

**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**GEMİ FORMLARININ CFD KULLANARAK  
OPTİMİZASYONU**

Gemi İnş. ve Gemi Mak. Müh. Can KOCAMAN

**FBE Gemi İnşaatı ve Gemi Makineleri Mühendisliği Programında  
Hazırlanan**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Tez Danışmanı: Doç. Dr. Fahri ÇELİK (YTÜ)**

**İSTANBUL, 2010**

# İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ.....	iv
KISALTIMA LİSTESİ.....	v
ŞEKİL LİSTESİ.....	vi
ÇİZELGE LİSTESİ.....	ix
ÖNSÖZ.....	x
ÖZET.....	xi
ABSTRACT.....	xii
1 GİRİŞ.....	1
1.1 CFD Uygulamaları.....	1
1.2 Gemi İnşaatında CFD Uygulamaları.....	3
2 GEMİ İNŞAATINDA KULLANILAN CFD METODLARINA VE DENKLEMLERINE GENEL BAKIŞ.....	6
2.1 Gemi Hareketinin Akışkan Denklemleri.....	6
2.2 Akışkanlar Dinamiğinin Genel Diferansiyel Denklemleri.....	6
2.2.1 Sıkıştırılamazlık Kabulü.....	7
2.2.2 Türbülanslı Akış.....	8
2.2.3 Potansiyel Akış.....	10
2.3 Genel Sınır Koşulları.....	10
2.4 Türbülanslı Viskoz Akış Yöntemi.....	11
2.4.1 Sonlu Farklar Yöntemi.....	11
2.4.2 Sonlu Elemanlar Yöntemi.....	11
2.4.3 Sonlu Hacimler Yöntemi.....	12
3. GEMİ ETRAFINDA AKIŞ.....	13
3.1 Gemi Direnci.....	13
3.1.1 Gemi Formunun Direnç Üzerindeki Etkisi.....	15
3.2 CFD Yardımı ile Analiz.....	16
3.2.1 Gemi Geometrisinin Oluşturulması.....	16
3.2.2 Ağ Yapısının Oluşturulması ve Sınır Koşullarının Belirlenmesi.....	16
3.2.3 Viskoz Direncin ve Sürtünme Direncinin Hesaplanması.....	17
3.2.4 CFD Analiz Raporlarının Sunumu.....	18
3.3 CFD Uygulamalarındaki Belirsizlikler ve Genel Hatalar.....	18
3.3.1 Model Hataları ve Belirsizlikler.....	19
3.3.2 Ayrıklaştırma ve Nümerik Hatalar.....	19
3.3.3 İterasyon ve Yakınsama Hataları.....	19

3.3.4	Yuvarlama Hataları .....	19
3.3.5	Uygulama Belirsizlikleri .....	19
3.3.6	Kullanıcı Hataları .....	20
3.3.7	Kod Hataları .....	20
3.4	Hata Kaynakları ve Belirsizlikleri .....	20
3.4.1	Hata Kaynakların ve Belirsizliklerin Tanımı .....	20
3.4.2	İnceleme, Doğrulama ve Düzenleme İşlemlerinin Tanımı .....	20
4.	SEÇİLEN BİR GEMİ FORMUNUN SİSTEMATİK VE CFD ANALİZİ İLE OPTİMİZASYONU .....	22
4.1	Seçilen Formun Sistematik Analizi .....	23
4.2	Seçilen Formun CFD Analizi .....	31
4.2.1	Gemi Geometrisinin Oluşturulması .....	32
4.2.2	Ağ Yapısının Oluşturulması .....	36
4.2.3	Sınır Koşullarının Belirlenmesi .....	44
4.2.4	Sonuçların Değerlendirilmesi .....	46
5.	SONUÇLAR ve ÖNERİLER .....	71
	KAYNAKLAR .....	72
	EKLER .....	77
	Ek 1 KVLCC Formu Ofset Tablosu .....	77
	ÖZGEÇMİŞ .....	79

## SİMGE LİSTESİ

B	Gemi genişliği
$C_B$	Blok katsayısı
$C_F$	Sürtünme direnç katsayısı
$C_M$	Orta kesit narinlik katsayısı
D	Gemi derinliği
e	Birim kütle için iç enerjisi
$f = (f_x, f_y, f_z)$	Bünye kuvveti
GM	Metesantır yüksekliği
h	Statik entalpi
k	Isı iletim katsayısı
KG	Geminin düşey ağırlık merkezi
$L_{PP}$	Geminin dikmeler arası boyu
$L_{WL}$	Geminin su hattı boyu
p	Basınç
$R_n$	Reynold sayısı
$R_F$	Sürtünme direnci
$R_R$	Artık direnç
$R_T$	Toplam direnç
$R_{VP}$	Viskoz basınç direnci (form direnci)
$R_W$	Dalga direnci
T	Gemi su çekimi
$\vec{U} = (u, v, w)$	Akışkan hızı
$\rho$	Akışkan yoğunluğu
$\dot{q}$	Birim kütle başına hacimsel ısı artışı oranı
$\tau_{nn}$	Viskoz gerilmeler
V	Gemi Deplasman hacmi
$\mu$	Akışkanın dinamik viskozitesi
u, v, w	Hız vektörü bileşenleri
$\Phi$	Hız potansiyelini

## KISALTMA LİSTESİ

AIAA	American Institute of Aeronautics and Astronautics
BEM	Boundary Element Method
CAD	Computer Aided Design
CFD	Computational Fluid Dynamics
CTU	Chalmers University of Technology
FDM	Finite Difference Method
FEM	Finite Element Method
FVM	Finite Volume Method
IGES	Initial Graphics Exchange Specification
IIHR	Iowa Institute of Hydraulic Research
ITTC	International Towing Tank Conference
KRISO	Korea Research Institute of Ships & Ocean Engineering
KVLCC	Kriso Very Large Crude Carrier
MOERI	Maritime&Ocean Engineering Research Institute
NSMB	The Netherlands Ship Model Basin
RANS	Reynolds-Averaged Navier Stokes
SRI	Ship Research Institute
SSPA	Swedish State Shipbuilding Experiment Tank

## ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 4.1	KRISO KVLCC2 Tekne Formu .....	22
Şekil 4.2	B/T 2.788 oranına bağlı su hattı boyu - direnç grafiği .....	25
Şekil 4.3	B/T 2.649 oranına bağlı su hattı boyu - direnç grafiği .....	26
Şekil 4.4	B/T 2.719 oranına bağlı su hattı boyu - direnç grafiği .....	27
Şekil 4.5	B/T 2.858 oranına bağlı su hattı boyu - direnç grafiği .....	28
Şekil 4.6	B/T 2.928 oranına bağlı su hattı boyu - direnç grafiği .....	29
Şekil 4.7	Ana değerlerin karşılaştırılması .....	30
Şekil 4.8	CFD Analizi için Gerekli Aşamalar (Xing and Stern,2007) .....	31
Şekil 4.9	C13 formunun perspektif görüntüsü .....	33
Şekil 4.10	C13 formunun önden görüntüsü .....	33
Şekil 4.11	C63 formunun perspektif görüntüsü .....	34
Şekil 4.12	C63 formunun önden görüntüsü .....	34
Şekil 4.13	C113 formunun perspektif görüntüsü .....	35
Şekil 4.14	C113 formunun perspektif görüntüsü .....	35
Şekil 4.15	Düzgün, Düzgün Olmayan ve Melez (Hibrid) Ağ yapısı .....	36
Şekil 4.16	Hesaplama hacmi boyutları (Wen-Lin vd.,1995) .....	37
Şekil 4.17	C13 formu için oluşturulan hesaplama hacmi .....	38
Şekil 4.18	C13 formu için oluşturulan hesaplama hacminin ağ yapısı .....	39
Şekil 4.19	C13 formu için oluşturulan tekne yüzeyi ağ yapısı .....	39
Şekil 4.20	C13 formu için oluşturulan tekne yüzeyi ve hesaplama hacmi ağ yapısı profil görünüşü .....	40
Şekil 4.21	C63 formu için oluşturulan hesaplama hacmi .....	40
Şekil 4.22	C63 formu için oluşturulan hesaplama hacminin ağ yapısı .....	41
Şekil 4.23	C63 formu için oluşturulan tekne yüzeyi ağ yapısı .....	41
Şekil 4.24	C63 formu için oluşturulan tekne yüzeyi ve hesaplama hacmi ağ yapısı profil görünüşü .....	42
Şekil 4.25	C113 formu için oluşturulan hesaplama hacmi .....	42
Şekil 4.26	C113 formu için oluşturulan hesaplama hacminin ağ yapısı .....	43
Şekil 4.27	C113 formu için oluşturulan tekne yüzeyi ağ yapısı .....	43
Şekil 4.28	C113 formu için oluşturulan tekne yüzeyi ve hesaplama hacmi ağ yapısı profil görünüşü .....	44
Şekil 4.29	CFD analizinde kullanılan sınır koşulları .....	45
Şekil 4.30	CFD analiz sonuçlarının grafik olarak gösterilmesi .....	47
Şekil 4.31	Holtrop-Mennen ve CFD analiz sonuçlarının grafik olarak gösterilmesi .....	47
Şekil 4.32	C13 formu CFD analizinde edilen hesap hacmi basınç dağılımı perspektif görünüşü .....	48
Şekil 4.33	C13 formu CFD analizinde edilen tekne yüzeyi basınç dağılımı perspektif görünüşü .....	48
Şekil 4.34	C13 formu CFD analizinde edilen tekne yüzeyi basınç dağılımı profil görünüşü .....	49
Şekil 4.35	C13 formu CFD analizinde edilen tekne yüzeyi baş taraf basınç dağılımı perspektif görünüşü .....	49
Şekil 4.36	C13 formu CFD analizinde edilen tekne yüzeyi kıç taraf basınç dağılımı perspektif görünüşü .....	50
Şekil 4.37	C63 formu CFD analizinde edilen hesap hacmi basınç dağılımı perspektif görünüşü .....	50
Şekil 4.38	C63 formu CFD analizinde edilen tekne yüzeyi basınç dağılımı perspektif	

	görünüşü .....	51
Şekil 4.39	C63 formu CFD analizinde edilen tekne yüzeyi basınç dağılımı profil görünüşü .....	51
Şekil 4.40	C63 formu CFD analizinde edilen tekne yüzeyi basınç dağılımı profil görünüşü .....	52
Şekil 4.41	C63 formu CFD analizinde edilen tekne yüzeyi kıç taraf basınç dağılımı perspektif görünüşü .....	52
Şekil 4.42	C113 formu CFD analizinde edilen hesap hacmi basınç dağılımı perspektif görünüşü .....	53
Şekil 4.43	C113 formu CFD analizinde edilen tekne yüzeyi basınç dağılımı perspektif görünüşü .....	53
Şekil 4.44	C113 formu CFD analizinde edilen tekne yüzeyi basınç dağılımı profil görünüşü .....	54
Şekil 4.45	C113 formu CFD analizinde edilen tekne yüzeyi baş taraf basınç dağılımı perspektif görünüşü .....	54
Şekil 4.46	C113 formu CFD analizinde edilen tekne yüzeyi kıç taraf basınç dağılımı perspektif görünüşü .....	55
Şekil 4.47	C13 formu CFD analizinde edilen hesap hacmi hız vektörleri perspektif görünüşü .....	55
Şekil 4.48	C13 formu CFD analizinde edilen tekne yüzeyi hız vektörleri perspektif görünüşü .....	56
Şekil 4.49	C13 formu CFD analizinde edilen tekne yüzeyi hız vektörleri profil görünüşü .....	56
Şekil 4.50	C13 formu CFD analizinde edilen tekne yüzeyi baş taraf hız vektörleri perspektif görünüşü .....	57
Şekil 4.51	C13 formu CFD analizinde edilen tekne yüzeyi kıç taraf hız vektörleri perspektif görünüşü .....	57
Şekil 4.52	C63 formu CFD analizinde edilen hesap hacmi hız vektörleri perspektif görünüşü .....	58
Şekil 4.53	C63 formu CFD analizinde edilen tekne yüzeyi hız vektörleri perspektif görünüşü .....	58
Şekil 4.54	C63 formu CFD analizinde edilen tekne yüzeyi hız vektörleri profil görünüşü .....	59
Şekil 4.55	C63 formu CFD analizinde edilen tekne yüzeyi baş taraf hız vektörleri perspektif görünüşü .....	59
Şekil 4.56	C63 formu CFD analizinde edilen tekne yüzeyi kıç taraf hız vektörleri perspektif görünüşü .....	60
Şekil 4.57	C113 formu CFD analizinde edilen hesap hacmi hız vektörleri perspektif görünüşü .....	60
Şekil 4.58	C113 formu CFD analizinde edilen tekne yüzeyi hız vektörleri perspektif görünüşü .....	61
Şekil 4.59	C113 formu CFD analizinde edilen tekne yüzeyi hız vektörleri profil görünüşü .....	61
Şekil 4.60	C113 formu CFD analizinde edilen tekne yüzeyi baş taraf hız vektörleri perspektif görünüşü .....	62
Şekil 4.61	C113 formu CFD analizinde edilen tekne yüzeyi kıç taraf hız vektörleri perspektif görünüşü .....	62
Şekil 4.62	C13 formu CFD analizinde edilen tekne yüzeyi etrafındaki akım hatlarının perspektif görünüşü .....	63

Şekil 4.63	C13 formu CFD analizinde edilen tekne yüzeyi etrafındaki akım hatlarının profil görünüşü .....	63
Şekil 4.64	C13 formu CFD analizinde edilen tekne yüzeyi baş taraf etrafındaki akım hatlarının profil görünüşü .....	64
Şekil 4.65	C13 formu CFD analizinde edilen tekne yüzeyi kıç taraf etrafındaki akım hatlarının profil görünüşü .....	64
Şekil 4.66	C63 formu CFD analizinde edilen tekne yüzeyi etrafındaki akım hatlarının perspektif görünüşü .....	65
Şekil 4.67	C63 formu CFD analizinde edilen tekne yüzeyi etrafındaki akım hatlarının profil görünüşü .....	65
Şekil 4.68	C63 formu CFD analizinde edilen tekne yüzeyi baş taraf etrafındaki akım hatlarının profil görünüşü .....	66
Şekil 4.69	C63 formu CFD analizinde edilen tekne yüzeyi kıç taraf etrafındaki akım hatlarının profil görünüşü .....	66
Şekil 4.70	C113 formu CFD analizinde edilen tekne yüzeyi etrafındaki akım hatlarının perspektif görünüşü .....	67
Şekil 4.71	C113 formu CFD analizinde edilen tekne yüzeyi etrafındaki akım hatlarının profil görünüşü .....	67
Şekil 4.72	C113 formu CFD analizinde edilen tekne yüzeyi baş taraf etrafındaki akım hatlarının profil görünüşü .....	68
Şekil 4.73	C113 formu CFD analizinde edilen tekne yüzeyi kıç taraf etrafındaki akım hatlarının profil görünüşü .....	68
Şekil 4.74	C13 formunun orta simetri düzlemi ile tekne yüzeyinin kesiştiği çizgide ölçülen basınç değerlerinin tekne boyuna göre dağılımı .....	70
Şekil 4.75	C63 formunun orta simetri düzlemi ile tekne yüzeyinin kesiştiği çizgide ölçülen basınç değerlerinin tekne boyuna göre dağılımı .....	70
Şekil 4.76	C113 formunun orta simetri düzlemi ile tekne yüzeyinin kesiştiği çizgide ölçülen basınç değerlerinin tekne boyuna göre dağılımı .....	70



## ÇİZELGE LİSTESİ

Çizelge 4.1	KRISO VLCC2 ana boyutları.....	23
Çizelge 4.2	Sistematik analiz için kullanılan B/T oranına bağlı ana boyutları.....	23
Çizelge 4.3	B/T oranı 2.788 için ana boyutlar ve toplam direnç değerleri.....	25
Çizelge 4.4	B/T oranı 2.649 için ana boyutlar ve toplam direnç değerleri.....	26
Çizelge 4.5	B/T oranı 2.719 için ana boyutlar ve toplam direnç değerleri.....	27
Çizelge 4.6	B/T oranı 2.858 için ana boyutlar ve toplam direnç değerleri.....	28
Çizelge 4.7	B/T oranı 2.928 için ana boyutlar ve toplam direnç değerleri.....	29
Çizelge 4.8	B/T oranları için bulunan en düşük direnç değerleri.....	30
Çizelge 4.9	Sistematik analiz sonucu seçilen gemilerin ana boyutları.....	32
Çizelge 4.10	Sistematik analiz sonucu elde edilen 15.5 knot gemi hızı için direnç değerleri.....	46
Çizelge 4.11	CFD analizi sonucu elde edilen 15.5 knot gemi hızı için direnç değerleri.....	46

## **ÖNSÖZ**

Bu tezin oluşma aşamasında bana her türlü destekte bulunan sayın hocam Doç. Dr. Fahri ÇELİK'e, Yrd. Doç. Dr. Seyfettin BAYRAKTAR'a, lisans ve yüksek lisans eğitimim boyunca yardımlarını esirgemeyen tüm bölüm hocalarıma teşekkür ederim.

Tezin başlangıcından bitişine kadar her türlü konuda destek olan ve moral veren sevgili eşim Esengül KOCAMAN'a, eğitim hayatım boyunca beni destekleyen anneme ve babama teşekkürü bir borç bilirim.

ISTANBUL,2010

## ÖZET

Teknolojik gelişmelere paralel olarak gemi inşaatı mühendisliğinde de sayısal yöntemlerin ve modellemelerin kullanımı yaygınlaşmıştır. Gemi formunun direncini hesaplamada CFD uygulamaları model deneylerine alternatif olarak sıkça kullanılmaya başlanmıştır. Böylece direnç açısından daha iyi gemi formları geliştirebilmek mümkün olmaktadır.

Gemi formlarının CFD uygulamaları kullanılarak optimizasyon çalışmaları ile model deneylerine olan ihtiyaç gün geçtikçe azalmaktadır. Böylece hem zamandan hem de maliyetten kazanç sağlanabilmektedir.

Sunulan bu çalışmada ticari bir tanker formu örnek alınmış ve bu forma bağlı olarak üç adet değişik boyutlarda gemi formu sistematik analiz yöntemi ile oluşturulmuştur. Oluşturulan bu formların CFD analizleri yapılmış ve direnç açısından en iyi gemi formu bulunmaya çalışılmıştır. Oluşturulan formların basınç dağılımları, gemi formu üzerindeki hız vektörleri ve akım hatları gösterilmiştir.

Sonuç olarak uygun modelleme ve sınır koşulları belirlenerek yapılan bu analizlerin model deneylerine alternatif olarak, bir çok parametreye karar verilmesi gereken ön dizayn aşamasında rahatlıkla ana boyutları belirlemede kullanılabileceği gözlemlenmiştir.

**Anahtar kelimeler:** Sayısal modelleme, sistematik analiz, CFD, gemi direnci, gemi tekne formu, basınç dağılımı.

## **ABSTRACT**

Corresponding to technological developments the use of numerical methods and modeling in naval architecture is becoming widespread. CFD methods which are alternative to model tests are being used frequently in calculating ship resistance. Therefore it is possible to develop better hull forms by means of resistance.

By the increasing use of CFD methods, the need for the model tests decrease day by day. So both time and money can be saved.

In this study, a merchant tanker form is used as a sample and three hull forms in different dimensions are constituted using systematic analysis depending on the original form. CFD analysis for the constituted hull forms is done to find the optimum hull form in way of lower ship resistance. Pressure distribution, velocity vectors on ship hull form and streamlines are screened for the constituted hull forms.

As a consequence it is observed that with using the proper modeling methods and boundary conditions, CFD analysis can be conveniently used alternative to model tests to determine the main dimensions in early design stage in which a lot of parameters have to be decided.

**Key Words:** Numerical modeling, systematic analysis, CFD, ship resistance, ship hull form, pressure distribution.

## 1. GİRİŞ

Her bir geminin kendine özgü özelliklerinin olmasından dolayı, her tekne formunun başlı başına ele alınıp özgün bir optimizasyon sürecinden geçmesi gerekmektedir. Dizayn aşamasında belirli bir taşıma kapasitesi belirlendiği için, geminin ana boyutları ve ambar boyutları gibi genel özellikleri kolayca değiştirilememektedir. Fakat ön dizayn aşamasında bir çok parametre değiştirilebilmekte ve böylece daha iyi bir çözüm elde edilebilmektedir. Bu dizayn aşamasında hız kazanabilmek için geminin performansına etki eden parametreler sistematik bir şekilde değiştirilebilir.

Geminin boy, genişlik, draft, blok katsayısı ve hacim merkezinin boyuna yeri gibi ana boyutları geminin direnç, sevk, denizcilik ve manevra kabiliyeti gibi başlıca hidrodinamik özelliklerine etki etmektedir. Bununla beraber ana boyutlar genellikle geminin çalışacağı limanın derinliği, geçeceği kanalların genişliği, taşıyacağı kargo tipi ve ağırlığı ile kısıtlanmıştır. Bu durumda gemi formu, tasarımcı açısından geminin hidrodinamik özelliklerini geliştirebilmek için elde kalan son parametredir. Bu sebeple neredeyse tüm yeni gemi formları model havuzunda test edilmektedir.

Günümüzde CFD uygulamaları gemi formlarının geliştirilmesinde hızlı sonuç vermesi ve model deneylerine göre maliyetinin düşük olması sebebi ile sıklıkla tercih edilmeye başlanmıştır (Van vd., 2006).

CFD uygulamalarının ve çeşitli dizayn tekniklerinin beraber kullanılması dikkat çekmiş ve yeni konsept analizlerinde ve gemi dizayn aşamasında bu yöntemlerin kullanılması gündeme gelmiştir. Geliştirilmiş dizayn teknikleri ve analiz metotlarını (CAD/CFD) içeren örnek gemi dizayn uygulamaları Bertram (2004) tarafından açıklanmıştır.

### 1.1 CFD Uygulamaları

CFD (Computational Fluid Dynamics), sıvı akışı, ısı transferi, kütle transferi ve kimyasal reaksiyonlar gibi olayların çözümlerini nümerik yöntemler kullanarak fizik kanunları çevresinde matematik denklemleri çözerek analiz eden yöntemdir. CFD analizlerinin sonuçları yeni dizaynların konsept çalışmaları, detaylı ürün geliştirme, çözüm üretme ve tekrar dizayn etme gibi mühendislik çözümleri ile ilgilidir [1].

Günümüzde sanayinin hemen hemen tüm kesimlerinde, akış problemlerinin incelenmesinde CFD uygulamaları oldukça popüler hale gelmiştir. CFD uygulamalarının yoğun olarak kullanıldığı sektörler:

- Uzay ve Havacılık
- Otomotiv
- Biyomedikal
- Enerji
- Kimyasal Üretim
- Havalandırma
- Petrol Araştırma
- Medikal Araştırmalar
- Meteoroloji
- Astrofizik
- Denizcilik
- Elektrik

olarak gösterilebilir.

Modern CFD uygulamalarının gelişmesi 1950'li yıllarda dijital bilgisayarların ortaya çıkması ile başlamaktadır. CFD'nin temelini oluşturan Sonlu Farklar Yöntemi(FDM) ve Sonlu Elemanlar Yöntemi(FEM) kısmi diferansiyel denklemlerin çözümünde kullanılan farklı orijin noktalarına sahip iki metottur (Chung,2002).

1910 yılında İngiltere'de Richardson tarafından yayınlanan makalede sonlu farklar metodu taş duvarların gerilme analizi için kullanılmıştır. Turner (1956) tarafından yayınlanan makalede sonlu elemanlar metodunun ilk uygulama örneği verilmiş olup burada sonlu elemanlar metodu uçak kanatlarının gerilme analizinin gerçekleştirilmesi için kullanılmıştır. Bundan sonra her iki metodun akışkanlar mekaniği, ısı transferi ve ilgili alanlara uygulanması paralel şekilde artmıştır.

Sonlu Farklar Yönteminin CFD'ye uygulanmasının ilk örnekleri Courant, Friedrichs ve Lewy (1928), Evans ve Harlow (1957), Godunov (1959), Lax ve Wendroff (1960), MacCormack (1969) tarafından verilmiş olup, mühendislik edebiyatında Sonlu Farklar Yönteminin CFD'ye uygulanması ile ilgili benzer çalışmalar görülmektedir.

Sonlu Elemanlar Yönteminin CFD'ye uygulanmasının ilk örnekleri ise Zienkiewicz ve Cheung (1965), Oden (1972), Chung (1978) tarafından verilmiştir.

CFD'nin temelini oluşturan bu iki metot dışında Sınır Elemanları Yöntemi (BEM), Sonlu Hacimler Yöntemi (FVM) gibi değişik teknikler geliştirilmiş olup FDM formülasyonundan türetilen FVM son zamanlarda CFD'de en çok kullanılan sayısal yöntem olup Sergei K.Godunov tarafından 1959 yılında geliştirilmiştir. Yapısal çözüm ağlarında olduğu kadar yapısal olmayan çözüm ağlarında da başarılı sonuçlar vermesi bu yöntemin avantajıdır (Özdemir, 2007).

## 1.2 Gemi İnşaatında CFD Uygulamaları

Ticari CFD programlarındaki gelişmeler ve bilgisayar hızlarındaki artış sayesinde CFD yöntemleri, bütün endüstriyel sektörlerde olduğu gibi gemi inşa sanayinde de akışkan problemlerinin çözümünde sıkça kullanılmaya başlanmıştır. Günümüzde CFD, dizayn aşamasındaki optimizasyonlar ve gemi inşa sanayi için pratik bir analiz aracı olarak düşünülebilir (Hino,1999).

Özdemir'e (2007) göre günümüzde ekonomik dizayn yapabilmek için sayısal yöntemleri ve deneysel verileri kullanmak kaçınılmaz hale gelmiştir ve gemi inşaatı sanayinde de diğer sanayi dallarında olduğu gibi CFD uygulamalarının birçok örneği görülebilir. Özdemir (2007) tarafından gemi inşaatı sanayinde bugüne kadar kullanılmış olan CFD uygulamaları aşağıda sıralanmıştır;

- a) Form optimizasyonu
- b) Baş ve kık formunun optimizasyonu
- c) Gemi etrafındaki dalga formunun ve deformasyonlarının tespiti
- d) Geminin direnç bileşenlerinin bulunması
- e) Takıntıların uygun yerlerinin bulunması
  - Yalpa omurgası
  - Baş ve kık iticiler
  - Kık kanatçıklar
  - Skeg omurga
  - Dümen ve topuk etrafındaki akış
  - İz düzenleyici nozul
  - Kort nozul

## f) Pervane tasarımı

- Pervane etrafındaki akış
- Pervane, tekne, dümen etkileşimi
- Nozul pervane ilişkisi
- Kavitasyon
- İz dağılımı

## g) Akış kaynaklı akustik analiz

## h) Yelken etrafındaki akışın analizi

## i) Yumru baş optimizasyonu

## j) Kayıcı tekneler üzerindeki dinamik kuvvetlerin hesabı

## k) Boru devrelerinde akışlar

## l) Baca gazı akışları

## m) Yatlarda ısısal konforun analizi

Gemi etrafındaki viskoz akışın tahmini ile ilgili ilk uluslararası çalışma toplantısı SSPA (İsveç Devlet Gemi İnşa Deney Tankı) ve ITTC (Uluslararası Çekme Tankı Konferansı) orgazinatörlüğünde 1980 yılında Götterburg-İsveç'te yapılmıştır (Larsson, 1981). Bu toplantının amacı kullanıcıları bir araya toplamak, gemi etrafındaki viskoz akış hesaplamalarındaki gelişmeleri belirlemek ve metotların ileriye dönük gelişimlerini ortaya koymaktır. Toplantıda kullanılan 17 adet metottan 16 adedi sınır tabaka yaklaşımına dayanmaktaydı (Larsson vd.,2003). Elde edilen genel sonuçta, birçok araştırmacı belirli bir yakınsaklıkla, geminin büyük bir kısmı için sınır tabakayı doğru biçimde bulmuşlardır. Fakat gemi kıçında ve iz bölgesinde metotların birçoğu arzu edilen sonucu vermemiştir (Özdemir,2007). 1980 yılında yapılan toplantıda ortaya çıkan sınır tabaka yaklaşımındaki bu hatalar araştırmacıları daha ileri yöntemler kullanmaya sevk etmiş ve gemi kıçındaki akış için RANS (Reynolds -average Navier-Stokes) denklemleri geliştirilmiştir. (Larsson vd.,2003).

20. yüzyılın sonlarına doğru yeni bir çalışma toplantısı yapma ihtiyacı ortaya çıkmış SSPA (İsveç Devlet Gemi İnşa Deney Tankı), CTU (Chalmers Teknoloji Üniversitesi) ve IIHR (Iowa Hidrolik Araştırmaları Enstitüsü) tarafından 1990 yılı Eylül ayında yine Götterburg'ta toplantı gerçekleştirilmiştir (Larsson, 1991).



Bir sonraki toplantı ise SRI(Gemi Araştırma Enstitüsü) tarafından 1994 yılında Tokyo-Japonya'da gerçekleştirilmiştir.

Serinin (Göteborg 1980 ve 1990, Tokyo 1994) dördüncü toplantısı Lars Larsson, Fred Stern ve Volker Bertram tarafından gemi etrafındaki viskoz akış hesaplamalarının gelişimini güncellemek ve ileriki araştırma ve geliştirmelere yön vermek amacıyla Eylül 1990'da Göteborg'da düzenlenmiştir (23. Uluslararası Çekme Tankı Konferansı Sonuç Raporu,2002).

## 2. GEMİ İNŞAATINDA KULLANILAN CFD METODLARINA VE DENKLEMLERİNE GENEL BAKIŞ

### 2.1 Gemi Hareketinin Akışkan Denklemleri

Gemi inşaatında kullanılan CFD uygulamaları genellikle hidrodinamik problemler ile ilgilidir. Çoğunlukla çözülen problemlerde, bir deniz aracının veya platformun su altında kalan kısmı için basınç değerleri ve akışkan hızları hesaplanmaya çalışılır. Bu yolla gemi üzerine etkileyen kuvvetler ve momentler zamana bağlı veya zamana bağlı olmadan hesaplanabilir.

Bu hesaplamalarda alışılmışı olarak akışkan, bu durumda su, sıkıştırılmaz ve izotermik olarak kabul edilebilir. Fakat çözümü yapılmak istenen problemin durumuna göre farklı kabuller de yapılabilmektedir.

Ticari CFD yazılımların büyük bir çoğunluğu sıkıştırılabilir, viskoz ve türbülanslı akış genel durumları için yazılmıştır. Bununla beraber doğru durum denklemleri, akışkan özellikleri ve sınır şartları seçildiğinde hidrodinamik durumlar için de uygulanabilmektedirler.

### 2.2 Akışkanlar Dinamiğinin Genel Diferansiyel Denklemleri

Sıvı akışının genel denklemleri fizik kanunlarının matematiksel ifadeleri ile temsil edilir.

- Sıvının kütlesi korunur.
- Momentumun değişim oranı sıvı üzerindeki kuvvetin toplamına eşittir.
- Enerji değişim oranı, ısı oranı ile yapılan iş oranının toplamına eşittir.

Düzensiz, üç boyutlu ve sıkıştırılabilir viskoz akış için denklemler aşağıdaki gibidir.

Süreklilik denklemi:

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

Momentum denklemleri:

$$\text{X bileşeni: } \rho \left( \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} + f_x \quad (2.2)$$

$$\text{Y bileşeni: } \rho \left( \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} + f_y \quad (2.3)$$

$$\text{Z bileşeni: } \rho \left( \frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} + f_z \quad (2.4)$$

Enerji denklemleri:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \left( \rho \left( e + \frac{U^2}{2} \right) \right) + \nabla \cdot \left( \rho U \left( e + \frac{U^2}{2} \right) \right) = \rho \dot{q} + \frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k \frac{\partial T}{\partial z} \right) \\ - \frac{\partial(u p)}{\partial x} - \frac{\partial(v p)}{\partial y} - \frac{\partial(w p)}{\partial z} \\ + \frac{\partial(u \tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial(u \tau_{yx})}{\partial y} + \frac{\partial(u \tau_{zx})}{\partial z} \\ + \frac{\partial(u \tau_{xy})}{\partial x} + \frac{\partial(u \tau_{yy})}{\partial y} + \frac{\partial(u \tau_{zy})}{\partial z} \\ + \frac{\partial(u \tau_{xz})}{\partial x} + \frac{\partial(u \tau_{yz})}{\partial y} + \frac{\partial(u \tau_{zz})}{\partial z} + \rho f U \end{aligned} \quad (2.5)$$

Burada;  $\rho$  akışkan yoğunluğunu,  $U = (u, v, w)$  akışkan hızını,  $p$  basıncı,  $T$  sıcaklığı,  $e$  birim kütle için iç enerjisini,  $f = (f_x, f_y, f_z)$  bünye kuvvetini,  $k$  ısı iletim katsayısını,  $\dot{q}$  birim kütle başına hacimsel ısı artışı oranı,  $\tau_{nm}$  viskoz gerilmeleri ifade eder.

Bu denklemler, 7 bilinmeyenli,  $u, v, w, p, T, q$  ve  $e$ , 5 transport denklemi ifade ederler.

Bunlarda;

Yoğunluğun sıcaklık ve basınçla olan ilişkisi:

$$\rho = \rho(T, p) \quad (2.6)$$

Statik entalpinin sıcaklık ve basınçla olan ilişkisi:

$$h = h(T, p) \quad (2.7)$$

İle tanımlanır.

### 2.2.1 Sıkıştırılamazlık Kabulü

Hidrodinamik için ihtiyaç duyduğumuz sıkıştırılamaz akışlar için, akışkanın Newtonian tipi ve akış boyunca viskozitenin ve yoğunluğun sabit olduğunu kabul edersek,

Süreklilik denklemi:

$$\nabla \cdot U = 0 \quad (2.8)$$

Orantı sabiti  $\mu$ , viskozite katsayısıdır. Viskoz gerilmeler:

$$\tau_{xx} = 2\mu \frac{\partial u}{\partial x} \quad \tau_{yy} = 2\mu \frac{\partial v}{\partial y} \quad \tau_{zz} = 2\mu \frac{\partial w}{\partial z} \quad (2.9)$$

$$\tau_{xy} = \tau_{yx} = \mu \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \quad \tau_{xz} = \tau_{zx} = \mu \left( \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) \quad \tau_{yz} = \tau_{zy} = \mu \left( \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \quad (2.10)$$

Bu ifadelerin (2.2), (2.3) ve (2.4) denklemlerinde yerleştirilmesi, Newtonian tipi bir akışkan için diferansiyel momentum denklemini verir. Burada  $f_x$ ,  $f_y$  ve  $f_z$  birim hacme düşen kütle kuvvetleri olup, yerçekimi, manyetizma, elektrik potansiyel gibi dış alanlar nedeniyle oluşur ve elemanın içindeki kütlenin tamamına etki ederler.

Momentum denklemleri:

$$\text{X momentum bileşeni:} \quad f_x - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) = \rho \frac{du}{dt} \quad (2.11)$$

$$\text{Y momentum bileşeni:} \quad f_y - \frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) = \rho \frac{dv}{dt} \quad (2.12)$$

$$\text{Z momentum bileşeni:} \quad f_z - \frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) = \rho \frac{dw}{dt} \quad (2.13)$$

İfadelerine dönüşmektedir.

### 2.2.2 Türbülanslı Akış

Yukarıda açıklanan denklemler sıkıştırılamaz, laminar akış ve sürekliliğin tanımlanmasında yeterli olmalarına rağmen lineer değildir ve kararsızdırlar. Fiziksel olarak bu kararsızlıklar türbülans mekanizmasını anlamak için imkan sağlarlar. Pratik olarak bu kararsızlıklar, denklemlerin analitik olarak çözümlenmesini imkânsız hale getirerek nümerik yöntemler ile çözüm yapılmasına ihtiyaç duyarlar.

Türbülanslı akış için, dalgalanmalardan dolayı, korunum denklemlerindeki her hız ve basınç terimi zaman ve konumun hızlı değişen rastgele bir fonksiyonudur. Bundan dolayı RANS (Reynolds Averaged Navier Stokes) denklemlerini elde etmek için akış fiziksel büyüklüklerin ani değerlerinin ortalaması alınarak akışkan hareket denklemleri çözülür. Ortalama değerler için elde edilen denklemler esas itibari ile orijinal denklemler ile aynıdır (Mehdiyev,2009).

Hız bileşenleri aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$U = U(x) + U'(x,t) \quad (2.14)$$

Burada,  $U(x)$  ortalamayı,  $U'(x,t)$  akıştaki düzensiz çalkantı (fluctuation) değerlerini ifade etmektedir.

Bu durumda momentumun x bileşeni,

$$\begin{aligned} \rho \left[ \frac{\partial(u^2)}{\partial x} + \frac{\partial(uv)}{\partial y} + \frac{\partial(uw)}{\partial z} \right] &= -\frac{dP}{dx} + \frac{\partial}{\partial x} \left[ \mu \frac{\partial u}{\partial x} - \rho \overline{u'^2} \right] \\ &+ \frac{\partial}{\partial y} \left[ \mu \frac{\partial u}{\partial y} - \rho \overline{u'v'} \right] \\ &+ \frac{\partial}{\partial z} \left[ \mu \frac{\partial u}{\partial z} - \rho \overline{u'w'} \right] \end{aligned} \quad (2.15)$$

Bu durumda momentumun y bileşeni,

$$\begin{aligned} \rho \left[ \frac{\partial(uv)}{\partial x} + \frac{\partial(v^2)}{\partial y} + \frac{\partial(vw)}{\partial z} \right] &= -\frac{dP}{dy} + \frac{\partial}{\partial x} \left[ \mu \frac{\partial v}{\partial x} - \rho \overline{u'v'} \right] \\ &+ \frac{\partial}{\partial y} \left[ \mu \frac{\partial v}{\partial y} - \rho \overline{v'^2} \right] \\ &+ \frac{\partial}{\partial z} \left[ \mu \frac{\partial v}{\partial z} - \rho \overline{v'w'} \right] \end{aligned} \quad (2.16)$$

Bu durumda momentumun z bileşeni,

$$\begin{aligned} \rho \left[ \frac{\partial(uw)}{\partial x} + \frac{\partial(vw)}{\partial y} + \frac{\partial(w^2)}{\partial z} \right] &= -\frac{dP}{dy} + \frac{\partial}{\partial x} \left[ \mu \frac{\partial w}{\partial x} - \rho \overline{u'w'} \right] \\ &+ \frac{\partial}{\partial y} \left[ \mu \frac{\partial w}{\partial y} - \rho \overline{v'w'} \right] \\ &+ \frac{\partial}{\partial z} \left[ \mu \frac{\partial w}{\partial z} - \rho \overline{w'^2} \right] \end{aligned} \quad (2.17)$$

### 2.2.3 Potansiyel Akış

Eğer ideal ve irrotasyonel akış kabulü yapılırsa,  $\nabla \times \vec{v} = 0$ ,  $\nabla = (\partial/\partial x, \partial/\partial y, \partial/\partial z)$ , momentum denklemleri sadeleştirilebilir. Bu durumda akışkan ivmelenmesi doğrudan akışkanın basınç grandyanlarına bağlıdır.

$$u = -\frac{\partial\phi}{\partial x} \quad v = -\frac{\partial\phi}{\partial y} \quad w = -\frac{\partial\phi}{\partial z} \quad (2.18)$$

(2.16) denklemleri, potansiyel akış Laplace denklemini türetmek için (2.8) süreklilik denkleminde yerine yazılarak aşağıdaki gibi türetilir:

$$\nabla^2\phi = \partial^2\phi/\partial x^2 + \partial^2\phi/\partial y^2 + \partial^2\phi/\partial z^2 = 0 \quad (2.19)$$

Potansiyel akışlarda akışkan basıncı için Navier Stokes denklemlerinin entegre edilmesiyle Bernoulli denklemlerini veren basit ifadeler türetmek mümkündür.

Potansiyel akışların nümerik çözümlerinin formülasyonunda kullanılan birçok yararlı özelliği vardır. Sınır elemanlarının ve panel yöntemlerinin değişik formları bu akışın modellenmesi ile anlamlı hale gelmiştir.

### 2.3 Genel Sınır Koşulları

Yukarıda herhangi bir akış için verilen akışkan hareketi denklemlerinin çözümü için uygun sınır şartlarının tanımlanması gerekmektedir. Böylece çözümün yapılacağı üç boyutlu alan için ifade edilen denklemlerin tek bir tanımlama ve çözümü mümkün olabilmektedir. Genel olarak bu sınır koşulları aşağıdaki iki şekilde olabilir:

- Sınırın değerleri bilinen noktalarda değişkenler için tanımlanan sabit değerler. (Dirichlet sınır şartları)
- Değişkenlerin türevlerinin bilinmesi (Neumann sınır şartı)

İlk tip sınır şartları sabit bir hızda büyük bir kontrol hacminin içinde ilerleyen geminin etrafındaki akış alanını incelerken karşımıza çıkar. Bu tip hesaplamalar yapılırken gemi yüzeyinin sabit olduğu kabul edilerek suyun hareketli olduğu düşünülür ve giriş sınır şartında suyun akış hızı için geminin hareketinin karşıt yönünde gemi hızına eşit sabit değer belirlenir. Benzer şekilde akışkan hızının bileşenleri gemi yüzeyinde sıfır olarak yani gemiyi delip geçmediği kabul edilir (No-slip sınır şartı).

İkinci tip sınır şartları ise gemi etrafındaki akışın zamandan bağımsız nümerik çözümlerinde görülebilir. Genellikle hesap hacminin boyutlarının küçültülmesi için geminin merkez hattında simetri düzlemi sınır şartı uygulanır. Serbest yüzey etkilerinin az olduğu veya hesaplama dışı bırakıldığı durumlarda su hattı düzlemine de simetri düzlemi sınır şartı verilir. (Double-model çözümü).

Sonuç olarak bu sınır şartlarının uygulanması seçilen çözüm yöntemine bağlıdır.

## **2.4 Türbülanslı Viskoz Akış Yöntemi**

### **2.4.1 Sonlu Farklar Yöntemi**

Sonlu farklar yöntemi 1768 yılında Euler tarafından geliştirilmiş olup en eski yöntemdir ve diferansiyel denklemlerin elle hesaplanmasında nümerik çözümler elde etmek için kullanılmıştır. Akışkan alanını tanımlayan ağ yapısının her düğüm noktasında, RANS denklemleri türevlerine sonlu fark yaklaşımı oluşturmak için Taylor serisi açılımları kullanılmıştır (WS Atkins Consultants ve NSC üyeleri,2003).

Sonlu farklar yöntemi uygulaması kolay bir yöntem olmasına rağmen düzenli bir ağ yapısına ihtiyaç duymaktadır. Genellikle düzgün (structured) ağ yapısı kullanılmalıdır.

### **2.4.2 Sonlu Elemanlar Yöntemi**

Sonlu elemanlar yöntemi ilk olarak yapısal analizlerde gerilme ve yer değiştirme hesapları için geliştirilmiştir. Yöntem bilinmeyen akış değişkenlerinin değişimlerini tanımlamak için yerel elemanlar üzerinde parçalı çok terimli fonksiyonları kullanır.

Günümüzde sonlu elemanlar yöntemini kullanan ticari ve araştırma amaçlı kodların olmasına rağmen; sonlu elemanlar yöntemi CFD uygulamalarında yaygın olarak kullanılmamaktadır.

Bunun yanı sıra sonlu elemanlar yöntemi, sonlu hacimler yöntemine göre daha fazla bilgisayar kaynağı ve işlemci gücü gerektirdiği için kullanımı kısıtlıdır.

### **2.4.3 Sonlu Hacimler Yöntemi**

Sonlu hacimler yöntemi ilk defa McDonald (1971), MacCormack ve Paullay (1972) tarafından zamana bağlı iki boyutlu Euler denklemlerinin çözümü için kullanılmıştır. Rizzi ve Inouye (1973) tarafından üç boyutlu akışlara uygulanmıştır. Sonlu hacimler yöntemi akışkanlar mekaniğinde, akışkanın hareket denklemlerinin integrallerini fiziksel alanda ayırıştırarak çözmek için kullanılır.

Yöntem düğüm kesişim noktaları (grid intersection point) yerine hücresel hacimler (cell volume) ile çalıştığından dolayı yapısal olmayan ağ yapısı kullanılabilir. Böylece karmaşık geometrilere sahip şekiller rahatlıkla modellenebilir.

Sonuç olarak yukarıda açıklanan diğer iki yöntemle oranla sonlu hacimler yöntemi günümüz ticari CFD programlarında en yaygın kullanılan yaklaşımdır.



### 3. GEMİ ETRAFINDA AKIŞ

Gemilerin istenilen bir hızda seyretmesi, ana makine gücünün doğru olarak seçilmesiyle mümkündür. Bu gücü belirleyebilmek için, öncelikle geminin hareketi sırasında su ve havadan gördüğü direncin hassas olarak bilinmesi gerekir. O halde gemiye, hareketini engelleyen direnci karşılayacak bir itme kuvveti uygulamak gerekir. Gemiye belirli bir hızda hareket ettiren bu itme kuvveti, gemi direncine eşit olacağından, itme kuvveti yerine gemi direncinden söz edilir. Bu sebeple, gemi ana makine gücü öyle belirlenmelidir ki, makineden pervaneye kadar uzanan güç iletim sistemi ve pervanedeki kayıplardan sonra tekne kıçında oluşan itme kuvveti, toplam direnci karşılayarak teknenin istenen hızda seyrini sağlasın (Baykal, 2002).

Gemi etrafındaki akış bileşenlerinin bilinmesi ile gemi direncini elde edebiliriz. Bu şekilde, gemi formu üzerinde düzeltmeler yaparak, direnci azaltma yollarını arayabiliriz (Barlas ve Aldoğan,1999).

#### 3.1 Gemi Direnci

Bir geminin herhangi bir hızla hareket etmesi sırasında, bulunduğu akışkan ortamından geminin hareketine karşı gösterilen karşı kuvvete direnç denir (Okan, 2007). Gemi direncinin bir mühendislik problemi olarak tanımlanabilmesi için direncin oluşumu, bileşenleri ve bunları etkileyen faktörlerin belirlenebilmesi ve verilen bir form için belirlenen hız aralığında deneysel ve/veya nümerik yöntemlerle hesaplanabilir olabilmesi gerekir (Odabaşı, 2007-2008).

Tanımı ve anlaşılması bu kadar basit görünmesine rağmen hesaplanması zor olan gemi direnci, çeşitli araştırmalar neticesinde hesaplanması ve anlaşılması kolay olabilecek bileşenlerine ayrılmıştır. Bu ayrım için temelde iki yaklaşım vardır (Gül vd.,2005).

1. Direnç kuvvetinin kaynağına göre yapılan ayrım. Bu ayrıma göre gemi üzerinde oluşan direnç kuvveti

a. Dalga direnci: Kaynağı, yerçekimi ivmesidir.

b. Viskoz direnç: Kaynağı suyun viskozitesidir.

i. Sürtünme direnci

ii. Viskoz basınç direnci

$$R_T = R_W + R_V \quad (3.1)$$

$$R_V = R_F + R_{VP} \quad (3.2)$$

2. Direnç kuvvetinin etkisine göre yapılan ayırım. Bu ayırma göre gemi üzerinde oluşan direnç kuvveti;

a. Basınç direnci: Gemi yüzeyi normal doğrultusunda oluşan direnç kuvveti

i. Dalga direnci

ii. Viskoz basınç direnci

b. Sürtünme direnci gemi yüzeyi teğeti doğrultusunda oluşan kuvvet

$$R_T = R_R + R_F \quad (3.3)$$

$$R_R = R_W + R_{VP} \quad (3.4)$$

Bu iki tür ayırma sebep olan “viskoz basınç direnci” form direnci olarak da adlandırılmakta ve sürtünme direncinin oranı olarak ifade edilmektedir.

$$R_{VP} = k \cdot R_F \quad (3.5)$$

Burada k sayısı form faktörü olarak adlandırılmaktadır. k sayısının büyüklüğü gemi formunun viskoz direnç açısından geometri kalitesini göstermektedir. Eğer gemi formu, sınır tabakanın oluşumu, aşırı çevrilerin oluşması ve eklentilerin geometrisi ve pozisyonları açısından optimize edilmediyse k sayısı büyüyecektir. k sayısı büyüdükçe formun kalitesi bozulacak ve form direnci artmış olacaktır. k sayısı sifıra yaklaştıkça gemi formunun durumu düz bir levhanın durumuna yaklaşacaktır.

Genel olarak baktığımızda gemi direncini aşağıdaki gibi üç ana bileşene ayırabiliriz:

1. Dalga direnci ( $R_W$ )

2. Sürtünme direnci ( $R_F$ )

3. Viskoz basınç direnci ( $R_{VP}$ )

$$R_T = R_W + R_F + R_{VP} \quad (3.6)$$

Dalga direnci: Geminin hareketi esnasında oluşturduğu dalgalar için harcadığı enerji olarak tarif edilebilir. Yerçekimi sebeplidir. Oluşmasında viskozitenin etkisi yoktur. Ancak gemi etrafındaki özellikle kıç bölgedeki viskoz akış, potansiyel akım şartlarını bozduğundan, dalga direnci bu anlamda viskoziteden etkilenmektedir.

Sürtünme direnci: Sürtünme direnci, gemi ıslak yüzeyi üstündeki teğetsel gerilmelerin gemi hareket yönünde toplanması ile elde edilen direnç bileşenidir (Odabaşı, 2007-2008). Oluşumunun sebebi viskozite ve yüzey pürüzlülüğüdür. Sürtünme direnci açısından formu optimize etmek için ya sürtünen yüzey alanı minimize edilecek ya da yüzey pürüzlülüğü

azaltılarak sürtünme katsayısı minimize edilmeye çalışılacaktır. Gemilerin sürtünme direncini hesaplamada sürtünme direnci katsayısı için ITTC-57 formülü başarıyla kullanılmaktadır.

$$C_F = \frac{0.075}{\log_{10}(R_n - 2)^2} \quad (3.7)$$

Viskoz basınç direnci (form direnci) : Serbest su yüzeysiz (tamamen batmış) ve ideal bir akışkan içerisinde hareket eden bir cismin direnci sıfırdır (D'Alembert paradoksu). Yani cisim üzerindeki basınç dağılımının ilerleme yönündeki bileşenleri toplamı sıfırdır. Viskozite olaya dâhil edildiğinde durum değişmekte ve cisim üzerindeki basınç dağılımının ilerleme yönündeki bileşenleri toplamı sıfırdan farklı çıkmaktadır. İşte bu farka viskoz basınç direnci, bu direncin sürtünme direncine oranına da form faktörü denilmektedir.

### 3.1.1 Gemi Formunun Direnç Üzerindeki Etkisi

Gemi direncinin azaltılması yakıt tüketimini de azaltacağından dizayn aşamasında mümkün olan en az dirence sahip gemi formu elde edilmelidir. Yeni bir gemi için genellikle belirli bir hızda belirli tonajdaki yükü taşıması istenir. Bu durumda dizayner istenen tonajı elde etmek için deplasman ve ana boyutları belirlemelidir. Ana boyutlar genellikle, direnç ve sevk sistemine göre değil geminin sefer yapacağı bölgedeki kısıtlamalar ile belirlenir. İlk yatırım maliyetlerine bakıldığında gemi boyunun uzatılması pahalıdır ve seyir yapılacak bölgeye ve havuzlama kısıtlamalarına bağlıdır. Direnç açısından bakıldığında ise belirli bir deplasmana göre daha uzun bir geminin dalga direnci ve sürtünme direnci daha düşük olacaktır. Buna bağlı olarak da geminin aynı makine gücü için daha süratli seyir yapmasını sağlayacaktır. Ayrıca daha uzun boya sahip gemilerin denizcilik özelliklerinin daha iyi olduğu bilinmektedir.

Belirli bir deplasmanda drafttaki artış genel olarak direnç açısından daha faydalı ve maliyet açısından ucuz olmasına rağmen seyir yapılacak bölgedeki limanların derinlikleri, kanal boyutları ve geçilecek nehrin özellikleri ile kısıtlıdır. Genişliğe bakıldığında ise yeterli stabiliteyi sağlamak açısından önemli bir faktör olduğu görülür ve bu aşamada minimum B/T oranına ihtiyaç duyulur. Belirli bir deplasman için düzgün bir gemi formu oluşturulmadığı sürece genişlikteki artış direncin de artmasına sebep olacaktır.

Bu değerlendirmelerin gemi inşa mühendislerine ana boyutların seçilmesinde rehber olmasının yanı sıra diğer talepler ve ihtiyaçlar da göz önünde bulundurulmalıdır. Dizayn işlemi çeşitli parametreler dengeye gelene kadar iteratif şekilde devam eder. Tüm bu iterasyonlar yapılırken ana boyutlar, gemi makine tipi, gemi formu ve gemi formu faktörleri parametrik olarak kontrol edilmelidir.

## 3.2 CFD Yardımı ile Analiz

### 3.2.1 Gemi Geometrisinin Oluşturulması

Geometrik modelleme teknikleri birçok farklı şekilde (sınırların modellenmesi, katı modelleme vs.) sınıflandırılabilir. Aşağıdaki basit sınıflandırma Harries (2004) tarafından verilmiştir:

- Konvansiyonel modelleme (Conventional modelling): Şekiller, birbirinden bağımsız ve eyleme özgü bilgiler içermeyen datalardan tanımlanırlar. B-spline yüzeylerin çok yüzlü köşe noktalarından tanımlanması bu modellemeye örnek olarak gösterilebilir.
- Kısmi parametrik modelleme (Partial parametric modelling): Geometrinin değişimleri çeşitli parametreler ile tanımlanır.
- Tamamen parametrik modelleme (Fully parametric modelling): Tüm geometri parametrelere bağlı olarak tanımlanır.

Gemi inşaatı uygulamalarında çok çeşitli yazılımlar kullanılmaktadır. Bunlar yukarıda açıklanan modelleme tekniklerini içerirler.

Geometri genellikle IGES (Initial Graphics Exchange Specification) ve benzeri genel formatlarda verilir. IGES, CAD programları arasında bilgi alışverişini sağlamak için tasarlanmış vektörel grafik dosyasıdır. Özellikle geometri oluştururken, geometriyi interaktif olarak kontrol edebilmek için CAD programı kullanılır. Daha sonra geometri CFD programlarının ön-işlem modüllerine aktarılır. Bu modüllerde eğer varsa geometri üzerindeki hatalar düzeltilmeye çalışılır.

### 3.2.2 Ağ Yapısının Oluşturulması ve Sınır Koşullarının Belirlenmesi

CFD uygulamalarında modelleme çalışmasının en zor, zaman alan ve tecrübe gerektiren bölümü ağ yapısının oluşturulmasıdır. Ağ yapısının özellikleri çözücünün performansını doğrudan etkilediği gibi sonuçların doğruluğu da ağ yapısının uygunluğuna bağlıdır. Kısaca ağ yapısının yoğunluğu ne kadar fazla olursa çözümün hassasiyeti artar diyebiliriz. Öte yandan ağ yapısının çok yoğun olması durumunda ise yapılacak hesaplamaların toplam süresi artar ve hatta hesaplama, kullanılan bilgisayar sisteminin imkanları dahilinde, çözülemeyen bir hal alabilir. Ağ yapısının oluşturulması ile ilgili yararlı bir literatür taraması Thompson(1996) tarafından yapılmıştır.

Ağ yapısı ilgilenilen bölgedeki geometriyi tanımlar. Ağ yapısı, geometrik yapıyı hassas bir şekilde tanımlamak için hacimsel yapılardan oluşur. CFD uygulamalarında kullanılan ağ

yapısı neredeyse evrensel hale gelmiştir. Buna rağmen aşağıda örneklerinden bazıları verilen ağ yapıları mevcuttur:

- Düzgün (Structured) Ağ Yapısı
- Blok Düzgün (Block Structured) Ağ
- Düzgün Olmayan (Unstructured) Ağ
- Düzgün ve Düzgün Olmayan Ağların Beraber Kullanılması (Melez)

Ağ yapısı akışın bütün önemli özelliklerini karşılayacak kadar hassas olmalıdır. Bu da ağ yapısının hassas hesap yapılacak bölgede iyileştirilmesi ile sağlanabilir. Bu tür bir uygulamada düzgün olmayan ağ yapısı kullanılması ihtiyacı en iyi şekilde karşılayacaktır. Ağ yapısının yoğunluğunun yanı sıra ağ yapısının kalitesinde kullanılan hacimsel elemanlarında şekilleri ve geometrik özellikleri etkilidir.

Ağ yapısının oluşturulmasından sonra işlem sırası sınır koşullarının model üzerine uygulanmasına gelir. Çözümün mümkün olabilmesi için çözümü yapılacak problemin yapısına uygun sınır şartları uygulanır. Sınır koşullarının belirlenmesi aşağıdaki maddeleri içermelidir:

- Sınır koşullarının yerlerinin belirlenmesi (giriş, çıkış, duvar ve simetri koşulları)
- Sınır koşullarındaki bilgilerin girilmesi (örneğin giriş için gemi hızının girilmesi)

Sınır koşullarında ihtiyaç duyulan bilgiler, sınır koşulunun tipine ve çözümü yapılacak fiziksel modele göre değişmektedir. Sınır koşullarında girilecek bilgiler ve sınır koşullarının uygulanacağı bölgeler bilinmelidir. Aksi takdirde yanlış girilmiş sınır koşulları ve sınır koşulu değerleri sonuca büyük ölçüde etki edecektir.

### **3.2.3 Viskoz Direncin ve Sürtünme Direncinin Hesaplanması**

Fluent çözümü sonucunda cismin üzerindeki kuvvetlerin hesaplanması istendiğinde iki türlü kuvvet hesaplanmaktadır. Basınç kuvveti ve sürtünme kuvveti, viskoz basınç direnci ve dalga direncinin her ikisi basınç kaynaklıdır. Ancak basınç kuvveti hesaplanırken bunları ayırmak mümkün olmamaktadır. Viskoz basınç direncini dalga direncinden (potansiyel basınç direnci) ayırabilmek için çözümü double-model olarak yapmak yeterlidir. Bu da serbest su yüzeyine simetri şartını vermekle kolayca yapılabilir. Double-model çözümünden elde edilen basınç, viskoz basınç direncini ve bu kuvvetin sürtünme direncine oranı ise form faktörünü verecektir (Gül vd.,2005).

### 3.2.4 CFD Analiz Raporlarının Sunumu

CFD yöntemleri ile çözümde kullanılan yazılım tarafından bir çok data üretilir. Bu miktardaki dataların sunumunun düzgün yapılabilmesi için düzenlemeye ihtiyaç duyulmaktadır. Bu durumda alışlagelmiş gösterimler aşağıdaki gibidir:

- Gemi formu üzerindeki basınç dağılımları
- Geminin oluşturduğu dalga profili
- Gemi formu üzerindeki hız vektörleri
- Dalga modeli
- Su yüzeyinin perspektif görünüşü

Bertram'a (1992) göre CFD raporları minimum aşağıdaki bilgileri içermelidir:

Gemi formunun geliştirilmesi ile ilgili bilgiler

- a) İlgili bölgelerdeki basınç hatlarının üst ve alttan uygun eğimli açılardan tercihen renkli olarak gösterilmesi
- b) Gemi üzerinde oluşan dalga profilinin gösterilmesi (dalga direncinin dikkate alınmadığı analizlerde gerek yoktur ve gösterilmeyecektir.).
- c) Gemi hızının referans vektör olarak gösterildiği gemi baş tarafındaki hız dağılımının akış yönleri ile gösterilmesi.
- d) Referans alınan form ile karşılaştırmak için gemi direncindeki değişikliklerin gösterilmesi.

Sonuçların kontrolü ile ilgili bilgiler

- a) Özellikle gemi formu üzerinde oluşturulan ağ yapısının gösterilmesi.
- b) Çözüm iterasyonlarının yakınsaklıkları ile ilgili bilgilerin verilmesi.
- c) Hesap yapılan hacimdeki mantıksız sonuçları belirlemek için dalga modelinin gösterilmesi.

Genel olarak gemi formu gösterimleri, posta hatları ve dizayn su hattı gibi ana referans hatlarını endaze planına referans sağlamak için içermelidir.

### 3.3 CFD Uygulamalarındaki Belirsizlikler ve Genel Hatalar

Ayrıklaştırma işlemi her koşulda elde edilen sonuçların yaklaşık olmasıdır. Buna ek olarak akışkan hareketleri fiziksel olarak karmaşık yapıdadır ve bu akış hareketini tanımlayan denklemler, gerçek fiziksel akışın sadece yaklaşık olarak ifade edilmesidir.

CFD uygulamalarının kendi karmaşık yapısından dolayı, uygulamacının bir dizi farklı işlemi gerçekleştirmesini gerektirmektedir. Bu işlemler:

- Problemin tanımlanması
- Çözüm stratejisinin belirlenmesi
- Modelin geliştirilmesi
- Hesaplamanın yapılması
- Sonuçların analiz edilmesi

CFD uygulamalarındaki hatalar ve belirsizlikler ile ilgili evrensel olarak kabul edilmiş bir sınıflama bulunmamaktadır. Aşağıda yapılan sınıflama yedi farklı hata ve belirsizlik için yapılmıştır.

### **3.3.1 Model Hataları ve Belirsizlikler**

Bu hata ve belirsizlikler gerçek akış ve model denklemlerinin çözümü arasındaki farklardan kaynaklanmaktadır.

### **3.3.2 Ayrıklaştırma ve Nümerik Hatalar**

Bu hatalar model denklemlerinin gerçek çözümü ile ağ yapısı üzerinde bulunan belirli bir sayıda düğüm noktasında yapılan nümerik çözüm arasındaki farklardan dolayı ortaya çıkmaktadır. Genel olarak ağ yapısını sıklaştırarak daha iyi sonuçlar elde edilebilmektedir.

### **3.3.3 İterasyon ve Yakınsama Hataları**

Bu hatalar sonlu sayıdaki düğüm noktasında tamamen yakınsanmış bir çözüm ile yakınsanmamış çözüm arasındaki farklardan kaynaklanmaktadır. CFD yöntemleri ile çözülen denklemler genellikle iteratif olduğundan, başlangıç yaklaşımından çözüme ulaşmaya çalışırlar.

### **3.3.4 Yuvarlama Hataları**

Yuvarlama hataları, iterasyon işlemi esnasında bilgisayar hassasiyetinin yetersizliğinden dolayı bir parametrenin iki değeri arasında oluşan farklardan kaynaklanmaktadır.

### **3.3.5 Uygulama Belirsizlikleri**

Bu belirsizlik uygulamanın karmaşık olmasından ve simülasyon için gerekli ve hassas bilginin sağlanamamasından kaynaklanmaktadır.

### 3.3.6 Kullanıcı Hataları

Bu hatalar kullanıcının yaptığı hataları ve dikkatsizliklerden ortaya çıkmaktadır. Bu tip hatalar genellikle tecrübe ile azalmaktadır.

CFD uygulamalarında insan faktörü önemli bir rol oynamaktadır. Sonuçlar kullanıcının yeterliliğine ve tecrübesine dayanmaktadır.

CFD kodlarının kullanımındaki hızlı artış, birçok alternatif modelleme seçeneği olan paket programların sayısının artmasına sebep olmuştur. Bu durum kullanıcı hatalarının artmasına sebep olmaktadır. Bu artış eğilimi basit kullanıcı arayüzlü programların, tecrübesiz kullanıcılar tarafından da kullanılabilmesi sorununu oluşturmuştur.

### 3.3.7 Kod Hataları

CFD programlarındaki hatalardan dolayı ortaya çıkan hatalardır. CFD programlarının oldukça karmaşık yapısından dolayı bu tür hataları bulmak oldukça zordur.

## 3.4 Hata Kaynakları ve Belirsizlikleri

### 3.4.1 Hata Kaynakların ve Belirsizliklerin Tanımı

CFD uygulamalarındaki eksiklikler çoğunlukla yapılan hatalarla ve belirsizlikler ile ilgilidir. AIAA (Amerikan Havacılık ve Uzay Enstitüsü) 1998 yılında yayınladığı bir rehberde hata ve belirsizliklerin tanımını aşağıdaki gibi yapmıştır:

- Hata: Bilgi yetersizliğinden kaynaklanmayan belirlenebilen eksiklikler
- Belirsizlik: Bilgi yetersizliğinden oluşabilecek olan muhtemel eksiklikler

Hata tanımına örnek olarak yuvarlama hataları ve iterasyon esnasındaki yakınsama hataları gösterilebilir. Bu gibi durumlarda analizi yapan kişinin hatanın boyutunu tahmin etme şansı olabilir. Giriş datalarında ve kodun kendisinde olan uygulama hatalarını tahmin etmek için herhangi bir yöntem bulunmamaktadır.

Belirsizlikler fiziksel karakteristiklerin tam olarak bilinmemesinden kaynaklanır. Hatalar daha dikkatli işlemler yapılarak giderilebilirken, belirsizlikler bilgi eksikliğinden kaynaklandığından dolayı ortadan kaldırılamazlar.

### 3.4.2 İnceleme, Doğrulama ve Düzenleme İşlemlerinin Tanımı

Aşağıda verilen tanımlar AIAA rehberi (1998), Roache(1998), Rizzi ve Vos(1998), ve Fisher ve Rhodes(1996) tarafından belirtilmişlerdir:

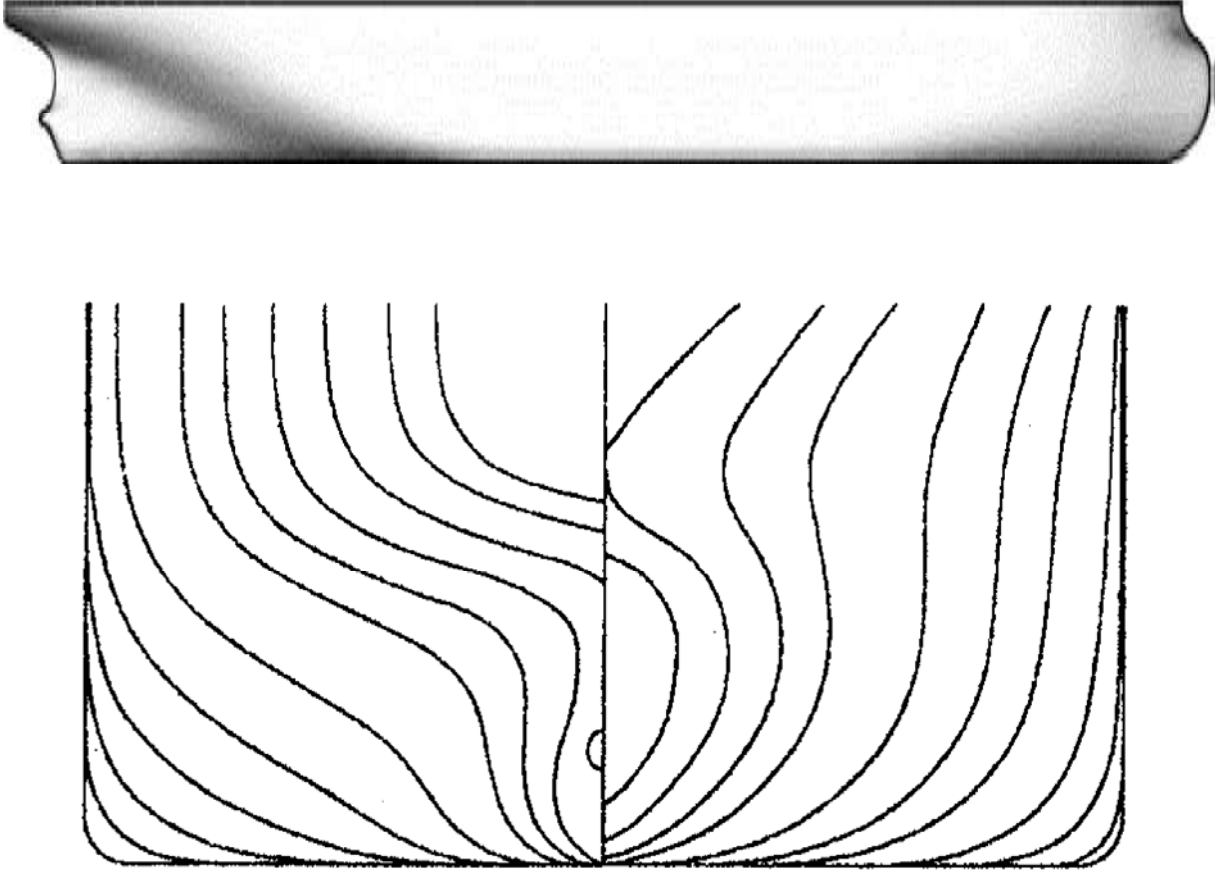


- İnceleme (Verification): CFD analizleri için kullanılan bilgisayar programının denklemleri doğru olarak çözüp çözemediğinin belirlenmesi prosedürüdür.
- Doğrulama (Validation): CFD analizi için kullanılan modelin tam olarak gerçeği yansıtip yansıtmadığının belirlenmesi prosedürüdür.
- Düzenleme (Calibration): Dizayn edilmek üzere belirlenen geometrinin genel parametrelerinin CFD kodun yardımıyla tahmin edilme kabiliyetinin belirlenmesi prosedürüdür.

Gemi hidrodinamiği dalında inceleme, doğrulama ve düzenleme işlemleri ile ilgili daha detaylı bilgi ITTC raporlarında mevcuttur.

#### 4. SEÇİLEN BİR GEMİ FORMUNUN SİSTEMATİK VE CFD ANALİZİ İLE OPTİMİZASYONU

Bu çalışmada eski adı KRISO (Korea Research Institute of Ships & Ocean Engineering) yeni adıyla MOERI(Maritime&Ocean Engineering Research Institute) olan araştırma enstitüsü tarafından geliştirilen ve birçok araştırmada örnek form olarak kullanılan KVLCC2 formu kullanılmıştır [2]. KVLCC2, MOERI tarafından geliştirilmiş U formlu kış hatlarına sahip tankerin ikinci versiyonudur (Van vd., 1998, Kim vd., 2001). Formun özellikleri Şekil 4.1 ve Çizelge 4.1’de görülebilir. KVLCC orijinal tekne formu KRISO tarafından akışkan fiziğini açıklamak ve modern tanker formlarının CFD analizlerini doğrulamak için düşünülmüştür. Ayrıca bu form Göteburg çalışma toplantılarında karşılaştırmalı değerlendirme formu ve koşulları olarak kullanılmıştır (Larsson vd.,2000a).



Şekil 4.1 KRISO KVLCC2 Tekne Formu

Çizelge 4.1 KRISO VLCC2 ana boyutlar

Ana Boyutlar		Tam ölçekli
Dikmeler Arası Boy	$L_{PP}$ [m]	320
Su Hattı Boyu	$L_{WL}$ [m]	325.5
Genişlik	$B$ [m]	58
Derinlik	$D$ [m]	30
Draft	$T$ [m]	20.8
Deplasman Hacmi	$\nabla$ [m <sup>3</sup> ]	310660
Dümen Hariç Islak Alan	$S_W$ [m <sup>2</sup> ]	27957
Blok Katsayısı ( $C_B$ )	$\nabla / (L_{WL} B_{WL} T)$	0.791
Orta Kesit Narinlik Katsayısı ( $C_M$ )		0.998
LCB (% $L_{PP}$ ), baş+		3.48
Ağırlık Merkezinin Düşey Yeri	$KG$ [m]	18.6
Metasantr Yüksekliği	$GM$ [m]	5.71
Gemi Hızı	$V$ [knot]	15.5

#### 4.1 Seçilen Formun Sistematik Analizi

Sistematik analiz, seçilen KVLCC2 formunun deplasman hacmi sabit tutularak çeşitli B/T oranları kullanılıp yeni formların oluşturulması ile yapılmıştır. B/T oranı ilk durumda %5 azaltılmış, ikinci durumda %2.5 azaltılmış, üçüncü durumda %2.5 artırılmış ve dördüncü durumda %5 artırılarak yeni formlar elde edilmiştir. Bu durumlarda oluşan boyutlar Çizelge 4.2’de verilmiştir.

Çizelge 4.2 Sistematik analiz için kullanılan B/T oranına bağlı ana boyutlar

Durum	1	2	Başlangıç	3	4
$L_{WL}$ [m]	309.225	317.363	325.500	333.638	341.775
$L/B$	5.331	5.472	5.612	5.752	5.893
$B/T$	2.649	2.719	2.788	2.858	2.928
$\nabla$ [m <sup>3</sup> ]	310660	310660	310660	310660	310660

Her B/T oranı için su hattı boyuna ve L/B oranına bağılı olarak 25 adet form oluşturulmuştur. 5 adet B/T oranına bağılı olarak toplamda 125 adet gemi formu oluşturulmuştur. B/T oranının 2.788 alındığı başlangıç durumu için ana boyutlar Çizelge 4.3'te, B/T oranının 2.649 alındığı ilk durum için ana boyutlar Çizelge 4.4'te, B/T oranının 2.719 alındığı ikinci durum için ana boyutlar Çizelge 4.5'te, B/T oranının 2.858 alındığı üçüncü durum için ana boyutlar Çizelge 4.6'da ve B/T oranının 2.928 alındığı dördüncü durum için ana boyutlar Çizelge 4.7'de verilmiştir.

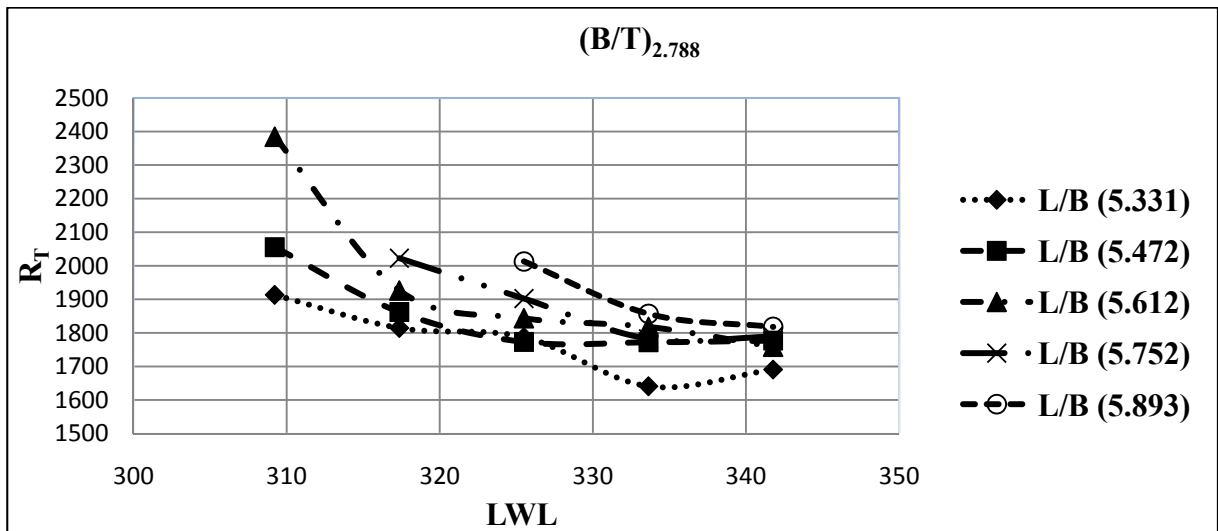
Ayrıca yukarıda bahsedilen çizelgelerde bu formların Maxsurf paket programının Hullspeed modülünde Holtrop-Mennen metodu kullanılarak bulunan toplam dirençleri de verilmiştir. Bu yöntem, Hollanda gemi model deney havuzunda (The Netherlands Ship Model Basin - NSMB) yapılmış, çok sayıda gemi model deneyleri ile gemilerde yapılan ölçümlerin regresyon analizi ile incelenmesi ve sonuçların gemi form parametreleri cinsinden ifade edilmesi ile ortaya çıkmıştır (Holtrop ve Mennen,1982).

Bu çizelgeler oluşturulduktan sonra, B/T oranının belirlenen değerlerinde her L/B oranının toplam direnç ve su hattı boyu grafikleri çizilmiştir. Bu grafikler Şekil 4.2, Şekil 4.3, Şekil 4.4, Şekil 4.5 ve Şekil 4.6'da verilmiştir. Bu grafiklerden istenilen su hattı boyu ve L/B oranına bağılı olarak toplam direnç elde edilebilir. Böylece istenilen su hattı boyunda istenilen L/B oranı kullanılarak, B ve T değerleri elde edilir yani geminin ana boyutlarına ve toplam direncine ulaşılabilmektedir.

Burada dikkat edilmesi gereken çizelgelerde boş bırakılan değerlere ait formların narinlik katsayılarının( $C_B$ ) bir veya bire çok yakın olmasından dolayı çizilen grafiklerde bu değerlerin kullanılmamasıdır.

Çizelge 4.3 B/T oranı 2.788 için ana boyutlar ve toplam direnç değerleri

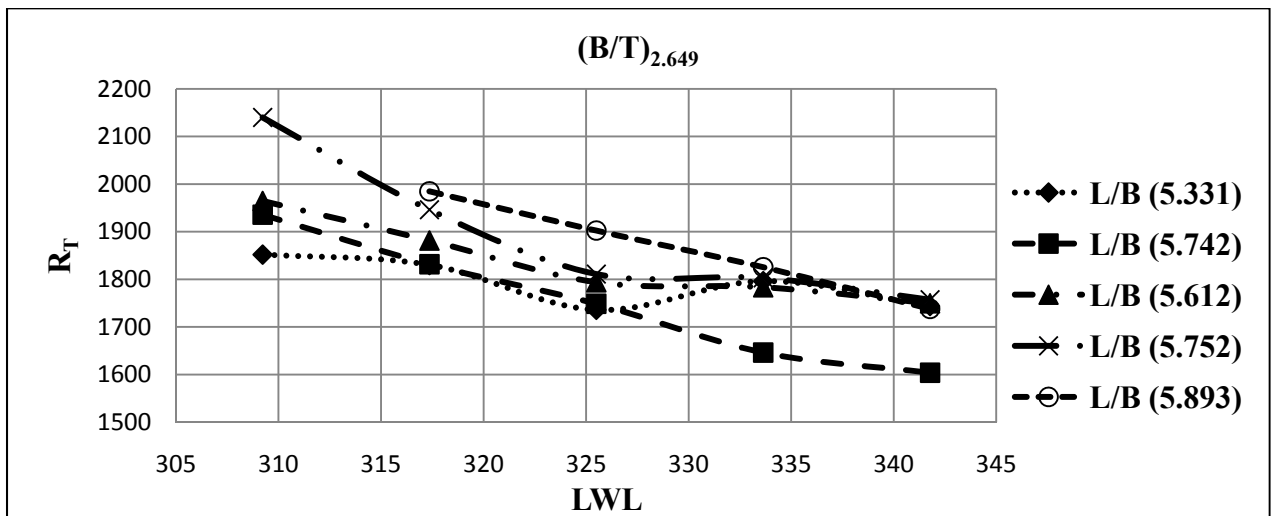
	LWL [m]	L/B	B/T	B [m]	T [m]	$\nabla$ [m <sup>3</sup> ]	$C_B$ [ $\nabla/(LWL*BWL* T)$ ]	$R_T$ [kN]
1	309.225	5.331	2.788	58.000	20.800	310660	0.833	1913.120
2	309.225	5.472	2.788	56.513	20.267	310660	0.877	2055.340
3	309.225	5.612	2.788	55.100	19.760	310660	0.923	2384.580
4	309.225	5.752	2.788	53.756	19.278	310660	0.969	8863.800
5	309.225	5.893	2.788	52.476	18.819	310660	1.017	
6	317.363	5.331	2.788	59.526	21.347	310660	0.770	1814.290
7	317.363	5.472	2.788	58.000	20.800	310660	0.811	1862.260
8	317.363	5.612	2.788	56.550	20.280	310660	0.854	1926.320
9	317.363	5.752	2.788	55.171	19.785	310660	0.897	2022.510
10	317.363	5.893	2.788	53.857	19.314	310660	0.941	6326.140
11	325.500	5.331	2.788	61.053	21.895	310660	0.714	1787.260
12	325.500	5.472	2.788	59.487	21.333	310660	0.752	1772.980
13	325.500	5.612	2.788	58.000	20.800	310660	0.791	1843.790
14	325.500	5.752	2.788	56.585	20.293	310660	0.831	1902.170
15	325.500	5.893	2.788	55.238	19.810	310660	0.872	2012.690
16	333.638	5.331	2.788	62.579	22.442	310660	0.663	1640.780
17	333.638	5.472	2.788	60.974	21.867	310660	0.698	1772.040
18	333.638	5.612	2.788	59.450	21.320	310660	0.735	1817.880
19	333.638	5.752	2.788	58.000	20.800	310660	0.772	1782.250
20	333.638	5.893	2.788	56.619	20.305	310660	0.810	1856.640
21	341.775	5.331	2.788	64.105	22.989	310660	0.617	1690.550
22	341.775	5.472	2.788	62.462	22.400	310660	0.650	1777.030
23	341.775	5.612	2.788	60.900	21.840	310660	0.683	1758.840
24	341.775	5.752	2.788	59.415	21.307	310660	0.718	1789.060
25	341.775	5.893	2.788	58.000	20.800	310660	0.753	1817.710



Şekil 4.2 B/T 2.788 oranına bağlı su hattı boyu - direnç grafiği

Çizelge 4.4 B/T oranı 2.649 için ana boyutlar ve toplam direnç değerleri

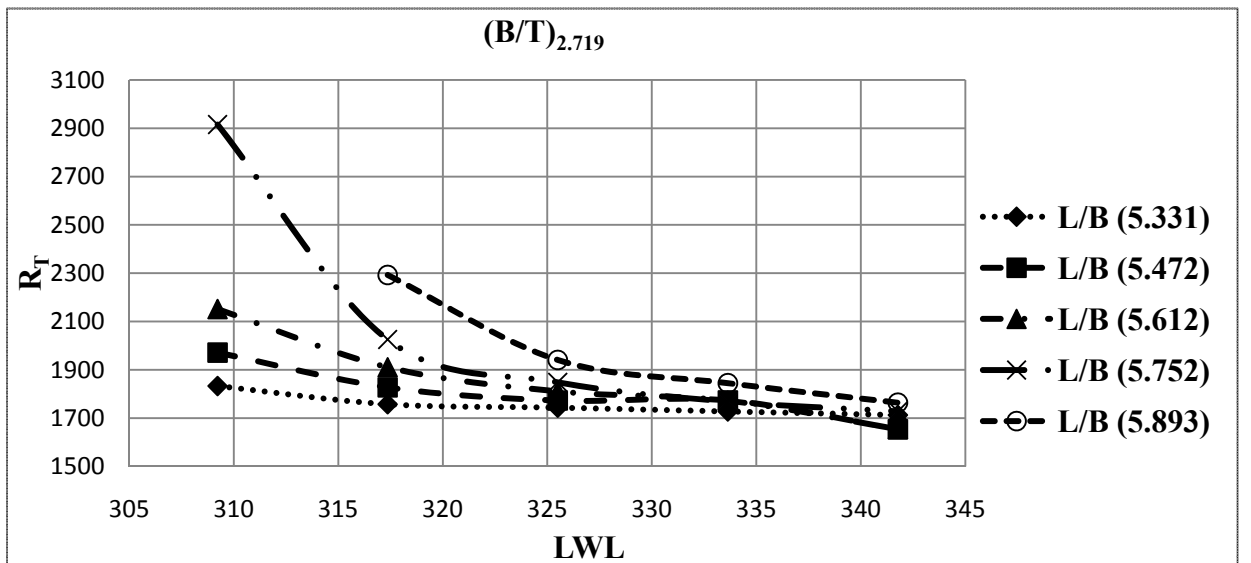
	LWL [m]	L/B	B/T	B [m]	T [m]	$\nabla$ [m <sup>3</sup> ]	$C_B$ [ $\nabla/(LWL*BWL* T)$ ]	$R_T$ [kN]
26	309.225	5.331	2.649	58.000	21.895	310660	0.791	1852.090
27	309.225	5.472	2.649	56.513	21.333	310660	0.833	1935.750
28	309.225	5.612	2.649	55.100	20.800	310660	0.877	1964.590
29	309.225	5.752	2.649	53.756	20.293	310660	0.921	2140.040
30	309.225	5.893	2.649	52.476	19.810	310660	0.966	14289.060
31	317.363	5.331	2.649	59.526	22.471	310660	0.732	1830.250
32	317.363	5.472	2.649	58.000	21.895	310660	0.771	1831.670
33	317.363	5.612	2.649	56.550	21.347	310660	0.811	1881.550
34	317.363	5.752	2.649	55.171	20.827	310660	0.852	1946.240
35	317.363	5.893	2.649	53.857	20.331	310660	0.894	1984.820
36	325.500	5.331	2.649	61.053	23.047	310660	0.678	1735.870
37	325.500	5.472	2.649	59.487	22.456	310660	0.714	1748.740
38	325.500	5.612	2.649	58.000	21.895	310660	0.752	1793.920
39	325.500	5.752	2.649	56.585	21.361	310660	0.790	1811.090
40	325.500	5.893	2.649	55.238	20.852	310660	0.829	1902.440
41	333.638	5.331	2.649	62.579	23.623	310660	0.630	1796.220
42	333.638	5.472	2.649	60.974	23.018	310660	0.663	1646.280
43	333.638	5.612	2.649	59.450	22.442	310660	0.698	1783.480
44	333.638	5.752	2.649	58.000	21.895	310660	0.733	1803.070
45	333.638	5.893	2.649	56.619	21.373	310660	0.769	1825.520
46	341.775	5.331	2.649	64.105	24.199	310660	0.586	1743.860
47	341.775	5.472	2.649	62.462	23.579	310660	0.617	1603.920
48	341.775	5.612	2.649	60.900	22.989	310660	0.649	1749.730
49	341.775	5.752	2.649	59.415	22.429	310660	0.682	1757.260
50	341.775	5.893	2.649	58.000	21.895	310660	0.716	1737.960



Şekil 4.3 B/T 2.649 oranına bağlı su hattı boyu - direnç grafiği

Çizelge 4.5 B/T oranı 2.719 için ana boyutlar ve toplam direnç değerleri

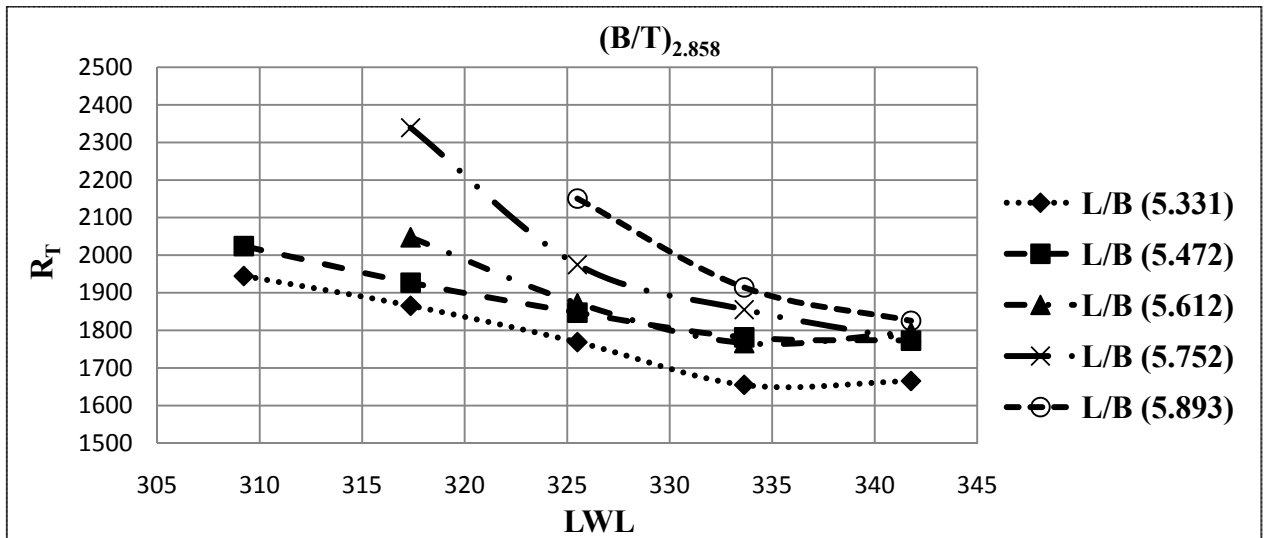
	LWL [m]	L/B	B/T	B [m]	T [m]	$\nabla$ [m <sup>3</sup> ]	$C_B$ [ $\nabla/(LWL*BWL* T)$ ]	$R_T$ [kN]
51	309.225	5.331	2.719	58.000	21.333	310660	0.812	1833.050
52	309.225	5.472	2.719	56.513	20.786	310660	0.855	1971.230
53	309.225	5.612	2.719	55.100	20.267	310660	0.900	2151.550
54	309.225	5.752	2.719	53.756	19.772	310660	0.945	2915.430
55	309.225	5.893	2.719	52.476	19.302	310660	0.992	
56	317.363	5.331	2.719	59.526	21.895	310660	0.751	1757.600
57	317.363	5.472	2.719	58.000	21.333	310660	0.791	1827.320
58	317.363	5.612	2.719	56.550	20.800	310660	0.832	1910.720
59	317.363	5.752	2.719	55.171	20.293	310660	0.874	2025.480
60	317.363	5.893	2.719	53.857	19.810	310660	0.918	2292.530
61	325.500	5.331	2.719	61.053	22.456	310660	0.696	1743.400
62	325.500	5.472	2.719	59.487	21.880	310660	0.733	1772.830
63	325.500	5.612	2.719	58.000	21.333	310660	0.771	1810.720
64	325.500	5.752	2.719	56.585	20.813	310660	0.810	1848.330
65	325.500	5.893	2.719	55.238	20.317	310660	0.850	1940.640
66	333.638	5.331	2.719	62.579	23.018	310660	0.646	1727.490
67	333.638	5.472	2.719	60.974	22.427	310660	0.681	1773.620
68	333.638	5.612	2.719	59.450	21.867	310660	0.716	1772.200
69	333.638	5.752	2.719	58.000	21.333	310660	0.753	1768.430
70	333.638	5.893	2.719	56.619	20.825	310660	0.790	1844.790
71	341.775	5.331	2.719	64.105	23.579	310660	0.601	1712.680
72	341.775	5.472	2.719	62.462	22.974	310660	0.633	1654.110
73	341.775	5.612	2.719	60.900	22.400	310660	0.666	1654.580
74	341.775	5.752	2.719	59.415	21.854	310660	0.700	1728.050
75	341.775	5.893	2.719	58.000	21.333	310660	0.735	1763.950



Şekil 4.4 B/T 2.719 oranına bağlı su hattı boyu - direnç grafiği

Çizelge 4.6 B/T oranı 2.858 için ana boyutlar ve toplam direnç değerleri

	LWL [m]	L/B	B/T	B [m]	T [m]	$\nabla$ [m <sup>3</sup> ]	$C_B$ [ $\nabla/(LWL*BWL*T)$ ]	$R_T$ [kN]
76	309.225	5.331	2.858	58.000	20.293	310660	0.854	1944.800
77	309.225	5.472	2.858	56.513	19.772	310660	0.899	2024.150
78	309.225	5.612	2.858	55.100	19.278	310660	0.946	11214.100
79	309.225	5.752	2.858	53.756	18.808	310660	0.994	
80	309.225	5.893	2.858	52.476	18.360	310660	1.043	
81	317.363	5.331	2.858	59.526	20.827	310660	0.790	1865.550
82	317.363	5.472	2.858	58.000	20.293	310660	0.832	1926.680
83	317.363	5.612	2.858	56.550	19.785	310660	0.875	2047.520
84	317.363	5.752	2.858	55.171	19.303	310660	0.919	2339.110
85	317.363	5.893	2.858	53.857	18.843	310660	0.965	
86	325.500	5.331	2.858	61.053	21.361	310660	0.732	1768.790
87	325.500	5.472	2.858	59.487	20.813	310660	0.771	1847.220
88	325.500	5.612	2.858	58.000	20.293	310660	0.811	1872.080
89	325.500	5.752	2.858	56.585	19.798	310660	0.852	1974.810
90	325.500	5.893	2.858	55.238	19.326	310660	0.894	2150.620
91	333.638	5.331	2.858	62.579	21.895	310660	0.680	1654.970
92	333.638	5.472	2.858	60.974	21.333	310660	0.716	1781.440
93	333.638	5.612	2.858	59.450	20.800	310660	0.753	1766.250
94	333.638	5.752	2.858	58.000	20.293	310660	0.791	1855.300
95	333.638	5.893	2.858	56.619	19.810	310660	0.830	1914.250
96	341.775	5.331	2.858	64.105	22.429	310660	0.632	1665.460
97	341.775	5.472	2.858	62.462	21.854	310660	0.666	1772.700
98	341.775	5.612	2.858	60.900	21.307	310660	0.700	1794.970
99	341.775	5.752	2.858	59.415	20.788	310660	0.736	1774.310
100	341.775	5.893	2.858	58.000	20.293	310660	0.772	1825.470

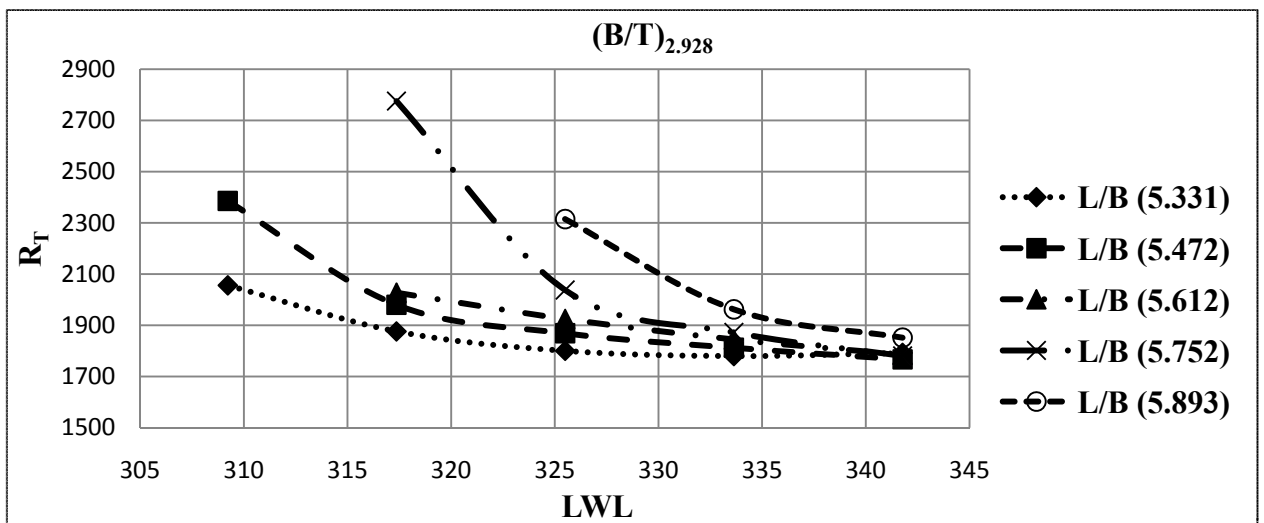


Şekil 4.5 B/T 2.858 oranına bağlı su hattı boyu - direnç grafiği



Çizelge 4.7 B/T oranı 2.928 için ana boyutlar ve toplam direnç değerleri

	LWL [m]	L/B	B/T	B [m]	T [m]	$\nabla$ [m <sup>3</sup> ]	$C_B[\nabla/(LWL*BWL* T)]$	$R_T$ [kN]
101	309.225	5.331	2.928	58.000	19.810	310660	0.874	2056.100
102	309.225	5.472	2.928	56.513	19.302	310660	0.921	2385.650
103	309.225	5.612	2.928	55.100	18.819	310660	0.969	
104	309.225	5.752	2.928	53.756	18.360	310660	1.018	
105	309.225	5.893	2.928	52.476	17.923	310660	1.068	
106	317.363	5.331	2.928	59.526	20.331	310660	0.809	1876.010
107	317.363	5.472	2.928	58.000	19.810	310660	0.852	1980.020
108	317.363	5.612	2.928	56.550	19.314	310660	0.896	2027.110
109	317.363	5.752	2.928	55.171	18.843	310660	0.942	2775.720
110	317.363	5.893	2.928	53.857	18.395	310660	0.988	
111	325.500	5.331	2.928	61.053	20.852	310660	0.750	1799.960
112	325.500	5.472	2.928	59.487	20.317	310660	0.790	1868.970
113	325.500	5.612	2.928	58.000	19.810	310660	0.831	1924.710
114	325.500	5.752	2.928	56.585	19.326	310660	0.873	2037.620
115	325.500	5.893	2.928	55.238	18.866	310660	0.916	2314.630
116	333.638	5.331	2.928	62.579	21.373	310660	0.696	1779.470
117	333.638	5.472	2.928	60.974	20.825	310660	0.733	1812.370
118	333.638	5.612	2.928	59.450	20.305	310660	0.771	1844.510
119	333.638	5.752	2.928	58.000	19.810	310660	0.810	1872.360
120	333.638	5.893	2.928	56.619	19.338	310660	0.850	1962.210
121	341.775	5.331	2.928	64.105	21.895	310660	0.648	1792.040
122	341.775	5.472	2.928	62.462	21.333	310660	0.682	1766.740
123	341.775	5.612	2.928	60.900	20.800	310660	0.718	1785.250
124	341.775	5.752	2.928	59.415	20.293	310660	0.754	1780.400
125	341.775	5.893	2.928	58.000	19.810	310660	0.791	1851.530

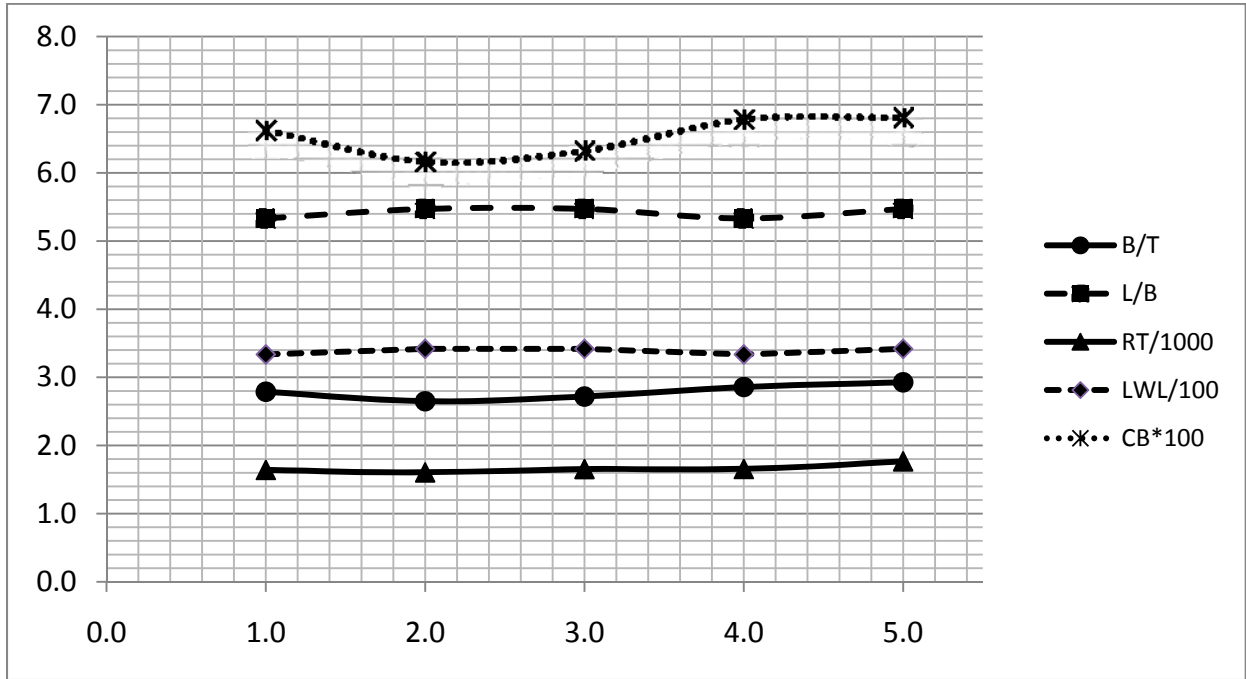


Şekil 4.6 B/T 2.928 oranına bağlı su hattı boyu - direnç grafiği

Sistematik analiz sonucu elde edilen dirençlerden her B/T oranına bağlı olarak bulunan en düşük dirençler seçilerek aşağıda gösterilen Çizelge 4.8 oluşturulmuştur.

Çizelge 4.8 B/T oranları için bulunan en düşük direnç değerleri

	LWL[m]	L/B	B/T	B [m]	T[m]	$\Delta$ (m <sup>3</sup> )	$C_B$ [ $\Delta / (LWL * BWL * T)$ ]	$R_T$ [kN]
<b>16</b>	333.638	5.331	2.788	62.579	22.442	310660	0.663	1640.780
<b>47</b>	341.775	5.472	2.649	62.462	23.579	310660	0.617	1603.920
<b>72</b>	341.775	5.472	2.719	62.462	22.974	310660	0.633	1654.110
<b>91</b>	333.638	5.331	2.858	62.579	21.895	310660	0.680	1654.970
<b>122</b>	341.775	5.472	2.928	62.462	21.333	310660	0.682	1766.740

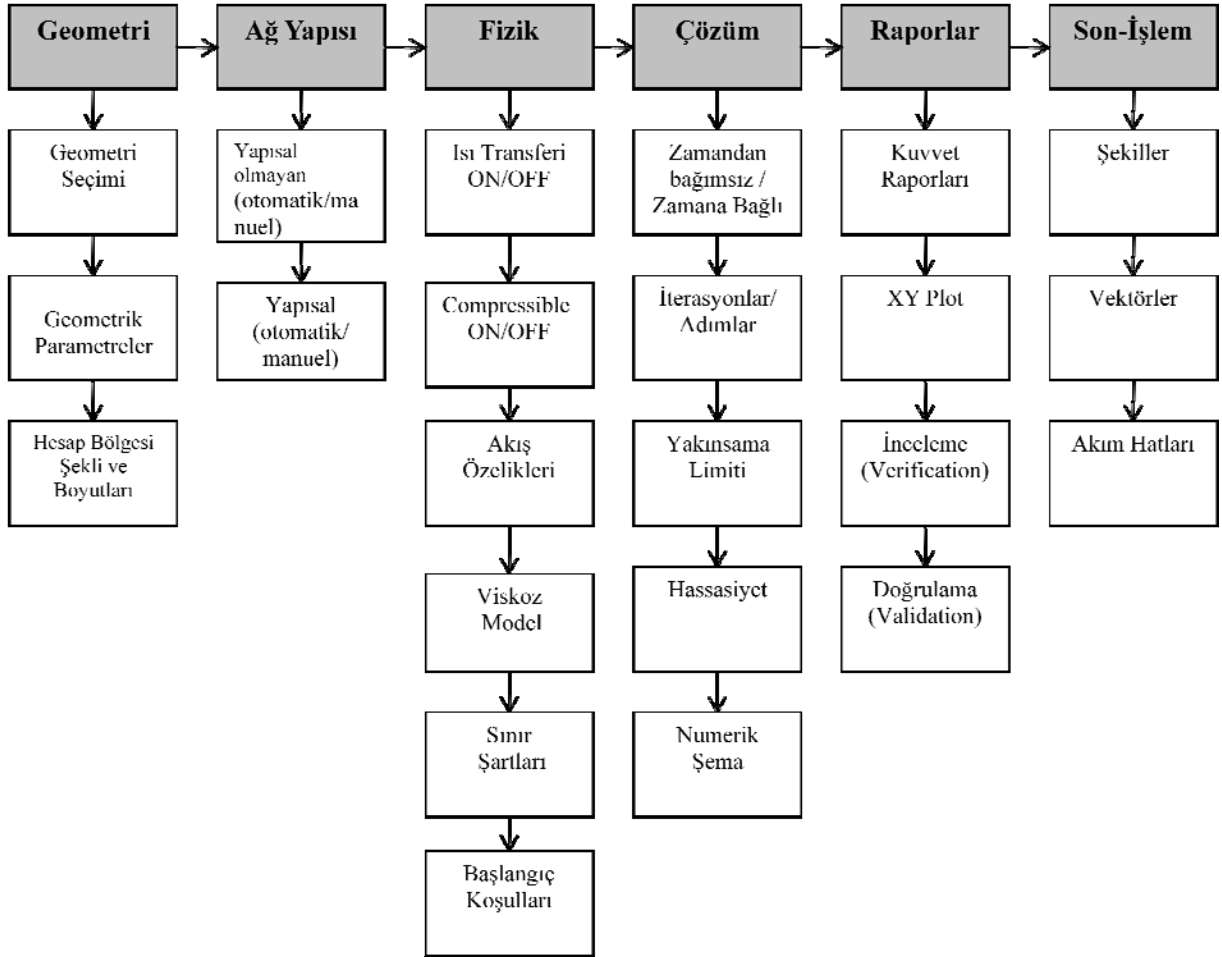


Şekil 4.7 Ana değerlerin karşılaştırılması

Çizelge 4.8'de verilen gemi ana boyutlarının Şekil 4.7'de birbirleri ile olan etkileşimleri görsel olarak verilmiştir. Böylece ana boyutlar arasında grafiğe dayalı bir seçim yapılabilir.

## 4.2 Seçilen Formun CFD Analizi

Seçilen formun CFD analizinin yapılabilmesi için, formun çeşitli aşamalardan geçmesi gereklidir. Bu aşamalardan sonra CFD analiz programları ile istenilen çözümler yapılabilir. CFD analizi için gerekli aşamaların bir özeti Şekil 4.8’de verilmiştir.



Şekil 4.8 CFD Analizi için Gerekli Aşamalar (Xing and Stern,2007)

Genel olarak baktığımızda CFD analizleri 3 temel aşamadan meydana gelir [3]:

- **Ön-işlem;** geometrinin oluşturulması, problemin modellenmesi, hesaplama ağ yapısının oluşturulması, sınır şartlarının belirlenmesi.
- **Çözüm;** problemin türüne uygun bir çözüm yöntemiyle yaklaşık olarak hesaplanması.
- **Son-işlem;** çözümde elde edilen sonuçların değerlendirilmesi.

Bu bölümde sistematik analiz yardımıyla oluşturulan formların arasından seçilen 3 adet gemi formunun Fluent paket programı ile CFD analizleri yapılacaktır. Gemi formu, etrafındaki akış ve direnç özellikleri açısından hesaplamalı akışkanlar dinamiği tekniklerinden sonlu hacimler yöntemi kullanılarak analiz edilmiştir. Fluent yazılımı Navier-Stokes denklemlerini çözerek

cisim üzerinde oluşan kuvvetleri hesaplayabilmektedir. Fluent yazılımı korunum denklemlerini birinci dereceden upwind düzeltme şemalarını kullanarak ayrıklaştırır ve ayrıklaştırılan denklemlerin çözümü SIMPLE algoritması kullanılarak yapılır.

Seçilen formların ana boyutları Çizelge 4.8’de verilmiştir.

Çizelge 4.9 Sistematik analiz sonucu seçilen gemilerin ana boyutları

Ana Boyutlar		C13	C63	C113
Su Hattı Boyu	$L_{WL}$ [m]	325.500	325.500	325.500
Genişlik	B [m]	58.000	58.000	58.000
Draft	T [m]	20.800	21.333	19.810
Deplasman Hacmi	$\nabla$ (m <sup>3</sup> )	310660	310660	310660
Blok Katsayısı ( $C_B$ )	$\nabla / (L_{WL} B_{WL} T)$	0.791	0.771	0.831
Gemi Hızı	V [knot]	15.5	15.5	15.5

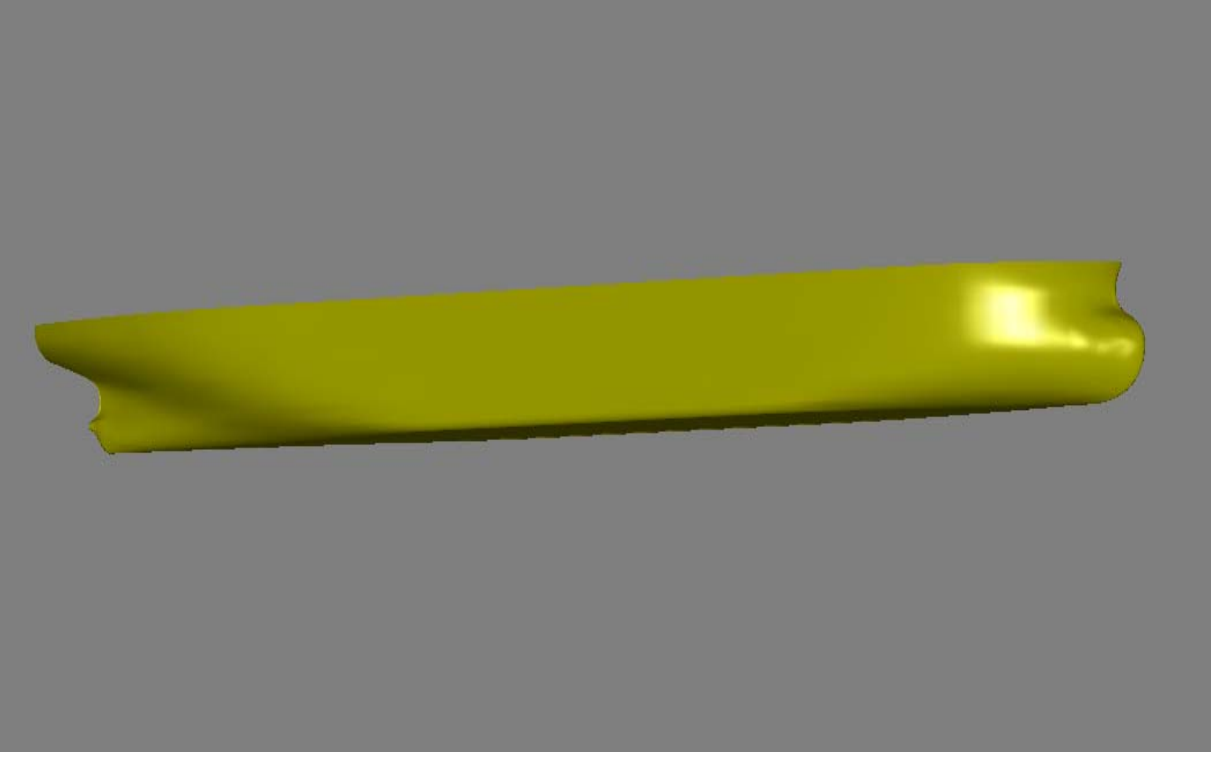
Çizelge 4.9’den de görülebileceği üzere form seçiminde su hattı boyları, genişlik ve deplasman hacmi sabit tutulmuştur. Buna bağlı olarak draft ve blok katsayısı değerleri değişken olarak bırakılmıştır. Ayrıca seçilen tüm formlar için sonuçlar aynı hız değerinde yapılmıştır. Belirlenen hız değeri Çizelge 4.9’da gösterilmiştir.

Seçilen formların, CFD analizi kullanılarak viskoz basınç ve sürtünme dirençleri Bölüm 3.2.3’de anlatıldığı gibi Fluent yazılımı ile hesaplandı ve CFD analizi ile bulunan değerler sistematik analiz ile elde edilen değerler ile karşılaştırıldı. Sonuçlar Bölüm 4.2.4’te ayrıntılı olarak verilmiştir.

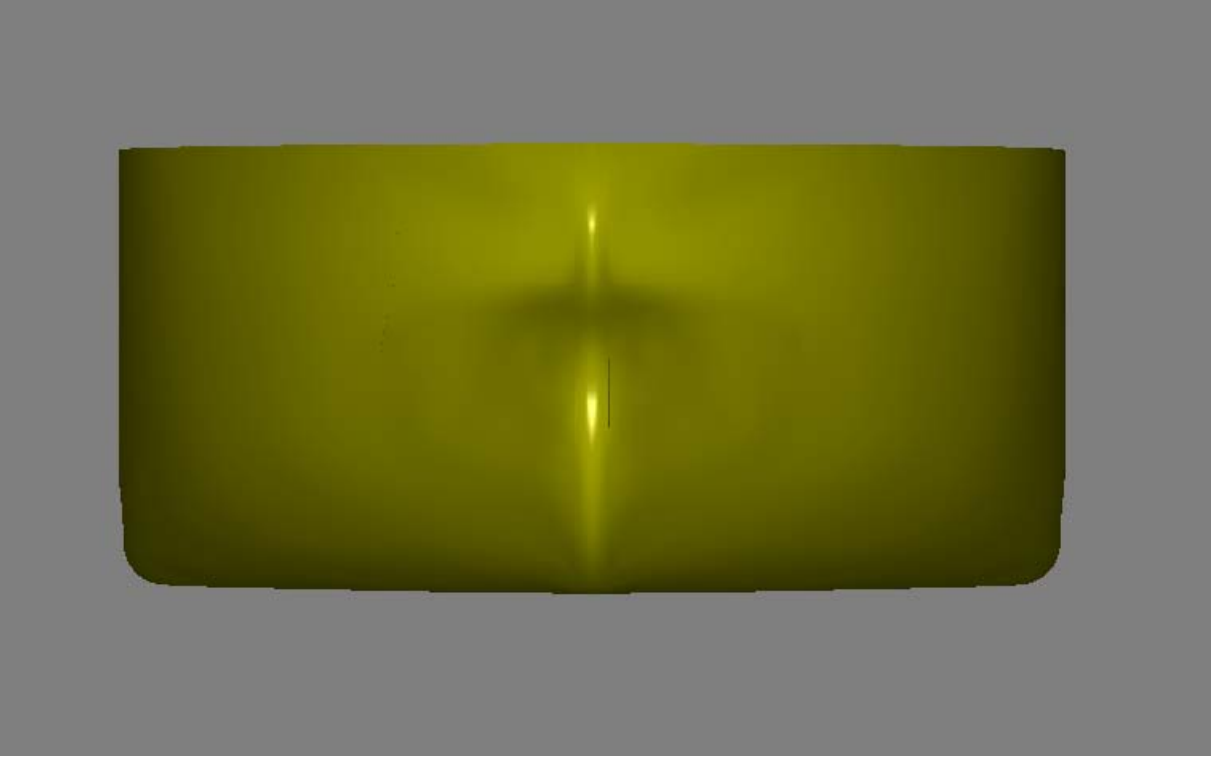
Seçilen formların CFD analizi için aşağıda verilen aşamalar takip edilmiştir.

#### 4.2.1 Gemi Geometrisinin Oluşturulması

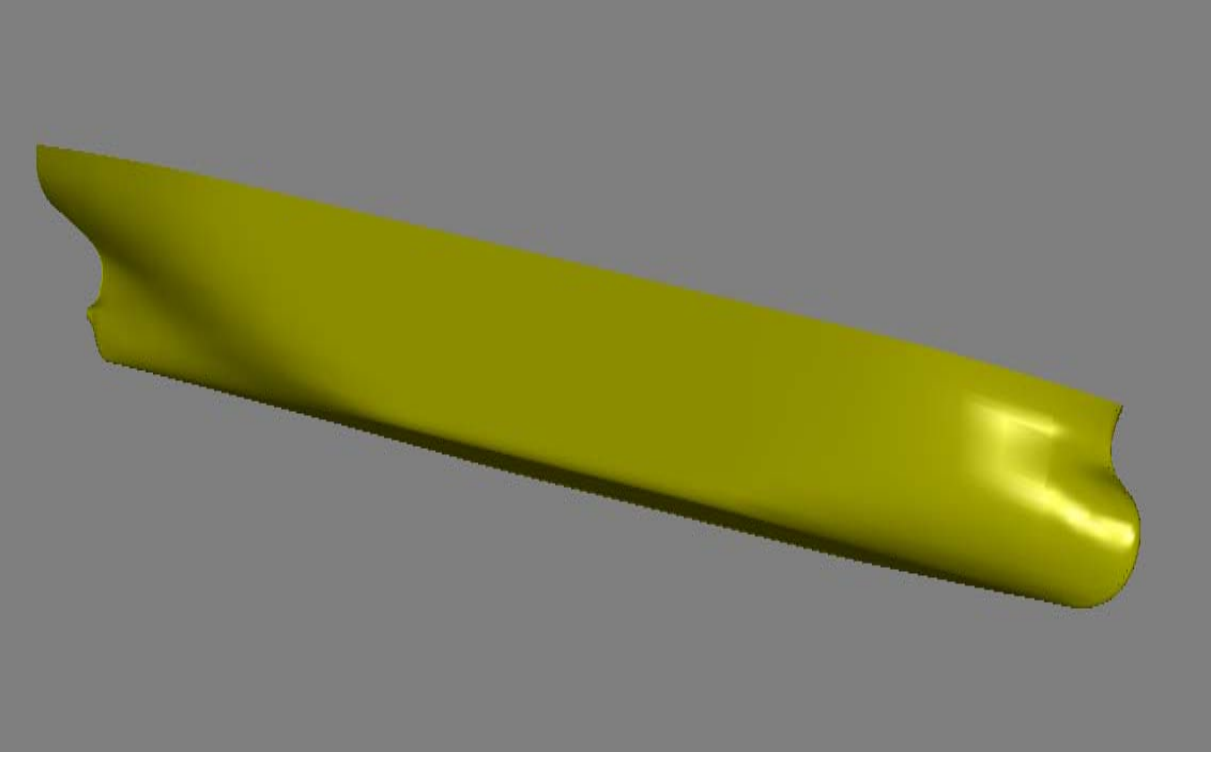
Analizi yapılacak gemi formlarının ana boyutları sistematik analiz yoluyla belirlendikten sonra bu formlar için yüzey oluşturulması kısmına geçilmiştir. Form yüzeyleri FLEUNT programının içinde bulunan GAMBIT programında oluşturulabileceği gibi çeşitli CAD (Bilgisayar Destekli Dizayn) programlarında da oluşturulabilir. Bu çalışmada geometri KVLCC2 tanker formu kullanılarak Çizelge 4.9’da ana boyutları verilen formlar MAXSURF programında oluşturulmuştur. MAXSURF programında oluşturulan gemi formlarının perspektif ve önden görünüşleri sırasıyla C13 formu için Şekil 4.9’da ve Şekil 4.10’da, C63 formu için Şekil 4.11’de ve 4.12’de ve C113 formu için Şekil 4.13’de ve Şekil 4.14’te verilmiştir.



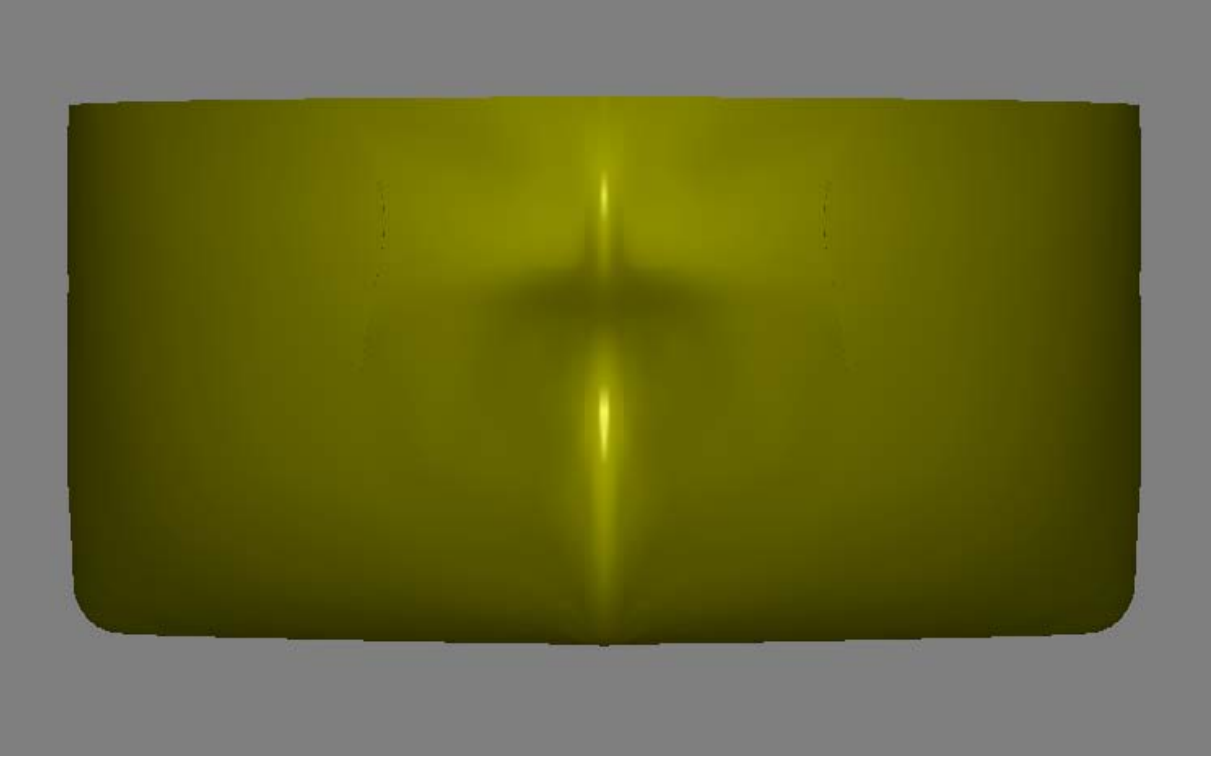
Şekil 4.9 C13 formunun perspektif görüntüsü



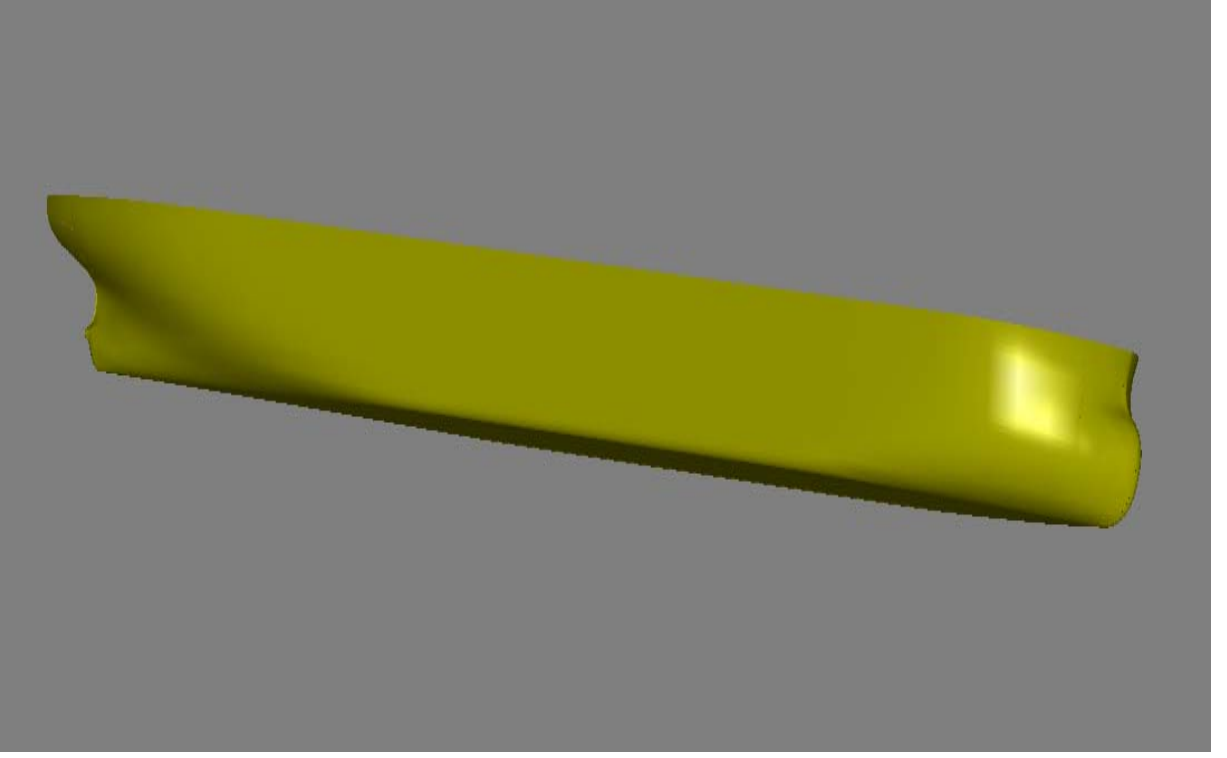
Şekil 4.10 C13 formunun önden görüntüsü



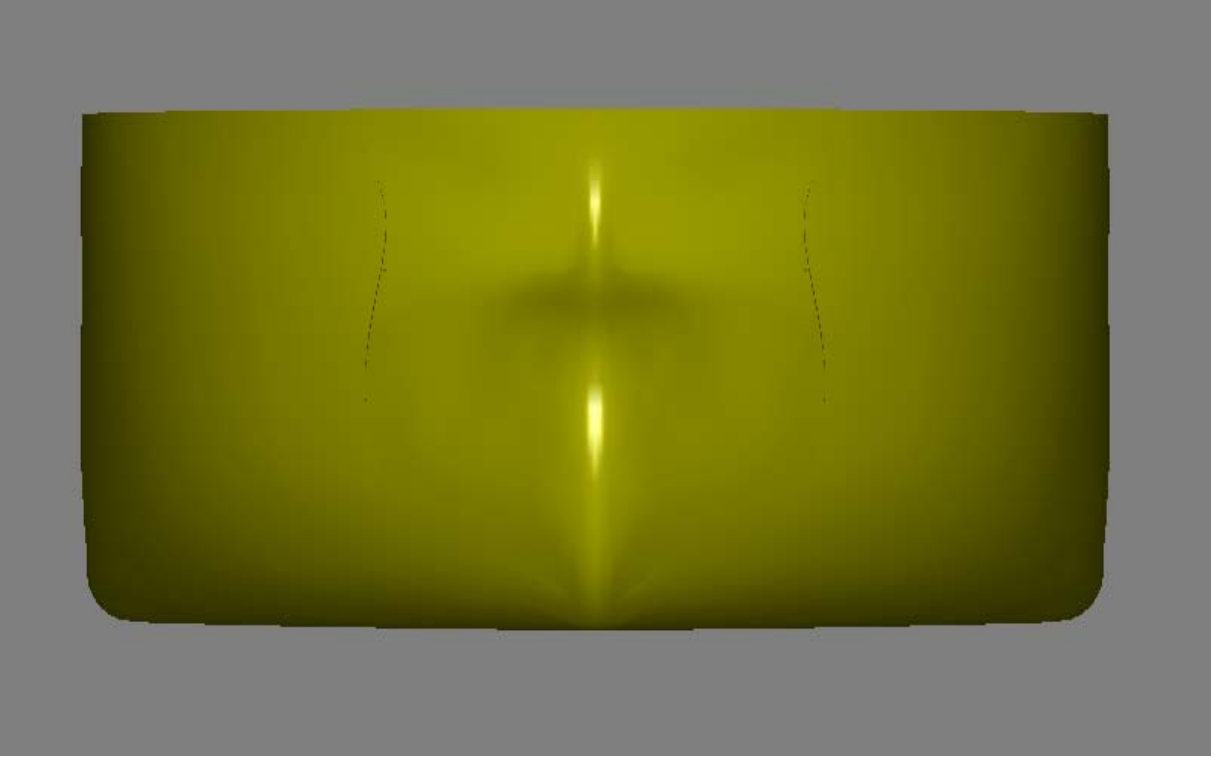
Şekil 4.11 C63 formunun perspektif görüntüsü



Şekil 4.12 C63 formunun önden görüntüsü



Şekil 4.13 C113 formunun perspektif görüntüsü

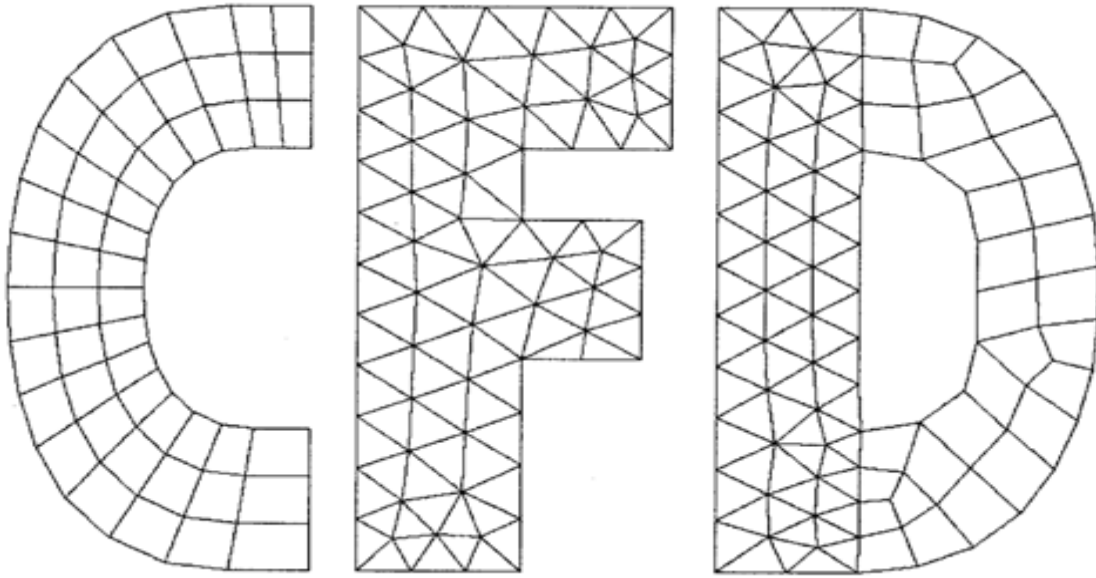


Şekil 4.14 C113 formunun perspektif görüntüsü

MAXSURF programında oluşturulan gemi formu yüzeyleri CFD analizi için ağ yapısını oluşturmak üzere GAMBIT programına aktarılmıştır.

#### 4.2.2 Ağ Yapısının Oluşturulması

Oluşturulan yüzeylerin ağ yapıları GAMBIT programında çeşitli yöntemler ile oluşturulabilir. Bu ağ yapısı düzgün, düzgün olmayan ve melez (düzgün ve düzgün olmayan ağ yapısının beraber kullanılması) şeklinde olabilir. Şekil 4.15'te ağ yapıları ile ilgili bir örnek gösterim verilmiştir.



Şekil 4.15 Düzgün, Düzgün Olmayan ve Melez (Hibrid) Ağ yapısı

Ağ yapısının yoğun olması genel olarak CFD analizinin hassasiyetini artırır denebilir fakat bunun geçerli olmadığı durumlar da mevcuttur. Diğer bir taraftan ağ yapısının gereğinden fazla olması toplam hesaplama süresini oldukça arttırır ve eldeki bilgisayar sistemi ile çözüm imkânsız hale gelebilir. CFD analizlerinin en zor, zaman alan ve tecrübe gerektiren kısmı ağ yapısının oluşturulması bölümüdür. Ağ yapısının nitelikleri analiz programının performansını doğrudan etkilediği gibi sonuçların doğruluğu da ağ yapısının uygunluğuna bağlıdır.

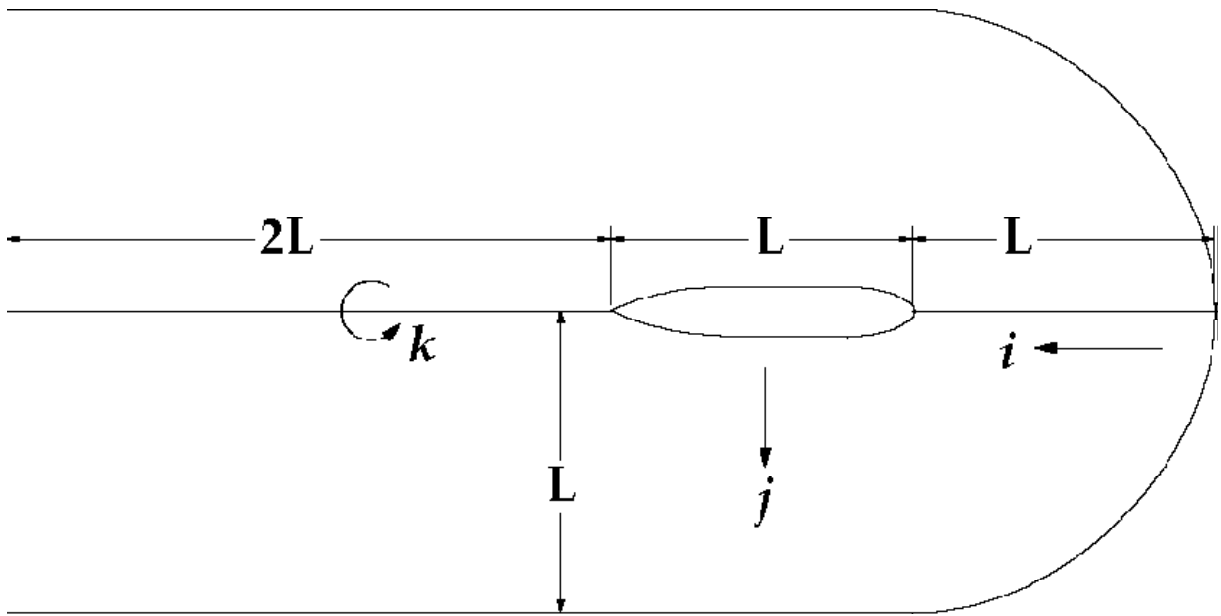
Karmaşık geometrilerin ağ yapısının oluşturulabilmesi için düzgün olmayan ağ yapıları geliştirilmiştir. Düzgün olmayan ağ yapısı karmaşık geometrilerin analizlerinde ve ağ yapısının akış şartlarına uyarlanmasında önemli derecede esneklik sağlar. Düzgün olmayan ağ yapısı genelde üçgen temelli elemanlardan oluşur. Düzgün olmayan ağ yapısı kullanılarak hesaplama hacmi (domain) çok az kullanıcı girdisi ile neredeyse otomatik hale getirilebilir ve karmaşık geometriler etrafında kolaylıkla oluşturulabilir.



Düzgün olmayan ağ yapısı herhangi bir düğümde herhangi bir miktarda elemanın bağlanmasına izin verirler. Temelde otomatik ağ yapısı oluşturma programlarında kullanılmak üzere geliştirilmişlerdir. Düzgün olmayan ağ yapısı teknikleri karmaşık geometrilere kolayca uyar ve elemanların fazla çarpılmasına (skewness) engel olacak şekilde eleman büyüklüğünü değiştirebilir bu nedenle CFD uygulamalarında başarıyla kullanılabilir.

Son birkaç yılda oldukça yaygınlaşmaya başlayan ve otomasyona yatkınlığı ve kolaylığıyla öne çıkan bir yöntem olan düzgün olmayan ağ yapıları göreceli olarak daha kolay bir öğrenme ve modelleme süreci sağlayabilmesi sayesinde önümüzdeki yılların temel yöntemi olacak gibi gözükmektedir. Bu nedenle artık hemen tüm gelişmiş ticari CFD yazılımları eski sürümlerinde sadece yapısal ağ yapısı ile çalışabilirken artık yapısal olmayan ağ yapılarını desteklemeye başlamışlardır. Bununla birlikte yapısal ağ yapılarının üstünlükleri de mevcuttur. Her iki yöntemi bir arada kullanan melez (hibrid) ağ yapıları özellikle bazı problemlerde en uygun tercih olarak seçilebilirler. [3]

Ağ yapısı oluşturmada diğer önemli bir konu ise hesaplama hacminin (domain) yeterli büyüklükte seçilmesi ve ağ yapısının oluşturulmasıdır. Bu çalışmada hesaplama hacmi olarak Wen Lin vd.(1995) tarafından gemi su hattı boyuna (LWL) bağlı olarak verilen hesaplama hacmi boyutları kullanılmıştır.



Şekil 4.16 Hesaplama hacmi boyutları (Wen Lin vd.,1995)

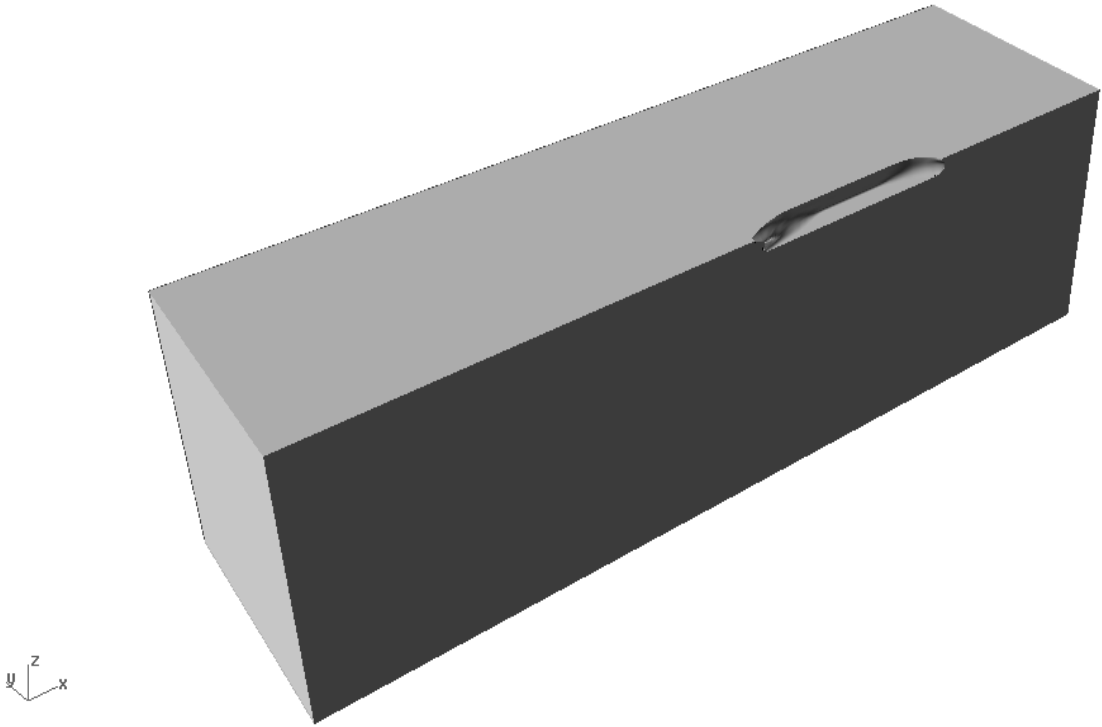
Deniz araçlarının CFD analizlerinde, genellikle ağ yapısı boyutlarının tanımlanmasında  $i, j$  ve  $k$  kullanılır.  $i$ , aksenal yönde;  $j$  yüzeye normal yönde ve  $k$  yüzeye çevresel yöndedir (Wen Lin vd.,1995). Şekil 4.16'da verilen  $L$  değeri, CFD analizi yapılacak geminin su hattı boyuna eşittir.

Yukarıdaki gibi su hattı boyuna bağlı olarak bulunan hesaplama hacmi boyutları ile geminin sığ su ve kanal etkilerinden bağımsız olduğu varsayılabilir. Yani kısaca hesaplamaların yapılacağı hacmin yeterince büyük olduğu kabul edilebilir. Böylece gemi direnci sığ su ve kanal etkilerinden etkilenmemiş olup daha doğru bir sonuca ulaşılabilir.

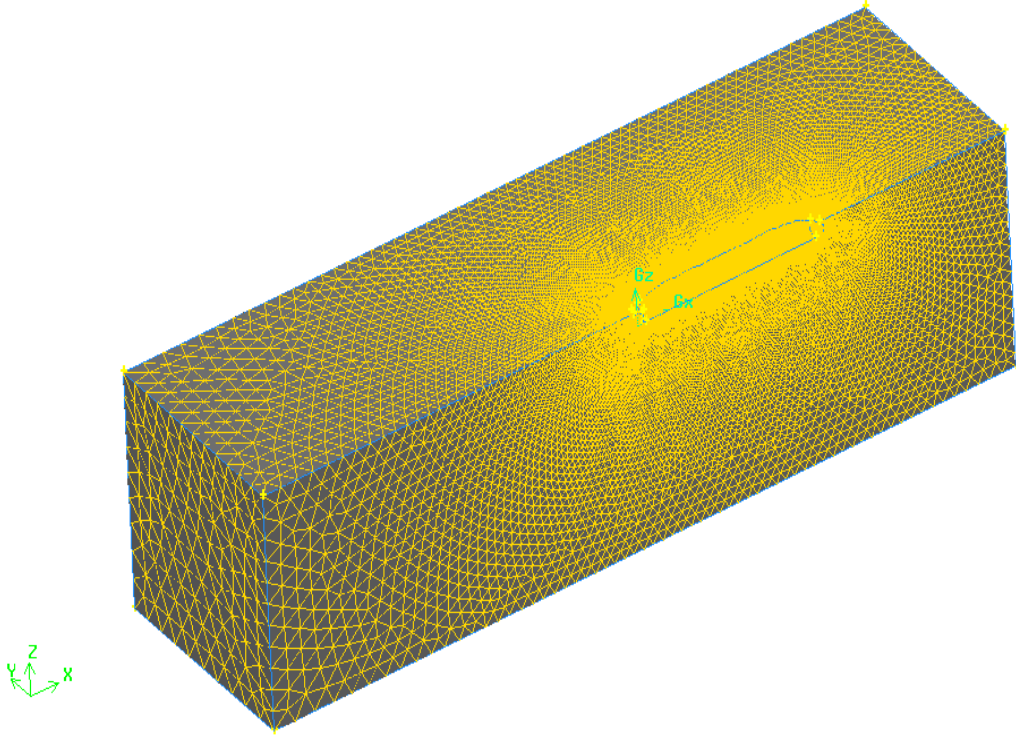
Bu çalışmada yukarıda belirtildiği gibi karmaşık geometrilerin modellenmesinde daha esnek çalışma imkânı tanıyan düzgün olmayan ağ yapısı kullanılmıştır. Hesaplama hacmi boyutları ise Şekil 4.16'da gösterilen boyutlarda GAMBIT programında oluşturulmuştur. Seçilen üç gemi formu için de GAMBIT programında aynı parametreler kullanılmış ve aynı kalitede ağ yapısı oluşturulmaya çalışılmıştır. Böylece ağ yapısı oluşturma aşamasında neredeyse otomatik bir işlem uygulanmıştır. Seçilen formların ağ yapılarının oluşturulmasında 2.000.000 hacim elemanı kullanılmıştır.

Ağ yapısının gemi yüzeyi ve hesap hacmi için oluşturulması ile CFD analizi için en uzun zaman alan ve işin zor olan kısmı geçilmiş olacaktır. Sınır koşullarının belirlenmesi ve sonuçların alınması aşamalarına geçilebilir.

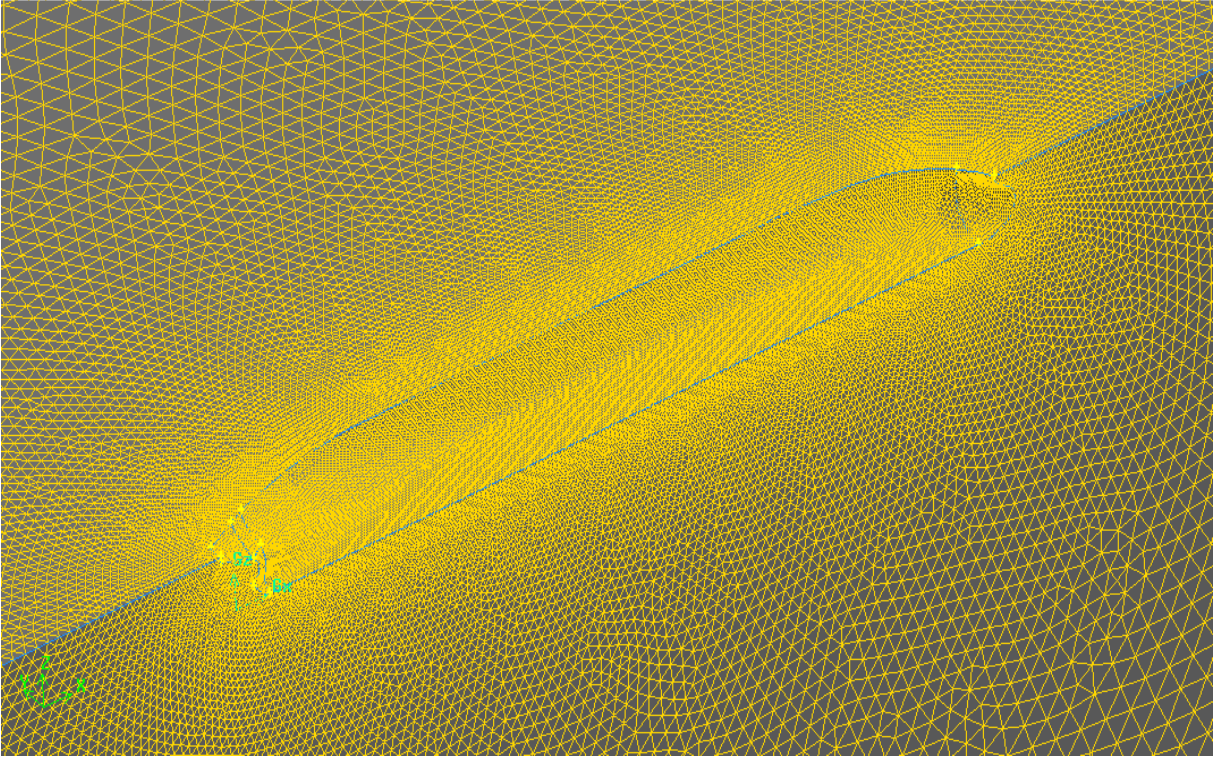
GAMBIT programında oluşturulan gemi yüzeyi ve hesap hacmi ağ yapısı sırasıyla C13 formu için Şekil 4.17, Şekil 4.18, Şekil 4.19 ve Şekil 4.20'de, C63 formu için, Şekil 4.21, Şekil 4.22, Şekil 4.23, Şekil 24'de ve C113 formu için, Şekil 4.25, Şekil 4.26, Şekil 4.27 ve Şekil 4.28'de verilmiştir.



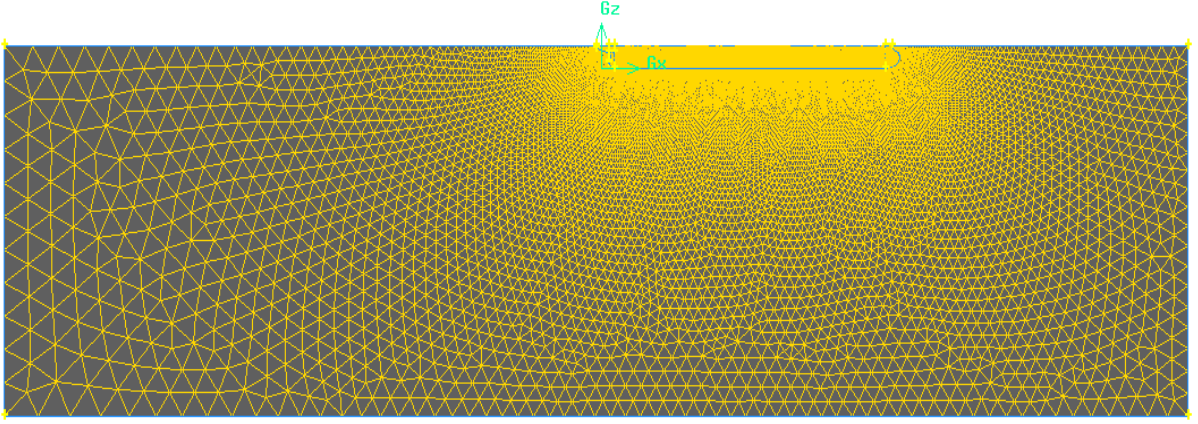
Şekil 4.17 C13 formu için oluşturulan hesaplama hacmi



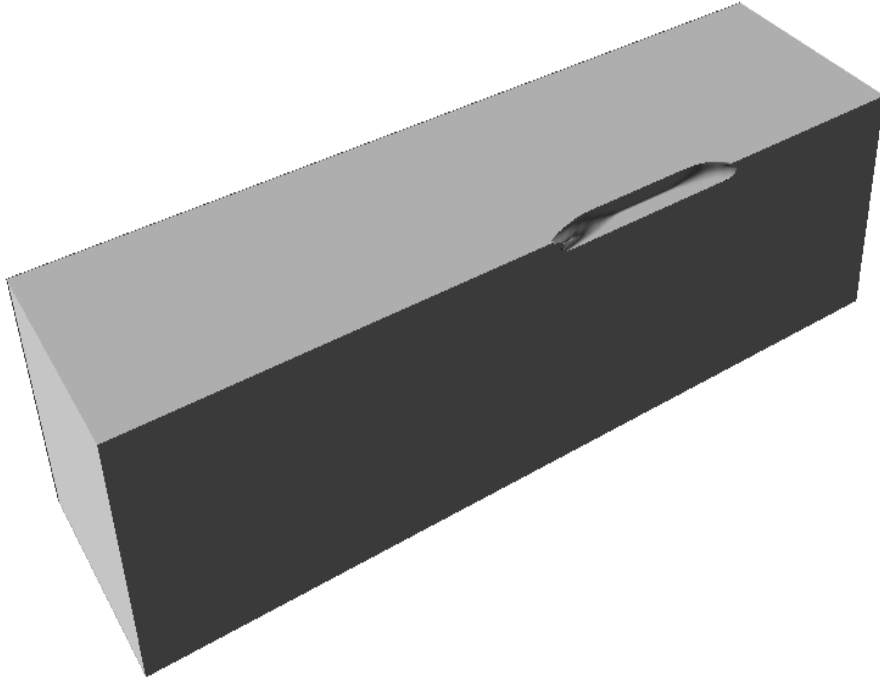
Şekil 4.18 C13 formu için oluşturulan hesaplama hacminin ağ yapısı



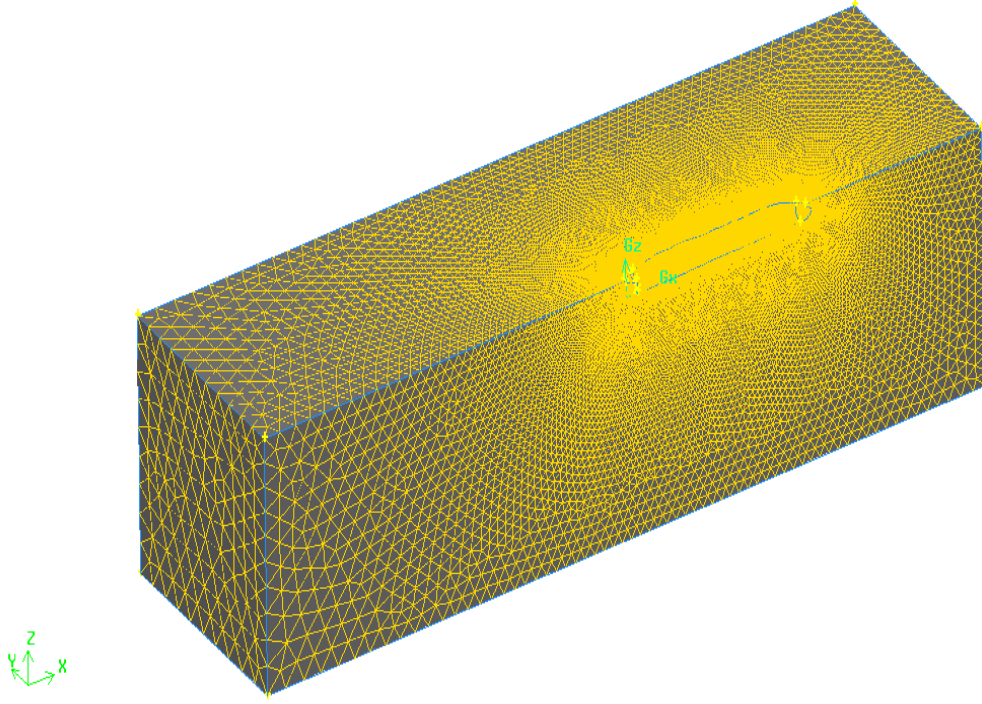
Şekil 4.19 C13 formu için oluşturulan tekne yüzeyi ağ yapısı



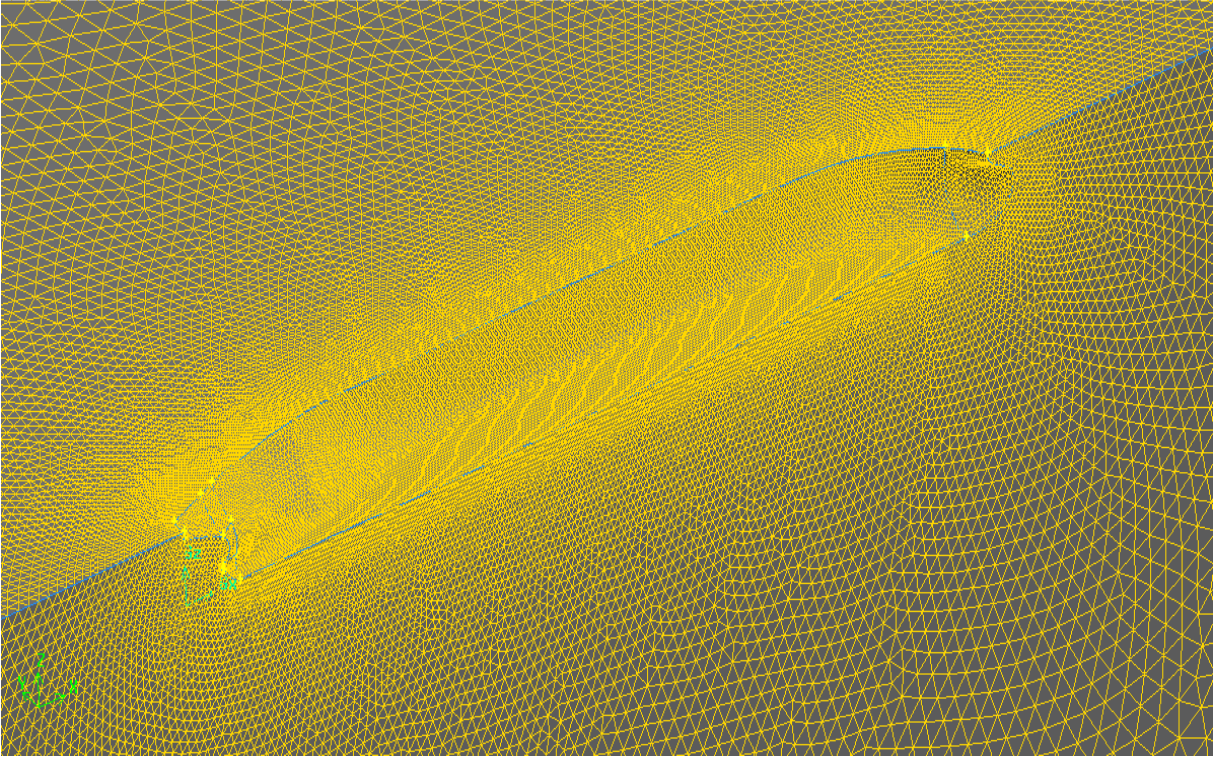
Şekil 4.20 C13 formu için oluşturulan tekne yüzeyi ve hesaplama hacmi ağ yapısı profil görünüşü



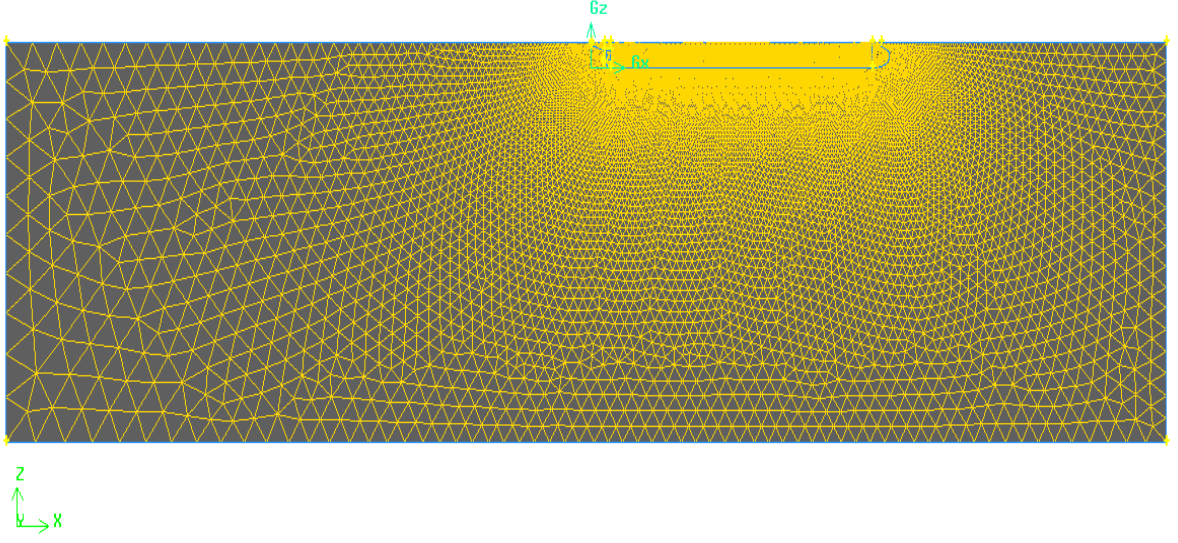
Şekil 4.21 C63 formu için oluşturulan hesaplama hacmi



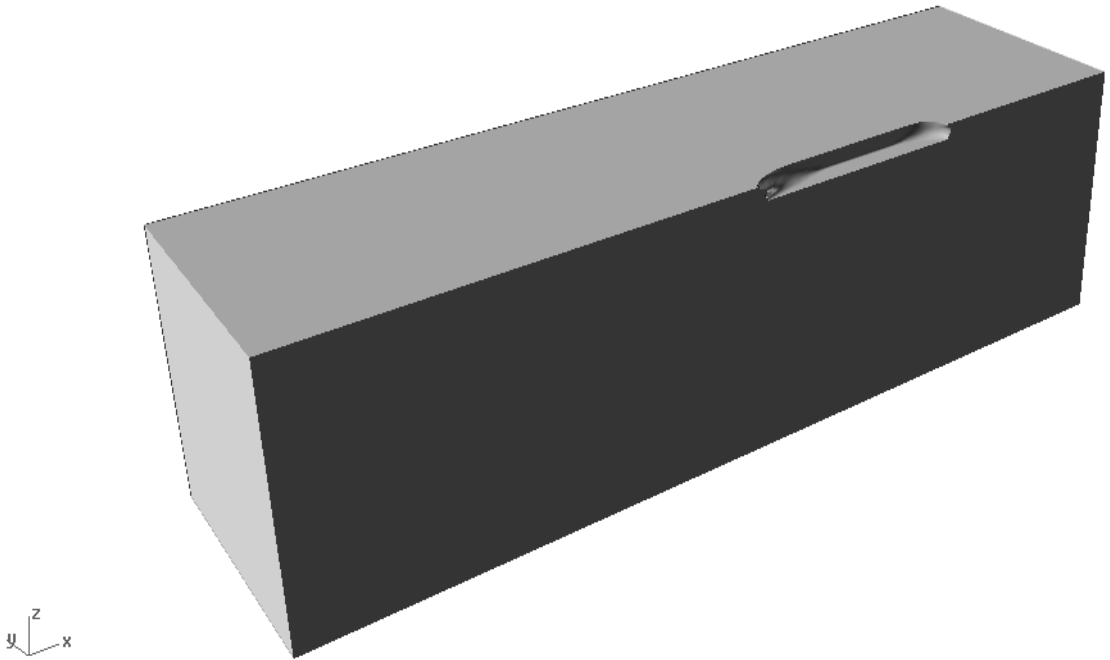
Şekil 4.22 C63 formu için oluşturulan hesaplama hacminin ağ yapısı



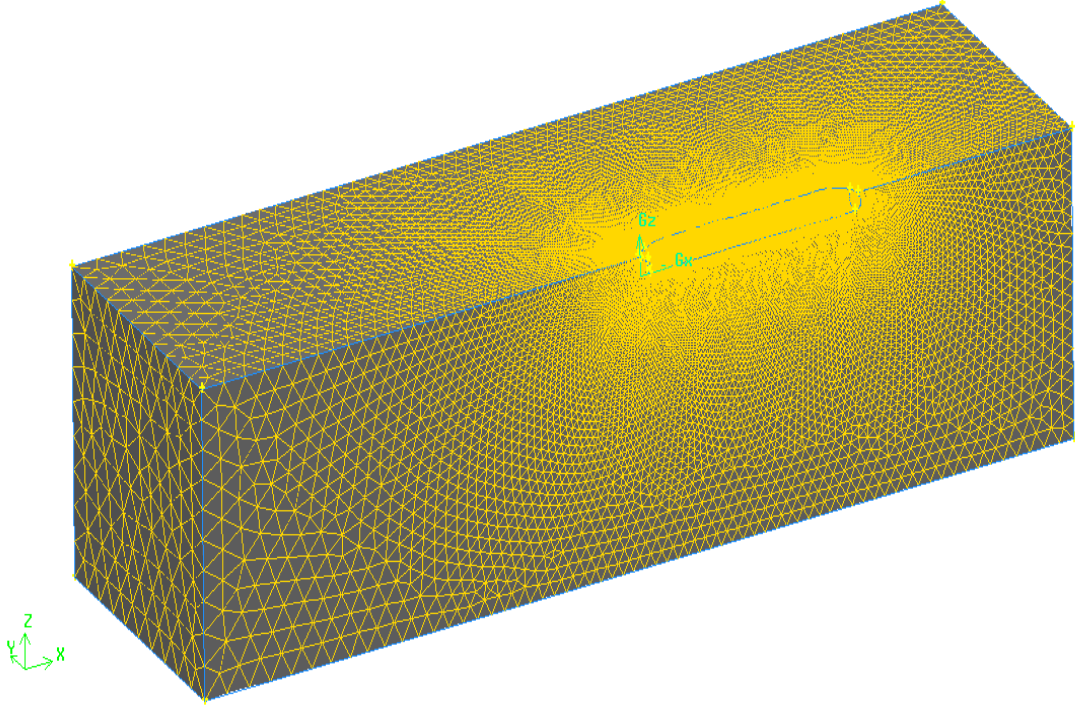
Şekil 4.23 C63 formu için oluşturulan tekne yüzeyi ağ yapısı



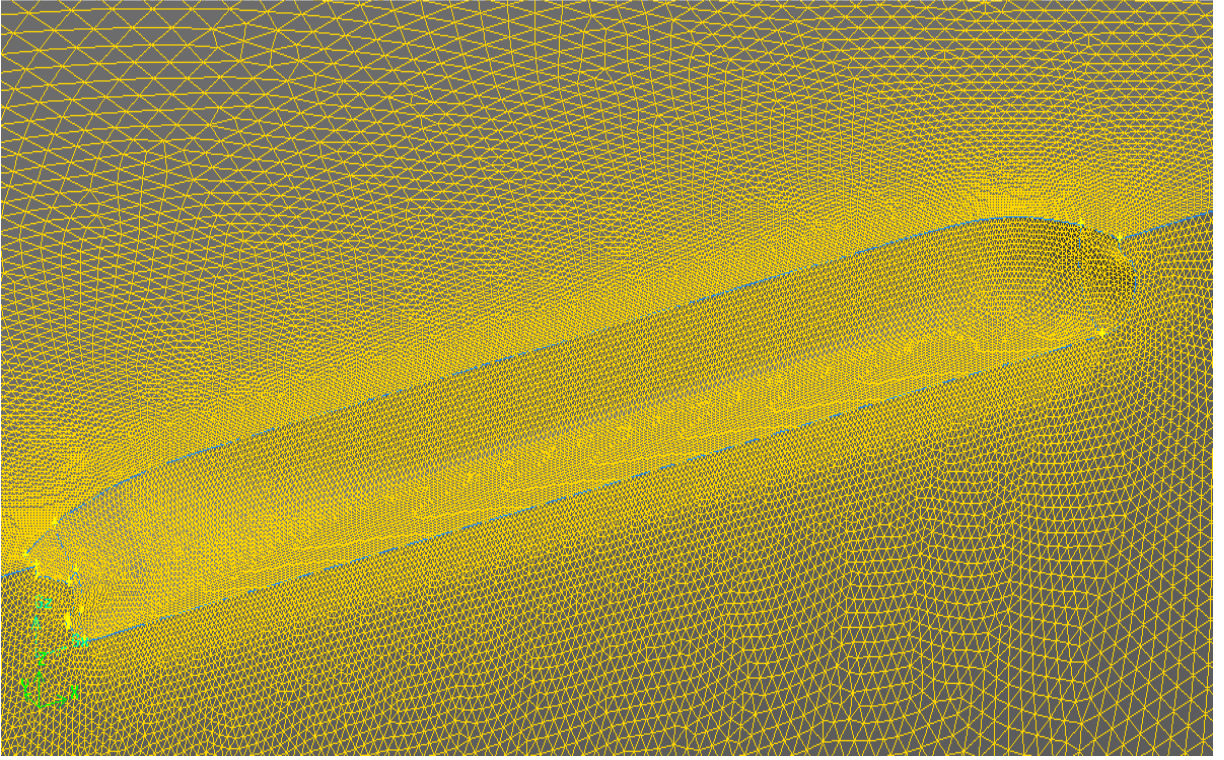
Şekil 4.24 C63 formu için oluşturulan tekne yüzeyi ve hesaplama hacmi ağ yapısı profil görünüşü



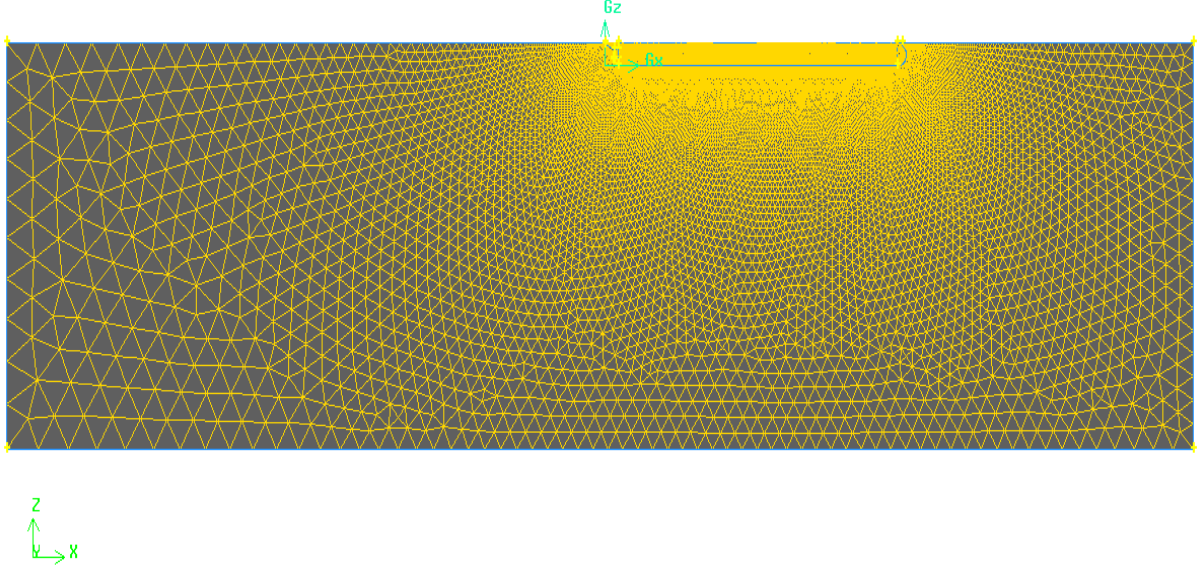
Şekil 4.25 C113 formu için oluşturulan hesaplama hacmi



Şekil 4.26 C113 formu için oluşturulan hesaplama hacminin ağ yapısı



Şekil 4.27 C113 formu için oluşturulan tekne yüzeyi ağ yapısı



Şekil 4.28 C113 formu için oluşturulan tekne yüzeyi ve hesaplama hacmi ağ yapısı profil görünüşü

Yukarıdaki şekillerden görülebileceği üzere seçilen üç form için de GAMBIT programında aynı parametreler kullanıldığından gemi form yüzeyi ve hesap hacmi için neredeyse aynı ağ yapısına ulaşılmıştır. Böylece sonuçlar arasında da kıyaslama daha kolay yapılabilecektir.

#### 4.2.3 Sınır Koşullarının Belirlenmesi

Viskoz basınç direncini dalga direncinden ayırabilmek için, çözümü double-model olarak yapmak yeterlidir. Bu da serbest su yüzeyine simetri şartını vermekle kolayca yapılabilmektedir. Double-model çözümünden elde edilen basınç kuvveti bize viskoz basınç direncini bu kuvvetin sürtünme direncine oranı ise form faktörünü verecektir. (Gül vd.,2005)

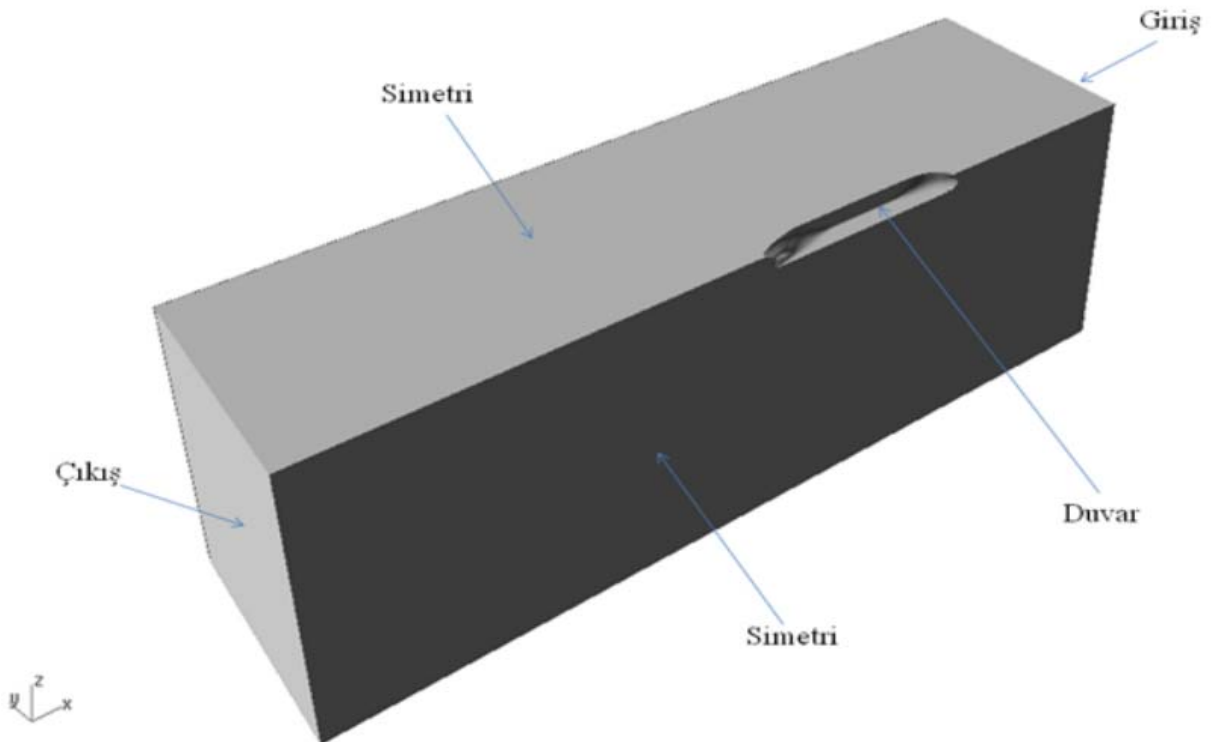
Bu çalışmada gemi formunun dalga direnci hesaplanmayacağı için sınır koşulları Bölüm 2.3'de anlatılan double-model çözümünün yapılabilmesine imkan tanıyacak şekilde belirlenmiştir.

RANS denklemlerinin çözümünün yapılabilmesi için her yüzeyde sınır koşullarının belirlenmesi gerekmektedir. Bu çalışmada gemi etrafındaki akışta serbest yüzey etkileri dikkate alınmamıştır. Ayrıca merkez hattında simetri sınır koşulu verileceğinden modelleme yarım model için yapılmıştır. Çalışmada Ok ve Jil (2004) tarafından verilen aşağıdaki sınır koşulları kullanılmıştır:



- Serbest yüzeyi etkileri dikkate alınmamış ve bu etkileri ortadan kaldırmak için su hattı yüzeyine Bölüm 2.3'te anlatıldığı üzere simetri sınır koşulu verilmiştir.
- Merkez hattı düzleminde, model boyutunu azaltmak ve hesap süresini kısaltmak için simetri sınır koşulu uygulanmıştır. (Geometrik simetri düzlemi  $y = 0$  )
- Gemi formu yüzeyinde duvar sınır koşulları uygulanmıştır. Bu sınır koşulunda gemi ıslak alanında Bölüm 2.3'te anlatıldığı gibi no-slip şartı uygulanmış ve ıslak alanda (su hattı altında kalan yüzey) yüzeydeki hız bileşenlerinin sıfır olduğu kabul edilir.
- Giriş sınır koşulları olarak hareket yönündeki giriş yüzeyine hız giriş sınır koşulu, çıkış olarak da suyun aktığı yöndeki çıkış yüzeyine basınç çıkış sınır koşulu verilmiştir.
- Hesaplama hacminin dış yüzeylerindeki sınır koşulları geminin hidrodinamik özellikleri etkilenmeyecek şekilde seçilmiştir.

Genel olarak üç modelde de yeterli hassasiyeti sağlamak için aynı sınır koşulları kullanılmıştır. Kullanılan sınır koşulları Şekil 4.29'da görülebilir.



Şekil 4.29 CFD analizinde kullanılan sınır koşulları

#### 4.2.4 Sonuçların Değerlendirilmesi

Sonuçların değerlendirilmesi aşamasında FLUENT programından alınan sonuçlar sistematik analiz sonucu elde edilen değerler ile karşılaştırılmıştır. Bu bağlamda sistematik analizde, Bölüm 4.1’de belirtilen Holtrop-Mennen yöntemi ile elde edilen direnç değerleri FLUENT programı ile yapılan CFD analizinden elde edilen direnç değerleri ile karşılaştırılmıştır. Fakat burada dikkat edilmesi gereken nokta Holtrop-Mennen yöntemi ile elde edilen değerler ile FLUENT programından elde edilen sonuçların arasındaki farktır. Bu farkın sebebi ise bu çalışmada serbest su yüzeyi etkilerinin CFD analizinde ele alınmamış olmasıdır. Yani kısaca seçilen gemi formlarının dalga dirençlerinin hesaplanmamış olmasıdır. Bu durumda iki yöntem ile elde edilen sonuçlar merteye olarak karşılaştırılacak ve iki yöntem ile elde edilen değerlerin birbirine paralel olduğu gösterilecektir. Böylece seçilen üç formun direnç değerleri açısından birbirlerinden farkları yorumlanmaya çalışılacaktır. Bu yorumlar Bölüm 3.2.4’te belirtilen CFD raporlarının minimum içermesi gereken bilgiler ışığında değerlendirilecektir. Bu çalışmada serbest su yüzeyi ele alınmadığından geminin oluşturduğu dalgalar ile ilgili bilgiler verilmemiştir.

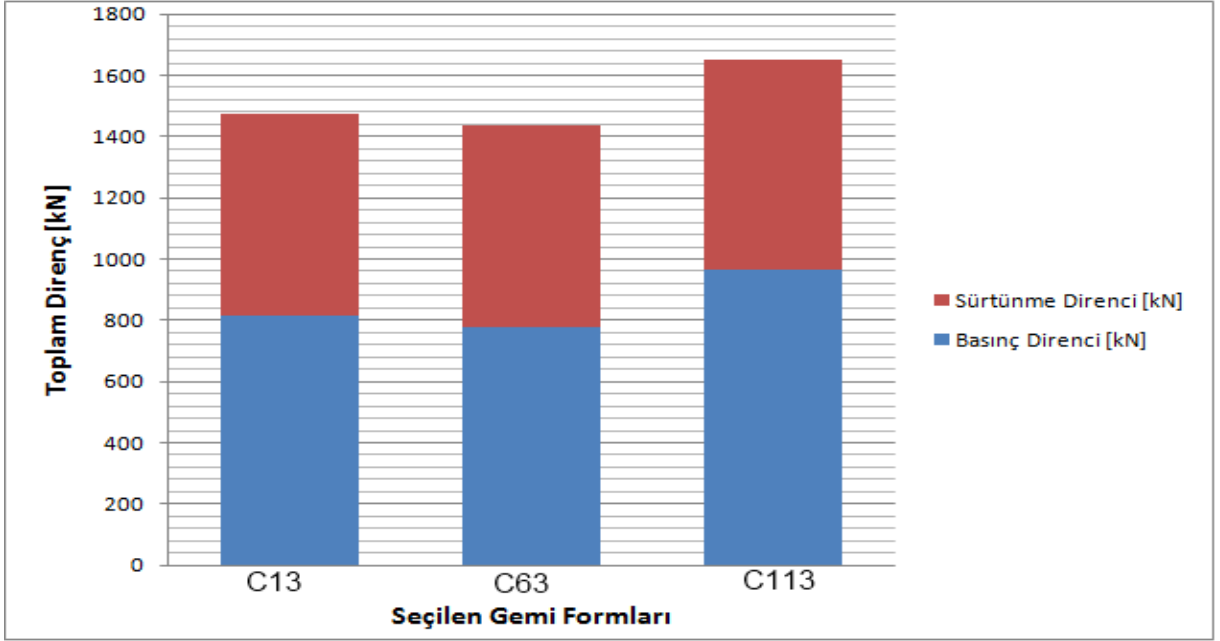
Çizelge 4.10’da seçilen gemi formları için sistematik analiz ile elde edilen direnç değerleri, Çizelge 4.11’de ise seçilen gemi CFD analizi ile elde edilen viskoz basınç ve sürtünme dirençlerinin değerleri verilmiştir.

Çizelge 4.10 Sistematik analiz sonucu elde edilen 15.5 knot gemi hızı için direnç değerleri

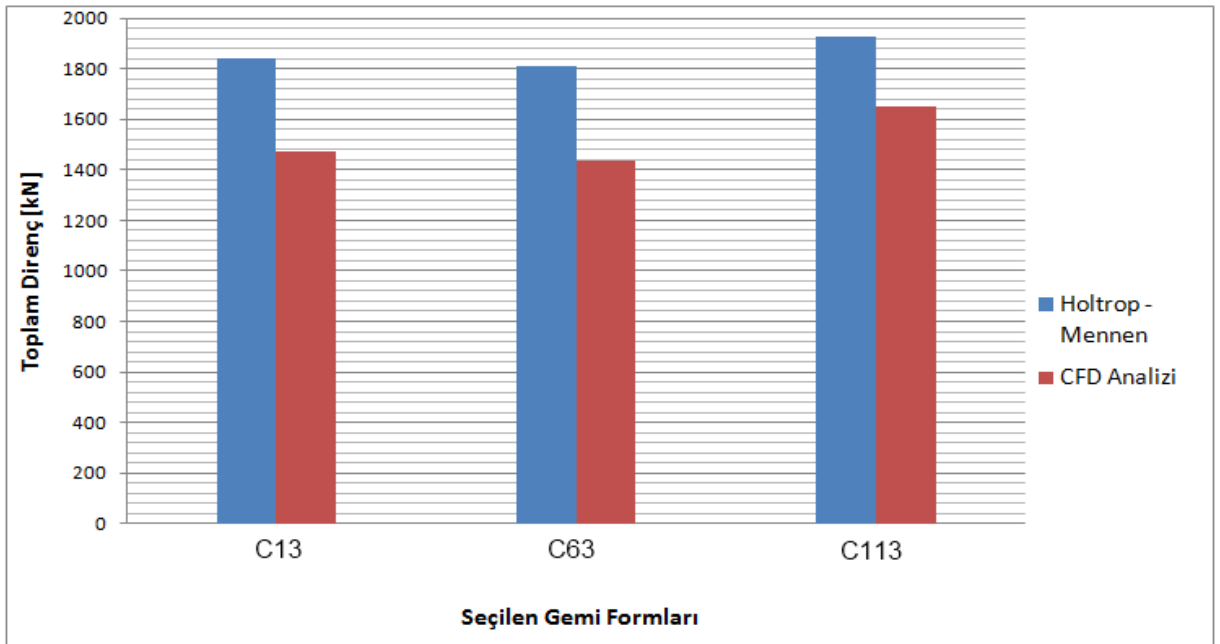
	<b>B/T</b>	<b>Toplam Direnç <math>R_T</math> [kN]</b>
<b>C13</b>	2.788	1843.790
<b>C63</b>	2.719	1810.720
<b>C113</b>	2.928	1924.710

Çizelge 4.11 CFD analizi sonucu elde edilen 15.5 knot gemi hızı için direnç değerleri

	<b>B/T</b>	<b>Viskoz Basınç Direnci [kN]</b>	<b>Sürtünme Direnci [kN]</b>	<b>Toplam Viskoz Direnç [kN]</b>
<b>C13</b>	2.788	814.290	660.985	1475.276
<b>C63</b>	2.719	778.979	655.320	1434.299
<b>C113</b>	2.928	962.766	689.960	1652.726



Şekil 4.30 CFD analiz sonuçlarının grafik olarak gösterilmesi

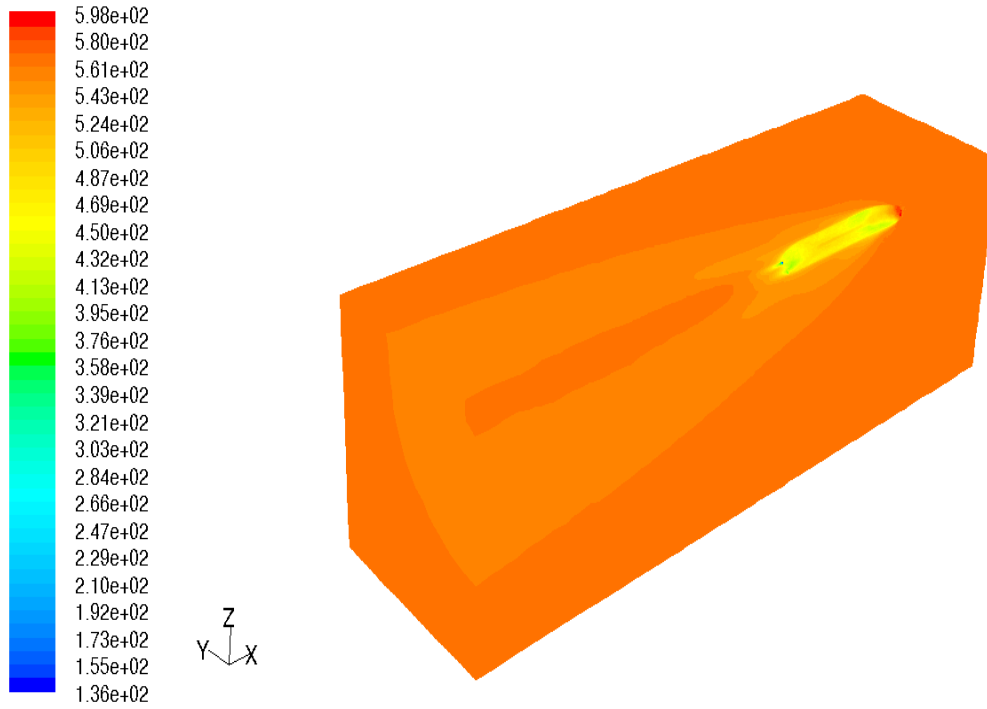


Şekil 4.31 Holtrop-Mennen ve CFD analiz sonuçlarının grafik olarak gösterilmesi

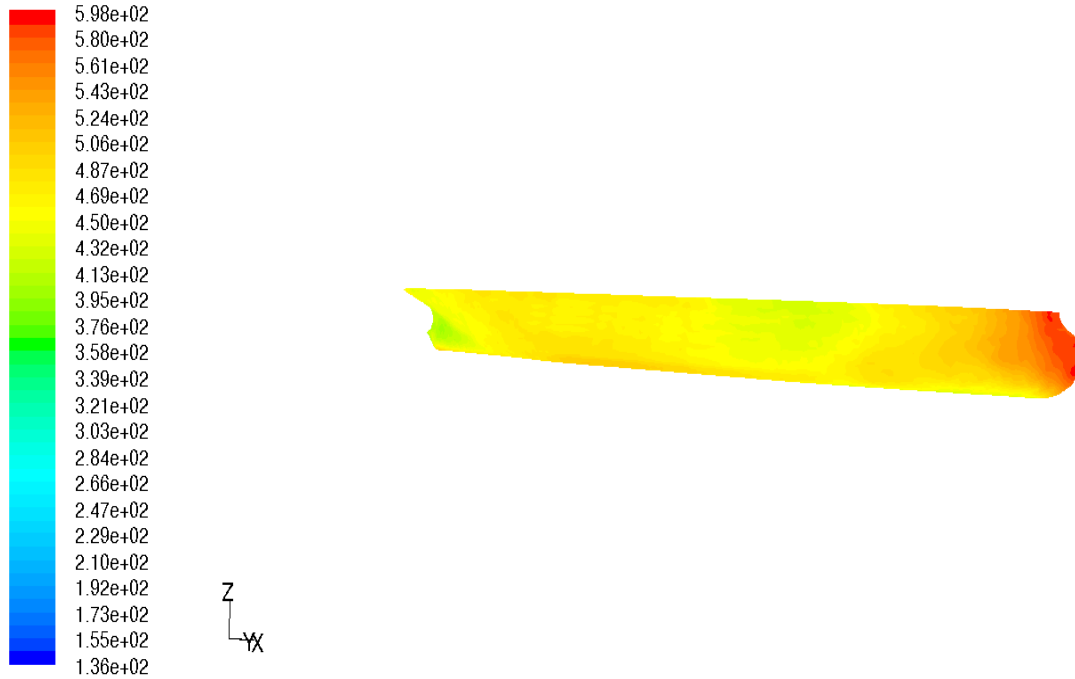
CFD analizi sonucu elde edilen dirençler Şekil 4.30'da grafik olarak gösterilmiştir. Böylece analiz sonuçları görsel olarak da izlenenmiştir. Şekil 4.31'de ise Holtrop-Mennen ve CFD analizi ile bulunan sonuçların karşılaştırılabilmesi için ilgili grafik verilmiştir.

Direnç değerleri yukarıda verildikten sonra CFD analizi ile bulunan hesap hacmindeki ve tekne yüzeyindeki basınç dağılımlarının her form için verilmesine geçilir. Her form için uygun açılarda ve görünüşlerde basınç dağılım şekilleri verilir.

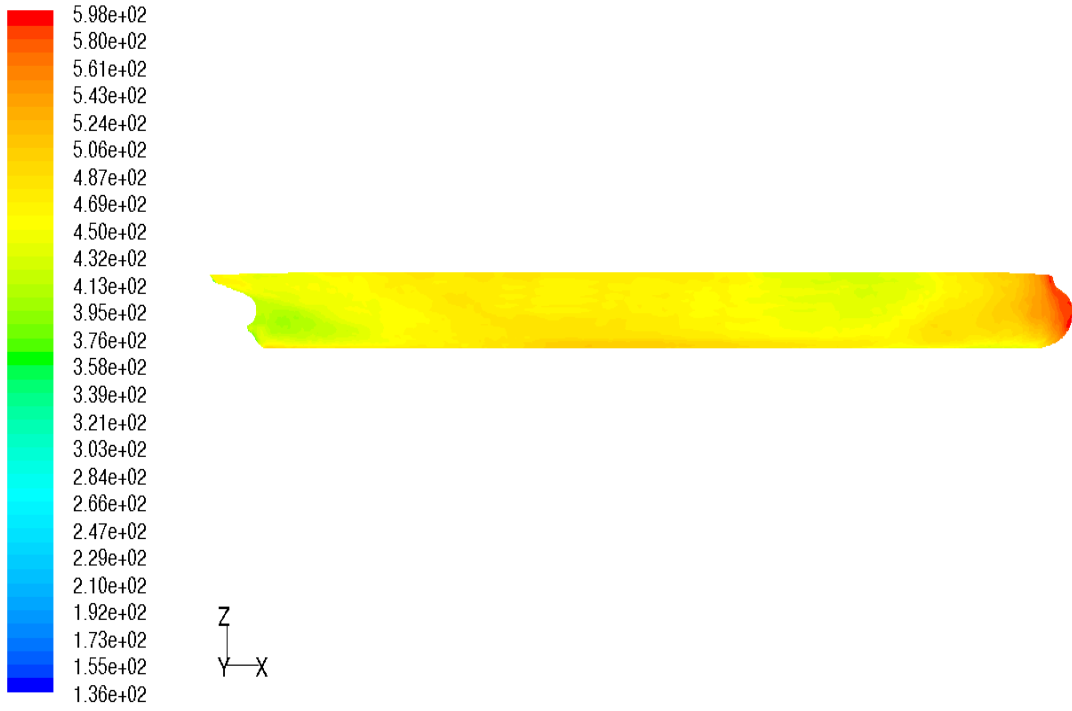
Şekil 4.32, Şekil 4.33, Şekil 4.34, Şekil4.35 ve Şekil 4.36'da C13 formuna ait basınç dağılım şekilleri verilmiştir.



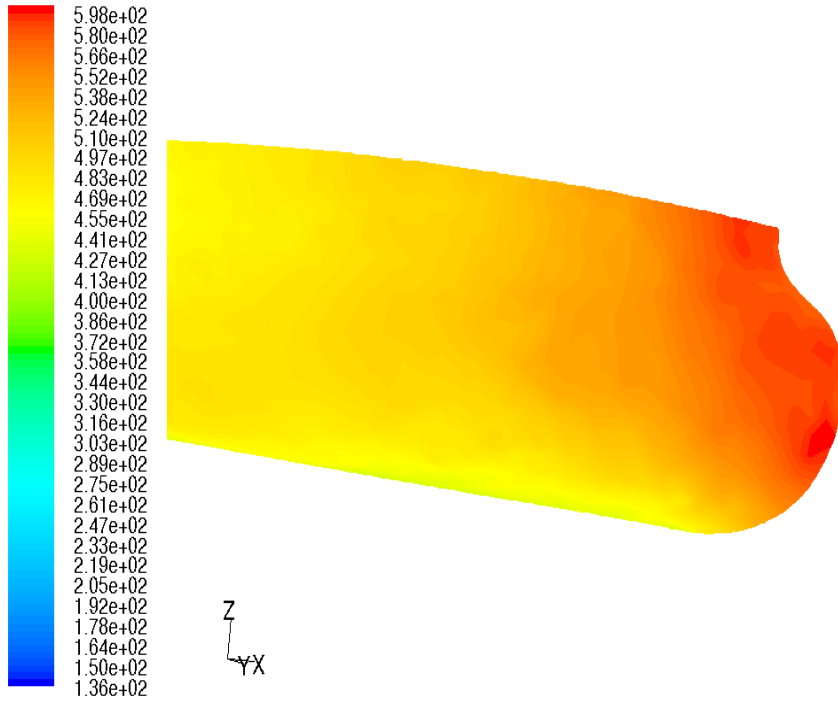
Şekil 4.32 C13 formu CFD analizinde elde edilen hesap hacmi basınç dağılımı perspektif görünüşü



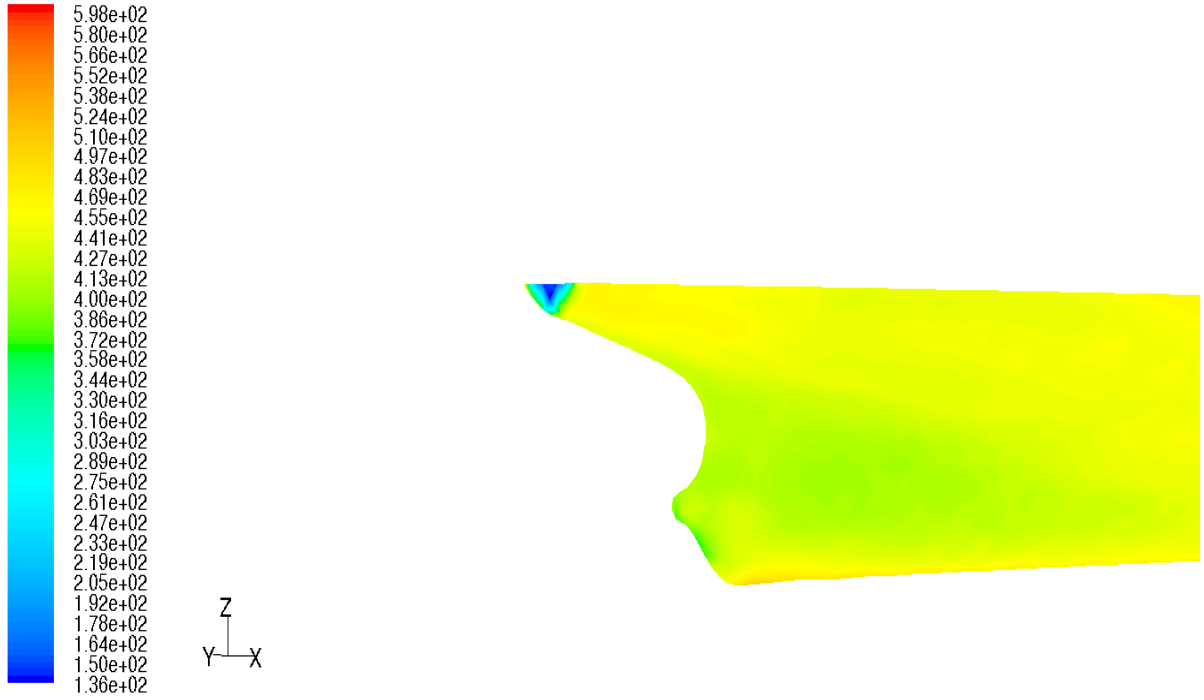
Şekil 4.33 C13 formu CFD analizinde elde edilen tekne yüzeyi basınç dağılımı perspektif görünüşü



Şekil 4.34 C13 formu CFD analizinde elde edilen tekne yüzeyi basınç dağılımı profil görünüşü

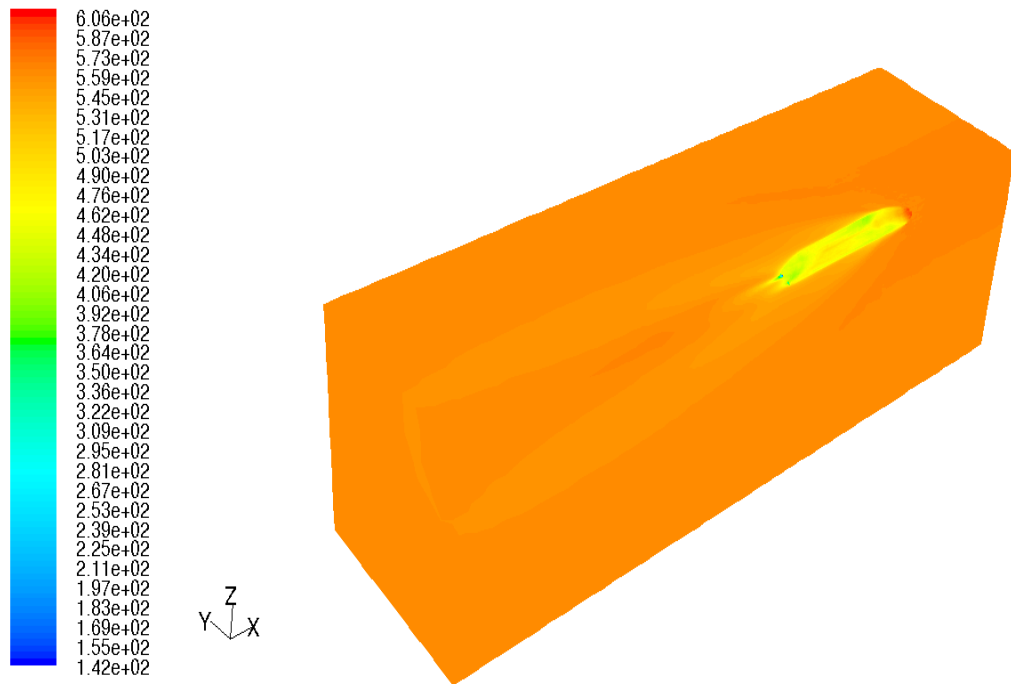


Şekil 4.35 C13 formu CFD analizinde elde edilen tekne yüzeyi baş taraf basınç dağılımı perspektif görünüşü

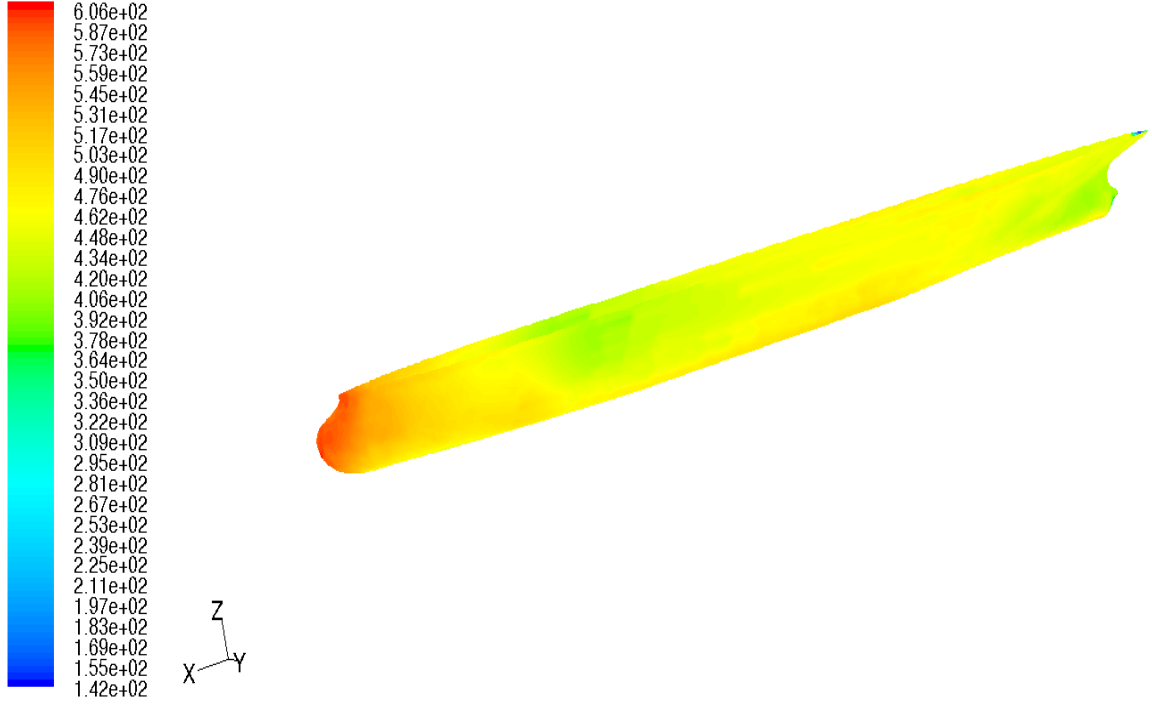


Şekil 4.36 C13 formu CFD analizinde elde edilen tekne yüzeyi kıç taraf basınç dağılımı perspektif görünüşü

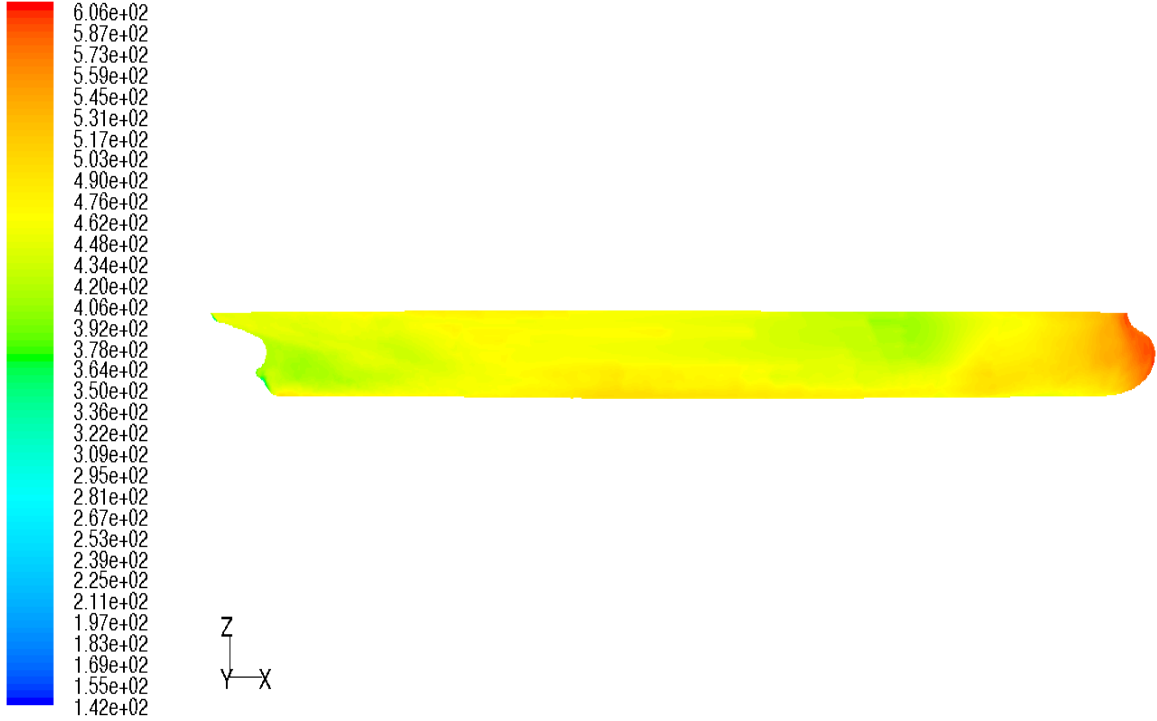
Şekil 4.37, Şekil 4.38, Şekil 4.39, Şekil 4.40 ve Şekil 4.41’de C63 formuna ait basınç dağılım şekilleri verilmiştir.



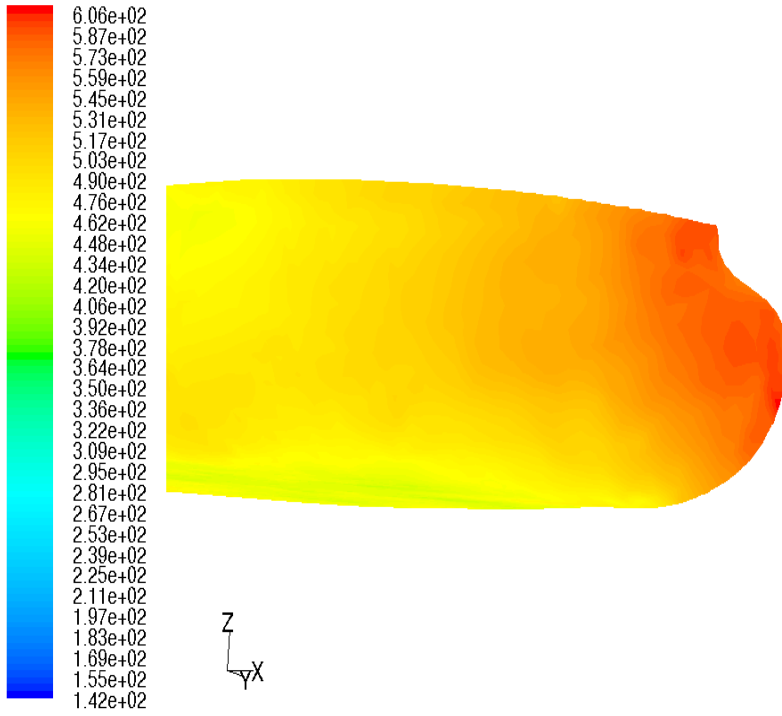
Şekil 4.37 C63 formu CFD analizinde elde edilen hesap hacmi basınç dağılımı perspektif görünüşü



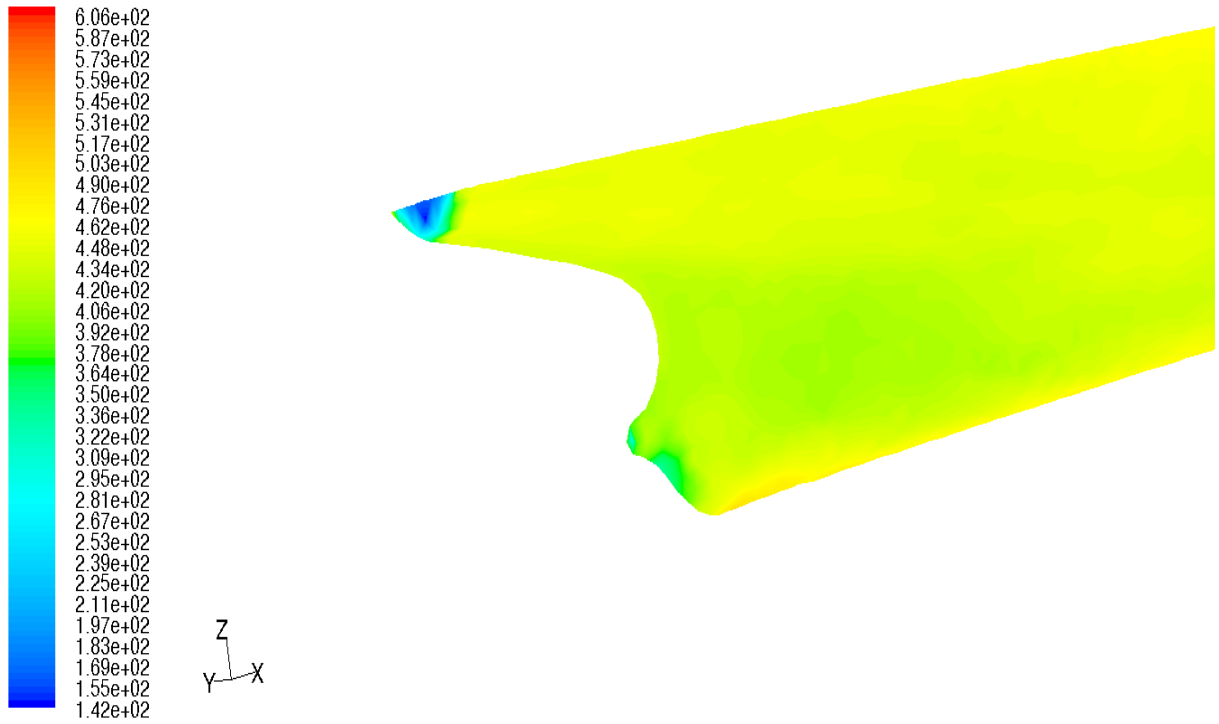
Şekil 4.38 C63 formu CFD analizinde elde edilen tekne yüzeyi basınç dağılımı perspektif görünüşü



Şekil 4.39 C63 formu CFD analizinde elde edilen tekne yüzeyi basınç dağılımı profil görünüşü



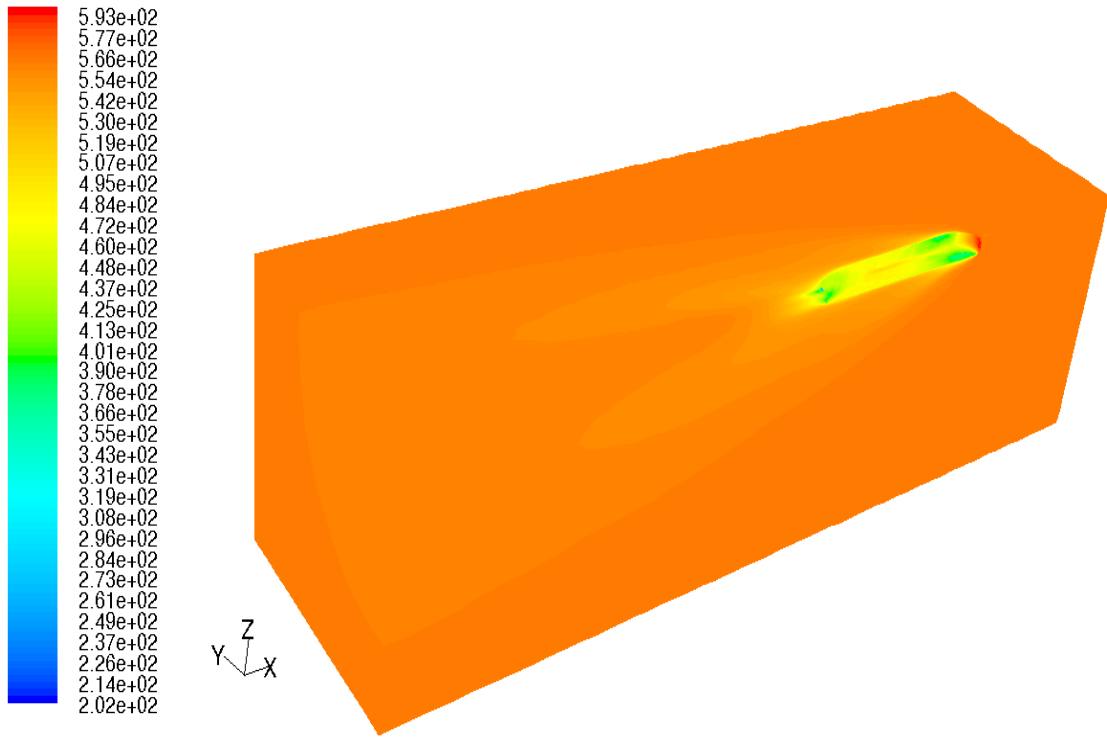
Şekil 4.40 C63 formu CFD analizinde elde edilen tekne yüzeyi baş taraf basınç dağılımı perspektif görünüşü



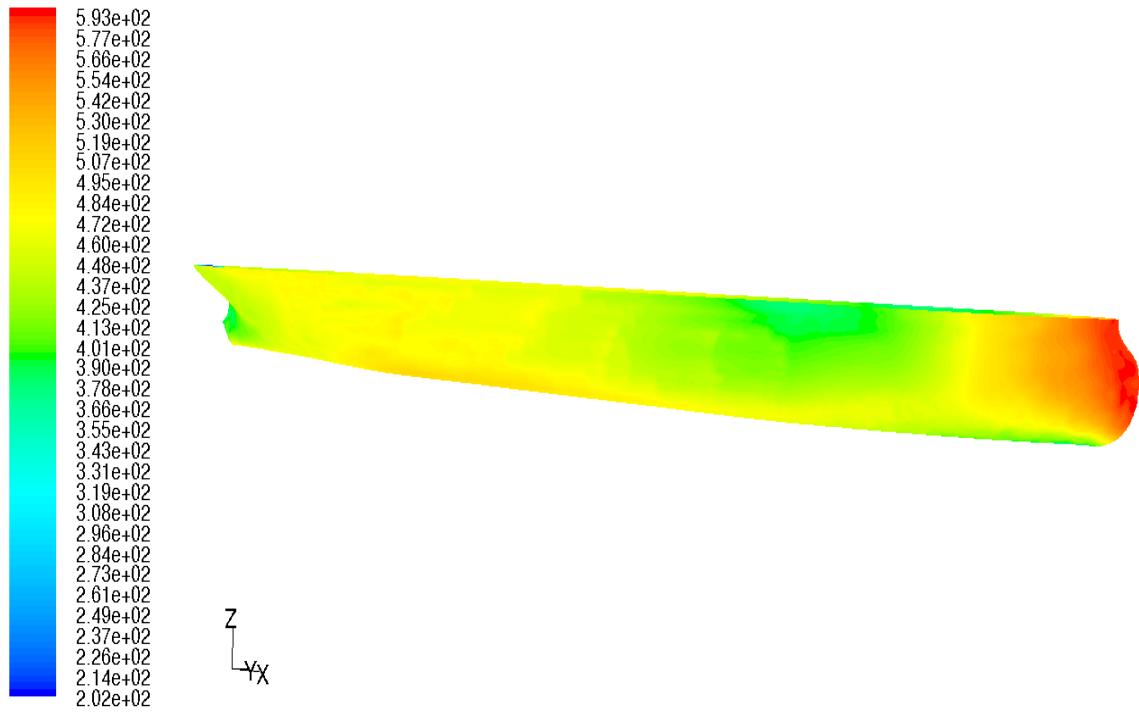
Şekil 4.41 C63 formu CFD analizinde elde edilen tekne yüzeyi kıç taraf basınç dağılımı perspektif görünüşü



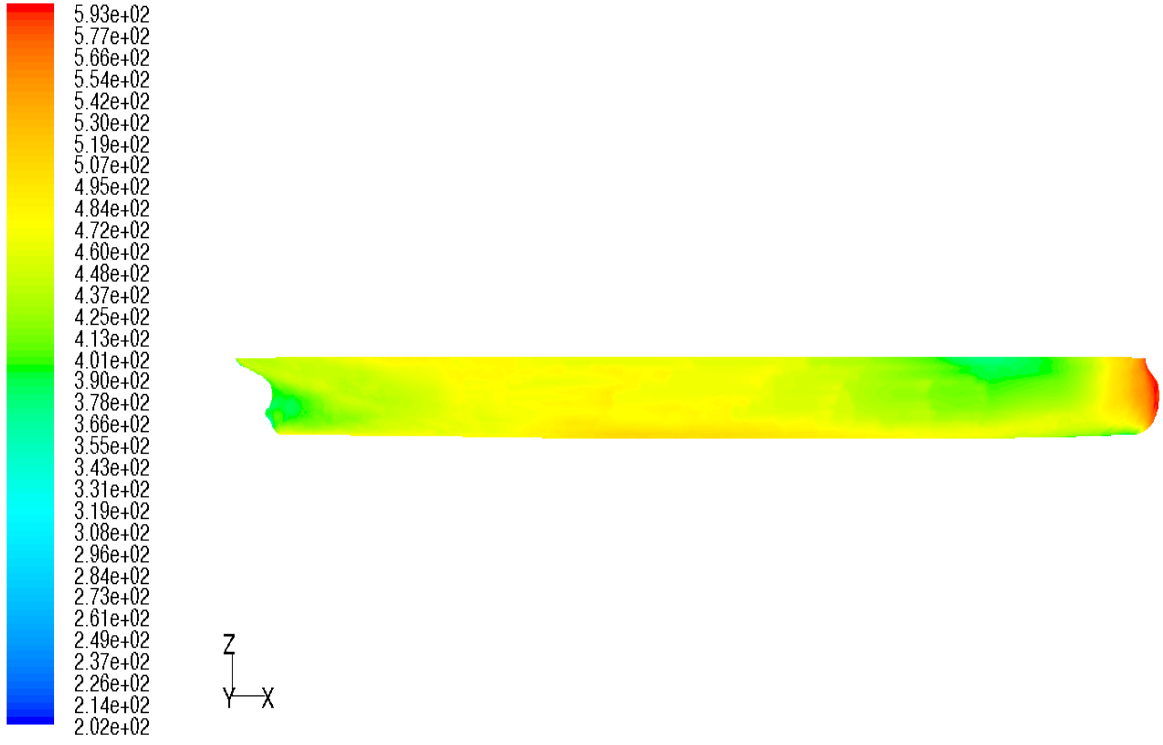
Şekil 4.42, Şekil 4.43, Şekil 4.44, Şekil 4.45 ve Şekil 4.46'da C113 formuna ait basınç dağılım şekilleri verilmiştir.



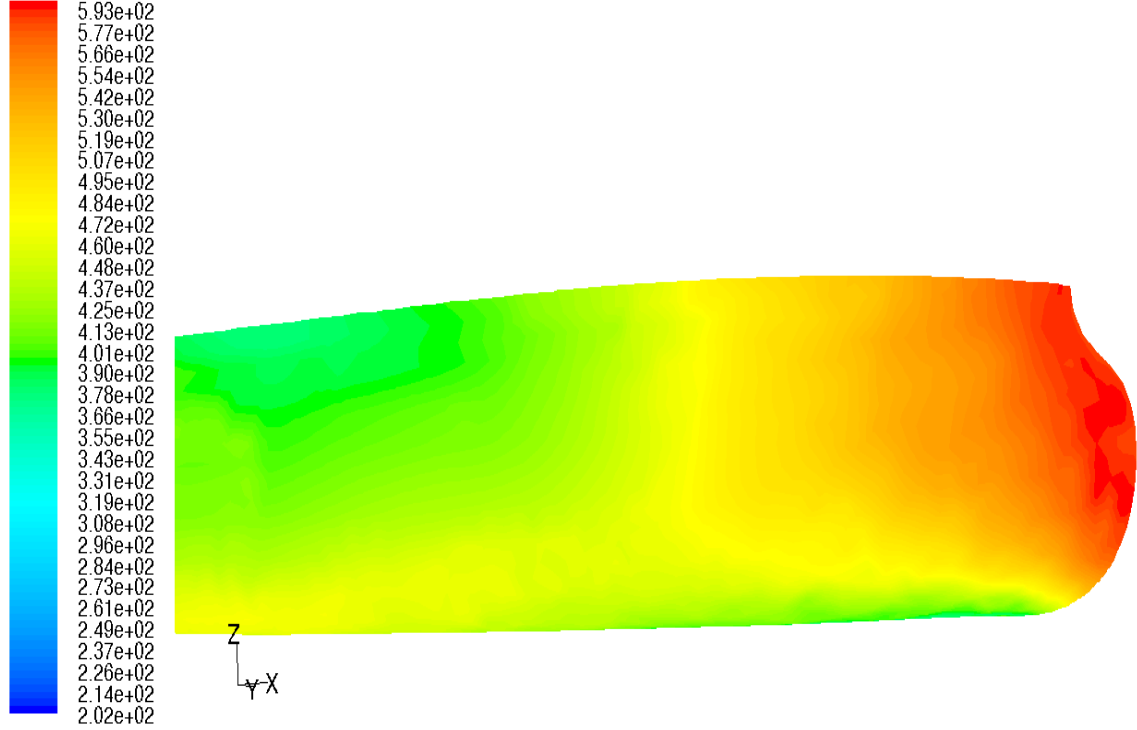
Şekil 4.42 C113 formu CFD analizinde elde edilen hesap hacmi basınç dağılımı perspektif görünüşü



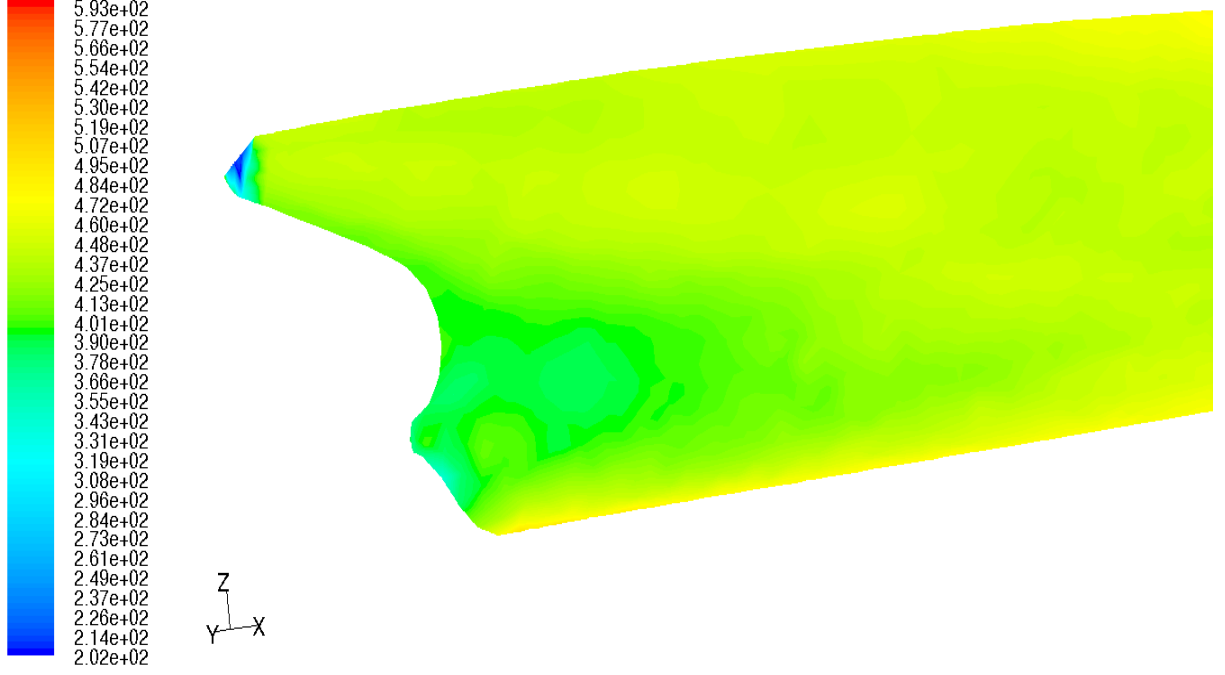
Şekil 4.43 C113 formu CFD analizinde elde edilen tekne yüzeyi basınç dağılımı perspektif görünüşü



Şekil 4.44 C113 formu CFD analizinde elde edilen tekne yüzeyi basınç dağılımı profil görünüşü



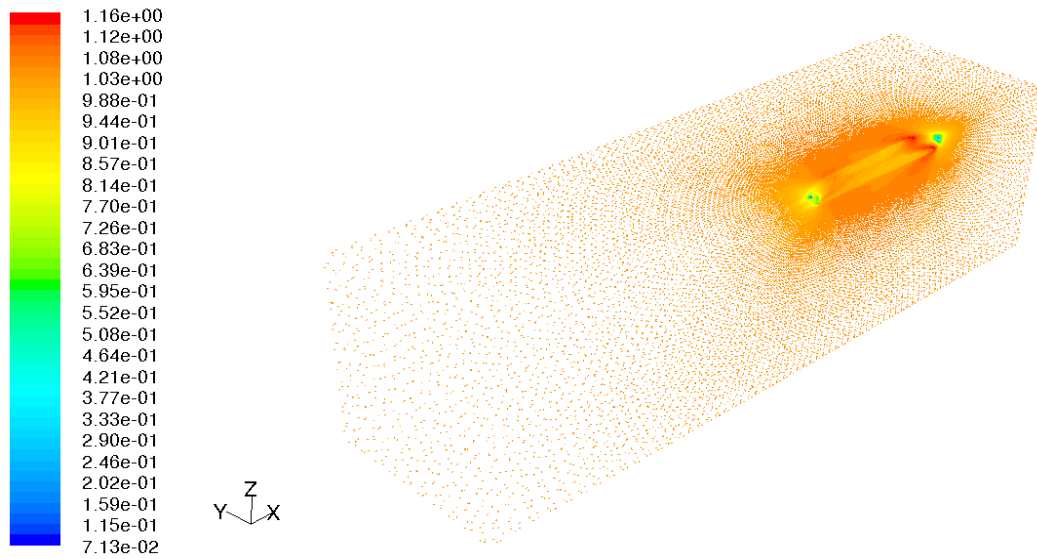
Şekil 4.45 C113 formu CFD analizinde elde edilen tekne yüzeyi baş taraf basınç dağılımı perspektif görünüşü



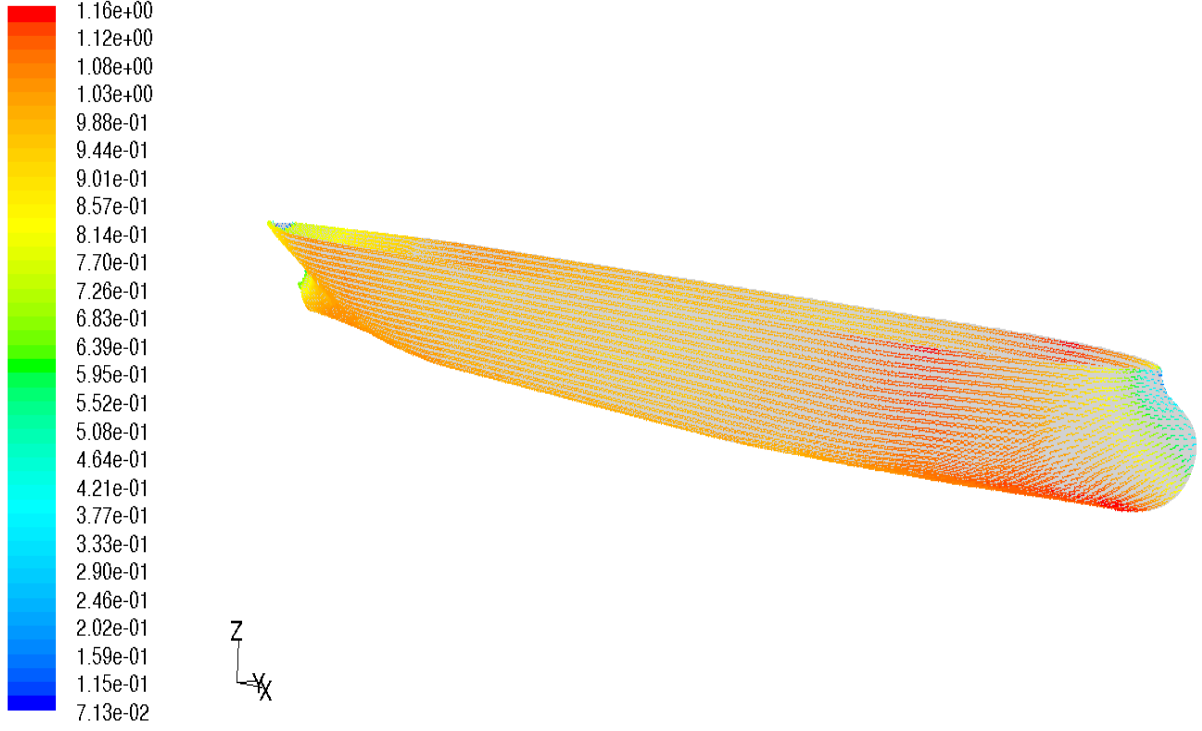
Şekil 4.46 C113 formu CFD analizinde elde edilen tekne yüzeyi kıç taraf basınç dağılımı perspektif görünüşü

Basınç değerleri gösterildikten sonra CFD analizi ile bulunan hesap hacmindeki ve tekne yüzeyindeki hız vektörlerinin her form için gösterilmesine geçilir. Her form için uygun açılarda ve görünüşlerde hız vektörleri şekilleri verilir.

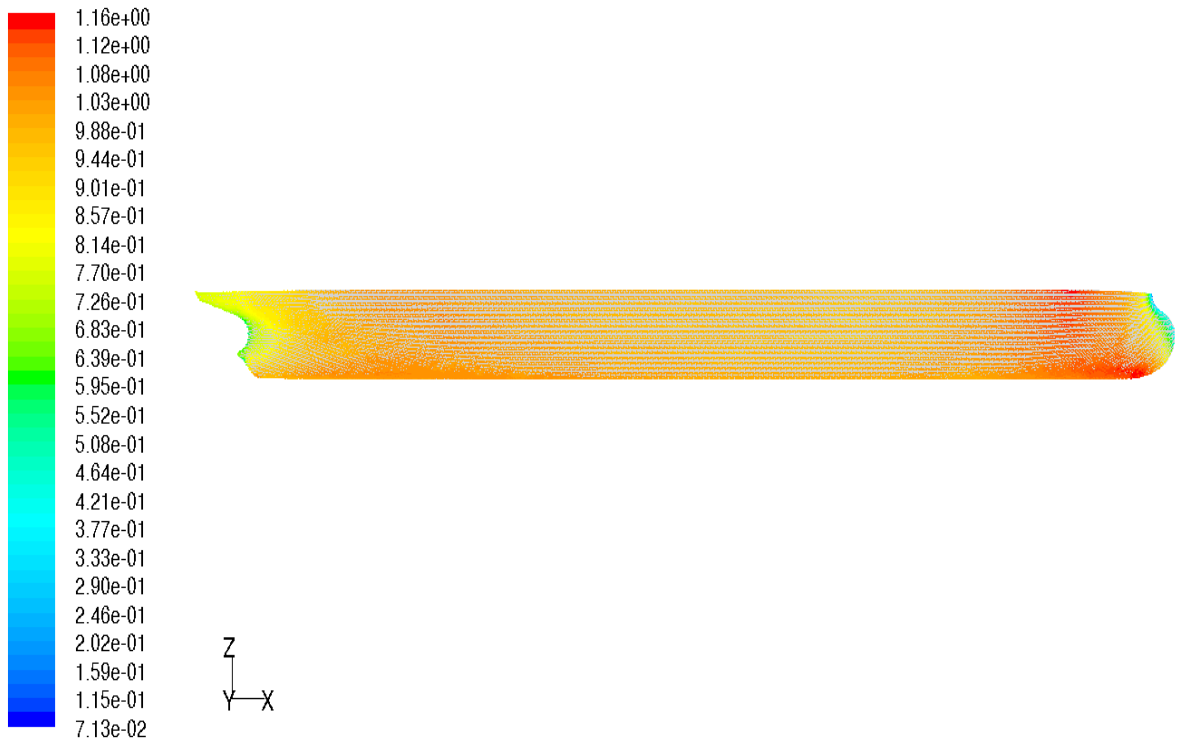
Şekil 4.47, Şekil 4.48, Şekil 4.49, Şekil 4.50 ve Şekil 4.51’de C13 formuna ait hız vektörleri şekilleri verilmiştir.



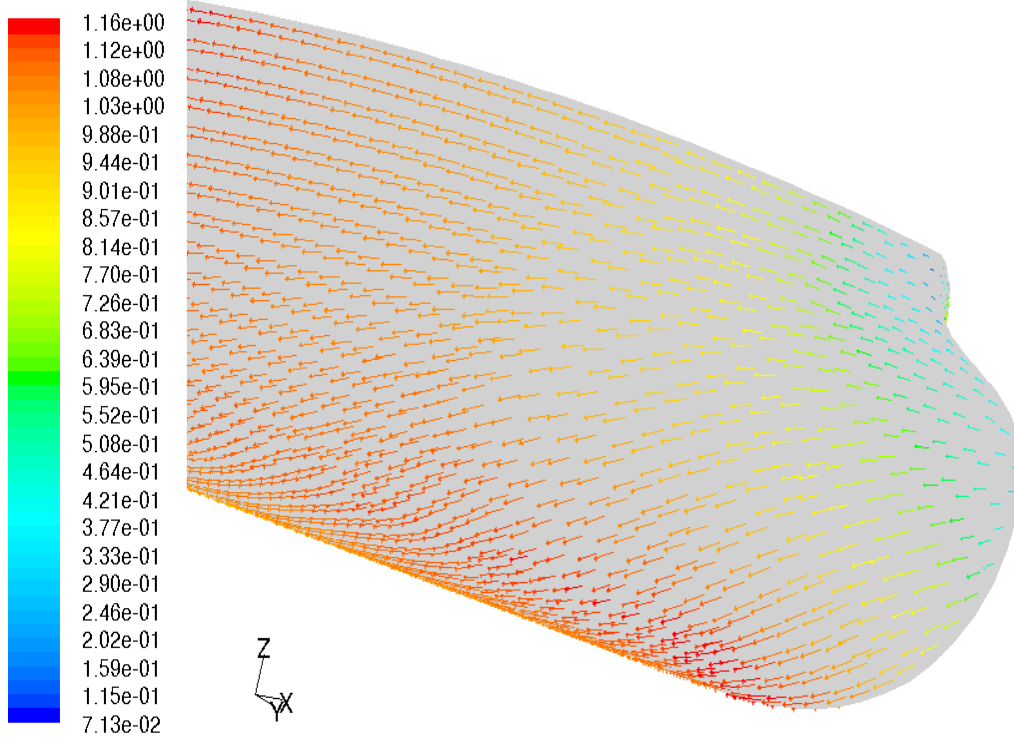
Şekil 4.47 C13 formu CFD analizinde elde edilen hesap hacmi hız vektörleri perspektif görünüşü



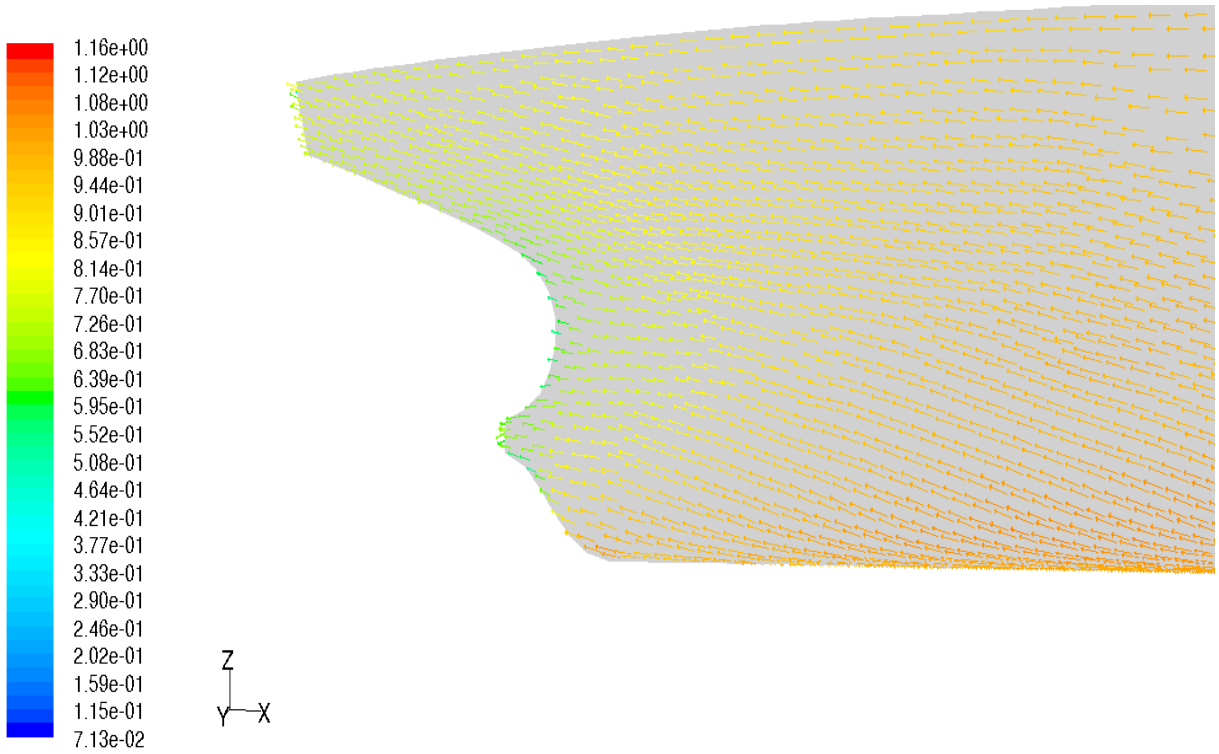
Şekil 4.48 C13 formu CFD analizinde elde edilen tekne yüzeyi hız vektörleri perspektif görünüşü



Şekil 4.49 C13 formu CFD analizinde elde edilen tekne yüzeyi hız vektörleri profil görünüşü

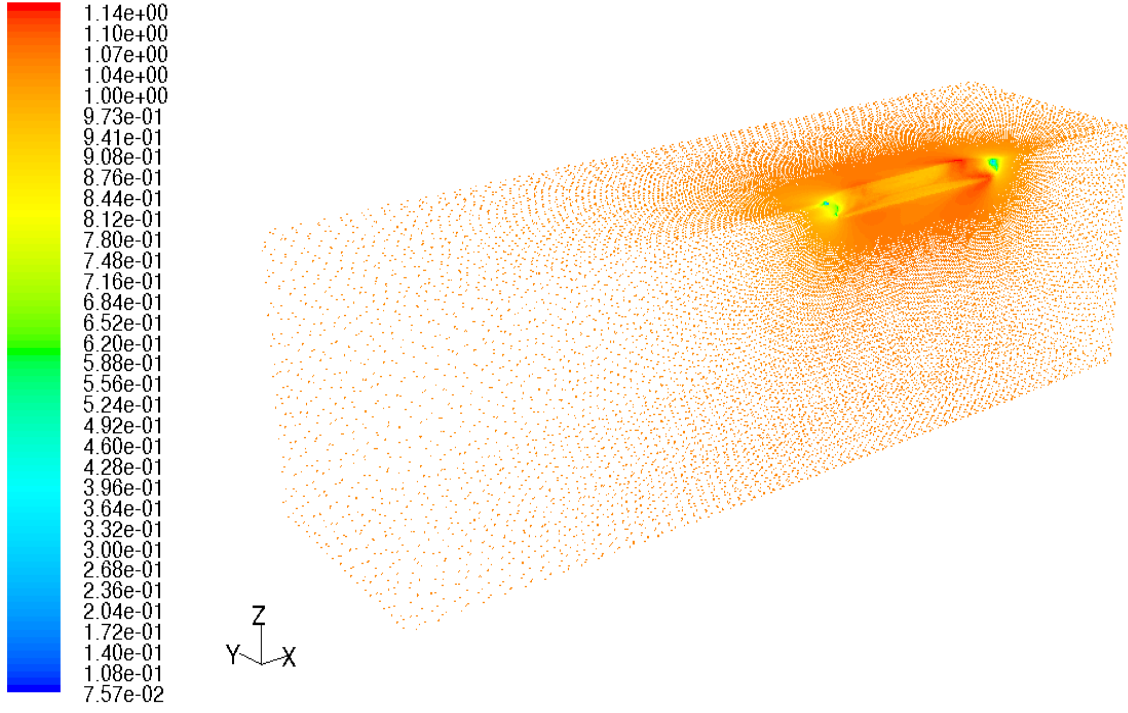


Şekil 4.50 C13 formu CFD analizinde elde edilen tekne yüzeyi baş taraf hız vektörleri perspektif görünüşü

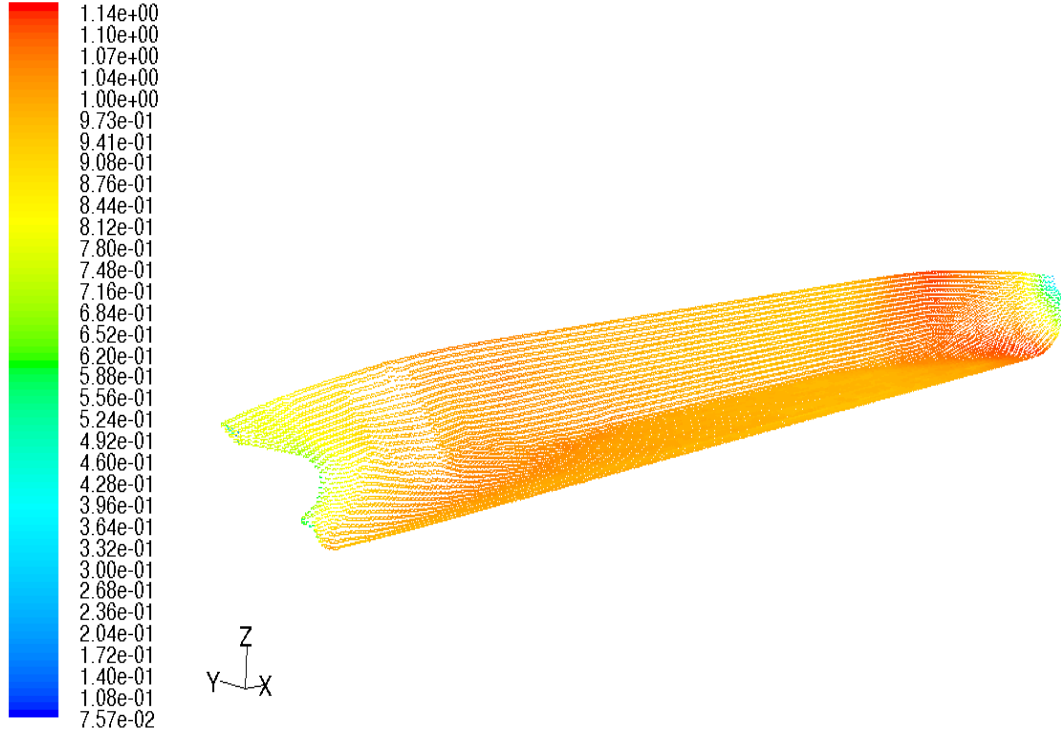


Şekil 4.51 C13 formu CFD analizinde elde edilen tekne yüzeyi kıç taraf hız vektörleri perspektif görünüşü

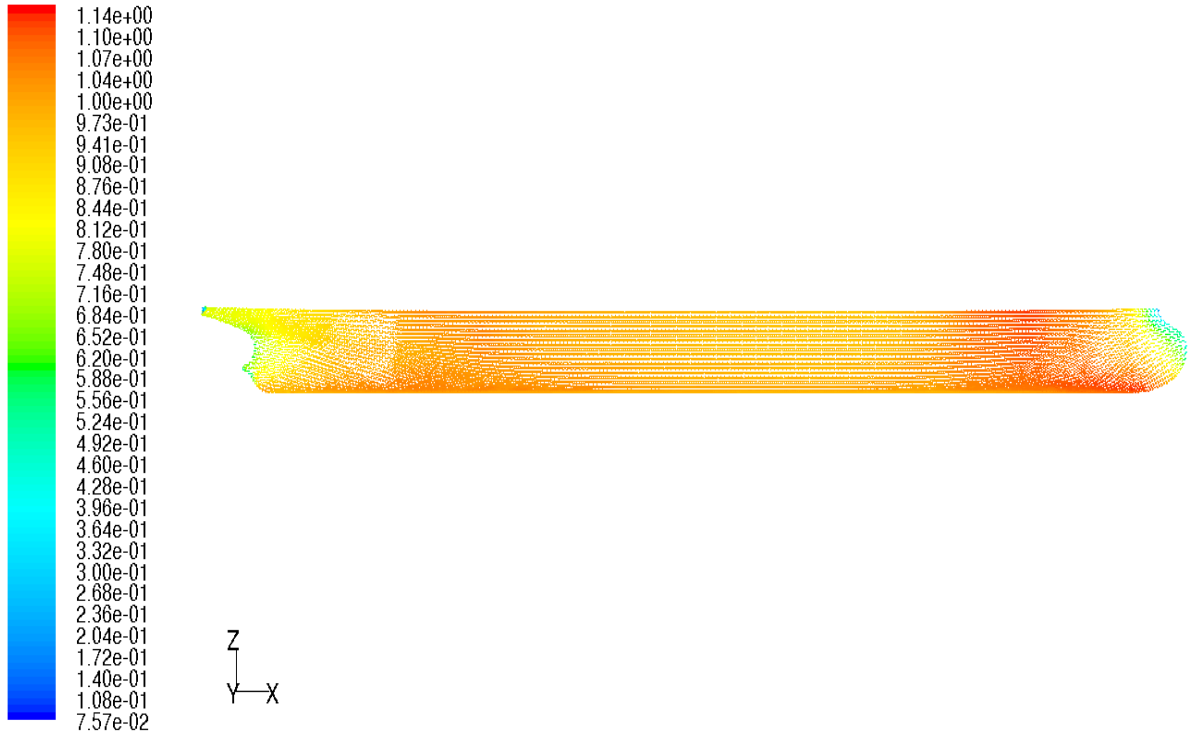
Şekil 4.52, Şekil 4.53, Şekil 4.54, Şekil 4.55 ve Şekil 4.56'da C63 formuna ait hız vektörleri şekilleri verilmiştir.



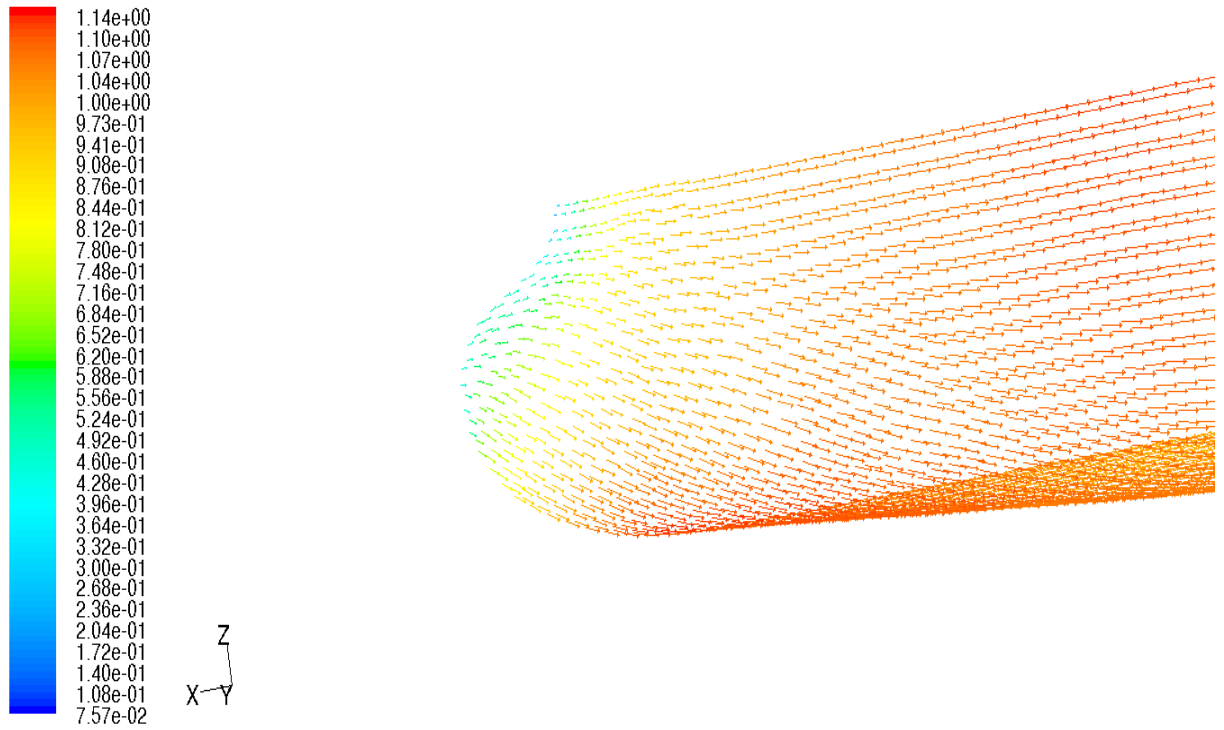
Şekil 4.52 C63 formu CFD analizinde elde edilen hesap hacmi hız vektörleri perspektif görünüşü



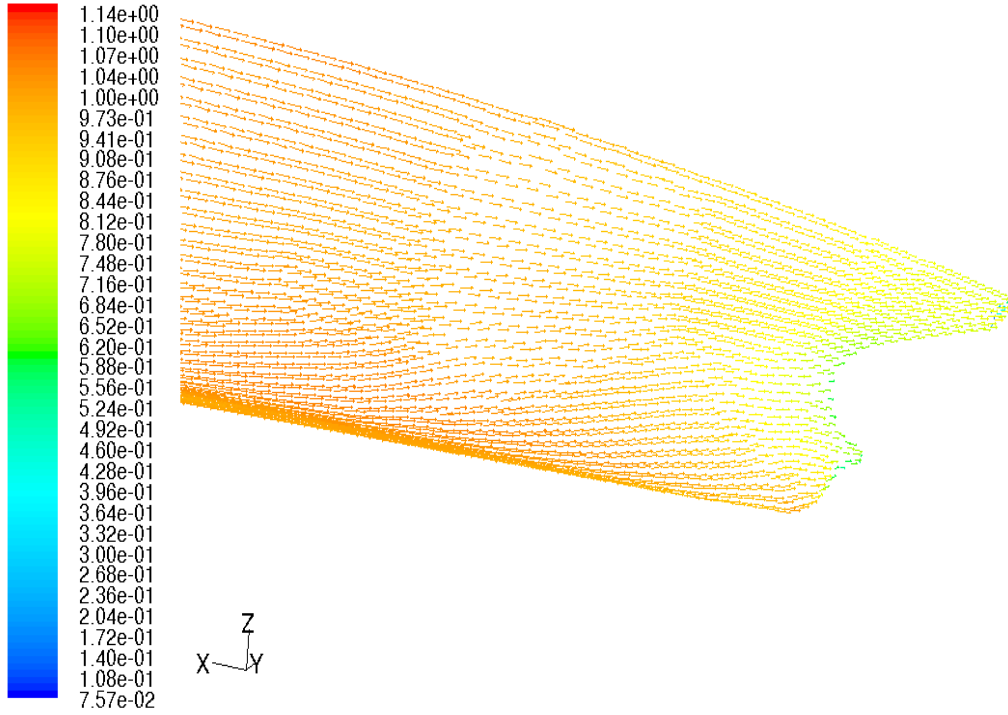
Şekil 4.53 C63 formu CFD analizinde elde edilen tekne yüzeyi hız vektörleri perspektif görünüşü



Şekil 4.54 C63 formu CFD analizinde elde edilen tekne yüzeyi hız vektörleri profil görünüşü

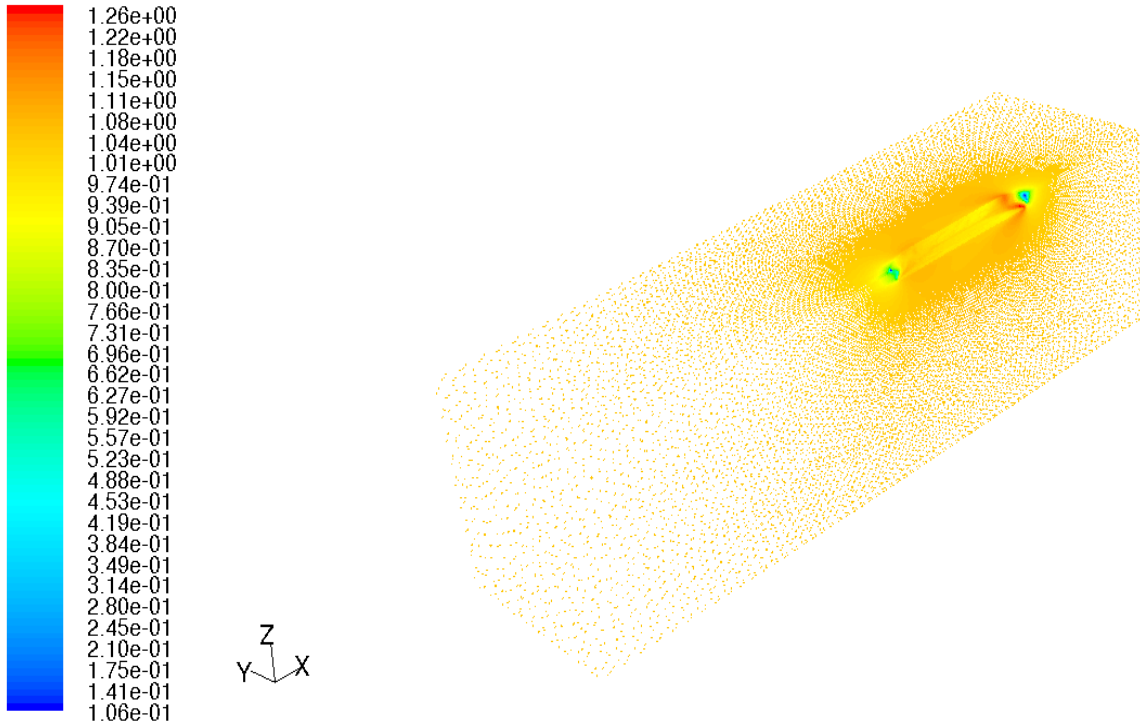


Şekil 4.55 C63 formu CFD analizinde elde edilen tekne yüzeyi baş taraf hız vektörleri perspektif görünüşü



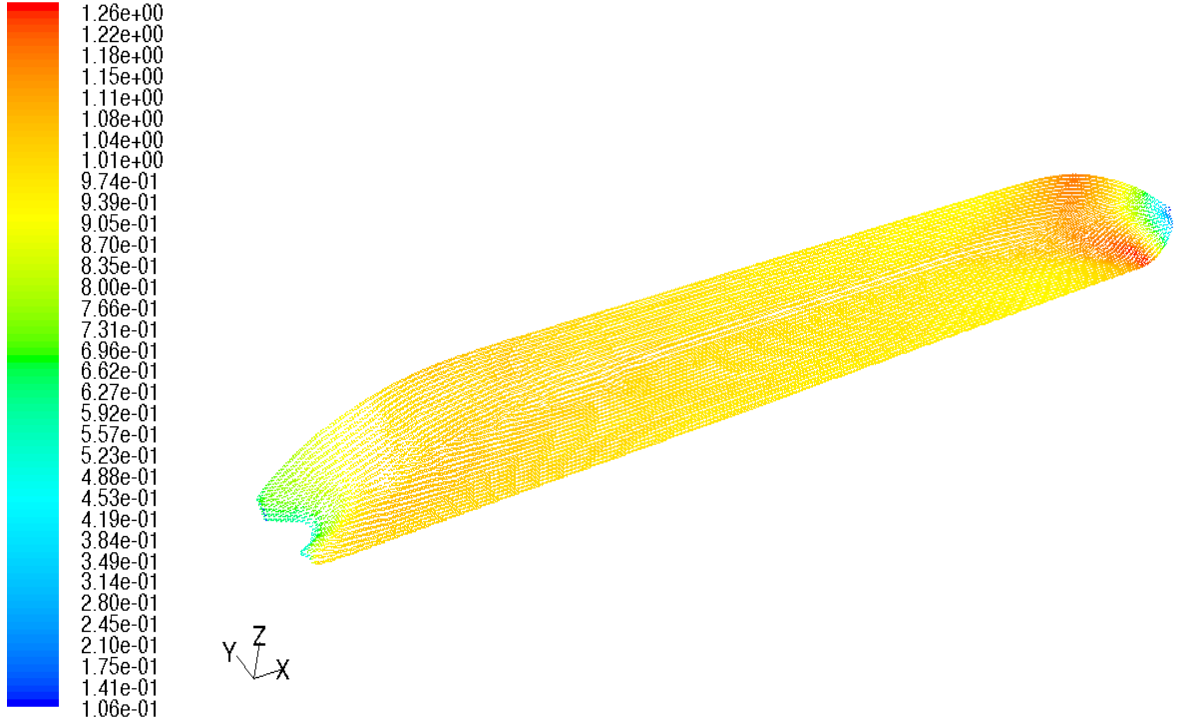
Şekil 4.56 C63 formu CFD analizinde elde edilen tekne yüzeyi kıç taraf hız vektörleri perspektif görünüşü

Şekil 4.57, Şekil 4.58, Şekil 4.59, Şekil 4.60 ve Şekil 4.61’de C113 formuna ait hız vektörleri şekilleri verilmiştir.

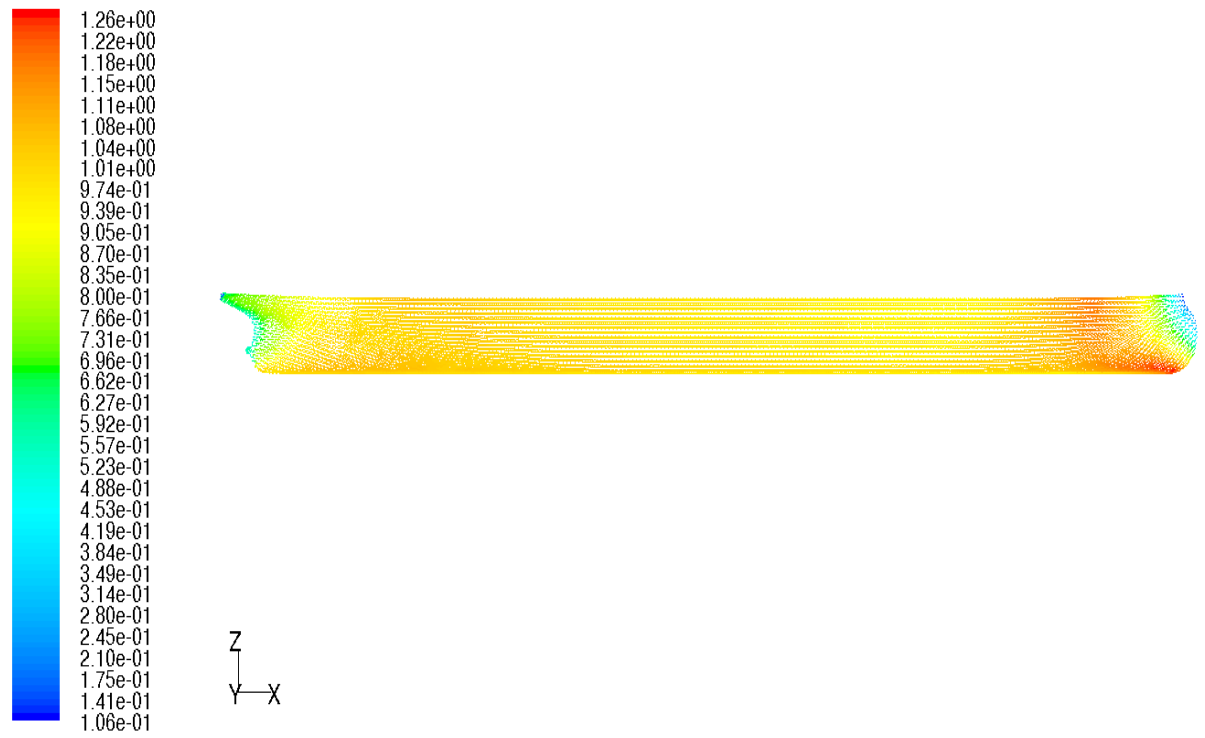


Şekil 4.57 C113 formu CFD analizinde elde edilen hesap hacmi hız vektörleri perspektif görünüşü

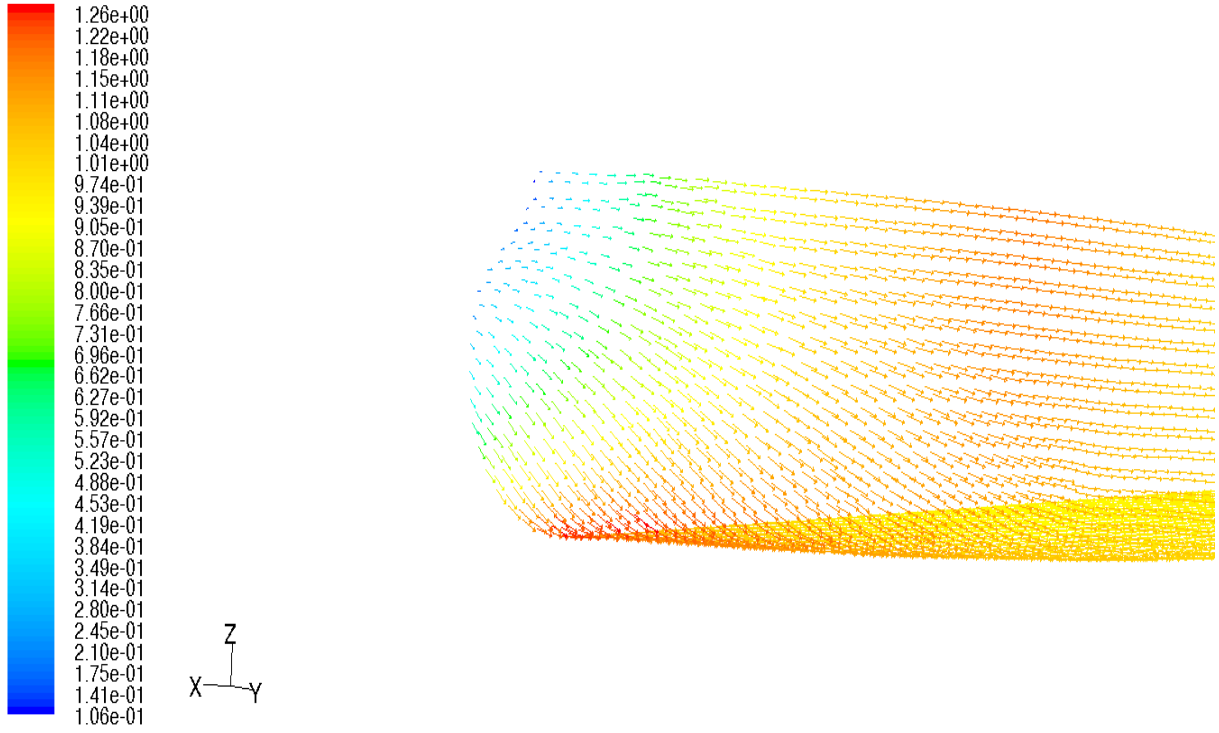




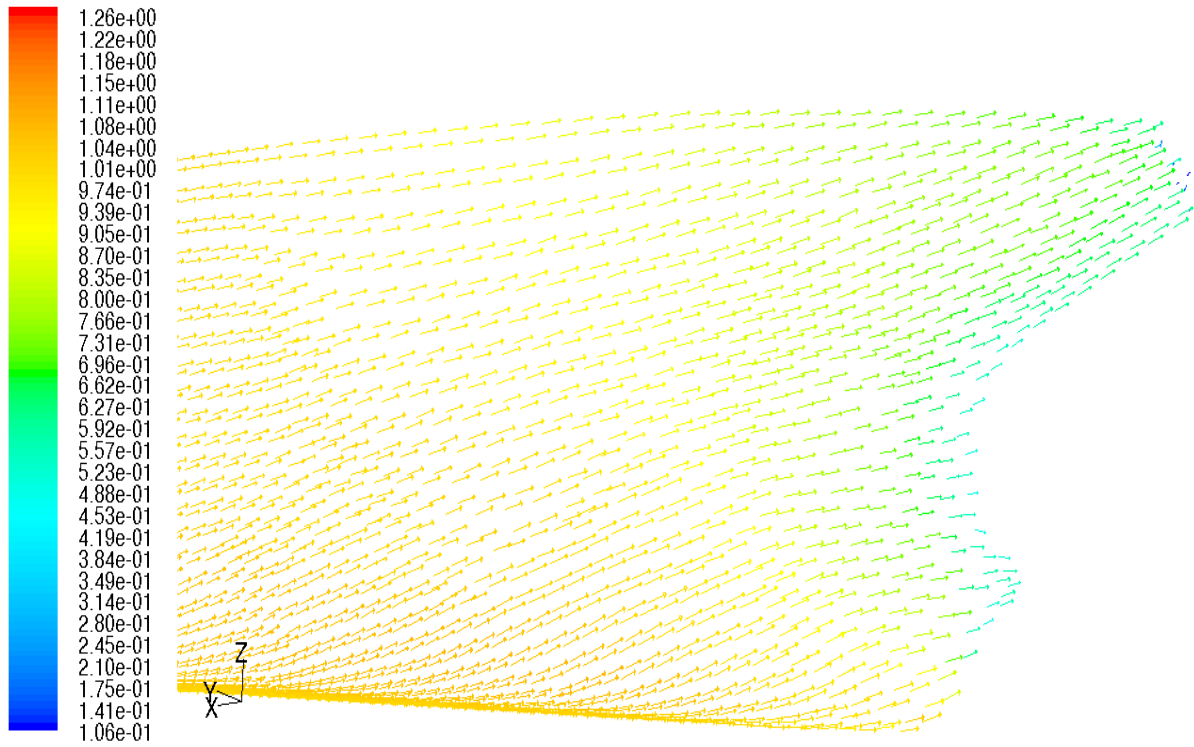
Şekil 4.58 C113 formu CFD analizinde elde edilen tekne yüzeyi hız vektörleri perspektif görünüşü



Şekil 4.59 C113 formu CFD analizinde elde edilen tekne yüzeyi hız vektörleri profil görünüşü



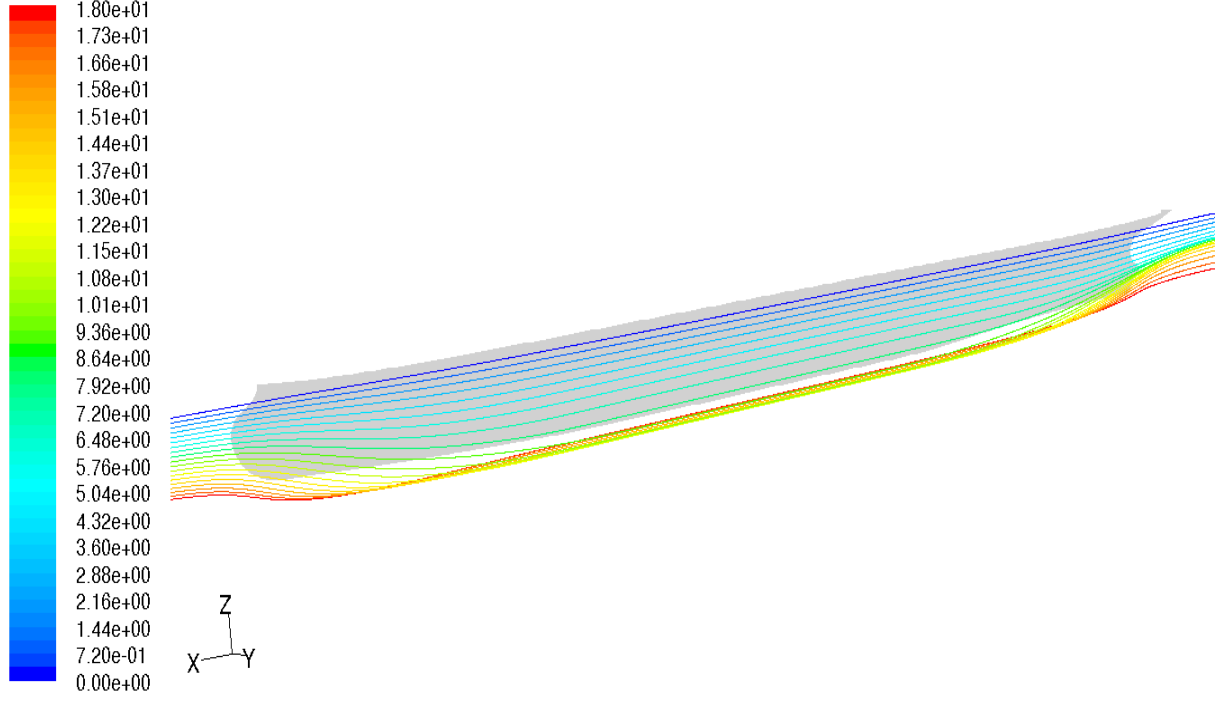
Şekil 4.60 C113 formu CFD analizinde elde edilen tekne yüzeyi baş taraf hız vektörleri perspektif görünüşü



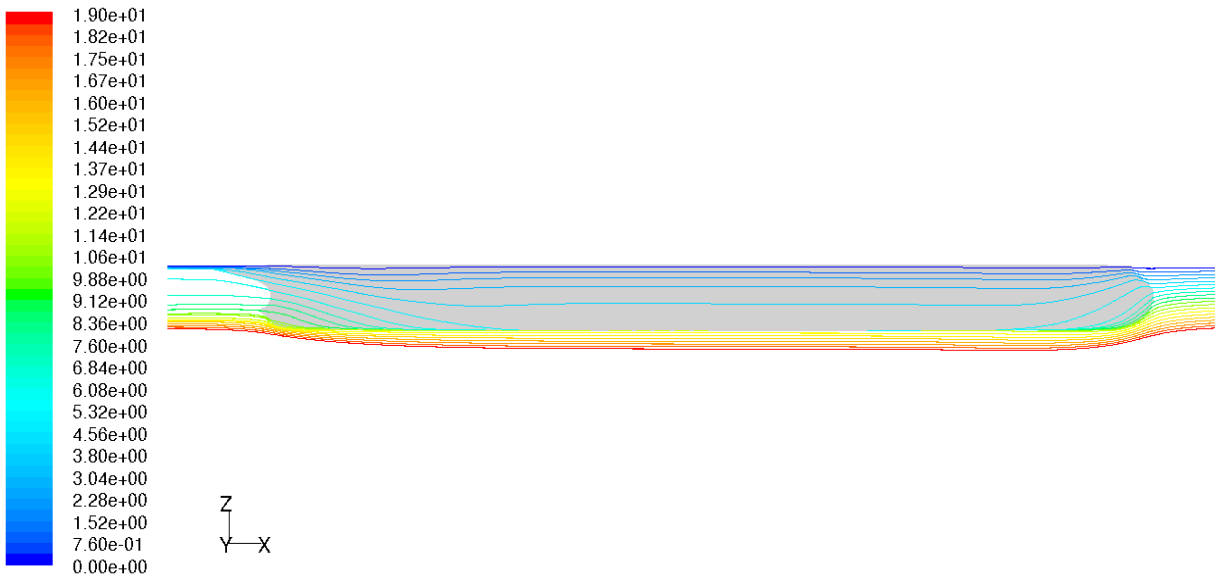
Şekil 4.61 C113 formu CFD analizinde elde edilen tekne yüzeyi kıç taraf hız vektörleri perspektif görünüşü

Basınç dağılımlarının ve hız vektörlerinin gösterilmesinden sonra gemi formu etrafındaki akım hatlarının da gösterilmesinde fayda vardır. Gösterilen akım hatları form ile ilgili fikir verebilir.

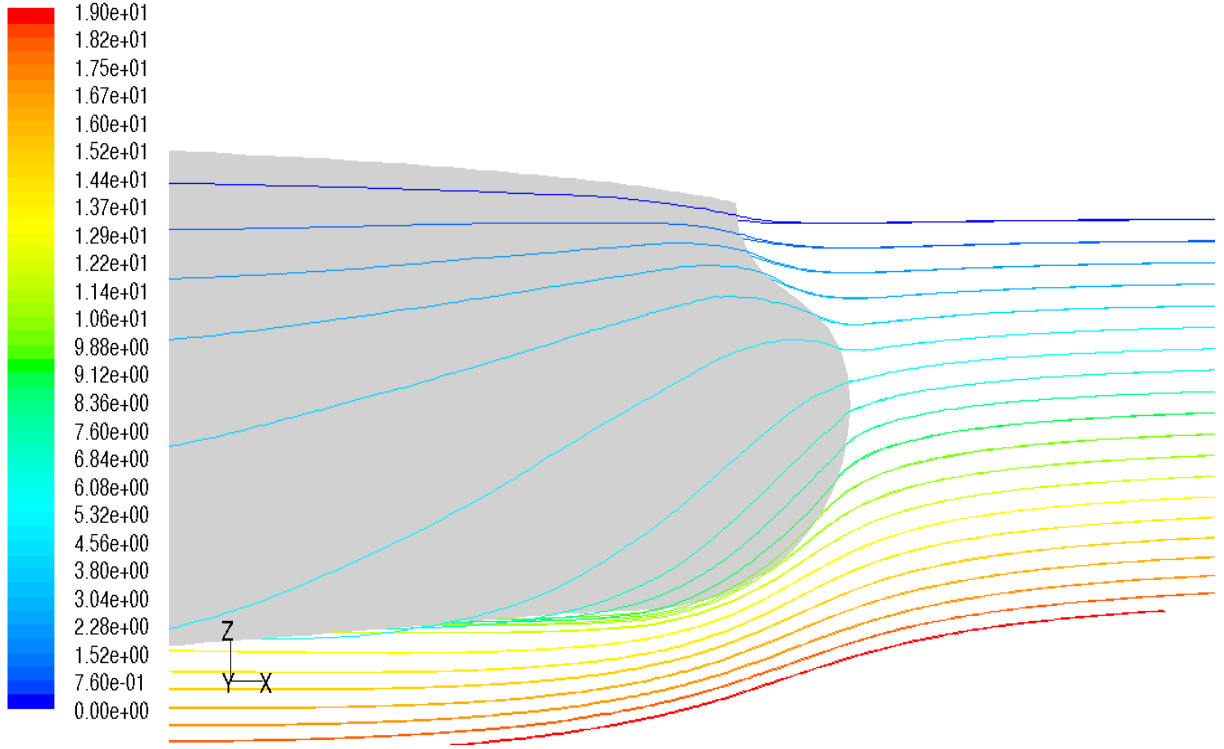
Şekil 4.62, Şekil 4.63, Şekil 4.64 ve Şekil 4.65'de C13 formunun etrafındaki akım hatları gösterilmiştir.



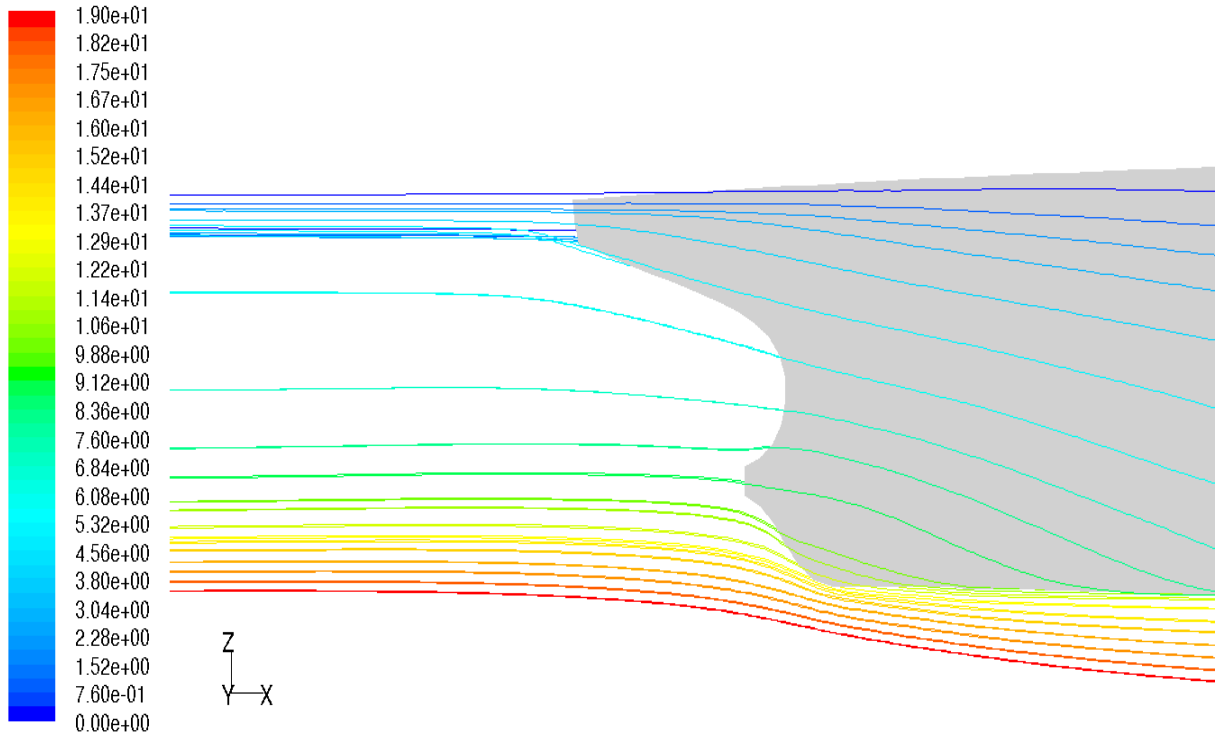
Şekil 4.62 C13 formu CFD analizinde elde edilen tekne yüzeyi etrafındaki akım hatlarının perspektif görünüşü



Şekil 4.63 C13 formu CFD analizinde elde edilen tekne yüzeyi etrafındaki akım hatlarının profil görünüşü

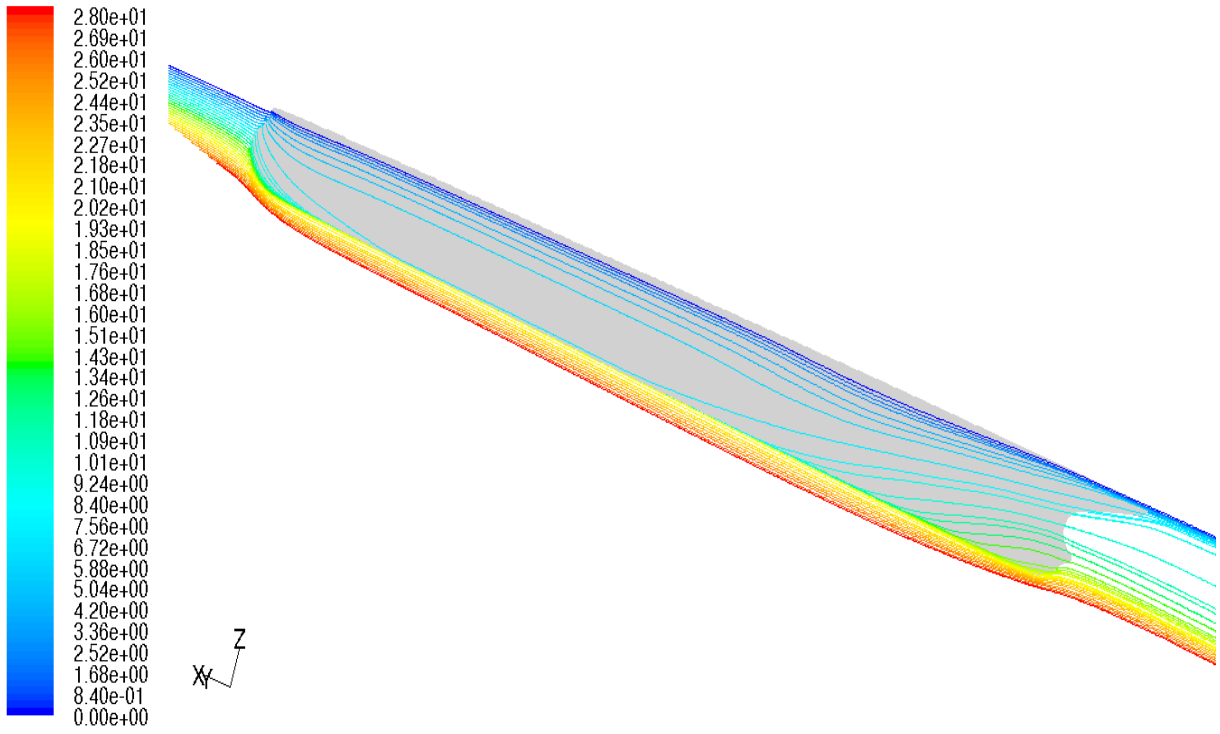


Şekil 4.64 C13 formu CFD analizinde elde edilen tekne yüzeyi baş taraf etrafındaki akım hatlarının profil görünüşü

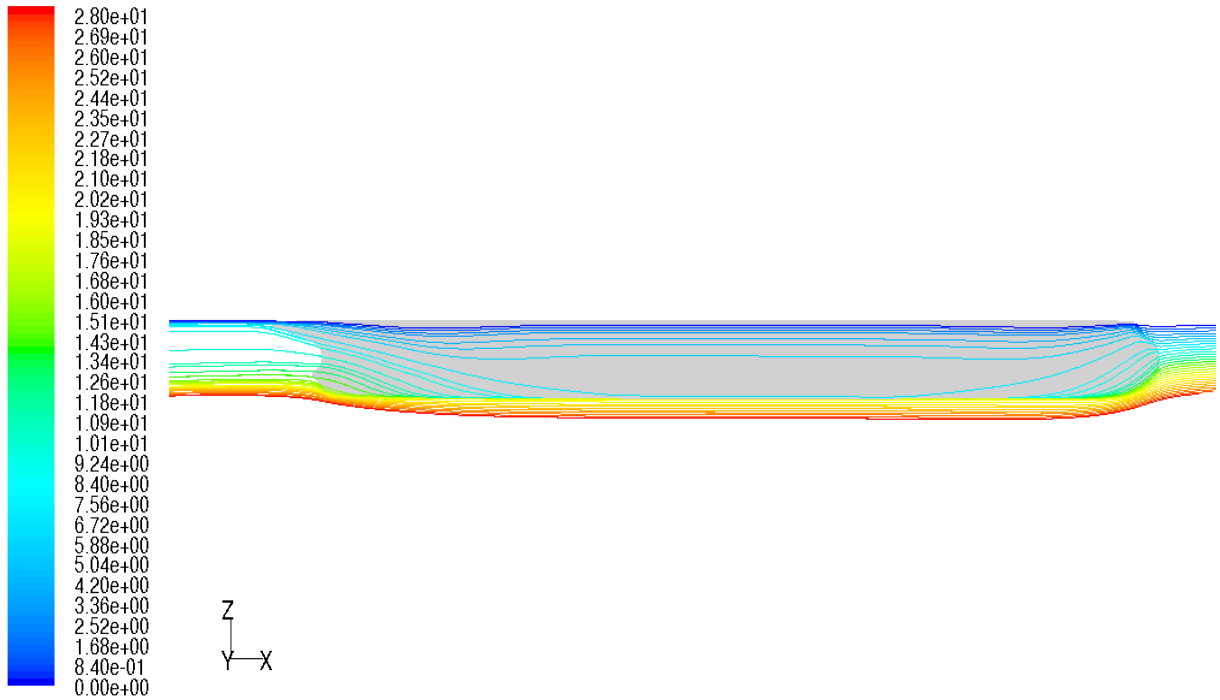


Şekil 4.65 C13 formu CFD analizinde elde edilen tekne yüzeyi kıç taraf etrafındaki akım hatlarının profil görünüşü

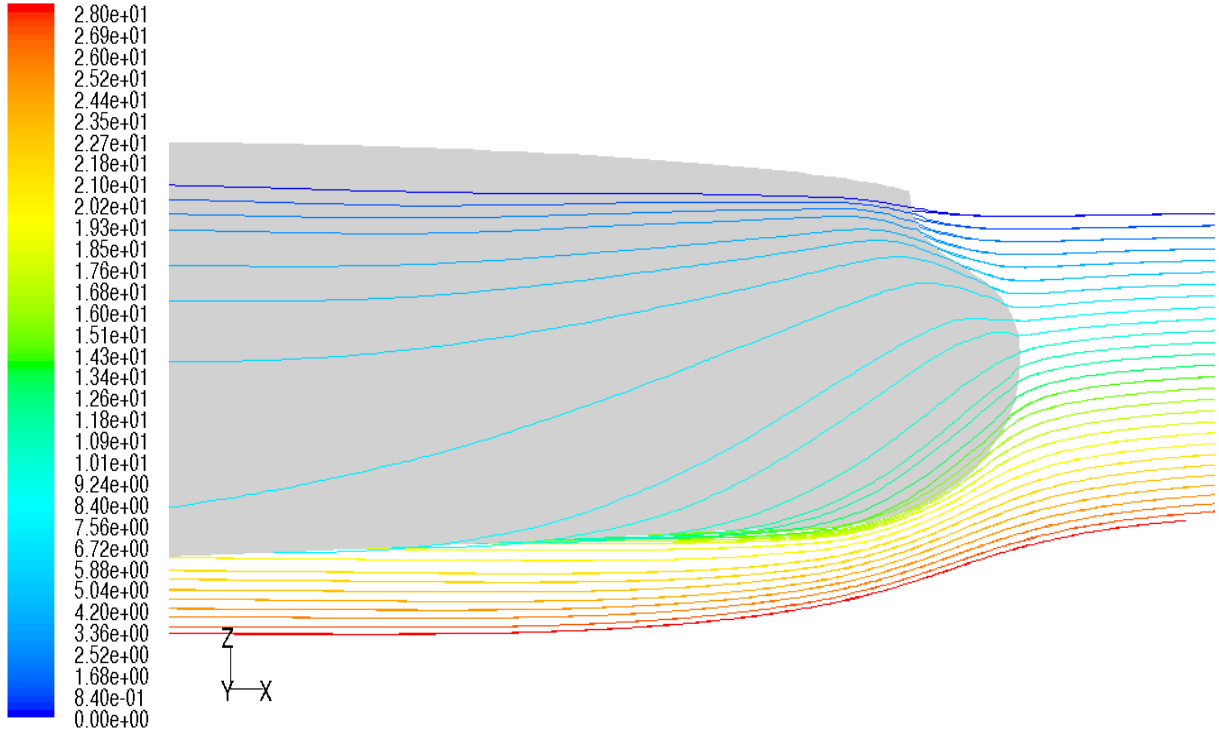
Şekil 4.66 Şekil 4.67, Şekil 4.68 ve Şekil 4.69'da C63 formunun etrafındaki akım hatları gösterilmiştir.



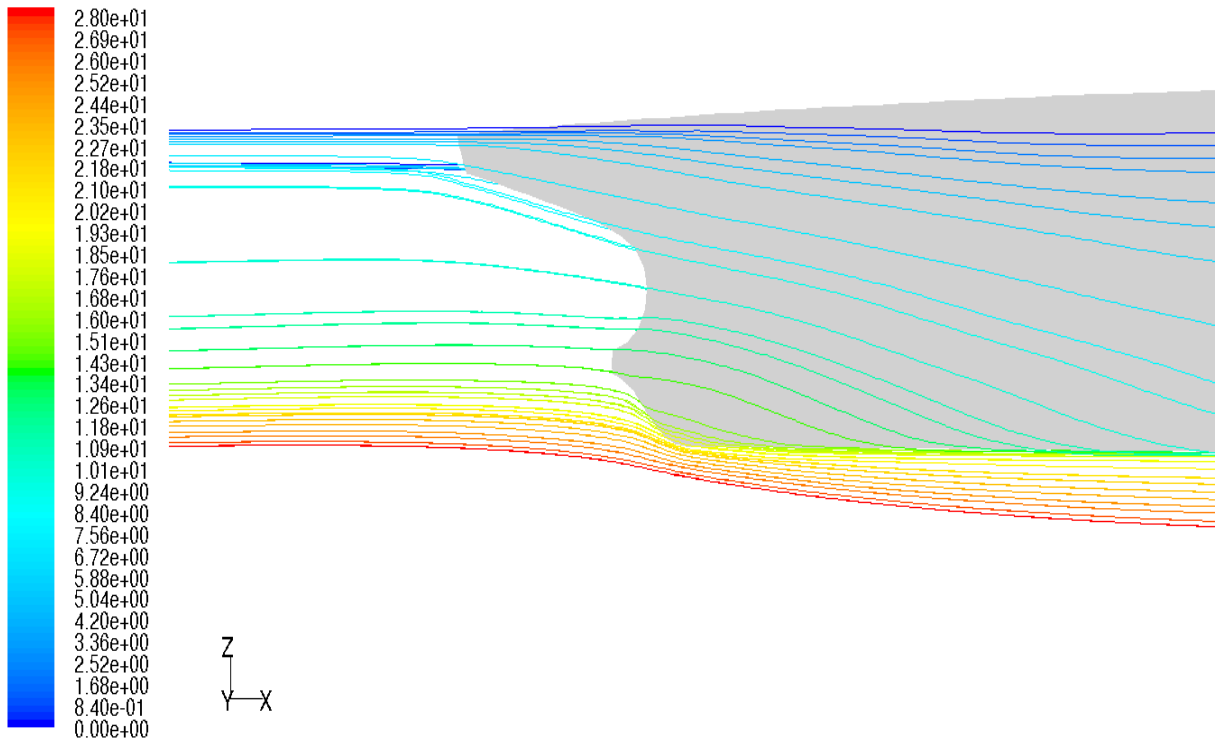
Şekil 4.66 C63 formu CFD analizinde elde edilen tekne yüzeyi etrafındaki akım hatlarının perspektif görünüşü



Şekil 4.67 C63 formu CFD analizinde elde edilen tekne yüzeyi etrafındaki akım hatlarının profil görünüşü

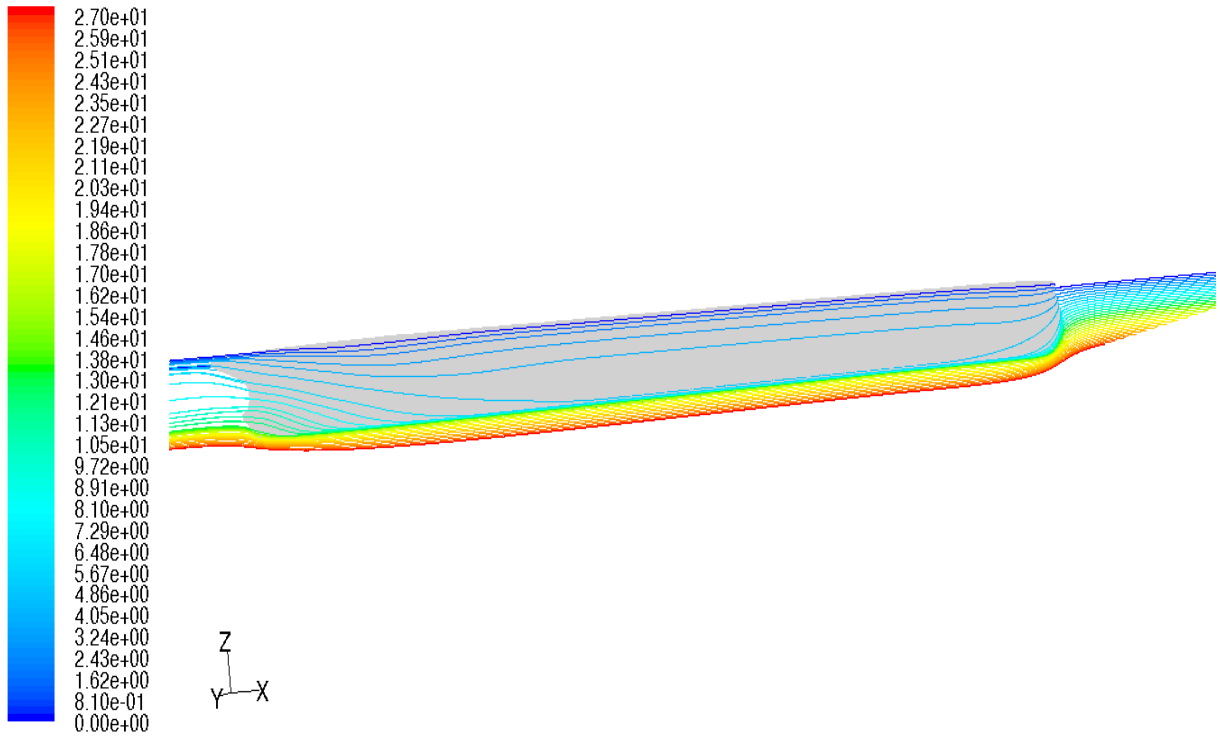


Şekil 4.68 C63 formu CFD analizinde elde edilen tekne yüzeyi baş taraf etrafındaki akım hatlarının profil görünüşü

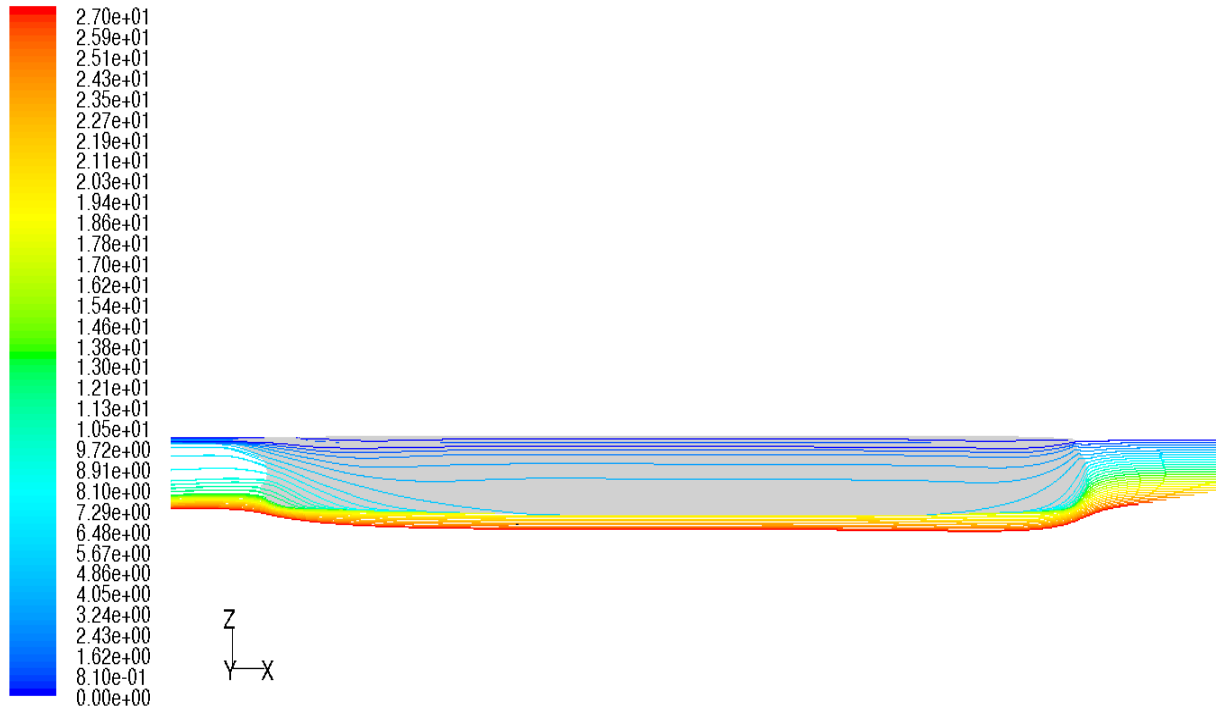


Şekil 4.69 C63 formu CFD analizinde elde edilen tekne yüzeyi kıç taraf etrafındaki akım hatlarının profil görünüşü

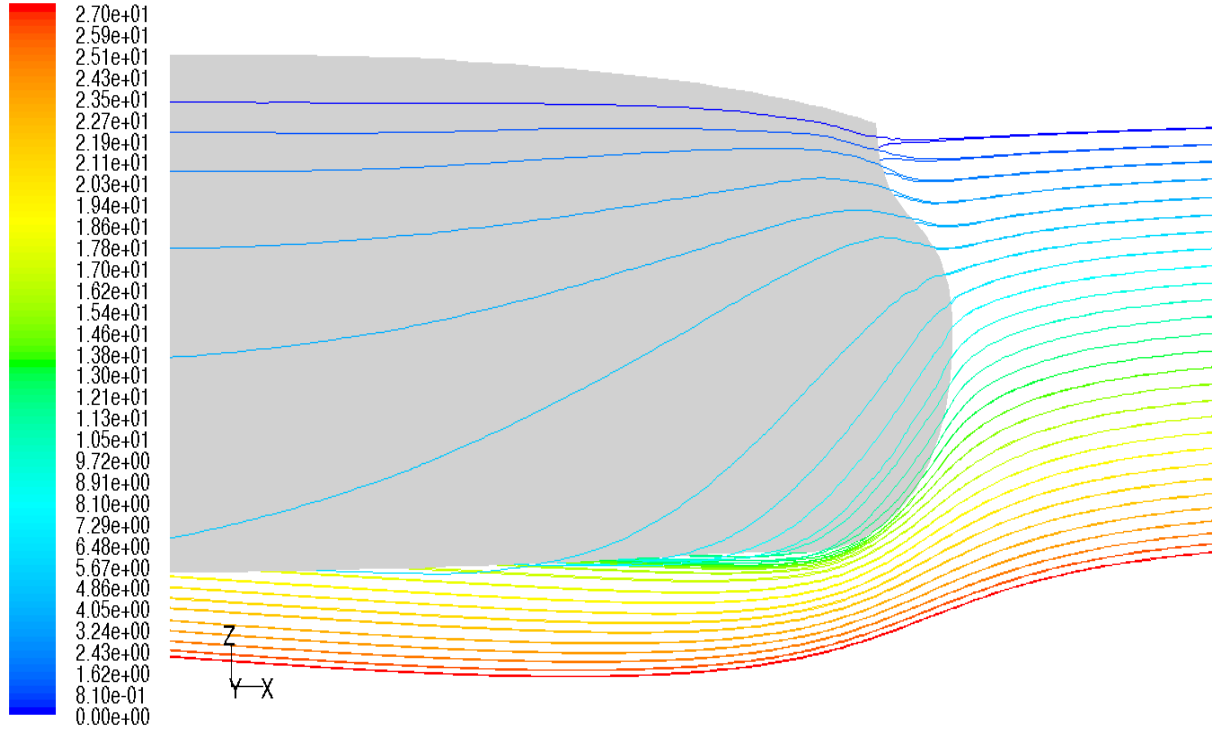
Şekil 4.70, Şekil 4.71, Şekil 4.72 ve Şekil 4.73’de C113 formunun etrafındaki akım hatları gösterilmiştir.



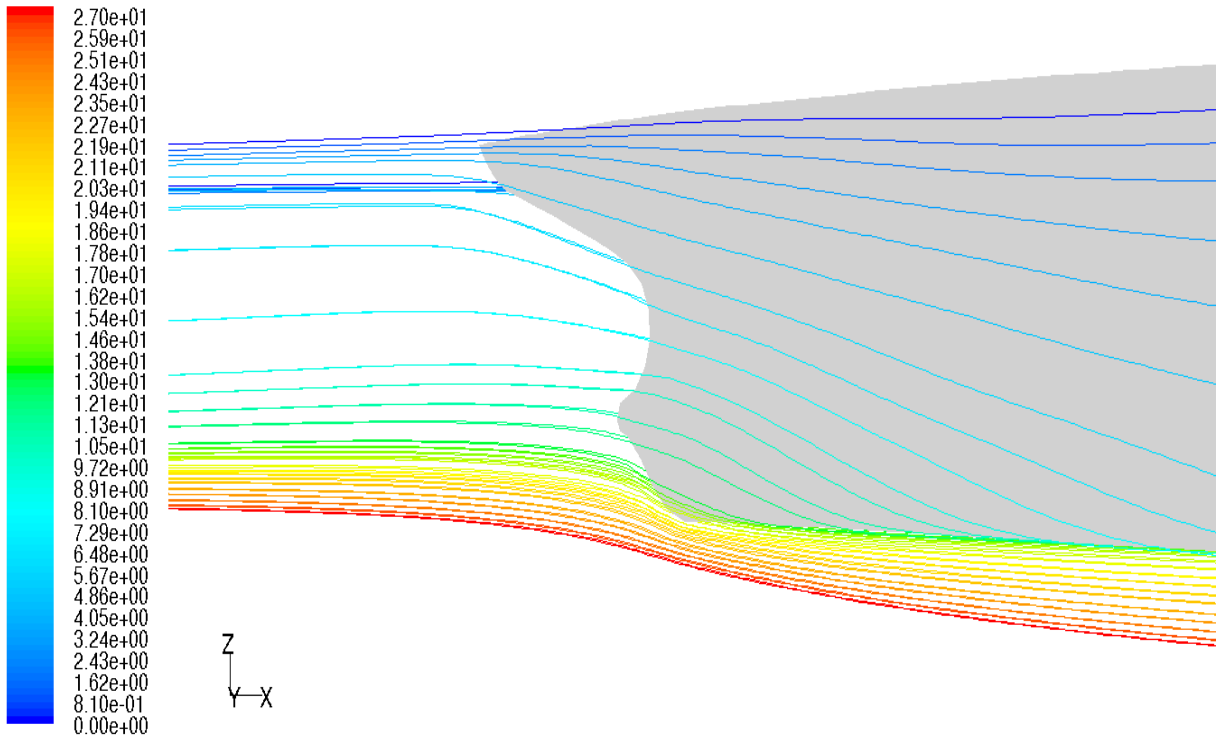
Şekil 4.70 C113 formu CFD analizinde elde edilen tekne yüzeyi etrafındaki akım hatlarının perspektif görünüşü



Şekil 4.71 C113 formu CFD analizinde elde edilen tekne yüzeyi etrafındaki akım hatlarının profil görünüşü



Şekil 4.72 C113 formu CFD analizinde elde edilen tekne yüzeyi baş taraf etrafındaki akım hatlarının profil görünüşü



Şekil 4.73 C113 formu CFD analizinde elde edilen tekne yüzeyi kıç taraf etrafındaki akım hatlarının profil görünüşü



Yukarıda verilen basınç dağılımları, hız vektörleri ve akım hatları şekilleri seçilen her form için verilmiş ve formlar arasındaki farklılıklar gözlenmeye çalışılmıştır. Her form için verilen bu şekiller neredeyse benzerdir. Bunun nedeni ise formların aynı form örnek alınarak oluşturulmuş olmasıdır.

Şekil 4.34, Şekil 4.39 ve Şekil 4.44'te C13, C63 ve C113 formları için verilen basınç dağılım görünüşlerine bakıldığında geminin baş tarafındaki basınç değerinin kıç tarafa ve gemi ortasına göre daha fazla olduğu görülmektedir.

Şekil 4.74, Şekil 4.75 ve Şekil 4.76'da C13, C63 ve C113 formlarının orta simetri düzlemi ile tekne yüzeylerinin kesiştiği çizgide ölçülen basınç değerlerinin tekne boyuna göre dağılımları verilmiştir. Böylece basınç dağılımının tekne boyunca nasıl değiştiği gözlemlenebilmektedir. Gemi baş tarafında fazla olan basınç değeri gemi ortasına doğru azalmaya başlamış fakat kıça doğru ise artmıştır. Ancak kıç dikme civarında ise ani bir düşüş gözlenmektedir.

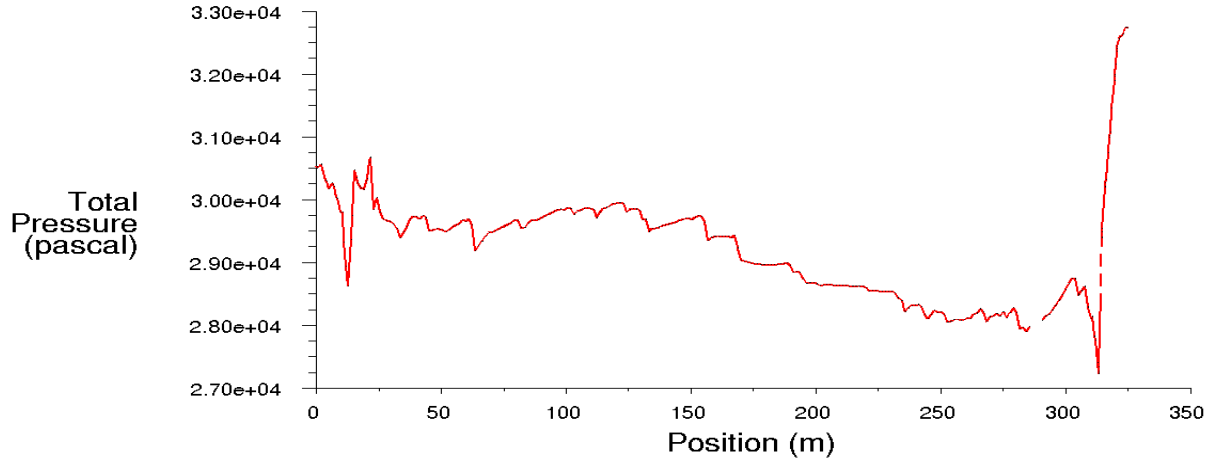
Şekil 4.65, Şekil 4.69 ve Şekil 4.73'te C13, C63 ve C113 formları için verilen akım hatları görünüşlerine bakıldığında gemi kıç tarafında akım hatlarının pervane merkezine doğru düzgün bir şekilde toplandığı görülmektedir.

Basınç dağılımları, hız vektörleri ve akım hatlarının birbirine benzer olmasına rağmen sistematik analiz ve CFD analiz sonuçlarına göre C113 formu direnci en yüksek olan formdur. Çizelge 4.9'dan da görülebileceği üzere seçilen formların su hattı boyu, genişlik ve deplasman hacimleri sabit tutulmuş su çekimi ve blok katsayıları değiştirilmiştir. Böylece su çekimi ve blok katsayısındaki değişimin direnç üzerindeki etkisi gözlenmeye çalışılmıştır. B/T oranı en düşük olan formun direncinin de diğer formlardan daha düşük olduğu görülmüştür.

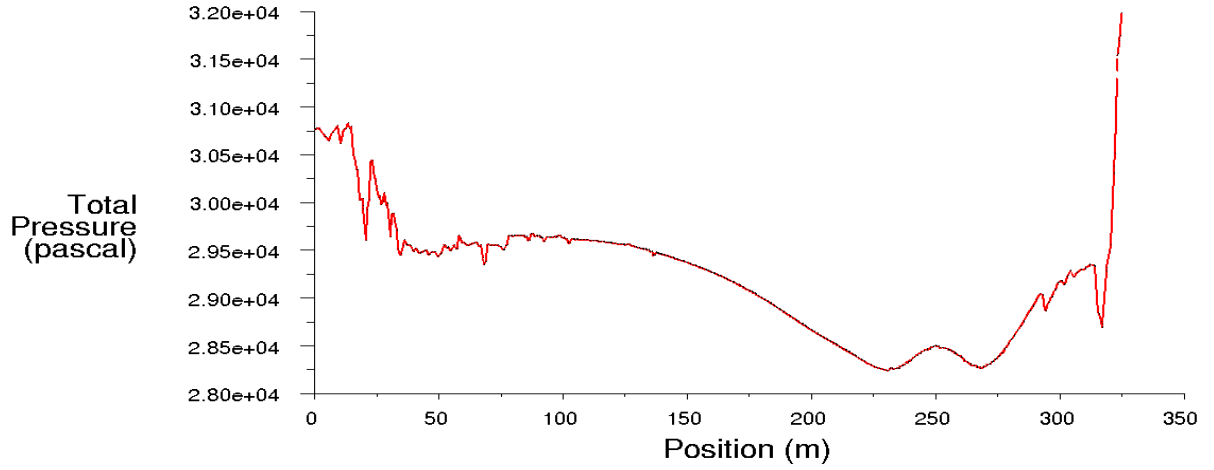
Blok katsayısındaki artışın gemi direncini negatif etkilediği yani blok katsayısındaki artışın dirençte de artışa neden olduğu söylenebilir.

Bir diğer etken de su çekimidir. Dizayn aşamasında istenilen su çekiminin bulunması için çeşitli kriterler mevcuttur. Bu kriterlere örnek olarak geminin çalışacağı limanlardaki su derinliği verilebilir. Bu kriterlere göre seçim yapılırken eğer deplasman hacmi sabit tutulmak isteniyorsa blok katsayısındaki artışın dikkatli bir şekilde incelenmesi ve blok katsayısındaki artışın geminin direncini arttıracacağı da göz önünde bulundurulması gerekmektedir.

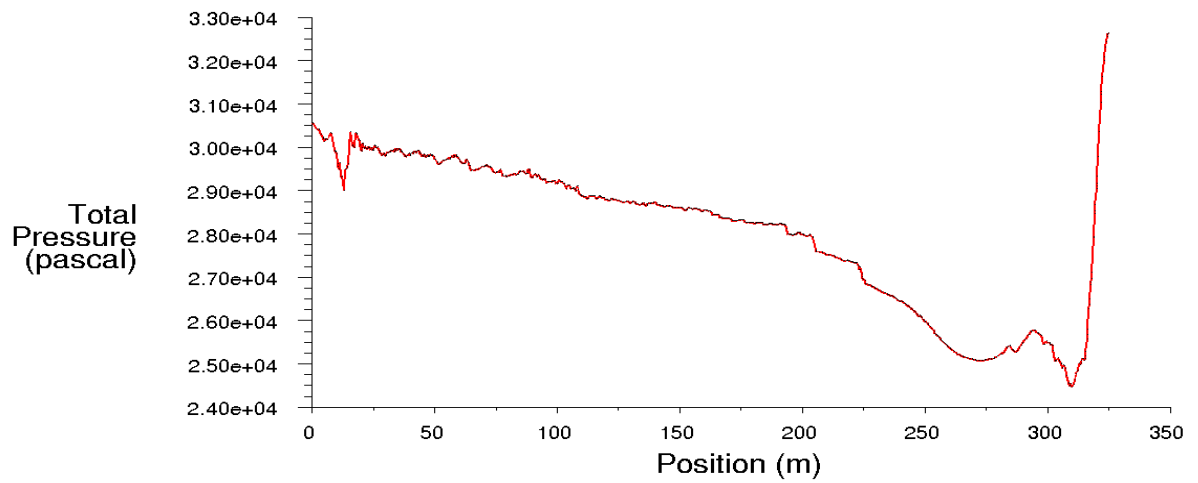
Sonuç olarak dizayn aşamasında çeşitli seçenekleri olan dizayner eldeki tüm verileri kullanarak en verimli ve amacına uygun formu seçmelidir.



Şekil 4.74 C13 formunun orta simetri düzlemi ile tekne yüzeyinin kesiştiği çizgide ölçülen basınç değerlerinin tekne boyuna göre dağılımı



Şekil 4.75 C63 formunun orta simetri düzlemi ile tekne yüzeyinin kesiştiği çizgide ölçülen basınç değerlerinin tekne boyuna göre dağılımı



Şekil 4.76 C113 formunun orta simetri düzlemi ile tekne yüzeyinin kesiştiği çizgide ölçülen basınç değerlerinin tekne boyuna göre dağılımı

## 5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Günümüzde teknolojideki hızlı gelişmeler sonucu mühendislik dallarında bilgisayar programlarının kullanımı yaygınlaşmıştır. Bu gelişmeler sonucu prototip üretimlerine ek olarak bilgisayar simülasyonlarının yapılması kaçınılmaz olmuştur.

Gemi inşaatı mühendisliğinde de bu gelişmelere bağlı olarak birçok ticari simülasyon programları kullanılmaya başlanmıştır. Gemi formu etrafındaki akışın modellenmesinde günümüzde FLUENT ticari yazılımı sıkça kullanılmaktadır.

Bu tez çalışmasında da CFD analizleri için FLUENT ticari yazılımı kullanılmıştır. İlk etapta MAXSURF yazılımında oluşturulan gemi formları GAMBIT programına aktarılmış ve bu programda ağ yapısı oluşturulmaya çalışılmıştır. Daha önce de bahsedildiği gibi CFD analizlerinin en çok zaman ve tecrübe gerektiren kısmı ağ yapısının oluşturulması bölümüdür. Analiz sonuçlarının da ağ yapısının kalitesinden etkilenmesi nedeniyle en yakın çözüme ulaşabilmek için ağ yapısının mümkün olduğunca düzgün olması gerekmektedir. Çeşitli seçenekleri olan kullanıcılar analizi yapılacak problem için en iyi ağ yapısı türünü kullanmalıdır. Bu çalışmada kullanılan yapısal olmayan ağ yapısı yerine yapısal ağ yapısı kullanılarak sonuçlar kontrol edilebilir.

Sistematik analiz ve CFD analizi sonucu elde edilen değerlerin birbirine paralel olduğu görülmüş olup, CFD analizinde dalga direnci hesaplanmadığından elde edilen direnç değerlerinde farklılıklar vardır. Toplam dirence belli oranda yakınsaklık sağlamak için dalga direnci de göz önüne alınarak CFD analizi yapılmalıdır.

Seçilen üç formun da CFD analizi yapılmış ve form olarak en düşük dirence sahip gemi bulunmuştur. Bu tez çalışmasında takip edilen yöntem ön dizayn aşamasında direnç ve ana boyutlara karar verme sürecinde kullanılabilir.

CFD uygulamalarındaki ve ticari yazılımlarındaki gelişmeler takip edilmeli ve gelişmeler ışığında analiz için oluşturulan ağ yapısı ve sınır koşulları amaca uygun seçilerek daha yakınsak direnç değerleri elde edilmelidir.

## KAYNAKLAR

- Abt, C. ve Harries, S., “A New Approach to Integration of CAD and CFD for Naval Architects”, 6th International Conference on Computer Applications and Information Technology in the Maritime Industries (COMPIT2007), Cortona, April 2007.
- AIAA (1988), “AIAA Guide for the Verification and Validation of Computational Fluid Dynamics Simulations”, AIAA G-077-1998.
- Barlas, B., (1999), “Gemi Etrafındaki Sınır Tabakanın İncelenmesi”, Doktora Tezi, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Barlas, B., ve Aldoğan İ.A., (1999), “Gemi Arkasındaki Türbülanslı Akışın Nümerik Hesaplanması” Gemi İnşaatı ve Deniz Teknolojisi Teknik Kongresi 99 – Bildiri Kitabı.
- Baykal, R. ve Dikili, A.C., (2002), Gemilerin Direnci ve Makina Gücü, İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi Matbaası, İstanbul.
- Bertram, V., (1992), “CFD im Schiffbau. Handbuch der Werften”, Hansa, XXI:19
- Bertram, V., (2000), Practical Ship Hydrodynamics, Butterworth-Heinemann, Oxford
- Campana, E.F., Peri, D., Tahara, Y., ve Stern, F., (2004), “Comparison and Validation of CFD Based Local Optimization Methods for Surface Combatant Bow”, 25th Symposium on Naval Hydrodynamics, St. John’s, NL, Canada, 2004:31–46.
- Chen, H.C., Patel, V.C ve Ju, S., (1990), “Solution of Reynolds-Averaged Navier-Stokes Equations for Three-Dimensional Incompressible Flows”, Journal of Computational Physics, 88(2).
- Chisholm, T., ve Zingg W.D., (2004), “Validation of TRANSOM”, Defense R&D Canada – Atlantic.
- Chung, T.J., (1978), Finite Element Analysis in Fluid Dynamics, McGraw-Hill, New York.
- Chung, T.J., (2002), Computational Fluid Dynamics, United Kingdom.
- Courant, R., Friedrichs, K. ve Lewy, H., (1967), “On the Partial Difference Equations of Mathematical Physics”, IBM Journal of Research and Development Archive, March 1967 11(2):32–74.
- Digital Marine Technology, (2005), “Hull Form and Ship Propulsion Project RSD16”, DMT(035).
- Dikili, C., (1999), “Ön Dizayn Aşamasında Gemi Gücünün Belirlenmesi ve Değişik Tip Gemiler İçin Model Deneyleri ile Karşılaştırılması” Gemi İnşaatı ve Deniz Teknolojisi Teknik Kongresi 99 – Bildiri Kitabı.
- Evans, W., Harlow, F.H., (1957), “The Particle-in-cell Method for Hydrodynamic Calculations”, Los Alamos Scientific Laboratory report LA-2139.
- Fisher, E.M. & Rhodes, N., (1996), “Uncertainty in computational fluid dynamics”, Proc. Mech. Eng., Part C: Journal of Mech. Eng. Sci., 210:91-94.
- Fluent User Services Center, Introductory FLUENT Notes, FLUENT v6.0 Jan 2002, www.fluentusers.com.
- Fonfach, J. M. A. ve Soares, G. C., (2010), “Improving The Resistance of a Series 60 Vessel With a CFD Code”, European Conference on Computational Fluid Dynamics ECCOMAS CFD 14–17 June 2010, Lisbon, Portugal.

- Froude, W., "The Fundamental Principles of the Resistance of Ships", Proc. Roy. Inst. Gt. Brit., 8(1875-1878):188-213.
- Godunov, S. K., (1959), "A Difference Method for Numerical Solution of Discontinuous Solution of Hydrodynamic Equations", Math. Sbornik, 47:271-306, translated US Joint Publ. Res. Service, JPRS 7226, 1969.
- Gül, Y., Kaydihan, L., Çehreli, Z.N., Uçar, G. ve Esirgemez, E., (2005), "Gemilerin Hidrodinamik Dizaynında CFD Uygulamaları", Gemi ve Deniz Teknolojisi Dergisi, sayı 163, Ocak 2005.
- Hanninen, S., (2006), "Rans Computations of the Flow Field Around a Ship Advancing at Constant Speed in Still Water", Ship Laboratory, Helsinki University of Technology.
- Heimann, J., (2005), "CFD Based Optimization of the Wave-Making Characteristics of Ship Hulls", Berlin.
- Hino, T., (1999), "Shape Optimization of Practical Ship Hull Forms Using Navier-Stokes Analysis," Proceedings of the 7th International Conference on Numerical Ship Hydrodynamics, 1999.
- Holtrop, J. ve Mennen, G.G.J., (1982), "An Approximate Power Prediction Method", International Shipbuilding Progress, July 1982, 29.
- ITTC, "Report of the Propulsion Committee", In 21st International Towing Tank Conference Proceedings, volume I & II, 1996.
- ITTC, "Report of the Propulsion Committee", In 22nd International Towing Tank Conference Proceedings, volume I & III, 1999.
- ITTC, "Report of the Propulsion Committee", In 23rd International Towing Tank Conference Proceedings, volume I & III, 2002.
- J. T. Oden, (1972), "Finite Elements in Nonlinear Continua", McGraw-Hill, New York, 83.
- Kim, W.J., Van, S.H. ve Kim, D.H., (2001), "Measurement of Flows Around Modern Commercial Ship Models", Experiments in Fluids, 31(2001):567-578.
- Kodama, Y., Takeshi, H., Hinatsu, M., Hino, T., Uto, S., Hirata, N. ve Murashige, S. Ed., (1994) "Proceedings of the CFD Workshop, Tokyo".
- Koechert, C., (2008), "Automatic CFD Optimizing of Hull Forms Using Strategy-Driven Transformation Functions", TUHH, Hamburg/Germany.
- Larsson, L., Stern, F. ve Bertram, V. (2003), "Benchmarking of Computational Fluid Dynamics for Ship Flows: The Gothenburg 2000 Workshop", Journal of Ship Research, March 2003, 47(1):63-81.
- Larsson, L., (1997), "CFD in Ship Design-Prospects and Limitations", Ship Technology Research.
- Larsson, L., Stern, F., ve Bertram, V., (2000), "Proceeding of Gothenburg 2000. A workshop on Numerical Ship Hydrodynamics", Gothenburg, 2000a.
- Larsson, L., Stern, F., ve Bertram, V., (2000), "Summary conclusions and recommendations of the Gothenburg 2000 workshop. Gothenburg 2000: A Workshop on Numerical Ship Hydrodynamics", Chalmers University of Technology, September, Gothenburg, Sweden, 2000b.
- Lax, P.D. ve Wendroff, B., (1960), "Systems of Conservation Laws", Comm. Pure Appl. Math., 13:217-237".

- Lin, C.W., Smith, G.D. ve Fisher, S.C., (1991), "Numerical Viscous Flow Simulation of Wind Tunnel Model-Scaled Experiments", The 2nd Osaka International Colloquium on Viscous Fluid Dynamics in Ship and Ocean Technology.
- Lee, D., (1997), "Multi Objective Design of a Marine Vehicle with Aid of Design Knowledge", International Journal for Numerical Methods in Engineering, 40:2665-2677, (1997).
- Lin, C.W., Percival, S., ve Gotimer, E.H., "Viscous Drag Calculations for Ship Hull Geometry", Naval Surface Warfare Center Carderock Division Bethesda MD Ship Hydromechanics Department, December 1995.
- McDonald, P. W., (1971), "The Computation of Transonic Flow Through Two-Dimensional Gas Turbine Cascades", Paper 71-GT-89, ASME, New York, 1971.
- MacCormack, R. W., (1969), "The Effect of Viscosity in Hypervelocity Impact Catering", AIAA Paper 69-354.
- MacCormack, R.W. ve Paullay, A. J., (1972), "AIAA Paper No. 72-154", Jan. 1972.
- Majumdar, S., Zhu, J. ve Rodi, W., (1990), "Calculation of Three Dimensional Turbulent Flow around Ship Structures", Proc. of 1990 SSPA-CTH-IIHR Workshop on Ship Viscous Flow, Gothenburg.
- Mehdiyev, N. (2009), "Yüksek Süratli Kayıcı Bir Teknenin Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği Yöntemi ile Form Optimizasyonu", Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Turner, M.J., Clough, R.W., Martin, H.C., ve Topp, L.J., (1956), "Stiffness and Deflection Analysis of Complex Structures", Journal of the Aeronautical Sciences, 23(9):805-823.
- Odabaşı, Y., (2007-2008), "Gemi Mühendisliğine Giriş, Gemi Direnci Ders Notları", İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, 1.
- Ok, P., ve Jil, V., (2004), "Numerical Investigation of Scale Effects of Schneekluth's Duct" , aus Busan, Korea.
- Okan, Z.E., (2007), "Düşük ve Orta Hızlı Gemilerin Dalga Direnci Karakteristiğinin Belirlenmesi için Bir Yaklaşım Yöntemi", Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Özdemir, Y.H., (2007), "Gemi Etrafındaki Akışın Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği Yöntemi Kullanılarak İncelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Paterson, E.G., Wilson, R.V. ve Stern, F., (2003), "General-Purpose Paralel Unsteady RANS Ship Hydrodynamics Codes: CFDSHIP-IOWA, IIHR Report no. 432", The University of Iowa, Iowa
- Percival, S., Hendrix, D. ve Noblesse, F., (2001), "Hydrodynamic Optimization of Ship Hull Forms", Applied Ocean Research, 23(2001):337-355.
- Peri, D., Rossetti, M., ve Campana, E.F., (2001), "Design Optimization of Ship Hulls via CFD Techniques", J. Ship Research, 45(2):140-149.
- Proceedings of the CFD Workshop, (2005), Tokyo, Japan, 9-11 March 2005.
- Richardson, L.F., "The Approximate Arithmetical Solution by Finite Differences of Physical Problems Involving Differential Equations with an Application to the Stresses in a Masonry Dam", Transactions of the Royal Society of London, Series A 1910; 210:307-357.

- Rizzi, A. W. ve Voss, J., (1998), "Towards Establishing Credibility in Computational Fluid Dynamics Simulations", *AIAA Journal*, 36(5):668-675.
- Rizzi, A. W. ve Inouye, M., *AIAA*, 11(1973):1478.
- Roache, P.J., (1998), "Verification and Validation in Computational Science and Engineering", Hermosa Publishers, Albuquerque.
- Stern, F., Wilson, R.V., Coleman, H.W., ve Paterson, E.G., "Comprehensive Approach to Verification and Validation of CFD Simulations-Part 1: Methodology and Procedures", *Journal of Fluids Engineering*, 2001, 123:793–802.
- Tahara, Y., Sugimoto, S., Murayama, S., Katsui, T., ve Himeno, Y., (2003), "Development of CAD/CFD/Optimizer-Integrated Hull-Form Design System", *J. Kansai Society of Naval Architects*, 2003, 240:29–36.
- Tahara, Y., Peri, D., Campana, E.F., ve Stern, F., "CFD-Based Multiobjective Optimization of a Surface Combatant", 5th Osaka Colloquium on Advanced Research on Ship Viscous Flow and Hull Form Design by EFD and CFD Approaches, Osaka, Japan, 14–15 March 2005.
- Tahara, Y., Wilson, R., ve Carrica, P., (2005), "Comparison of Free-Surface Capturing and Tracking Approaches in Application to Modern Container Ship and Prognosis for Extension to Self-Propulsion Simulator", *CFD Workshop*, Tokyo, Japan, 9–11 March 2005.
- Thompson J. F., (1996), "A reflection on Grid Generation in the 90s: Trends, Needs and Influences", In 5th International Conference on Numerical Grid Generation in Computational Field Simulations", 1029:1110, Mississippi State University, April 1996.
- Thornhill E., (2004), "CFD Code Evaluation", National Research Council and Institute for Ocean Technology, Canada, June 2004.
- Van, S.H., Kim W.J., Kim, D.H., Yim, G.T., Lee, C.J., ve Eom, J.Y., (1998), "Flow Measurement Around a 300K VLCC Model", *Proceedings, Annual Spring Meeting, SNAK*, Ulsan, Korea, 185–188.
- Van, S.H., Kim, W. J., Yoon, H. S., Lee, Y. Y. I., ve Park, R., "Flow Measurement Around a Model Ship with Propeller and Rudder", Springer, 2006.
- Wen Lin, C., Percival, S., ve Gotimer, E.H., "Viscous Drag Calculations For Ship Hull Geometry", Design Evolution Branch, Hydromechanics Directorate, David Taylor Model Basin, Carderock Division Naval Surface Warfare Center, Bethesda, USA, 1995.
- Wilson, R.V., Stern, F., Coleman, H.W. ve Paterson, E.G., (2001), "Comprehensive Approach to Verification and Validation of CFD Simulations–Part 2: Application for RANS Simulation of a Cargo/Container Ship", *Journal of Fluid Engineering*, 123:803-810.
- WS Atkins Consultants ve NSC üyeleri, "Best Practice Guidelines for Marine Applications of Computational Fluid Dynamics", Technical Report, Sirehna, 2003.
- Xing, T. ve Stern, F., (2007), "Introduction to Computational Fluid Dynamics (CFD)", IIHR Hydroscience & Engineering C. Maxwell Stanley Hydraulics Laboratory, The University of Iowa.
- Zienkiewicz, O.C. ve Cheung, Y.K., (1965), "Finite Elements in the Solution of Field Problems," *The Engineer*, 220:507-510.

**İNTERNET KAYNAKLARI**

[1] <http://www.fluentusers.com>

[2] <http://www.iihr.uiowa.edu/gothenburg2000>

[3] <http://tersane.uskudar.biz/anasayfa.htm>



**EKLER****Ek 1 KVLCC Formu Ofset Tablosu**

Offset (Half Breadth)														
Station		-5.5	-3.2	0	4	8	12	16	24	32	48	64	80	96
Wl.No.	Height [m]													
<b>0</b>	<b>0.000</b>	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.187	0.605	1.339	3.709	7.108	11.371	16.354
<b>0.25</b>	<b>0.250</b>	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.740	1.803	3.103	6.226	9.877	14.191	19.278
<b>0.5</b>	<b>0.500</b>	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.069	2.350	3.831	7.173	10.939	15.376	20.533
<b>1</b>	<b>1.000</b>	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.509	1.584	3.103	4.784	8.403	12.401	17.095	22.252
<b>2</b>	<b>2.000</b>	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.339	2.324	3.986	5.833	9.858	14.371	19.535	24.319
<b>3</b>	<b>3.000</b>	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.816	2.724	4.443	6.394	10.785	15.826	21.306	25.575
<b>4</b>	<b>4.000</b>	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.932	2.820	4.642	6.741	11.596	17.204	22.761	26.495
<b>5</b>	<b>5.000</b>	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.822	2.724	4.700	7.005	12.401	18.556	23.971	27.197
<b>6</b>	<b>6.000</b>	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.577	2.518	4.687	7.244	13.264	19.857	24.982	27.732
<b>7</b>	<b>7.000</b>	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.249	2.254	4.655	7.508	14.217	21.087	25.806	28.131
<b>8</b>	<b>8.000</b>	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.927	2.002	4.662	7.855	15.286	22.220	26.482	28.414
<b>9</b>	<b>9.000</b>	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.708	1.848	4.797	8.396	16.496	23.231	27.023	28.614
<b>10</b>	<b>10.000</b>	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.618	1.854	5.145	9.214	17.803	24.113	27.448	28.755
<b>11</b>	<b>11.000</b>	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.637	2.022	5.763	10.353	19.110	24.892	27.790	28.852
<b>12</b>	<b>12.000</b>	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.792	2.427	6.741	11.796	20.353	25.575	28.066	28.923
<b>13</b>	<b>13.000</b>	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.198	3.252	8.216	13.476	21.480	26.154	28.292	28.968
<b>14</b>	<b>14.000</b>	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	2.170	4.745	10.147	15.228	22.478	26.643	28.472	28.994
<b>15</b>	<b>15.000</b>	0.000	0.000	0.000	0.000	0.934	4.031	6.902	12.234	16.850	23.340	27.049	28.620	29.000
<b>16</b>	<b>16.000</b>	0.000	0.000	0.000	0.000	3.400	6.484	9.252	14.146	18.247	24.068	27.390	28.736	29.000
<b>17</b>	<b>17.000</b>	0.000	0.000	0.000	2.949	6.130	8.924	11.416	15.781	19.406	24.680	27.674	28.820	29.000

<b>Offset (Half Breadth)</b>														
<b>Station</b>		<b>-5.5</b>	<b>-3.2</b>	<b>0</b>	<b>4</b>	<b>8</b>	<b>12</b>	<b>16</b>	<b>24</b>	<b>32</b>	<b>48</b>	<b>64</b>	<b>80</b>	<b>96</b>
<b>Wl.No.</b>	<b>Height [m]</b>													
<b>18</b>	<b>18.000</b>	0.000	0.000	2.621	5.846	8.609	11.049	13.257	17.140	20.391	25.195	27.912	28.891	29.000
<b>19</b>	<b>19.000</b>	0.972	3.116	5.634	8.312	10.669	12.813	14.777	18.280	21.241	25.652	28.111	28.936	29.000
<b>20</b>	<b>20.000</b>	4.217	5.821	7.836	10.109	12.188	14.120	15.917	19.136	21.885	26.019	28.272	28.974	29.000
<b>20.8</b>	<b>20.800</b>	5.891	7.269	9.066	11.139	13.083	14.906	16.605	19.651	22.278	26.251	28.375	28.987	29.000
<b>21</b>	<b>21.000</b>	6.220	7.565	9.317	11.358	13.277	15.073	16.754	19.760	22.362	26.302	28.401	28.987	29.000
<b>22</b>	<b>22.000</b>	7.482	8.699	10.321	12.246	14.069	15.775	17.365	20.211	22.709	26.502	28.491	28.994	29.000
<b>23</b>	<b>23.000</b>	8.248	9.407	10.965	12.826	14.584	16.226	17.752	20.501	22.922	26.631	28.556	29.000	29.000
<b>24</b>	<b>24.000</b>	8.673	9.800	11.319	13.141	14.861	16.464	17.951	20.655	23.038	26.701	28.594	29.000	29.000
<b>25</b>	<b>25.000</b>	8.866	9.974	11.474	13.277	14.970	16.560	18.041	20.733	23.089	26.740	28.614	29.000	29.000
<b>26</b>	<b>26.000</b>	8.911	10.006	11.500	13.290	14.983	16.567	18.054	20.758	23.109	26.746	28.620	29.000	29.000

**ÖZGEÇMİŞ**

Doğum tarihi	29.09.1984	
Doğum yeri	İstanbul	
Lise	1998-2002	Vatan Anadolu Lisesi
Lisans	2002-2006	Yıldız Teknik Üniversitesi, Makine Fakültesi Gemi İnşaatı ve Gemi Makineleri Mühendisliği
Yüksek Lisans	2006-2010	Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Gemi İnş. ve Gemi Mak. Müh. Ana Bilim Dalı

**Çalıştığı kurumlar**

2005-2009	Barbaros Gemi ve Yatçılık Makine İnşaat San. ve Tic. A.Ş.
2010-	Gelibolu Gemi İnşaat Sanayi ve Ticaret A.Ş. (Gelibolu Tersanesi)