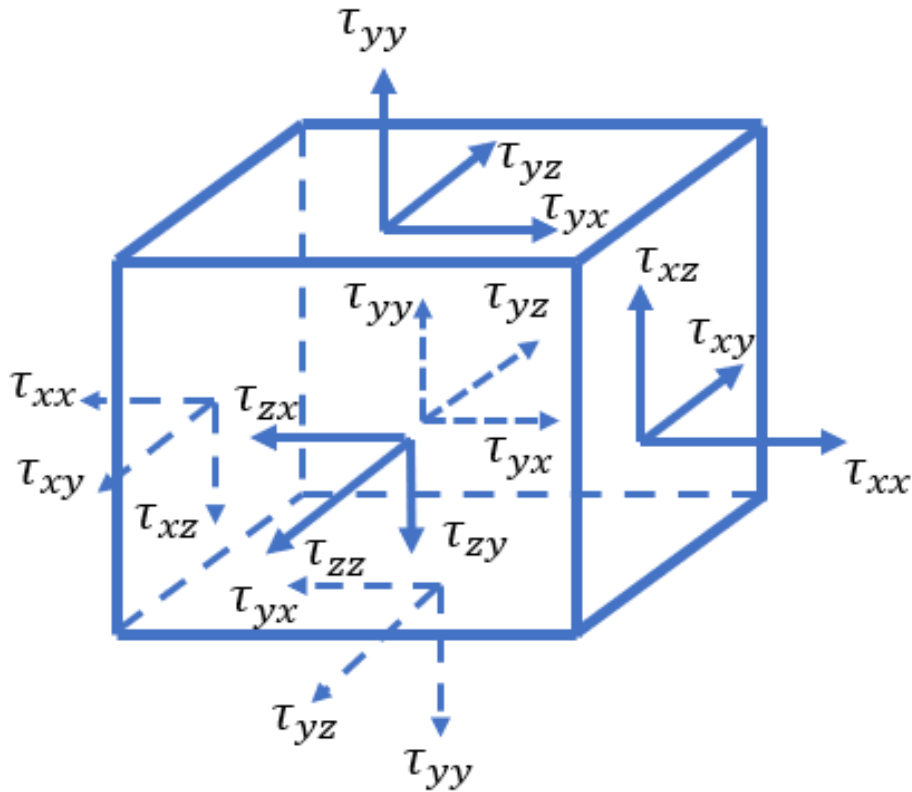
– Theo phương  $z$ :

$$\rho \frac{Dw}{Dt} = \frac{-\partial p}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} + \sum F_z^B \quad (2.13)$$

Trong đó:

- $\rho \frac{Du}{Dt}, \rho \frac{Dv}{Dt}, \rho \frac{Dw}{Dt}$  là tích của khối lượng riêng chất lỏng nhân với đạo hàm riêng của các hàm vectơ vận tốc  $u, v, w$  theo thời gian: thể hiện sự thay đổi động lượng của hạt chất lưu theo thời gian.
- $\frac{-\partial p}{\partial x}, \frac{-\partial p}{\partial y}, \frac{-\partial p}{\partial z}$  là đạo hàm của áp suất theo các phương  $x, y, z$ : thể hiện sự thay đổi áp suất do thay đổi của mật độ chất lỏng trong hạt lưu chất khi có ngoại lực tác động [4].

- $\frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z}$ ,  $\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z}$ ,  $\frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z}$  là lực mặt tác dụng lên hạt lưu chất theo các phương  $x$ ,  $y$ ,  $z$ : thể hiện các ngoại lực tác dụng lên bề mặt bao gồm lực tiếp tuyến và lực pháp tuyến.
- $\sum F_x^B$ ,  $\sum F_y^B$ ,  $\sum F_z^B$  là các lực khối tác dụng lên phần tử chất lưu.



Hình 2.3 Các thành phần ứng suất tác dụng lên phần tử chất lưu theo phương x  
 Tổng các lực tác dụng lên phần tử chất lưu theo phương x là:

$$\sum F_x = m.a_x \quad (2.14)$$

Trong đó:

- $\sum F_x$ : Tổng lực tác dụng lên phần tử chất lưu theo phương x
- $a_x$ : Gia tốc ( $a_x = \frac{Du}{Dt}$ )
- $m$ : Khối lượng,  $m = \rho.\Delta x\Delta y\Delta z$

Tổng lực mặt tác dụng lên phần tử chất lưu theo phương x:

$$\sum F_x = \left( \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} \right) \Delta x \Delta y \Delta z \quad (2.15)$$

Tổng lực mặt tác dụng lên phần tử chất lưu theo phương y là:

$$\sum F_y = \left( \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} \right) \Delta x \Delta y \Delta z \quad (2.16)$$

Tổng lực mặt tác dụng lên phần tử chất lưu theo phương z là:

$$\sum F_z = \left( \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} \right) \Delta x \Delta y \Delta z \quad (2.17)$$

Trong đó:

$$\begin{aligned} \sigma_{xx} &= -p + \tau_{xx} \\ \sigma_{yy} &= -p + \tau_{yy} \\ \sigma_{zz} &= -p + \tau_{zz} \end{aligned} \quad (2.18)$$

Mà theo Newton thì ứng suất nhớt tỷ lệ thuận với tốc độ biến dạng nên ta có:

$$\begin{aligned} \tau_{ii} &= 2\mu \frac{\partial u_i}{\partial x_i} + \lambda \nabla \cdot u \\ \tau_{ij} &= \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \end{aligned} \quad (2.19)$$

Trong đó:

$$+ \nabla \cdot u = 0 \text{ (đối với chất lỏng lý tưởng không nén được)}$$

Do đó ta có:

$$\begin{aligned} \sigma_{xx} &= -p + \tau_{xx} \\ \sigma_{yy} &= -p + \tau_{yy} \\ \sigma_{zz} &= -p + \tau_{zz} \\ \tau_{xy} = \tau_{yx} &= \mu \left( \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) \\ \tau_{xz} = \tau_{zx} &= \mu \left( \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) \\ \tau_{yz} = \tau_{zy} &= \mu \left( \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \end{aligned} \quad (2.20)$$

Thành phần lực khối tác dụng lên mô hình với phương x,y,z là:  $\rho g$

=> Phương trình bảo toàn động lượng theo phương x là:

$$\rho \frac{Du}{Dt} = (F_F + F_B) \Delta x \Delta y \Delta z \quad (2.21)$$

Trong đó:

- $F_F$  là lực mặt
- $F_B$  là lực khối

$$\begin{aligned} \Leftrightarrow \rho \frac{Du}{Dt} &= \rho g_x + \left( \frac{\partial(-p + 2\mu \frac{\partial u}{\partial x})}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left[ \mu \left( \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ \mu \left( \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) \right] \quad (2.22) \\ &= \rho g_x - \frac{\partial p}{\partial x} + 2\mu \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y \partial x} \mu + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \mu + \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial z} \mu + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \mu \\ &= \rho g_x - \frac{\partial p}{\partial x} + \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \mu + \mu \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial z} \right) \\ &= \rho g_x - \frac{\partial p}{\partial x} + \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \mu + \mu \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) \end{aligned}$$

Tương tự đối với phương y và z ta có:

$$\rho \frac{Dv}{Dt} = \rho g_y - \frac{\partial p}{\partial y} + \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \mu + \mu \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) \quad (2.23)$$

$$\rho \frac{Dw}{Dt} = \rho g_z - \frac{\partial p}{\partial z} + \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \mu + \mu \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\partial w}{\partial z} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial u}{\partial x} \right) \quad (2.24)$$

### 2.2.3 Phương trình bảo toàn năng lượng

Phương trình bảo toàn động lượng được phát biểu là tỷ lệ tăng năng lượng trong một phần tử chất lưu bằng tổng nhiệt truyền vào phần tử chất lưu cộng với tổng công sinh ra của phần tử chất lưu đó [4]. Phương trình bảo toàn năng lượng được biểu diễn như sau:

$$\begin{aligned} \rho \frac{DE}{Dt} &= -\text{div}(pu) + \text{div}(\lambda \cdot \text{grad}(T)) \\ &+ \left[ \begin{aligned} &\frac{\partial(u\sigma_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial(u\tau_{yx})}{\partial y} + \frac{\partial(u\tau_{zx})}{\partial z} \\ &+ \frac{\partial(v\tau_{yx})}{\partial x} + \frac{\partial(v\sigma_{yy})}{\partial y} + \frac{\partial(v\tau_{zy})}{\partial z} \\ &+ \frac{\partial(w\tau_{zx})}{\partial x} + \frac{\partial(w\tau_{zy})}{\partial y} + \frac{\partial(w\sigma_{zz})}{\partial z} \end{aligned} \right] \quad (2.25) \end{aligned}$$

Trong đó:

- $\rho \frac{DE}{Dt}$  là tích của khối lượng riêng chất lỏng nhân với đạo hàm riêng của hàm năng lượng theo thời gian: thể hiện sự thay đổi năng lượng của hạt chất lưu theo thời gian.
- $-\text{div}(\rho u) = -\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} - \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} - \frac{\partial(\rho w)}{\partial z}$
- $\text{div}(\lambda \cdot \text{grad}(T)) = -\text{div}(q)$  là tốc độ truyền nhiệt vào chất lỏng vào chất lỏng và  $q = -\lambda \cdot \text{grad}(T)$  là nhiệt lượng truyền qua các bề mặt tiếp xúc.

## 2.3 Các phương pháp mô phỏng dòng rối

### 2.3.1 Giới thiệu về dòng rối

Dòng chảy tầng là dòng chảy mà ở đó các hạt chất lưu di chuyển song song với nhau, có sự phân tầng về vận tốc và khi ở trạng thái ổn định vận tốc tại một điểm hầu như không đổi theo thời gian.

Dòng chảy rối là dòng chảy mà các hạt chất lưu di chuyển không ổn định và nhiễu loạn tạo ra các dòng xoáy hỗn độn lớn bé khác nhau dẫn đến sự thay đổi ngẫu nhiên của vận tốc và áp suất làm cho sự khuếch tán, trao đổi năng lượng diễn ra mạnh mẽ và khó kiểm soát.

Ở đây, trong đề tài này việc tìm hiểu về dòng rối cực kỳ quan trọng vì khi mô phỏng các dòng rối này chính là kết quả của mô phỏng cần tìm hiểu, tại các vị trí chất lỏng đi qua vật thể có sự thay đổi vận tốc và áp suất thì ảnh hưởng đến kết quả mong đợi và đưa ra lời giải để tìm hiểu sâu hơn.

### 2.3.2 Phương pháp mô phỏng rối trực tiếp DNS (Direct Numerical Simulation)

#### ❖ Khái niệm:

DNS là một phương pháp mô phỏng dòng chảy trong lĩnh vực CFD, trong đó các phương trình Navier-Stokes được giải quyết trực tiếp để tính toán các thông số dòng chảy trên từng điểm không gian. DNS là phương pháp có độ chính xác cao nhất trong CFD, cho phép mô phỏng các hiện tượng dòng chảy chi tiết nhất [4].

Tuy nhiên, việc giải quyết trực tiếp các phương trình Navier-Stokes đòi hỏi khối lượng tính toán rất lớn, vì vậy DNS thường chỉ được sử dụng trong các trường hợp dòng chảy không nén được và với kích thước không gian nhỏ.

❖ **Các đặc điểm của DNS bao gồm:**

- Độ chính xác cao: DNS cho phép tính toán các thông số dòng chảy trên từng điểm không gian, do đó độ chính xác của phương pháp này rất cao.
- Khối lượng tính toán lớn: Việc giải quyết trực tiếp các phương trình Navier-Stokes đòi hỏi khối lượng tính toán rất lớn, do đó DNS chỉ áp dụng được cho các trường hợp dòng chảy không nhớt và với kích thước không gian nhỏ.

### **2.3.3 Phương pháp mô phỏng rối với các xoáy lớn LES (Large Eddy Simulation)**

❖ **Khái niệm:**

LES là một phương pháp mô phỏng dòng chảy trong lĩnh vực CFD, trong đó các hiện tượng dòng chảy nhớt được mô phỏng bằng cách giải quyết trực tiếp các phần tử nhỏ, gọi là eddy, và xấp xỉ các phần tử lớn hơn. Phương pháp LES cho phép mô phỏng các hiện tượng dòng chảy nén được với độ chính xác cao hơn so với các phương pháp mô phỏng dòng chảy không nén được và đồng thời giảm thiểu chi phí tính toán so với các phương pháp mô phỏng dòng chảy toàn phần (DNS) [4].

❖ **Các đặc điểm của LES bao gồm:**

- Độ chính xác cao: LES cho phép mô phỏng các hiện tượng dòng chảy nén được với độ chính xác cao hơn so với các phương pháp mô phỏng dòng chảy không nén được.
- Khối lượng tính toán trung bình: Việc giải quyết trực tiếp các phần tử nhỏ đòi hỏi khối lượng tính toán trung bình so với DNS, do đó LES có thể được sử dụng cho các ứng dụng thực tế.

### **2.3.4 Phương pháp mô phỏng rối trung bình RANS (Reynolds-Averaged Navier-Stokes)**

❖ **Khái niệm:**

RANS là một phương pháp mô phỏng dòng chảy trong lĩnh vực CFD, trong đó các phương trình Navier-Stokes được giải quyết bằng kỹ thuật lấy trung bình Reynolds.

Phương pháp RANS cho phép mô phỏng các hiện tượng dòng chảy không nén được với độ chính xác tương đối cao và được sử dụng rộng rãi trong các ứng dụng thực tế.

❖ **Các đặc điểm của RANS bao gồm:**

- Độ chính xác tương đối cao: Phương pháp RANS cho phép mô phỏng các hiện tượng dòng chảy không nén được với độ chính xác tương đối cao. Tuy nhiên, độ chính xác của RANS thấp hơn so với các phương pháp mô phỏng dòng chảy không nén được và LES (Large Eddy Simulation).
- Khối lượng tính toán trung bình: Việc giải quyết kỹ thuật lấy trung bình Reynolds giúp giảm số lượng phương trình cần giải quyết và do đó giảm khối lượng tính toán so với các phương pháp mô phỏng dòng chảy toàn phần (DNS).

❖ **Kết luận:**

Đề tài này làm việc với đối tượng là tàu ngầm Darpa Suboff có tính chất đối xứng và quá trình nghiên cứu liên quan đến áp suất, vận tốc, độ nhớt động học và lưu lượng chất lỏng. Phương pháp RANS cho kết quả khá chính xác và khối lượng tính toán phù hợp với khả năng tính toán mà không mất nhiều nguồn tài nguyên và ngoài ra phương pháp RANS xử lý tốt các trường hợp chất lỏng có hướng và hình học có tính chất đối xứng.

Phương trình trung bình RANS được xây dựng trên cơ sở là tách các giá trị biến của dòng chất lưu thành các thành phần trung bình và thành phần biến động từ đây sinh ra 6 biến mới tương ứng 6 thành phần ứng suất rối Re (Reynolds) để biểu diễn biến động tăng vận tốc của chất lưu đó là:

$$\begin{aligned} \partial_{xx} &= -\overline{\rho u'^2}, \quad \partial_{yy} = -\overline{\rho v'^2}, \quad \partial_{zz} = -\overline{\rho w'^2} \\ \tau_{xy} = \tau_{yx} &= -\overline{\rho u'v'}, \quad \tau_{yz} = \tau_{zy} = -\overline{\rho v'w'}, \quad \tau_{xz} = \tau_{zx} = -\overline{\rho u'w'} \end{aligned} \quad (2.26)$$

3 phương trình bảo toàn có 5 phương trình mà phương pháp RANS có 6 ẩn mới nên phương pháp này thông thường sẽ bổ sung các mô hình dòng chảy rối, ta sử dụng mô hình SST k- $\omega$  cho bài toán này. STT k- $\omega$  là sự kết hợp giữa 2 mô hình k- $\epsilon$  và k- $\omega$  trong đó k- $\epsilon$  mạnh cho tính toán dòng chất lưu xung quanh vật thể nhưng lớp biên thì ít chính xác thay vào đó lớp biên sẽ được tính bằng mô hình k- $\omega$ .

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(\rho\omega)}{\partial t} + \text{div}(\rho\omega V) \\ & = \text{div} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_{\omega,1}} \right) \text{grad}(\omega) \right] + \gamma_2 \left( 2\rho S_{ij} \cdot S_{ij} - \frac{2}{3} \rho \omega \frac{\partial V_i}{\partial x_j} \Delta_{ij} \right) - \beta_2 \rho \omega^2 + 2 \frac{\rho}{\sigma_{\omega,2} \omega} \frac{\partial k}{\partial x_k} \frac{\partial \omega}{\partial x_k} \end{aligned} \quad (2.27)$$

## 2.4 Ứng dụng của phương pháp CFD

Xu hướng sử dụng phương pháp mô phỏng CFD (Computational Fluid Dynamics) ngày càng được phổ biến trong các lĩnh vực kỹ thuật và công nghiệp hiện nay. CFD giúp tối ưu hóa thiết kế và cải thiện hiệu suất của các sản phẩm và quá trình sản xuất, đồng thời giảm thiểu chi phí và thời gian nghiên cứu và phát triển sản phẩm mới. Ngoài ra, CFD còn giúp đánh giá tác động của dòng chảy chất lỏng và khí đến môi trường, từ đó đưa ra các giải pháp bảo vệ môi trường và tăng cường an toàn cho các hoạt động sản xuất. Tuy nhiên, việc sử dụng CFD cũng đặt ra một số thách thức, bao gồm chi phí cao cho việc tính toán và mô phỏng, độ phức tạp của các thuật toán và phương trình tính toán, cũng như sự khó khăn trong việc thu thập và xử lý dữ liệu đầu vào. Vì vậy, việc sử dụng CFD cần được đánh giá kỹ lưỡng để đảm bảo tính chính xác và hiệu quả của các kết quả mô phỏng, từ đó đưa ra các quyết định thiết thực và hợp lý trong các hoạt động kỹ thuật và sản xuất.

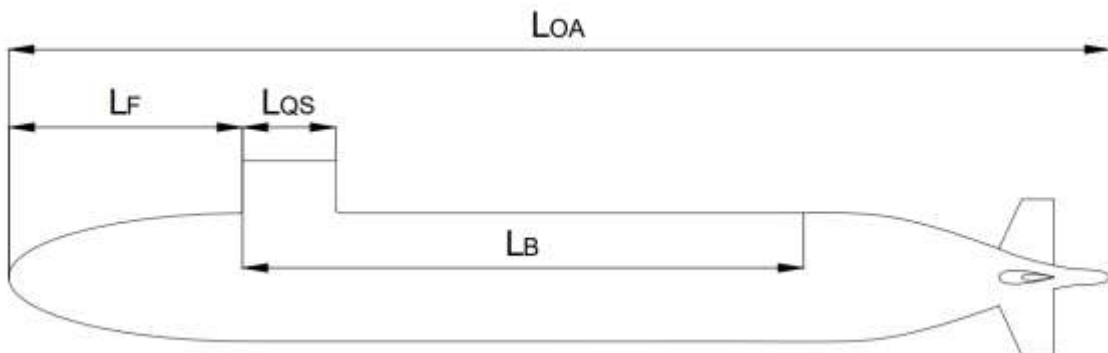
### **CHƯƠNG 3. XÂY DỰNG MÔ HÌNH 3D TÀU NGẦM DARPA SUBOFF**

#### **3.1 Thu thập dữ liệu**

Dựa vào tài liệu [1] về việc xây dựng lên mô hình tàu DARPA SUBOFF bằng tọa độ, ta chia ra các giai đoạn xây dựng nên mô hình 3D tàu.

Bảng 3.1 Dữ liệu tàu ngầm Darpa Suboff (David Taylor Research Center)

Thông số	Ký hiệu	Kích thước (m)
Chiều dài toàn bộ	$L_{OA}$	4,356
Chiều dài phần thân trước	$L_F$	1,016
Chiều dài phần thân giữa	$L_B$	2,229
Chiều dài phần thân sau tàu	$L_A$	1,111
Chiều dài phần đuôi	$L_D$	0,095
Chiều dài đài quan sát	$L_{QS}$	0,368
Đài quan sát cách vị trí mũi tàu ngầm theo phương dọc tàu	-	0,924



Hình 3.1 Kích thước chủ yếu mô hình tàu ngầm

#### **3.2 Xây dựng mô hình 3D**

##### **3.2.1 Phần thân tàu ngầm đối xứng**

Phần thân tàu có dạng đối xứng qua đường tâm dọc thân tàu xuyên suốt chiều dài 4,356m và đường kính lớn nhất phần thân giữa là 0,508m. Chọn trục x làm trục đối xứng với điểm O là phần đỉnh mũi tàu ngầm ta chia phần thân tàu thành 4 phần:

❖ **Phần mũi** ( $0m \leq x \leq 1,016m$ ) hoặc ( $0ft \leq x \leq 3,333ft$ )

Công thức xác định bán kính phần mũi theo chiều dài theo đơn vị feet:

$$R = R_{MAX} \left[ \begin{array}{l} 1,126395101x(0,3x-1)^4 \\ +0,442874707x^2(0,3x-1)^3 \\ +1-(0,3x-1)^4(1,2x+1) \end{array} \right]^{\frac{1}{2,1}} \quad (3.1)$$

Trong đó:

- x là chiều dài mô hình (ft)
- R bán kính từ tâm dọc tàu (ft)
- $R_{max} = \frac{5}{6}$

**Bảng 3.2 Bán kính phần mũi theo chiều dài tàu**

STT	x (ft)	R (ft)	x (m)	R (m)
0	0,000	0,000	0,000	0,000
1	0,042	0,059	0,013	0,018
2	0,083	0,114	0,025	0,035
3	0,125	0,164	0,038	0,050
4	0,167	0,212	0,051	0,065
5	0,208	0,255	0,063	0,078
6	0,250	0,296	0,076	0,090
7	0,292	0,333	0,089	0,101
8	0,333	0,367	0,102	0,112
9	0,375	0,398	0,114	0,121
10	0,417	0,427	0,127	0,130
11	0,458	0,453	0,140	0,138
12	0,500	0,478	0,152	0,146
13	0,542	0,499	0,165	0,152
14	0,583	0,519	0,178	0,158
15	0,625	0,538	0,190	0,164
16	0,667	0,554	0,203	0,169

17	0,708	0,569	0,216	0,173
18	0,750	0,583	0,229	0,178
19	0,792	0,595	0,241	0,181
20	0,833	0,606	0,254	0,185
21	0,875	0,616	0,267	0,188
22	0,917	0,625	0,279	0,191
23	0,958	0,633	0,292	0,193
24	1,000	0,641	0,305	0,195
25	1,042	0,648	0,317	0,197
26	1,083	0,654	0,330	0,199
27	1,125	0,660	0,343	0,201
28	1,167	0,665	0,356	0,203
29	1,208	0,670	0,368	0,204
30	1,250	0,675	0,381	0,206
31	1,292	0,679	0,394	0,207
32	1,333	0,684	0,406	0,208
33	1,375	0,688	0,419	0,210
34	1,417	0,692	0,432	0,211
35	1,458	0,696	0,444	0,212
36	1,500	0,700	0,457	0,213
37	1,542	0,703	0,470	0,214
38	1,583	0,707	0,483	0,216
39	1,625	0,711	0,495	0,217
40	1,667	0,715	0,508	0,218
41	1,708	0,719	0,521	0,219
42	1,750	0,723	0,533	0,220
43	1,792	0,727	0,546	0,222
44	1,833	0,731	0,559	0,223
45	1,875	0,736	0,571	0,224
46	1,917	0,740	0,584	0,226

*Phân tích đặc tính thủy động lực học của tàu ngầm Darpa Suboff bằng phương pháp CFD*

47	1,958	0,744	0,597	0,227
48	2,000	0,749	0,610	0,228
49	2,042	0,753	0,622	0,230
50	2,083	0,758	0,635	0,231
51	2,125	0,762	0,648	0,232
52	2,167	0,767	0,660	0,234
53	2,208	0,771	0,673	0,235
54	2,250	0,775	0,686	0,236
55	2,292	0,780	0,698	0,238
56	2,333	0,784	0,711	0,239
57	2,375	0,788	0,724	0,240
58	2,417	0,792	0,737	0,242
59	2,458	0,796	0,749	0,243
60	2,500	0,800	0,762	0,244
61	2,542	0,804	0,775	0,245
62	2,583	0,807	0,787	0,246
63	2,625	0,811	0,800	0,247
64	2,667	0,814	0,813	0,248
65	2,708	0,817	0,825	0,249
66	2,750	0,819	0,838	0,250
67	2,792	0,822	0,851	0,250
68	2,833	0,824	0,864	0,251
69	2,875	0,826	0,876	0,252
70	2,917	0,827	0,889	0,252
71	2,958	0,829	0,902	0,253
72	3,000	0,830	0,914	0,253
73	3,042	0,831	0,927	0,253
74	3,083	0,832	0,940	0,254
75	3,125	0,832	0,952	0,254
76	3,167	0,833	0,965	0,254

77	3,208	0,833	0,978	0,254
78	3,250	0,833	0,991	0,254
79	3,292	0,833	1,003	0,254
80	3,333	0,833	1,016	0,254

❖ **Phần thân ống** ( $1,016m \leq x \leq 3,245m$ ) hoặc ( $3,333ft \leq x \leq 10,646ft$ )

Bảng 3.3 Bán kính phần thân ống

STT	x	R	Đơn vị
1	1,016	0,254	m
2	3,245	0,254	m

❖ **Phần đuôi** ( $3,245m \leq x \leq 4,261m$ ) hoặc ( $10,646ft \leq x \leq 13,979ft$ )

Công thức xác định bán kính phần đuôi theo chiều dài theo đơn vị feet:

$$R = R_{MAX} \left[ \begin{aligned} & r_h^2 + r_h K_o \xi^2 + \left( 20 - 20r_h^2 - 4r_h K_o - \frac{1}{3} K_1 \right) \xi^3 \\ & + (-45 + 45r_h^2 + 6r_h K_o + K_1) \xi^4 \\ & + (36 - 36r_h^2 - 4r_h K_o - K_1) \xi^5 \\ & + \left( -10 + 10r_h^2 + r_h K_o + \frac{1}{3} K_1 \right) \xi^6 \end{aligned} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3.2)$$

Trong đó:

- $r_h = 0,1175$
- $K_0 = 10$
- $K_1 = 46,6244$
- $\xi = \frac{13,979167 - x}{3,333333}$

**Bảng 3.4 Bán kính phần đuôi theo chiều dài**

STT	$\xi$	x (ft)	R (ft)	x (m)	R (m)
0	1,000	10,646	0,833	3,245	0,254
1	0,950	10,812	0,833	3,296	0,254
2	0,900	10,979	0,828	3,346	0,252
3	0,850	11,146	0,818	3,397	0,249
4	0,800	11,312	0,801	3,448	0,244
5	0,750	11,479	0,776	3,499	0,237
6	0,700	11,646	0,744	3,550	0,227
7	0,650	11,812	0,705	3,600	0,215
8	0,600	11,979	0,661	3,651	0,201
9	0,550	12,146	0,611	3,702	0,186
10	0,500	12,313	0,557	3,753	0,170
11	0,450	12,479	0,501	3,804	0,153
12	0,400	12,646	0,442	3,854	0,135
13	0,350	12,813	0,384	3,905	0,117
14	0,300	12,979	0,327	3,956	0,100
15	0,250	13,146	0,271	4,007	0,083
16	0,200	13,313	0,220	4,058	0,067
17	0,150	13,479	0,174	4,108	0,053
18	0,100	13,646	0,135	4,159	0,041
19	0,050	13,813	0,108	4,210	0,033
20	0,000	13,979	0,098	4,261	0,030

❖ **Phần chóp đuôi** ( $4,261m \leq x \leq 4,356m$ ) hoặc ( $13,979ft \leq x \leq 14,291ft$ )

Công thức xác định bán kính phần đuôi theo chiều dài theo đơn vị feet:

$$R = 0.1175 \cdot R_{Max} \cdot \left[ 1 - (3,2x - 44,733333)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3.3)$$

**Bảng 3.5 Bán kính phần chóp theo chiều dài**

STT	x (ft)	R (ft)	x (m)	R (m)
0	13,979	0,098	4,261	0,030
1	14,042	0,096	4,280	0,029
2	14,104	0,090	4,299	0,027
3	14,167	0,078	4,318	0,024
4	14,229	0,059	4,337	0,018
5	14,292	0,000	4,356	0,000

### 3.2.2 Phần đài quan sát

Phần đài quan sát mặt cắt dạng profil, ở đây sẽ xác định tọa độ dạng profil ở mặt trên cùng của đài quan sát.

#### ❖ Phần trước

Công thức xác định tọa độ phần trước đài quan sát theo đơn vị feet:

$$z_l = z_{\max} \left[ 2,094759(A) + 0,2071781(B) + (C) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3.4)$$

Trong đó:

$$A = 2D(D-1)^4$$

$$B = \frac{1}{3}D^2(D-1)^3$$

$$C = 1 - (D-1)^4(4D+1)$$

$$D = 0,9363456(x - 0,9244541328)$$

**Bảng 3.6 Tọa độ profil phần phía trước đài quan sát**

STT	A	B	C	D	x (ft)	y (ft)	z (ft)	x (m)	y (m)	z (m)
0	0,000	0,000	0,000	0,000	3,033	1,508	0,000	0,924	0,460	0,000
1	0,058	0,000	0,010	0,033	3,044	1,508	0,040	0,928	0,460	0,012
2	0,101	-0,001	0,039	0,067	3,055	1,508	0,055	0,931	0,460	0,017
3	0,131	-0,002	0,081	0,100	3,066	1,508	0,065	0,934	0,460	0,020
4	0,150	-0,004	0,135	0,133	3,076	1,508	0,073	0,938	0,460	0,022
5	0,161	-0,005	0,196	0,167	3,087	1,508	0,080	0,941	0,460	0,024
6	0,164	-0,007	0,263	0,200	3,098	1,508	0,085	0,944	0,460	0,026
7	0,161	-0,008	0,332	0,233	3,109	1,508	0,089	0,948	0,460	0,027

8	0,154	-0,009	0,402	0,267	3,120	1,508	0,093	0,951	0,460	0,028
9	0,144	-0,010	0,472	0,300	3,131	1,508	0,096	0,954	0,460	0,029
10	0,132	-0,011	0,539	0,333	3,141	1,508	0,099	0,958	0,460	0,030
11	0,118	-0,011	0,603	0,367	3,152	1,508	0,101	0,961	0,460	0,031
12	0,104	-0,012	0,663	0,400	3,163	1,508	0,102	0,964	0,460	0,031
13	0,089	-0,011	0,718	0,433	3,174	1,508	0,104	0,967	0,460	0,032
14	0,076	-0,011	0,768	0,467	3,185	1,508	0,105	0,971	0,460	0,032
15	0,062	-0,010	0,813	0,500	3,196	1,508	0,106	0,974	0,460	0,032
16	0,051	-0,010	0,851	0,533	3,207	1,508	0,107	0,977	0,460	0,033
17	0,040	-0,009	0,885	0,567	3,217	1,508	0,108	0,981	0,460	0,033
18	0,031	-0,008	0,913	0,600	3,228	1,508	0,108	0,984	0,460	0,033
19	0,023	-0,007	0,936	0,633	3,239	1,508	0,108	0,987	0,460	0,033
20	0,016	-0,005	0,955	0,667	3,250	1,508	0,109	0,991	0,460	0,033
21	0,011	-0,004	0,969	0,700	3,261	1,508	0,109	0,994	0,460	0,033
22	0,007	-0,003	0,980	0,733	3,272	1,508	0,109	0,997	0,460	0,033
23	0,005	-0,002	0,988	0,767	3,283	1,508	0,109	1,001	0,460	0,033
24	0,003	-0,002	0,993	0,800	3,293	1,508	0,109	1,004	0,460	0,033
25	0,001	-0,001	0,997	0,833	3,304	1,508	0,109	1,007	0,460	0,033
26	0,001	-0,001	0,999	0,867	3,315	1,508	0,109	1,010	0,460	0,033
27	0,000	0,000	1,000	0,900	3,326	1,508	0,109	1,014	0,460	0,033
28	0,000	0,000	1,000	0,933	3,337	1,508	0,109	1,017	0,460	0,033
29	0,000	0,000	1,000	0,967	3,348	1,508	0,109	1,020	0,460	0,033
30	0,000	0,000	1,000	1,000	3,359	1,508	0,109	1,024	0,460	0,033

❖ **Phân giữa**

Bảng 3.7 Tọa độ profil phân giữa

STT	x (m)	y (m)	z (m)
0	1,024	0,460	0,033
1	1,085	0,460	0,033

❖ **Phần đuôi**

Công thức xác định tọa độ phần đuôi đài quan sát theo đơn vị feet:

$$z_i = 0,109375 \left[ \begin{array}{l} 2,238361(E(E-1)^4) \\ +3,106529(E^2(E-1)^3) + (1-(E-1)^4(4E+1)) \end{array} \right] \quad (3.5)$$

$$E = \frac{(4,241319 - x)}{0,6822917}$$

**Bảng 3.8 Tọa độ profil phần đuôi**

STT	E	x (ft)	y (ft)	z (ft)	x (m)	y (m)	z (m)
0	1,000	3,559	1,508	0,109	1,085	0,460	0,033
1	0,750	3,730	1,508	0,105	1,137	0,460	0,032
2	0,500	3,900	1,508	0,086	1,189	0,460	0,026
3	0,250	4,071	1,508	0,051	1,241	0,460	0,015
4	0,000	4,241	1,508	0,000	1,293	0,460	0,000

**3.2.3 Phần vây đuôi**

Phần vây đuôi với số lượng là 4 nên ở đây sẽ xác định vây vị trí 0°. Vây này sẽ được xác định bởi biên dạng profil có chiều hướng to dần vào tâm nên ta xác định tọa độ biên dạng profil vây đuôi tại 2 vị trí: 1 là phần profil lớn bên trong và 2 là phần profil nhỏ bên ngoài.

**3.2.3.1 Profil lớn bên trong**

Công thức xác định tọa độ phần profil lớn bên trong theo đơn vị feet:

$$\frac{z(\xi)}{c(y)} = 0,2969\sqrt{\xi} - 0,126\xi - 0,3516\xi^2 + 0,2852\xi^3 - 0,1045\xi^4$$

$$for 0 \leq \xi = \frac{x-h}{c(y)} + 1 \leq 1 \quad (3.6)$$

$$c(y) = -0,466308y + 0,88859$$

$$h = 12,73$$

Trong đó: vị trí x ban đầu là 12,73 ft tương ứng 3,88 m

**Bảng 3.9** Bảng tọa độ profil vây đuôi phần lớn bên trong

STT	$\xi$	c(y)	x (ft)	y (ft)	z(x)/c(y) (ft)	x (m)	y (m)	z(x)/c(y) (m)
0	0,000	0,833	12,730	0,118	0,000	3,880	0,036	0,000
1	0,013	0,833	12,740	0,118	0,032	3,883	0,036	0,010
2	0,025	0,833	12,750	0,118	0,044	3,886	0,036	0,013
3	0,038	0,833	12,761	0,118	0,052	3,890	0,036	0,016
4	0,050	0,833	12,771	0,118	0,059	3,893	0,036	0,018
5	0,063	0,833	12,782	0,118	0,065	3,896	0,036	0,020
6	0,075	0,833	12,792	0,118	0,070	3,899	0,036	0,021
7	0,088	0,833	12,803	0,118	0,074	3,902	0,036	0,023
8	0,100	0,833	12,813	0,118	0,078	3,905	0,036	0,024
9	0,113	0,833	12,823	0,118	0,081	3,909	0,036	0,025
10	0,125	0,833	12,834	0,118	0,084	3,912	0,036	0,026
11	0,138	0,833	12,844	0,118	0,087	3,915	0,036	0,026
12	0,150	0,833	12,855	0,118	0,089	3,918	0,036	0,027
13	0,163	0,833	12,865	0,118	0,091	3,921	0,036	0,028
14	0,175	0,833	12,875	0,118	0,093	3,924	0,036	0,028
15	0,188	0,833	12,886	0,118	0,094	3,928	0,036	0,029
16	0,200	0,833	12,896	0,118	0,096	3,931	0,036	0,029
17	0,213	0,833	12,907	0,118	0,097	3,934	0,036	0,029
18	0,225	0,833	12,917	0,118	0,098	3,937	0,036	0,030
19	0,238	0,833	12,928	0,118	0,098	3,940	0,036	0,030
20	0,250	0,833	12,938	0,118	0,099	3,943	0,036	0,030
21	0,263	0,833	12,948	0,118	0,099	3,947	0,036	0,030
22	0,275	0,833	12,959	0,118	0,100	3,950	0,036	0,030
23	0,288	0,833	12,969	0,118	0,100	3,953	0,036	0,030
24	0,300	0,833	12,980	0,118	0,100	3,956	0,036	0,030
25	0,313	0,833	12,990	0,118	0,100	3,959	0,036	0,030
26	0,325	0,833	13,000	0,118	0,100	3,963	0,036	0,030

*Phân tích đặc tính thủy động lực học của tàu ngầm Darpa Suboff bằng phương pháp CFD*

27	0,338	0,833	13,011	0,118	0,100	3,966	0,036	0,030
28	0,350	0,833	13,021	0,118	0,099	3,969	0,036	0,030
29	0,363	0,833	13,032	0,118	0,099	3,972	0,036	0,030
30	0,375	0,833	13,042	0,118	0,098	3,975	0,036	0,030
31	0,388	0,833	13,053	0,118	0,097	3,978	0,036	0,030
32	0,400	0,833	13,063	0,118	0,097	3,982	0,036	0,029
33	0,413	0,833	13,073	0,118	0,096	3,985	0,036	0,029
34	0,425	0,833	13,084	0,118	0,095	3,988	0,036	0,029
35	0,438	0,833	13,094	0,118	0,094	3,991	0,036	0,029
36	0,450	0,833	13,105	0,118	0,093	3,994	0,036	0,028
37	0,463	0,833	13,115	0,118	0,092	3,997	0,036	0,028
38	0,475	0,833	13,125	0,118	0,091	4,001	0,036	0,028
39	0,488	0,833	13,136	0,118	0,089	4,004	0,036	0,027
40	0,500	0,833	13,146	0,118	0,088	4,007	0,036	0,027
41	0,513	0,833	13,157	0,118	0,087	4,010	0,036	0,026
42	0,525	0,833	13,167	0,118	0,085	4,013	0,036	0,026
43	0,538	0,833	13,178	0,118	0,084	4,017	0,036	0,026
44	0,550	0,833	13,188	0,118	0,082	4,020	0,036	0,025
45	0,563	0,833	13,198	0,118	0,081	4,023	0,036	0,025
46	0,575	0,833	13,209	0,118	0,079	4,026	0,036	0,024
47	0,588	0,833	13,219	0,118	0,078	4,029	0,036	0,024
48	0,600	0,833	13,230	0,118	0,076	4,032	0,036	0,023
49	0,613	0,833	13,240	0,118	0,074	4,036	0,036	0,023
50	0,625	0,833	13,250	0,118	0,072	4,039	0,036	0,022
51	0,638	0,833	13,261	0,118	0,070	4,042	0,036	0,021
52	0,650	0,833	13,271	0,118	0,069	4,045	0,036	0,021
53	0,663	0,833	13,282	0,118	0,067	4,048	0,036	0,020
54	0,675	0,833	13,292	0,118	0,065	4,051	0,036	0,020
55	0,688	0,833	13,303	0,118	0,063	4,055	0,036	0,019
56	0,700	0,833	13,313	0,118	0,061	4,058	0,036	0,018

57	0,713	0,833	13,323	0,118	0,059	4,061	0,036	0,018
58	0,725	0,833	13,334	0,118	0,056	4,064	0,036	0,017
59	0,738	0,833	13,344	0,118	0,054	4,067	0,036	0,017
60	0,750	0,833	13,355	0,118	0,052	4,070	0,036	0,016
61	0,763	0,833	13,365	0,118	0,050	4,074	0,036	0,015
62	0,775	0,833	13,375	0,118	0,048	4,077	0,036	0,015
63	0,788	0,833	13,386	0,118	0,045	4,080	0,036	0,014
64	0,800	0,833	13,396	0,118	0,043	4,083	0,036	0,013
65	0,813	0,833	13,407	0,118	0,041	4,086	0,036	0,012
66	0,825	0,833	13,417	0,118	0,038	4,090	0,036	0,012
67	0,838	0,833	13,428	0,118	0,036	4,093	0,036	0,011
68	0,850	0,833	13,438	0,118	0,033	4,096	0,036	0,010
69	0,863	0,833	13,448	0,118	0,031	4,099	0,036	0,009
70	0,875	0,833	13,459	0,118	0,028	4,102	0,036	0,009
71	0,888	0,833	13,469	0,118	0,025	4,105	0,036	0,008
72	0,900	0,833	13,480	0,118	0,023	4,109	0,036	0,007
73	0,913	0,833	13,490	0,118	0,020	4,112	0,036	0,006
74	0,925	0,833	13,500	0,118	0,017	4,115	0,036	0,005
75	0,938	0,833	13,511	0,118	0,015	4,118	0,036	0,004
76	0,950	0,833	13,521	0,118	0,012	4,121	0,036	0,004
77	0,963	0,833	13,532	0,118	0,009	4,124	0,036	0,003
78	0,975	0,833	13,542	0,118	0,006	4,128	0,036	0,002
79	0,988	0,833	13,553	0,118	0,003	4,131	0,036	0,001
80	1,000	0,833	13,563	0,118	0,000	4,134	0,036	0,000

### **3.1.3.2 Profil nhỏ bên trong**

Công thức xác định tọa độ phần profil nhỏ bên ngoài theo đơn vị feet:

$$\frac{z(\xi)}{c(y)} = 0,2969\sqrt{\xi} - 0,126\xi - 0,3516\xi^2 + 0,2852\xi^3 - 0,1045\xi^4 \quad (3.7)$$

Trong đó: Vị trí x ban đầu là 13,146 ft tương ứng 4,007 m với các hệ số như bên dưới

$$0 \leq \xi = \frac{x-h}{c(y)} + 1 \leq 1$$

$$c(y) = -0,466308y + 0,88859$$

$$h = 13,146$$

Bảng 3.10 Bảng tọa độ profil vây đuôi phần nhỏ bên ngoài

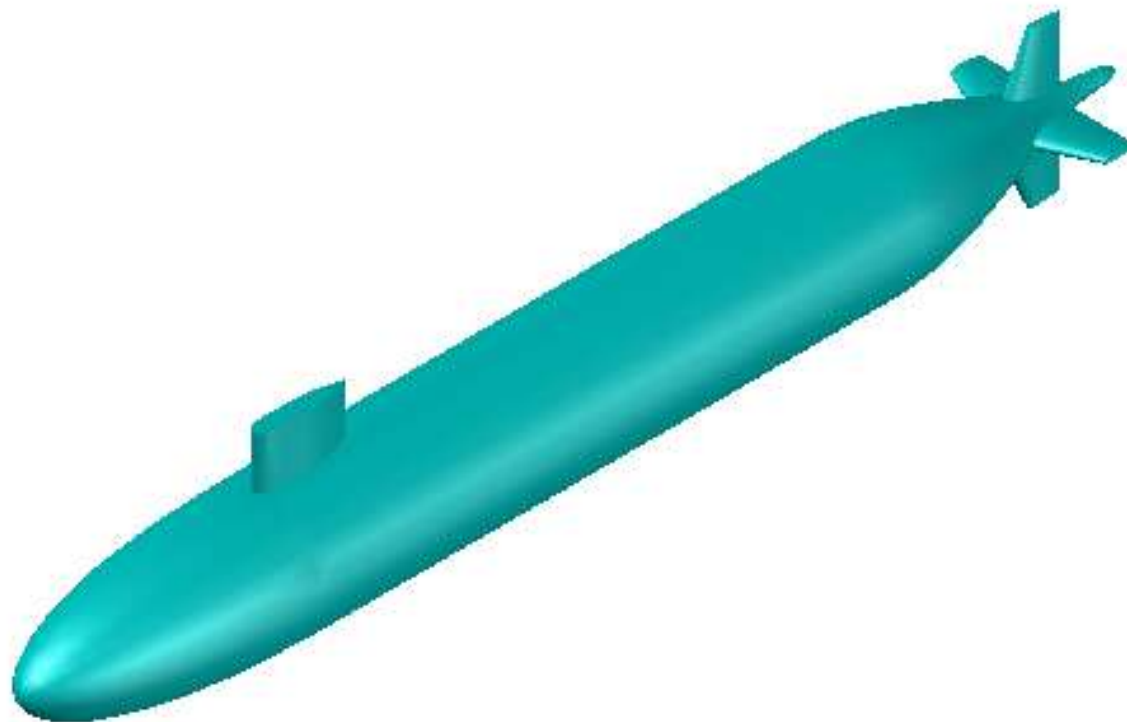
STT	$\xi$	c(y)	z(x)/c(y)	x (ft)	y (ft)	z (ft)	x (m)	y (m)	z (m)
0	0,000	0,417	0,000	13,146	1,012	0,000	4,007	0,308	0,000
1	0,013	0,417	0,032	13,151	1,012	0,013	4,009	0,308	0,004
2	0,025	0,417	0,044	13,157	1,012	0,018	4,010	0,308	0,006
3	0,038	0,417	0,052	13,162	1,012	0,022	4,012	0,308	0,007
4	0,050	0,417	0,059	13,167	1,012	0,025	4,013	0,308	0,008
5	0,063	0,417	0,065	13,172	1,012	0,027	4,015	0,308	0,008
6	0,075	0,417	0,070	13,178	1,012	0,029	4,017	0,308	0,009
7	0,088	0,417	0,074	13,183	1,012	0,031	4,018	0,308	0,009
8	0,100	0,417	0,078	13,188	1,012	0,033	4,020	0,308	0,010
9	0,113	0,417	0,081	13,193	1,012	0,034	4,021	0,308	0,010
10	0,125	0,417	0,084	13,198	1,012	0,035	4,023	0,308	0,011
11	0,138	0,417	0,087	13,204	1,012	0,036	4,024	0,308	0,011
12	0,150	0,417	0,089	13,209	1,012	0,037	4,026	0,308	0,011
13	0,163	0,417	0,091	13,214	1,012	0,038	4,028	0,308	0,012
14	0,175	0,417	0,093	13,219	1,012	0,039	4,029	0,308	0,012
15	0,188	0,417	0,094	13,224	1,012	0,039	4,031	0,308	0,012
16	0,200	0,417	0,096	13,230	1,012	0,040	4,032	0,308	0,012
17	0,213	0,417	0,097	13,235	1,012	0,040	4,034	0,308	0,012
18	0,225	0,417	0,098	13,240	1,012	0,041	4,036	0,308	0,012
19	0,238	0,417	0,098	13,245	1,012	0,041	4,037	0,308	0,012
20	0,250	0,417	0,099	13,250	1,012	0,041	4,039	0,308	0,013
21	0,263	0,417	0,099	13,256	1,012	0,041	4,040	0,308	0,013

*Phân tích đặc tính thủy động lực học của tàu ngầm Darpa Suboff bằng phương pháp CFD*

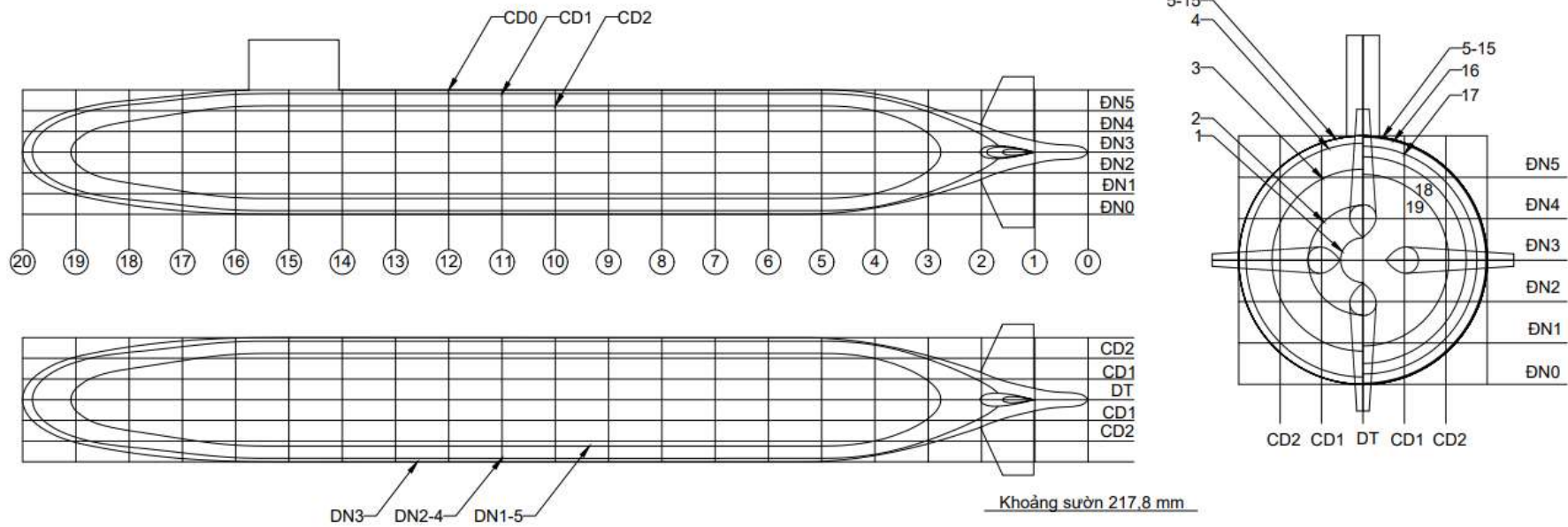
22	0,275	0,417	0,100	13,261	1,012	0,042	4,042	0,308	0,013
23	0,288	0,417	0,100	13,266	1,012	0,042	4,043	0,308	0,013
24	0,300	0,417	0,100	13,271	1,012	0,042	4,045	0,308	0,013
25	0,313	0,417	0,100	13,276	1,012	0,042	4,047	0,308	0,013
26	0,325	0,417	0,100	13,282	1,012	0,042	4,048	0,308	0,013
27	0,338	0,417	0,100	13,287	1,012	0,041	4,050	0,308	0,013
28	0,350	0,417	0,099	13,292	1,012	0,041	4,051	0,308	0,013
29	0,363	0,417	0,099	13,297	1,012	0,041	4,053	0,308	0,013
30	0,375	0,417	0,098	13,303	1,012	0,041	4,055	0,308	0,012
31	0,388	0,417	0,097	13,308	1,012	0,041	4,056	0,308	0,012
32	0,400	0,417	0,097	13,313	1,012	0,040	4,058	0,308	0,012
33	0,413	0,417	0,096	13,318	1,012	0,040	4,059	0,308	0,012
34	0,425	0,417	0,095	13,323	1,012	0,040	4,061	0,308	0,012
35	0,438	0,417	0,094	13,329	1,012	0,039	4,063	0,308	0,012
36	0,450	0,417	0,093	13,334	1,012	0,039	4,064	0,308	0,012
37	0,463	0,417	0,092	13,339	1,012	0,038	4,066	0,308	0,012
38	0,475	0,417	0,091	13,344	1,012	0,038	4,067	0,308	0,012
39	0,488	0,417	0,089	13,349	1,012	0,037	4,069	0,308	0,011
40	0,500	0,417	0,088	13,355	1,012	0,037	4,070	0,308	0,011
41	0,513	0,417	0,087	13,360	1,012	0,036	4,072	0,308	0,011
42	0,525	0,417	0,085	13,365	1,012	0,036	4,074	0,308	0,011
43	0,538	0,417	0,084	13,370	1,012	0,035	4,075	0,308	0,011
44	0,550	0,417	0,082	13,375	1,012	0,034	4,077	0,308	0,010
45	0,563	0,417	0,081	13,381	1,012	0,034	4,078	0,308	0,010
46	0,575	0,417	0,079	13,386	1,012	0,033	4,080	0,308	0,010
47	0,588	0,417	0,078	13,391	1,012	0,032	4,082	0,308	0,010
48	0,600	0,417	0,076	13,396	1,012	0,032	4,083	0,308	0,010
49	0,613	0,417	0,074	13,401	1,012	0,031	4,085	0,308	0,009
50	0,625	0,417	0,072	13,407	1,012	0,030	4,086	0,308	0,009
51	0,638	0,417	0,070	13,412	1,012	0,029	4,088	0,308	0,009

*Phân tích đặc tính thủy động lực học của tàu ngầm Darpa Suboff bằng phương pháp CFD*

52	0,650	0,417	0,069	13,417	1,012	0,029	4,090	0,308	0,009
53	0,663	0,417	0,067	13,422	1,012	0,028	4,091	0,308	0,008
54	0,675	0,417	0,065	13,428	1,012	0,027	4,093	0,308	0,008
55	0,688	0,417	0,063	13,433	1,012	0,026	4,094	0,308	0,008
56	0,700	0,417	0,061	13,438	1,012	0,025	4,096	0,308	0,008
57	0,713	0,417	0,059	13,443	1,012	0,024	4,097	0,308	0,007
58	0,725	0,417	0,056	13,448	1,012	0,024	4,099	0,308	0,007
59	0,738	0,417	0,054	13,454	1,012	0,023	4,101	0,308	0,007
60	0,750	0,417	0,052	13,459	1,012	0,022	4,102	0,308	0,007
61	0,763	0,417	0,050	13,464	1,012	0,021	4,104	0,308	0,006
62	0,775	0,417	0,048	13,469	1,012	0,020	4,105	0,308	0,006
63	0,788	0,417	0,045	13,474	1,012	0,019	4,107	0,308	0,006
64	0,800	0,417	0,043	13,480	1,012	0,018	4,109	0,308	0,005
65	0,813	0,417	0,041	13,485	1,012	0,017	4,110	0,308	0,005
66	0,825	0,417	0,038	13,490	1,012	0,016	4,112	0,308	0,005
67	0,838	0,417	0,036	13,495	1,012	0,015	4,113	0,308	0,005
68	0,850	0,417	0,033	13,500	1,012	0,014	4,115	0,308	0,004
69	0,863	0,417	0,031	13,506	1,012	0,013	4,117	0,308	0,004
70	0,875	0,417	0,028	13,511	1,012	0,012	4,118	0,308	0,004
71	0,888	0,417	0,025	13,516	1,012	0,011	4,120	0,308	0,003
72	0,900	0,417	0,023	13,521	1,012	0,010	4,121	0,308	0,003
73	0,913	0,417	0,020	13,526	1,012	0,008	4,123	0,308	0,003
74	0,925	0,417	0,017	13,532	1,012	0,007	4,124	0,308	0,002
75	0,938	0,417	0,015	13,537	1,012	0,006	4,126	0,308	0,002
76	0,950	0,417	0,012	13,542	1,012	0,005	4,128	0,308	0,001
77	0,963	0,417	0,009	13,547	1,012	0,004	4,129	0,308	0,001
78	0,975	0,417	0,006	13,553	1,012	0,002	4,131	0,308	0,001
79	0,988	0,417	0,003	13,558	1,012	0,001	4,132	0,309	0,000
80	1,000	0,417	0,000	13,563	1,012	0,000	4,134	0,309	0,000



Hình 3.2 Mô hình 3D tàu ngầm 3D được xây dựng



Hình 3.3 Tuyến hình tàu Darpa Suboff

Từ mô hình 3D tàu ngầm DARPA SUBBOFF ta có bảng trị số tuyến hình tàu ngầm:

**Bảng 3.11** Bảng trị số tuyến hình tàu ngầm Darpa Suboff

Số	Chiều cao cách chuẩn										Nửa chiều rộng				
	DT		CD1		CD2		CD 3		CD 4		ĐN1	ĐN2	ĐN3	ĐN4	ĐN5
SN0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
SN1	208	300	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	46	-	-
SN2	142	366	181	327	-	-	181	327	-	-	-	73	112	73	-
SN3	68	440	88	420	177	331	88	420	177	331	77	166	186	166	77
SN4	15	493	31	477	86	422	31	477	86	422	168	223	239	223	239
SN5	0	508	15	493	65	443	15	493	65	443	189	239	254	239	189
SN6	0	508	14	494	65	443	14	494	65	443	189	240	254	240	189
SN7	0	508	14	494	65	443	14	494	65	443	189	240	254	240	189
SN8	0	508	14	494	65	443	14	494	65	443	189	240	254	240	189
SN9	0	508	14	494	65	443	14	494	65	443	189	240	254	240	189
SN10	0	508	14	494	65	443	14	494	65	443	189	240	254	240	189
SN11	0	508	14	494	65	493	14	494	65	493	189	240	254	240	189
SN12	0	508	15	494	65	443	15	494	65	443	189	240	254	240	189
SN13	0	509	15	494	65	443	15	494	65	443	189	240	254	240	189
SN14	0	509	15	494	65	443	15	494	65	443	189	240	254	240	189
SN15	0	508	15	493	65	443	15	493	65	443	189	239	254	239	189
SN16	3	505	17	491	68	440	17	491	68	440	186	237	251	237	186
SN17	21	487	37	471	94	414	37	471	94	414	160	217	233	217	160
SN18	43	465	61	447	128	380	61	447	128	380	126	193	211	193	126
SN19	79	429	101	407	209	299	101	407	209	299	45	153	175	153	45
SN20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

## **CHƯƠNG 4. TÍNH TOÁN THỦY ĐỘNG LỰC HỌC TÁC DỤNG LÊN TÀU NGẦM TRONG TÍNH TOÁN SỨC CẢN**

### **4. 1 Tính toán sức cản của tàu ngầm ở các vận tốc khác nhau**

#### **4.1.1 Điều kiện mô phỏng – các thông số đầu vào**

Điều kiện mô phỏng CFD trong đề tài này sẽ được mô phỏng tương tự các điều kiện như thực nghiệm [2] nên các thông số đầu vào để thiết lập mô phỏng sẽ được dựa trên tài liệu [2]. Các thông số cụ thể như điều kiện kích thước bể thử, khối lượng riêng của nước, độ nhớt động học, độ nhám bề mặt sẽ được thiết lập tương tự bể thử cũng như vận tốc của mô hình tàu ngầm từ 3,0507 m/s đến 9,1520 m/s. Mô hình dòng chảy được sử dụng trong mô phỏng bao quanh tàu ngầm là mô hình chất lỏng thực RANS với dòng chảy đều và mô hình dòng rối SST k -  $\omega$  là phương pháp rất tốt cho các dòng chảy đặc biệt là sức cản tác dụng lên biên dạng tàu ngầm [4].

Bảng 4.1 Thông số đầu vào

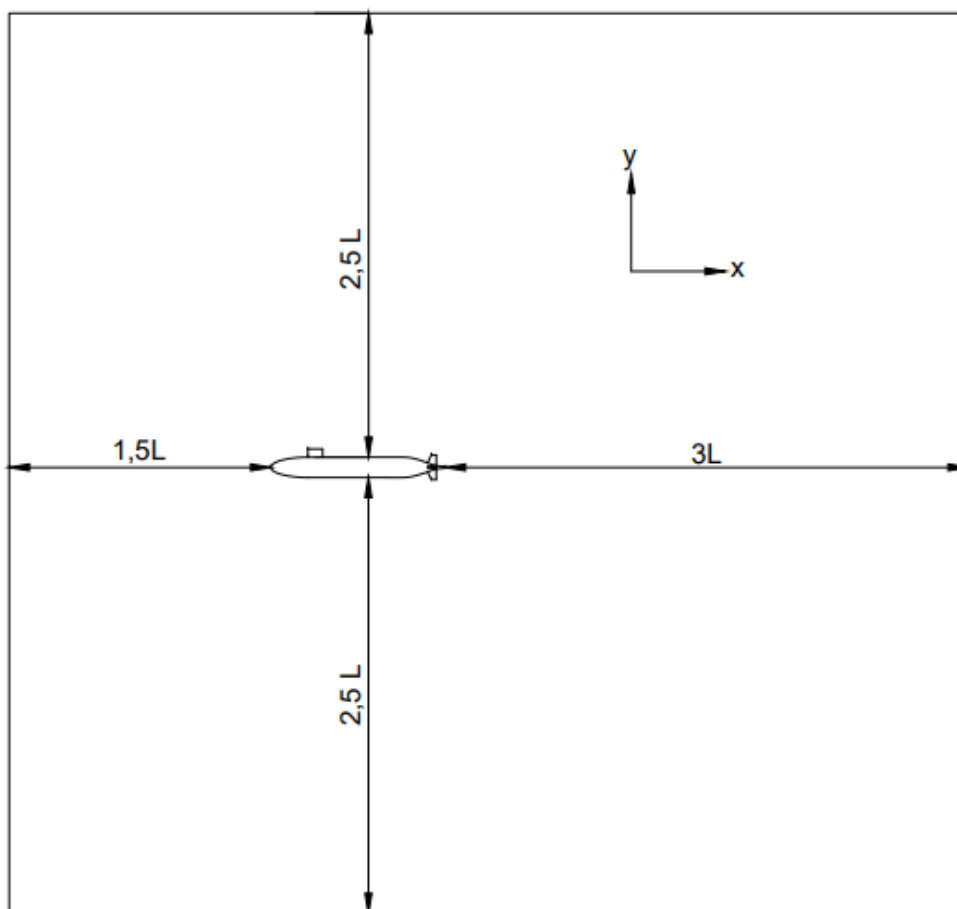
Các thông số đầu vào	Kí hiệu	Giá trị	Đơn vị
Khối lượng riêng của nước	$\rho$	998,2	$kg/m^3$
Độ nhớt động học	$\nu$	$1,003.10^{-6}$	$m^2/s$

Bảng 4.2 Các trường hợp vận tốc thử nghiệm

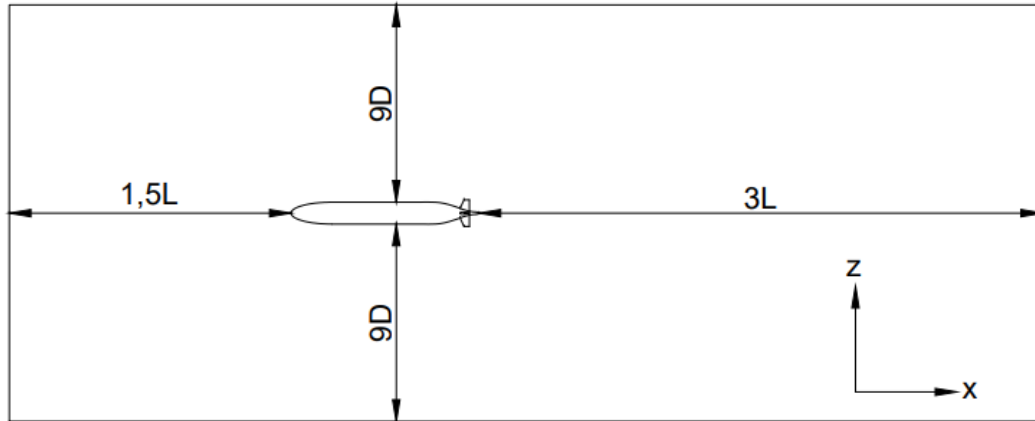
Trường hợp	Vận tốc tàu thật (m/s)	Vận tốc tàu mô hình (m/s)
1	14,95	3,0507
2	25,2	5,1444
3	29,87	6,0962
4	35,08	7,1611
5	40,32	8,2311
6	44,84	9,1520

#### **4.1.2 Không gian miền tính toán**

Miền không gian tính toán cực kì quan trọng vì nó ảnh hưởng đến độ chính xác của kết quả, tùy bài toán thì miền không gian sẽ đảm bảo đúng kích thước với các bài toán trong đường ống hoặc đủ độ lớn để đảm bảo không ảnh hưởng đến các điều kiện biên và các yếu tố cần tính toán tác động lên mô hình hình học của tàu ngầm. Ở đây ta phải giới hạn miền không gian sao cho các tàu cách mặt nước 1 khoảng và cách mặt đáy 1 khoảng để không tồn tại ảnh hưởng của mặt thoáng cũng như ảnh hưởng của độ sâu đến lực cản của tàu ngầm. Theo ITTC (2008) [5] ta lựa chọn miền tính toán sao cho các kích thước đảm bảo phải lớn hơn hoặc bằng để miền tính toán đạt độ chính xác cho việc tính toán bài toán đến đặc tính thủy động lực học tác động lên tàu ngầm. Đối với bài toán tính sức cản tàu ngầm ta chọn miền không gian có dạng hình hộp chữ nhật bao quanh tàu ngầm với các kích thước tối thiểu như sau (Chiều dài tàu  $L = 4,356m$  và đường kính thân tàu ngầm là  $D = 0,254m$ ):



Hình 4.1 Kích thước miền không gian hình chiếu đứng



Hình 4.2 Kích thước miền không gian hình chiếu bằng

Bảng 4.3 Miền tính toán theo ITTC 2008

Vị trí cách tàu	Khoảng cách
Phía trước mũi tàu ngầm	1,5.L <sub>OA</sub>
Phía sau đuôi tàu ngầm	3.L <sub>OA</sub>
2 bên mạn tàu ngầm	9.D
Phía trên tàu ngầm	2,5.L <sub>OA</sub>
Phía dưới tàu ngầm	2,5.L <sub>OA</sub>

#### 4.1.3 Lưới tính toán

Sử dụng dạng lưới tam giác (Triangle Mesh) là một loại lưới được sử dụng trong mô hình hóa và tính toán các vấn đề liên quan đến dòng chảy, nhiệt độ và cơ học trong phần mềm Ansys Fluent. Lưới tam giác được tạo bằng cách chia không gian tính toán thành các tam giác. Các tam giác này có thể có kích thước và hình dạng khác nhau, tùy thuộc vào yêu cầu của mô hình và độ chính xác mong muốn.

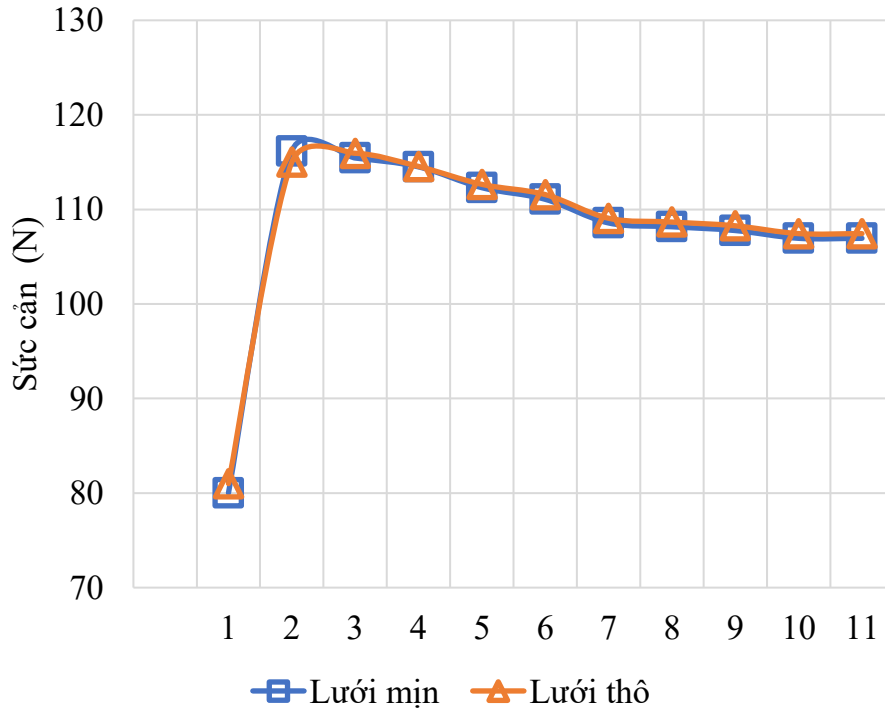
Lưới tam giác thường được sử dụng trong các mô hình đơn giản và có hình dạng đơn giản, vì nó dễ tạo và tính toán nhanh hơn so với các loại lưới khác. Ngoài ra, lưới tam giác cũng dễ dàng điều chỉnh độ chính xác của mô hình bằng cách thêm hoặc bớt các điểm lưới.

#### ❖ Xác định tính chính xác của việc chia lưới

Ta so sánh kết quả thu được tại vận tốc  $v=3,0507$  m/s và kiểm tra so sánh kết quả sức cản giữa chúng và thực nghiệm để kiểm chứng tính chính xác của lưới.

**Bảng 4.4 Kích thước lưới và số phần tử từng lưới**

Tên	Kích thước lưới (m)	Số lượng phần tử (triệu phần tử)
Lưới thô	0,5	0,64
Lưới mịn	0,25	2,33



**Hình 4.3 Đồ thị so sánh kết quả sức cản của 2 lưới**

Sai lệch độ kết quả 2 lưới là 0,5% nên đảm bảo độ hội tụ và so sánh với thực nghiệm sức thì kết quả sức cản của lưới thô sai lệch là 5,05% và lưới mịn là 4,54% đảm bảo tính chính xác của việc chia lưới và chất lượng lưới được đảm bảo. Chọn lưới thô để sử dụng làm mô phỏng tính sức cản trường hợp tàu thay đổi vận tốc do sai lệch đáp án giữa việc sử dụng lưới thường và lưới mịn không quá đáng kể so với kết quả, thêm vào đó sử dụng lưới thường sẽ giảm thời gian tính toán xuống đáng kể.

**❖ Đặc điểm của lưới:**

Kích thước lưới miền chất lỏng được chọn theo công thức kinh nghiệm GCI (Grid Convergence Index):

$$\delta \leq \frac{L}{2^N} \tag{4.1}$$

Trong đó:

- $\delta$  là kích thước phần tử (m)
- $L$  là chiều dài lớn nhất của miền chất lỏng (m)
- $N=3$  đối với bài toán mô phỏng 3D

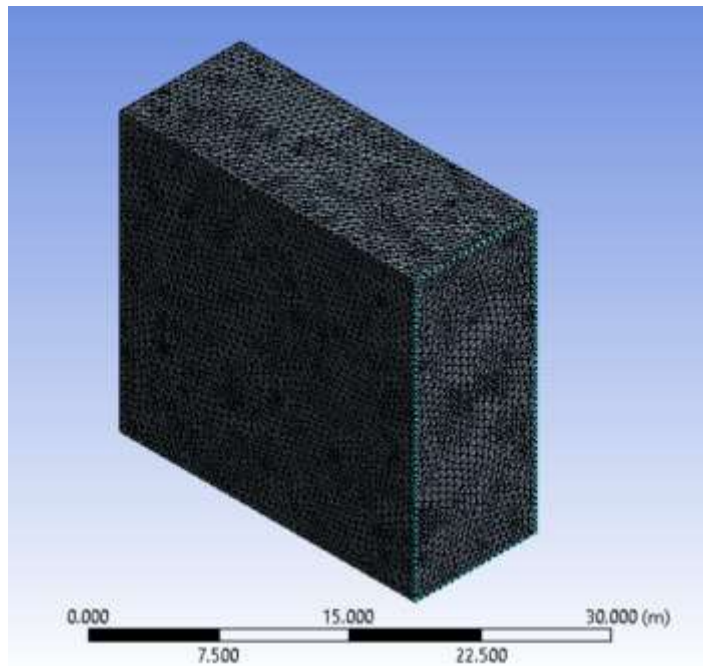
Đối với lớp biên trên tàu và xung quanh gần bề mặt tàu ngầm, kích thước lưới được tính chọn theo công thức kinh nghiệm  $Y^+$  :

$$Y^+ = \frac{y \cdot \rho \cdot U^*}{\mu} \quad (4.2)$$

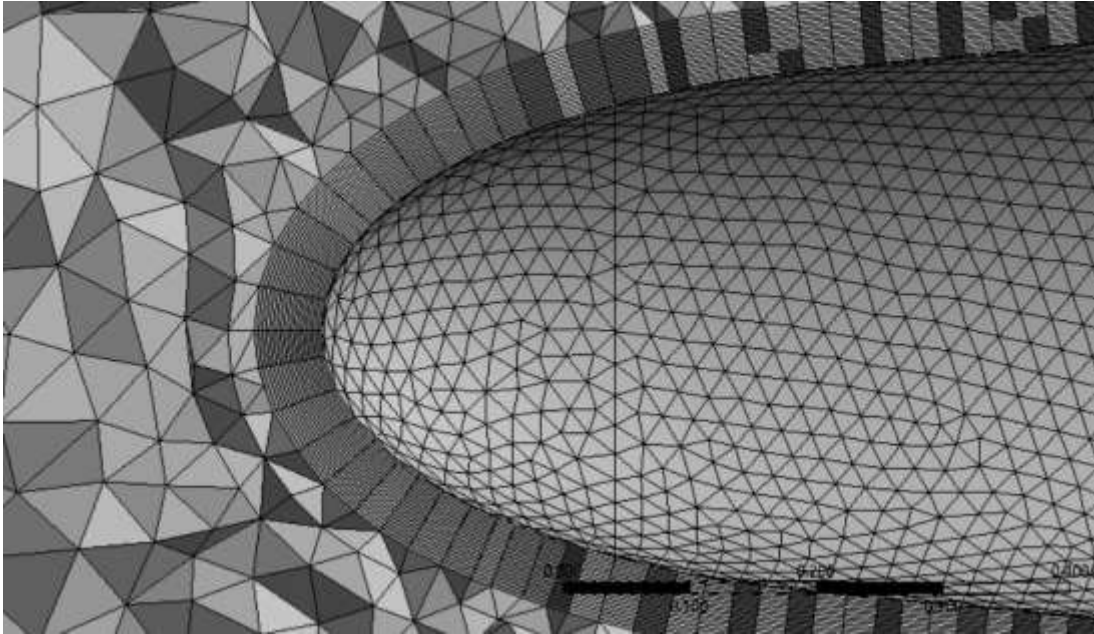
Trong đó:

- $Y^+$  là tham số không thứ nguyên khoảng cách tường
- $y$  là khoảng cách từ biên đến lớp biên (m)
- $U^*$  là vận tốc ma sát (m/s)
- $\mu$  là hệ số nhớt động học

Đối với lớp biên miền tính toán xác định có dạng thu nhỏ dần về biên dạng tàu ngầm, theo công thức kinh nghiệm CGI kích thước phần tử  $\delta \leq 3,12$  m, chọn  $\delta = 0,5$  m. Khoảng cách từ bề mặt đến lớp biên  $y \leq 0,308$  m, chọn kích thước lưới  $\delta = 0,272$  m và chi thêm lớp biên quanh tàu ngầm với kích thước 0,025 m.



Hình 4.4 Lưới tính toán miền không gian chất lỏng



Hình 4.5 Lưới trên bề mặt tàu ngầm và lưới xung quanh tàu

❖ **Tiêu chuẩn đánh giá chất lượng lưới:**

Tiêu chuẩn Skewness:

Bảng 4.5 Tiêu chuẩn đánh giá chất lượng lưới Skewness

Skewness					
Xuất sắc	Rất tốt	Tốt	Tạm	Tệ	Không đạt
0 – 0,25	0,25 – 0,5	0,5 – 0,8	0,8 – 0,94	0,95 – 0,97	0,98 – 1

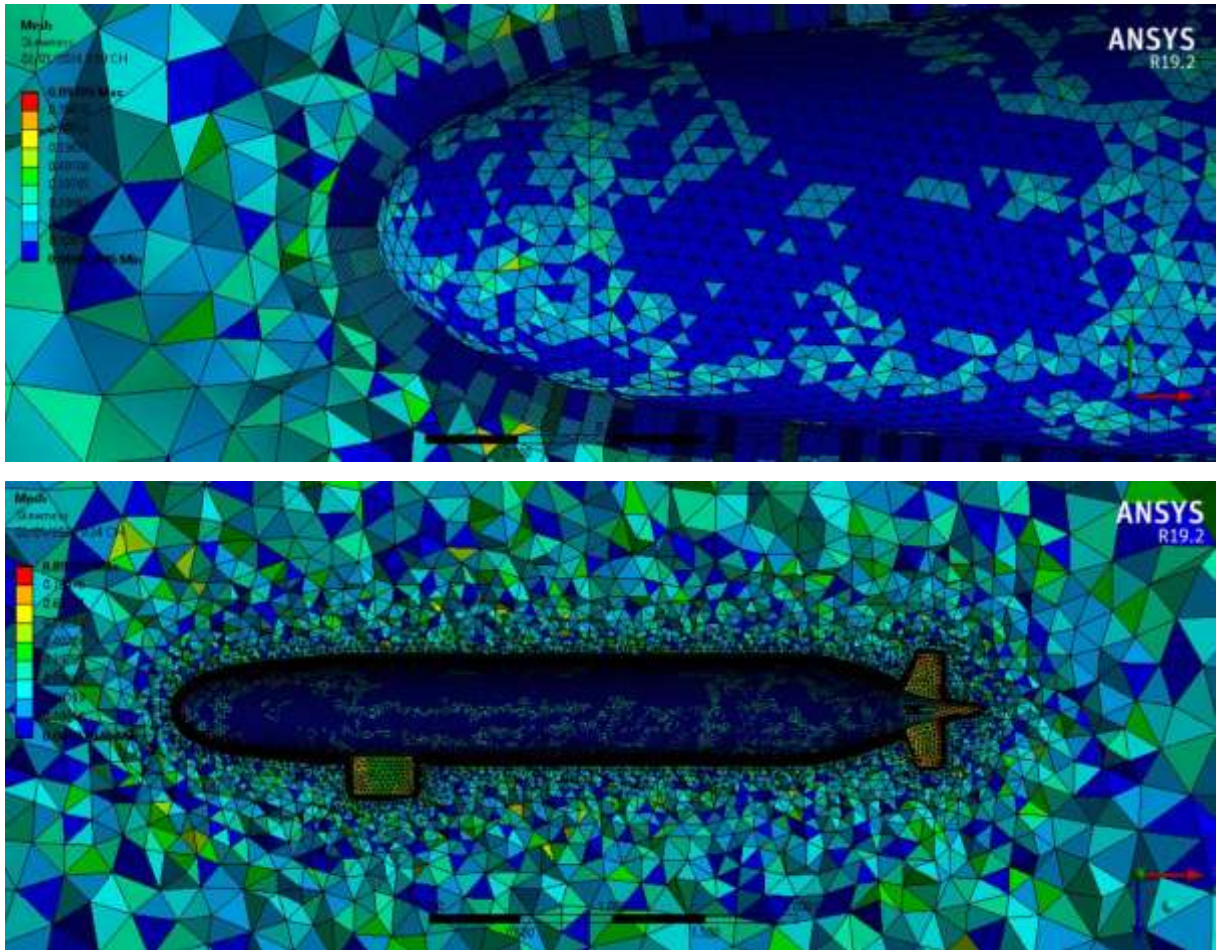
$$Max\ Skewness = \max \left[ \frac{\varphi_{\max} - \varphi_e}{180 - \varphi_e}; \frac{\varphi_e - \varphi_{\min}}{\varphi_e} \right] \quad (4.3)$$

Trong đó:

- $\varphi_{\max}$  là góc lớn nhất của phần tử
- $\varphi_{\min}$  là góc nhỏ nhất của phần tử
- $\varphi_e = 60^\circ$  với phần tử tam giác

❖ Kiểm tra chất lượng lưới trong phần mềm

- Max skewness: 0,894
- Min skewness: 0,001
- Các lưới nằm trong khoảng 0,001 đến 0,596



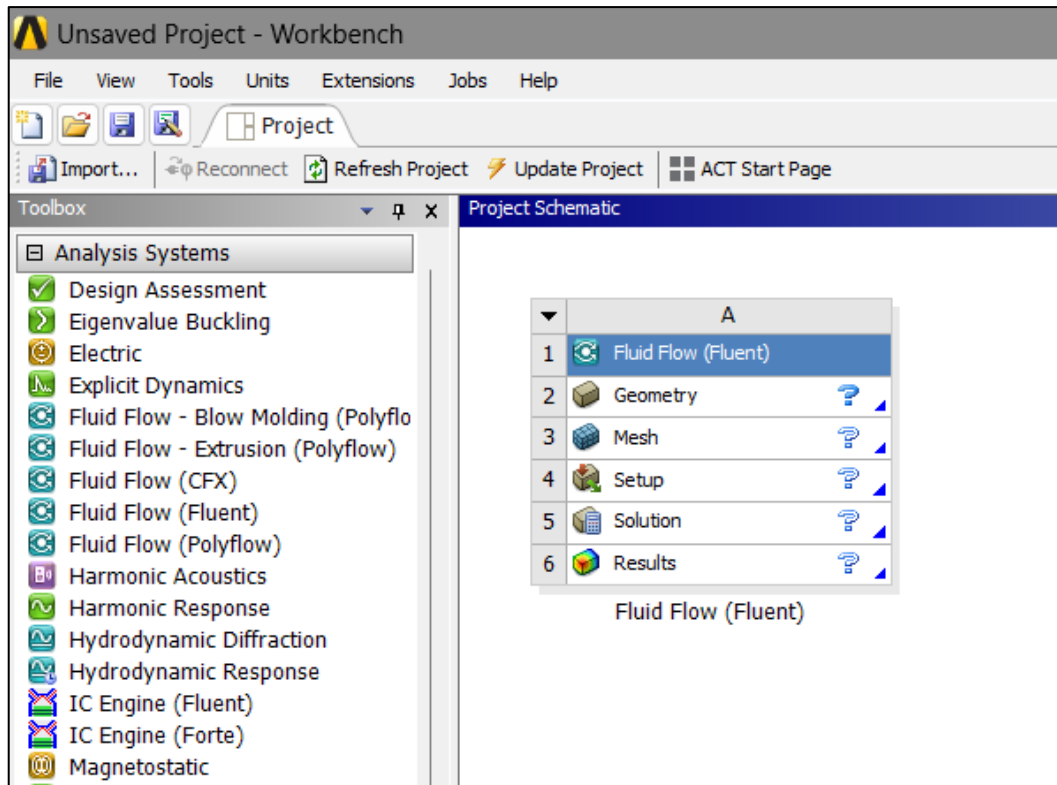
Hình 4.6 Chất lượng lưới trong phần mềm

#### **4.1.4 Thiết lập tính toán**

##### **❖ Bước 1: Thiết lập mô hình toán học**

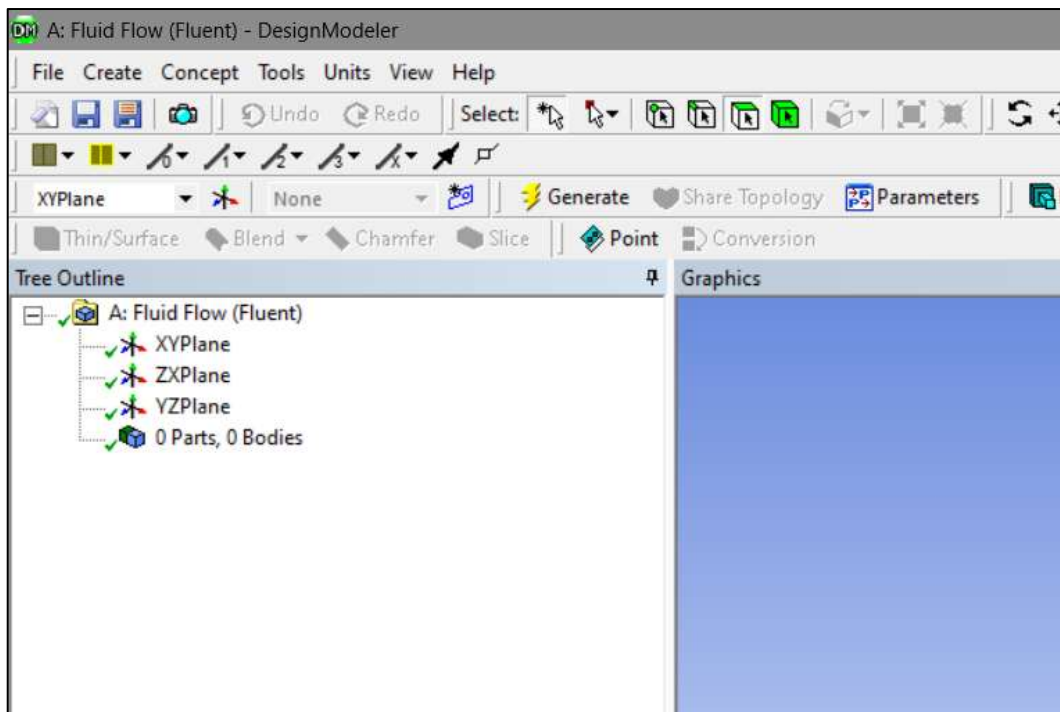
Mô hình hình học tàu ngầm 3D Darpa Suboff được xây dựng bằng phần mềm AutoCad ở Chương 3 được xuất sang file \*.iges để mô phỏng. Các bước tuần tự để đưa hình học 3D vào phần mềm:

- Khởi động phần mềm Ansys Workbench và chọn module Fluid Flow (Fluent): đây là module chuyên dụng của Ansys dùng để tính toán các giá trị thủy động lực học của tàu hay phương tiện trong môi trường chất lỏng cũng như trong môi trường thể khí.



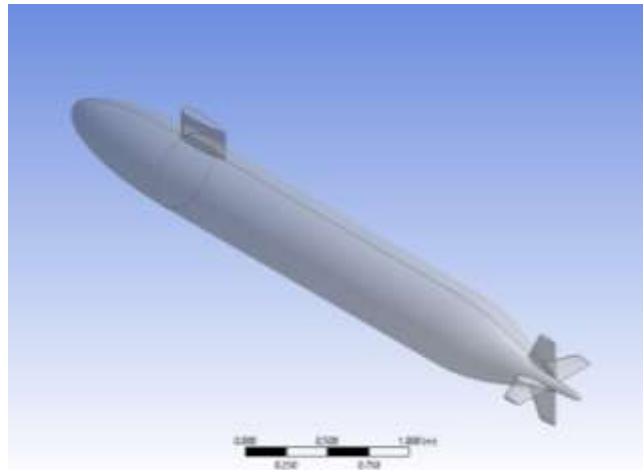
Hình 4.7 Khởi động phần mềm và chọn module Fluid Flow

- Trong phần Geometry chọn Design Modeller



Hình 4.8 Module DesignModeler

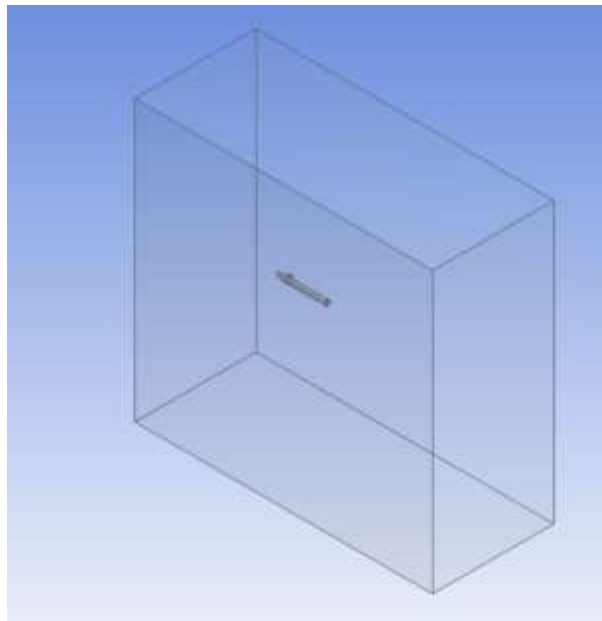
- Import file \*.iges mô hình 3D tàu ngầm vào phần mềm



Hình 4.9 Import tàu ngầm Darpa Suboff vào DesignModeler

Thiết lập miền tính toán như mục 4.1.2 bằng Enclosure – miền chất lỏng sẽ có dạng lập phương với các kích thước miền chất lỏng được lựa chọn dựa vào ITTC đã được thiết lập ở trên với các hướng so với tàu:

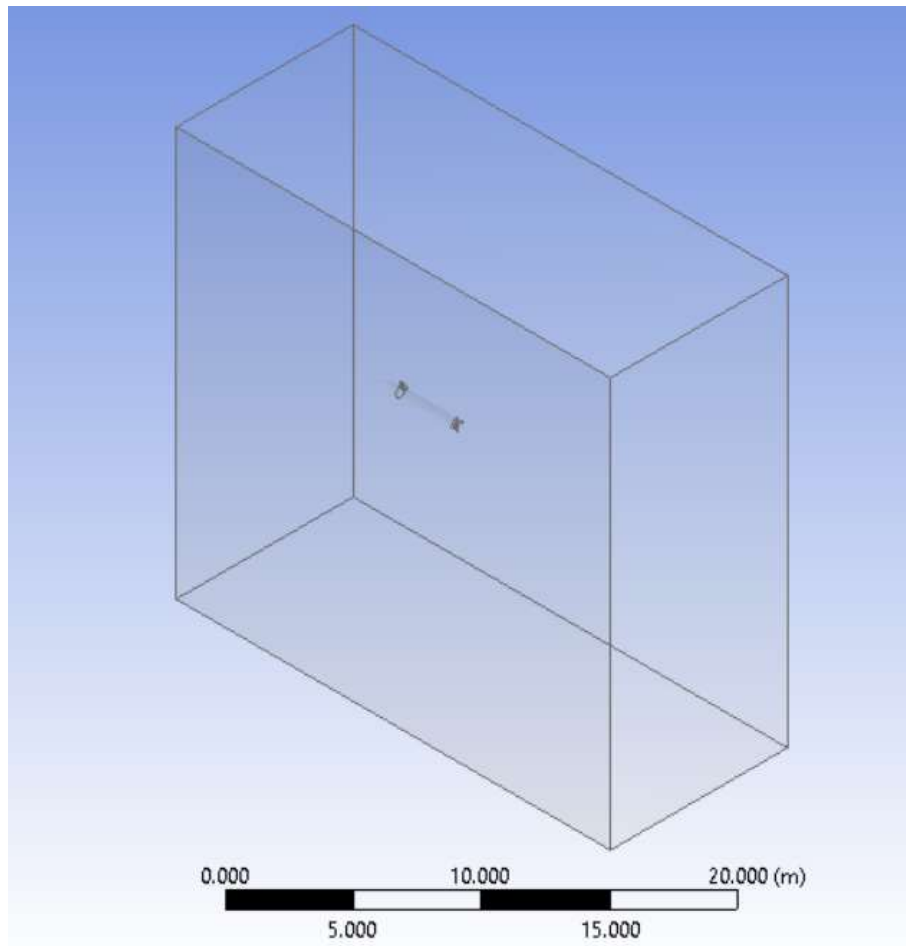
- + Phía trước mũi
- + Phía sau đuôi
- + Các mặt biên xung quanh



Hình 4.10 Thiết lập miền tính toán

- Dùng lệnh Subtract để giữ lại miền không gian sử dụng

Boolean	Boolean2
Operation	Subtract
Target Bodies	1 Body
Tool Bodies	1 Body
Preserve Tool Bodies?	No

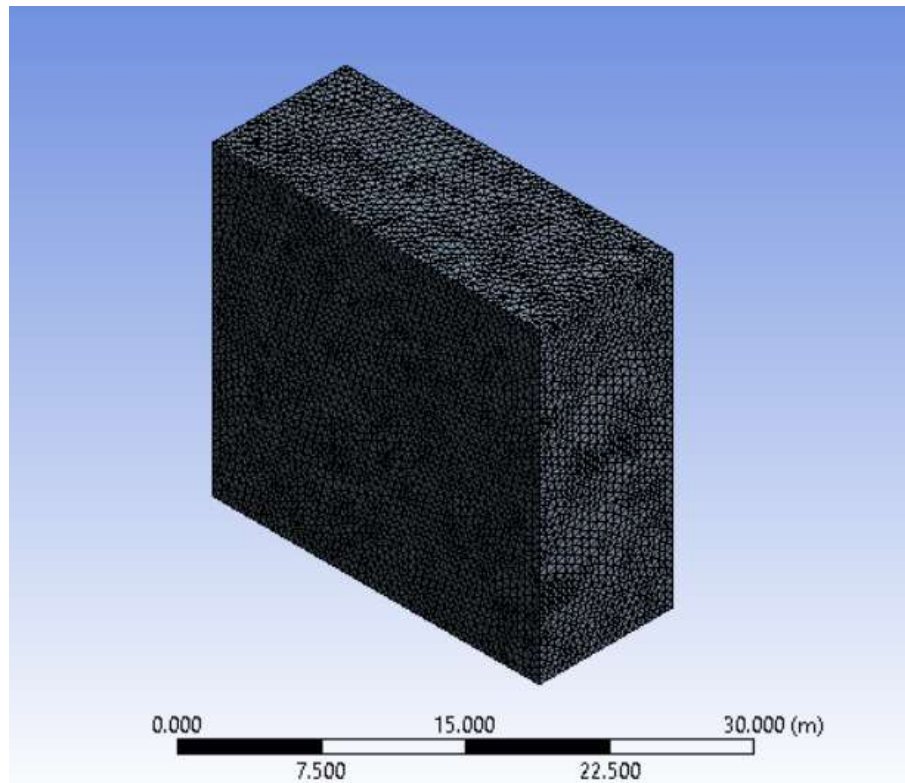


Hình 4.11 Hoàn thành phần thiết lập mô hình hình học

❖ **Bước 2:** Chia lưới

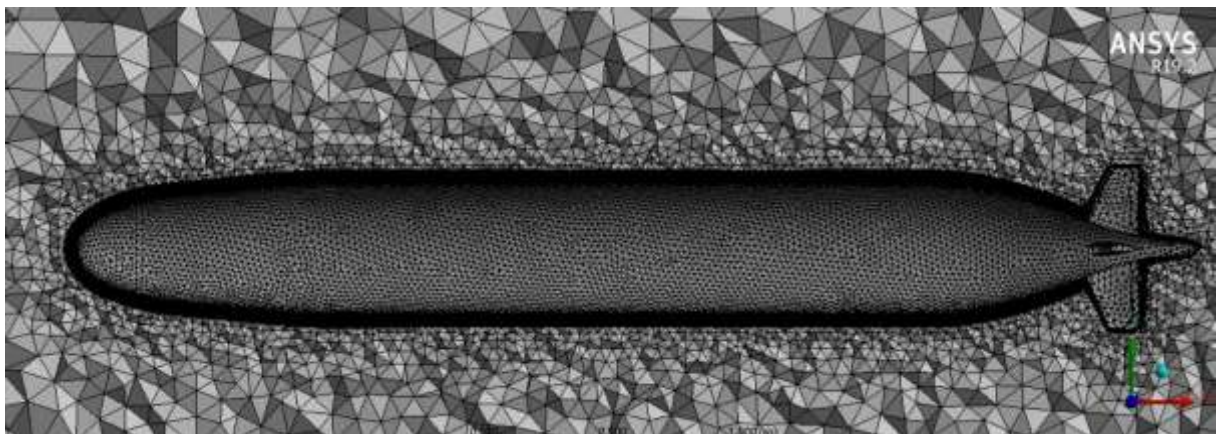
Sau bước kiểm tra tính chính xác của lưới, lựa chọn loại lưới sử dụng ta tiến hành thiết lập lưới cho các trường hợp ứng với các vận tốc còn lại trong phần mesh của Fluid Flow như sau:

- Thiết lập lưới Triangle cho miền chất lỏng bên ngoài kích thước phần tử là 0,5m



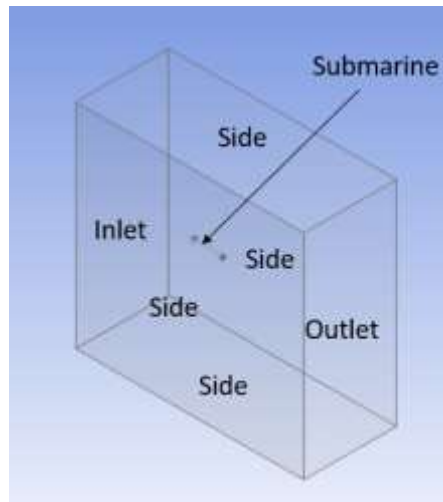
Hình 4.12 Thiết lập lưới miền chất lỏng

- Thiết lập lưới Triangle cho bề mặt tàu ngầm với kích thước lớp là 0,272 m, 5 lớp và kích thước lưới trên bề mặt tàu ngầm là 0,025 m:



Hình 4.13 Thiết lập lưới xung quanh tàu ngầm

- Đặt tên cho các mặt phẳng để sử dụng cho các thiết lập tính toán về sau với:
  - + Inlet là mặt phẳng thiết lập vận tốc đầu vào
  - + Outlet là mặt phẳng thiết lập thông số đầu ra
  - + Side là các mặt phẳng xung quanh
  - + Submarine là biên dạng tàu ngầm

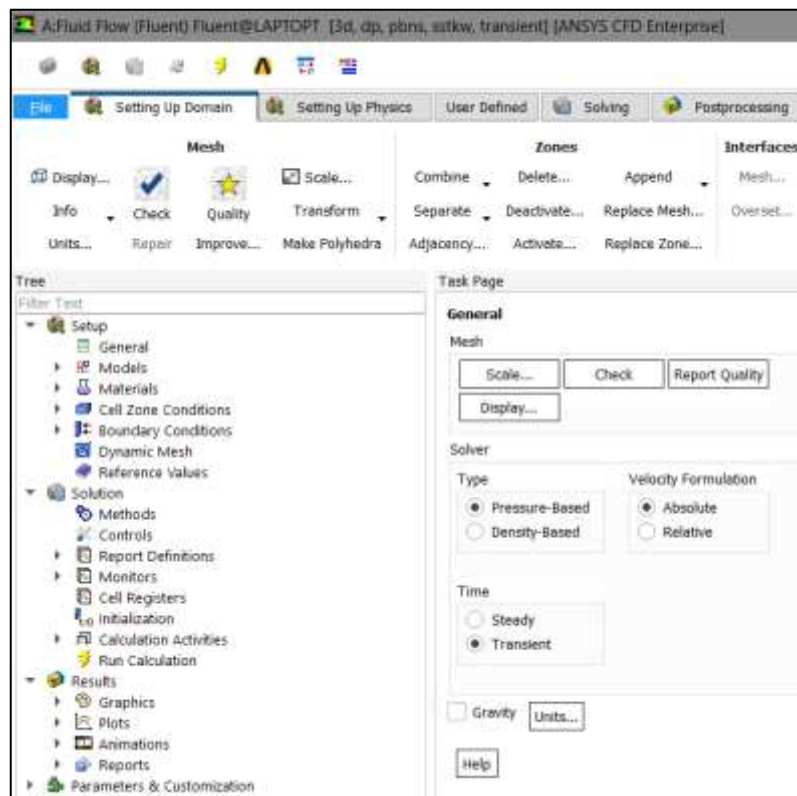


Hình 4.14 Đặt tên các biên

❖ **Bước 3:** Thiết lập thông số

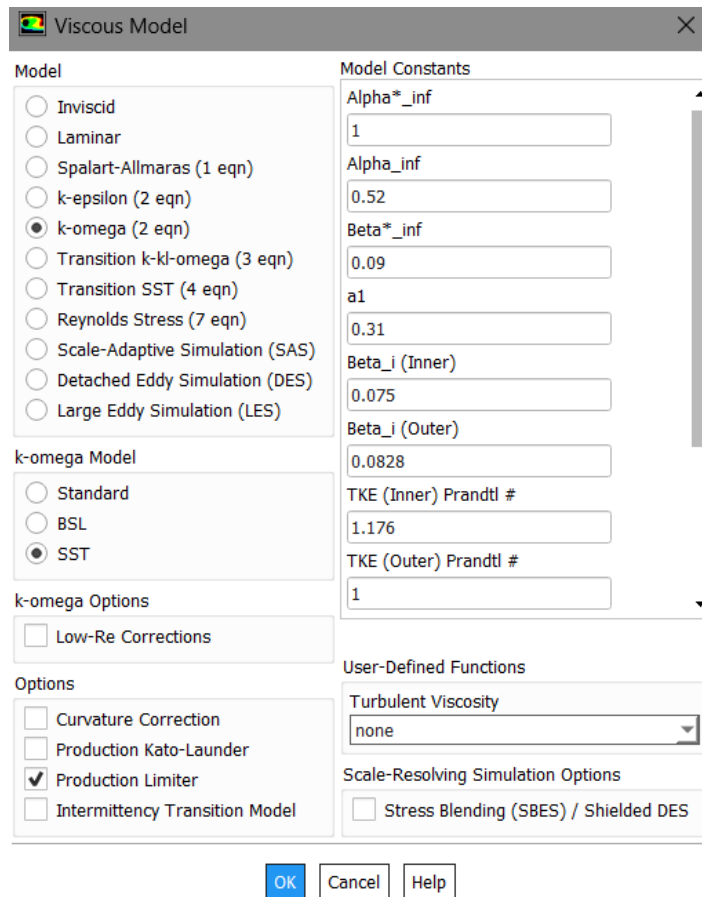
Sau khi hoàn thành bước 1 và 2 thì tiếp theo cần thực hiện là thiết lập các điều kiện biên và thông số đầu vào, lựa chọn phương pháp để tiến hành mô phỏng theo tuần tự:

- Lựa chọn Module Setup



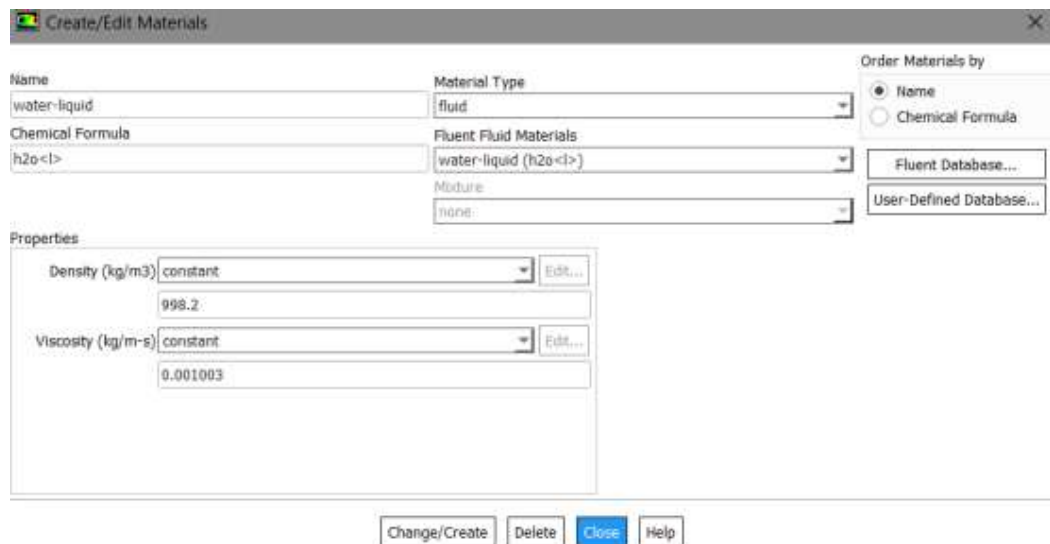
Hình 4.15 Giao diện module Setup, Solution và Results

- Lựa chọn mô hình dòng chảy rối SST k -  $\omega$



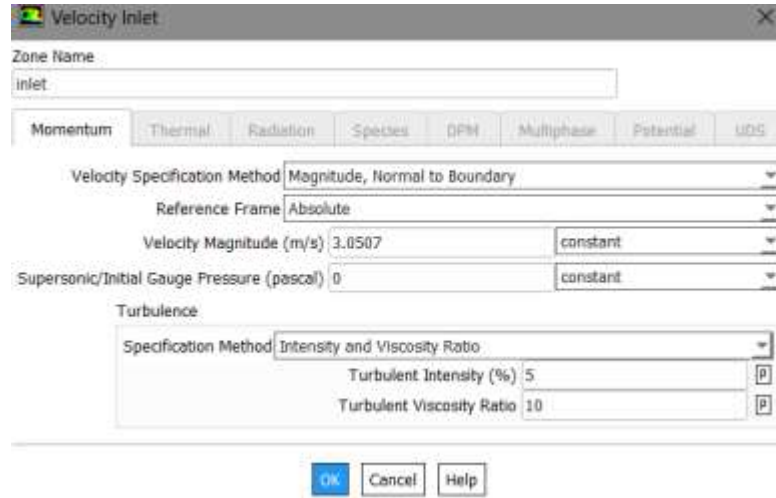
Hình 4.16 Thiết lập mô hình dòng rối SST k -  $\omega$

- Thiết lập chất lỏng mô phỏng là nước



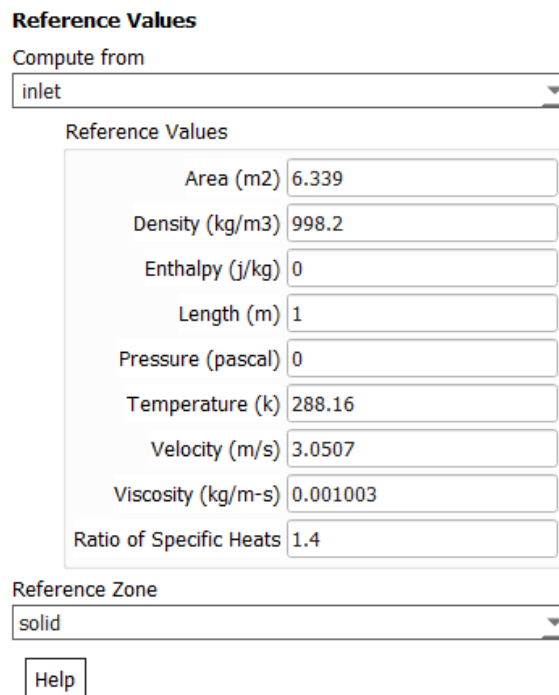
Hình 4.17 Thiết lập chất lỏng mô phỏng

- Thiết lập vận tốc vào mục Velocity Magnitude với hướng dòng chảy tới song song tâm đối xứng tàu ngầm. Tại đây các trường hợp khác nhau sẽ điền các vận tốc khác nhau.



Hình 4.18 Thiết lập vận tốc

- Tại mục Reference Values đặt bài toán với đầu vào là ở Inlet và tính toán với chất lỏng là nước đã thiết lập.



Hình 4.19 Cài đặt giá trị

- Tại mục Run Calculation tiến hành chạy mô phỏng.

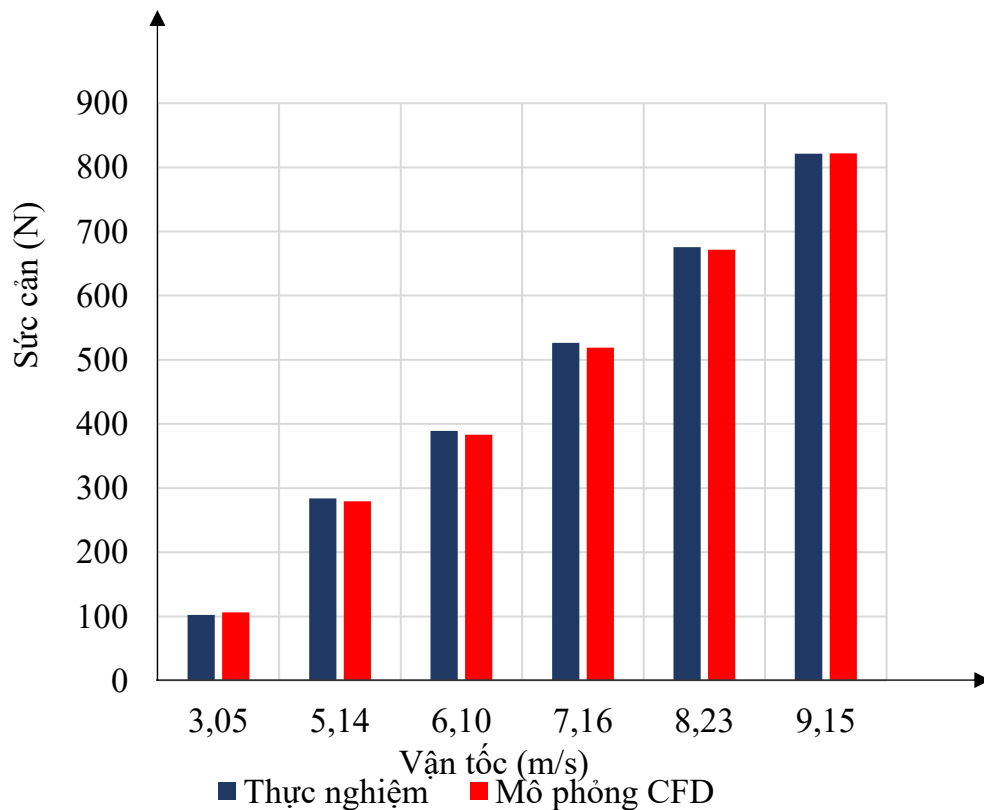
#### 4.1.5. Kết quả và bàn luận

##### ❖ Sức cản

Sau khi chạy mô phỏng và tiến hành kiểm tra độ hội tụ thu được kết quả sức cản tại các vận tốc đặt ra và so sánh với các kết quả thực nghiệm ở tài liệu [2]:

Bảng 4.6 Kết quả mô phỏng và so sánh với thực nghiệm

STT	Vận tốc (m/s)	Sức cản (N)		Sai số (%)
		Thực nghiệm	Mô phỏng CFD	
1	3,0507	102,3	106,4	4,01
2	5,1444	283,8	279,5	1,52
3	6,0962	389,2	383,2	1,54
4	7,1611	526,6	518,7	1,50
5	8,2311	675,6	671,8	0,56
6	9,1520	821,1	821,6	0,06



Hình 4.20 So sánh kết quả mô phỏng CFD với thực nghiệm

❖ **Tính chuyển sức cản tàu mô hình sang tàu thật**

Mô hình tàu ngầm và tàu ngầm thực tế đồng dạng số froude, trường hợp tàu ở sâu trong nước biển giả định sức cản tàu ngầm chỉ bao gồm sức cản ma sát và sức cản dư là đáng kể nhất, sức cản tàu thật sẽ được tính toán dựa trên tàu mẫu:

– Hệ số sức cản dư tàu mẫu bằng sức cản dư tàu mô hình:  $C_{ds} = C_{dm}$

– Sức cản ma sát tính theo ITTC 2008

+ Số Reynold

$$Re = \frac{v.L}{\mu} \quad (4.4)$$

+ Hệ số sức cản ma sát

$$C_f = \frac{0,075}{(\log_{10} Re - 2)} \quad (4.5)$$

+ Sức cản dư

$$R_d = 0,5.C_d.\rho.V^2.WS \quad (4.6)$$

+ Sức cản ma sát

$$R_f = 0,5.C_f.\rho.V^2.WS \quad (4.7)$$

Quy trình tính chuyển sức cản tàu mô hình sang tàu ngầm thực tế khi đã biết sức cản của tàu mô hình:

– Bước 1: Tính số Reynold của tàu mô hình (4.4)

– Bước 2: Tính hệ số sức cản ma sát của tàu mô hình (4.5)

– Bước 3: Tính sức cản ma sát của tàu mô hình (4.6)

– Bước 4: Tính sức cản dư tàu mô hình bằng công thức

$$R_T = R_d + R_f \quad (4.8)$$

– Bước 5: Tính hệ số sức cản dư tàu mô hình

– Bước 6: Tính sức cản dư tàu ngầm thực tế

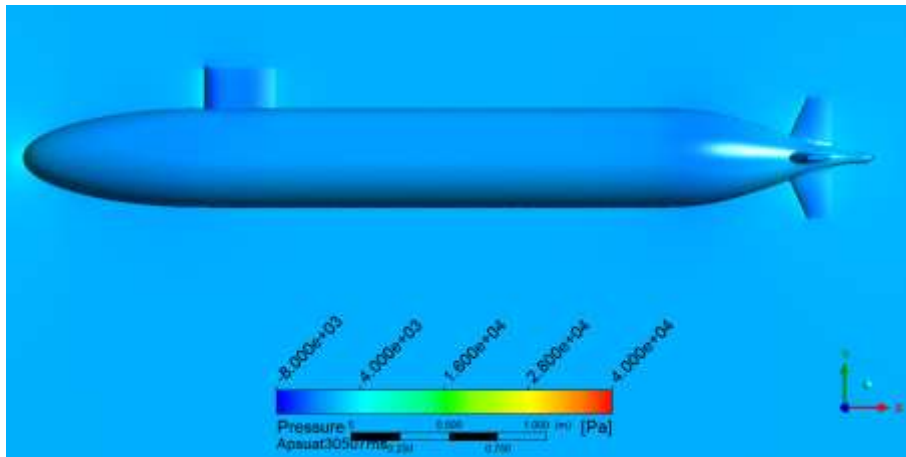
– Bước 7: Tính sức cản ma sát tàu ngầm thực tế

– Bước 8: Tính sức cản toàn bộ tàu ngầm thực tế (4.8)

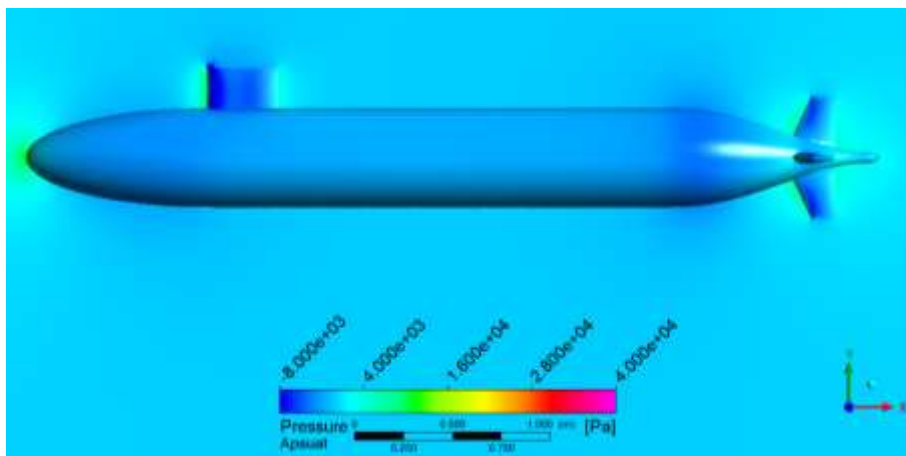
**Bảng 4.7** Tính chuyên sức cản tàu ngầm mô hình sang mô hình tàu thật

Vận tốc tàu ngầm $V_s$ (m/s)	Vận tốc mô hình $V_m$ (m/s)	Sức cản mô hình $R_{tm}$ (N)	Sức cản tàu thật $R_{ts}$ (N)
14,95	3,05	106,4	200699
25,2	5,14	279,5	545302
29,87	6,10	383,2	755397
35,08	7,11	518,7	1030220
40,32	8,23	671,8	1344967
44,84	9,15	821,6	1651154

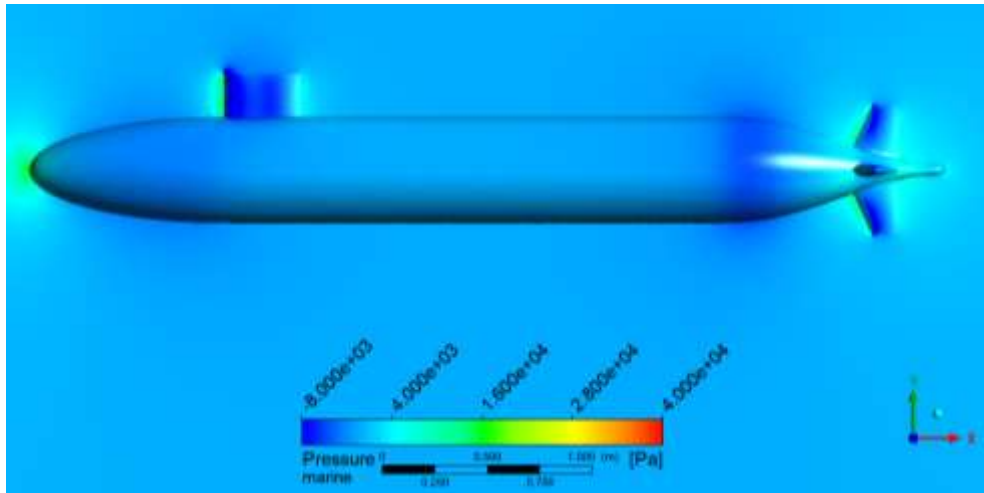
❖ **Phân bố áp suất**



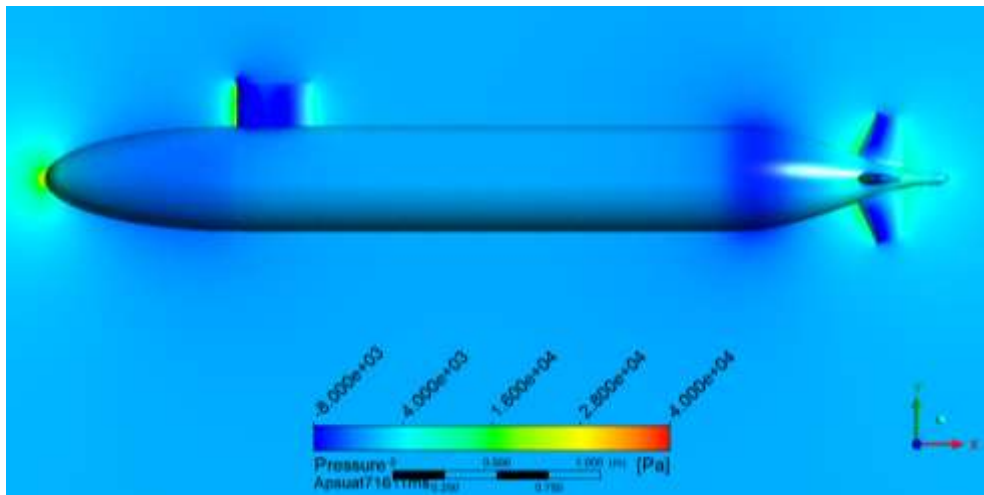
Hình 4.21 Phân bố áp suất tại  $V=3,0507$  (m/s)



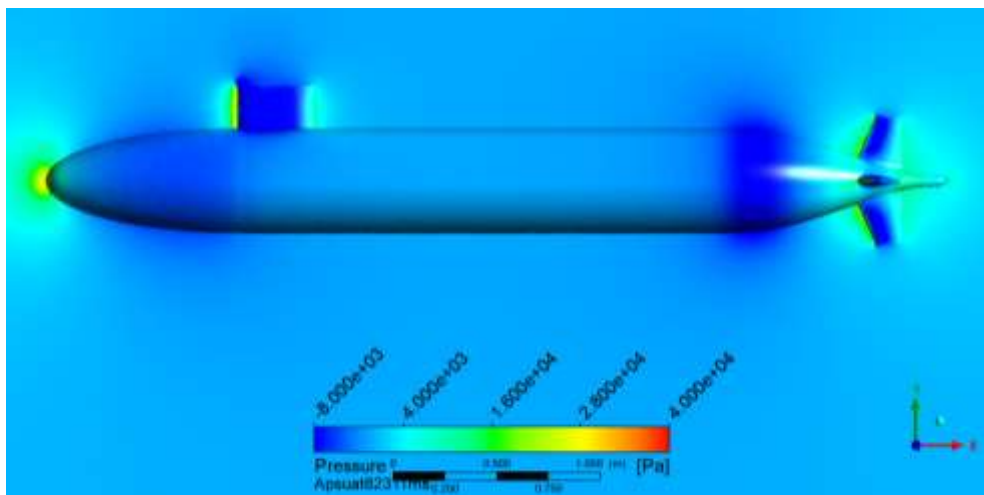
Hình 4.22 Phân bố áp suất tại  $V=5,1444$  (m/s)



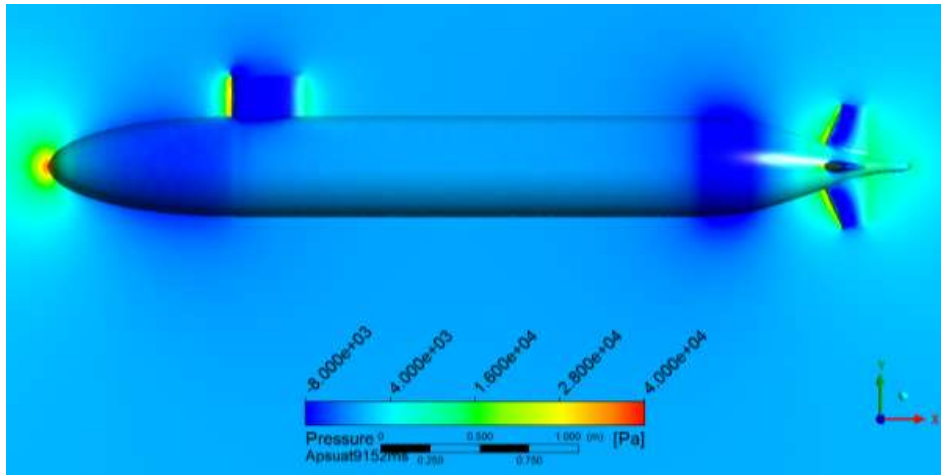
Hình 4.23 Phân bố áp suất tại  $V=6,0962$  (m/s)



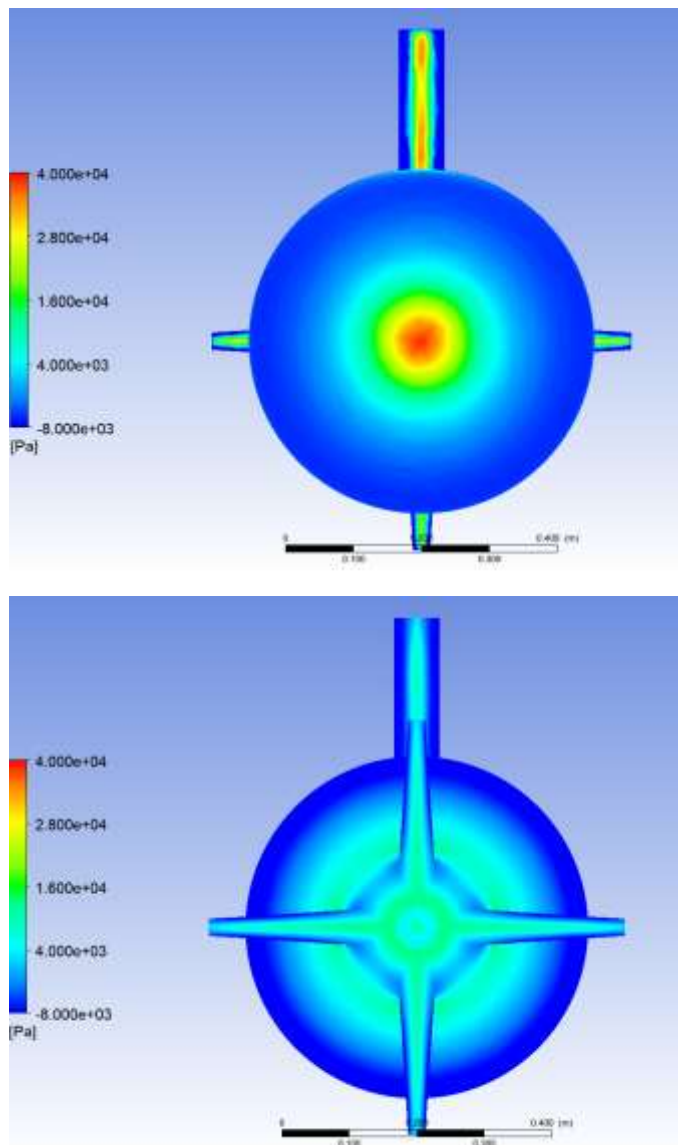
Hình 4.24 Phân bố áp suất tại  $V=7,1611$  (m/s)



Hình 4.25 Phân bố áp suất tại  $V=8,2311$  (m/s)

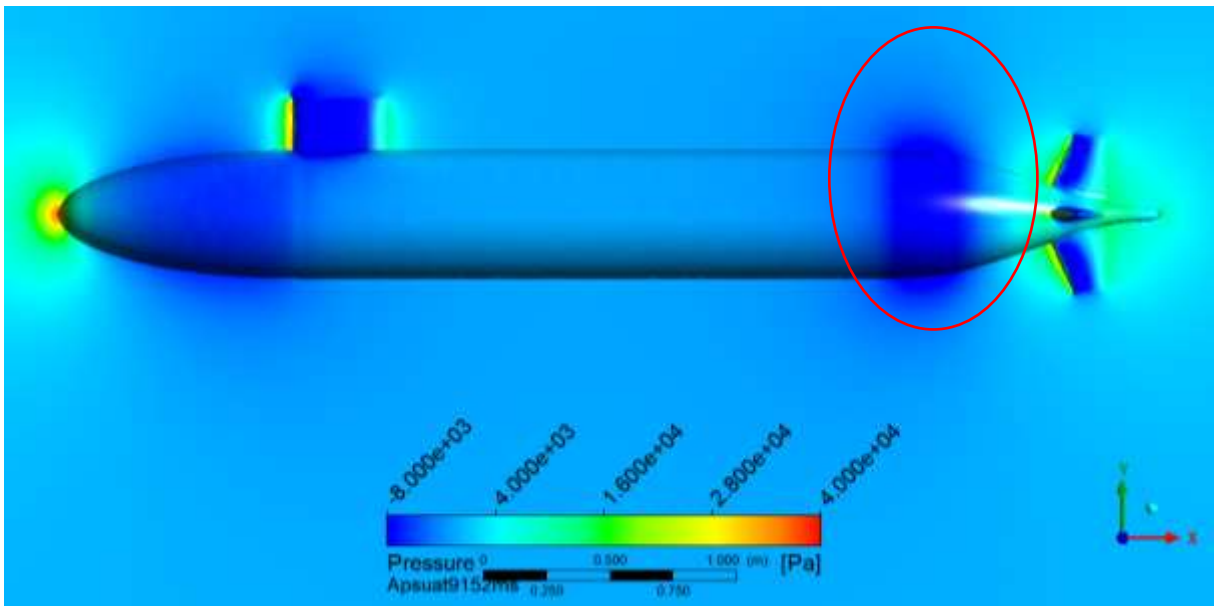


Hình 4.26 Phân bố áp suất tại  $V=9,1520$  (m/s)



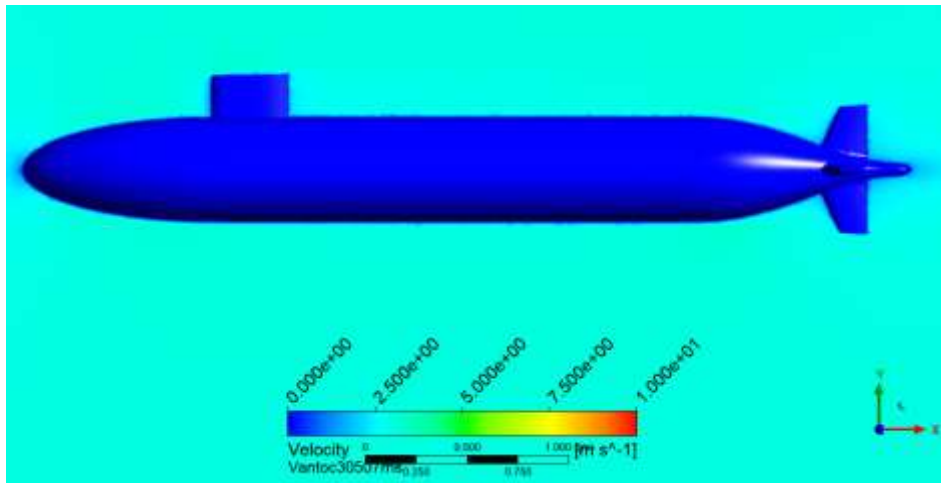
Hình 4.27 Phân bố áp suất mũi và đuôi  $V=3,05$  m/s

Từ kết quả phân bố áp suất của tàu ngầm được thể hiện ở trên, áp suất được biểu diễn ở các mặt cắt dọc và bề mặt tàu theo hướng dọc của thân tàu. Ở hình phân bố áp suất mũi và đuôi tàu, áp suất đạt giá trị cực đại tại mũi tàu và phần phía trước của đài quan sát khi tàu di chuyển với hai vận tốc khác nhau rõ nhất là từ vận tốc 7,16 m/s đến 9,15 m/s. Nguyên nhân gây ra áp suất lớn nhất ở mũi tàu và phía trước đài quan sát là do có sự va chạm giữa tàu ngầm và nước khi di chuyển. Khi tàu ngầm tiến vào nước, mũi tàu và phía trước đài quan sát bị tác động bởi khối lượng nước kèm theo phương dọc tàu phía trước hướng tiến của tàu ngầm, tạo ra một vùng áp suất cao. Trong khi đó, áp lực tác động trên phần thân giữa chủ yếu là do ứng suất tiếp tuyến gây ra. Trên phần đuôi, áp suất giảm xuống cho đến khi gặp các vây đuôi. Tại các vị trí ở phần đuôi tàu ngầm, áp suất tăng lên do áp lực của dòng chảy tác động lên phần phía sau đuôi tàu. Thông qua sự phân bố áp suất nhận thấy tàu ngầm khi di chuyển trong nước biển thì các vị trí tiếp giáp nước như mũi tàu, phía trước đài quan sát, vị trí chuyển tiếp từ phần thân giữa sang phần thân sau và các vây đuôi có áp suất toàn phần lớn hơn do sự ảnh hưởng của yếu tố thủy tĩnh và sức cản từ các vị trí này. Hình dạng thân tàu được thiết kế dạng trụ giúp giảm mặt tiếp nước và áp suất tác động lên thân tàu ở mức tối thiểu.

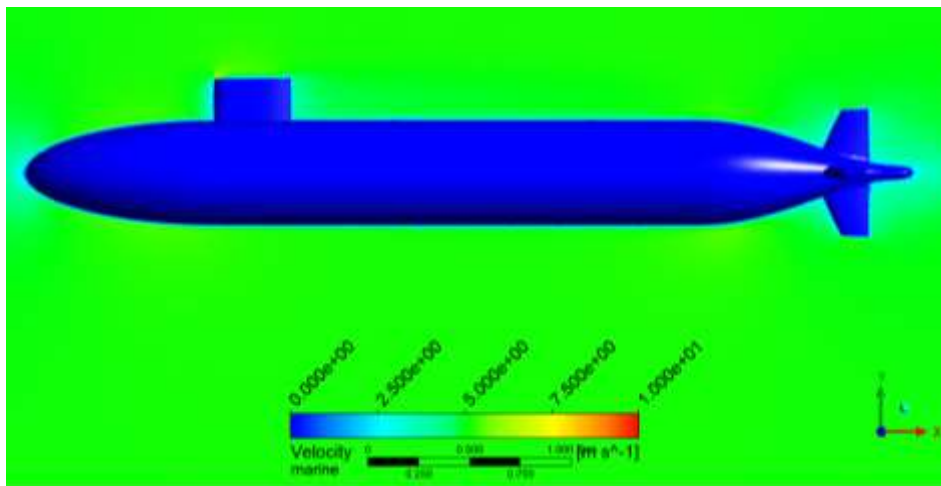


Hình 4.28 Vị trí tiếp giáp thân giữa  $V=9,15$  m/s

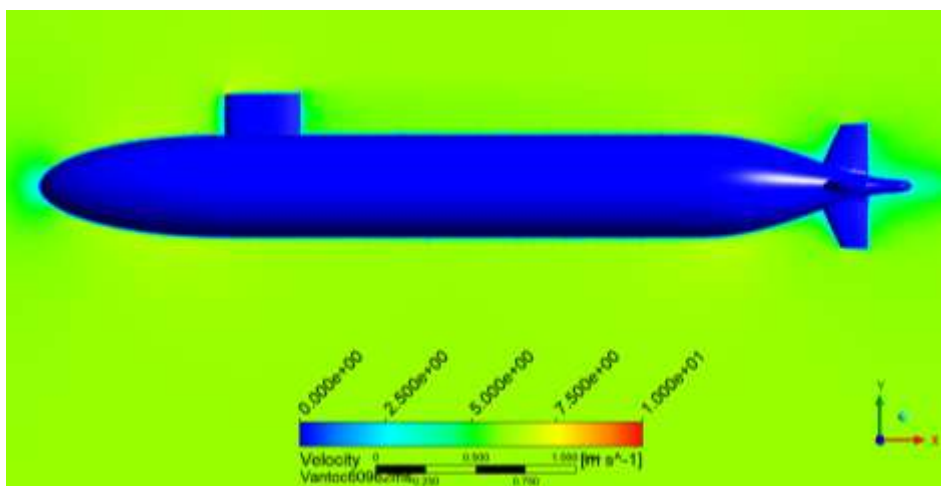
❖ **Phân bố vận tốc**



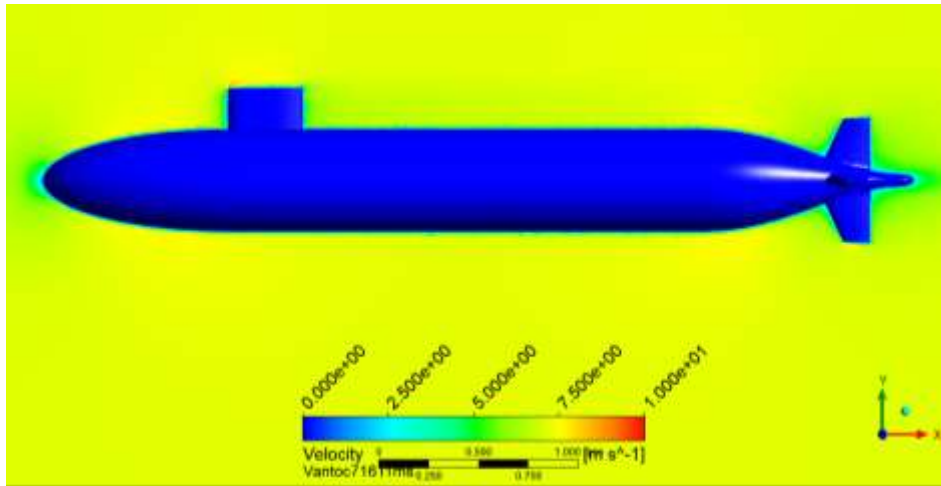
Hình 4.29 Phân bố vận tốc trên các lớp biên xung quanh tàu tại  $V=3,0507$  (m/s)



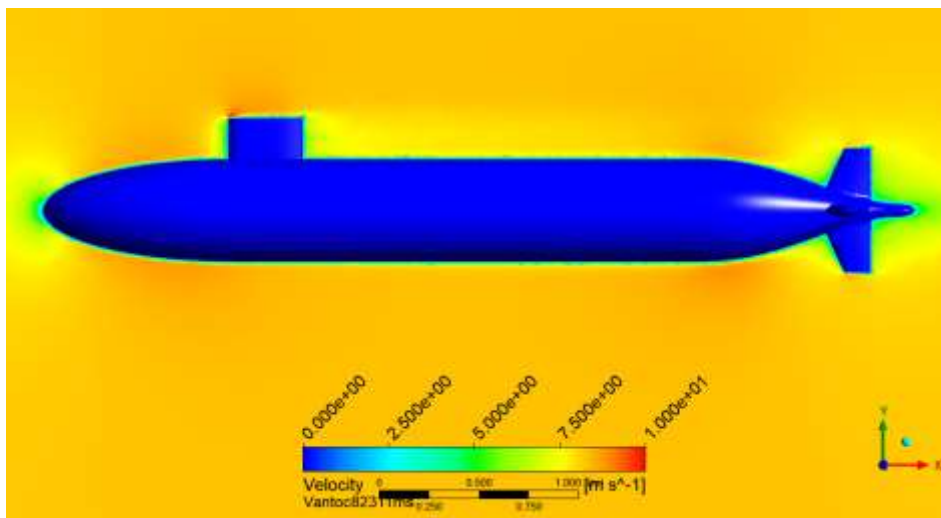
Hình 4.30 Phân bố vận tốc trên các lớp biên xung quanh tàu tại  $V=5,1444$  (m/s)



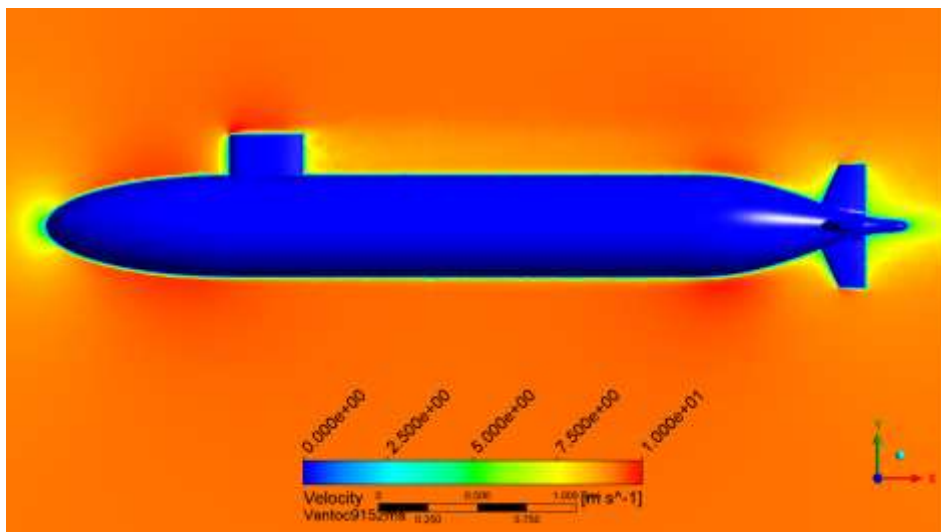
Hình 4.31 Phân bố vận tốc trên các lớp biên xung quanh tàu tại  $V=6,0962$  (m/s)



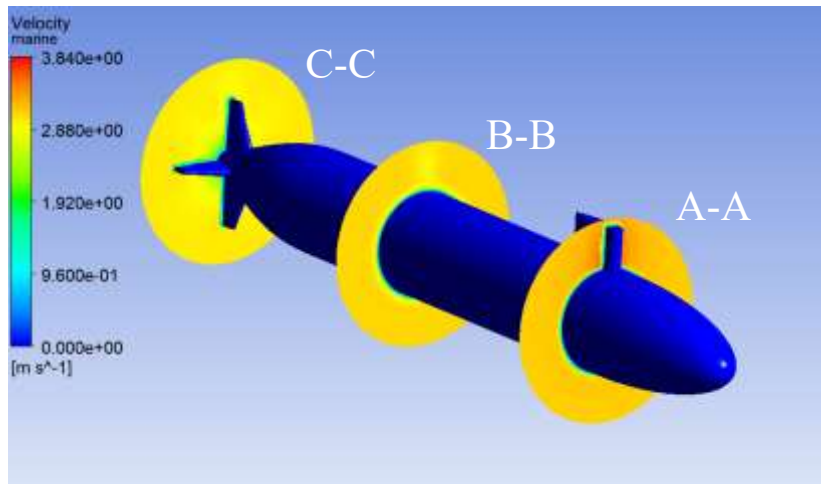
Hình 4.32 Phân bố vận tốc trên các lớp biên xung quanh tàu tại  $V=7,1611$  (m/s)



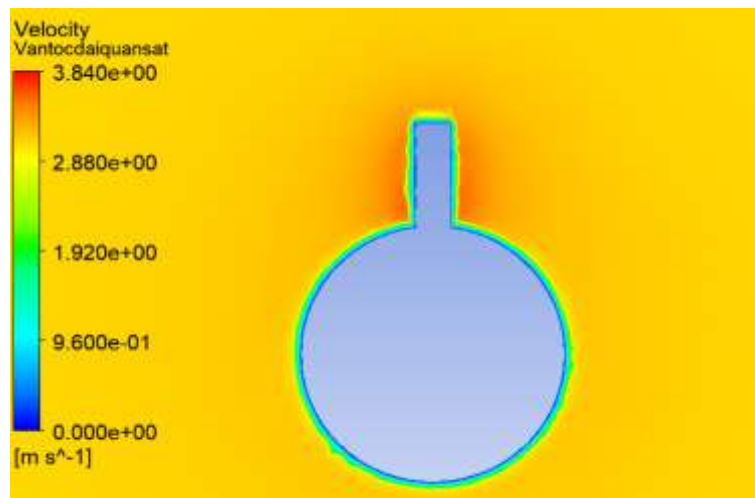
Hình 4.33 Phân bố vận tốc trên các lớp biên xung quanh tàu tại  $V=8,2311$  (m/s)



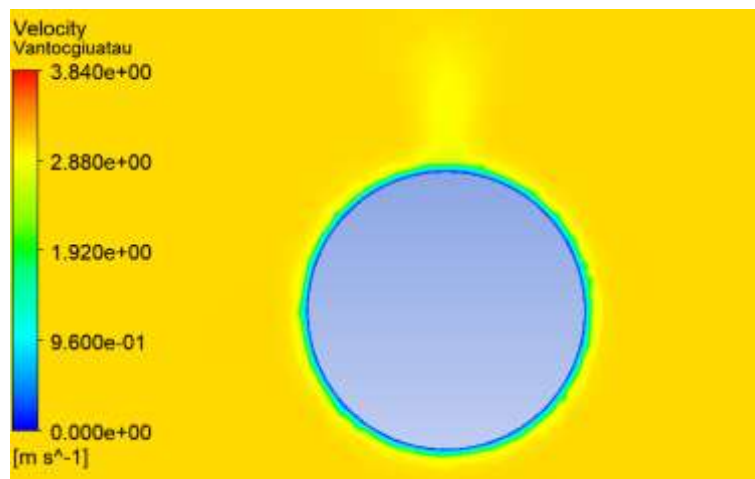
Hình 4.34 Phân bố vận tốc trên các lớp biên xung quanh tàu tại  $V=9,1520$  (m/s)



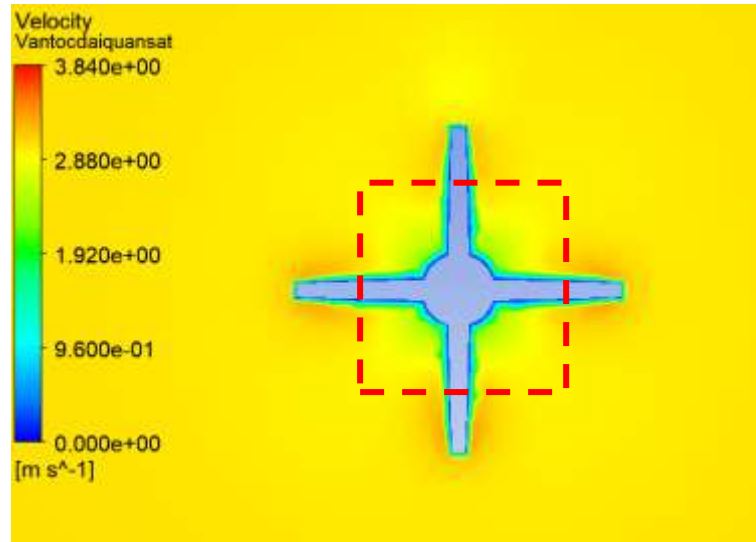
Hình 4.35 Vị trí các mặt cắt của phân bố vận tốc tại  $V=3,05$  m/s



Hình 4.36 Mặt cắt A-A



Hình 4.37 Mặt cắt B-B



Hình 4.38 Mặt cắt C-C

Từ kết quả phân bố vận tốc trên mặt phẳng giữa tàu và các mặt cắt ngang của tàu tại các vị trí đài quan sát, phần thân giữa và vùng vây đuôi được trình bày ở trên và thể hiện thành 3 mặt cắt ngang A-A, B-B, và C-C. Phân bố vận tốc trên mặt cắt ngang A-A cho thấy sự thay đổi vận tốc đều theo các lớp chất lỏng, đặc biệt là tại đài quan sát, 2 bên đài trên mặt cắt có vận tốc lớn nhất. Tại mặt cắt B-B, phân bố vận tốc đều hơn chỉ có phần sau đài quan sát có sự giảm nhẹ vận tốc do bị chắn. Cuối cùng, tại mặt cắt C-C, 4 vây có dạng profil thoát nước tốt, tuy nhiên, gần phần đuôi có tại 1 dòng chảy gần như hình vuông có vận tốc thấp, tạo điều kiện thuận lợi cho chân vịt xoay để tạo lực đẩy cho tàu và tăng độ hiệu quả cho hệ thống lái khi hoạt động trong trường hợp tàu tiến lên.

## 4.2 Tính toán sức cản của tàu ngầm ở các độ sâu khác nhau

### 4.2.1 Điều kiện mô phỏng – các thông số đầu vào

Điều kiện mô phỏng CFD trong đề tài này sẽ được mô phỏng tương tự các điều kiện như thực nghiệm [1] nên các thông số đầu vào để thiết lập mô phỏng sẽ được dựa trên tài liệu [2]. Các thông số cụ thể như điều kiện kích thước bể thử, khối lượng riêng của nước, độ nhớt động học, độ nhám bề mặt sẽ được thiết lập tương tự bể thử cũng như việc chọn độ sâu cho mô hình tàu ngầm. Mô hình dòng chảy được sử dụng trong mô phỏng bao quanh tàu ngầm là mô hình chất lỏng thực RANS với dòng chảy đều và mô hình dòng rối SST  $k - \omega$  là phương pháp rất tốt cho các dòng chảy đặc biệt là sức cản tác dụng lên biên dạng tàu ngầm [4]. Độ sâu của tàu ngầm sẽ dựa vào tỷ lệ  $H/D$  với  $H$  là chiều chìm của bánh lái,  $D$  là đường kính phần thân tàu ngầm.

**Bảng 4.8 Thông số đầu vào**

Các thông số đầu vào	Kí hiệu	Giá trị	Đơn vị
Khối lượng riêng của nước	$\rho_{nuoc}$	998,2	$\frac{kg}{m^3}$
Khối lượng riêng của không khí	$\rho_{kk}$	1,225	$\frac{kg}{m^3}$
Độ nhớt động học	$\nu_{nuoc}$	$1,003 \cdot 10^{-6}$	$\frac{m^2}{s}$
Độ nhớt động học	$\nu_{kk}$	$1,789 \cdot 10^{-8}$	$\frac{m^2}{s}$

**Bảng 4.9 Các trường hợp thử nghiệm**

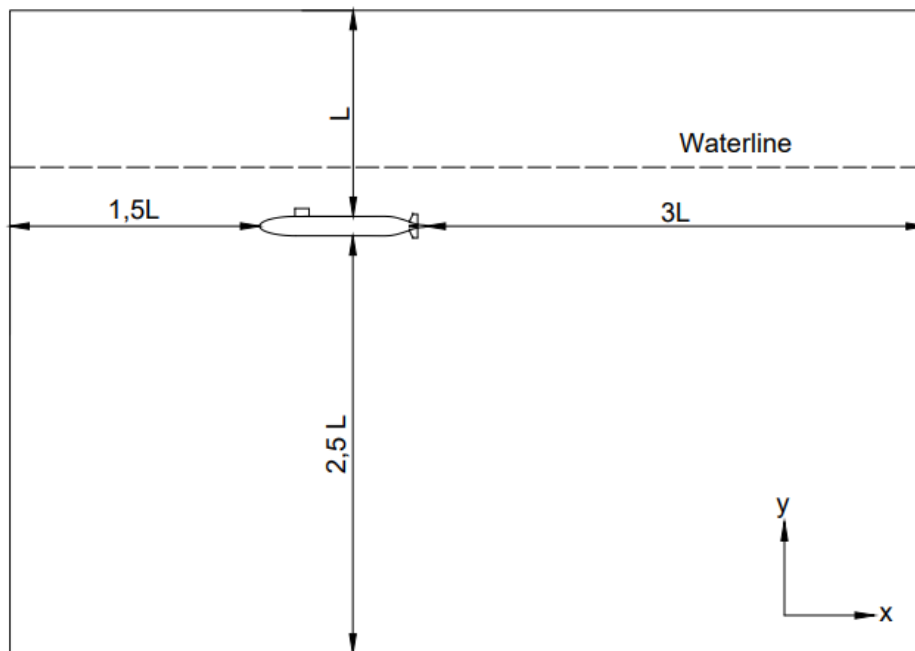
Trường hợp	Độ sâu (m)	Vận tốc (m/s)
1	0,81	0,86
2	0,81	2,03
3	0,81	3,01
4	1,37	0,86
5	1,37	2,03
6	1,37	3,01

#### **4.2.2 Không gian miền tính toán**

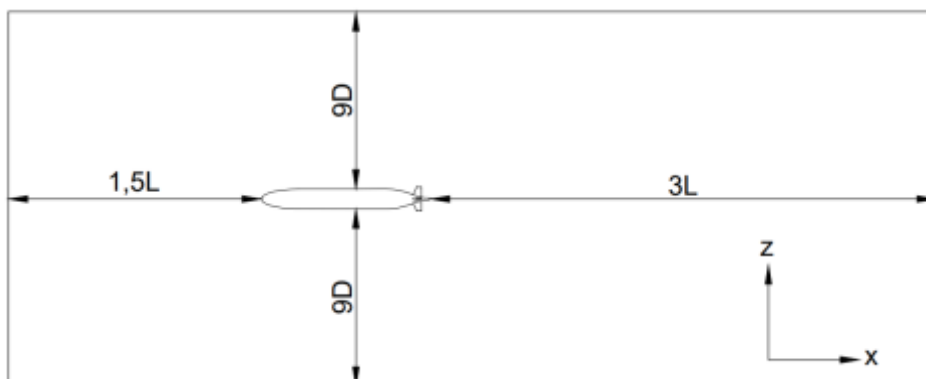
Phần miền không gian tính toán phần này có sự khác biệt so với Phần 4.1 do điều kiện tính toán là nước nông nên cần thiết lập 2 miền – 1 là không khí bên trên 2 là nước bên dưới. Theo ITTC (2008) [5] ta lựa chọn miền tính toán sao cho các kích thước đảm bảo phải lớn hơn hoặc bằng để miền tính toán đạt độ chính xác cho việc tính toán bài toán đến đặc tính thủy động lực học tác động lên tàu ngầm. Đối với bài toán tính sức cản tàu ngầm ta chọn miền không gian có dạng hình hộp chữ nhật bao quanh tàu ngầm với các kích thước tối thiểu như sau (Chiều dài tàu  $L = 4,356m$  và đường kính thân tàu ngầm là  $D = 0,254m$ ):

**Bảng 4.10** Kích thước miền chất lỏng

Vị trí cách tàu	Khoảng cách
Phía trước mũi tàu ngầm	$1,5.L_{OA}$
Phía sau đuôi tàu ngầm	$3.L_{OA}$
2 bên mạn tàu ngầm	$9.D$
Phía trên tàu ngầm	$L_{OA}$
Phía dưới tàu ngầm	$2,5.L_{OA}$



**Hình 4.39** Kích thước miền không gian hình chiếu đứng



**Hình 4.40** Kích thước miền không gian hình chiếu bằng

### **4.2.3 Phương pháp VOF ( Volume of Fluids)**

Phương pháp VOF (Volume of Fluid) trong CFD là một phương pháp số học được sử dụng để mô phỏng luồng chất lỏng đa pha, trong đó các pha được xác định bằng cách theo dõi tỷ lệ thể tích của chúng trong mỗi ô lưới.

Đặc điểm của phương pháp VOF bao gồm:

- Khả năng mô phỏng các hiện tượng đa pha như tách lớp, trộn lẫn và giao thoa giữa các chất lỏng.
- Khả năng xác định giao diện giữa các pha và tính toán các thông số liên quan như diện tích giao diện, vận tốc và áp suất.

Ứng dụng của phương pháp VOF trong đề tài này đó là mô phỏng hiện tượng đa pha trong mô phỏng sức cản tàu ngầm. Trường hợp mô phỏng này là tàu ngầm di chuyển ở độ sâu gần mặt thoáng nên có ảnh hưởng của mặt thoáng. Miền chất lỏng sẽ được chia thành 2 pha: 1 là nước và 1 là không khí với lớp không khí bên trên và áp đặt trọng lực và điều kiện để cho 2 chất lỏng không bị hòa trộn vào nhau ở điều kiện biên ban đầu bằng không.

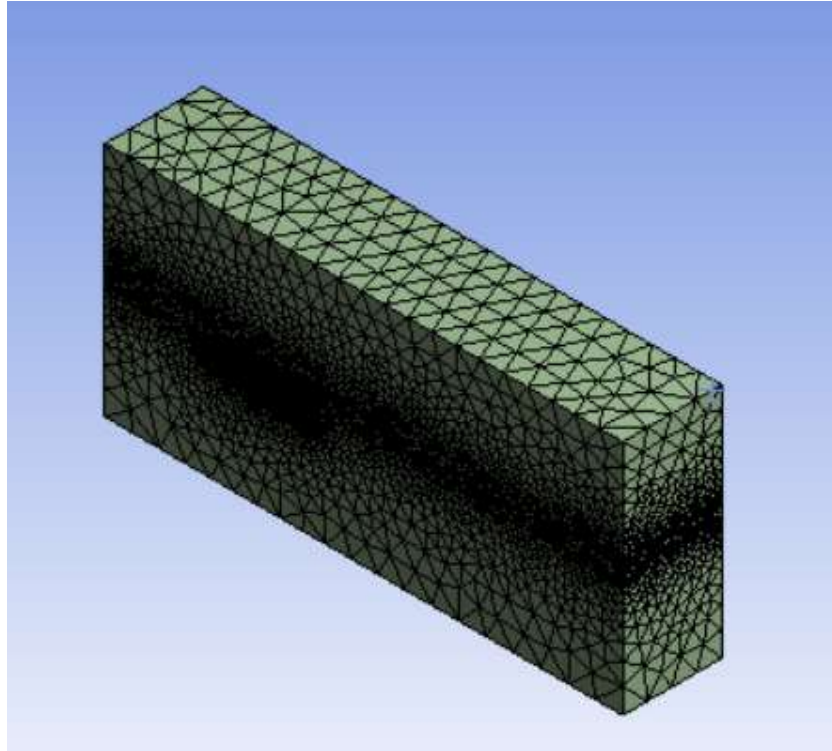
### **4.2.4 Lưới tính toán**

Sử dụng dạng lưới tam giác (Triangle Mesh) là một loại lưới được sử dụng trong mô hình hóa và tính toán các vấn đề liên quan đến dòng chảy, nhiệt độ và cơ học trong phần mềm Ansys Fluent.

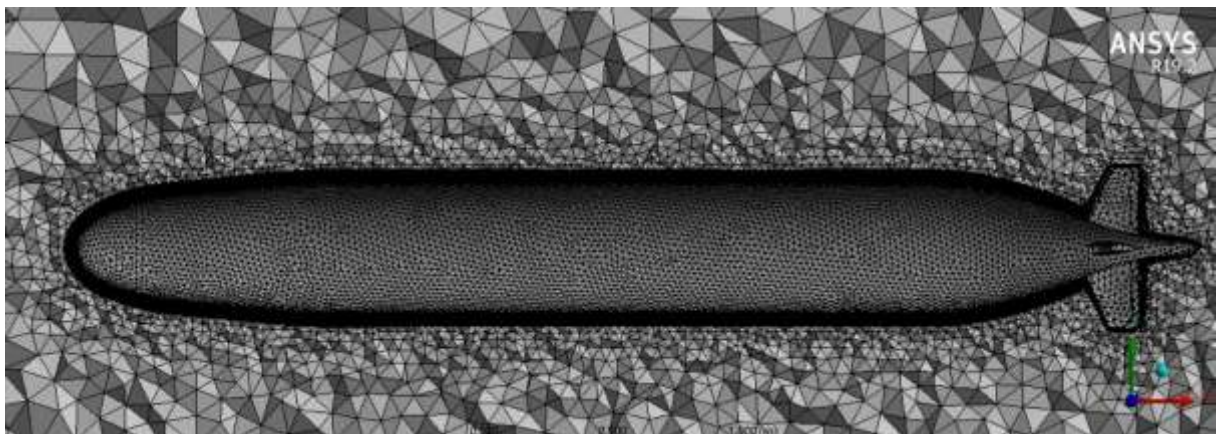
Lưới được chia mịn phần xung quanh thân tàu và vùng mặt thoáng của nước để đảm bảo bắt được kết quả chính xác về sức cản cũng như là sóng tạo ra do tàu ngầm chạy gần mặt nước gây ra.

#### **❖ Đặc điểm của lưới:**

Đối với lớp biên miền tính toán xác định có dạng thu nhỏ dần về biên dạng tàu ngầm, theo công thức kinh nghiệm CGI kích thước phân tử  $\delta \leq 3,12$  m, chọn  $\delta = 1,3$  m. Khoảng cách từ bề mặt đến lớp biên  $y \leq 0,308$  m, chọn kích thước lưới  $\delta = 0,272$  m và chia thêm lớp biên quanh tàu ngầm với kích thước 0,025 m.



Hình 4.41 Lưới tính toán miền không gian chất lỏng

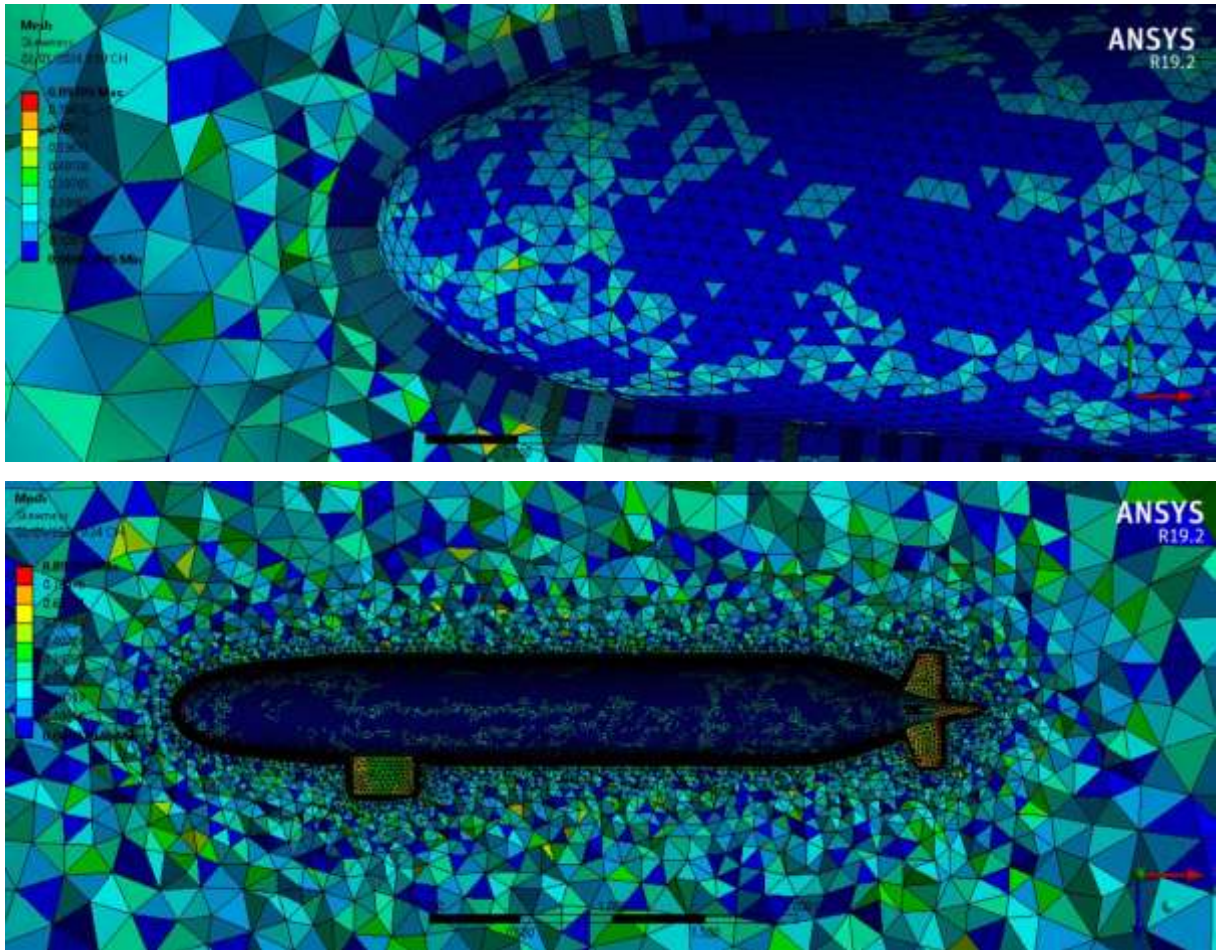


Hình 4.42 Lưới trên bề mặt tàu ngầm và lưới xung quanh tàu

❖ **Tiêu chuẩn đánh giá chất lượng lưới:**

Kiểm tra chất lượng lưới trong phần mềm

- Max skewness: 0,894
- Min skewness:  $0,0011,4 \cdot 10^{-6}$
- Các lưới nằm trong khoảng 0,001 đến 0,596



Hình 4.43 Chất lượng lưới trong phần mềm

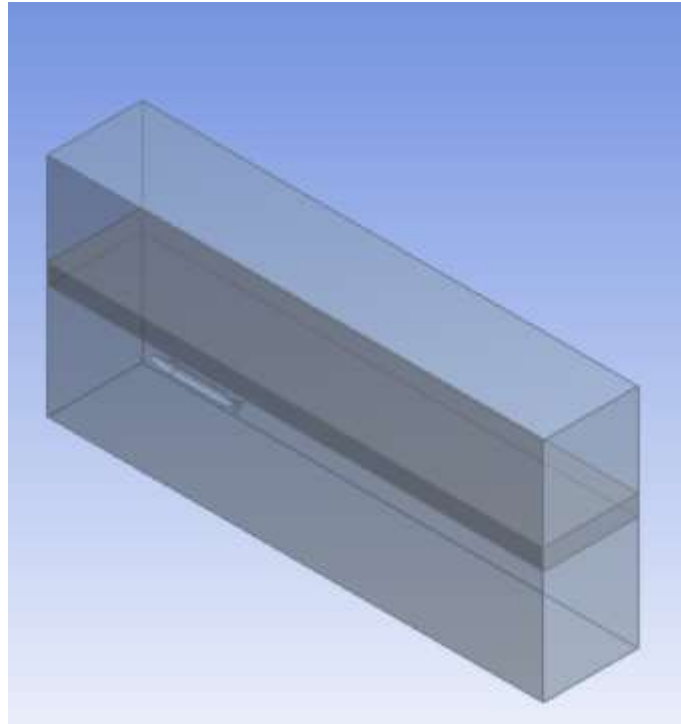
#### **4.2.5 Thiết lập tính toán**

##### **❖ Bước 1: Thiết lập mô hình toán học**

Mô hình hình học tàu ngầm 3D Darpa Suboff được xây dựng bằng phần mềm AutoCad ở Chương 3 được xuất sang file \*.iges để mô phỏng. Các bước tuần tự để đưa hình học 3D vào phần mềm:

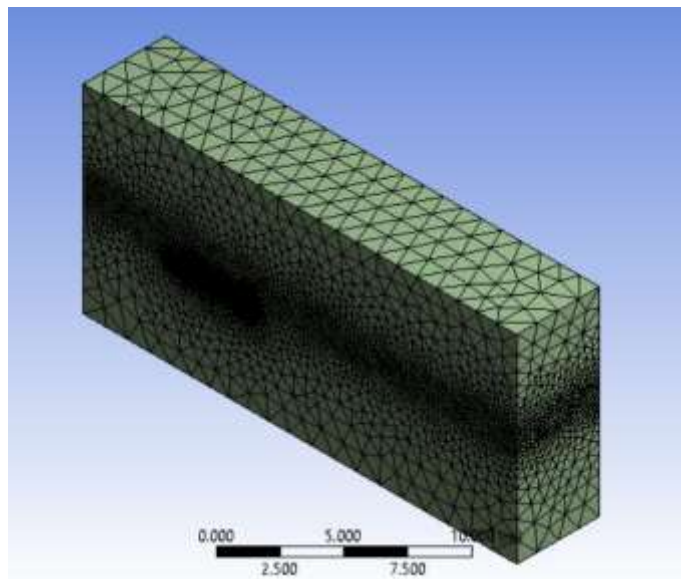
- Khởi động phần mềm Ansys Workbench và chọn module Fluid Flow (Fluent)
- Trong phần Geometry chọn Design Modeller
- Import file \*.iges mô hình 3D tàu ngầm vào phần mềm
- Thiết lập miền tính toán như bên dưới, tại đây sử dụng dạng đối xứng Symmetry nên vùng tính toán sẽ giảm 1 nửa như Hình 4.42
- Dùng lệnh Subtract để giữ lại miền không gian sử dụng

- Sau đó bấm Generate để hoàn thành việc loại bỏ khối bên trong tàu ngầm tạo điều kiện thuận lợi để chia lớp biên xung quanh tàu khi thiết lập phương pháp tính toán mô phỏng.



Hình 4.44 Xây dựng miền tính toán

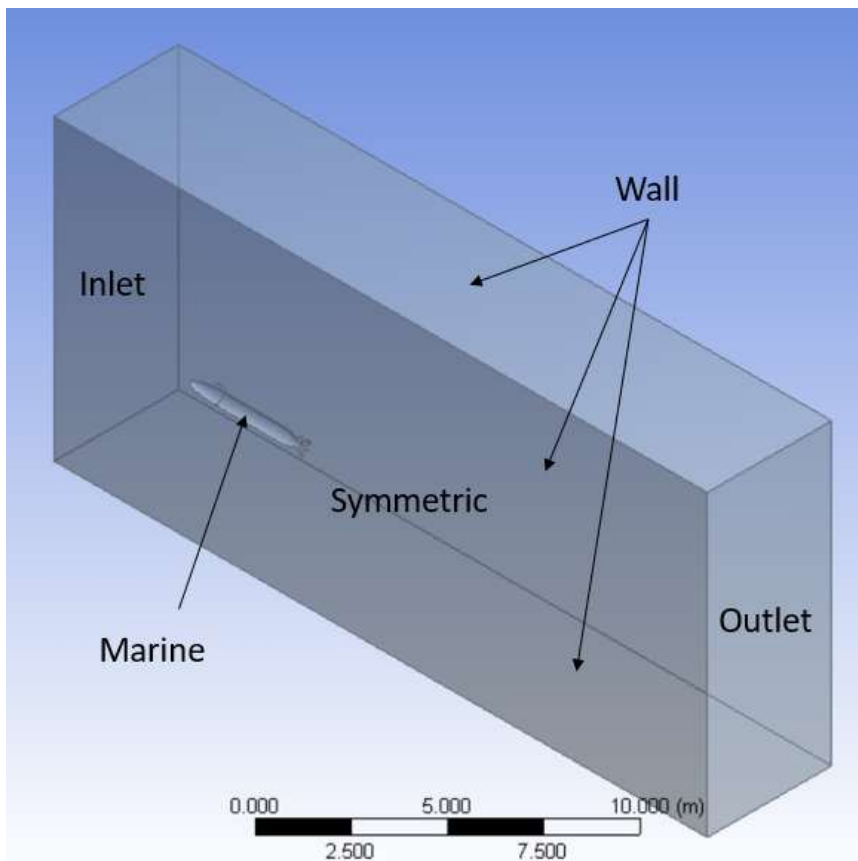
❖ **Bước 2:** Chia lưới



Hình 4.45 Chia lưới cho mô phỏng

Đặc tên cho các mặt phẳng: việc đặt tên cho các miền chất lỏng để thuận tiện cho việc quản lý và thiết lập các điều kiện biên, các điều kiện thử nghiệm khi tiến hành trong phần thiết lập phương pháp giải bài toán CFD. Đối với bài toán tính sức cản tàu thì dựa trên kinh nghiệm sẽ chọn 1 mặt phẳng làm đầu vào, 1 mặt phẳng đối diện làm đầu ra, các biên không dùng lấy kết quả sẽ không được đặt tên, mặt phẳng biên dạng tàu ngầm sẽ được đặt tên thuận tiện cho việc xuất kết quả từ biên dạng tàu ngầm và đặc biệt do bài toán cần khối lượng tính toán lớn đó là dòng 2 pha nên để giảm khối lượng tính toán sử dụng phương pháp Symmetry để sử dụng:

- Inlet là mặt phẳng thiết lập vận tốc đầu vào
- Outlet là mặt phẳng thiết lập thông số đầu ra
- Wall là các mặt phẳng xung quanh
- Marine là biên dạng tàu ngầm
- Symmetric là mặt phẳng đối xứng



Hình 4.46 Đặt tên cho các mặt phẳng

❖ **Bước 3:** Thiết lập thông số

Sau khi hoàn thành bước 1 và 2 thì tiếp theo cần thực hiện là thiết lập các điều kiện biên và thông số đầu vào, lựa chọn phương pháp để tiến hành mô phỏng theo tuần tự:

- Lựa chọn Module Setup, thiết lập phần General gia tốc trọng trường

☑ Gravity      Units...

**Gravitational Acceleration**

X (m/s <sup>2</sup> )	0	P
Y (m/s <sup>2</sup> )	-9.81	P
Z (m/s <sup>2</sup> )	0	P

Help

Hình 4.47 Thiết lập gia tốc trọng trường

- Lựa chọn mô hình dòng chảy rối SST  $k - \omega$
- Thiết lập thêm chất lỏng mô phỏng là nước

Create/Edit Materials

Name	water-liquid	Material Type	fluid
Chemical Formula	h2o<l>	Fluent Fluid Materials	water-liquid (h2o<l>)
		Mixture	none

Order Materials by  
 Name  
 Chemical Formula

Fluent Database...  
User-Defined Database...

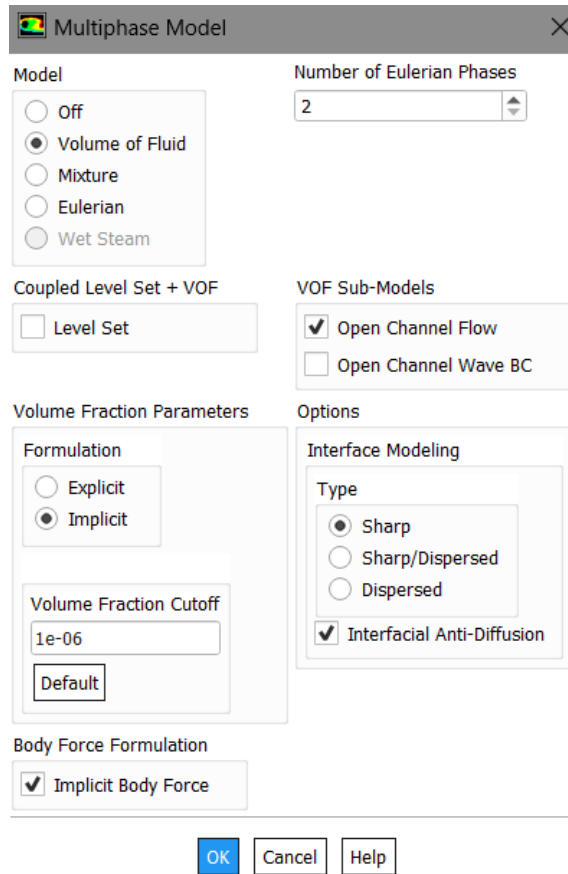
Properties

Density (kg/m <sup>3</sup> )	constant	Edit...
	998.2	
Viscosity (kg/m-s)	constant	Edit...
	0.001003	

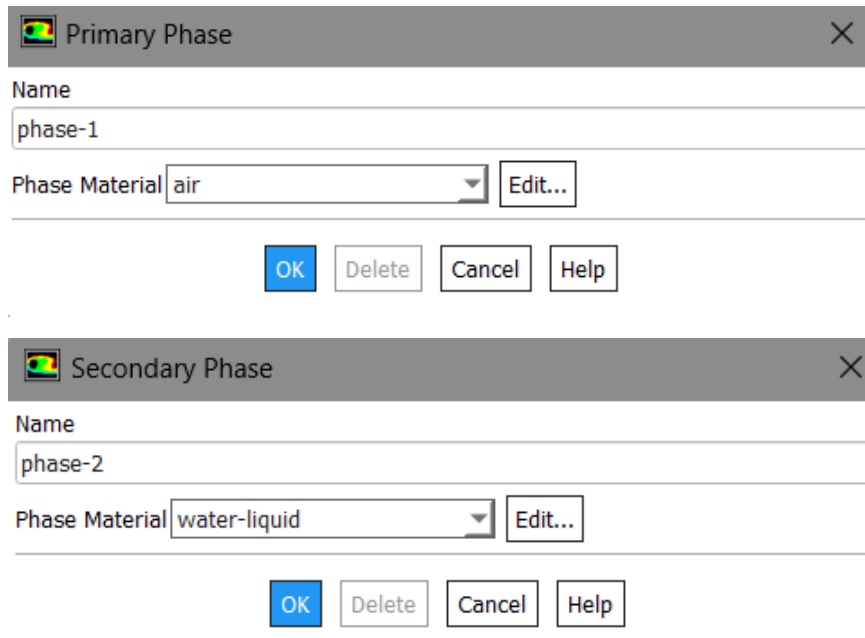
Change/Create    Delete    Close    Help

Hình 4.48 Thiết lập chất lỏng mô phỏng

- Thiết lập phương pháp VOF chia 2 miền pha chất lỏng



Hình 4.49 Thiết lập VOF



Hình 4.50 Chọn chất lưu cho 2 pha

- Thiết lập vận tốc vào mục Velocity Magnitude với hướng dòng chảy tới song song tâm đối xứng tàu ngầm. Tại đây các trường hợp khác nhau sẽ điền các vận tốc khác nhau và độ sâu khác nhau.

Pressure Inlet

Zone Name: inlet Phase: mixture

Momentum Thermal Radiation Species DPM Multiphase Potential UDS

Open Channel Inlet Group ID: 1

Secondary Phase for Inlet: phase-2

Flow Specification Method: Free Surface Level and Velocity

Free Surface Level (m): 1.37 constant

Velocity Magnitude (m/s): 0.86 constant

Bottom Level (m): -12 constant

Density Interpolation Method: From Free Surface Level

OK Cancel Help

Hình 4.51 Thiết lập vận tốc và độ sâu đầu vào

Pressure Outlet

Zone Name: outlet Phase: mixture

Momentum Thermal Radiation Species DPM Multiphase Potential UDS

Open Channel Outlet Group ID: 1

Pressure Specification Method: Free Surface Level

Free Surface Level (m): 1.37 constant

Bottom Level (m): -12 constant

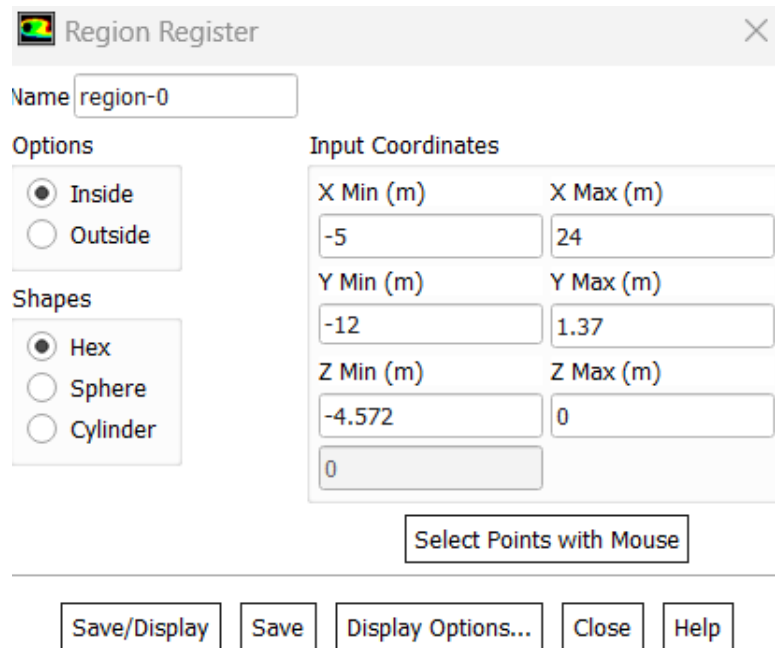
Density Interpolation Method: From Free Surface Level

OK Cancel Help

Hình 4.52 Thiết lập độ sâu đầu ra

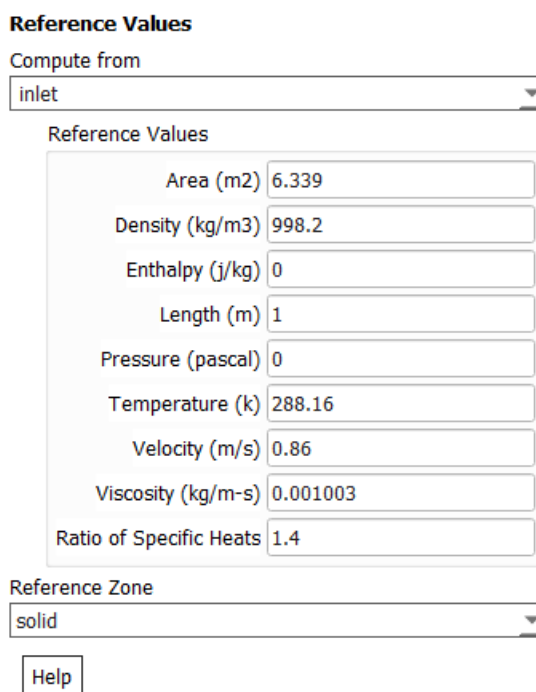
- Tại mục Cell register thiết lập region mới là miền nước để thực hiện tính toán tại đây vận tốc và áp suất được đặt lên và tính toán các giá trị chính xác của vận tốc đầu vào cũng như các giá trị trong vùng region này, bản chất thiết lập là dùng cho

mục đích cùng với miền chất lỏng đi vào và ra tạo thành 1 thể thống nhất 2 miền chất lỏng 2 pha.



Hình 4.53 Thiết lập miền chất lưu nước tính toán

- Tại mục Reference Values đặt bài toán với đầu vào là ở Inlet và tính toán với chất lỏng là nước đã thiết lập.



Hình 4.54 Cài đặt giá trị

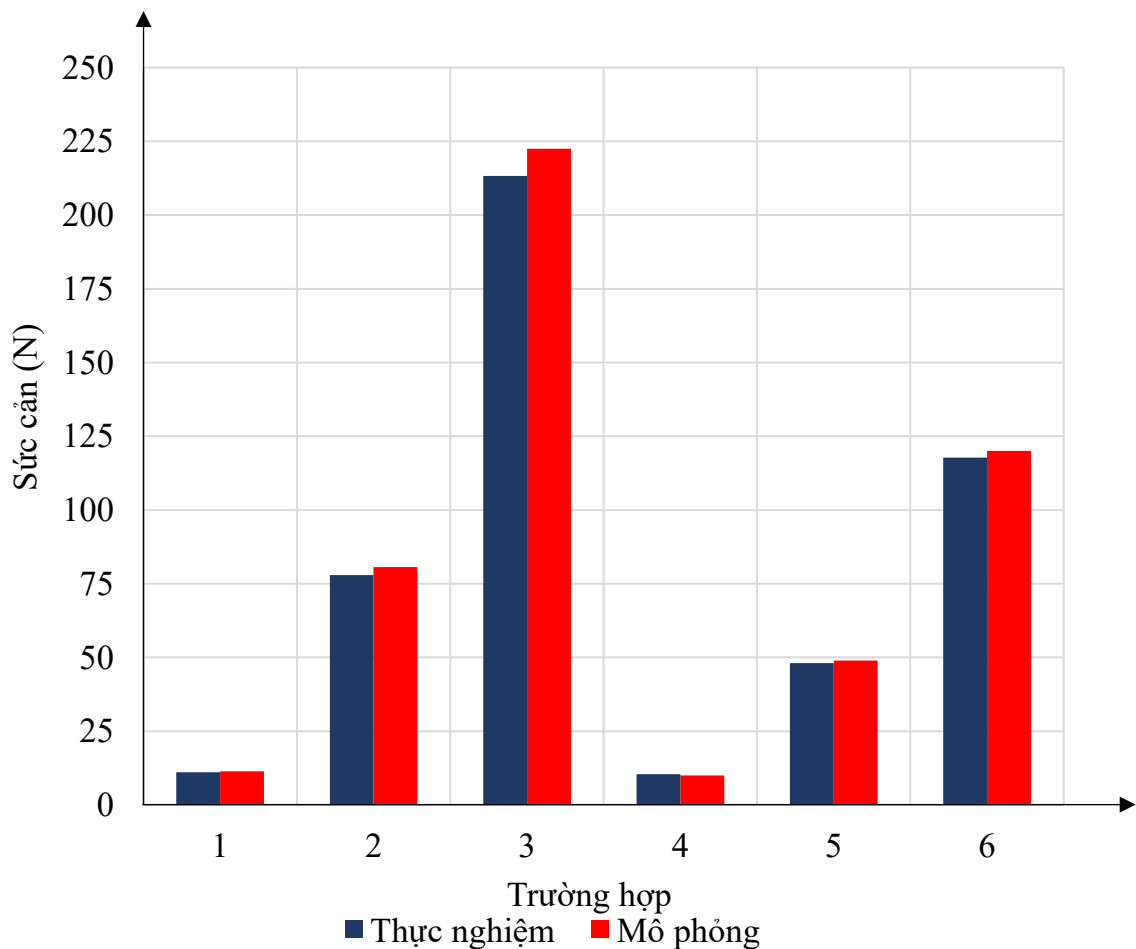
- Tại mục Run Calculation tiến hành chạy mô phỏng.

#### 4.2.6 Kết quả và bàn luận

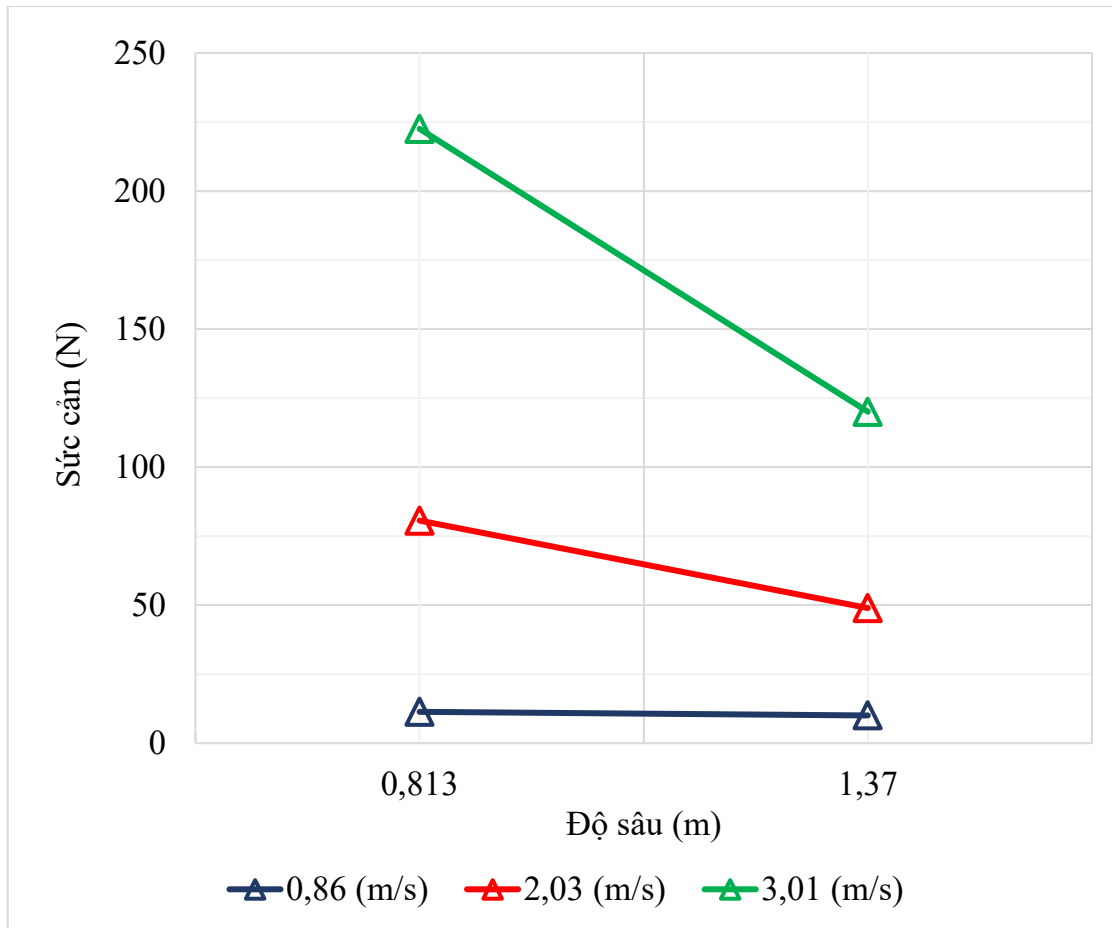
##### ❖ Sức cản

Bảng 4.11 So sánh kết quả sức cản dựa trên thực nghiệm và mô phỏng

Trường hợp	Độ sâu (m)	Vận tốc (m/s)	Thực nghiệm (N)	Mô phỏng CFD (N)	Sai lệch (%)
1	0,813	0,86	11,07	11,36	2,57
2		2,03	77,97	80,63	3,30
3		3,01	213,26	222,52	4,16
4	1,37	0,86	10,44	10,05	3,84
5		2,03	48,11	48,95	1,72
6		3,01	117,81	120,06	1,87



Hình 4.55 So sánh kết quả mô phỏng CFD với thực nghiệm



Hình 4.56 Biểu đồ so sánh sự thay đổi sức cản khi thay đổi độ sâu

Kết quả cho thấy, khi tàu ở gần mặt thoáng thì sức cản trên tàu có xu hướng tăng khi càng gần mặt thoáng ở cùng 1 vận tốc. Sự gia tăng sức cản của mô hình tàu ngầm Darpa Suboff khi giảm tiếp cận gần bề mặt tự do nguyên nhân là:

- Sự gia tăng vận tốc dòng chảy giữa bề mặt tự do và vùng đuôi tàu, khi tàu càng gần mặt thoáng, nhận thấy có sự co thắt dòng chảy phía đuôi tàu, sinh ra hiệu ứng Venturi làm tăng vận tốc dòng chảy giữa mặt thoáng và đuôi tàu gây nên sóng  
→Khoảng cách này càng nhỏ và vận tốc tàu càng nhanh sinh ra sức cản tạo sóng lớn ảnh hưởng đến sức cản toàn bộ tàu.
- Khi tăng chiều chìm của tàu ngầm thì sóng sinh ra có xu hướng giảm rõ rệt chứng minh ở  $V_m=3,05$  m/s ở trường hợp ở Mục 4.1 với sức cản  $R_T= 106,40$  N so với  $V_m=3,01$  m/s ở trường hợp 6 ở Mục 4.2 là 102,06 N.

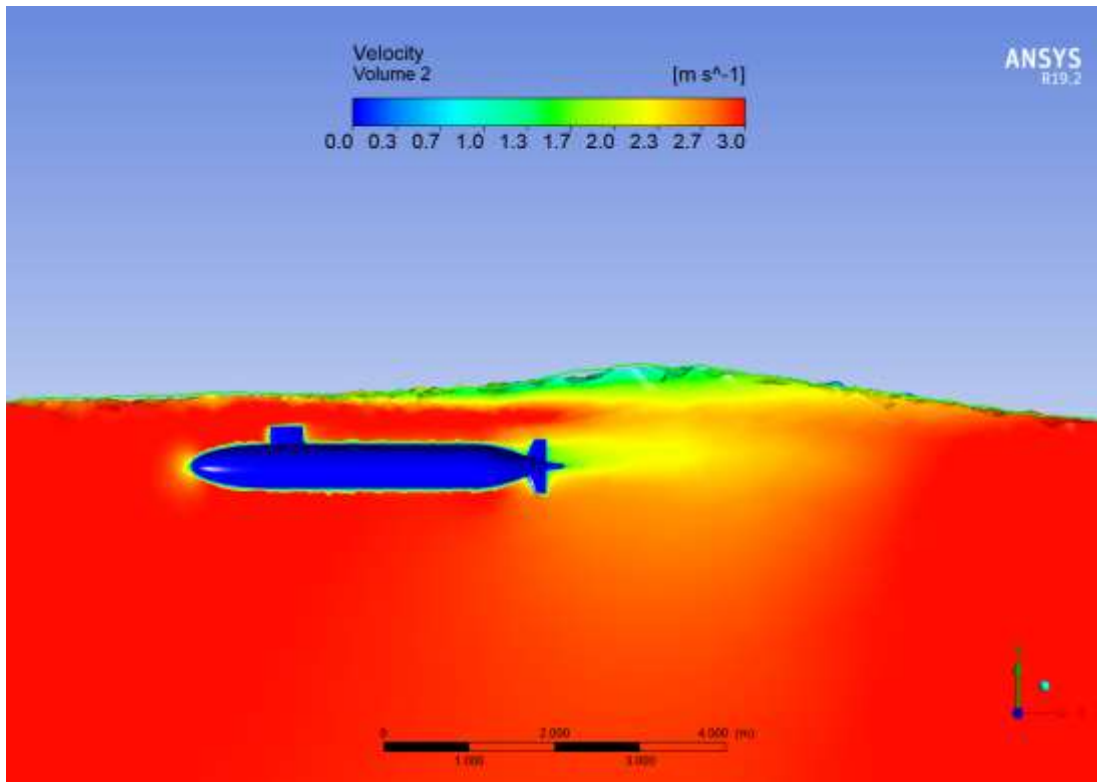
Ngoài ra, sóng trên bề mặt nước biển gây ra như Bảng 4.10 dưới đây, tàu ngầm khi ở cùng 1 độ sâu thay đổi vận tốc sức cản tăng lên nhanh đáng kể khi so sánh trường hợp 1-2-3 và 4-5-6; khi ở cùng 1 vận tốc và giảm độ sâu sức cản tàu ngầm tăng lên nhanh chóng điển hình là trường hợp 1-4, 2-5, 3-6. Khi giảm độ sâu tàu ngầm, sóng sinh ra trên bề mặt có bước sóng tăng dần khi tăng vận tốc, và chiều cao sóng cũng tăng, sự gia tăng sức cản khi tàu càng gần mặt thoáng là do sự gia tăng vận tốc cục bộ giữa mặt thoáng và vùng đuôi tàu. Khi tàu tăng chiều chìm, sức cản của tàu giảm dần và ảnh hưởng của mặt thoáng cũng giảm, điển hình là sóng trên mặt thoáng có chiều cao giảm dần.

**Bảng 4.12 Chiều cao sóng trên bề mặt và bước sóng trên mặt thoáng**

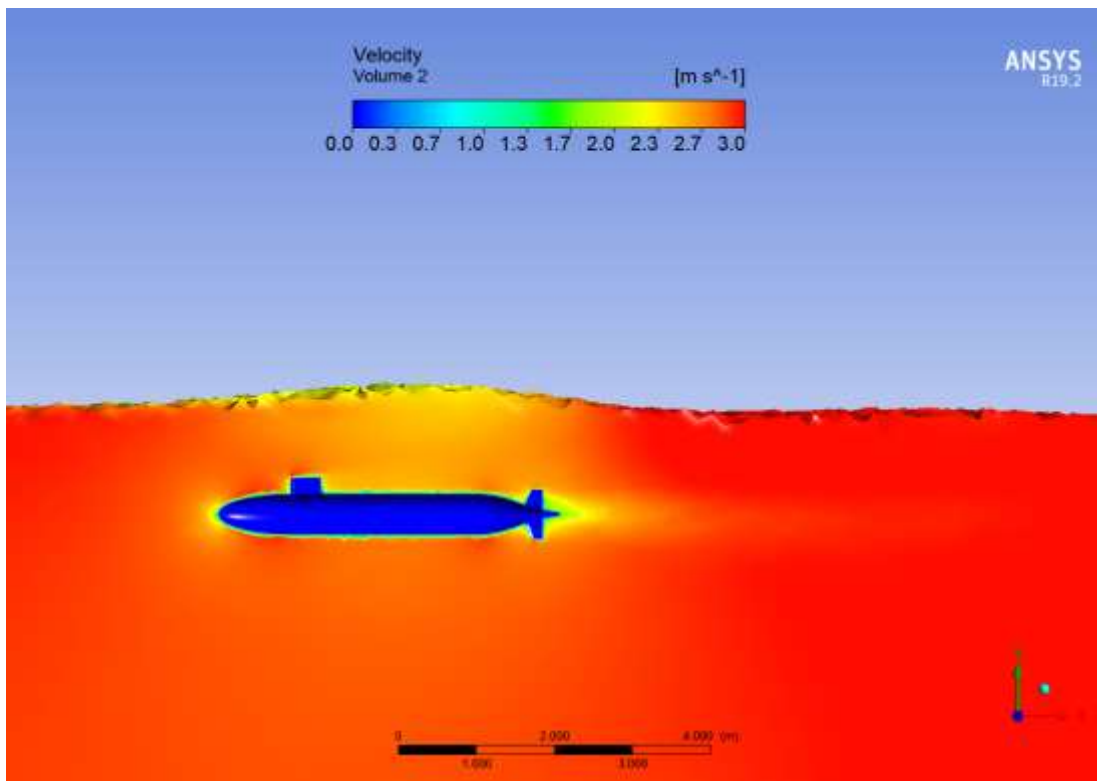
Trường hợp	Bước sóng (m)	Chiều cao sóng lớn nhất (m)
1	2,8	0,55
2	5,9	0,79
3	7,8	2,02
4	2,9	0,39
5	5,6	0,61
6	8,2	1,50

Qua các đồ thị sóng cho thấy, sóng sinh ra do tàu chạy gần mặt thoáng khá đáng kể như ở các hình, sóng có chiều cao sóng từ 0,39 m đến 2,02 m so với chiều dài tàu là 4,56 m. Ở cùng 1 độ sâu tăng vận tốc thì bước sóng tăng, chiều cao sóng tăng do ảnh hưởng của hình dáng tàu ngầm hướng dòng chảy xuôi theo biên dạng trong đó đối với miền chất lỏng phía trên tàu ngầm là gần mặt thoáng kết hợp với đài quan sát và vây đuôi tạo lên áp lực lớn sinh ra sóng. Sóng sinh ra là dạng hình sin, chiều cao sóng giảm nên đường biểu diễn sóng gần như theo dạng dao động tắt dần, càng xa tàu nên càng xa tàu sóng có xu hướng yếu dần. Với tính chất này thông thường khi nổi lên mặt nước hoặc cần di chuyển gần mặt nước thì tàu ngầm hay có xu hướng di chuyển chậm, đối với tàu ngầm quân sự, sự yên tĩnh khi tàu ngầm hoạt động rất cần thiết, sóng sinh ra có thể ảnh hưởng đến hoạt động bí mật của tàu.

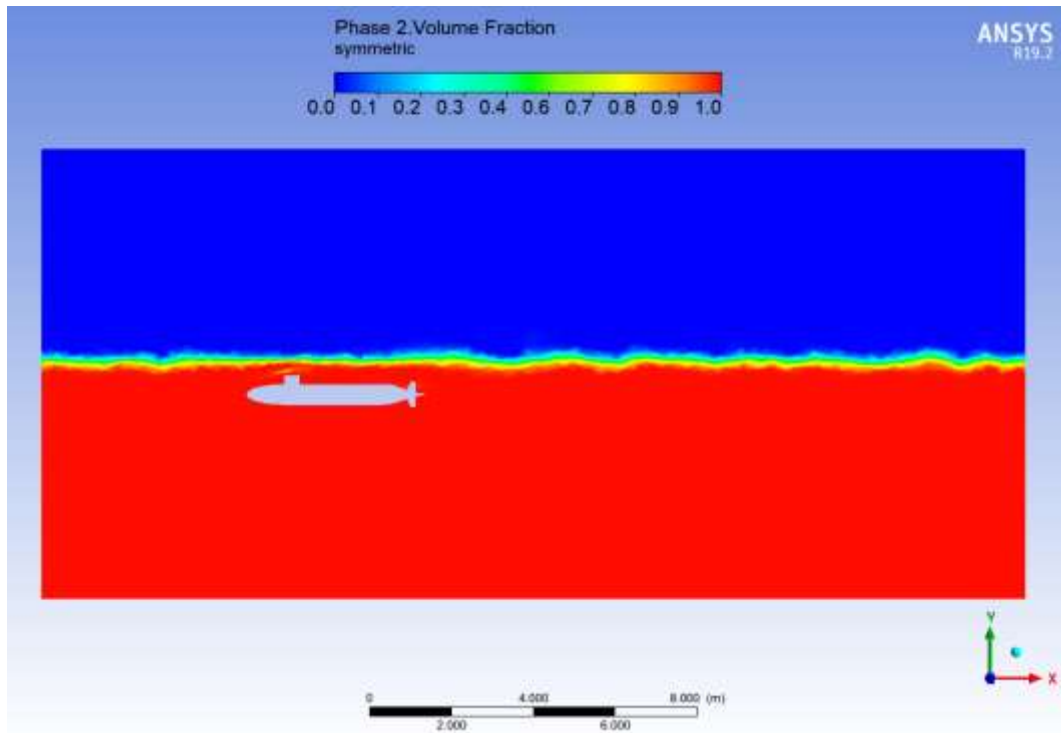
❖ **Phân bố vận tốc gần mặt thoáng**



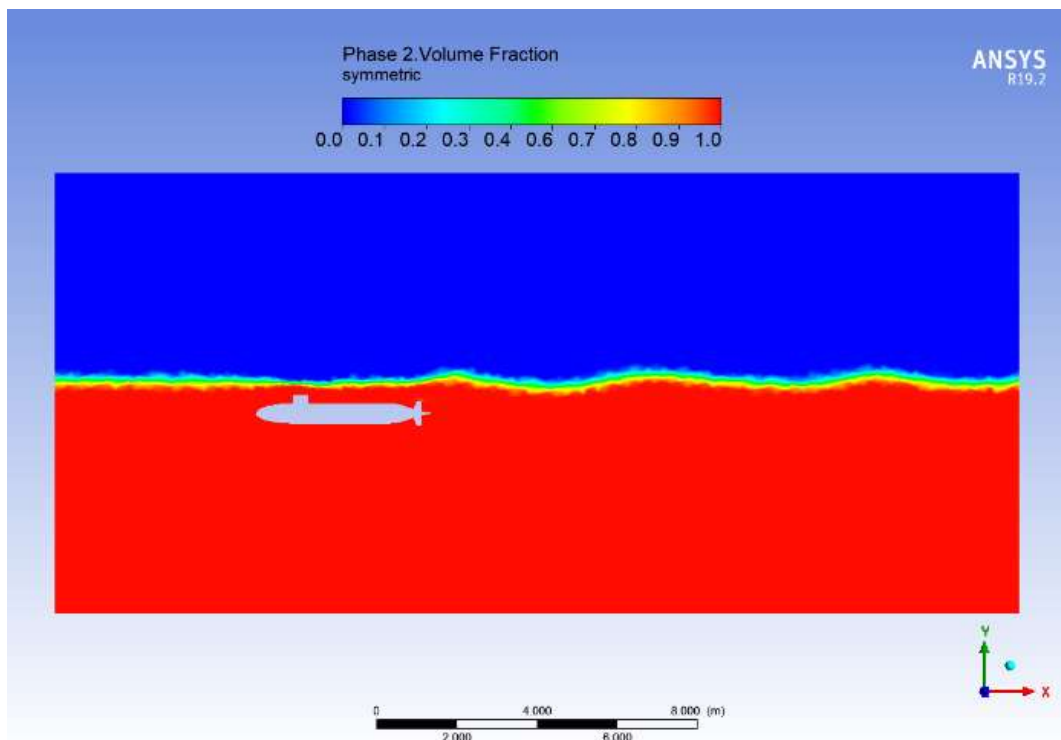
Hình 4.57 Phân bố vận tốc tại Trường hợp 3



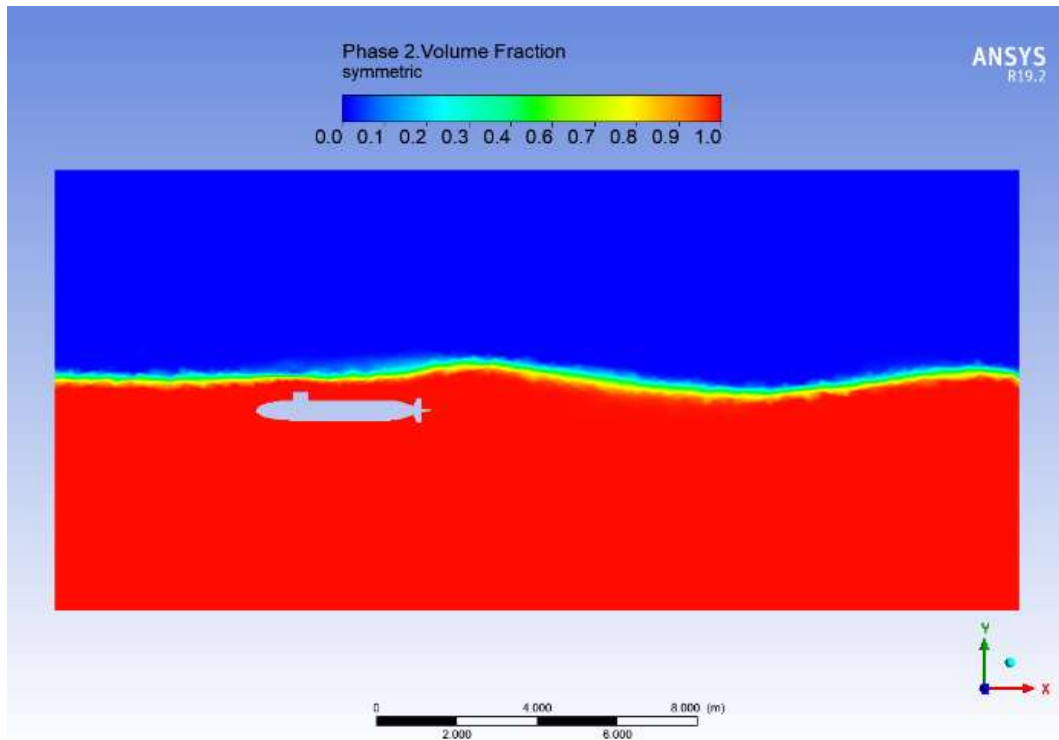
Hình 4.58 Phân bố vận tốc tại Trường hợp 6



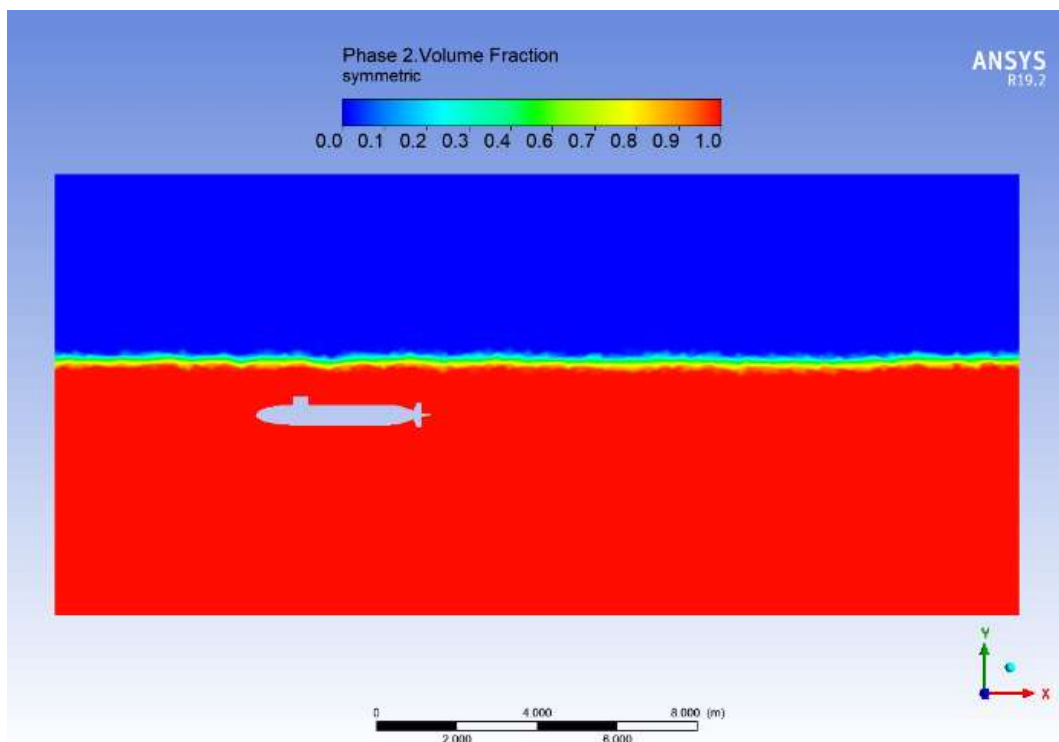
Hình 4.59 Sóng trên mặt thoáng do tàu ngầm gây ra Trường hợp 1



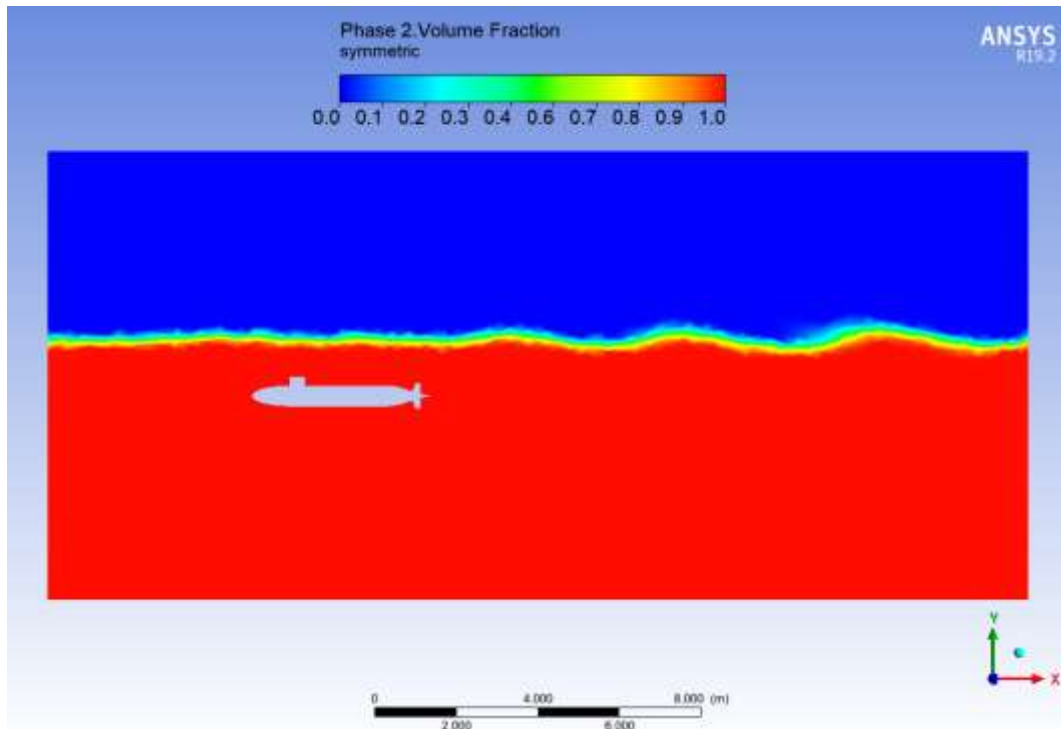
Hình 4.60 Sóng trên mặt thoáng do tàu ngầm gây ra Trường hợp 2



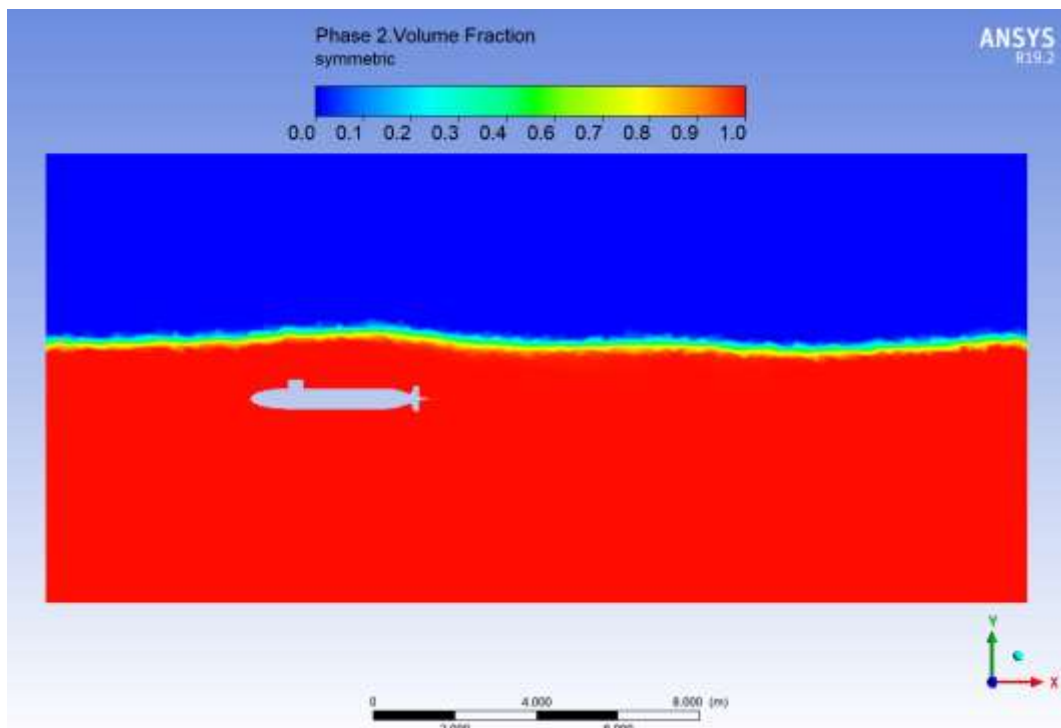
Hình 4.61 Sóng trên mặt thoáng do tàu ngầm gây ra Trường hợp 3



Hình 4.62 Sóng trên mặt thoáng do tàu ngầm gây ra Trường hợp 4

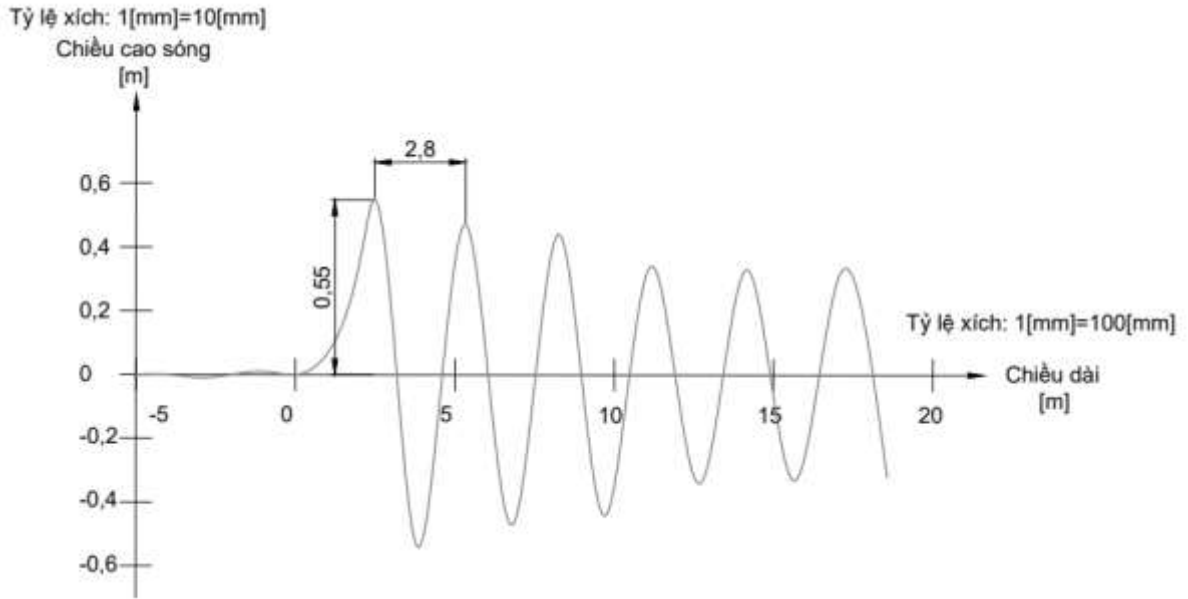


Hình 4.63 Sóng trên mặt thoáng do tàu ngầm gây ra Trường hợp 5

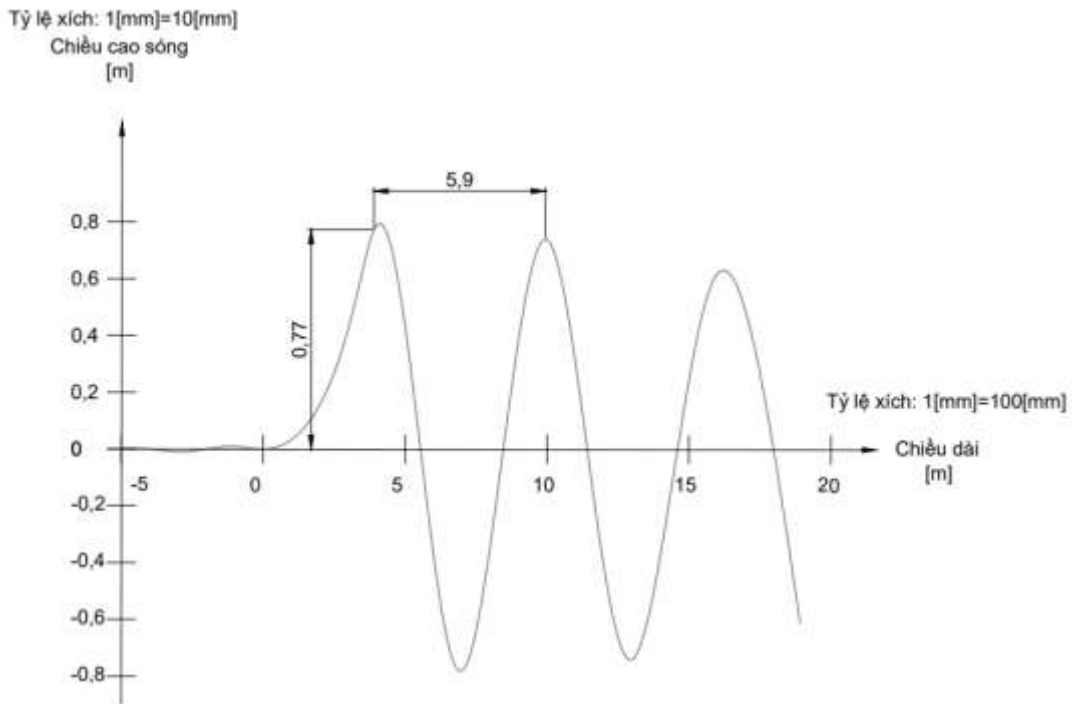


Hình 4.64 Sóng trên mặt thoáng do tàu ngầm gây ra Trường hợp 6

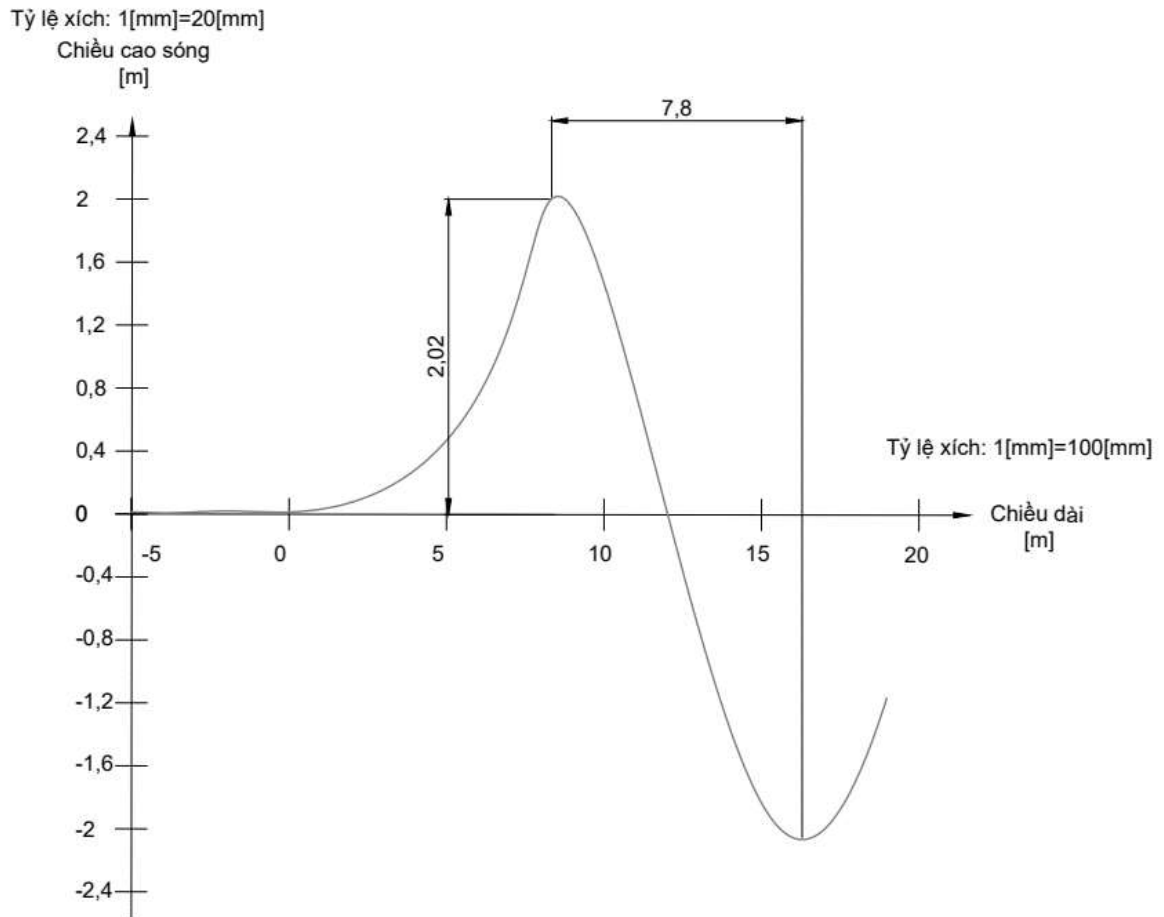
❖ **Sóng trên mặt thoáng do tàu ngầm gây ra**



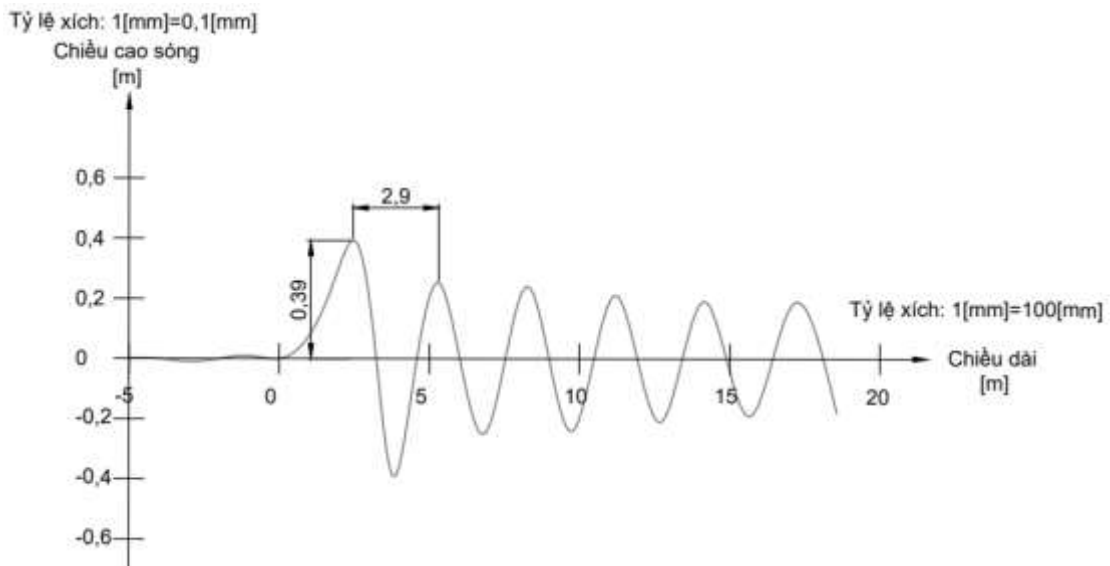
Hình 4.65 Đồ thị chiều cao sóng bề mặt Trường hợp 1



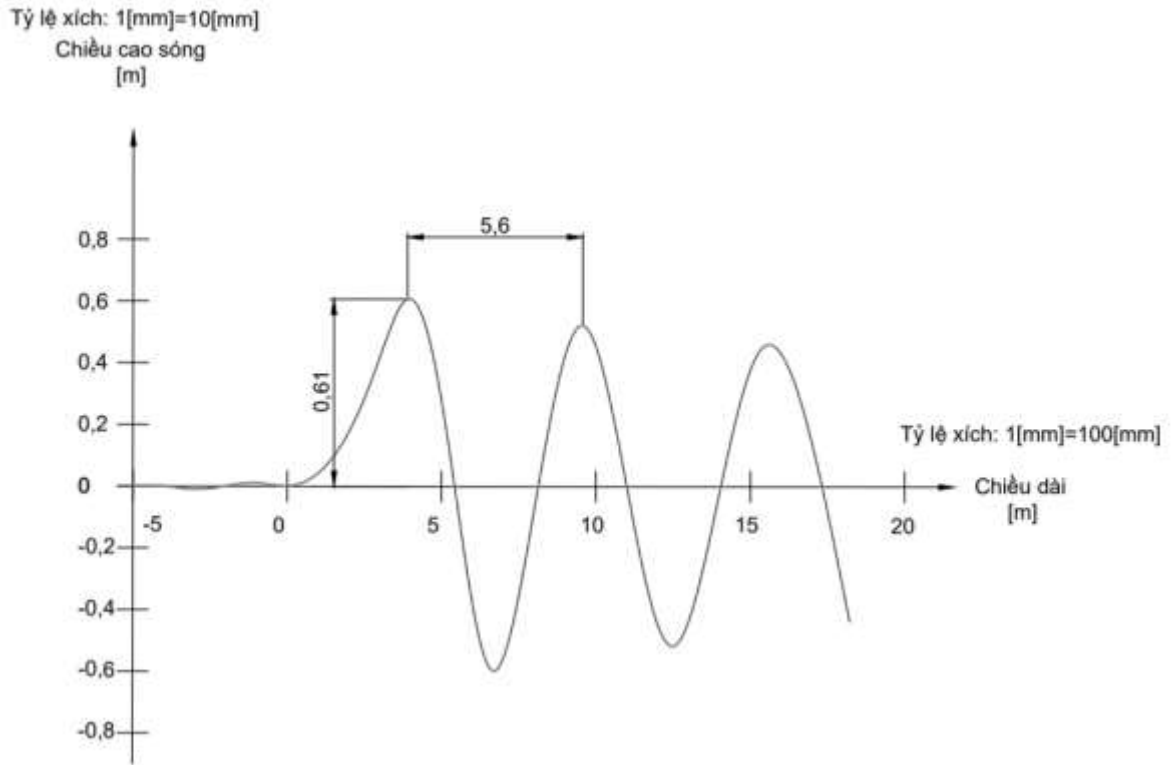
Hình 4.66 Đồ thị chiều cao sóng bề mặt Trường hợp 2



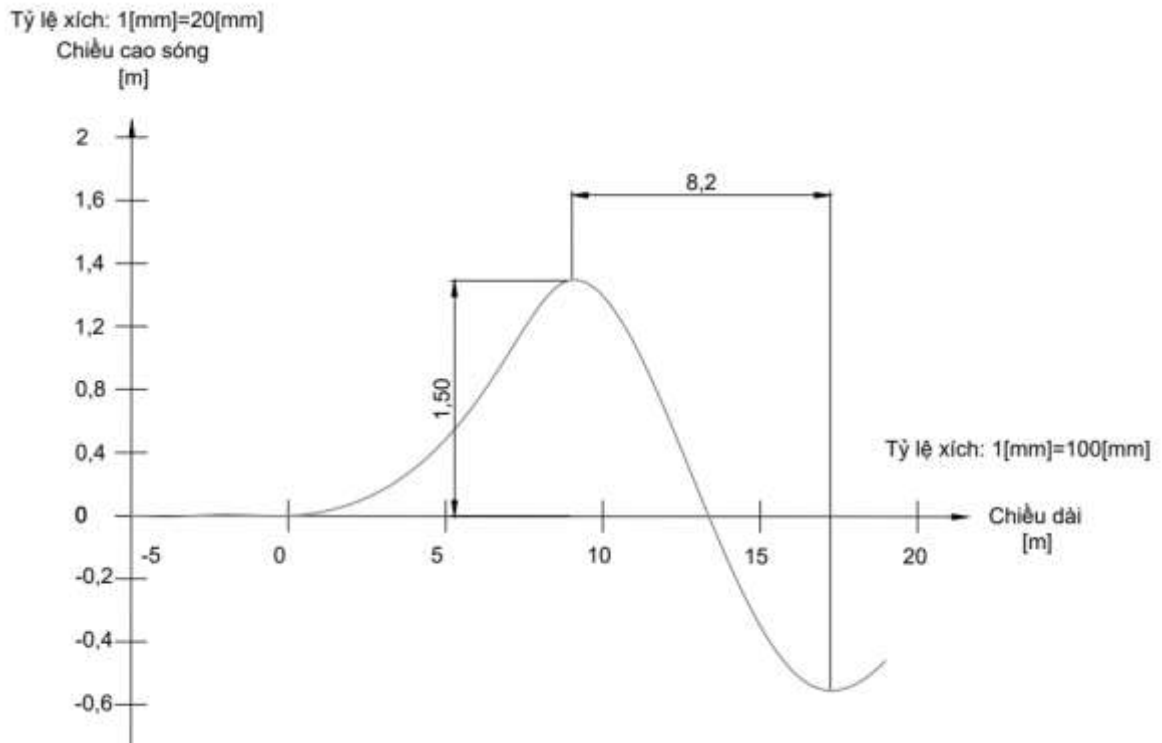
Hình 4.67 Đồ thị chiều cao sóng bề mặt Trường hợp 3



Hình 4.68 Đồ thị chiều cao sóng bề mặt Trường hợp 4



Hình 4.69 Đồ thị chiều cao sóng bề mặt Trường hợp 5



Hình 4.70 Đồ thị chiều cao sóng bề mặt Trường hợp 6

## **CHƯƠNG 5. TÍNH TOÁN THỦY ĐỘNG LỰC HỌC TÁC DỤNG LÊN TÀU NGẦM KHI ĐIỀU ĐỘNG**

### **5.1 Tính toán thủy động lực học tác dụng lên tàu ngầm ở các góc dạt khác nhau**

#### **5.1.1 Các thông số đầu vào**

Các thông số đầu vào được lấy dựa trên dữ liệu của các nhà khoa học, các bài báo đã thử nghiệm mô hình trong các bể thử thực tế [6] như: Các góc dạt, vận tốc mô hình. Mô hình được sử dụng trong mô phỏng là mô hình chất lỏng thực RANS với dòng chảy đều và mô hình rối  $k-\omega$  (SST). Mô hình này là mô hình giải hai phương trình dựa trên khái niệm độ nhớt rối [7]. Trong đó, một phương trình mô tả động năng rối và phương trình còn lại thể hiện tốc độ tiêu tán rối.

Bảng 5.1 Các thông số đầu vào

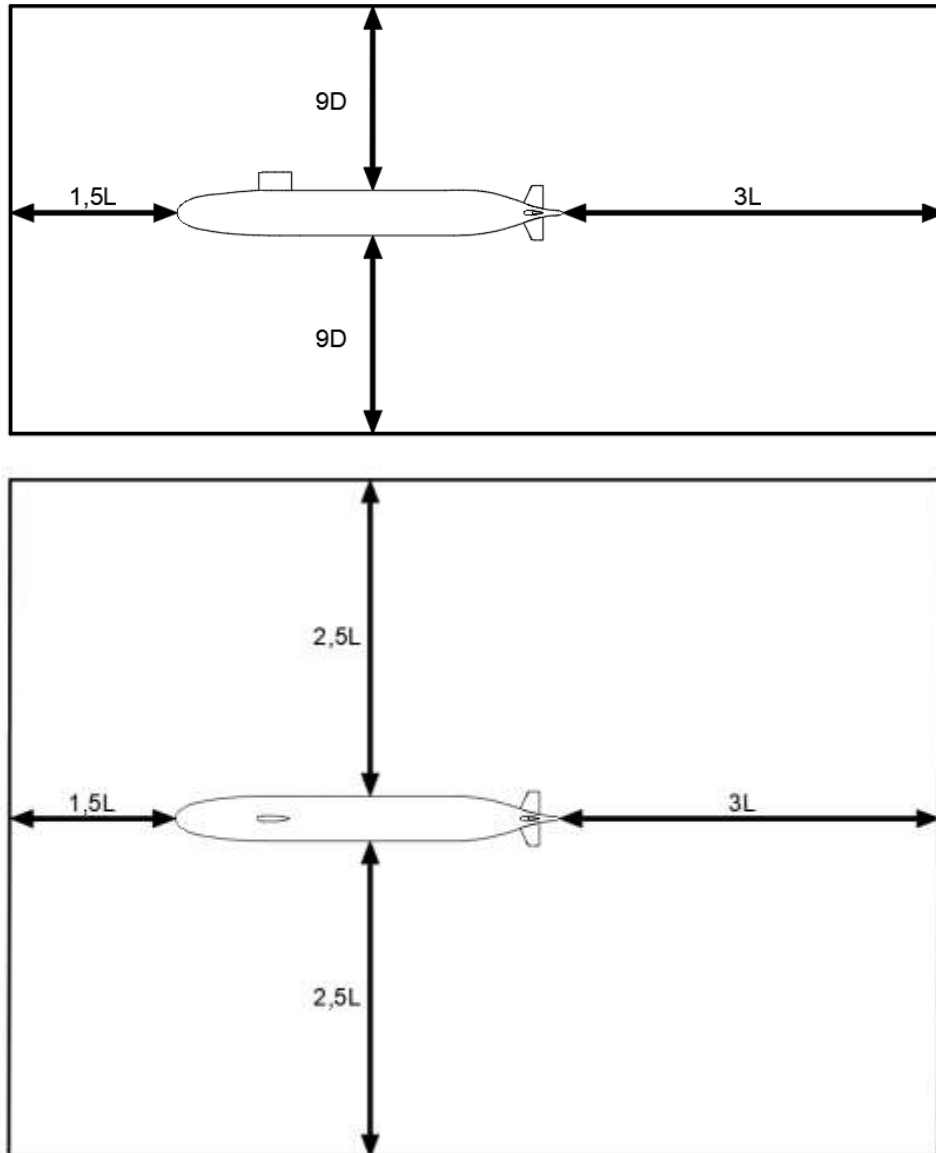
Thông số	Kí hiệu	Giá trị	Đơn vị
Vận tốc mô hình	V	3,3436	m/s
Góc dạt	$\beta$	0; 2; 4; 6; 8; 10	Độ
Độ nhớt động học	$\nu$	$1,003 \cdot 10^{-6}$	$m^2/s$
Khối lượng riêng của nước ngọt	$\rho$	998,2	$kg/m^3$

#### **5.1.2 Các điều kiện tính toán**

##### **5.1.2.1 Miền tính toán và điều kiện biên**

Miền tính toán là một khối hình hộp chữ nhật có các kích thước như sau:

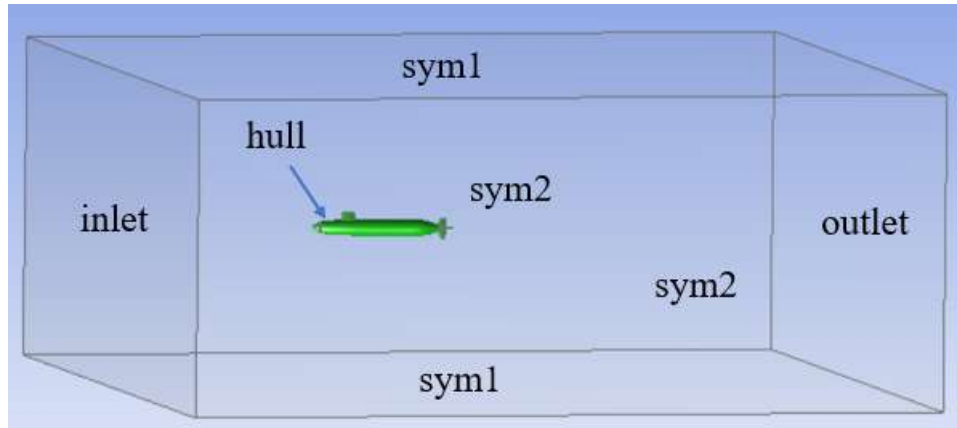
- Khoảng cách từ tàu ngầm đến các vị trí của miền tính toán như sau:
- Khoảng cách từ mũi tàu đến inlet: 1,5L
- Khoảng cách từ đuôi tàu đến outlet: 3L
- Khoảng cách từ tàu đến phía trên và phía dưới của bể thử ảo: 9D
- Chiều rộng của bể thử ảo tính từ bề mặt tàu: 2,5L



Hình 5.1 Kích thước miền tính toán

❖ **Điều kiện biên:**

- Inlet: Vận tốc vào lấy bằng vận tốc của tàu mô hình là  $V = 3,3436 \text{ m/s}$
- Outlet: Áp suất đầu ra ( $P = 0 \text{ Pa}$ )
- Hull: Thân tàu ngầm (no slip - wall)
- Hệ số nhớt động học của nước ngọt ở  $20^\circ\text{C}$ :  $\mu = 0,001003 \text{ m}^2/\text{s}$



Hình 5.2 Điều kiện biên miền tính toán

### 5.1.2.2 Lưới và tiêu chuẩn đánh giá chất lượng lưới

Lưới là một phần rất quan trọng của quá trình mô phỏng, nó ảnh hưởng đến sự hội tụ, độ chính xác của kết quả và tốc độ tính toán. Việc sử dụng lưới trong mô phỏng là để chia nhỏ các miền tính toán.

#### ❖ Các dạng lưới gồm:

- Lưới 2D: Triangle (tam giác), Quadrilateral (tứ giác), Polygonal (đa giác)
- Lưới 3D: Tetrahedral (Tứ diện), Hexa (hình hộp 6 mặt), nhiều mặt (Poly)

#### ❖ Tiêu chuẩn đánh giá chất lượng lưới:

Bảng 5.2 Tiêu chuẩn đánh giá chất lượng lưới Orthogonal

Orthogonal					
Excellent	Very good	Good	Acceptable	Bad	Unacceptable
0,95 – 1	0,7 – 0,95	0,2 – 0,69	0,15 – 0,2	0,001 – 0,14	0 – 0,001

Tiêu chuẩn Orthogonal là để đánh giá chất lượng trực giao xung quanh bề mặt tàu ngầm, nó giúp xử lý tốt các lớp biên gần tường và giảm bớt khối lượng tính toán (nên để giá trị Min của nó nhỏ hơn 0,1 để đảm bảo chất lượng lưới).

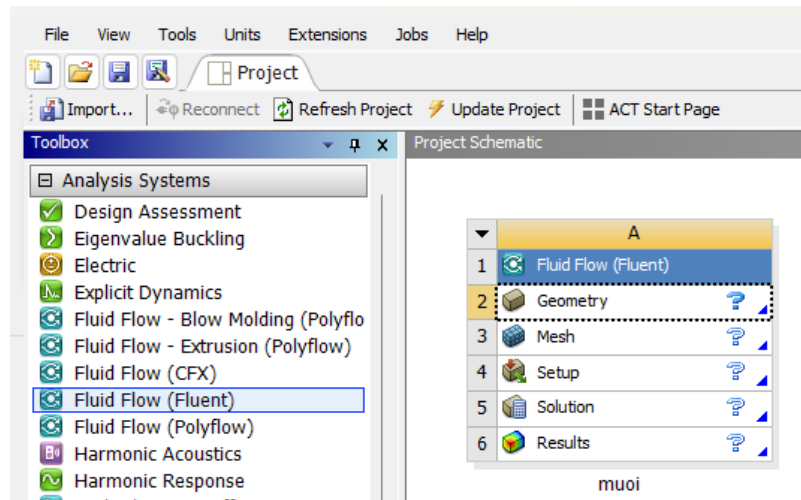
### 5.1.3 Quy trình tính toán mô phỏng bằng phần mềm Ansys – modul Fluid Flow (Fluent)

#### 5.1.3.1 Thiết lập mô hình tính toán

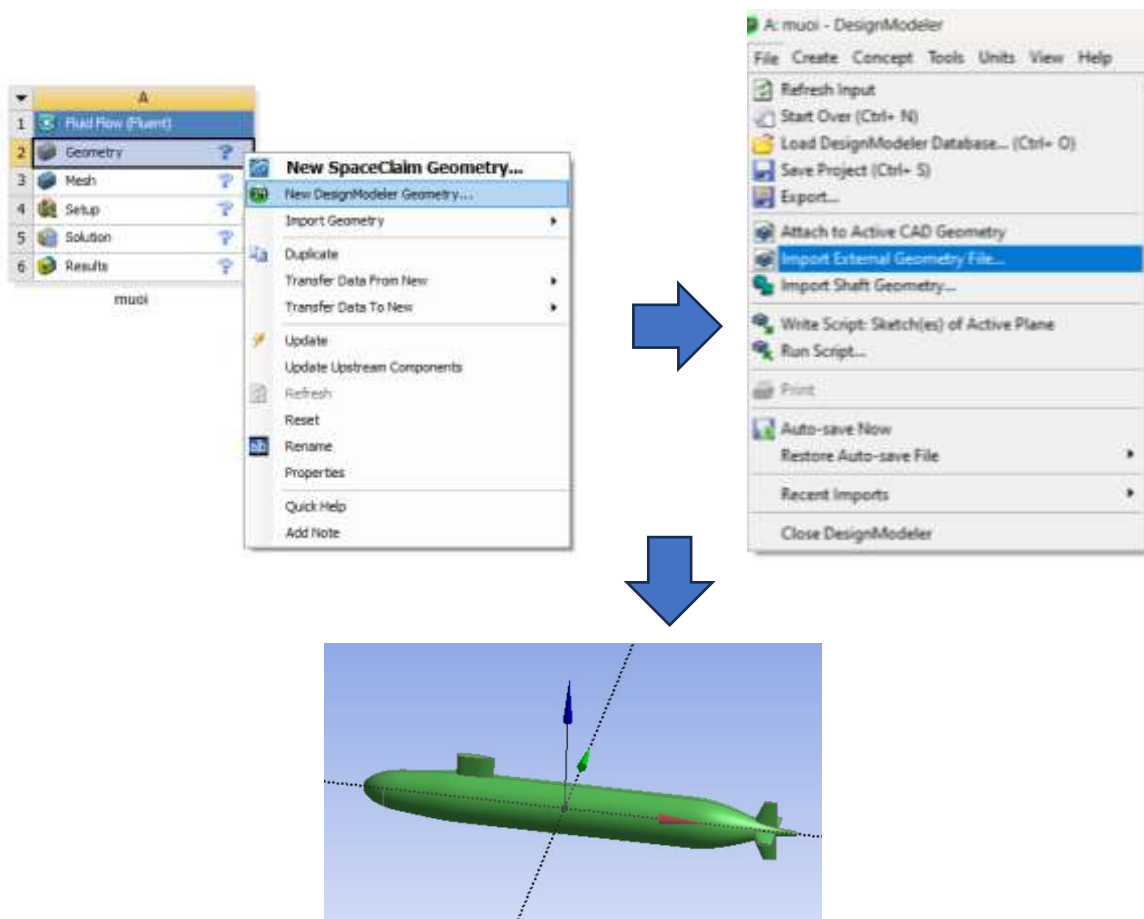
Mô hình 3D tàu ngầm được xây dựng bằng phần mềm Autocad sau đó được đưa vào phần mềm Ansys – modul Fluid Flow Fluent để mô phỏng như sau:

- Bước 1: Khởi động Ansys workbench 19.2 và chọn Modul Fluid Flow (Fluent)

- Bước 2: Kích chuột vào Geometry và chọn New Design Modeller Geometry
- Bước 3: Kích vào file và chọn Import External Geometry File để đưa mô hình 3D tàu ngầm vào phần mềm



Hình 5.3 Khởi động Ansys – module Fluid Flow (Fluent)

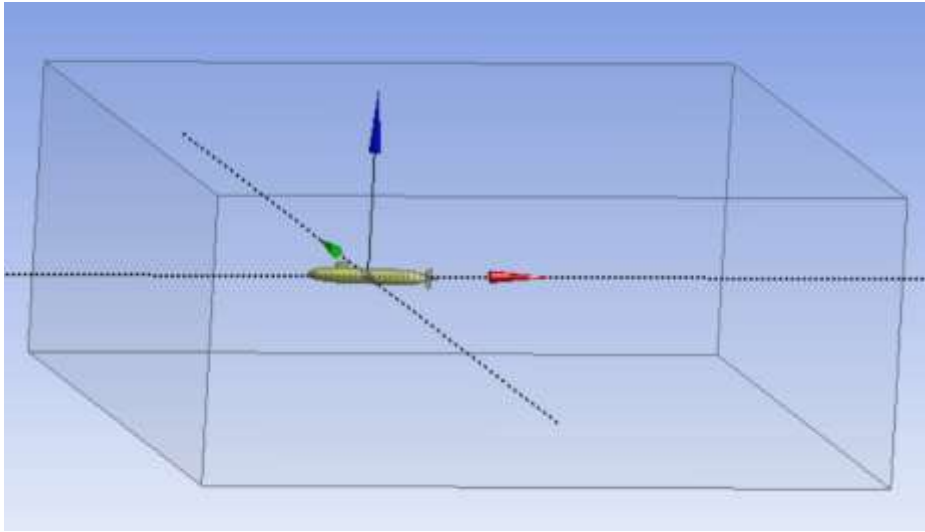


Hình 5.4 Các bước thiết lập mô hình tàu ngầm

- Bước 4: Thiết lập miền tính toán

Kích thước miền tính toán được dựa trên hiệp hội bể thử quốc tế ITTC – 2008.

Kích thước của bể thử ảo là:  $L \times B \times H = 23,950 \times 5,508 \times 18,508$  (m)

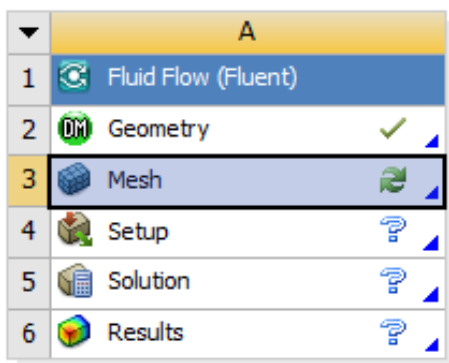


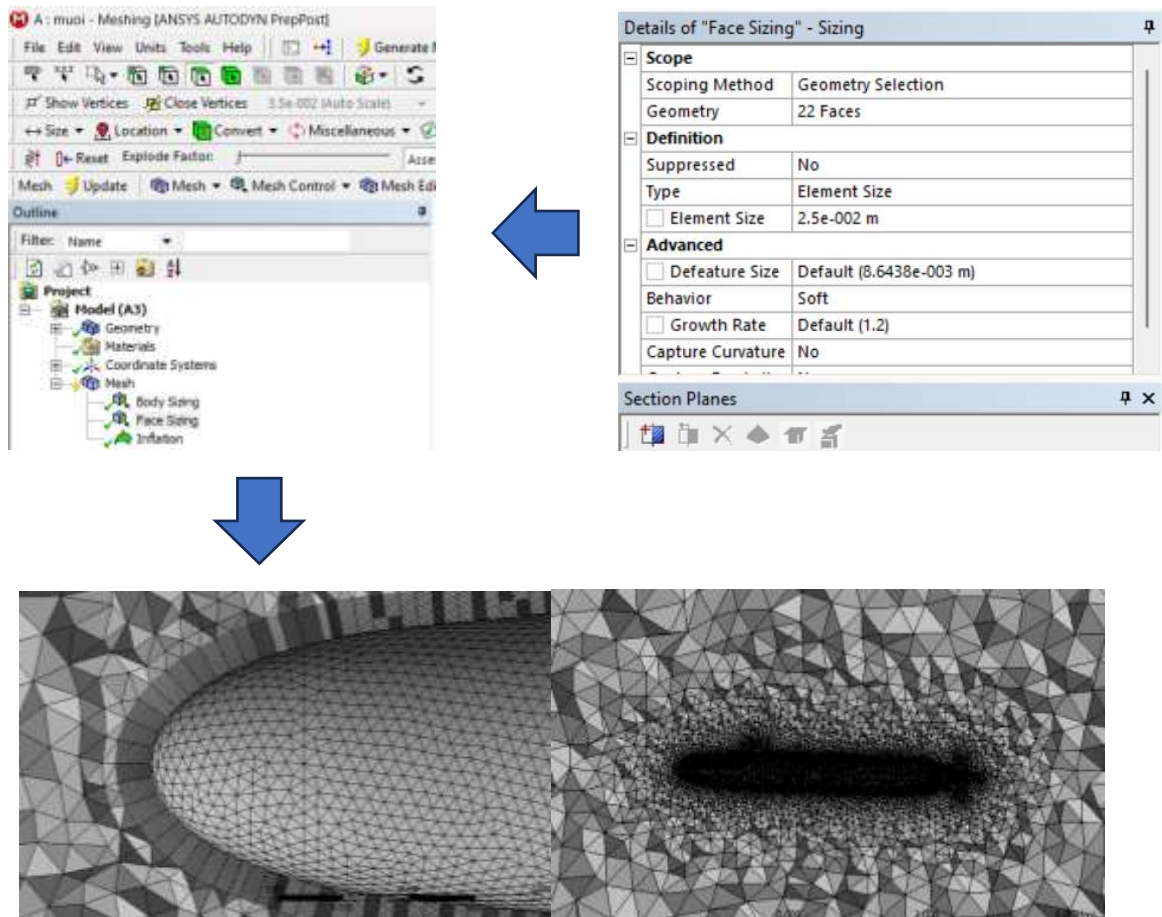
Hình 5.5 Miền tính toán

### 5.1.3.2 Chia lưới (mesh)

Chất lượng lưới ảnh hưởng đến độ chính xác, khả năng hội tụ và tốc độ tính toán do đó chúng ta phải chia lưới thật chính xác và kiểm tra theo các tiêu chuẩn đánh giá của lưới. Quy trình chia lưới như sau:

- Bước 1: Kích đúp vào Mesh để tiến hành chia lưới
- Bước 2: Tiến hành chia lưới cho các khối (body sizing) và các mặt (face sizing) và lớp biên gần tường (inflation)
- Bước 3: Chọn Generate mesh để tạo lưới





Hình 5.6 Các bước chia lưới tính toán

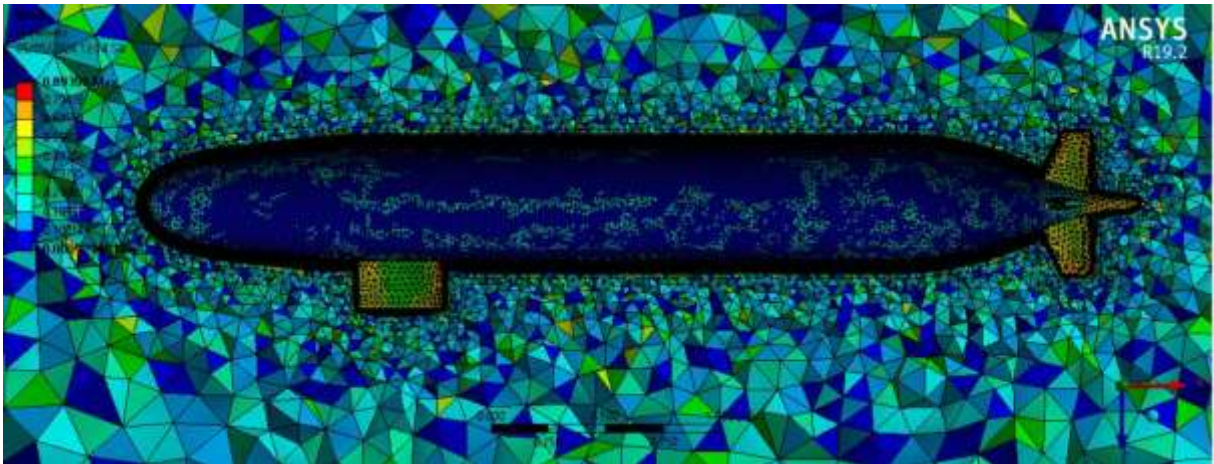
- Bước 4: Kiểm tra chất lượng lưới
  - + Max Skewness: 0,894
  - + Min Skewness: 0,001

Bảng 5.3 Bảng so sánh giữa lưới tính toán và tiêu chuẩn Skewness

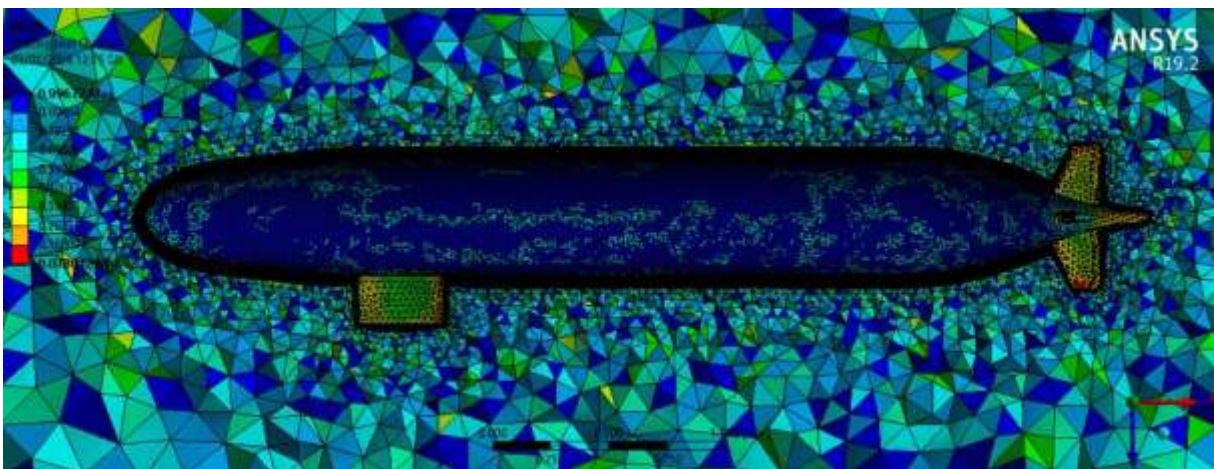
Skewness			
	CFD	Tiêu chuẩn (Acceptable)	Tiêu chuẩn (Excellent)
Min	0,001	0,8	0
Max	0,894	0,94	0,25

→ Chất lượng lưới nằm trong khoảng chấp nhận được

Số lượng phần tử lưới hơn 1,4 triệu phần tử và hơn 250 nghìn giao điểm



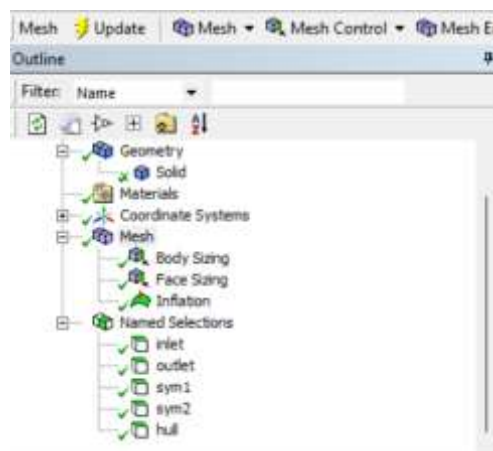
Hình 5.7 Kích thước lưới Skewness



Hình 5.8 Kích thước lưới Orthogonal

Bước 5: Thiết lập biên và tường của miền tính toán

Tiến hành đặt tên cho các biên và tường gồm: Inlet, outlet, sym1, sym2, hull sau đó bấm Update

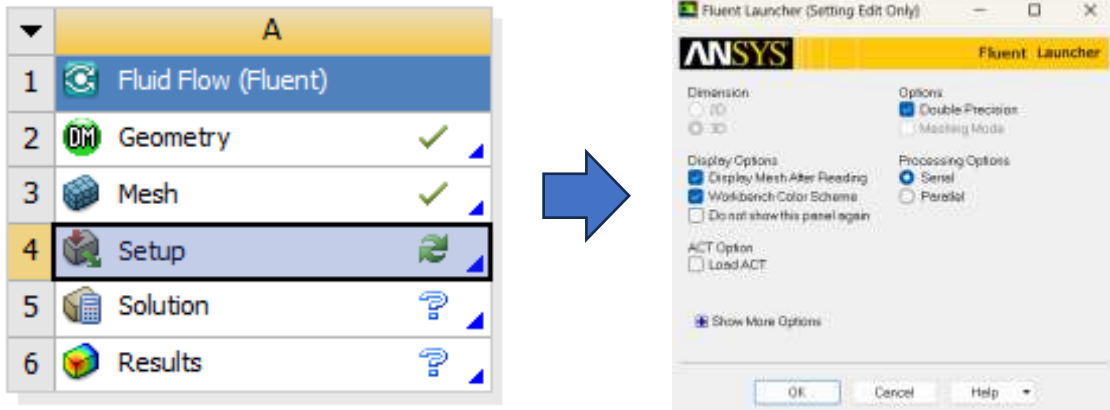


Hình 5.9 Tên của các biên và tường

### 5.1.3.3 Thiết lập tính toán trong Fluent

**Bước 1:** Kích đúp chuột vào Setup và giao diện Fluent Launcher xuất hiện

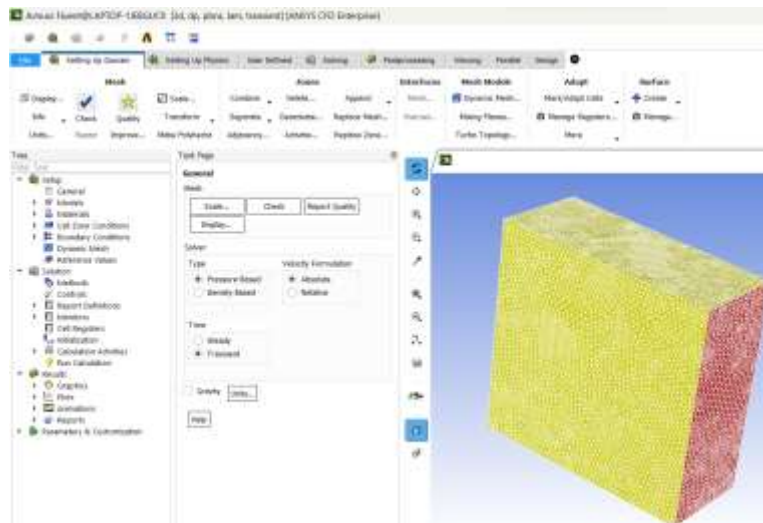
**Bước 2:** Chọn Double Precision và bấm OK

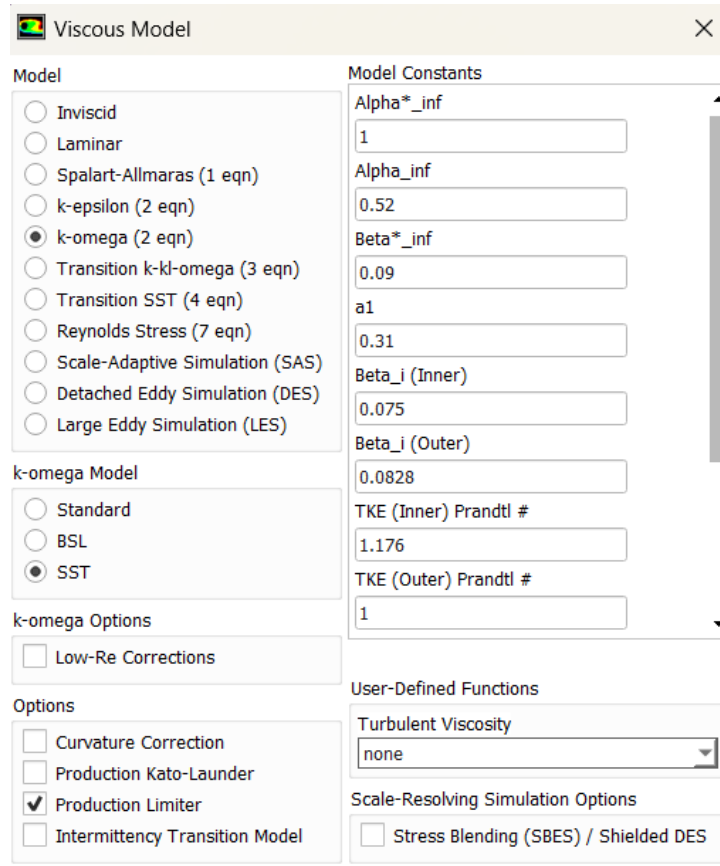


Hình 5.10 Giao diện Fluent Launcher

**Bước 3:** Tiến hành thiết lập các thông số để tính toán mô phỏng

- Lựa chọn mô hình tính toán: Model → Viscous → Edit → xuất hiện hộp thoại Viscous Model → k-omega (2eqn) → SST → bấm OK để hoàn thành
- Chọn môi trường để tính toán: Chọn Materials → Fluid → Create/Edit → Xuất hiện hộp thoại Fluent Database Materials → chọn Fluent Fluid Materials → Water-liquid (h2o <1>) → Copy để thêm môi trường nước sau đó bấm Close tất cả để hoàn thành

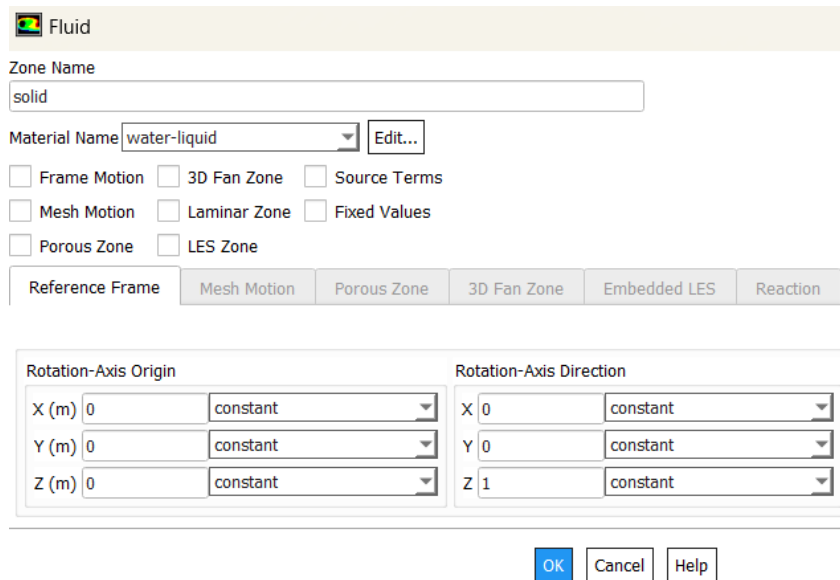




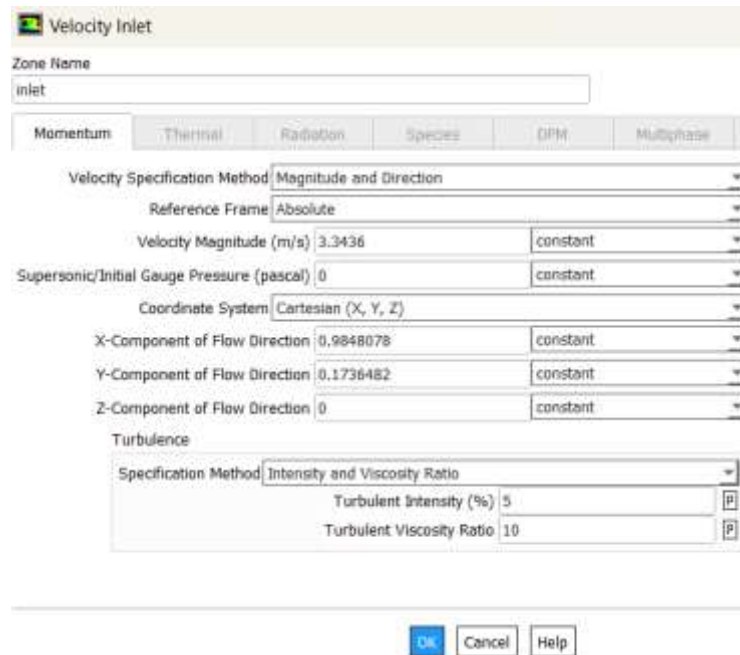
Hình 5.11 Lựa chọn mô hình và môi trường tính toán

- Sau khi chọn môi trường tính toán ở phần Materials, ta bấm vào Cell Zone Conditions để thay thế các môi trường cũ bằng Water-liquid (h<sub>2</sub>O <1>)
- ❖ **Thiết lập các điều kiện biên**
  - **Thiết lập điều kiện biên cho dòng vào:**
    - + Chọn Boundary Conditions → inlet → Chọn Type (Velocity inlet) → chọn Edit → xuất hiện hộp thoại Velocity inlet
    - + Tại Velocity Magnitude [m/s] ta nhập 3,3436 sau đó bấm Apply và chọn Close để hoàn thành
  - **Thiết lập điều kiện cho dòng ra:**
    - + Chọn Boundary Conditions → outlet → Chọn Type (Pressure outlet) → chọn Edit → xuất hiện hộp thoại Pressure outlet → nhập P = 0 (Pascal) sau đó bấm Apply và chọn Close để đóng hộp thoại
  - **Thiết lập các điều kiện biên còn lại như sau:**
    - + Sym1, Sym2: Symmetry

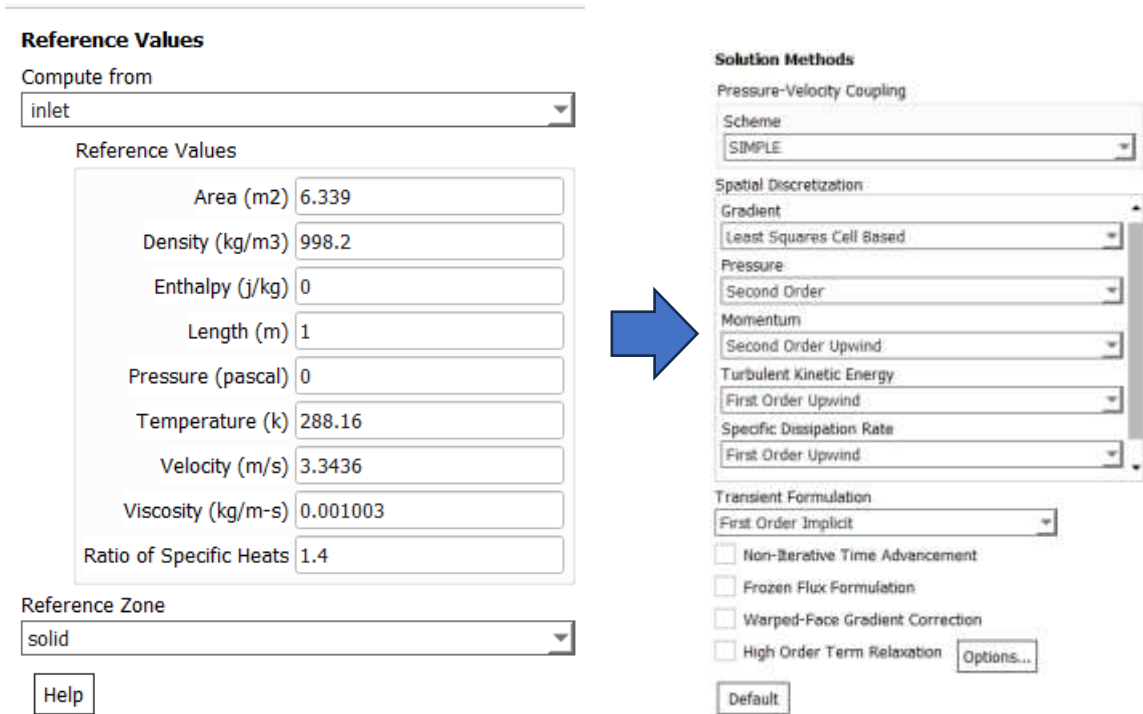
- + Hull: Wall
- + Trong Reference Values ta thiết lập các giá trị như: diện tích (Area), vận tốc (Velocity [m/s]) để tính toán các lực và moment
- + Tiếp theo, ta lựa chọn phương pháp giải → chọn Method và tiến hành thiết lập phương pháp



Hình 5.12 Thiết lập môi trường tính toán Water-liquid



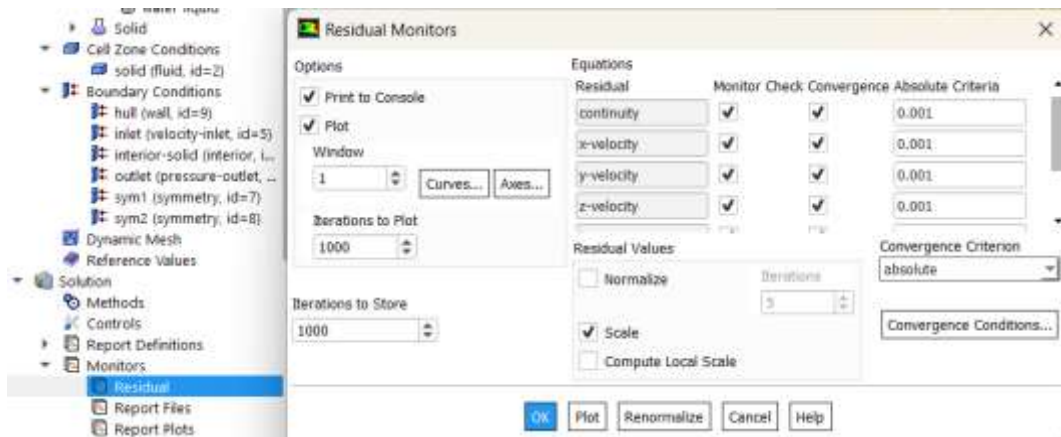
Hình 5.13 Thiết lập các điều kiện biên



Hình 5.14 Thiết lập phương pháp giải

– **Thiết lập điều kiện hội tụ của bài toán:**

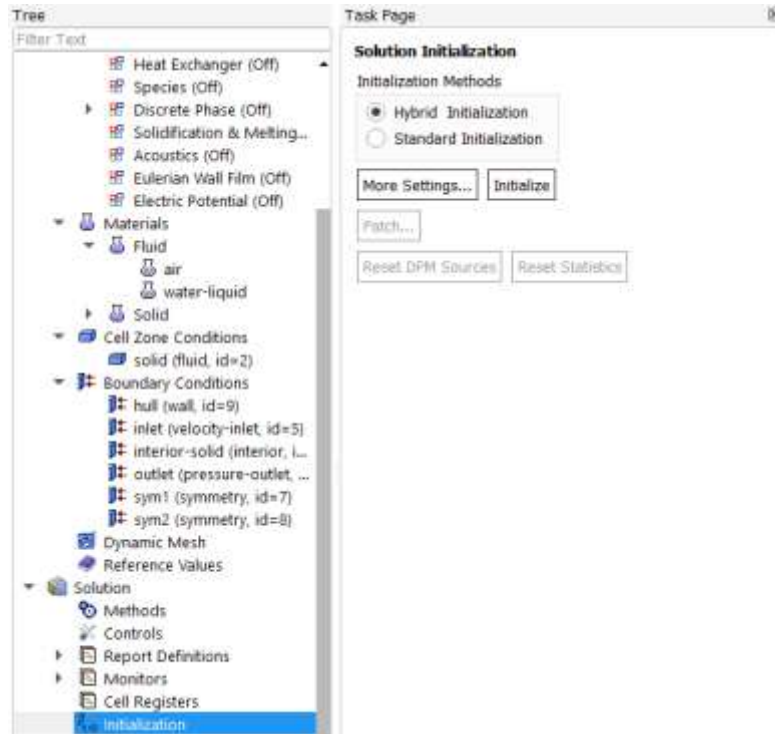
- + Kích đúp vào Monitors → xuất hiện hộp thoại Residual Monitors và chọn các thông số như hình vẽ
- + Sau đó bấm OK để hoàn thành



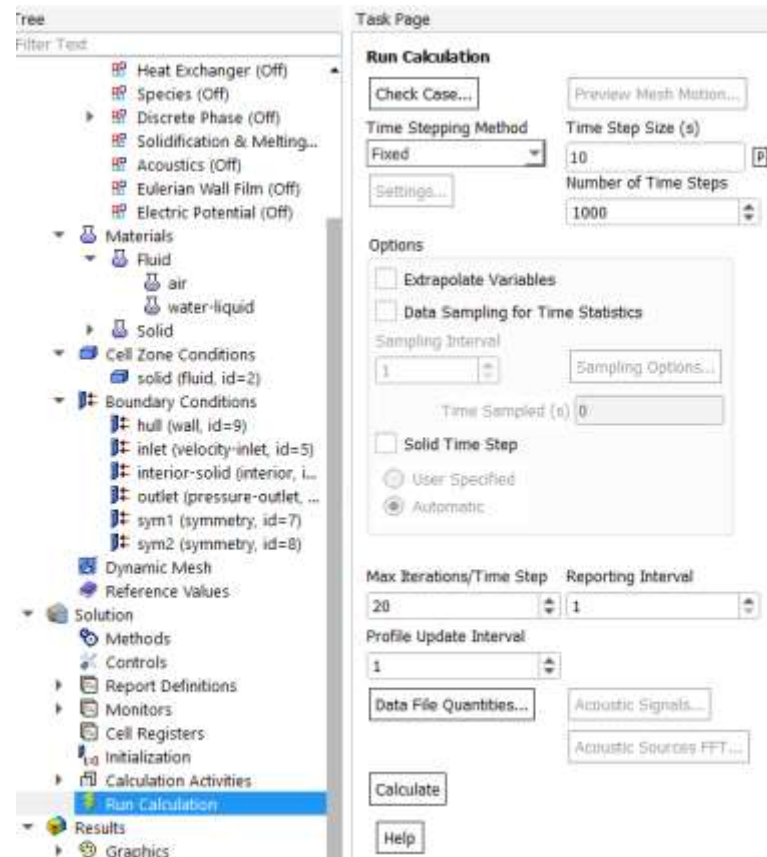
Hình 5.15 Thiết lập điều kiện hội tụ

**Bước 4:** Tiến hành chạy chương trình

- Chọn Initialization → Hybrid Initialization → chọn Initialize
- Tiếp theo, chọn Run Calculation → Time Step Size (s): 10 → Number of Time Steps: 100 → chọn Calculate để tiến hành tính toán



Hình 5.16 Khởi tạo tính toán



Hình 5.17 Thiết lập số bước thời gian tính toán

#### 5.1.4 Kết quả và bàn luận

Bảng 5.4 Kết quả tính toán từ CFD

$\beta$ (độ)	X (N)	Y (N)	N (N.m)
0	127,465	0,070	1,332
2	123,822	78,324	240,039
4	115,919	169,937	466,193
6	111,431	257,394	600,358
8	105,875	426,884	789,057
10	86,325	568,541	934,955
12	70,327	757,000	1025,342

Để có thể quy đổi các lực và moment thu được thành các giá trị không thứ nguyên các phương trình sau được sử dụng theo đề xuất của SNAME 1950. Theo đó các lực thủy động X, Y, Z được đưa về giá trị không thứ nguyên bằng cách sử dụng công thức sau:

$$X' = \frac{X}{\frac{1}{2}\rho.V^2.L_{OA}^2} \quad (5.2)$$

$$Y' = \frac{Y}{\frac{1}{2}\rho.V^2.L_{OA}^2} \quad (5.3)$$

$$Z' = \frac{Z}{\frac{1}{2}\rho.V^2.L_{OA}^2} \quad (5.4)$$

Các momen K, M, N là các momen quay quanh trục X, Y, Z được đưa về giá trị không thứ nguyên bằng công thức sau:

$$K' = \frac{K}{\frac{1}{2}\rho.V^2.L_{OA}^3} \quad (5.5)$$

$$M' = \frac{M}{\frac{1}{2}\rho.V^2.L_{OA}^3} \quad (5.6)$$

$$N' = \frac{N}{\frac{1}{2} \rho \cdot V^2 \cdot L_{OA}^3} \quad (5.7)$$

Dựa vào các công thức ở trên, ta có được bảng giá trị của các hệ số lực và momen không thứ nguyên

**Bảng 5.5 Kết quả hệ số lực và momen không thứ nguyên**

$\beta$ (độ)	X' (CFD)	X' (EFD)	Sai số (%)	Y' (CFD)	Y' (EFD)	Sai số (%)	N' (CFD)	N' (EFD)	Sai số (%)
0	1,204	1,220	1,328	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
2	1,170	1,238	5,812	0,740	0,826	9,621	5,210	5,169	0,787
4	1,115	1,124	2,648	1,605	1,685	4,984	10,102	9,948	1,524
6	1,052	1,093	3,897	2,630	2,792	6,159	13,000	13,890	6,846
8	1,000	0,989	1,100	4,030	4,105	1,861	17,100	17,103	0,018
10	0,815	0,837	2,699	5,371	5,673	5,622	20,271	20,104	0,828
12	0,664	0,654	1,506	7,150	7,023	1,776	22,231	22,689	2,060

Từ kết quả tính toán mô phỏng ta có thể thấy: khi càng tăng góc dạt thì lực dọc X càng giảm và momen quay quanh trục Z và lực dạt ngang Y càng tăng. Điều đó có thể được giải thích bằng công thức sau:

$$u = U \cdot \cos \beta \quad (5.8)$$

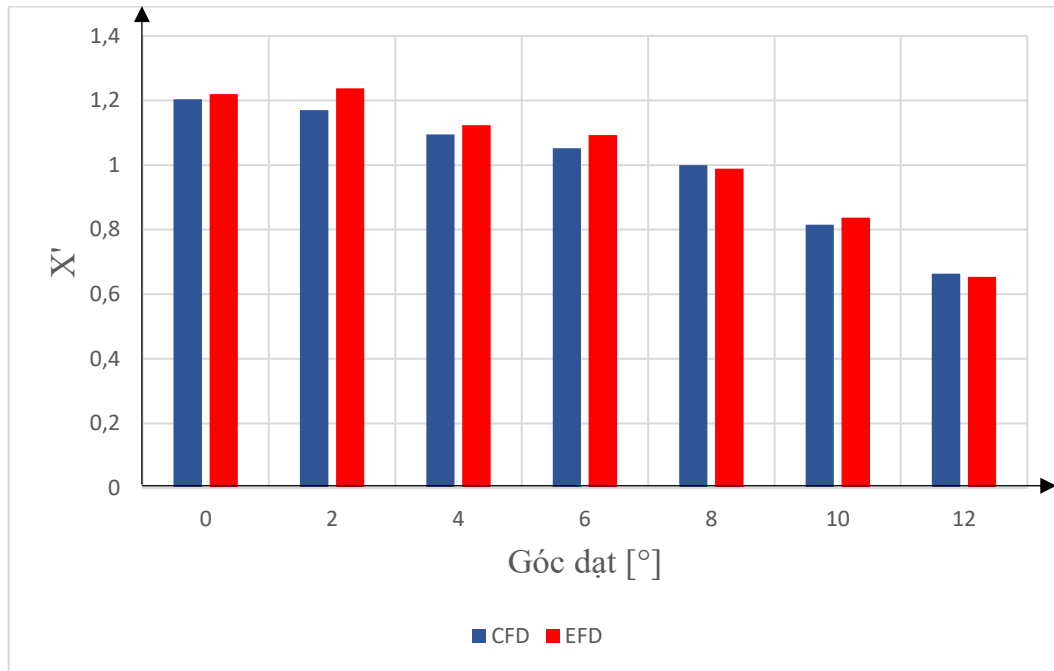
$$v = U \cdot \sin \beta \quad (5.9)$$

Trong đó:

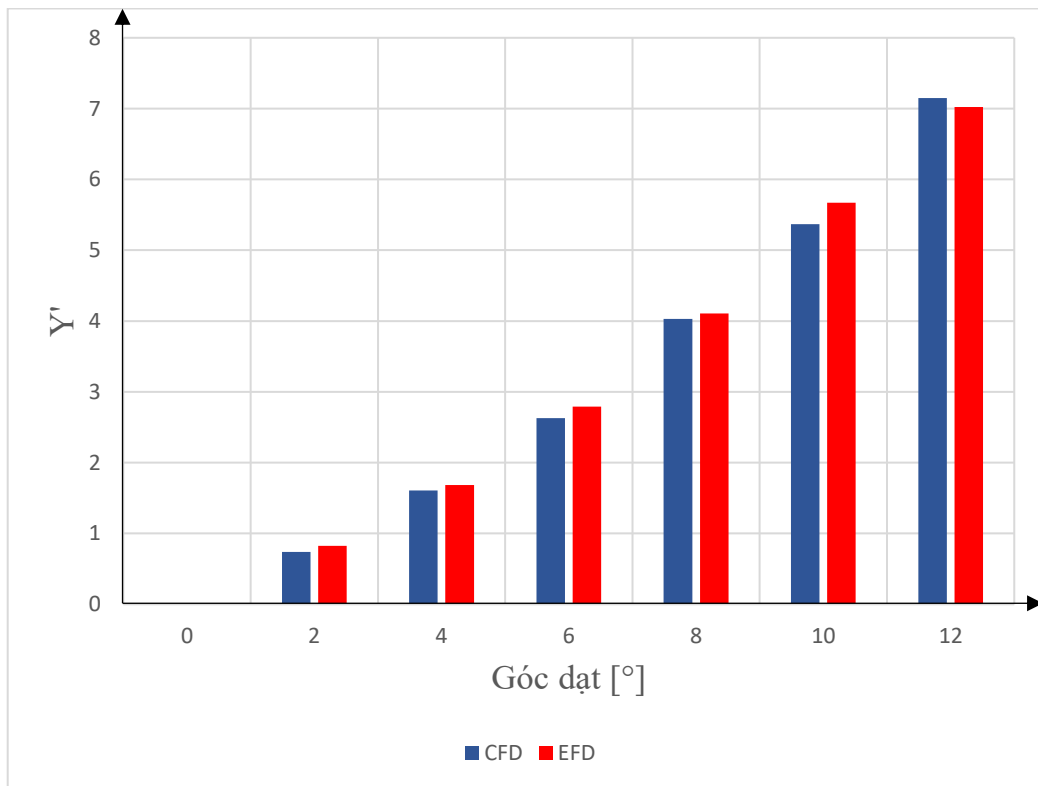
- U: Vận tốc tàu ngầm theo phương dọc (m/s)
- u: Vận tốc tuyến tính theo phương dọc tàu (m/s)
- v: Vận tốc tuyến tính theo phương ngang tàu (m/s)
- $\beta$ : Góc dạt của tàu ngầm (độ)

Sau khi có được kết quả lực và momen thủy động không thứ nguyên, em tiến hành so sánh với dữ liệu được lấy từ thử nghiệm mô hình và cho thấy kết quả khá chính xác với sai số lớn nhất giữa kết quả của lực thủy động tác dụng theo phương dọc X từ mô phỏng CFD và thực nghiệm là 5,812%, thấp nhất là 1,1%, lực thủy động tác dụng theo

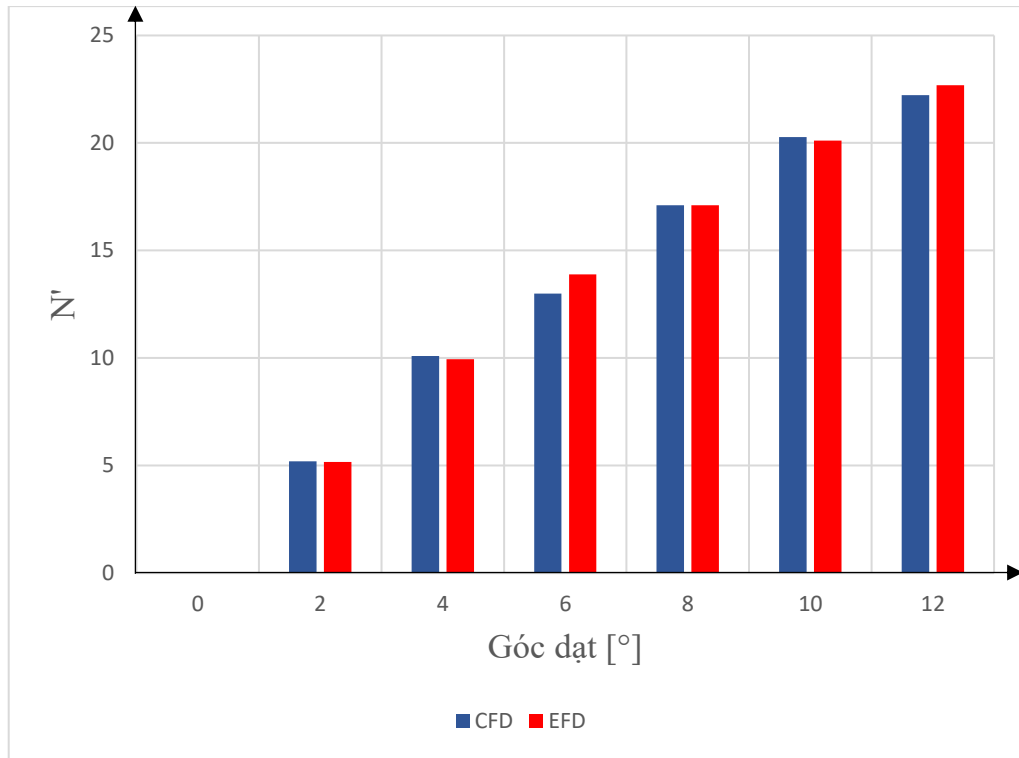
phương ngang Y với sai số lớn nhất là 9,621%, thấp nhất là  $\approx 0\%$ , và momen thủy động quay quanh trục z với sai số lớn nhất là 6,846%, thấp nhất là  $\approx 0\%$ .



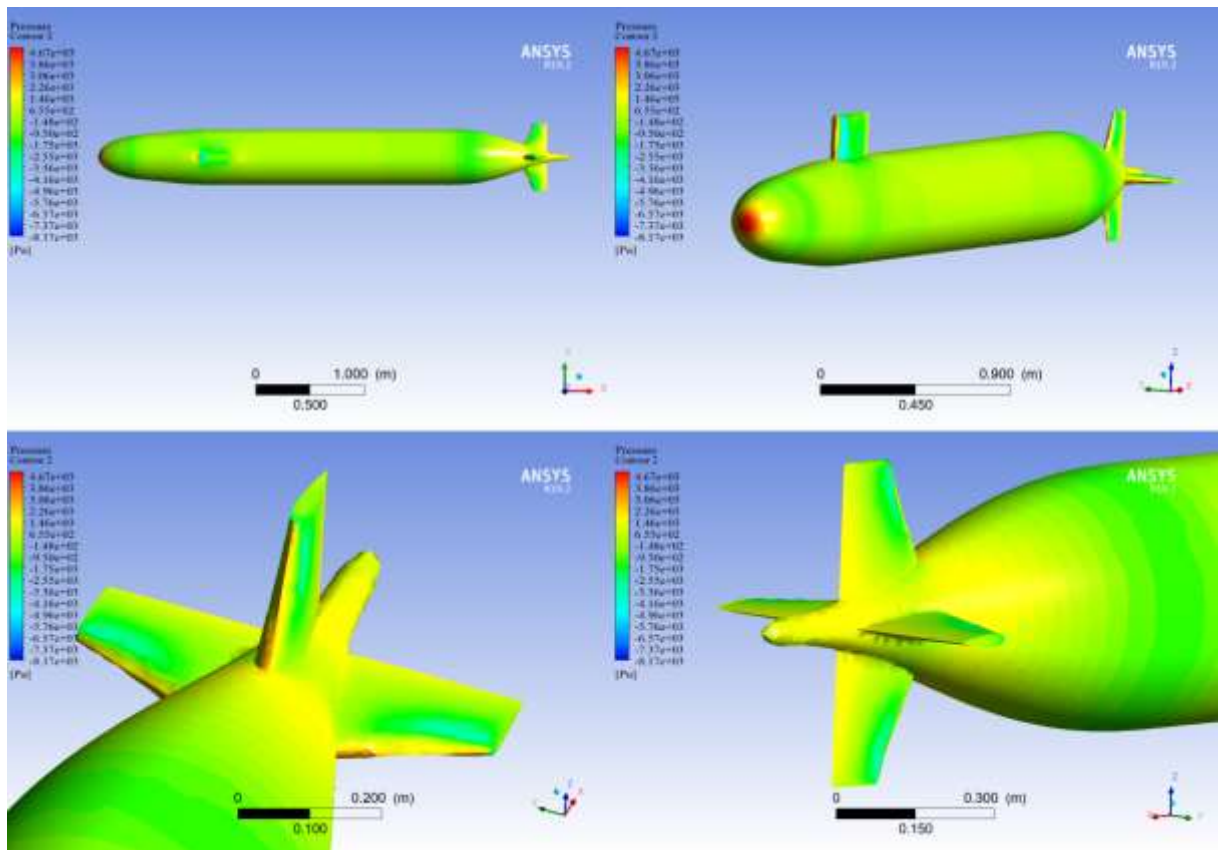
Hình 5.18 Đồ thị hệ số lực dọc tàu ngầm



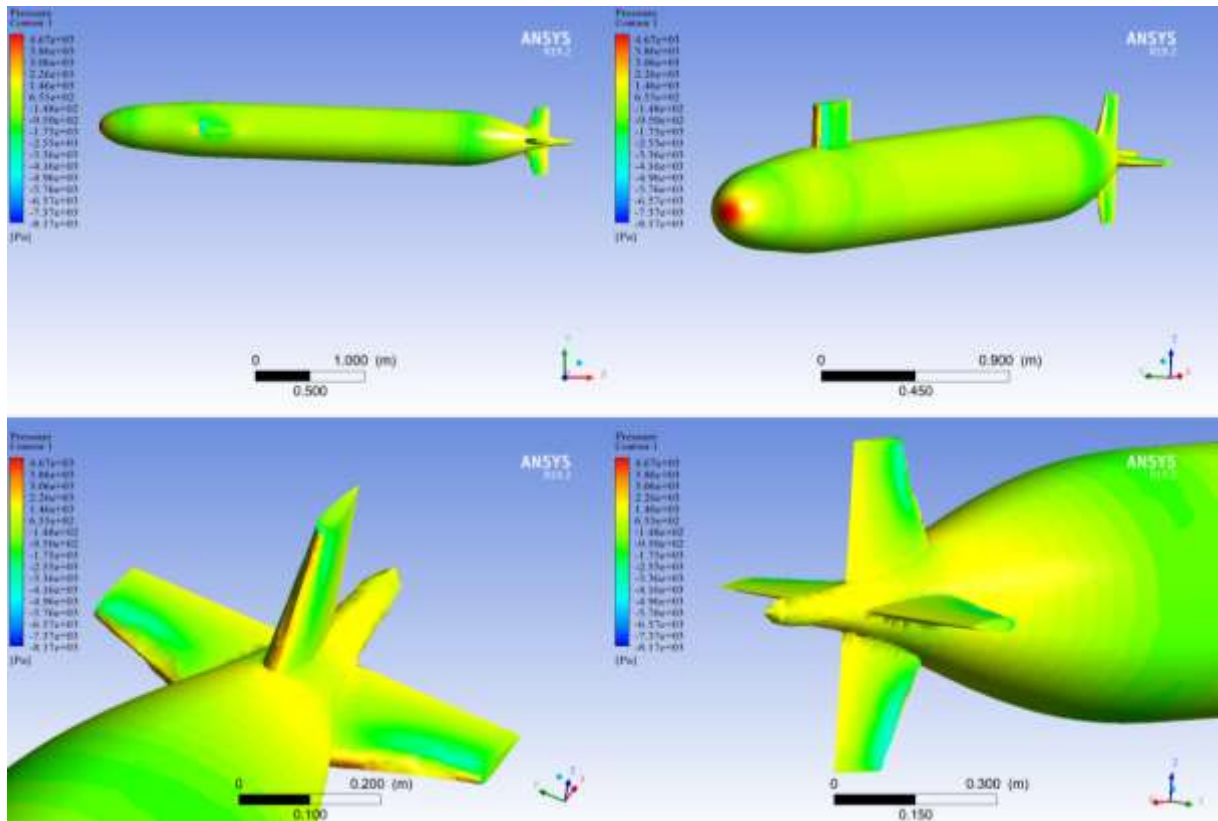
Hình 5.19 Đồ thị hệ số lực ngang tác dụng lên tàu ngầm



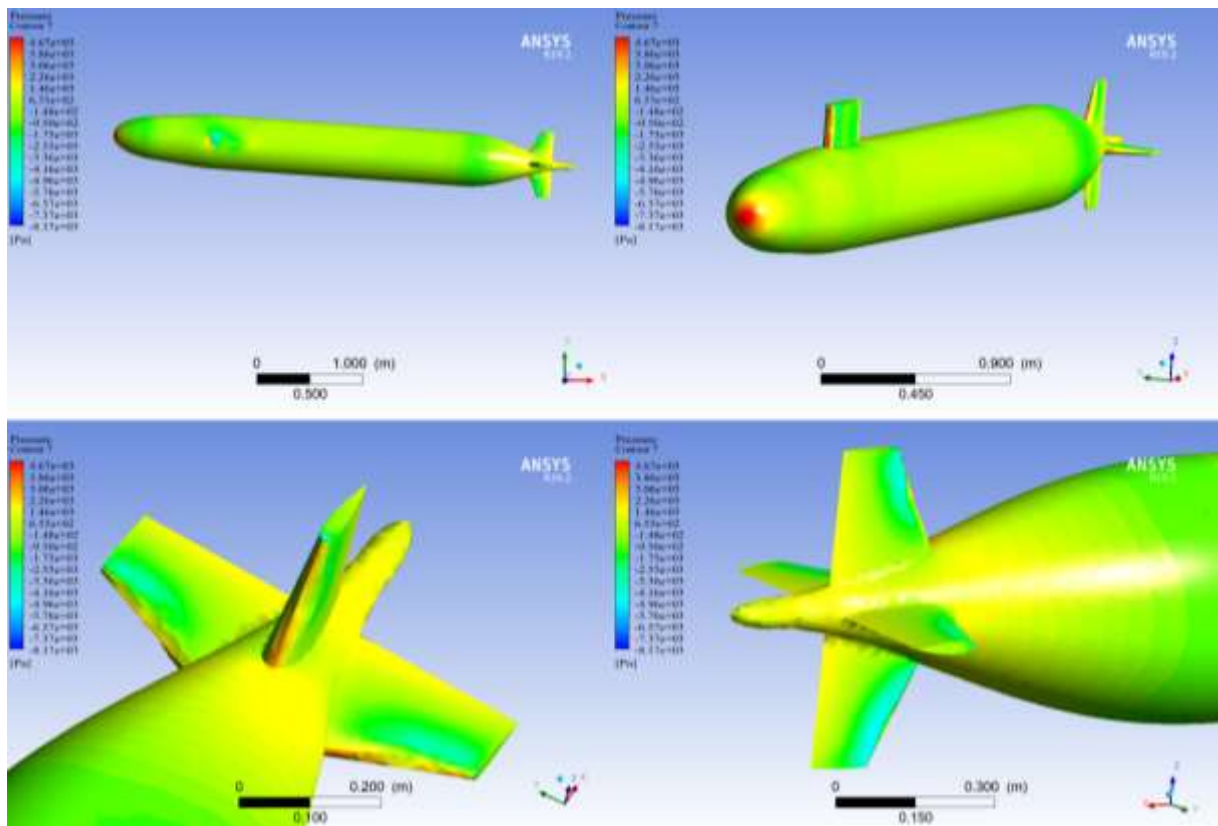
Hình 5.20 Đồ thị hệ số moment quay của tàu ngầm



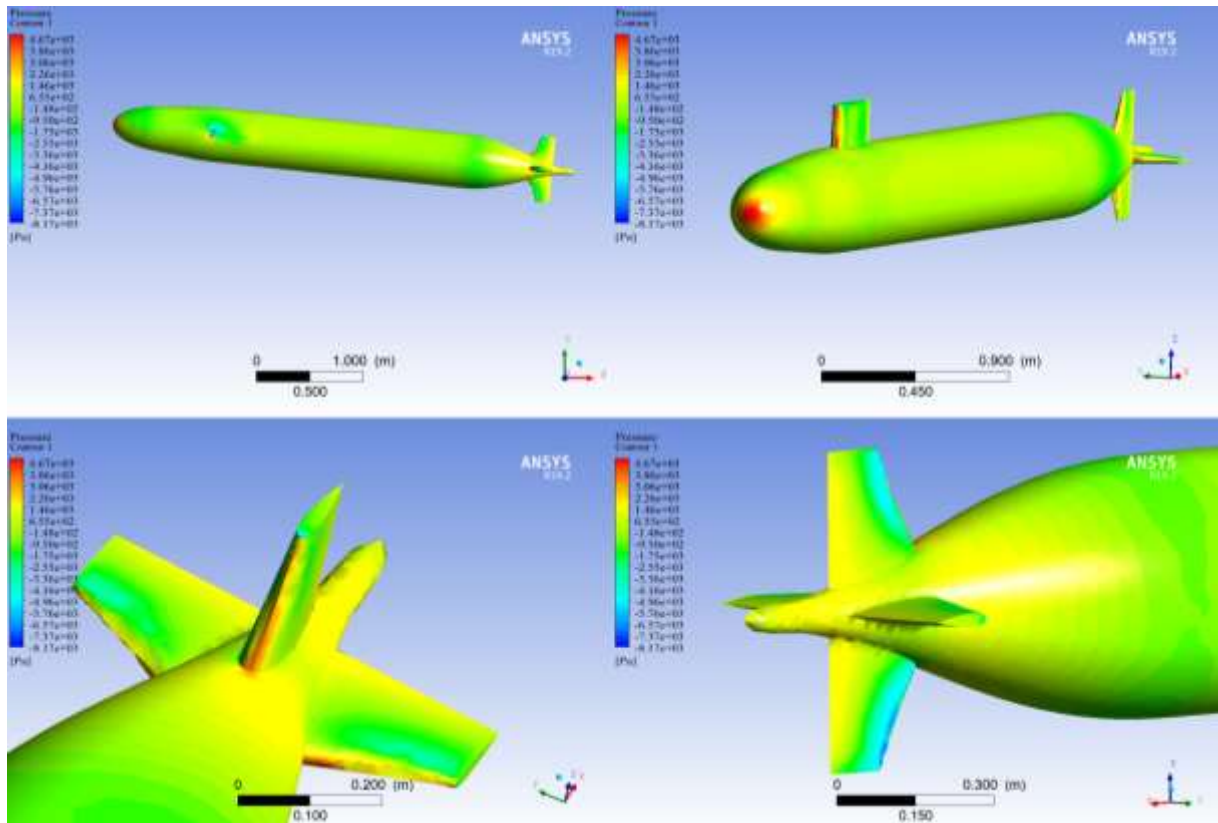
Hình 5.21 Phân bố áp suất của tàu ngầm tại góc đặt 0 độ



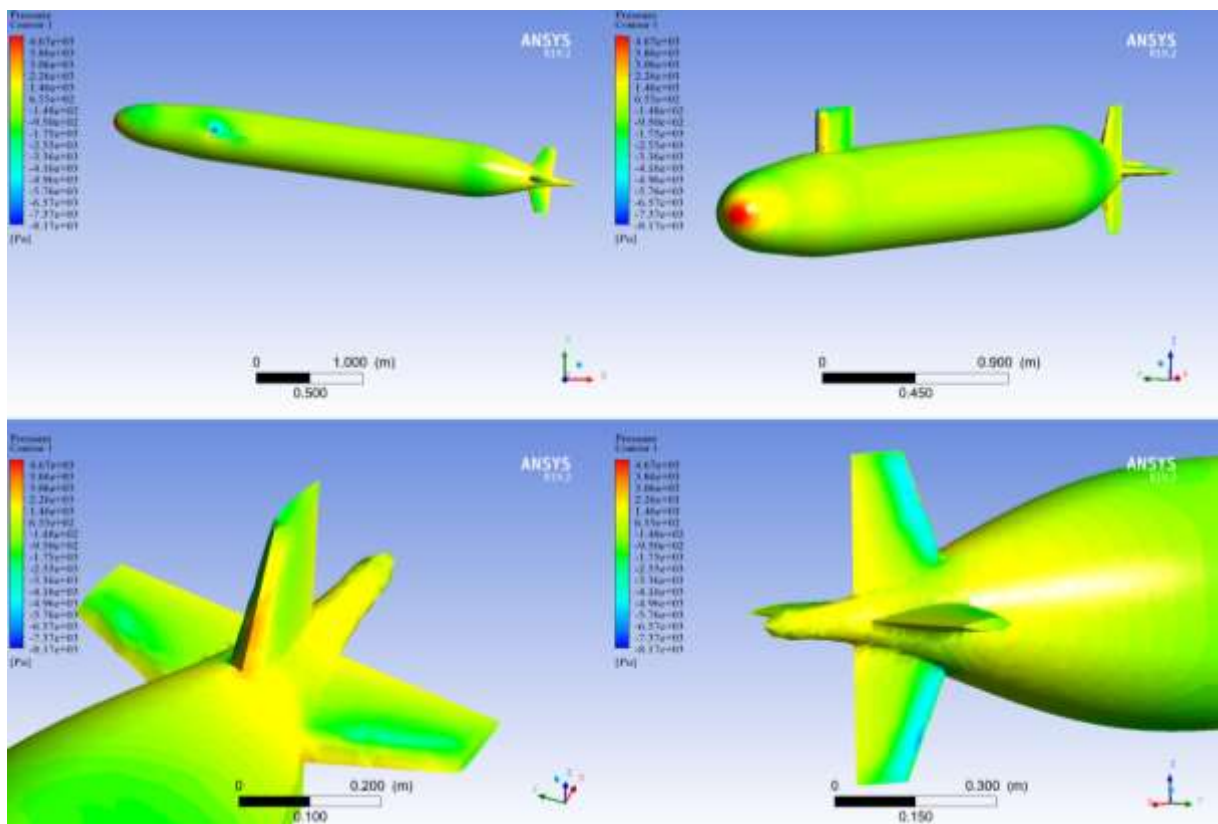
Hình 5.22 Phân bố áp suất của tàu ngầm tại góc dạt 2 độ



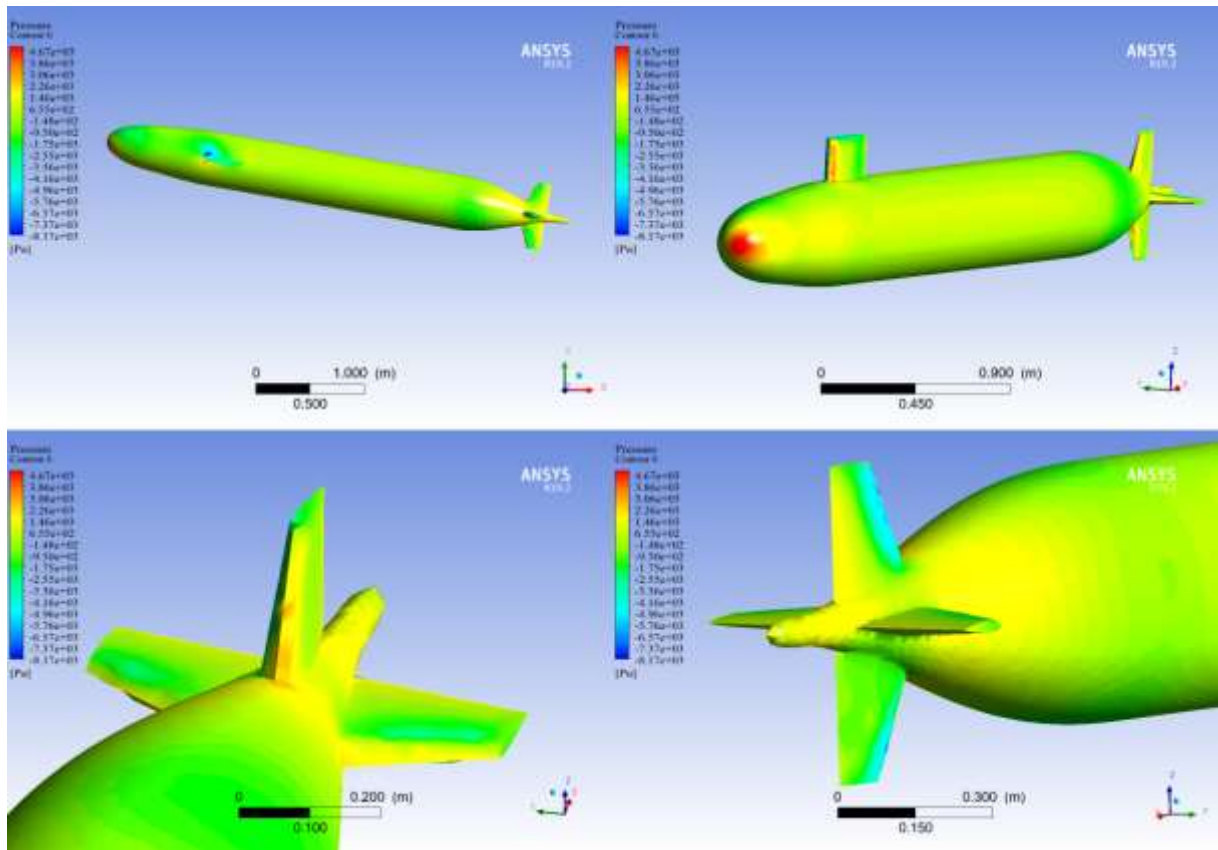
Hình 5.23 Phân bố áp suất của tàu ngầm tại góc dạt 4 độ



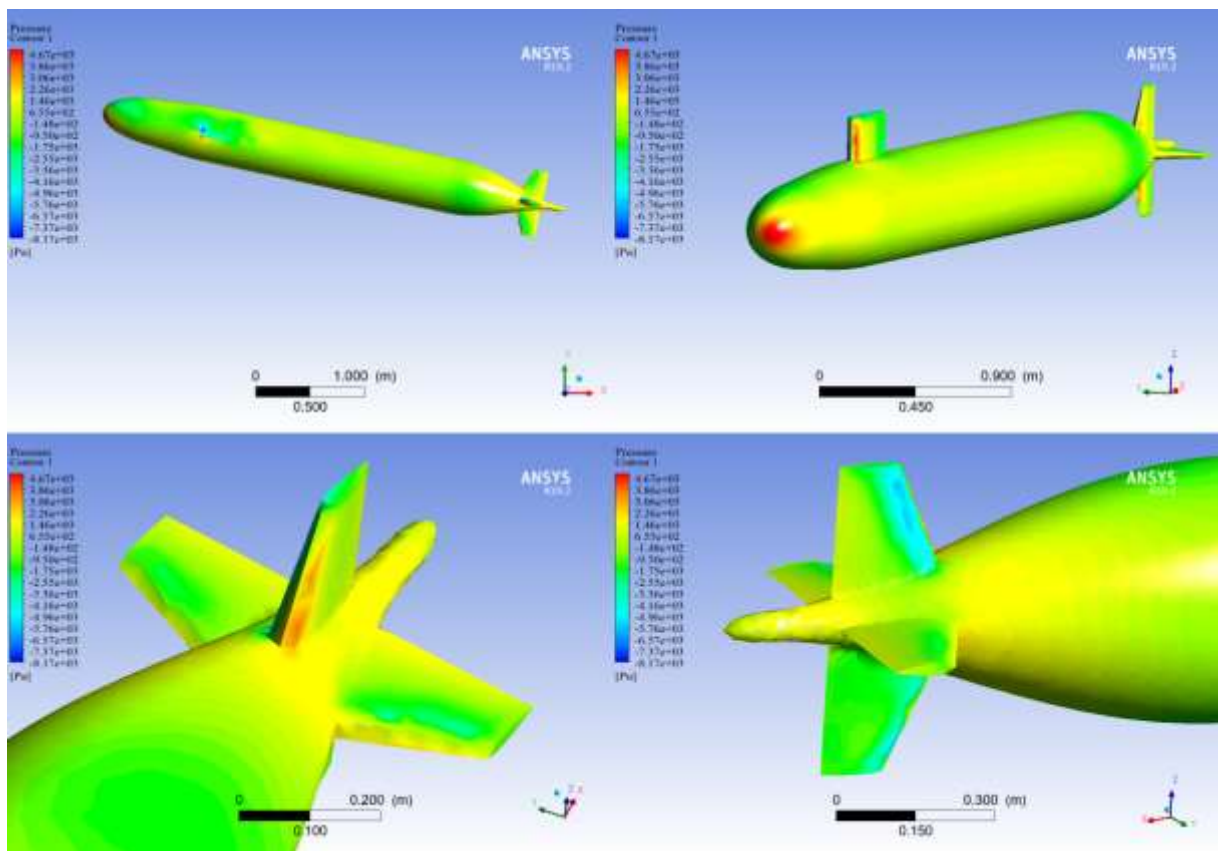
Hình 5.24 Phân bố áp suất của tàu ngầm tại góc dạt 6 độ



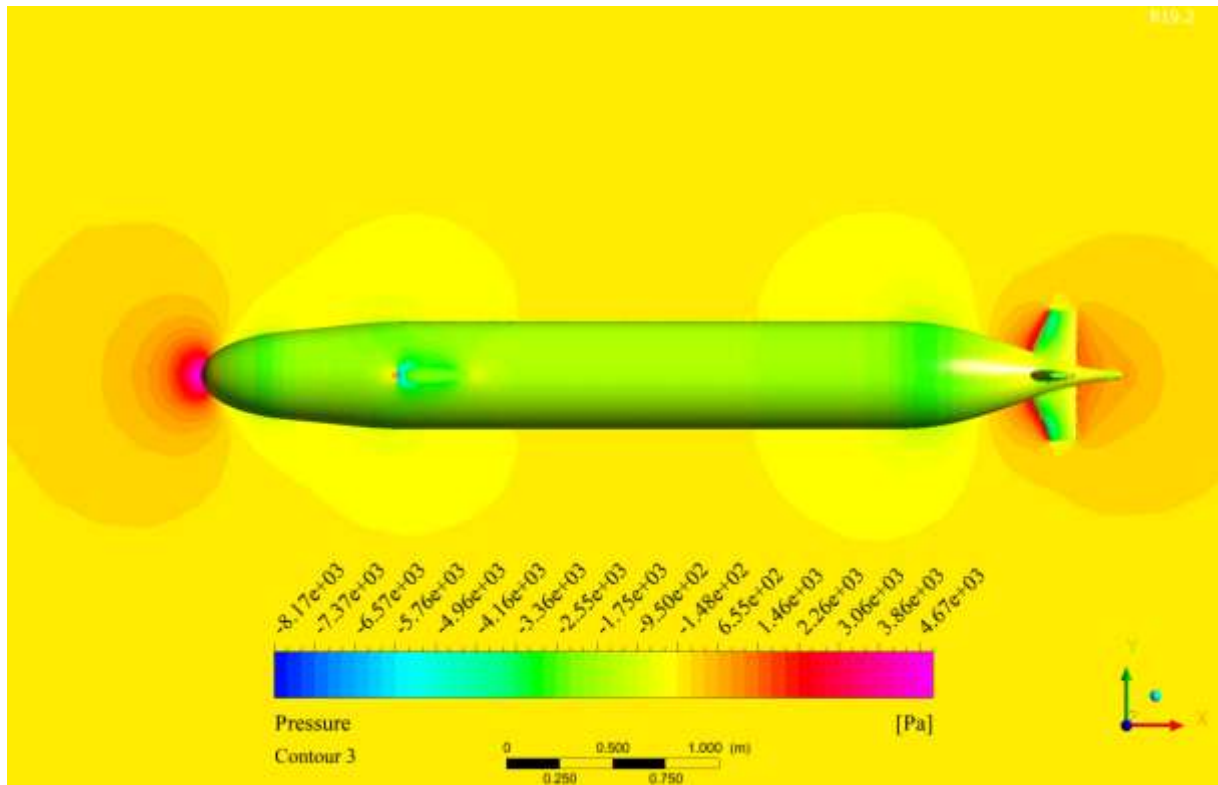
Hình 5.25 Phân bố áp suất của tàu ngầm tại góc dạt 8 độ



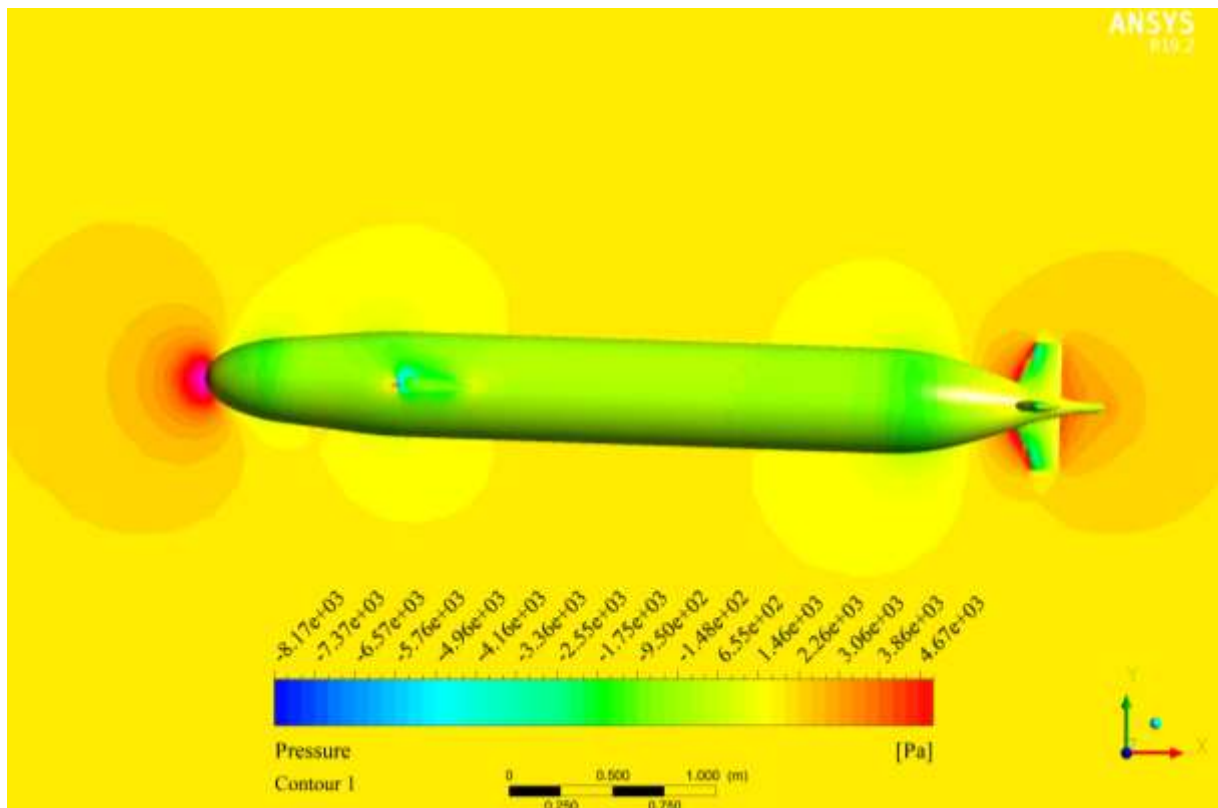
Hình 5.26 Phân bố áp suất của tàu ngầm tại góc dạt 10 độ



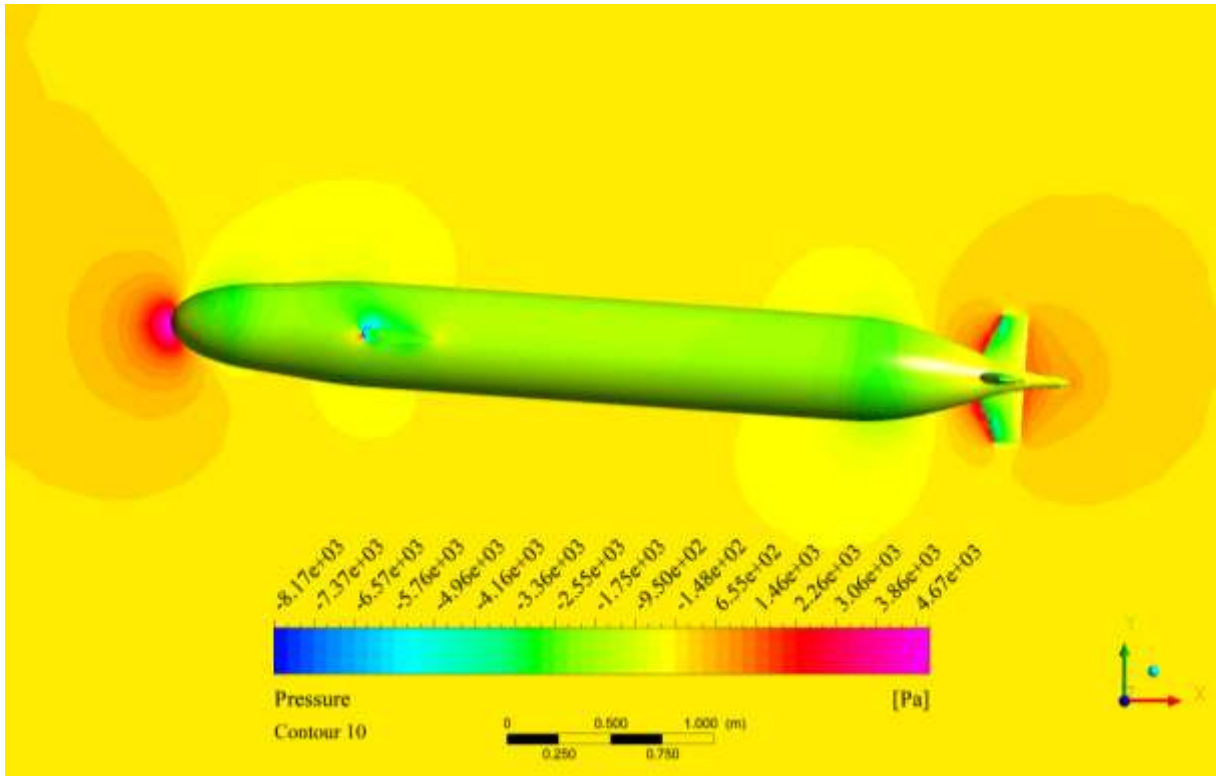
Hình 5.27 Phân bố áp suất của tàu ngầm tại góc dạt 12 độ



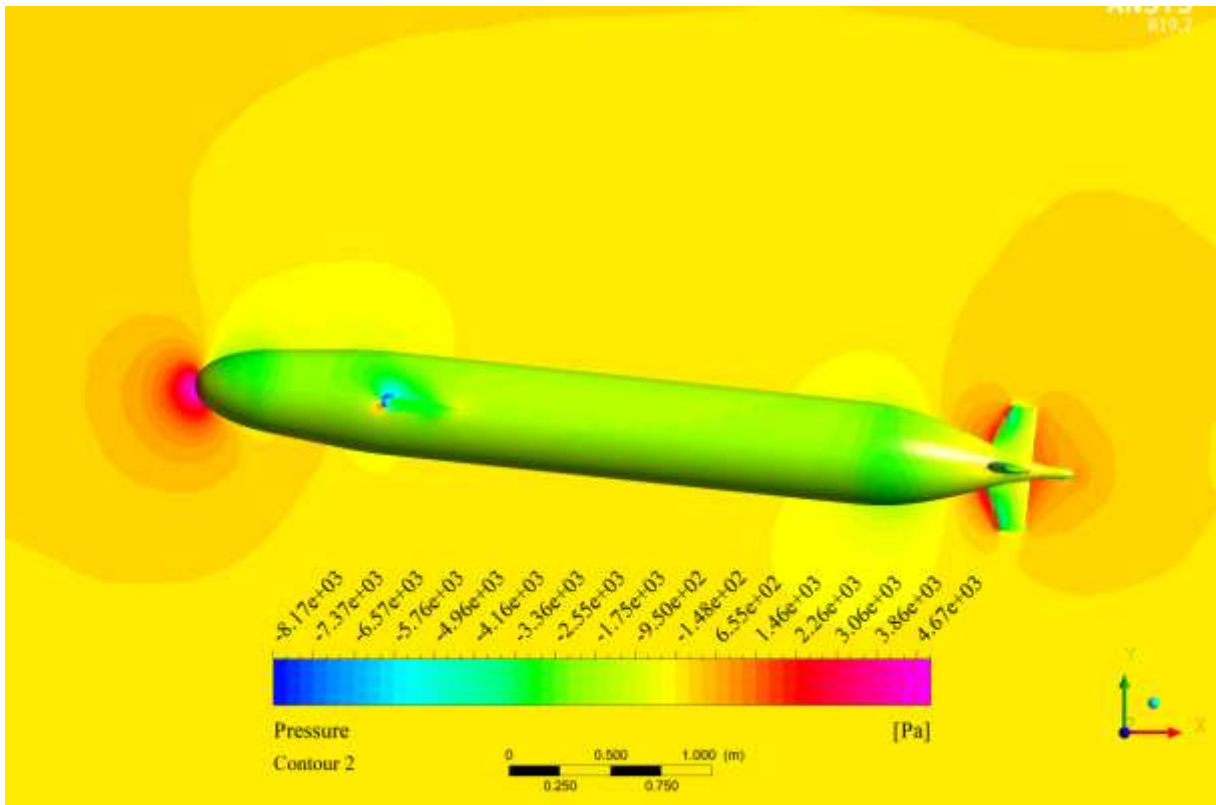
Hình 5.28 Phân bố áp suất quanh tàu ngầm tại góc dạt 0 độ



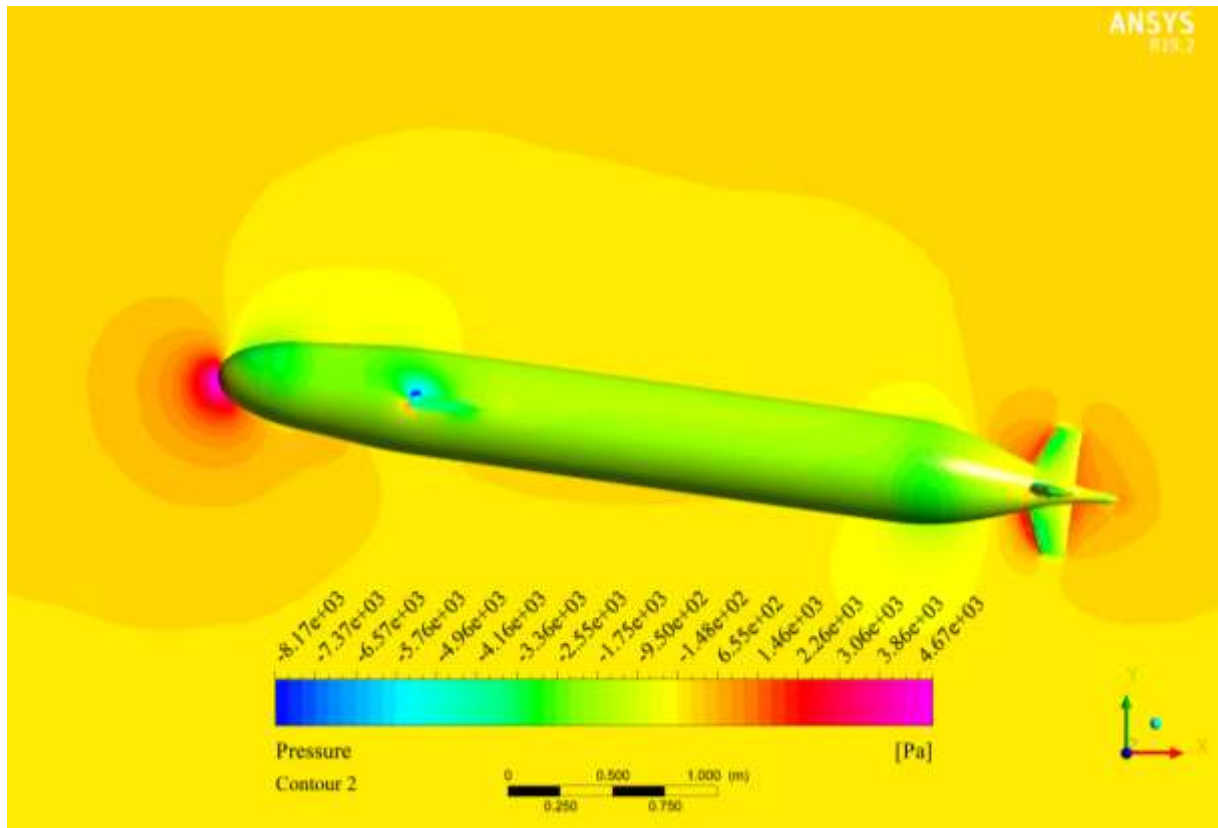
Hình 5.29 Phân bố áp suất quanh tàu ngầm tại góc dạt 2 độ



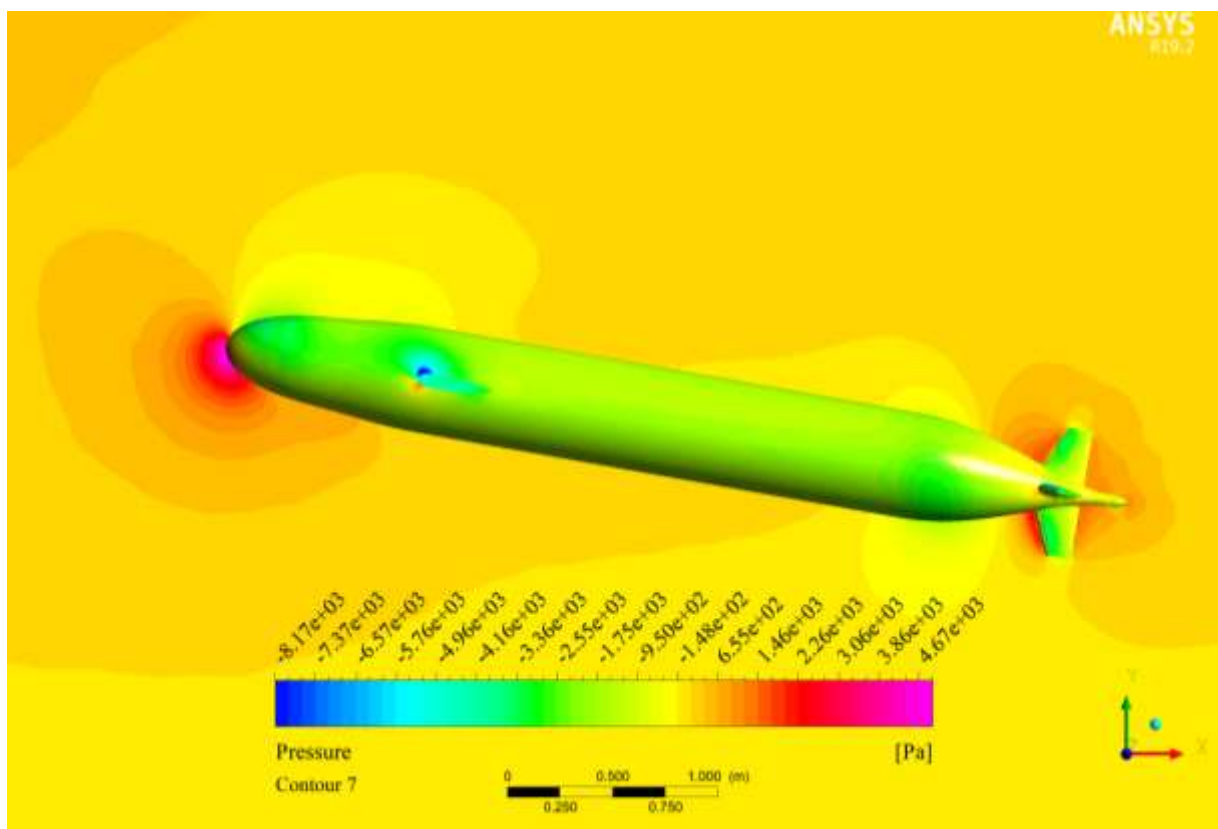
Hình 5.30 Phân bố áp suất quanh tàu ngầm tại góc dạt 4 độ



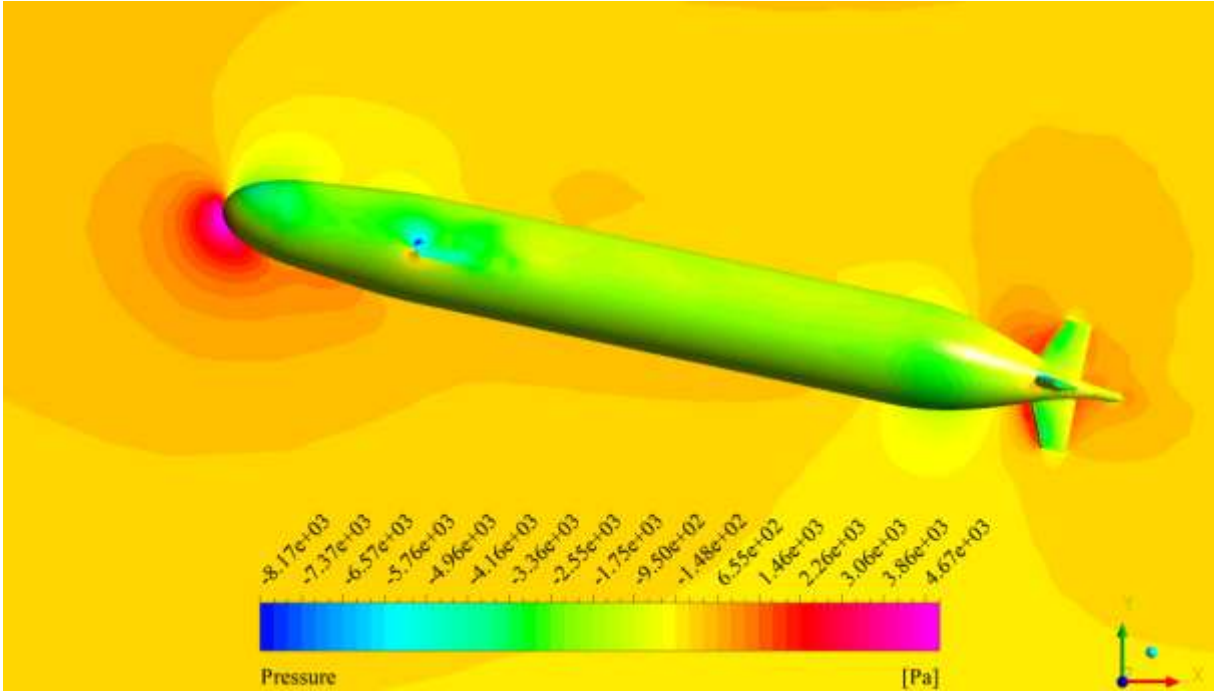
Hình 5.31 Phân bố áp suất quanh tàu ngầm tại góc dạt 6 độ



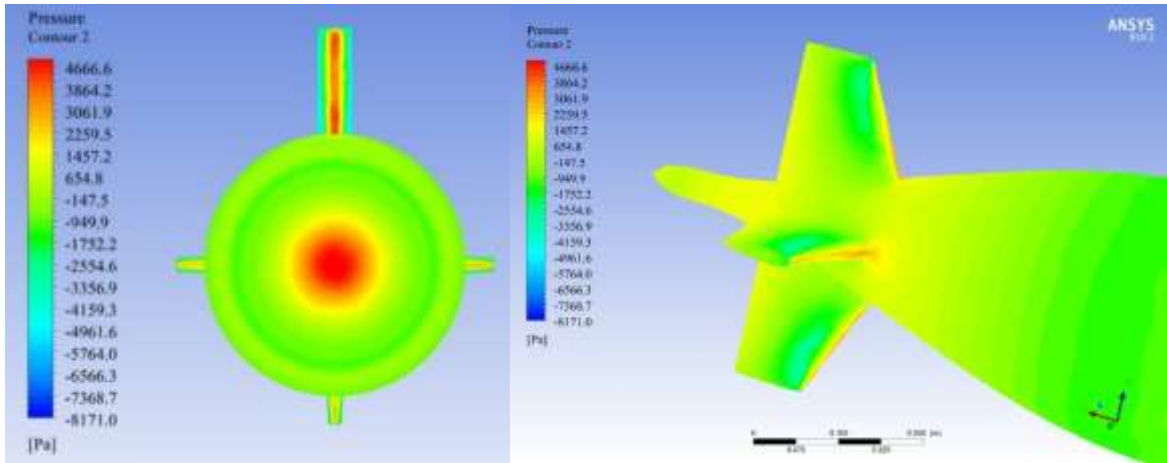
Hình 5.32 Phân bố áp suất quanh tàu ngầm tại góc dạt 8 độ



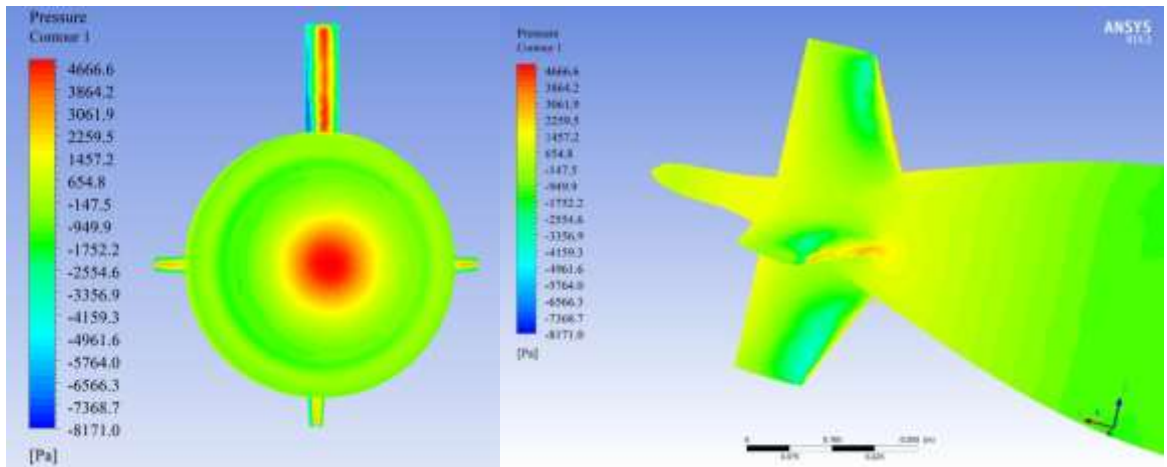
Hình 5.33 Phân bố áp suất quanh tàu ngầm tại góc dạt 10 độ



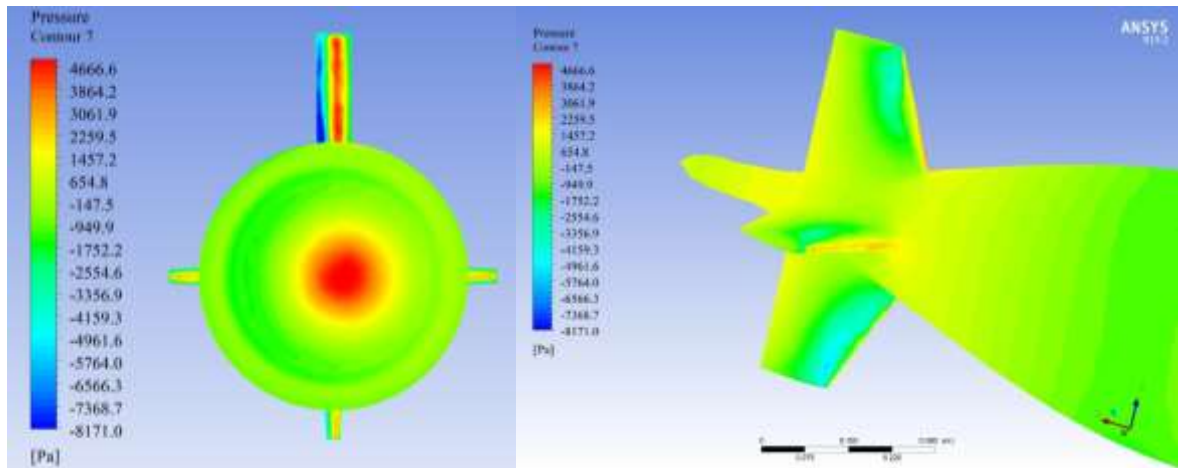
Hình 5.34 Phân bố áp suất quanh tàu ngầm tại góc dạt 12 độ



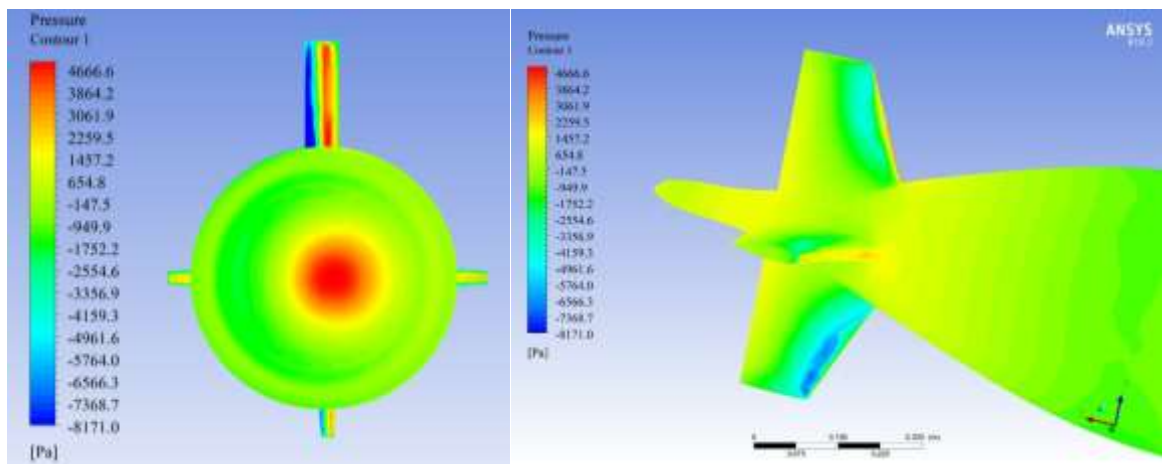
Hình 5.35 Phân bố áp suất của mũi và đuôi tại góc dạt 0 độ



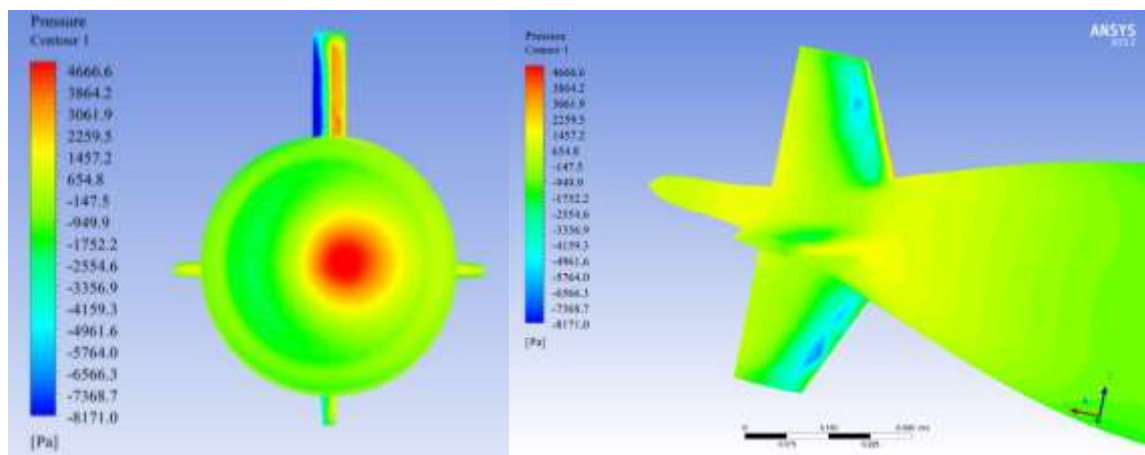
Hình 5.36 Phân bố áp suất của mũi và đuôi tại góc dạt 2 độ



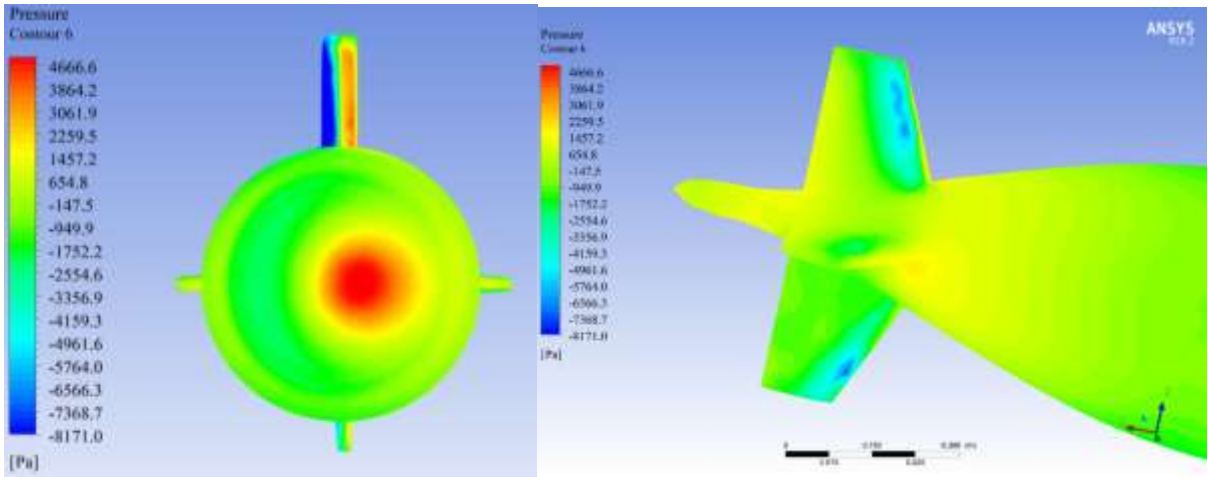
Hình 5.37 Phân bố áp suất của mũi và đuôi tại góc dạt 4 độ



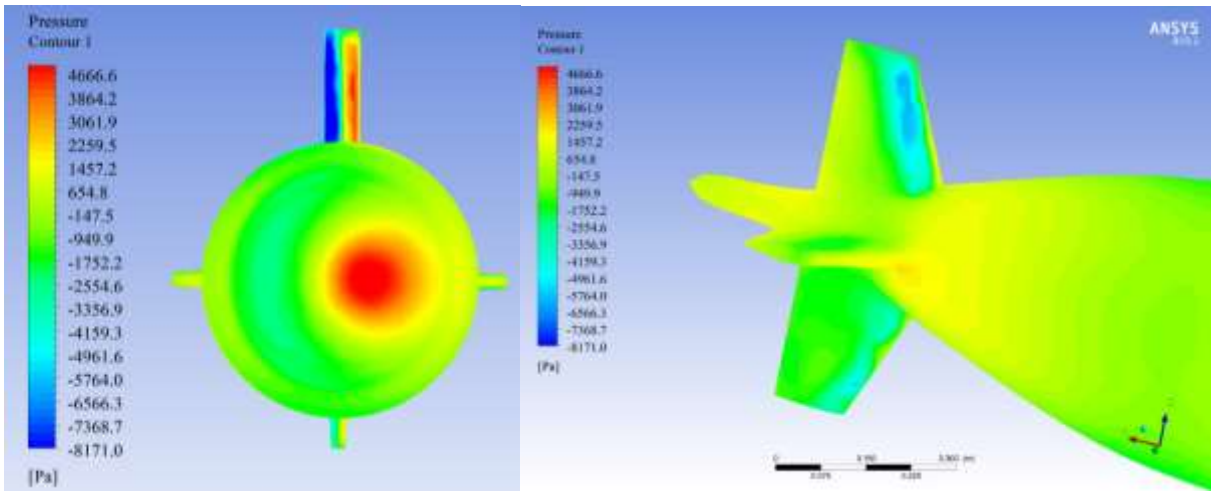
Hình 5.38 Phân bố áp suất của mũi và đuôi tại góc dạt 6 độ



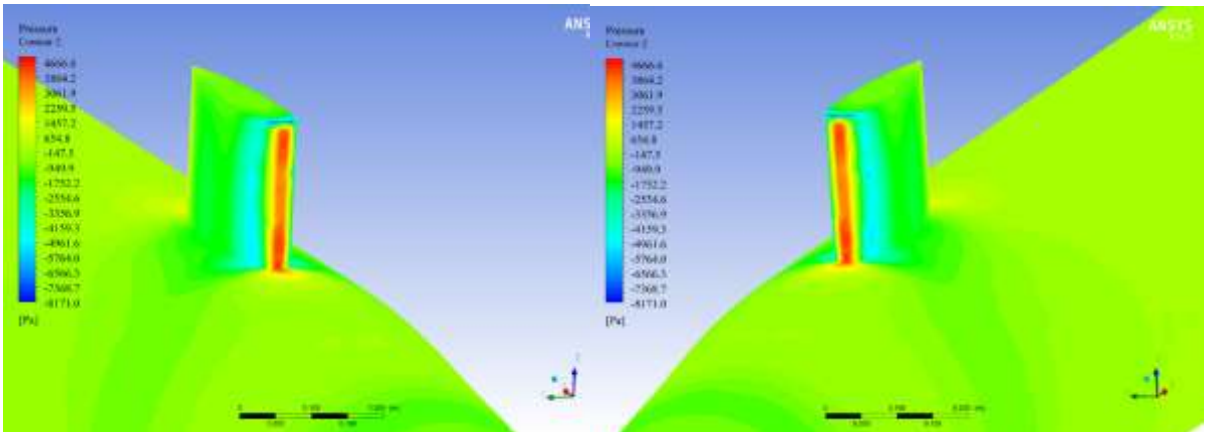
Hình 5.39 Phân bố áp suất của mũi và đuôi tại góc dạt 8 độ



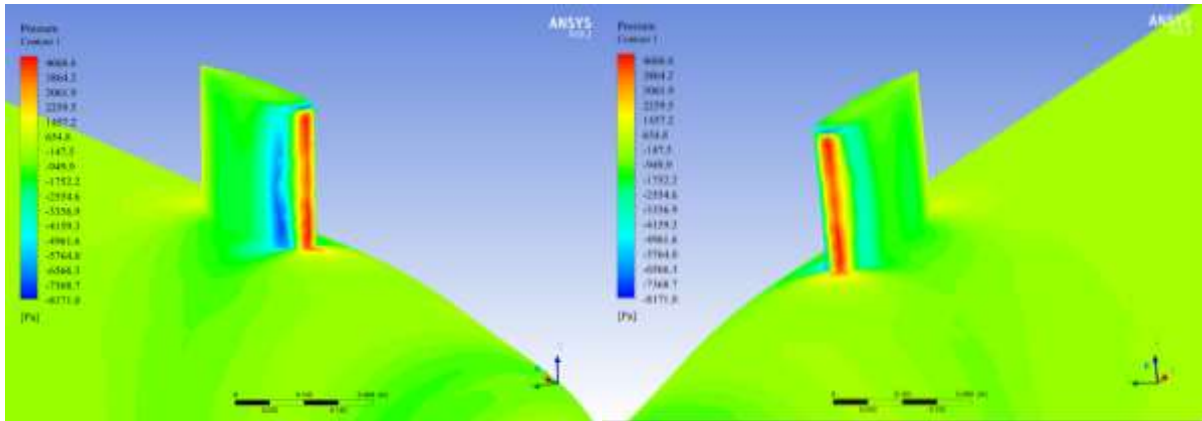
Hình 5.40 Phân bố áp suất của mũi và đuôi tại góc dạt 10 độ



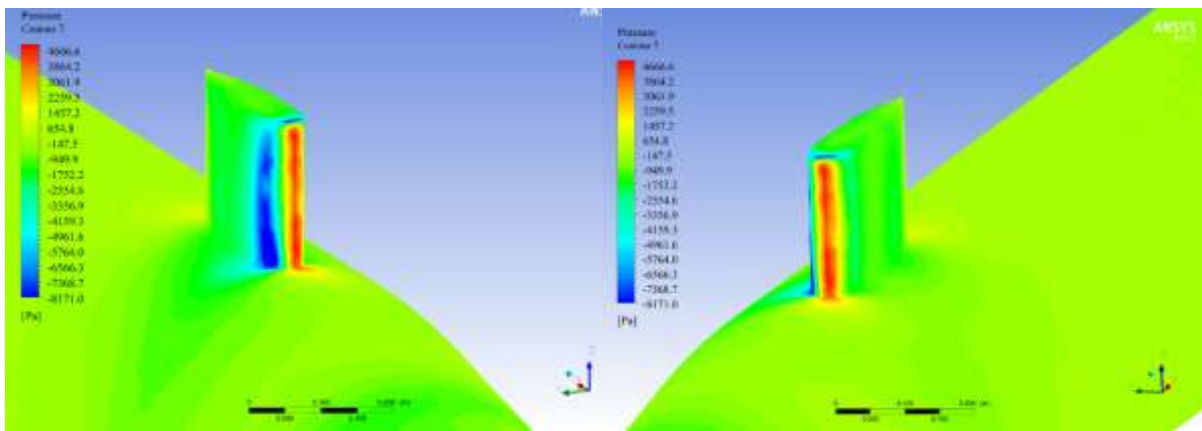
Hình 5.41 Phân bố áp suất của mũi và đuôi tại góc dạt 12 độ



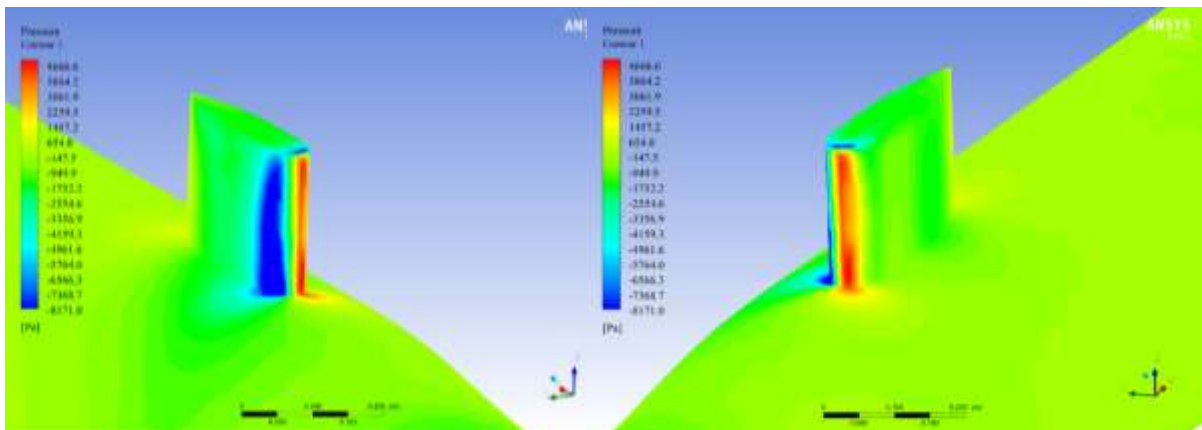
Hình 5.42 Phân bố áp suất của đài quan sát tại góc dạt 0 độ



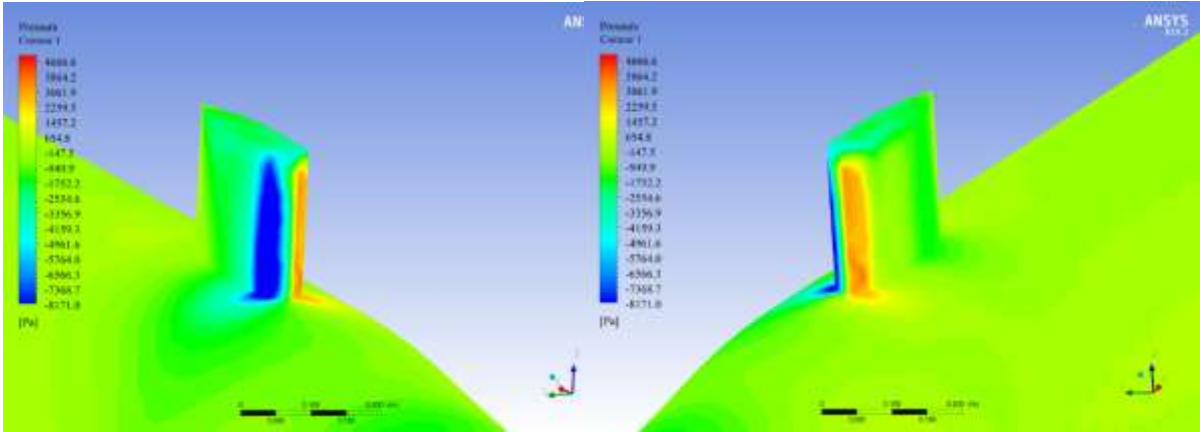
Hình 5.43 Phân bố áp suất của đài quan sát tại góc dạt 2 độ



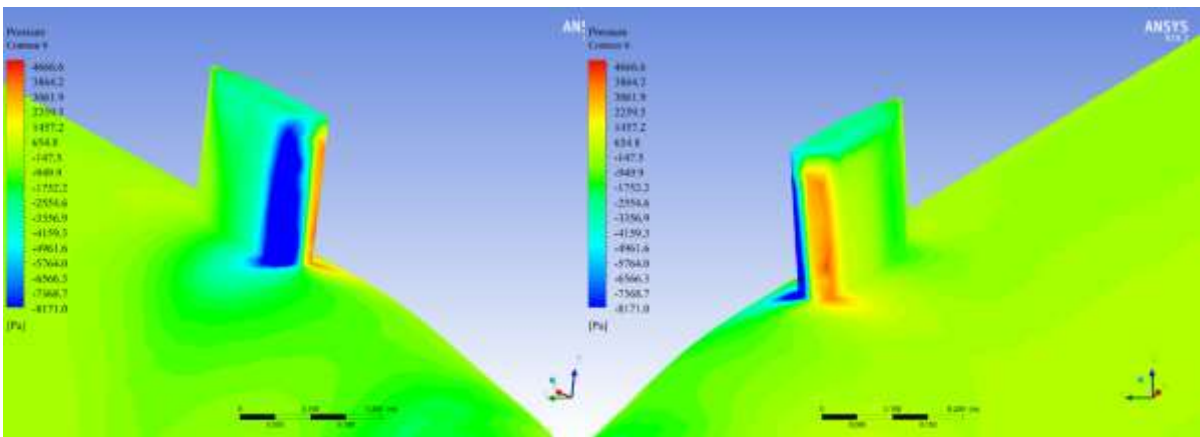
Hình 5.44 Phân bố áp suất của đài quan sát tại góc dạt 4 độ



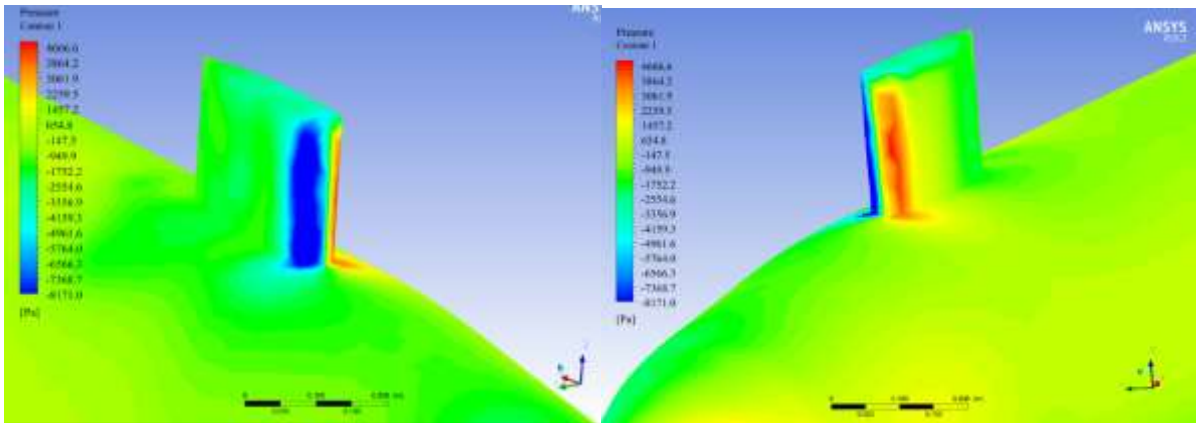
Hình 5.45 Phân bố áp suất của đài quan sát tại góc dạt 6 độ



Hình 5.46 Phân bố áp suất của đài quan sát tại góc dạt 8 độ



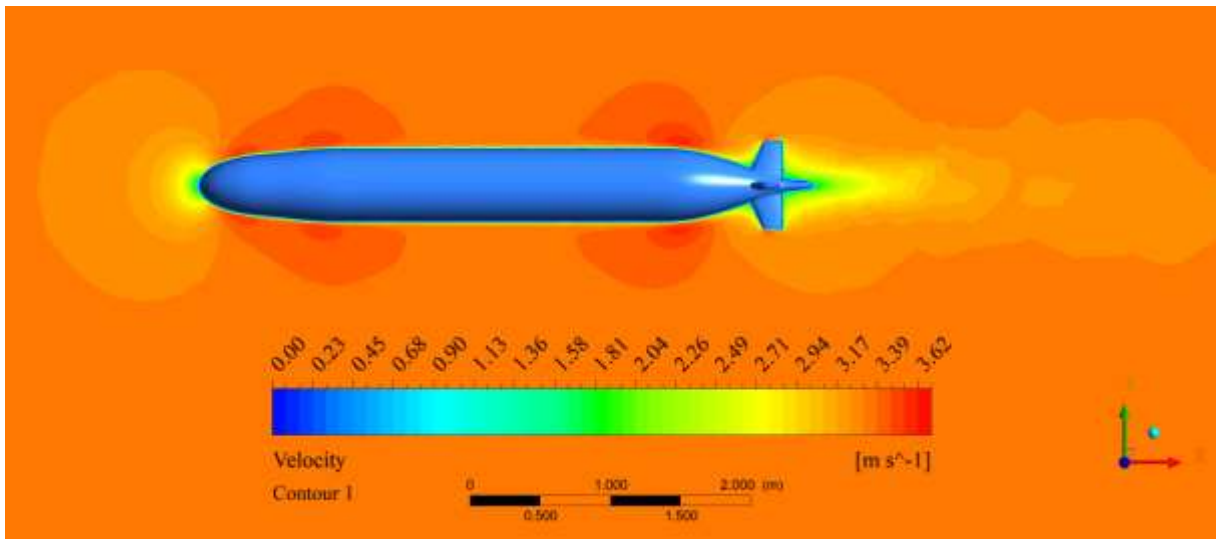
Hình 5.47 Phân bố áp suất của đài quan sát tại góc dạt 10 độ



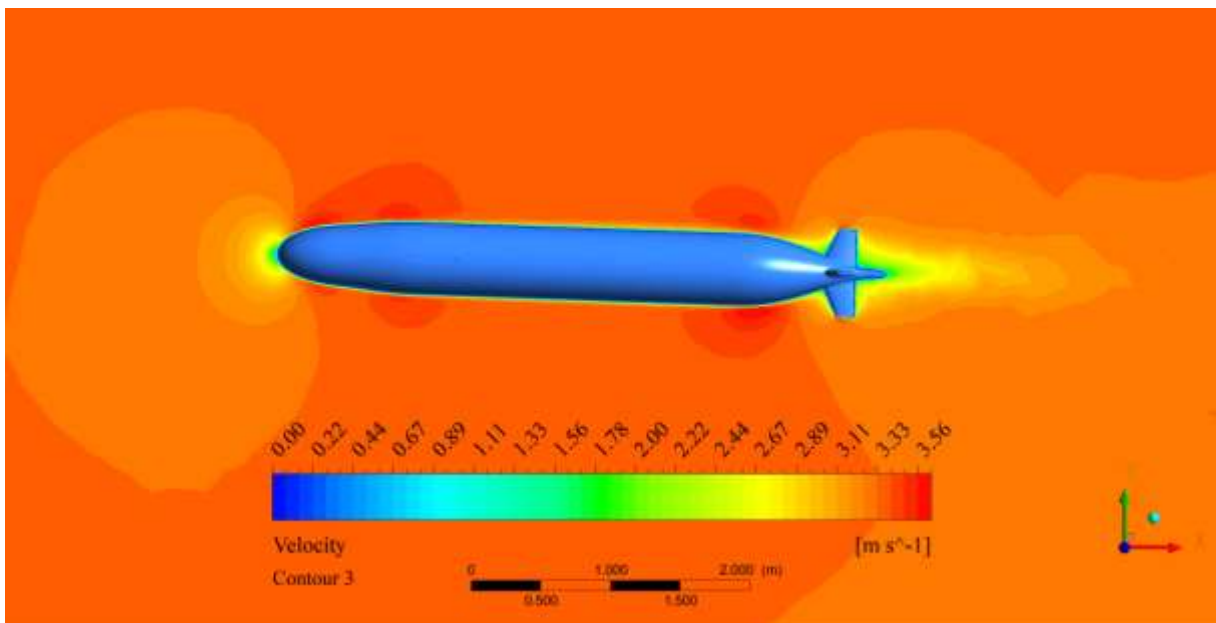
Hình 5.48 Phân bố áp suất của đài quan sát tại góc dạt 12 độ

Nhận xét: Từ kết quả nghiên cứu cho thấy sự phân bố áp suất trở nên đáng kể ở các góc dạt lớn, việc tăng góc dạt có ảnh hưởng đến sự phân bố áp suất của thân tàu ngầm DARPA SUBBOFF vì áp suất và vận tốc có mối liên hệ với nhau trong các phương trình động lượng. Từ kết quả, ta cũng có thể thấy áp suất ở phía mũi tàu và đài quan sát là lớn nhất ( $P = 4934$  [Pa] tại góc dạt 12 độ) do sự tác động gần như vuông góc

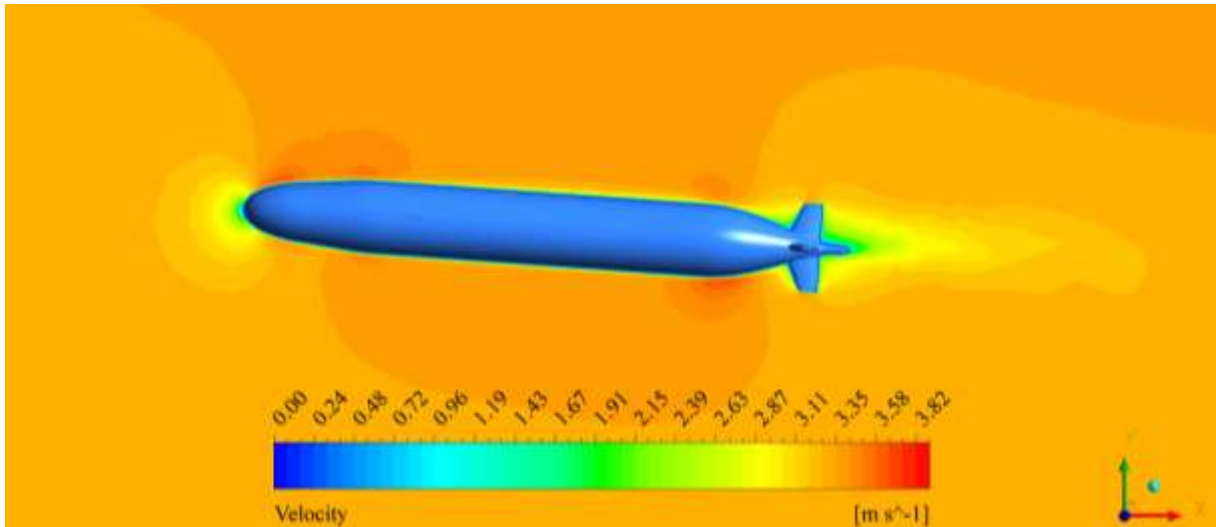
của nước biển, sự thay đổi áp suất rõ rệt trên thân tàu được thể hiện từ góc dạt 4 độ đến góc dạt 12 độ. Đồng thời ở đài quan sát còn cho thấy sự phân bố áp suất bên phải đài quan sát giảm rõ rệt khi tăng góc dạt, còn ở bên trái thì tăng lên do ở phía bên trái là phần diện tích chịu tác động trực tiếp từ nước, phần diện tích đó càng tăng thì áp suất phân bố ở bên trái càng lớn, phân bố áp suất ở bên phải đài quan sát càng giảm. Ngoài ra, chúng ta cũng có thể thấy được sự khác nhau về phân bố áp suất tại mạn phải và mạn trái, phân bố áp suất ở mạn trái tăng còn áp suất ở mạn phải giảm khi tăng các góc dạt và điều đó cũng giải thích cho sự gia tăng của lực ngang Y.



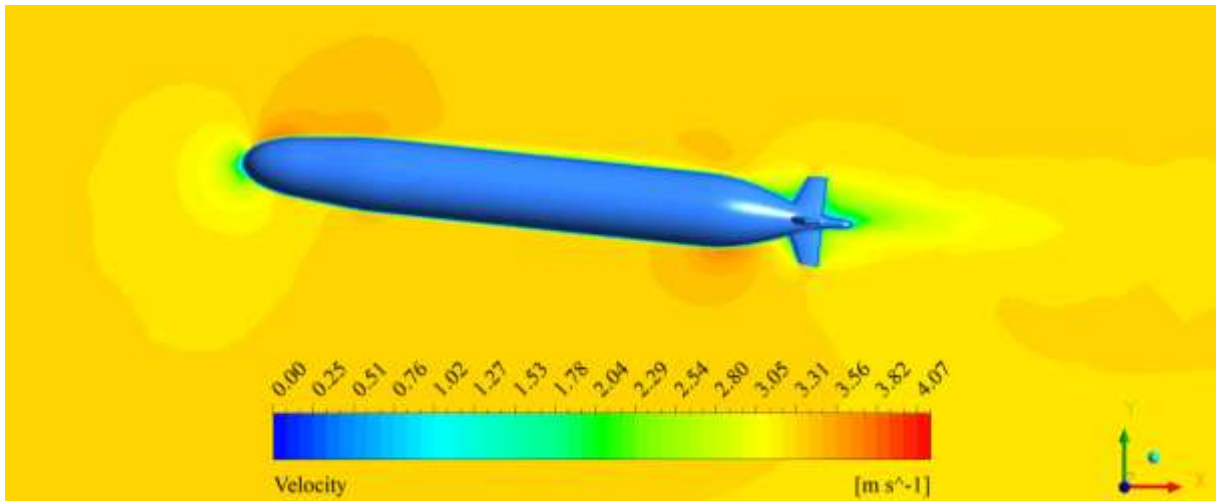
Hình 5.49 Phân bố vận tốc của tàu ngầm tại góc dạt 0 độ



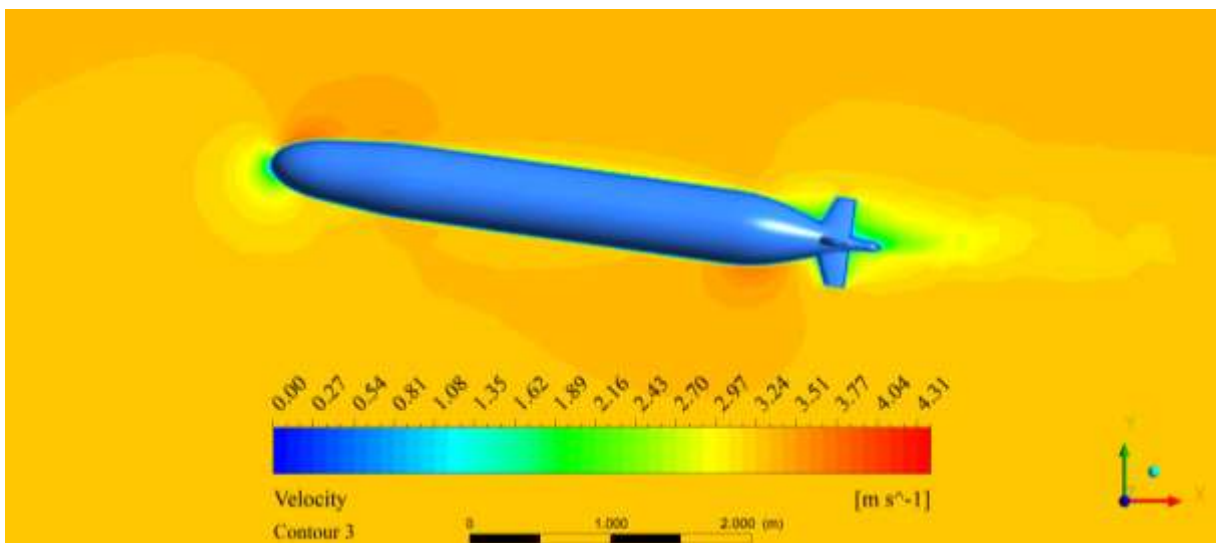
Hình 5.50 Phân bố vận tốc của tàu ngầm tại góc dạt 2 độ



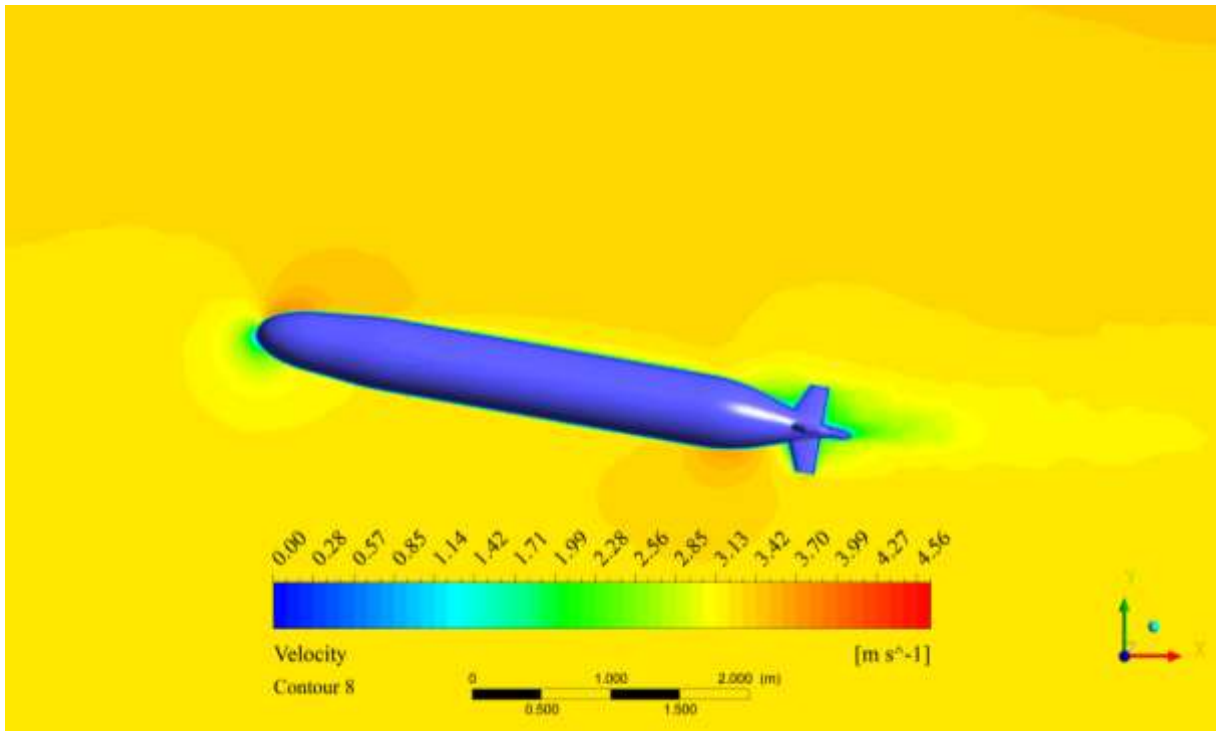
Hình 5.51 Phân bố vận tốc của tàu ngầm tại góc dạt 4 độ



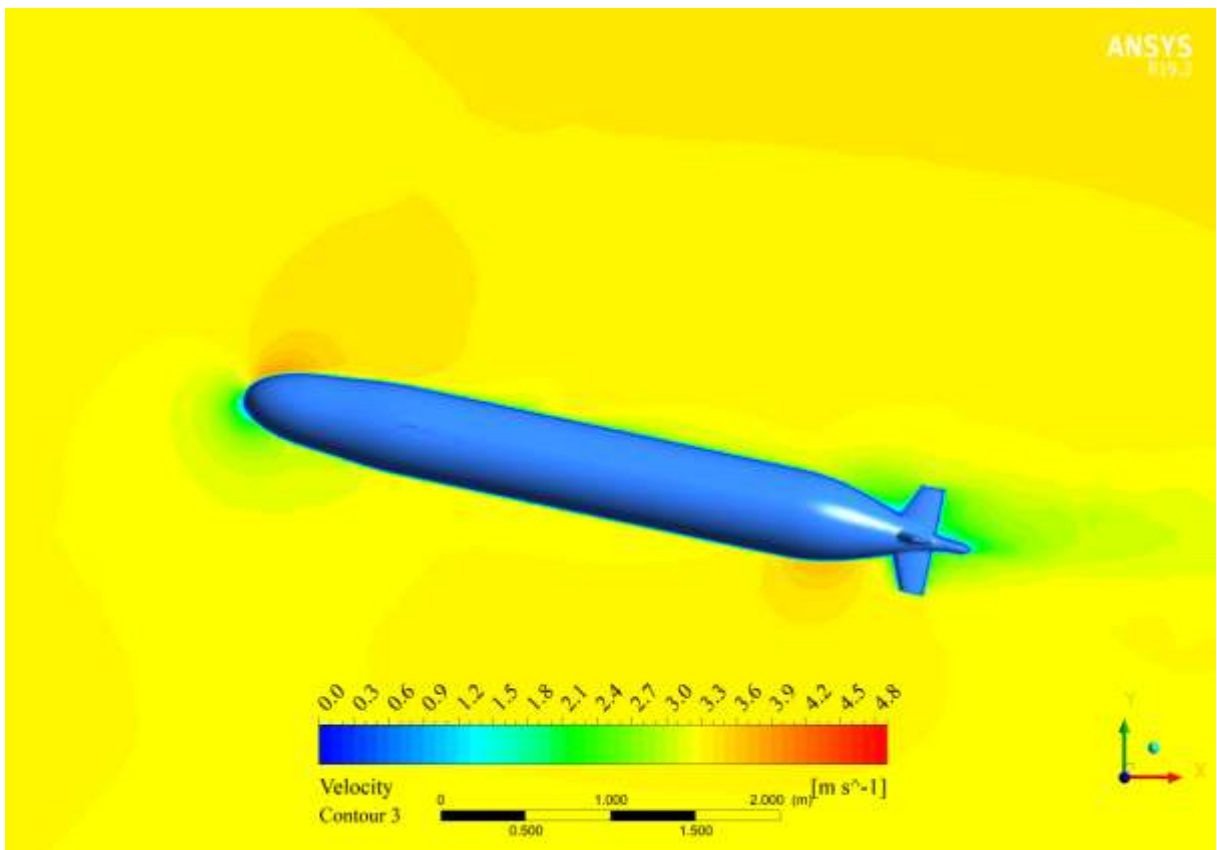
Hình 5.52 Phân bố vận tốc của tàu ngầm tại góc dạt 6 độ



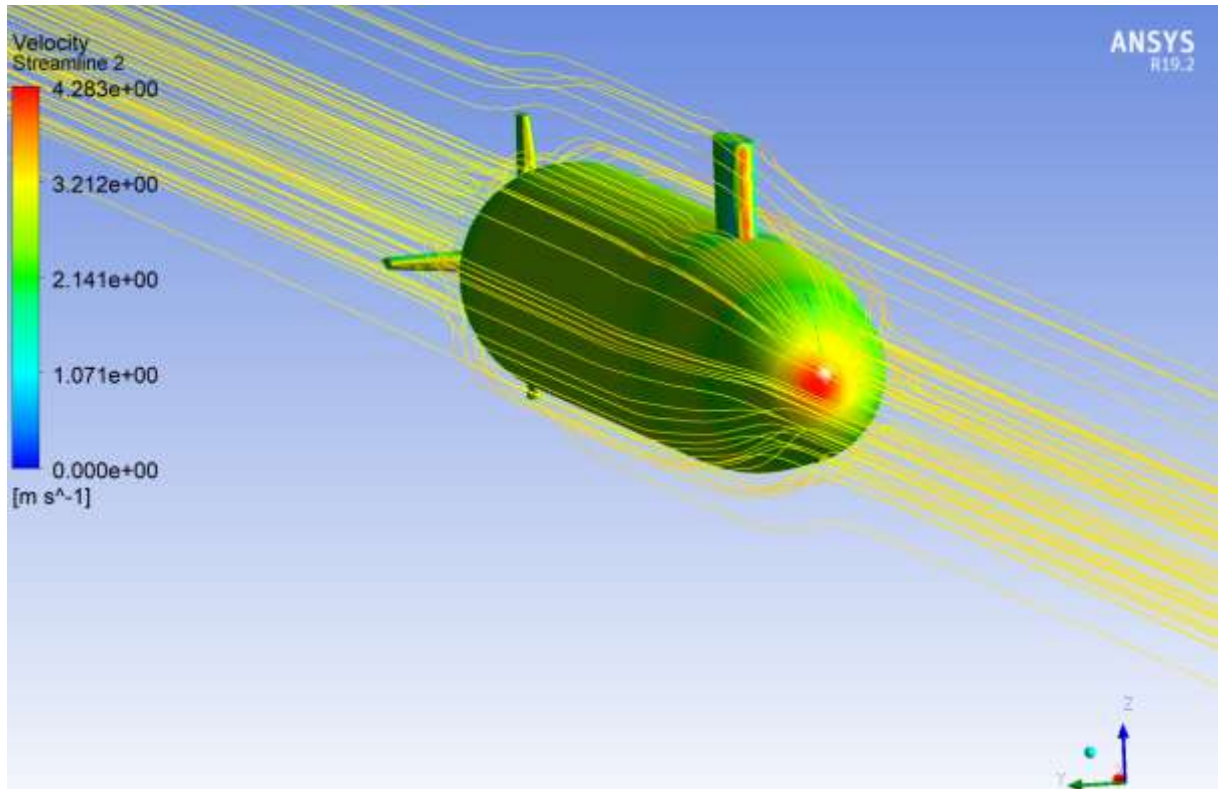
Hình 5.53 Phân bố vận tốc của tàu ngầm tại góc dạt 8 độ



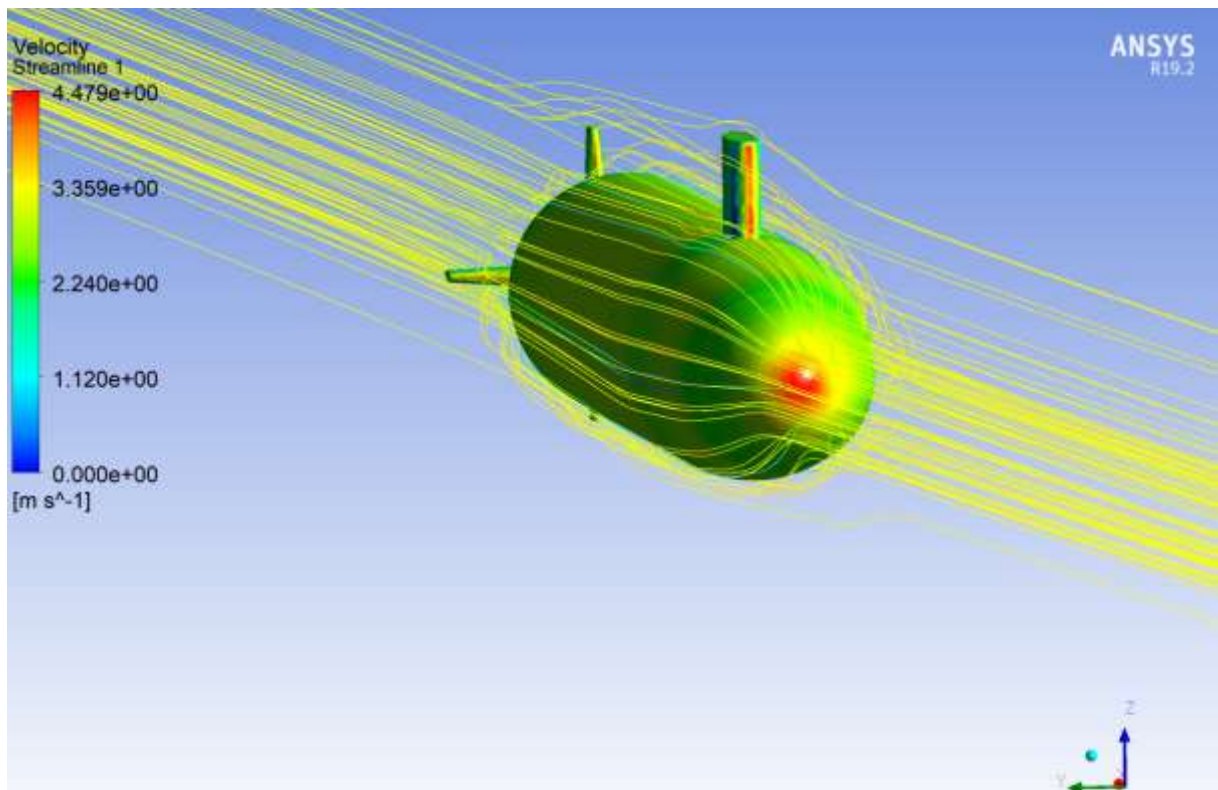
Hình 5.54 Phân bố vận tốc của tàu ngầm tại góc dạt 10 độ



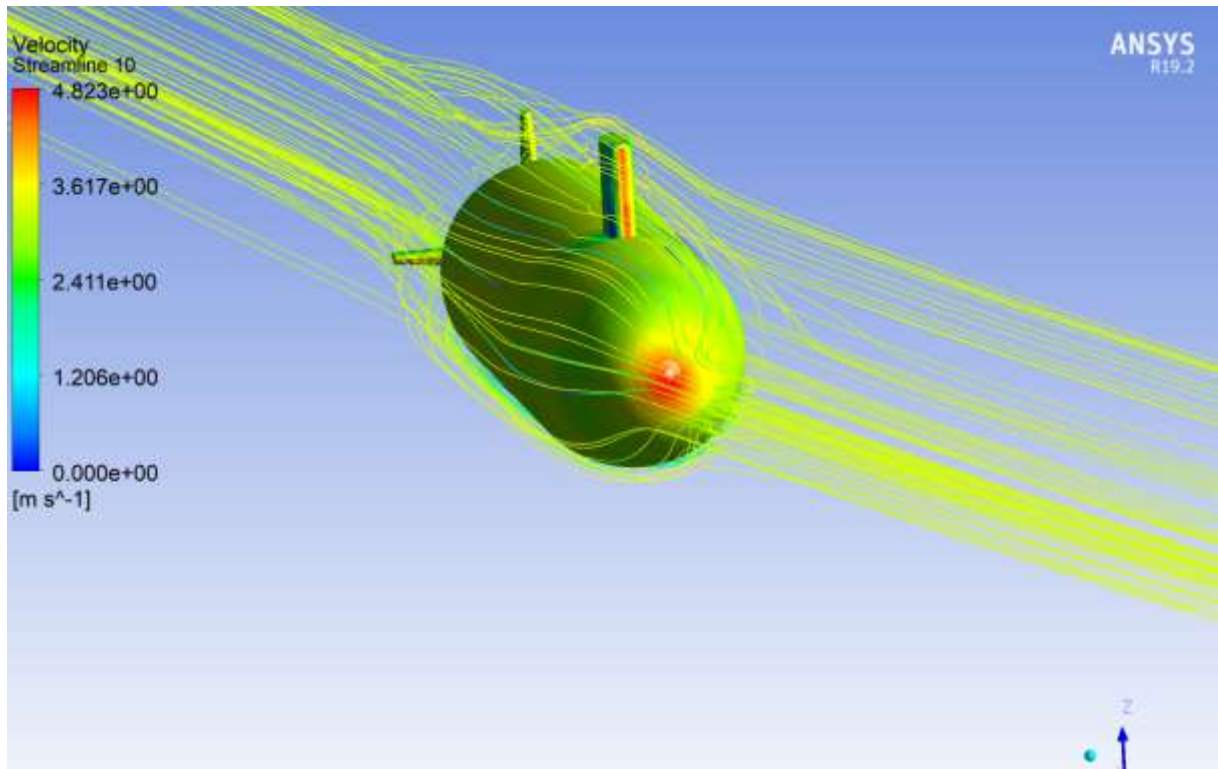
Hình 5.55 Phân bố vận tốc của tàu ngầm tại góc dạt 12 độ



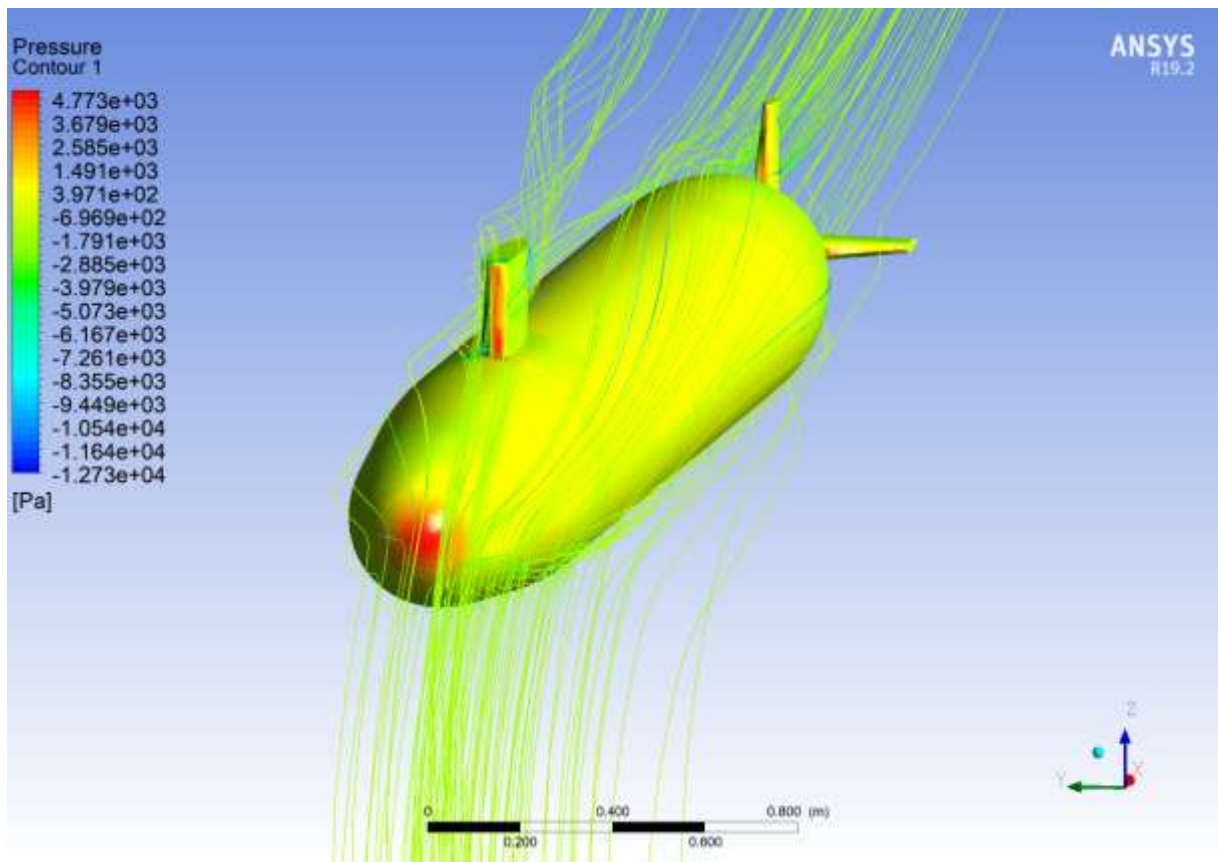
Hình 5.56 Phân bố đường dòng tại góc dạt 0 độ



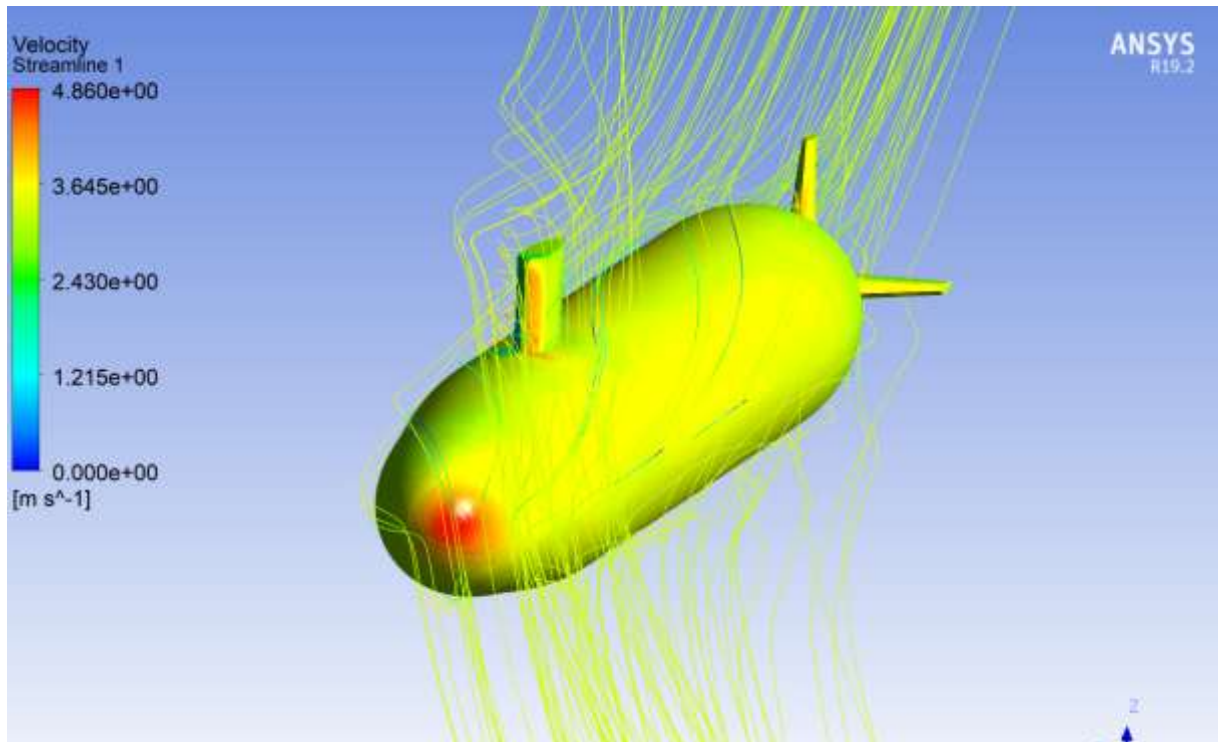
Hình 5.57 Phân bố đường dòng tại góc dạt 2 độ



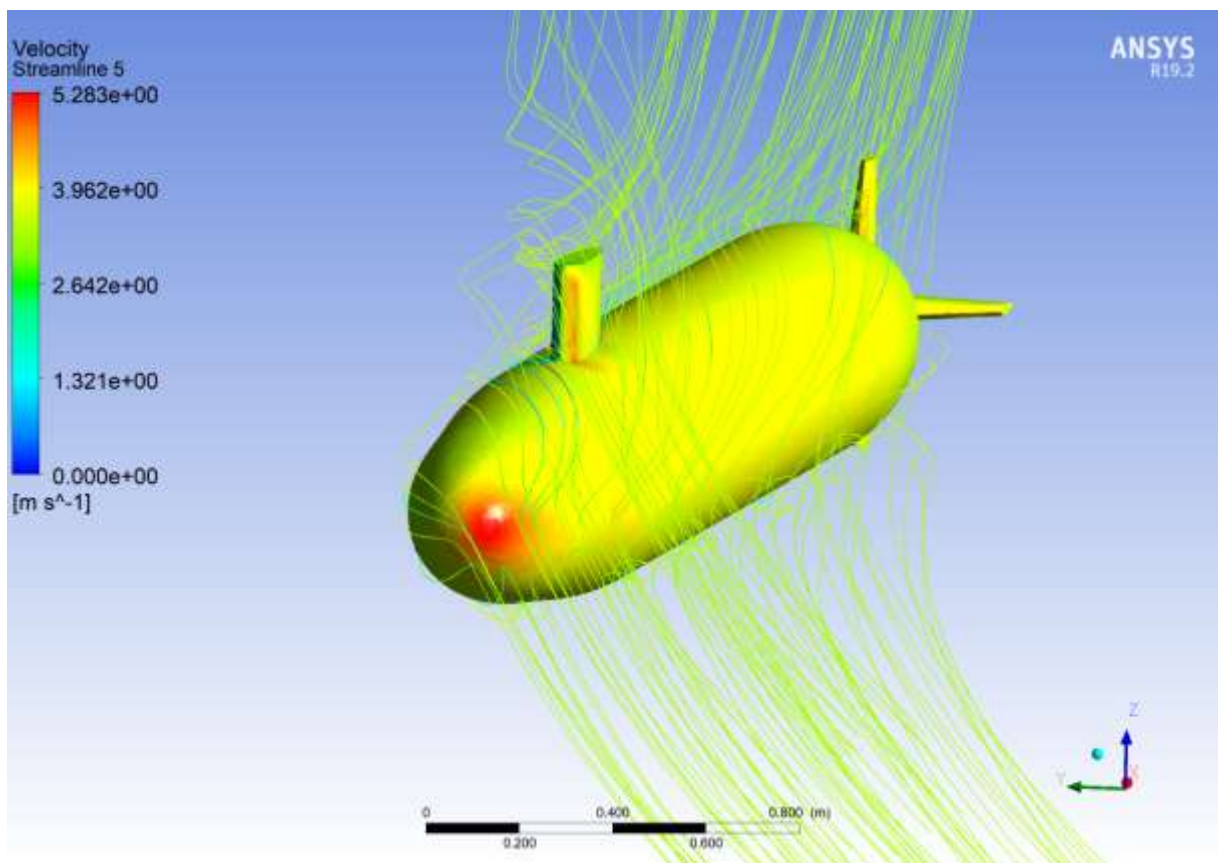
Hình 5.58 Phân bố đường dòng tại góc dạt 4 độ



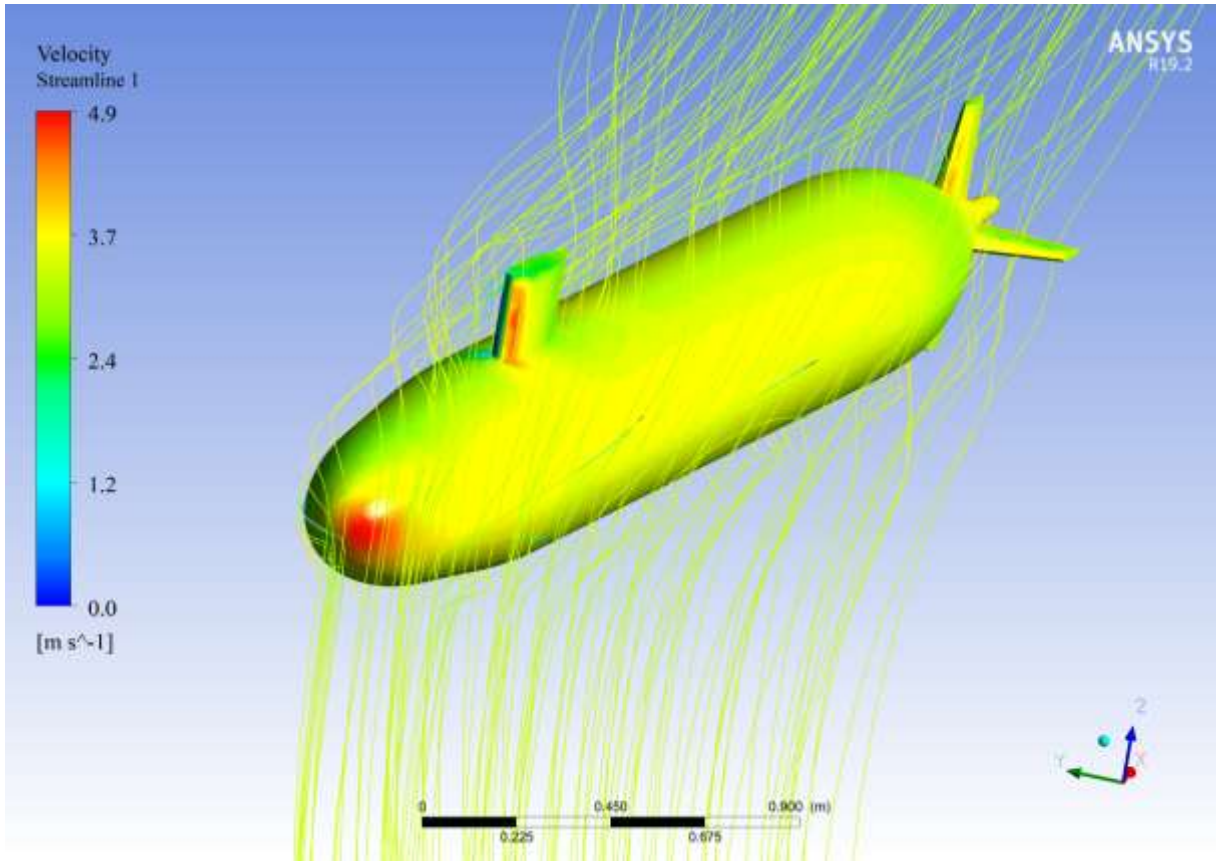
Hình 5.59 Phân bố đường dòng tại góc dạt 6 độ



Hình 5.60 Phân bố đường dòng tại góc dạt 8 độ



Hình 5.61 Phân bố đường dòng tại góc dạt 10 độ



Hình 5.62 Phân bố đường dòng tại góc dạt 12 độ

Nhận xét: Từ kết quả nghiên cứu cho thấy sự phân bố vận tốc xung quanh tàu tại các góc dạt 0 độ và 2 độ rất lớn, khi các góc dạt càng tăng thì phân bố vận tốc càng giảm đi và phân bố vận tốc giảm dần theo phương dọc tàu. Khi tăng góc dạt lên thì diện tích chắn nước càng lớn, điều này sẽ làm giảm sự phân bố vận tốc quanh tàu. Ngoài ra, việc tăng góc dạt nó cũng sẽ làm vận tốc ở thân giữa tàu, đuôi, phần vây cánh càng tăng

## **5.2 Tính toán thủy động lực học tác dụng lên tàu ngầm ở các góc chúi khác nhau**

### **5.2.1 Các thông số đầu vào**

Các thông số đầu vào được lấy dựa trên dữ liệu thực nghiệm của David Taylor Research Center đã thử nghiệm mô hình trong bể thử thực tế như: Các góc chúi, vận tốc mô hình. Mô hình được sử dụng trong mô phỏng là mô hình chất lỏng thực RANS với dòng chảy đều và mô hình rối  $k-\omega$  (SST). Mô hình này là mô hình giải hai phương trình dựa trên khái niệm độ nhớt rối [7]. Trong đó, một phương trình mô tả động năng rối và phương trình còn lại thể hiện tốc độ tiêu tán rối.

Bảng 5.6 Các thông số đầu vào

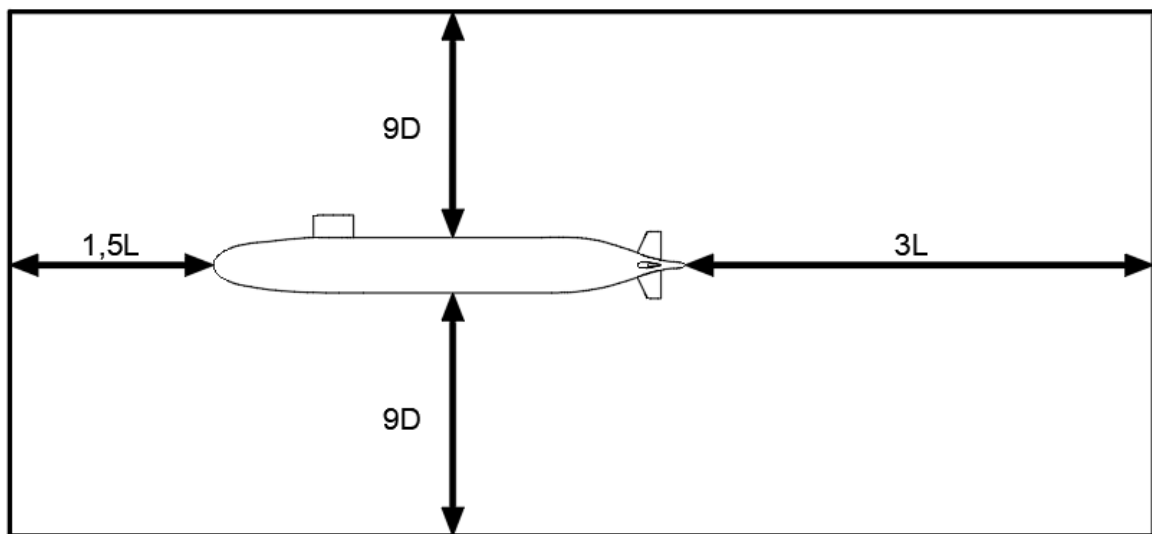
Thông số	Kí hiệu	Giá trị	Đơn vị
Vận tốc mô hình	V	3,3436	m/s
Góc chúi	$\beta$	0; 2; 4; 6; 8; 10	Độ
Độ nhớt động học	$\nu$	$1,003 \cdot 10^{-6}$	$m^2/s$
Khối lượng riêng của nước ngọt	$\rho$	998,2	$\frac{kg}{m^3}$

### 5.2.2 Các điều kiện tính toán

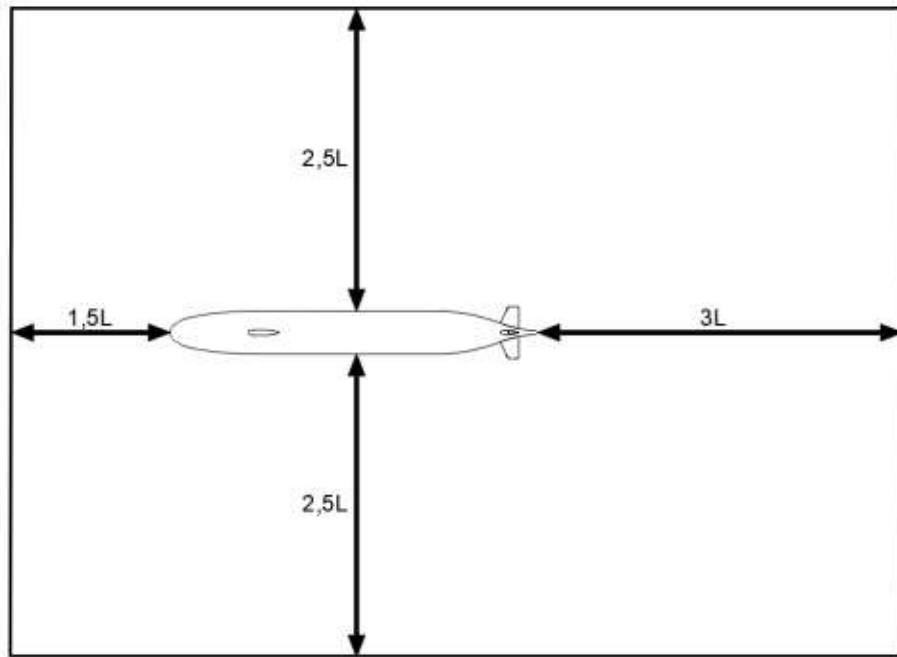
#### 5.2.2.1 Miền tính toán và điều kiện biên

##### ❖ Miền tính toán

- Khoảng cách từ tàu ngầm đến các vị trí của miền tính toán như sau:
- + Khoảng cách từ mũi tàu đến inlet: 1,5L
- + Khoảng cách từ đuôi tàu đến outlet: 3L
- + Khoảng cách từ tàu đến phía trên và phía dưới của bể thử ảo: 9D
- + Chiều rộng của bể thử ảo tính từ mặt phẳng dọc tâm tàu: 2,5L



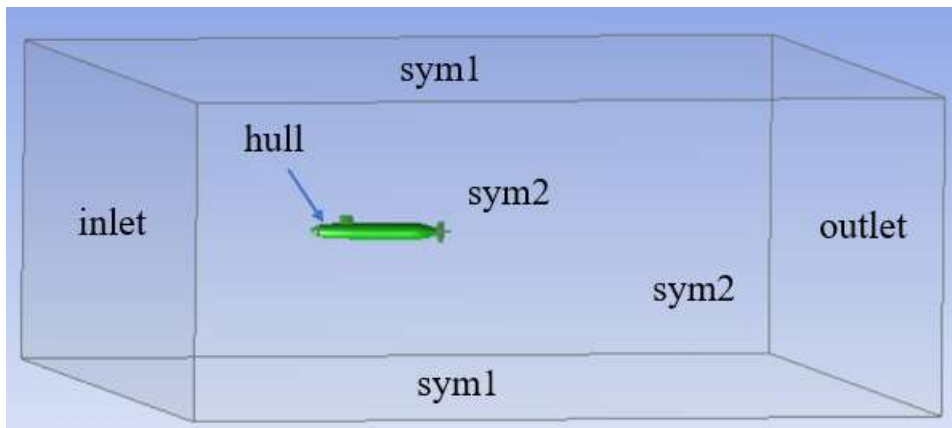
Hình 5.63 Miền tính toán hình chiếu đứng



Hình 5.64 Miền tính toán hình chiếu bằng

❖ Điều kiện biên:

- Inlet: Vận tốc vào lấy bằng vận tốc của tàu mô hình là  $V = 3,3436 \text{ m/s}$
- Outlet: Áp suất đầu ra ( $P = 0 \text{ Pa}$ )
- Hull: Thân tàu ngầm (wall)
- Hệ số nhớt động học của nước ngọt ở  $20^\circ\text{C}$ :  $\mu = 0,001003 \text{ m}^2/\text{s}$



Hình 5.65 Điều kiện biên

### 5.2.2.2 Các trường hợp tính toán

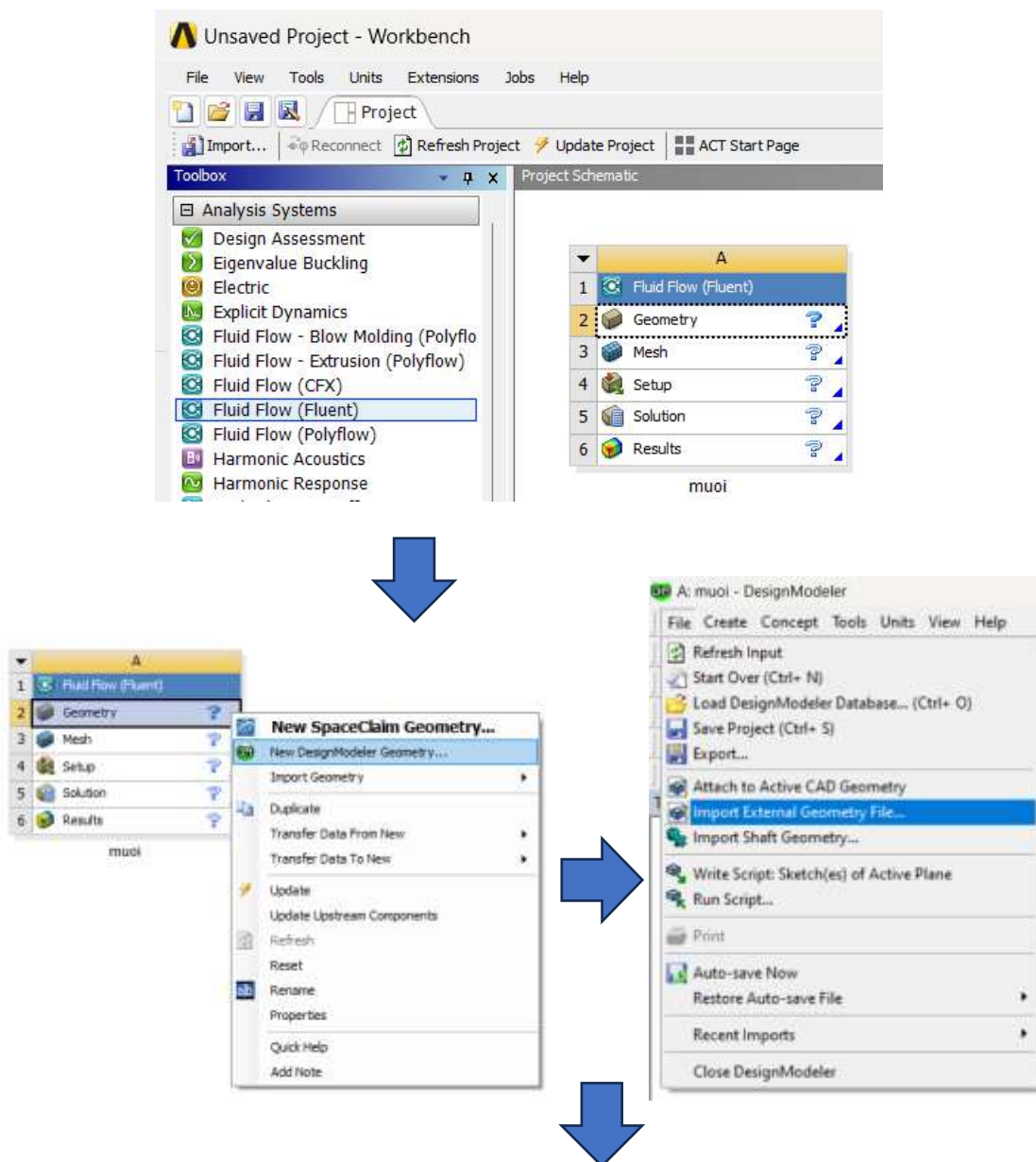
Tàu ngầm được tính ở các trường hợp có góc chúi khác nhau gồm: 0, 2, 4, 6, 8 và 10 trong bể thử ảo bằng phương pháp CFD sau đó được so sánh với kết quả thực nghiệm để kiểm tra tính chính xác.

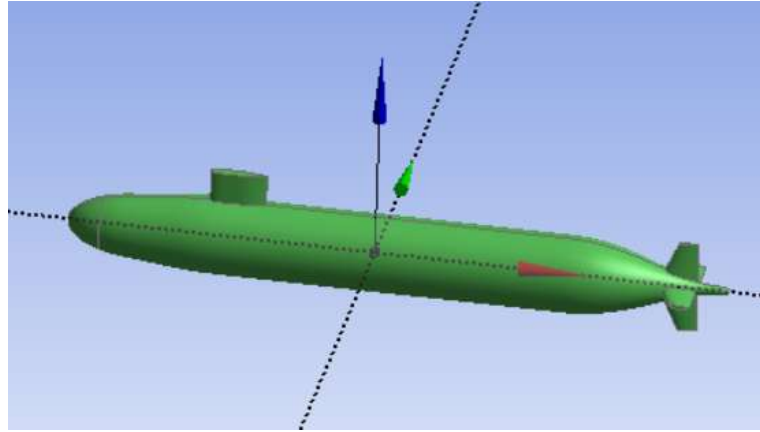
### **5.2.3 Quy trình tính toán mô phỏng tàu ngầm ở các góc chúi khác nhau bằng phần mềm Ansys – modul Fluid Flow (Fluent)**

#### **5.2.3.1 Thiết lập mô hình tính toán**

Mô hình 3D tàu ngầm được xây dựng bằng phần mềm Autocad sau đó được đưa vào phần mềm Ansys – modul Fluid Flow Fluent để mô phỏng như sau:

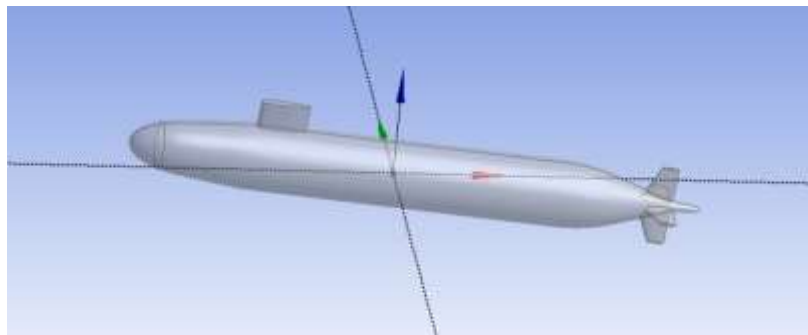
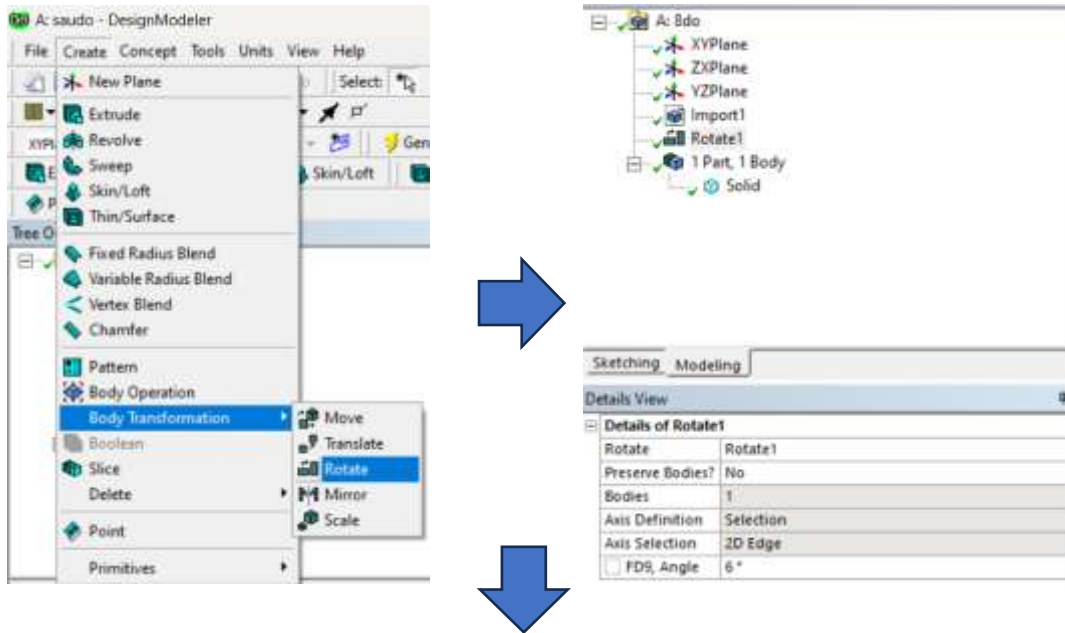
- Bước 1: Khởi động Ansys workbench 19.2 và chọn Modul Fluid Flow (Fluent)
- Bước 2: Kích chuột vào Geometry và chọn New Design Modeller Geometry
- Bước 3: Kích vào file và chọn Import External Geometry File để đưa mô hình 3D tàu ngầm vào phần mềm





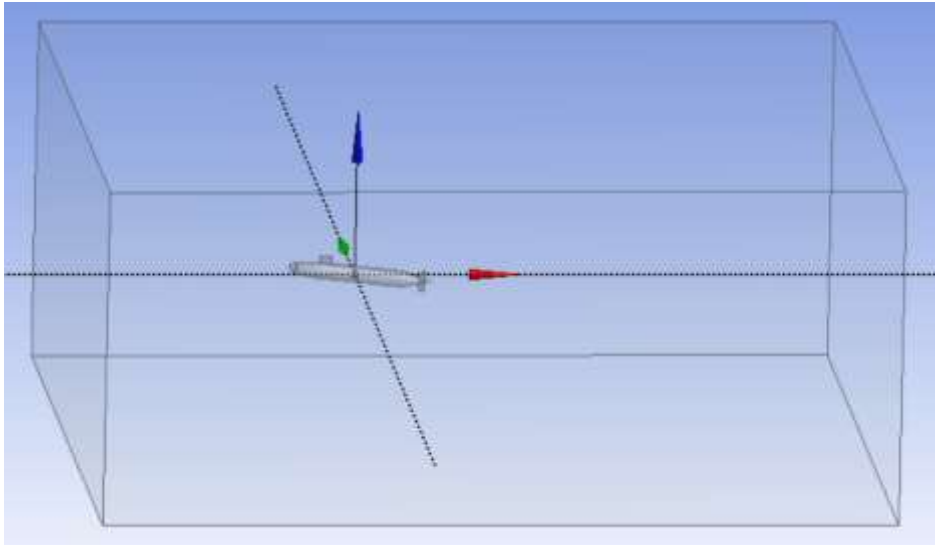
Hình 5.66 Các bước thiết lập mô hình tàu ngầm

- Bước 4: Chọn Create => Bodytransformation => Rotate để xoay tàu đến các góc chúi khác nhau, sau đó tại Axis Definition => chọn mô hình tàu ngầm, tại Axis Selection => chọn mặt phẳng, tại Angle => nhập góc chúi của tàu



Hình 5.67 Tàu ngầm tại góc chúi 6 độ

- Bước 5: Thiết lập miền tính toán  
Kích thước miền tính toán được dựa trên hiệp hội bể thử quốc tế ITTC – 2008.  
Kích thước của bể thử ảo là: L.B.H = 23,950.5,508.18,508 (m)

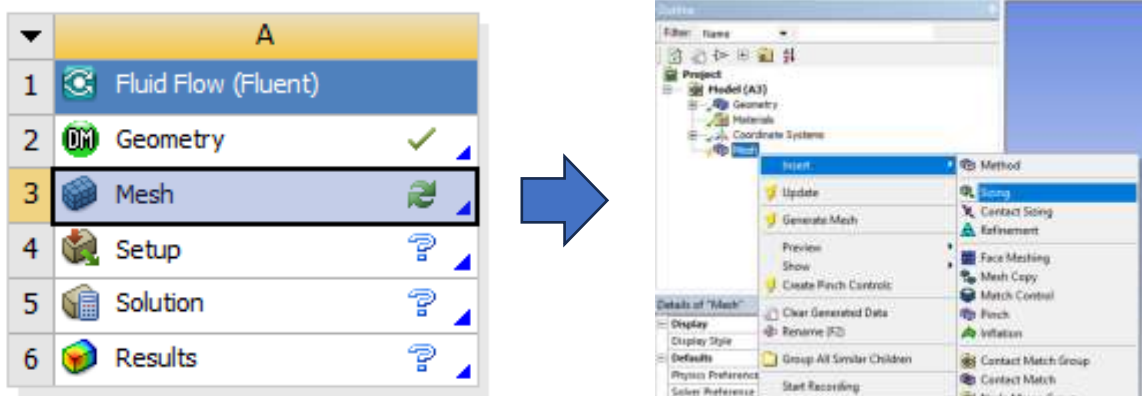


Hình 5.68 Miền tính toán

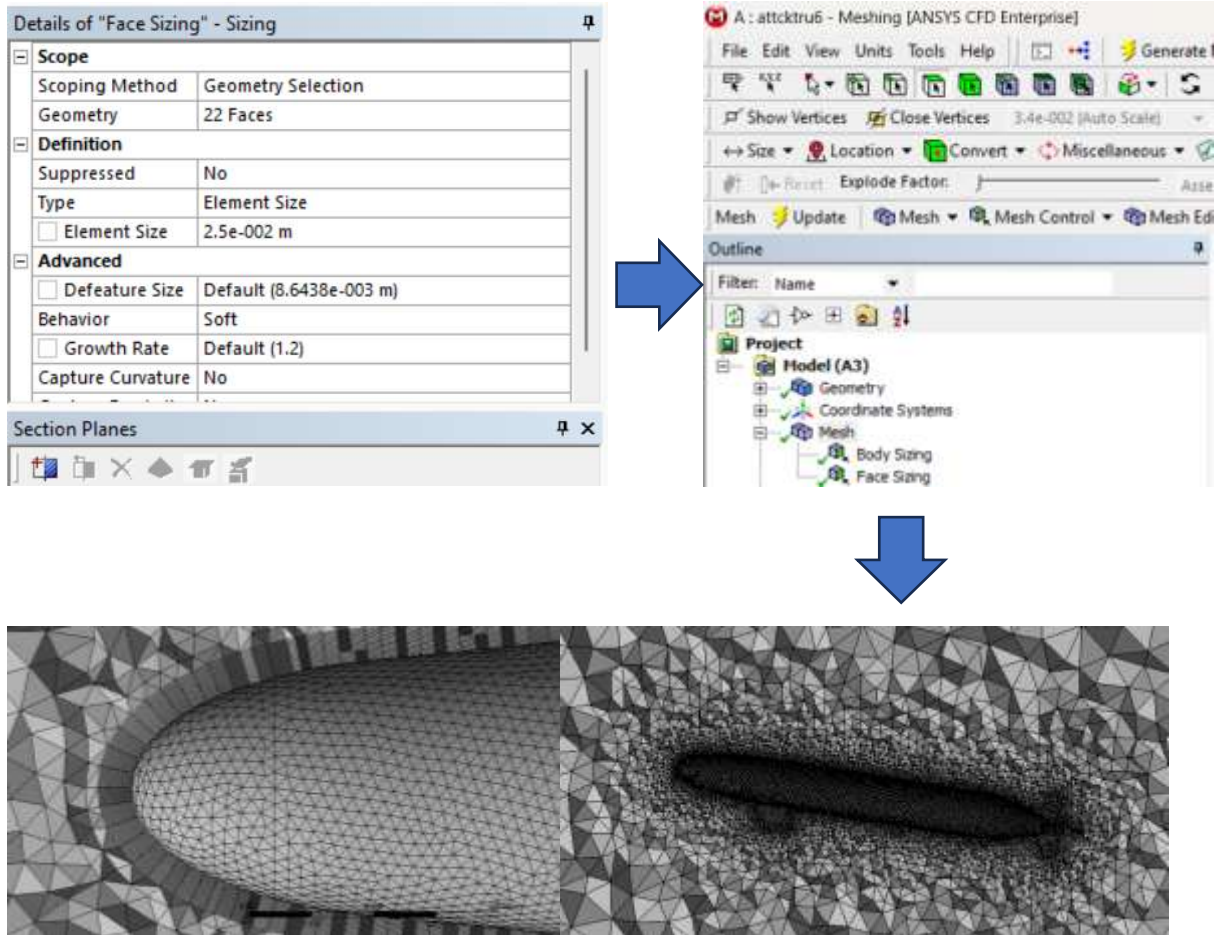
### 5.2.3.2 Quy trình chia lưới (mesh)

Chất lượng lưới ảnh hưởng đến độ chính xác, khả năng hội tụ và tốc độ tính toán do đó chúng ta phải chia lưới thật chính xác và kiểm tra theo các tiêu chuẩn đánh giá của lưới. Quy trình chia lưới như sau:

- Bước 1: Kích đúp vào Mesh để tiến hành chia lưới
- Bước 2: Tiến hành chia lưới cho các khối (body sizing) và các mặt (face sizing)
- Bước 3: Chọn Generate mesh để tạo lưới



Hình 5.69 Các bước chia lưới tính toán



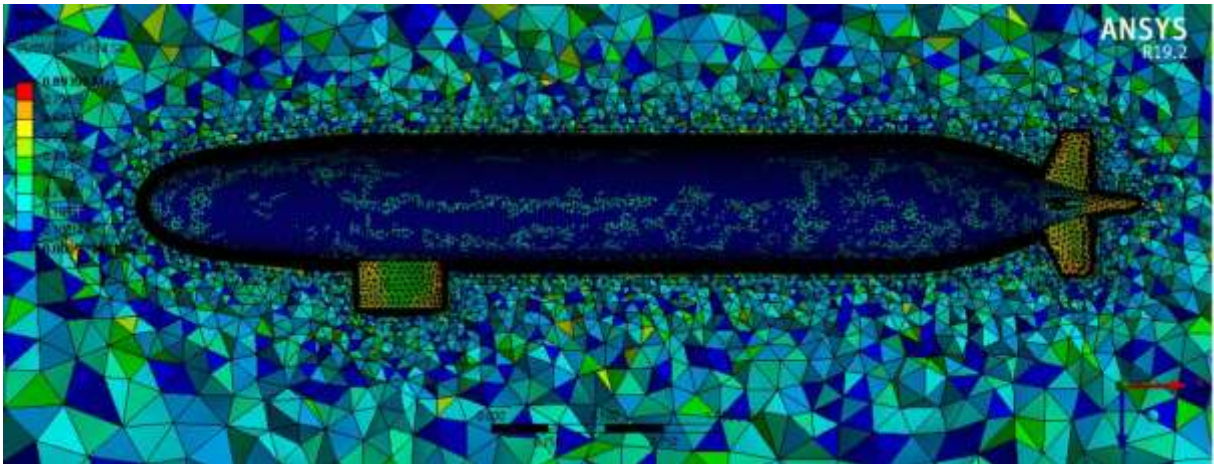
Hình 5.70 Các bước chia lưới tính toán

- Bước 4: Kiểm tra kích thước lưới
  - + Max Skewness: 0,894
  - + Min Skewness: 0,001

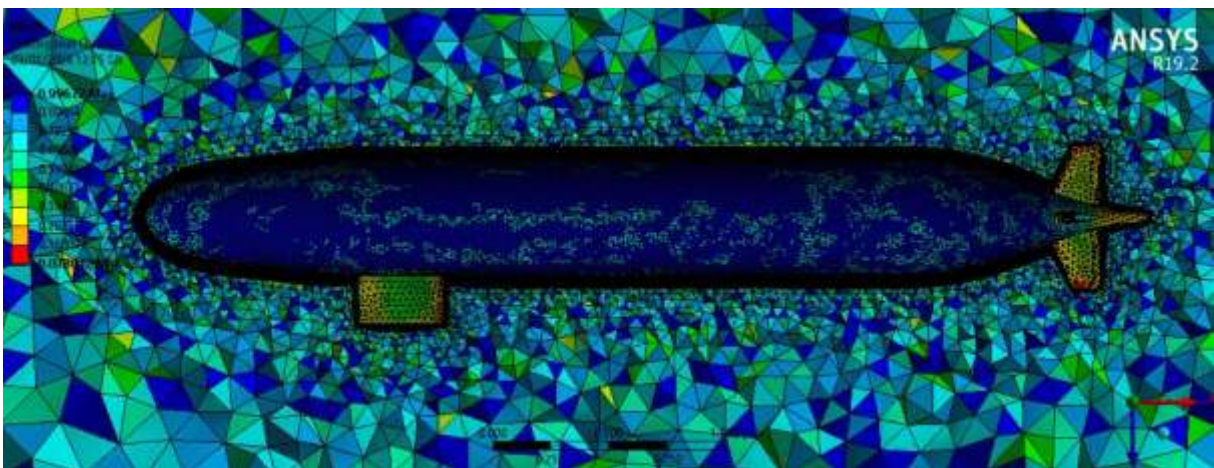
Bảng 5.7 Bảng so sánh giữa kích thước lưới tính toán và tiêu chuẩn Skewness

Skewness			
	CFD	Tiêu chuẩn (Acceptable)	Tiêu chuẩn (Excellent)
Min	0,001	0,8	0
Max	0,894	0,94	0,25

→ Chất lượng lưới nằm trong khoảng chấp nhận được



Hình 5.71 Kích thước lưới tính toán Skewness

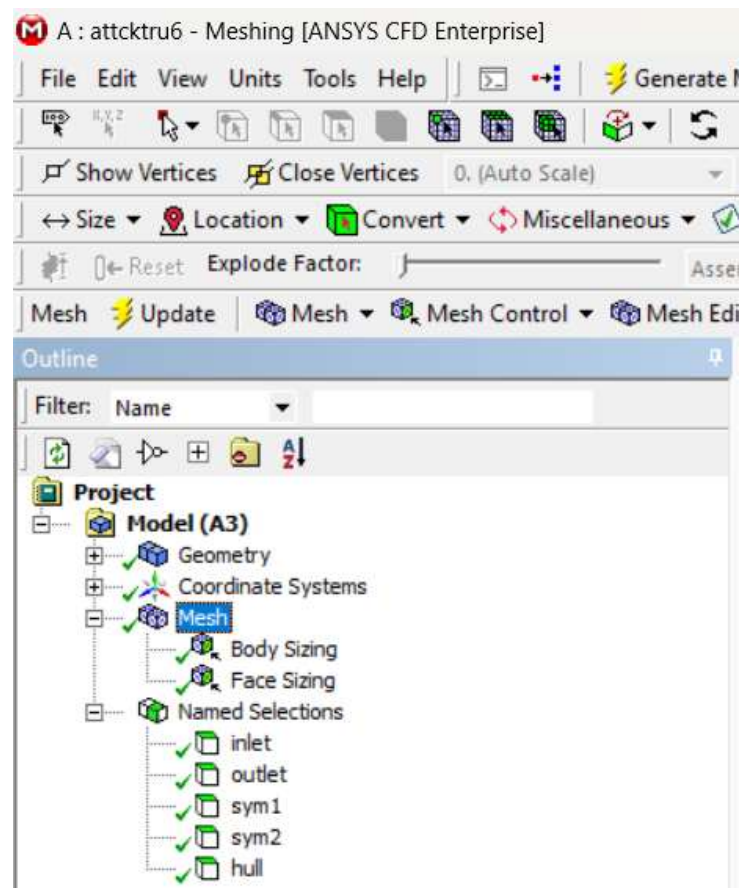


Hình 5.72 Kích thước lưới tính toán Orthogonal

#### Bước 5: Thiết lập biên và tường của miền tính toán

Tiến hành đặt tên cho các biên và tường gồm: Inlet, outlet, sym1, sym2, hull sau đó bấm Update

- + Inlet: Mặt phẳng thiết lập vận tốc đầu vào
- + Outlet: Mặt phẳng thiết lập thông số đầu ra
- + Sym1: Mặt phẳng ở hai bên mạn trái và phải
- + Sym2: Mặt phẳng phía trên và phía dưới
- + Hull: Biên dạng tàu ngầm DARPA SUBBOFF



Hình 5.73 Tên của các biên và tường

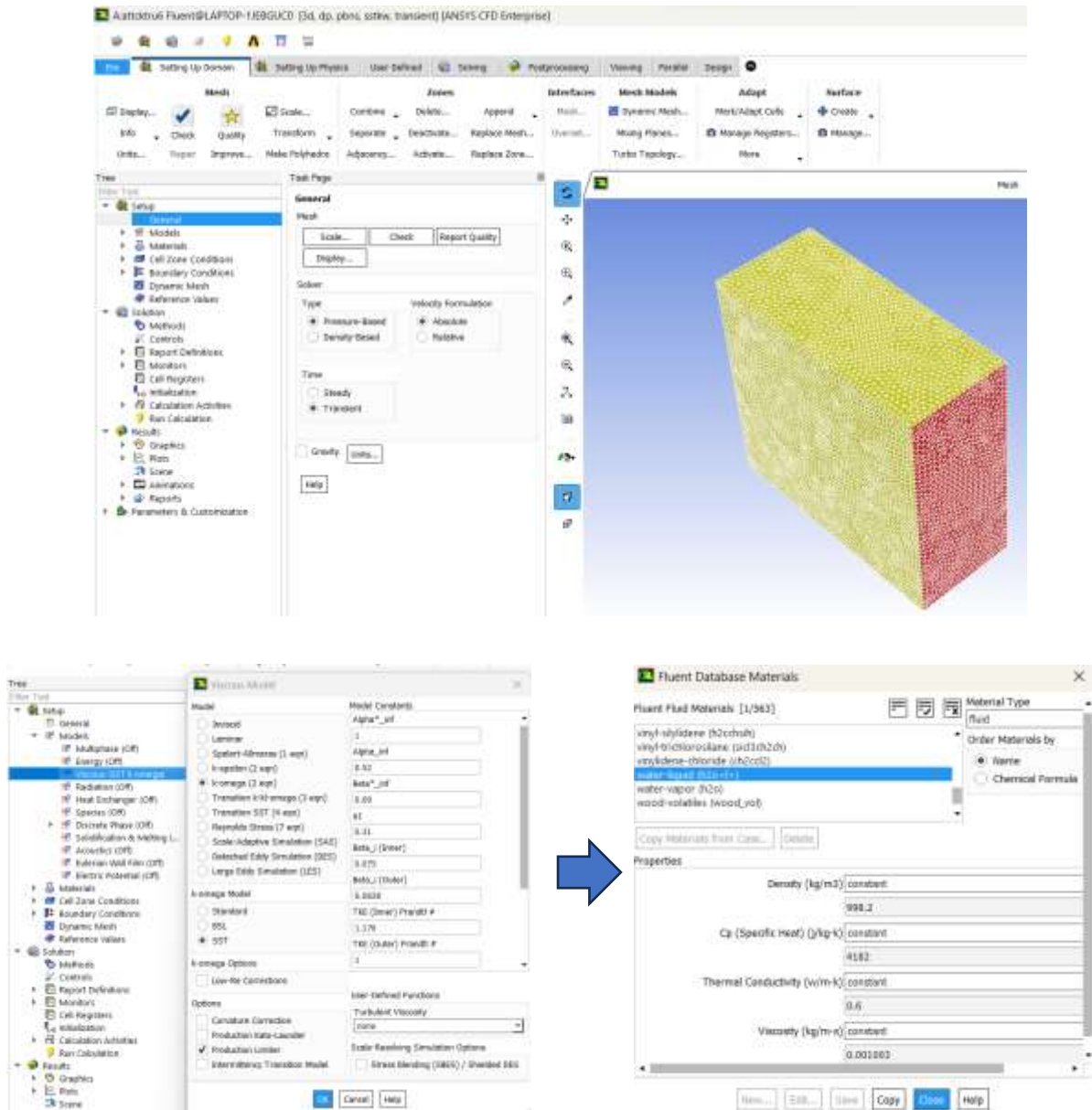
### 5.2.3.3 Thiết lập tính toán trong Fluent

**Bước 1:** Kích đúp chuột vào Setup và giao diện Fluent Launcher xuất hiện

**Bước 2:** Chọn Double Precision và bấm OK

**Bước 3:** Tiến hành thiết lập các thông số để tính toán mô phỏng

- Lựa chọn mô hình tính toán: Model → Viscous → Edit → xuất hiện hộp thoại Viscous Model → k-omega (2eqn) → SST → bấm OK để hoàn thành
- Chọn môi trường để tính toán: Chọn Materials → Fluid → Create/Edit → Xuất hiện hộp thoại Fluent Database Materials → chọn Fluent Fluid Materials → Water-liquid (h2o <1>) → Copy để thêm môi trường nước sau đó bấm Close tất cả để hoàn thành



Hình 5.74 Thiết lập môi trường và mô hình tính toán

- Sau khi chọn môi trường tính toán ở phần Materials, ta bấm vào Cell Zone Conditions để thay thế các môi trường cũ bằng Water-liquid (h2o <1>)

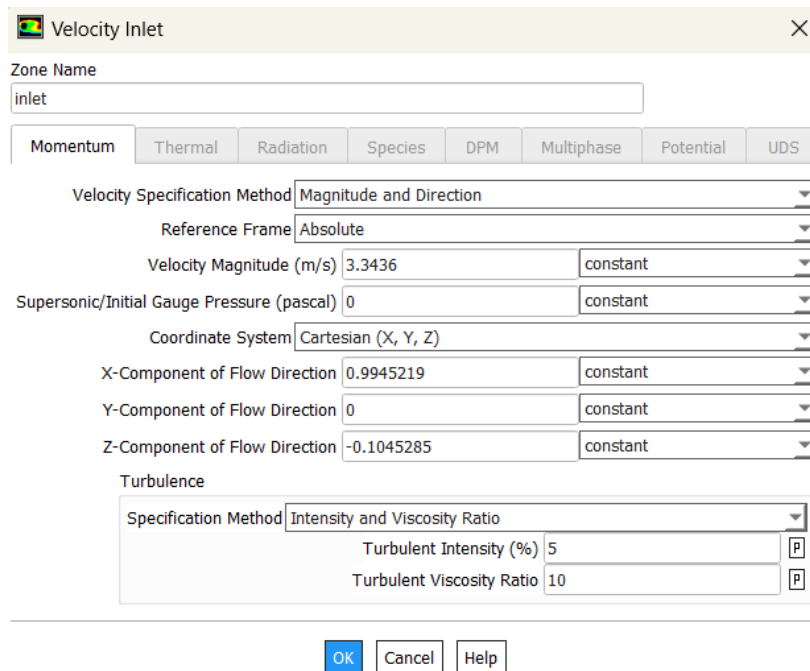
❖ **Thiết lập các điều kiện biên**

- **Thiết lập điều kiện biên cho dòng vào:**

- + Chọn Boundary Conditions → inlet → Chọn Type (Velocity inlet) → chọn Edit → xuất hiện hộp thoại Velocity inlet
- + Tại Velocity Magnitude [m/s] ta nhập 3,3436 sau đó bấm Apply và chọn Close để hoàn thành

- **Thiết lập điều kiện biên cho dòng ra:**

- + Chọn Boudary Conditions → outlet → Chọn Type (Pressure outlet) → chọn Edit → xuất hiện hộp thoại Pressure outlet → nhập P = 0 (Pascal) sau đó bấm Apply và chọn Close để đóng hộp thoại
- **Thiết lập các điều kiện biên còn lại như sau:**
  - + Sym1, Sym2: Symmetry
  - + Hull: Wall
  - + Trong Reference Values ta thiết lập các giá trị như: diện tích (Area), vận tốc (Velocity [m/s]) để tính toán các lực và moment
  - + Tiếp theo, ta lựa chọn phương pháp giải → chọn Method và tiến hành thiết lập phương pháp



Hình 5.75 Thiết lập các điều kiện biên

- **Thiết lập điều kiện hội tụ của bài toán:**
  - + Kích đúp vào Monitors → xuất hiện hộp thoại Residual Monitors và chọn các thông số như hình vẽ
  - + Sau đó bấm OK để hoàn thành

#### **Bước 4:** Tiến hành chạy chương trình

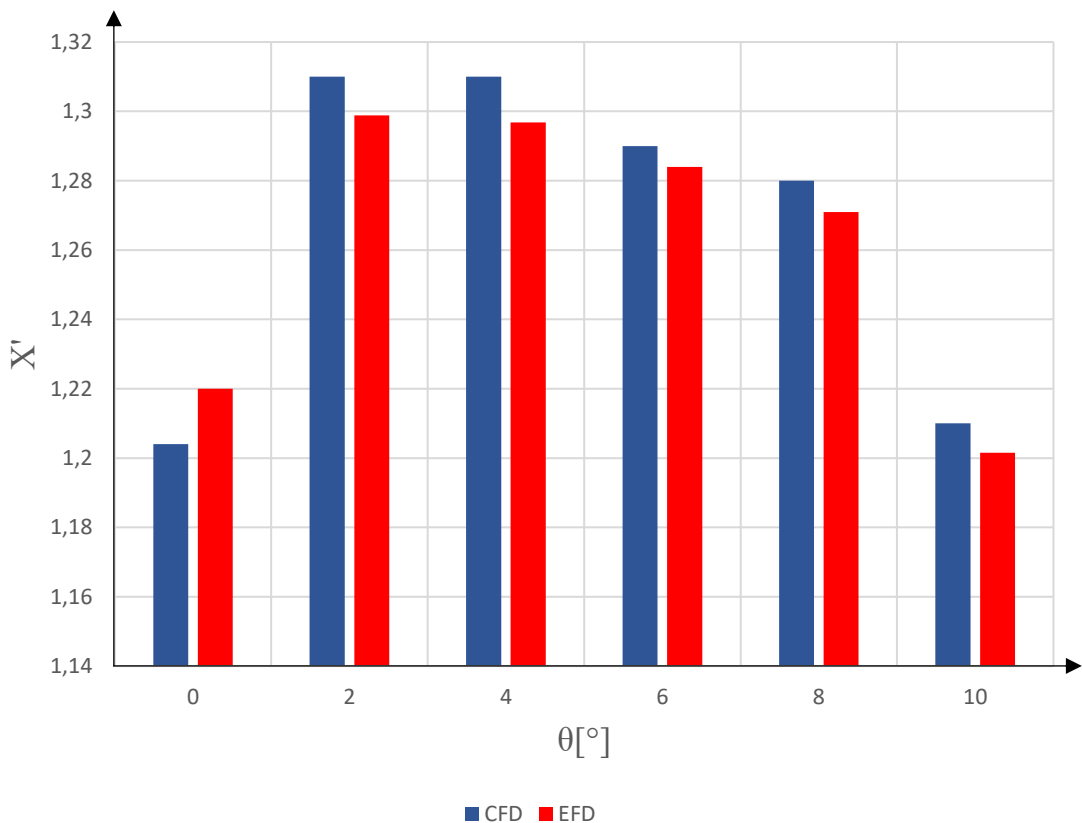
- Chọn Initialization → Hybrid Initialization → chọn Initialize

- Tiếp theo, chọn Run Calculation → Time Step Size (s): 10 → Number of Time Steps: 100 → chọn Calculate để tiến hành tính toán

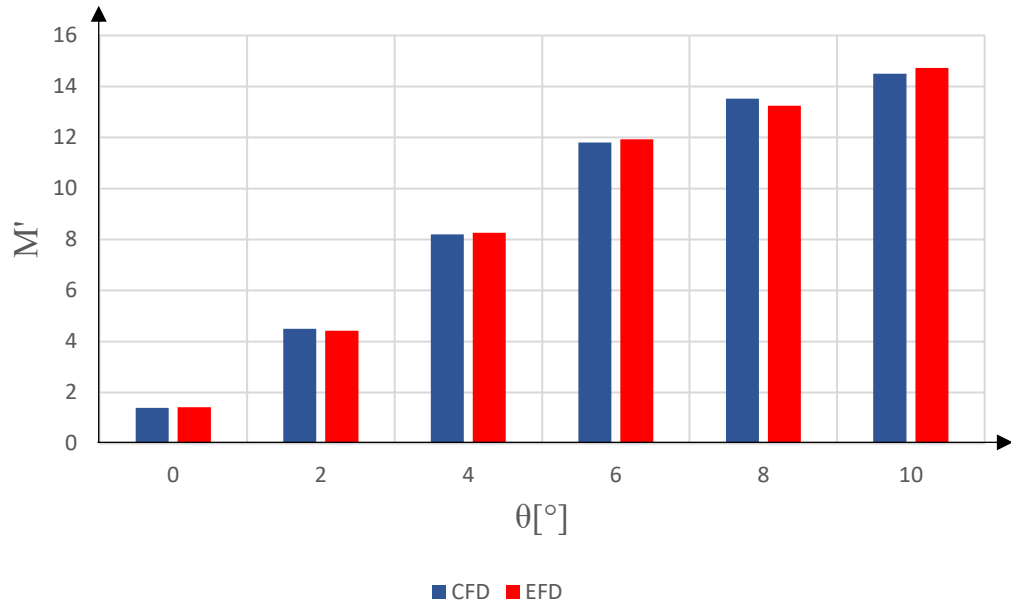
### 5.2.4 Kết quả và bàn luận

Bảng 5.8 Kết quả tính toán từ CFD

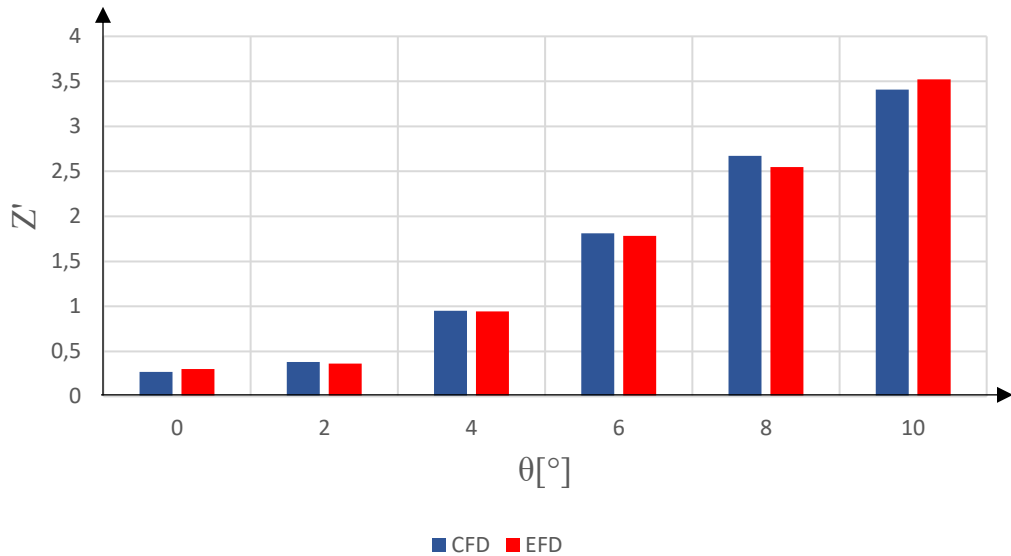
$\theta$ [°]	X' (CFD)	X' (EFD)	Sai số (%)	Z' (CFD)	Z' (EFD)	Sai số (%)	M' (CFD)	M' (EFD)	Sai số (%)
0	-1,204	-1,220	0,879	-0,273	-0,305	10,720	1,400	1,421	1,500
2	-1,310	-1,299	1,643	-0,383	-0,364	4,961	4,500	4,423	1,711
4	-1,310	-1,297	1,486	-0,950	-0,943	0,737	8,200	8,262	0,756
6	-1,290	-1,284	1,102	-1,810	-1,782	1,547	11,800	11,925	1,059
8	-1,280	-1,271	0,96	-2,672	-2,547	4,678	13,525	13,247	2,055
10	-1,210	-1,202	0,661	-3,410	-3,522	3,284	14,500	14,722	1,531



Hình 5.76 Đồ thị hệ số lực dọc tàu ngầm

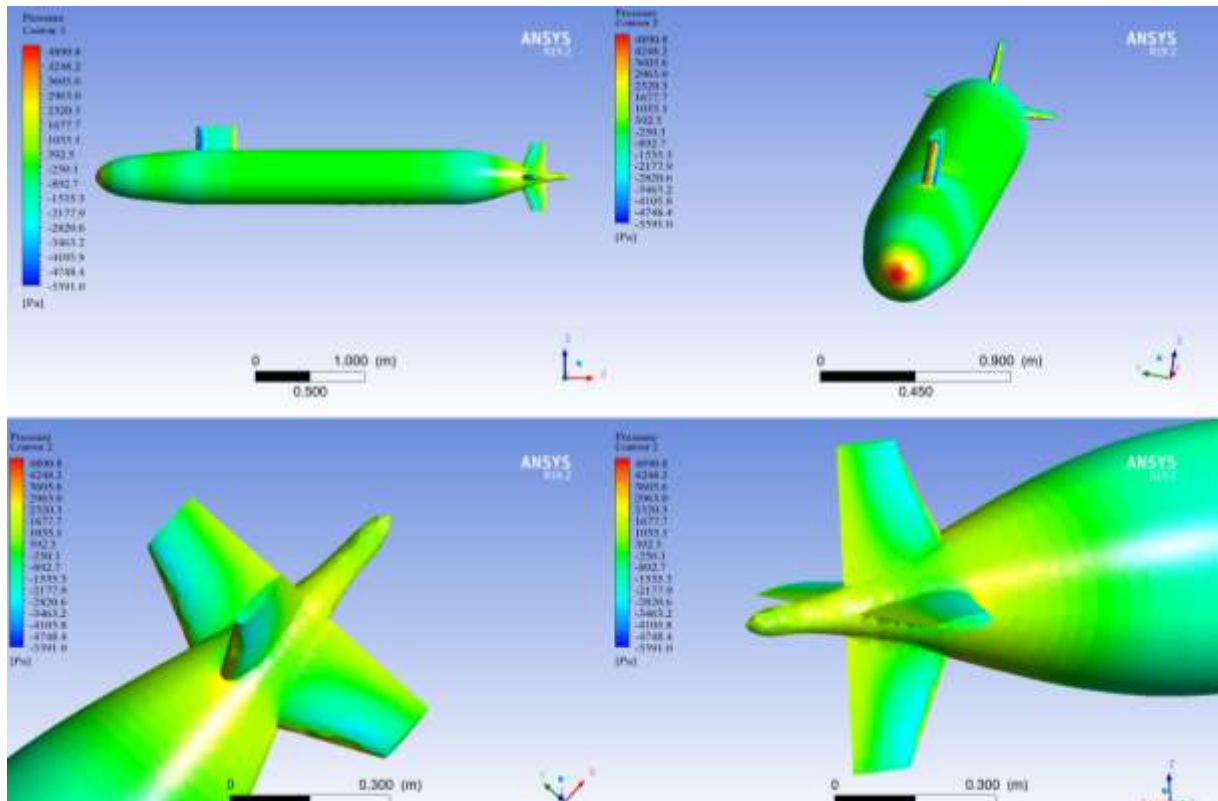


Hình 5.77 Đồ thị hệ số momen lắc dọc tàu ngầm

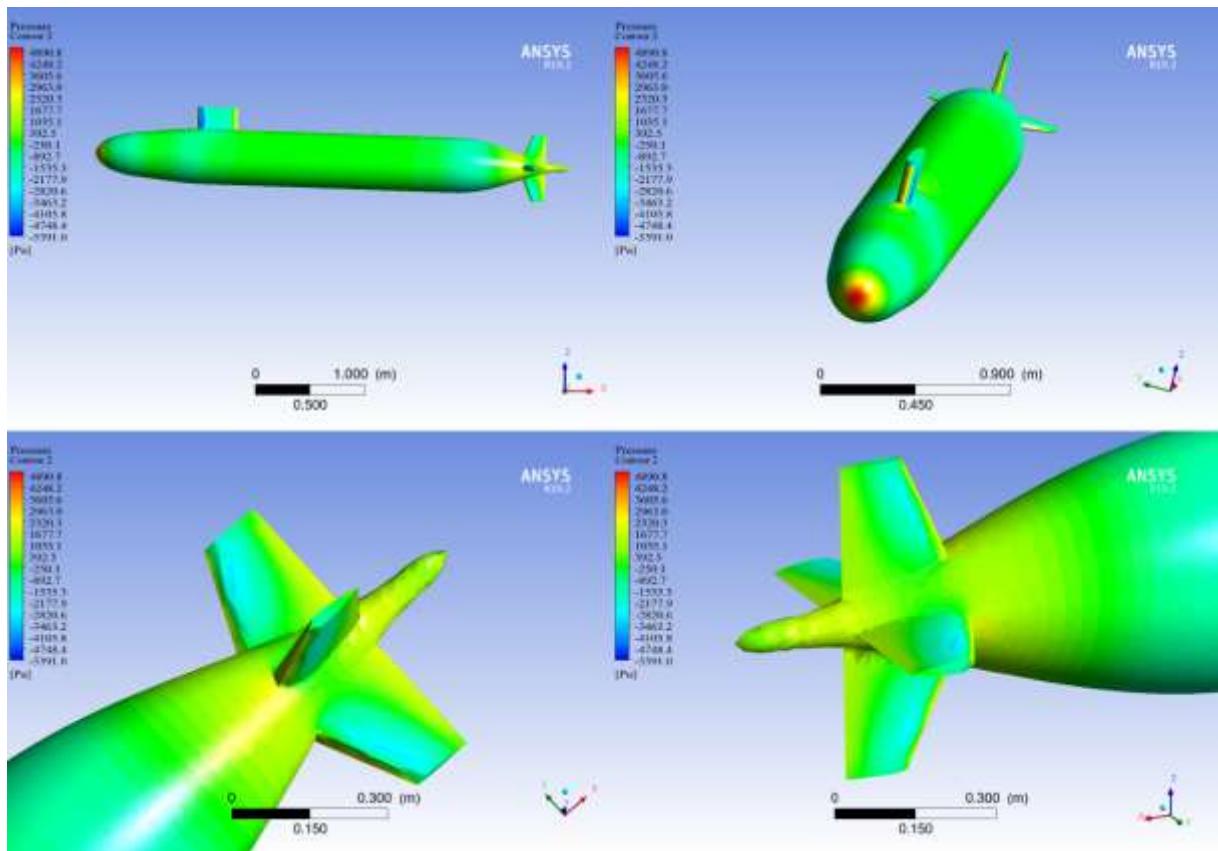


Hình 5.78 Đồ thị hệ số lực nâng tàu ngầm

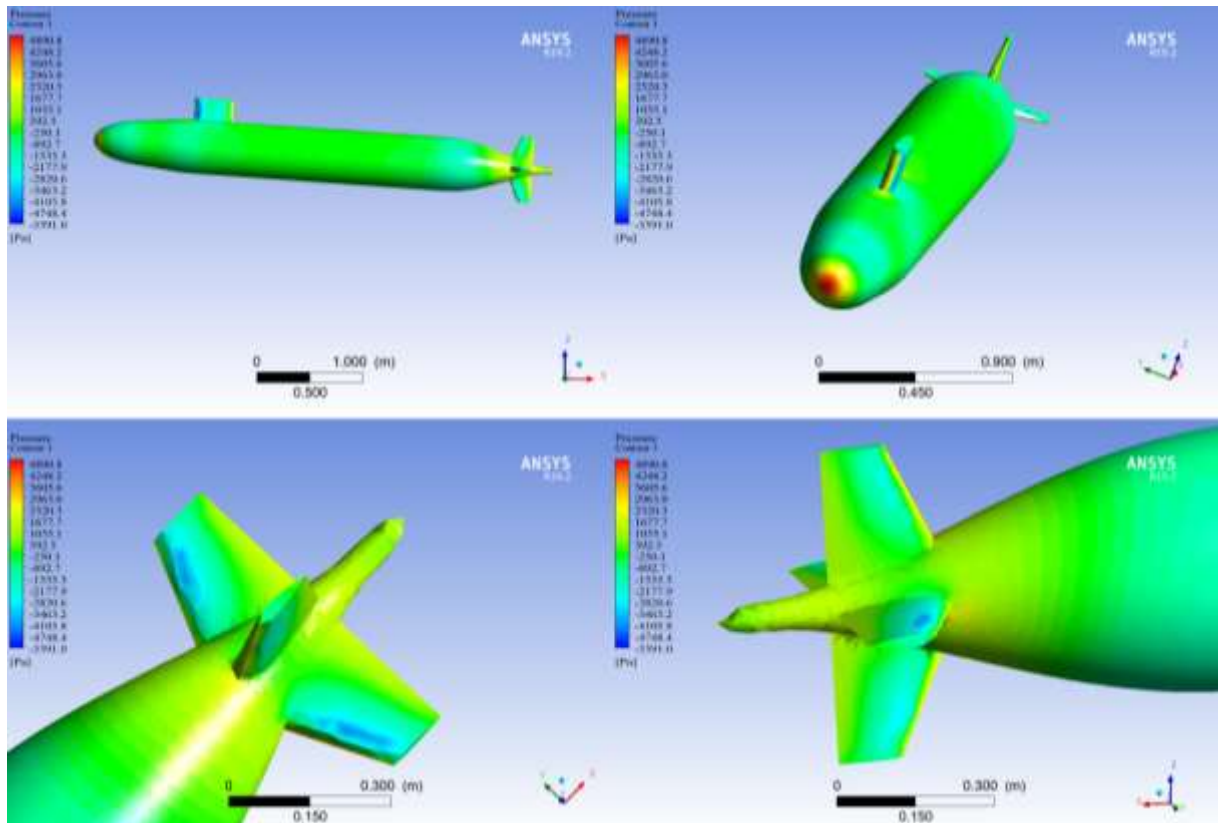
Từ kết quả tính toán ta có thể thấy: Khi góc chúi càng tăng, lực thủy động tác động lên tàu ngầm theo phương dọc tàu X càng giảm do ở trường hợp này góc chúi hướng lên trên và áp suất của phần thân trước tăng. Momen lắc dọc tàu M cũng cho thấy sự gia tăng rõ rệt khi tăng góc chúi. Điều này cũng dễ hiểu khi tàu ở các góc chúi và áp lực nước biển tác động thẳng vào thân tàu một góc  $\theta$  làm cho tàu bị lắc dọc mạnh và điều này có thể chứng minh ở phân bố áp suất trên thân tàu ngầm.



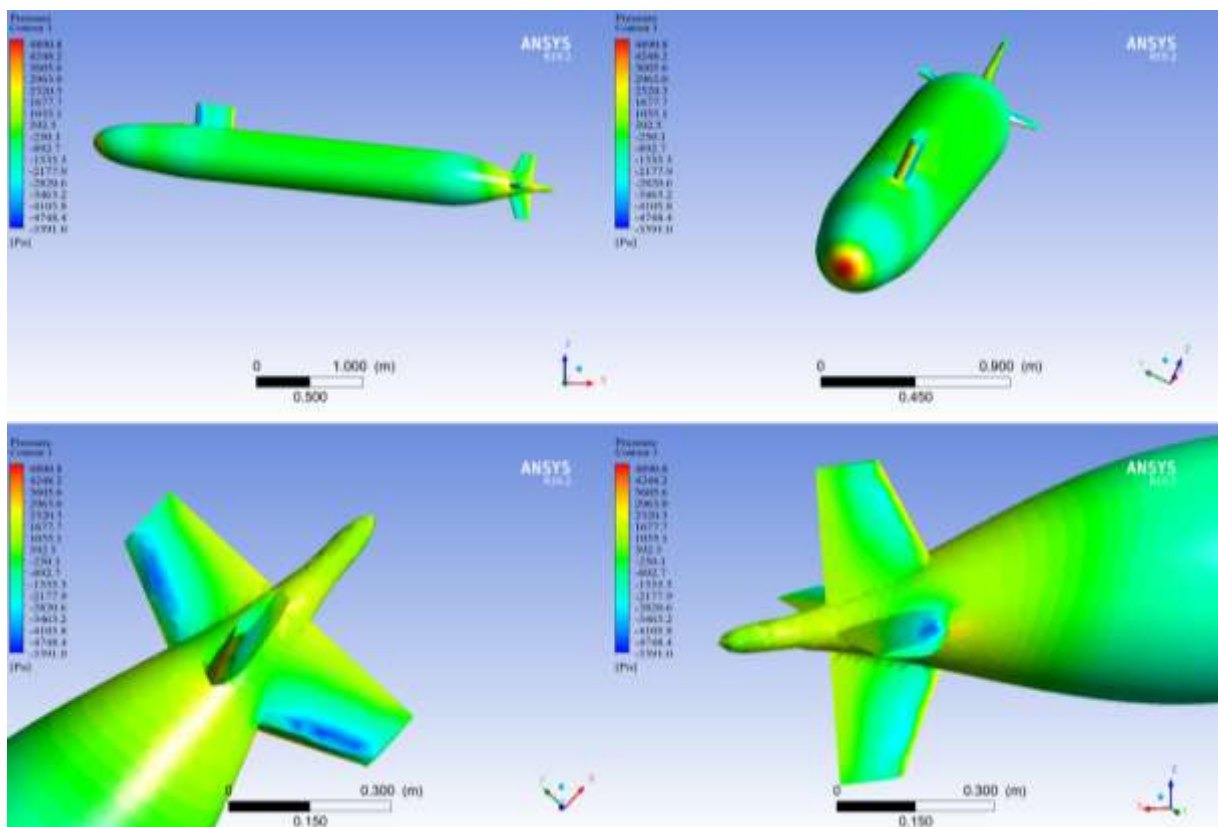
Hình 5.79 Phân bố áp suất của tàu ngầm tại góc chúi 0 độ



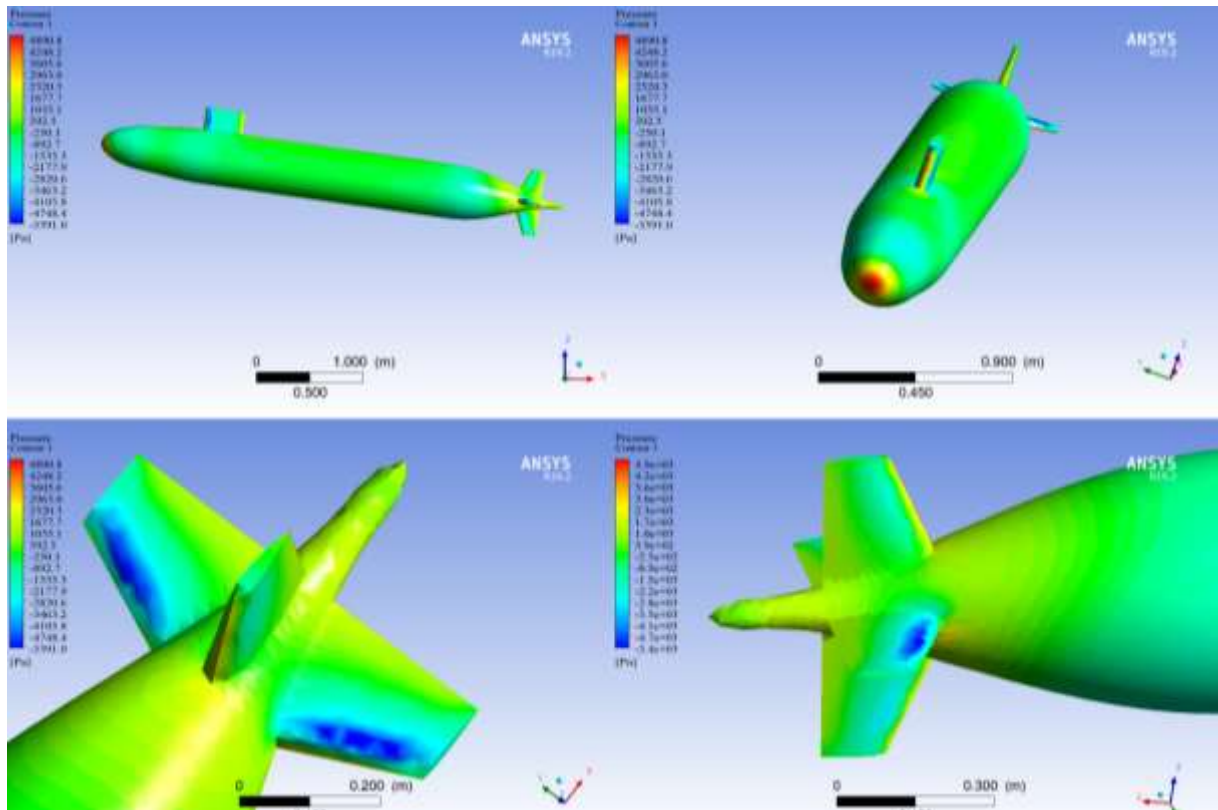
Hình 5.80 Phân bố áp suất của tàu ngầm tại góc chúi 2 độ



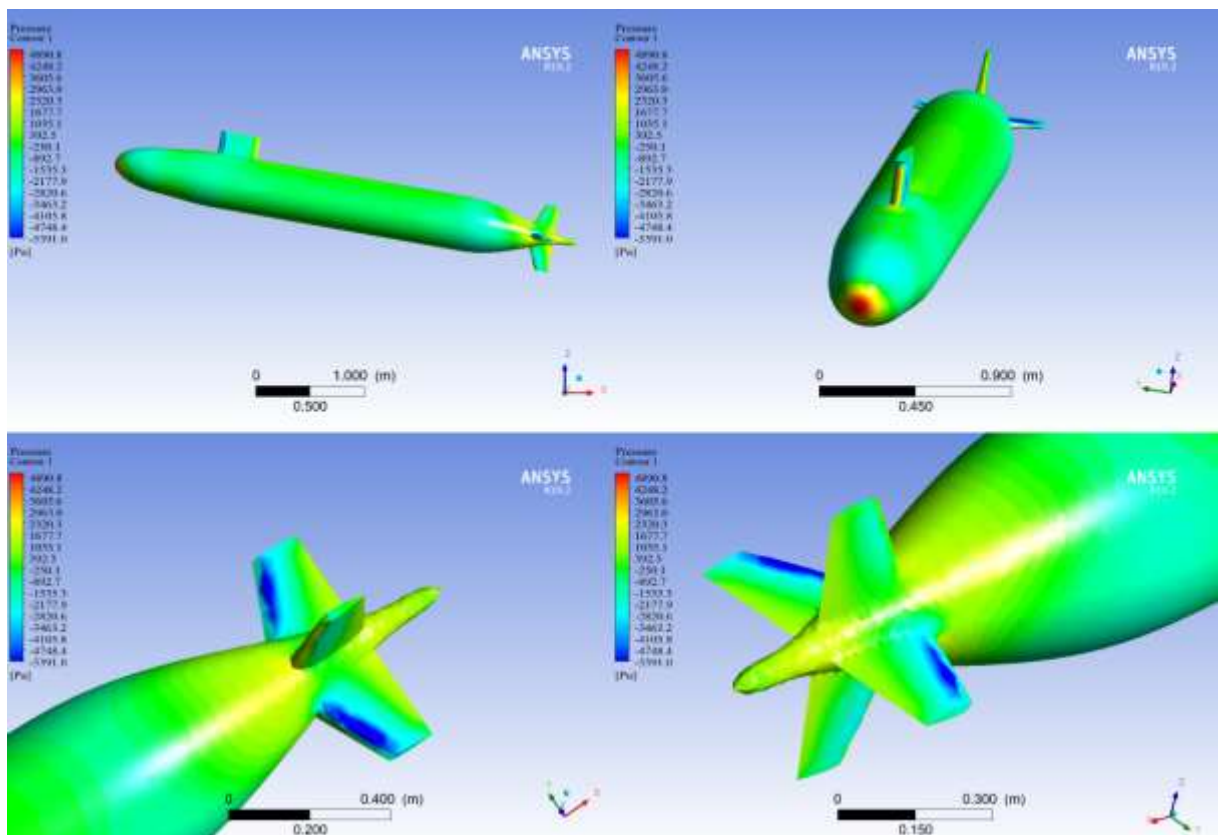
Hình 5.81 Phân bố áp suất của tàu ngầm tại góc chúi 4 độ



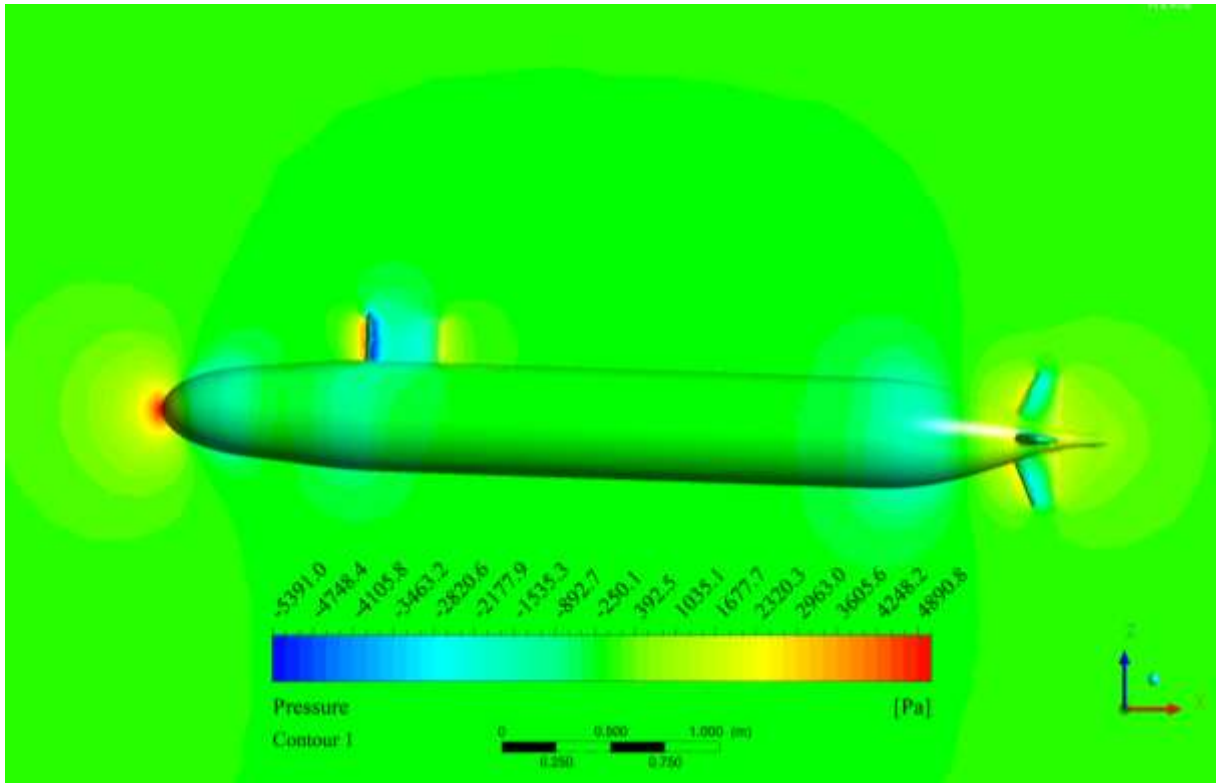
Hình 5.82 Phân bố áp suất của tàu ngầm tại góc chúi 6 độ



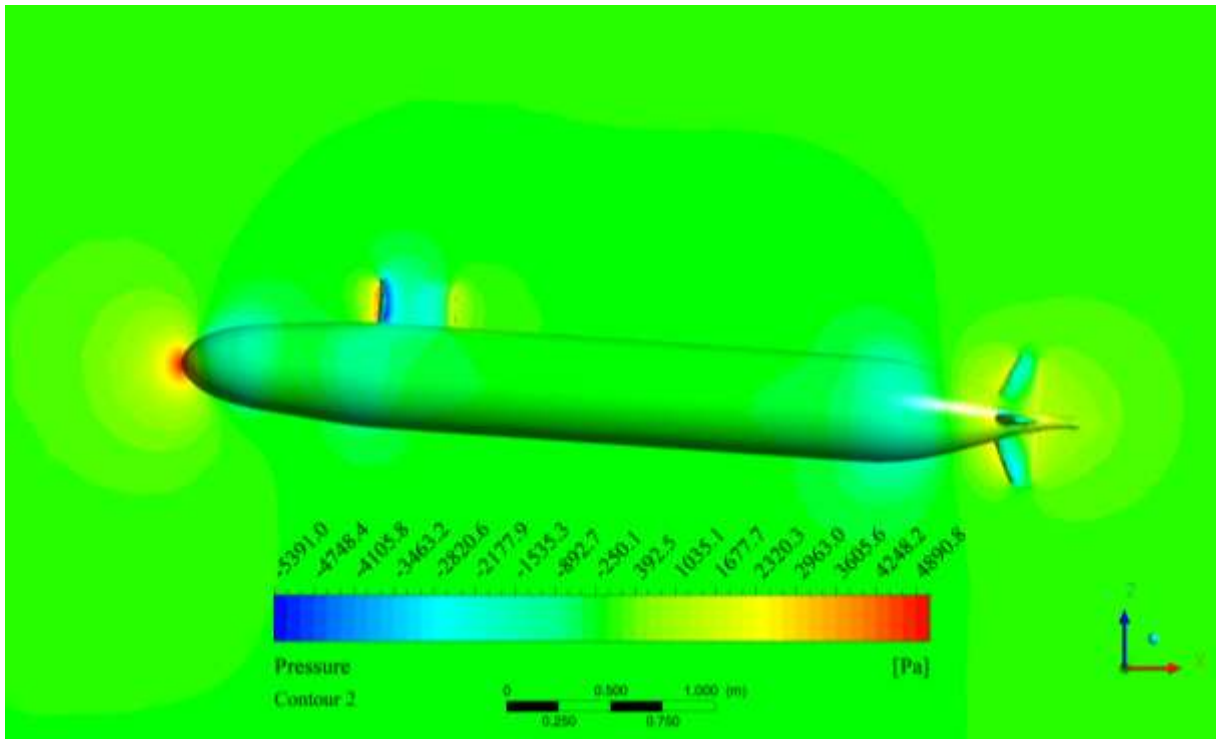
Hình 5.83 Phân bố áp suất của tàu ngầm tại góc chúi 8 độ



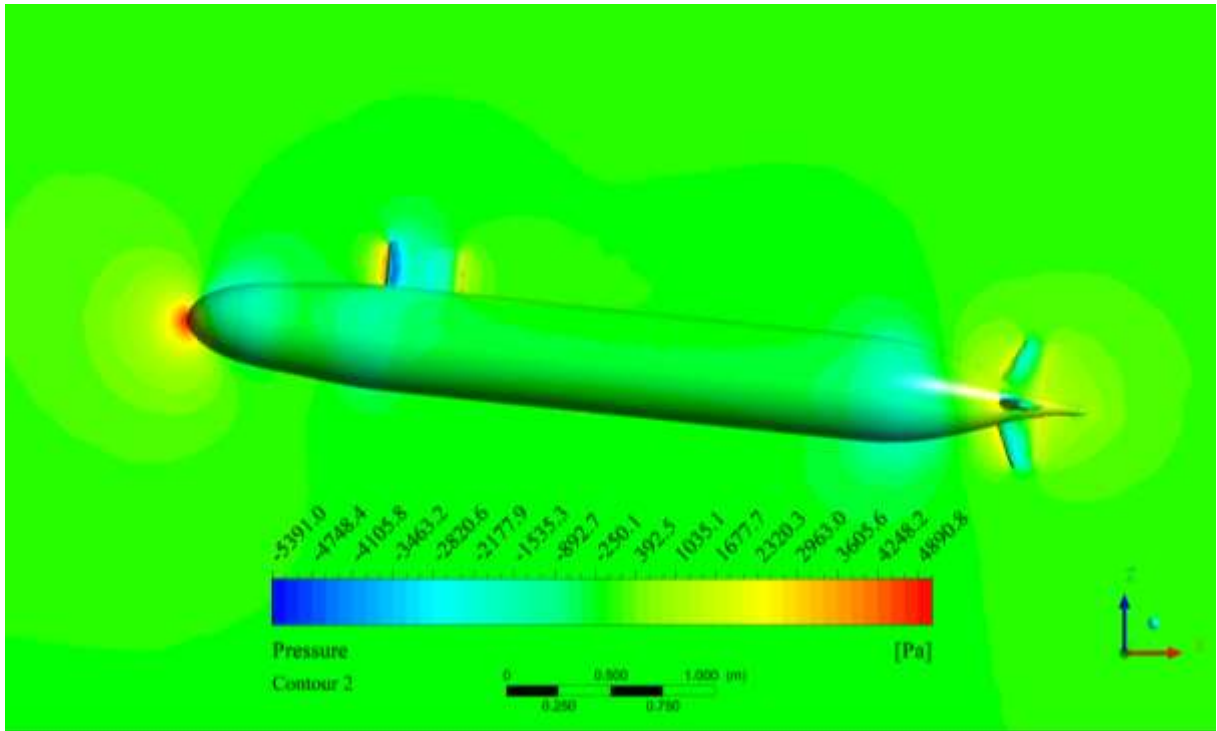
Hình 5.84 Phân bố áp suất của tàu ngầm tại góc chúi 10 độ



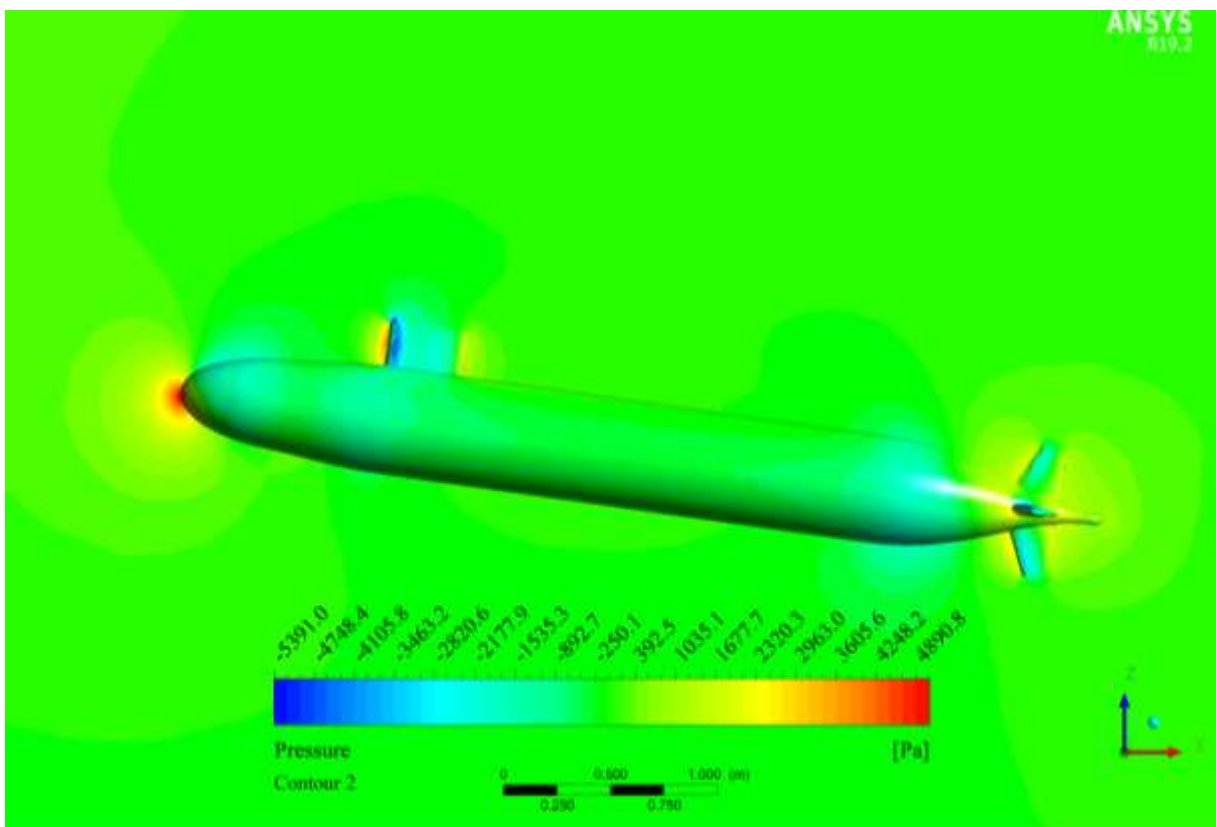
Hình 5.85 Phân bố áp suất quanh tàu ngầm tại góc chúi 2 độ



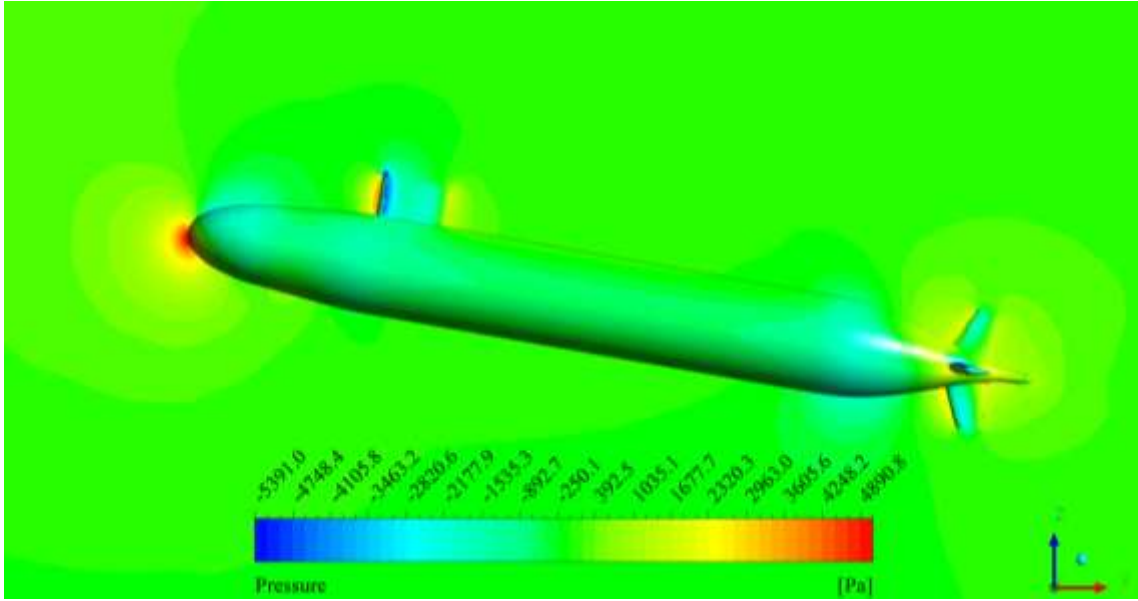
Hình 5.86 Phân bố áp suất quanh tàu ngầm tại góc chúi 4 độ



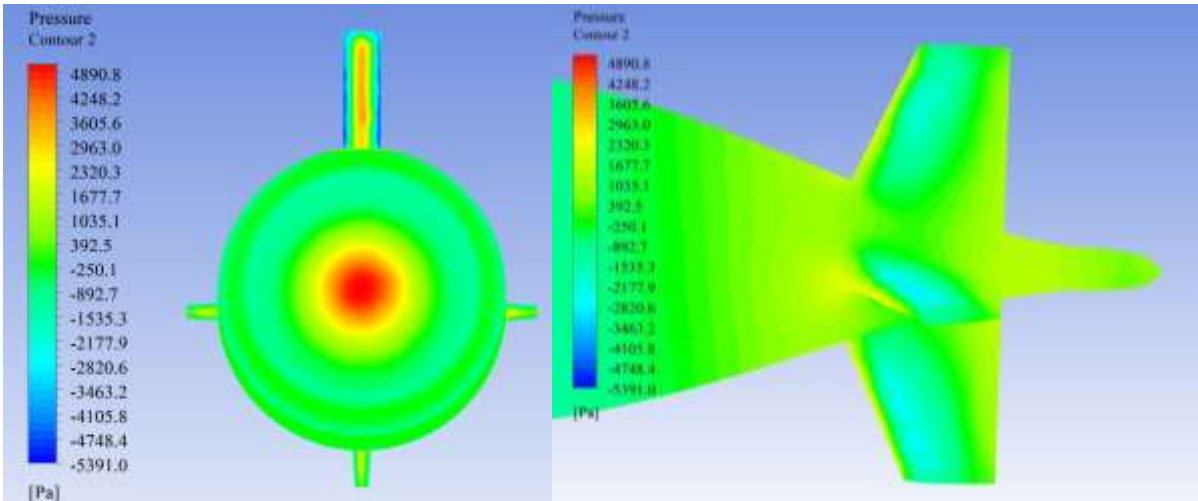
Hình 5.87 Phân bố áp suất quanh tàu ngầm tại góc chúi 6 độ



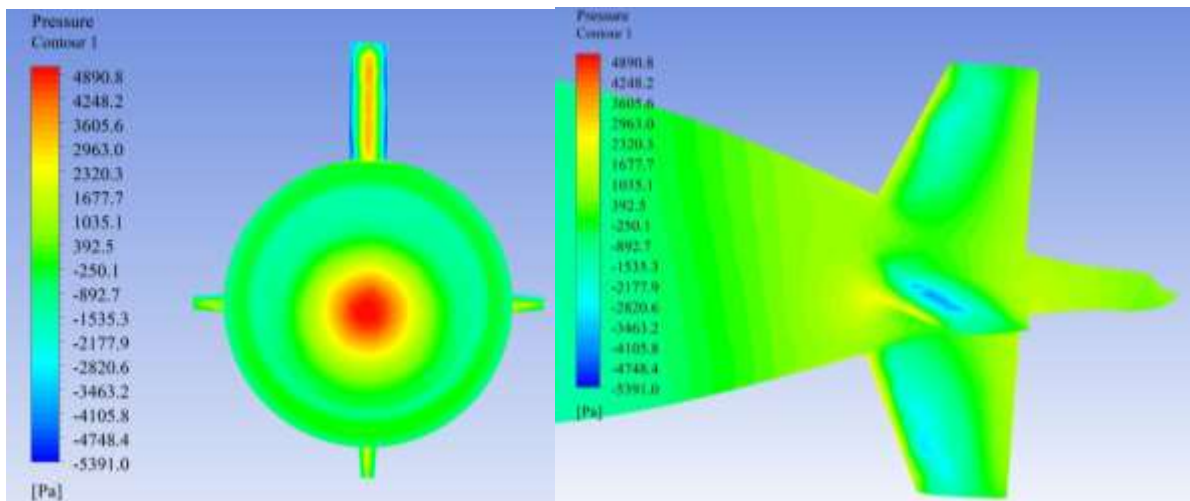
Hình 5.88 Phân bố áp suất quanh tàu ngầm tại góc chúi 8 độ



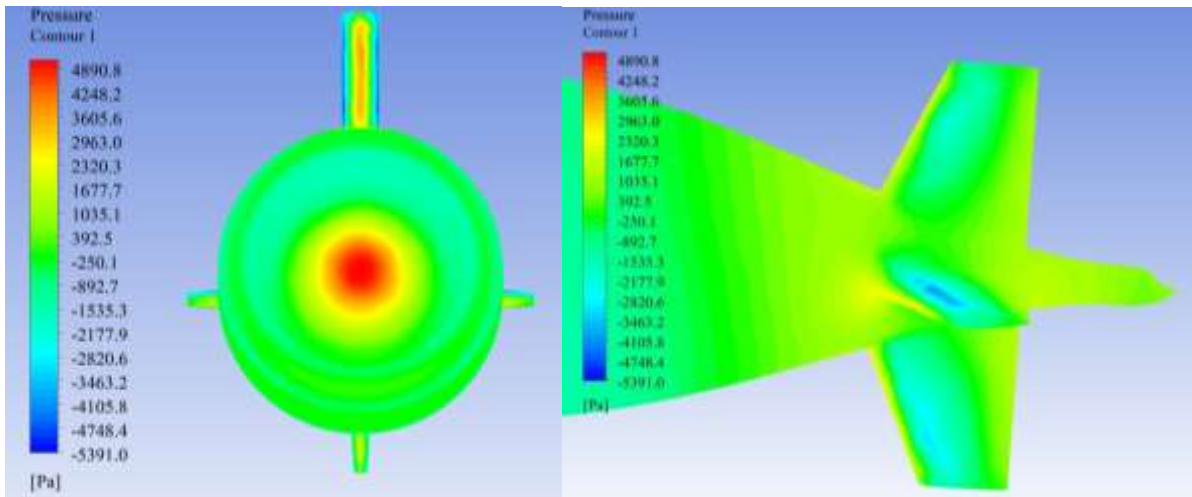
Hình 5.89 Phân bố áp suất quanh tàu ngầm tại góc chúi 10 độ



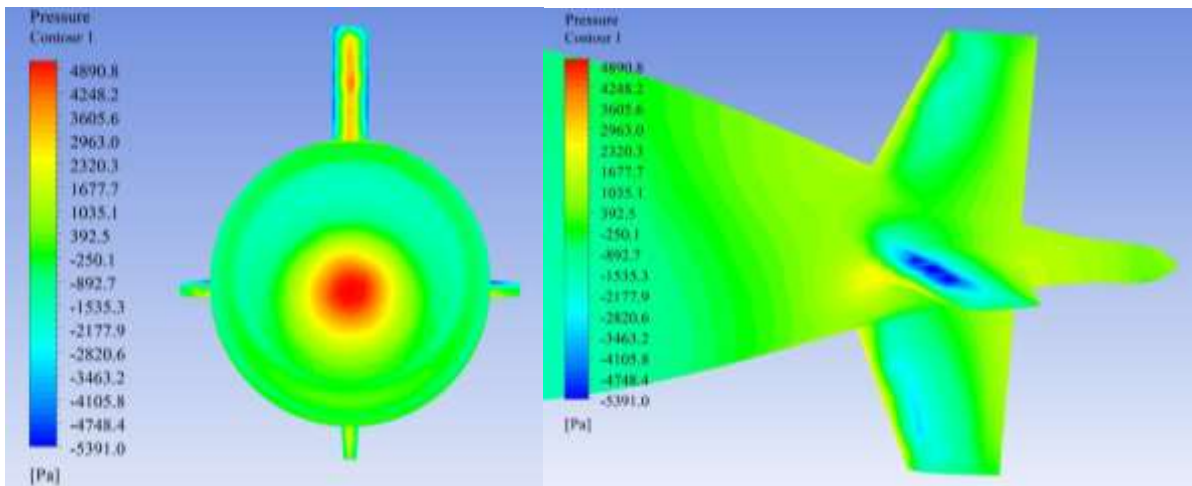
Hình 5.90 Phân bố áp suất của mũi và đuôi tại góc chúi 2 độ



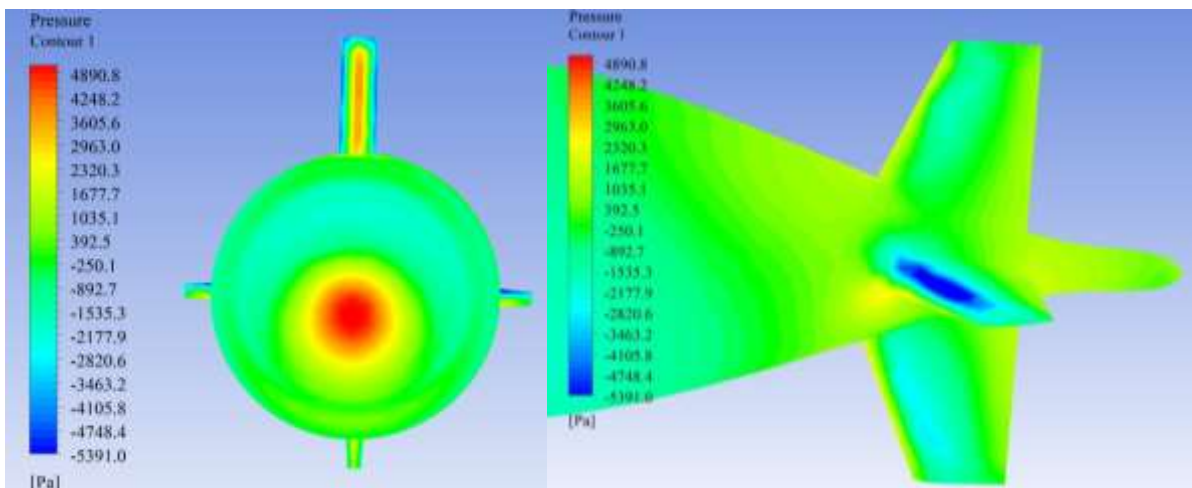
Hình 5.91 Phân bố áp suất của mũi và đuôi tại góc chúi 4 độ



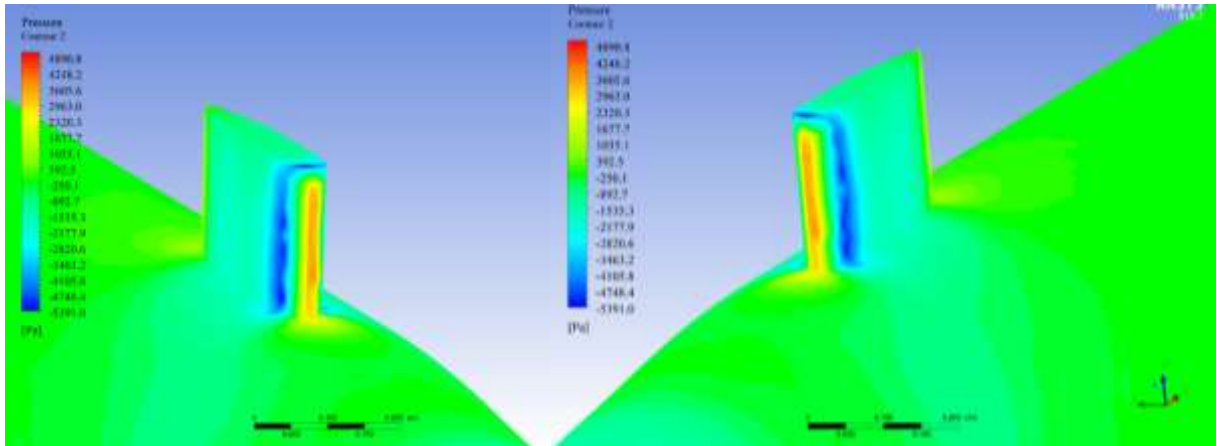
Hình 5.92 Phân bố áp suất của mũi và đuôi tại góc chúi 6 độ



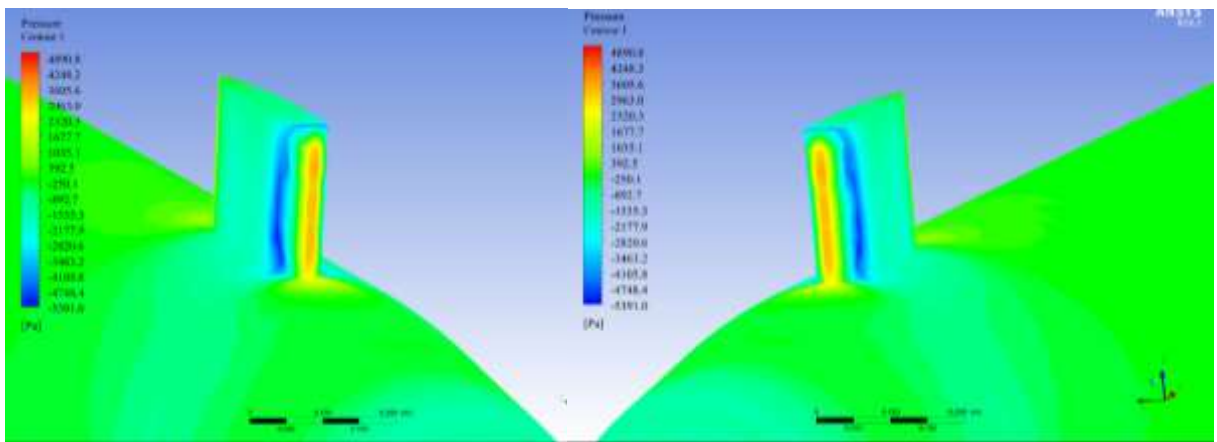
Hình 5.93 Phân bố áp suất của mũi và đuôi tại góc chúi 8 độ



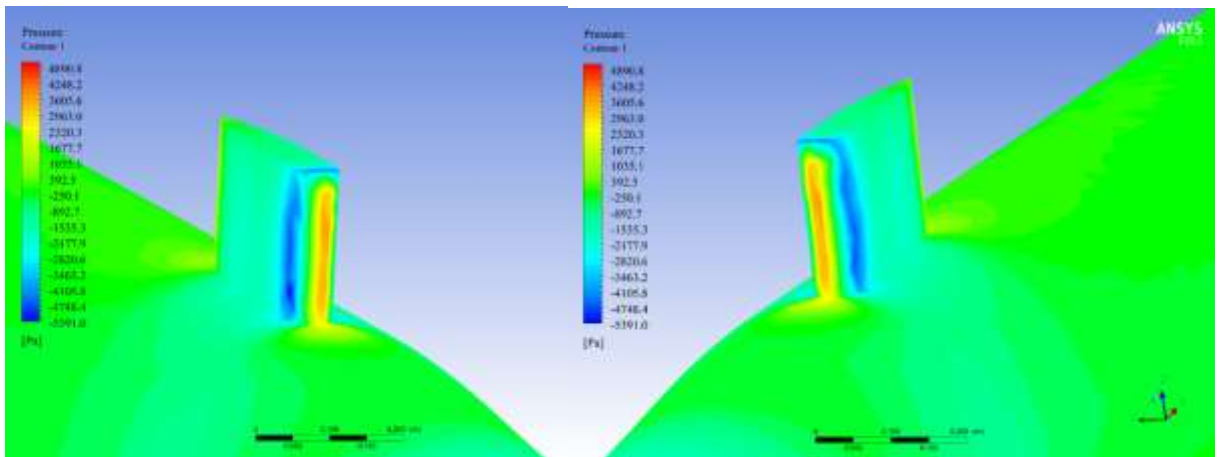
Hình 5.94 Phân bố áp suất của mũi và đuôi tại góc chúi 10 độ



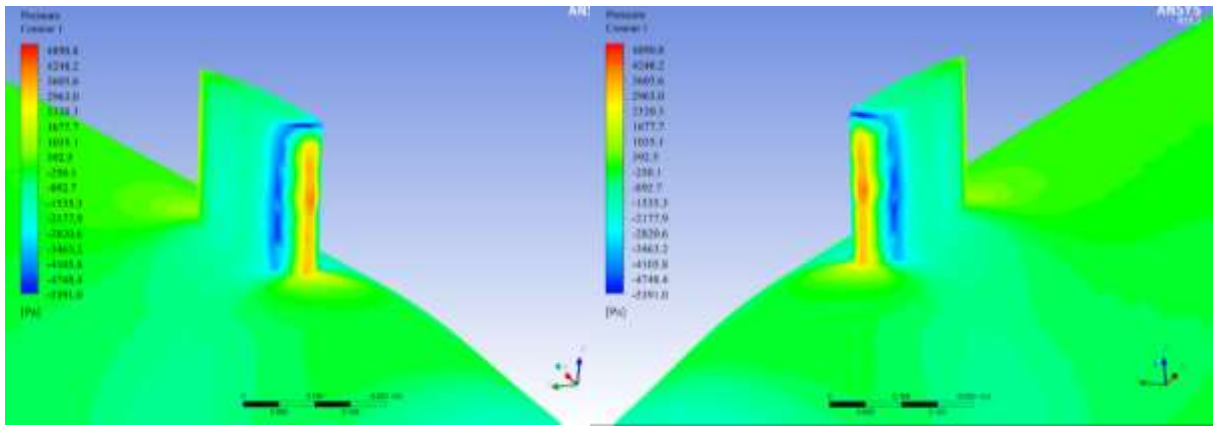
Hình 5.95 Phân bố áp suất của đài quan sát tại góc chúi 2 độ



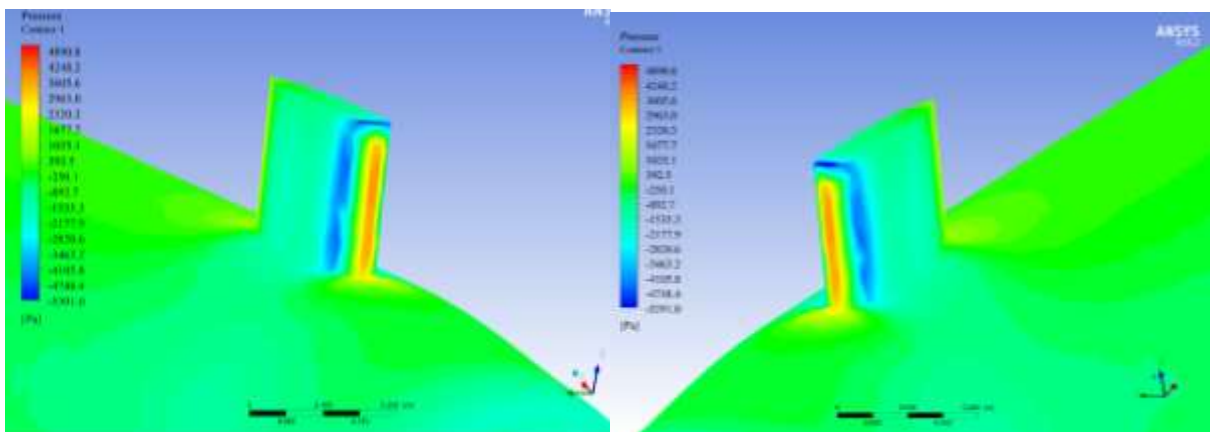
Hình 5.96 Phân bố áp suất của đài quan sát tại góc chúi 4 độ



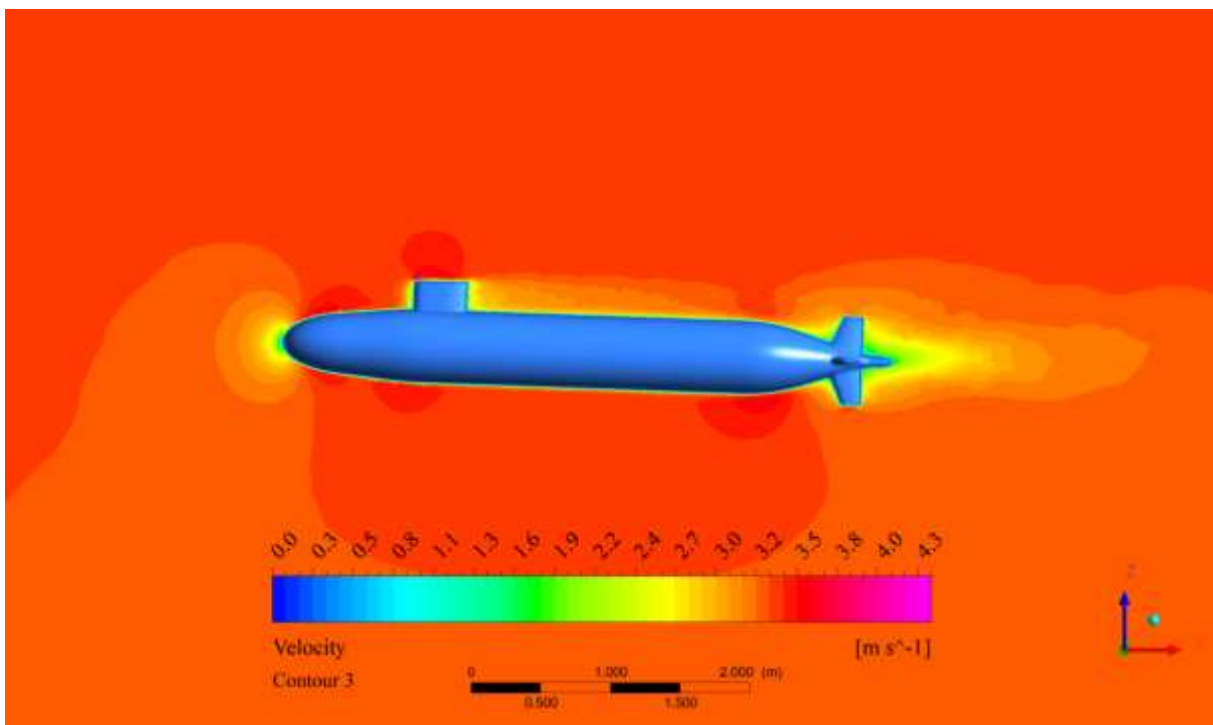
Hình 5.97 Phân bố áp suất của đài quan sát tại góc chúi 6 độ



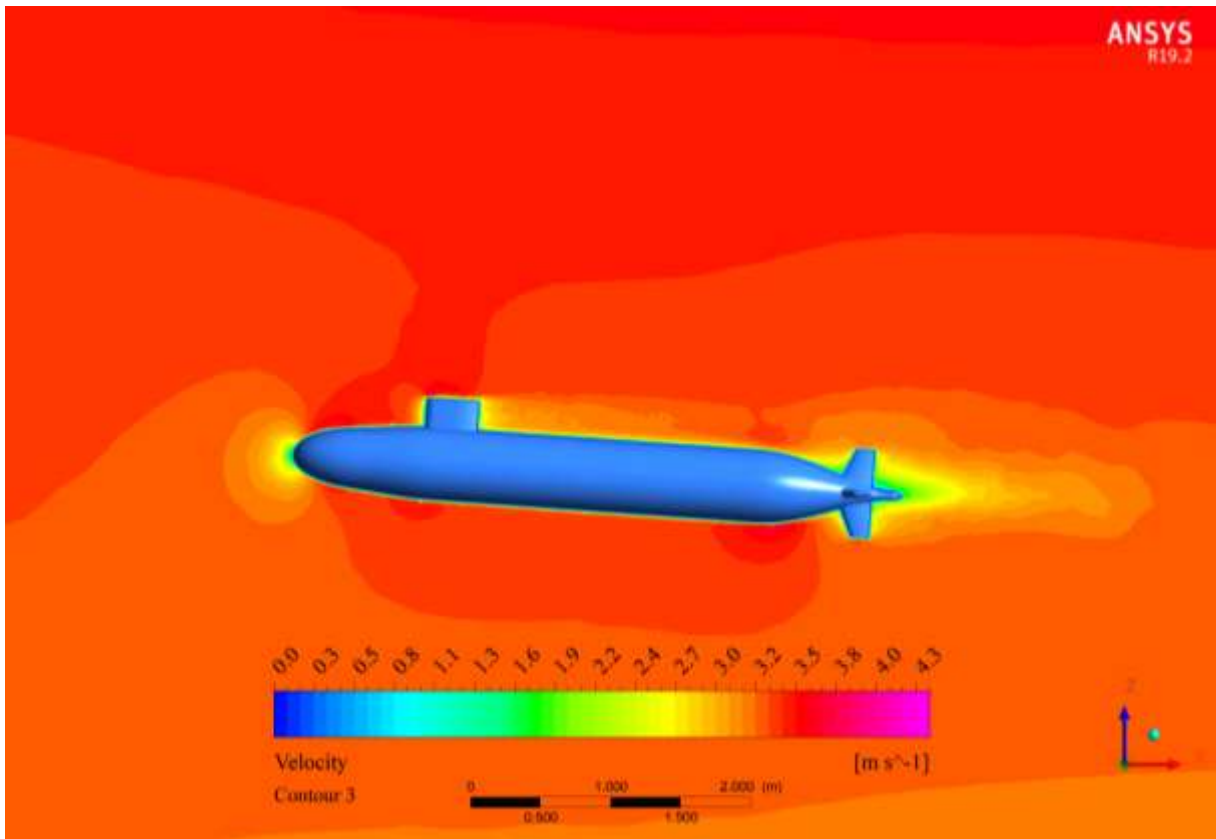
Hình 5.98 Phân bố áp suất của đài quan sát tại góc chúi 8 độ



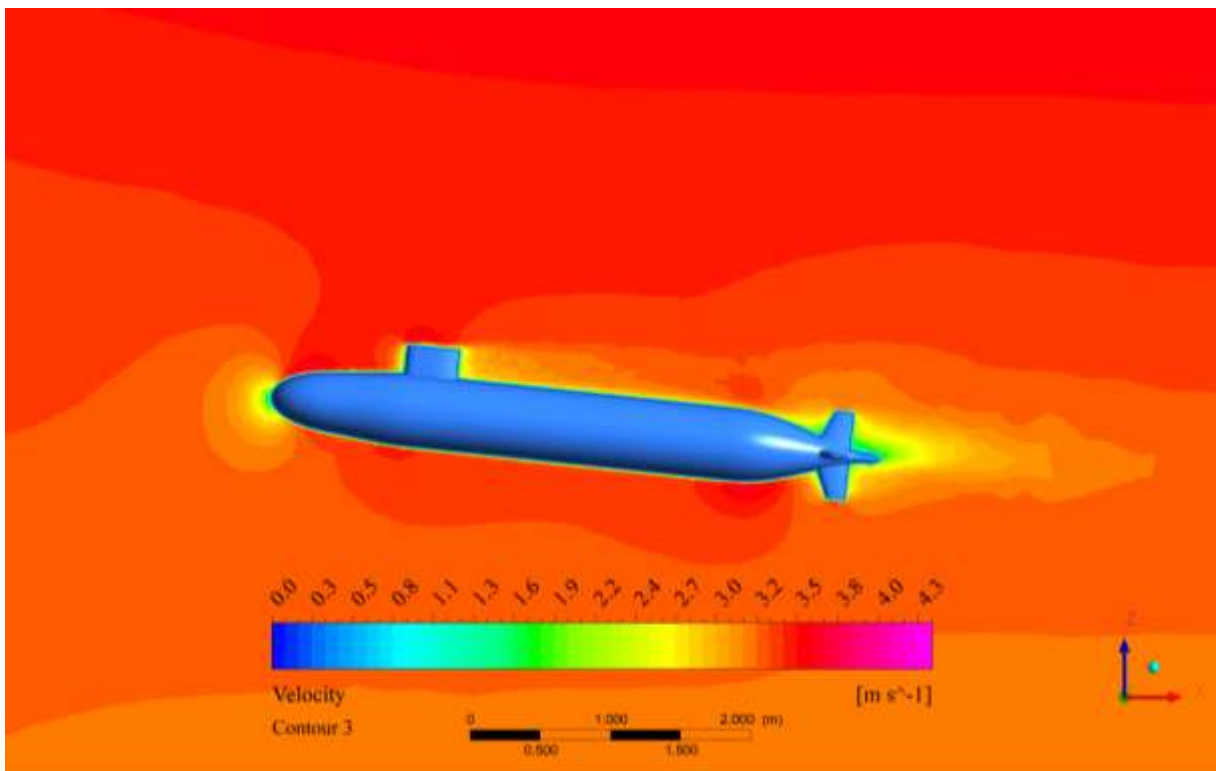
Hình 5.99 Phân bố áp suất của đài quan sát tại góc chúi 10 độ



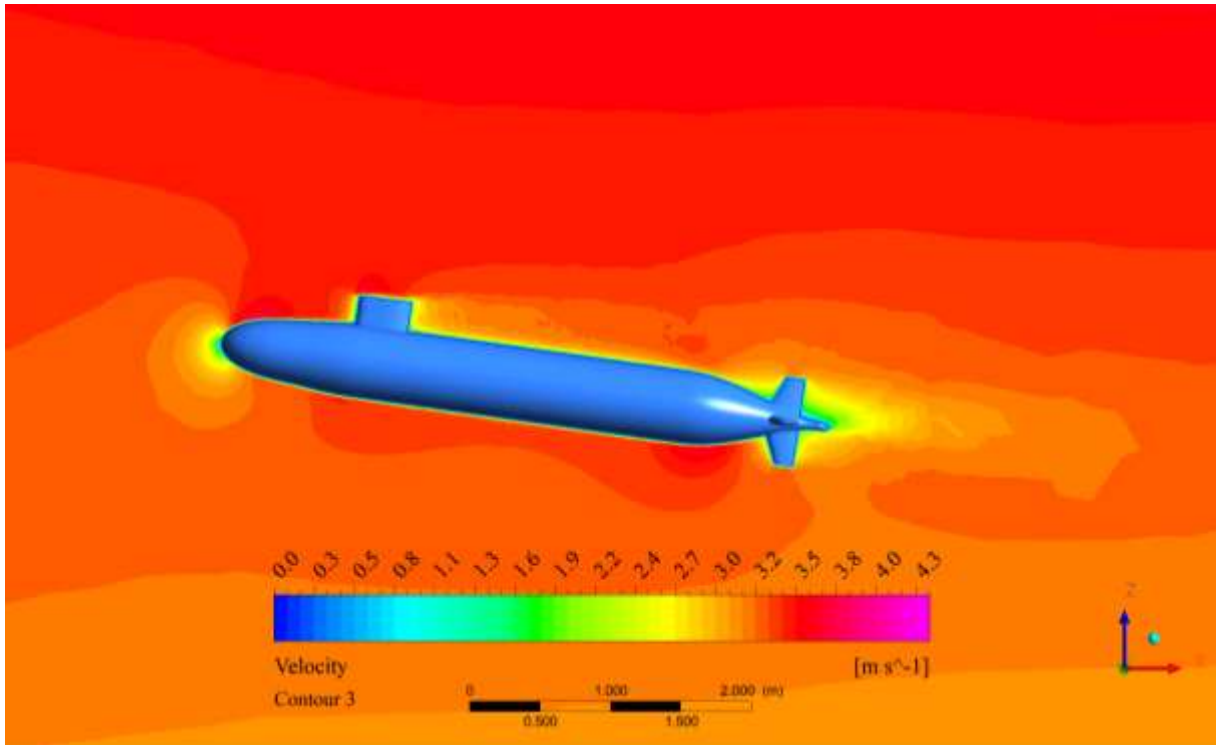
Hình 5.100 Phân bố vận tốc của tàu ngầm tại góc chúi 2 độ



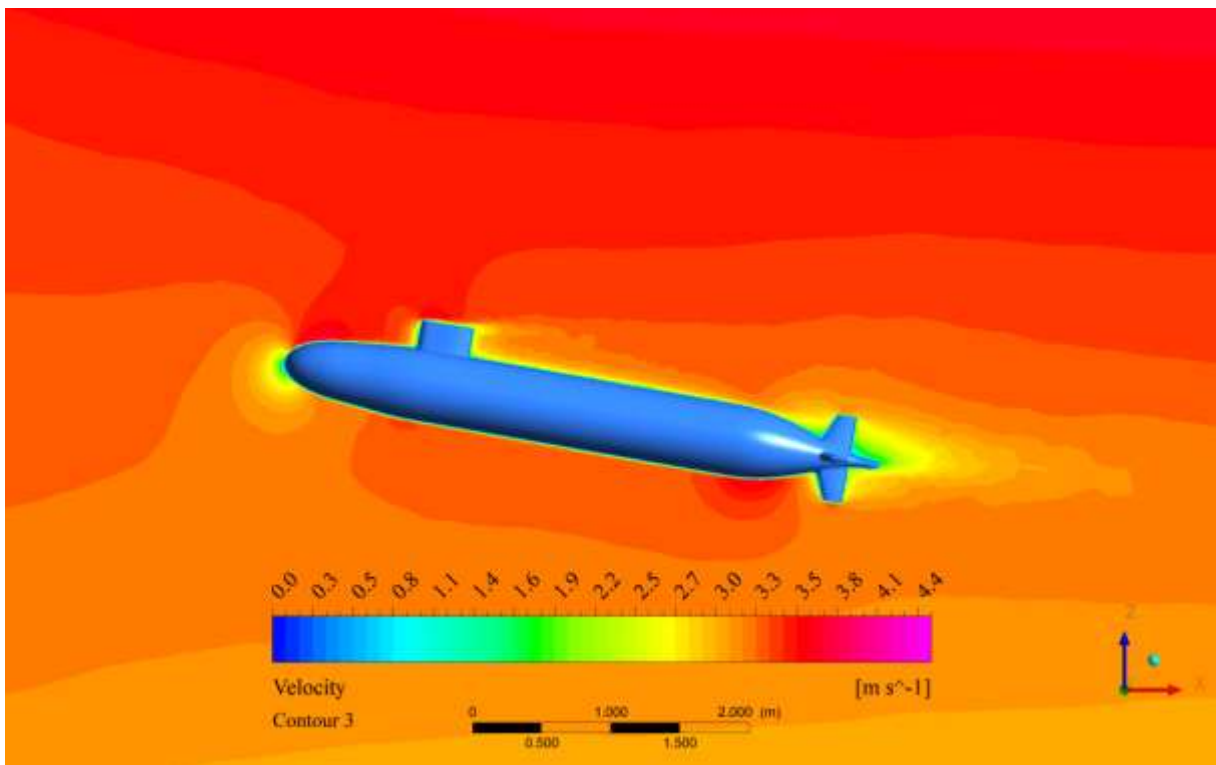
Hình 5.101 Phân bố vận tốc của tàu ngầm tại góc chúi 4 độ



Hình 5.102 Phân bố vận tốc của tàu ngầm tại góc chúi 6 độ



Hình 5.103 Phân bố vận tốc của tàu ngầm tại góc chúi 8 độ



Hình 5.104 Phân bố vận tốc của tàu ngầm tại góc chúi 10 độ

Nhận xét: Từ hình ảnh phân bố áp suất của tàu ngầm ta có thể thấy được sự phân bố áp suất tại các góc chúi khác nhau gần như chỉ tập trung tại mũi, vây cánh và đài

quan sát. Trong đó, tại vùng mũi là nơi tập trung áp suất lớn nhất, còn phần thân tàu gần như không có sự chênh lệch nhiều giữa các góc chúi với nhau và nó chỉ thể hiện rõ hơn khi ở góc chúi 8 độ đến 10 độ. Ngoài ra, áp suất ở phần mũi cũng cho ta thấy sự khác nhau tại các góc chúi khác nhau điều đó có thể thấy rõ khi quan sát sự thay đổi vùng áp suất ở mũi khi góc chúi tăng. Do trong trường hợp này góc chúi hướng lên trên do vùng áp suất lớn nhất được phân bố ở mũi có xu hướng di chuyển xuống phía dưới. Về phân bố vận tốc, từ hình ảnh phân bố vận tốc cho ta thấy vận tốc phía dưới thân tàu ngầm vùng diện tích chịu tác động trực tiếp của nước rất lớn còn phía không chịu tác động của nước thì giảm đi rõ rệt. Ở phía mũi và đuôi tàu ngầm, phân bố vận tốc sẽ càng giảm đi nếu góc chúi càng tăng, phần thân dưới tàu ngầm là nơi vận tốc phân bố nhiều nhất.

## **5.2.5 Tính toán hệ số thủy động lực học của tàu ngầm DARPA SUBBOFF**

### **5.2.5.1 Phương pháp tính toán**

Sử dụng phương pháp hồi quy tuyến tính để tính toán các hệ số thủy động lực học của tàu ngầm tại các góc dạt và góc chúi khác nhau. Phương pháp hồi quy tuyến tính là một kỹ thuật phân tích dữ liệu dự đoán giá trị của dữ liệu không xác định bằng cách sử dụng một giá trị dữ liệu liên quan và đã biết khác. Nó mô hình toán học biến không xác định hoặc phụ thuộc và biến đã biết hoặc độc lập như một phương trình tuyến tính. Các mô hình hồi quy tuyến tính tương đối đơn giản và cung cấp một công thức toán học dễ giải thích để đưa ra các dự đoán. Nói cách khác, hồi quy tuyến tính là một thuật toán có giám sát trong đó đầu ra dự đoán là liên tục, có độ dốc không đổi và nó được sử dụng để dự đoán các giá trị trong một phạm vi liên tục

### **5.2.5.2 Hệ số thủy động lực học của tàu ngầm**

Bảng 5.9 Hệ số thủy động lực học của tàu ngầm DARPA SUBBOFF

$X'_u = -0,0061$	$N'_v = 2,5953$	$X'_{ww} = 0,0019$
$X'_{vv} = -0,003$	$N'_{vv} = 0,0596$	$X'_w = -0,0149$
$X'_* = 1,195$	$N'_* = 0,1539$	$X'_w* = -1,2525$
$Y'_v = 0,3095$	$Z'_{ww} = 0,0207$	$M'_* = 0,8795$
$Y'_{vv} = 0,023$	$Z'_w = 0,1296$	$M'_{ww} = -0,090$
$Y'_* = 0,0063$	$Z'_0 = 0,1607$	$M'_w = 2,297$

Từ các hệ số thủy động lực học ở bảng 5.9 và phương trình chuyển động của tàu ngầm ta suy ra được lực và momen không thứ nguyên tại các góc dạt và góc chúi khác nhau.

Do ở đây em chỉ tính cho trường hợp góc dạt và góc chúi với vận tốc không thay đổi, góc đánh lái không thay đổi nên ta có phương trình đơn giản hóa như sau:

- Đối với trường hợp ở các góc dạt khác nhau:

$$X' = X'^* + X'_{vv} v^2 + X'_u u \quad (5.10)$$

$$Y' = Y'^* + Y'_{vv} v^2 + Y'_v v \quad (5.11)$$

$$N' = N'^* + N'_{vv} v^2 + N'_v v \quad (5.12)$$

- Đối với trường hợp ở các góc chúi khác nhau

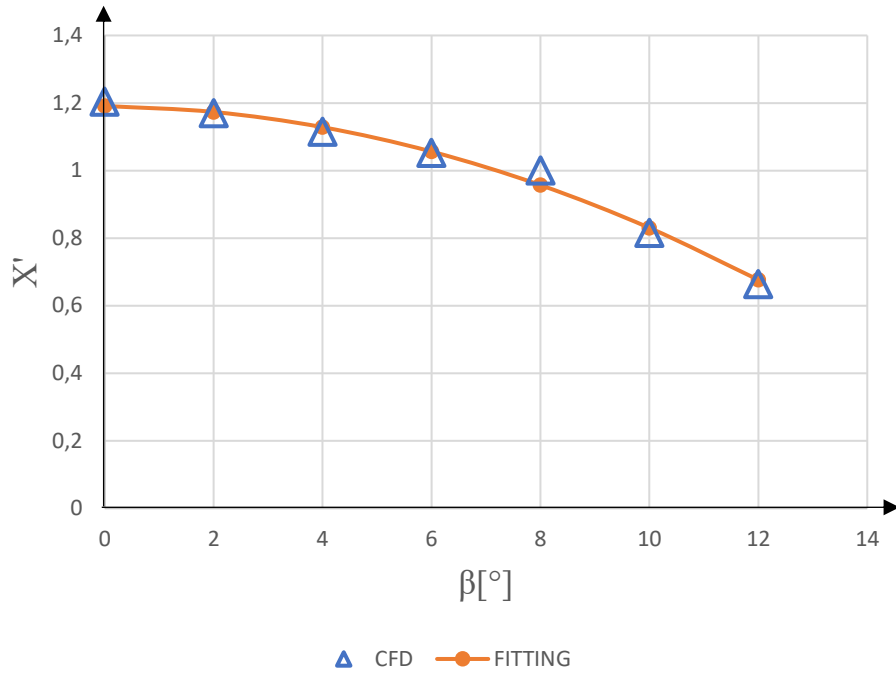
$$X' = X'^* + X'_{ww} w^2 + X'_w w \quad (5.13)$$

$$Z' = Z'_0 + Z'_{ww} w^2 + Z'_w w \quad (5.14)$$

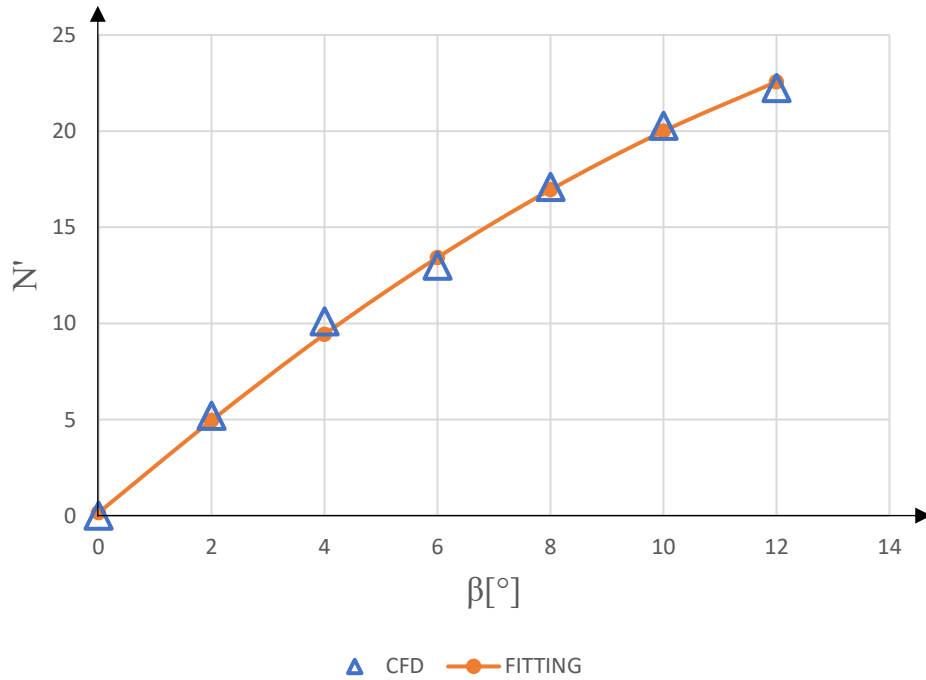
$$M' = M'^* + M'_{ww} w^2 + M'_w w \quad (5.15)$$

Bảng 5.10 Hệ số lực và momen tại các góc dạt khác nhau

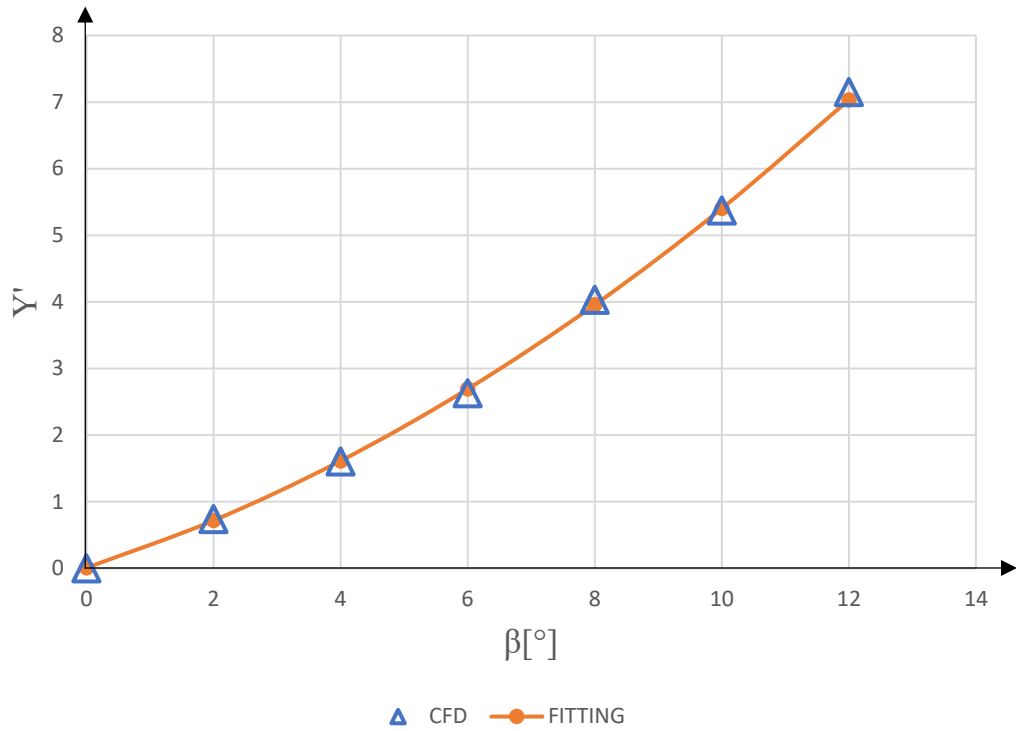
$\beta$ [°]	X'(CFD)	X'(FIT)	Y'(CFD)	Y'(FIT)	N'(CFD)	N'(FIT)
0	1,204	1,191	0,000	0,006	0,000	0,154
2	1,170	1,173	0,740	0,717	5,221	4,952
4	1,115	1,128	1,605	1,612	10,101	9,428
6	1,052	1,056	2,63	2,691	13,000	13,426
8	1,000	0,957	4,03	3,954	17,113	16,948
10	0,815	0,830	5,37	5,401	20,270	19,993
12	0,664	0,676	7,15	7,032	22,231	22,561



Hình 5.105 Đồ thị hệ số lực không thứ nguyên  $X'$  tại các góc dạt



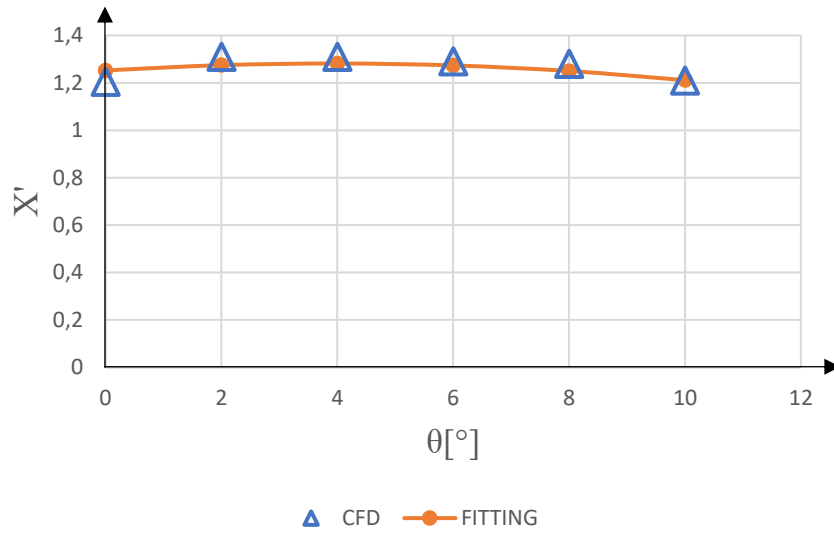
Hình 5.106 Đồ thị hệ số momen không thứ nguyên  $N'$  tại các góc dạt



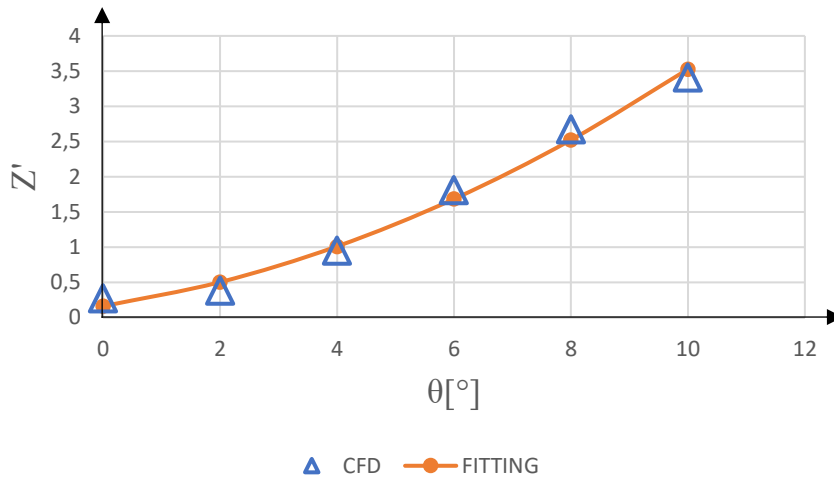
Hình 5.107 Đồ thị hệ số không thứ nguyên  $Y'$  tại các góc đặt

Bảng 5.11 Hệ số lực và momen tại các góc chúi khác nhau

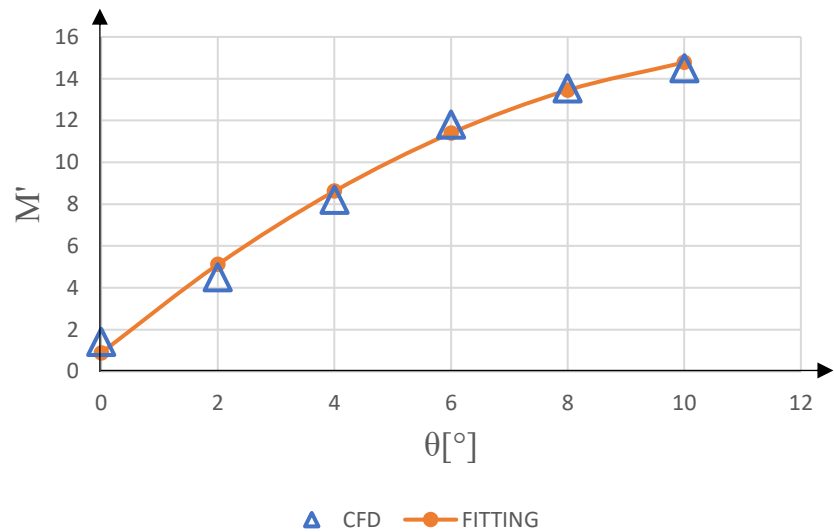
$\theta [^\circ]$	$X'$ (CFD)	$X'$ (FIT)	$Z'$ (CFD)	$Z'$ (FIT)	$M'$ (CFD)	$M'$ (FIT)
0	1,204	1,253	0,273	0,006	1,410	0,154
2	1,310	1,274	0,383	0,717	4,300	4,952
4	1,310	1,281	0,950	1,612	8,200	9,428
6	1,290	1,273	1,810	2,691	12,310	13,426
8	1,280	1,250	2,672	3,954	13,525	16,948
10	1,210	1,211	3,410	5,401	14,521	19,993



Hình 5.108 Đồ thị hệ số lực không thứ nguyên  $X'$  tại các góc chúi



Hình 5.109 Đồ thị hệ số lực không thứ nguyên  $Z'$  tại các góc chúi



Hình 5.110 Đồ thị hệ số momen không thứ nguyên  $M'$  tại các góc chúi

## **CHƯƠNG 6. KẾT LUẬN**

### **6.1 Kết luận**

Qua kết quả tính toán mô phỏng có thể đưa ra một số kết luận như sau:

- Kết quả tính sức cản bằng phương pháp CFD theo vận tốc sai lệch so với thực nghiệm từ 0,06% đến 4,99%, và các sai lệch này đều nhỏ hơn 5%, theo độ sâu sai lệch là 1,72% đến 4,16% đảm bảo tính chính xác của mô phỏng.
- Kiểm tra được kích thước lưới có ảnh hưởng đến độ chính xác của kết quả đặc biệt là lớp biên xung quanh tàu.
- Sức cản tàu ngầm tăng tuyến tính từ 3,05 m/s đến 9,15 m/s ở cùng độ sâu
- Khi tàu ngầm ở vị trí gần mặt thoáng, ảnh hưởng mặt thoáng làm tăng sức cản phi tuyến ở tàu ngầm.
- Các vị trí chịu áp lực lớn trên biên dạng tàu ngầm là: mũi tàu, phía trước đài quan sát và phần đuôi tàu. Theo các biểu đồ phân bố áp suất tại các vận tốc thể hiện giá trị lớn nhất tại các vị trí đó.
- Góc dạt tăng dẫn đến lực theo hướng X giảm, lực theo hướng Y tăng và momen quanh trục Z tăng lên
- Khi góc chúi của tàu ngầm hướng lên càng tăng thì lực thủy động tác động theo phương dọc tàu X giảm, momen quay quanh trục Y và lực tác động theo phương Z tăng.

### **6.2 Kết quả thu được**

Trong quá trình thực hiện đề tài này nhóm em đã được vận dụng các kiến thức đã được học trên giảng đường và ứng dụng vào giải quyết bài toán của tàu ngầm này, đồng thời nhận thấy tính ứng dụng và công nghệ trong việc thực hiện mô phỏng bằng phương pháp số CFD.

## **TÀI LIỆU THAM KHẢO**

- [1] Nancy C. Groves, Thomas T. Huang, Ming S. Chang (1989): “Geometric characteristics of DARPA Suboff models (DTRC model nos. 5470 and 5471), Ship Hydromechanics DeDartment.
- [2] Han L. Liu, Thomas T. Huang (1998): “Summary of DARPA Suboff Experimental Program Data”, Hydromechanics Directorate.
- [3] Jiyuan Tu, Guan-Heng Yeoh, Chaoqun Liu (Third Edition): “Computational Fluid Dynamics A Practical Approach”, Butterworth-Heinemann.
- [4] H. K. Versteeg, W. Malalasekera (Second Edition): “An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method”, Pearson.
- [5] ITTC (2008) ITTC, Recommended Procedures and Guidelines (2002)
- [6] Jong Y. Park, Nakwan Kim (2017): “Experimental Study on Hydrodynamic Coefficients for High-incidence-angle Maneuver of a Submarine”, International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering 9
- [7] Nguyễn Thị Hải Yên, Nguyễn Văn Thịnh, Nguyễn Thanh Tuấn, Vũ Cúc Phương (2019): “Mô phỏng dòng chảy trong môi trường rỗng bằng mô hình K- $\omega$  SST”, Tạp chí khoa học kỹ thuật Mỏ - Địa chất.
- [8] Hasan Ozturk, Kadir B. Gunduz, Yasemin A. Ozden (2023): “Numerica Investigation of the Maneuvering Force of Different DARPA Suboff Configurations for Static Drift Condition”, Journal of ETA Maritime Science
- [9] Yajun Gong, Wei Duan (2018): “Nonlinear Dynamic Modeling and Simulation Analysis of 6DOF Underwater Vehicles”, IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering