

**T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**GEMİ DİRENCİNİN VE HAREKETLERİNİN HESAPLAMALI AKIŞKANLAR
DİNAMİĞİ YÖNTEMİ KULLANILARAK İNCELENMESİ**

YAVUZ HAKAN ÖZDEMİR

**DOKTORA TEZİ
GEMİ İNŞAATI VE GEMİ MAKİNELERİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
GEMİ İNŞAATI VE GEMİ MAKİNELERİ MÜHENDİSLİĞİ PROGRAMI**

**DANIŞMAN
PROF. DR. TAMER YILMAZ**

İSTANBUL, 2014

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**GEMİ DİRENCİNİN VE HAREKETLERİNİN HESAPLAMALI AKIŞKANLAR
DİNAMIĞI YÖNTEMİ KULLANILARAK İNCELENMESİ**

Yavuz Hakan ÖZDEMİR tarafından hazırlanan tez çalışması 25.03.2014 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Gemi İnşaatı ve Gemi Makineleri Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı

Prof. Dr. Tamer YILMAZ
Yıldız Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri

Prof. Dr. Tamer YILMAZ
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Mesut GÜNER
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Fahri ÇELİK
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Ahmet ERGİN
İstanbul Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Barış BARLAS
İstanbul Teknik Üniversitesi

Bu çalışma, Yıldız Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü' nün 2011-10-01-KAP01 numaralı projesi ile desteklenmiştir.

ÖNSÖZ

Bu çalışmada gemi direncinin bileşenleri ve gemi hareketleri hesaplamalı akışkanlar dinamiği yöntemleri kullanılarak incelenmiştir. Geliştirilen analiz sistematiki dizayn aşamasında bulunan teknelerin geometrisinin form kalitesine ve uygunluğuna karar vermek için araştırmacılar tarafından kullanılabilir.

Çalışmalarım sırasında en zor günlerimde yanımda bulunan aileme, yardımlarını ve desteğini esirgemeyen Prof. Dr. Tamer YILMAZ ve Doç. Dr. Barış BARLAS Beylere, lisans ve lisans üstü derslerini takip ettiğim İ.T.Ü ve Y.T.Ü deki Hocalarıma ve Araş. Gör. mesai arkadaşlarıma teşekkür eder saygılarımı sunarım.

Mart, 2014

Yavuz Hakan ÖZDEMİR

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ.....	ix
KISALTMA LİSTESİ.....	xii
ŞEKİL LİSTESİ.....	xiii
ÇİZELGE LİSTESİ	xvi
ÖZET	xviii
ABSTRACT.....	xix
BÖLÜM 1	
GİRİŞ.....	1
1.1 Literatür Özeti	3
1.2 Tezin Amacı	11
1.3 Hipotez	14
BÖLÜM 2	
MATEMATİKSEL MODEL	16
2.1 Gemi Hareket Denklemleri ve Hidrodinamik Katsayılar	16
2.1.1 Giriş	16
2.1.2 Gemi Hareket Denklemleri	16
2.1.3 Newton-Euler Yöntemi ile Gemi Hareket Denklemlerinin Elde Edilmesi .	18
2.1.4 Hidrodinamik Katsayılar	20
2.2 Gemi Hareketlerinin HAD ile Çözümü için Kullanılan Yöntem.....	21
2.3 Karşılaşma Frekansı.....	24
2.4 Akışkanlar Dinamiği Denklemleri	25
2.4.1 Giriş	25

2.4.2	Navier-Stokes Denklemleri	26
2.5	Türbülans Modelleri.....	27
2.5.1	Zaman Ortalamalı Navier-Stokes (RANS) Denklemleri	28
2.5.2	Reynolds-Gerilme Eşitliği	30
2.5.3	Türbülans Kinetik Enerjisi Transport Denklemi	30
2.5.3.1	Eddy-Viskozitesi Kavramı	31
2.5.3.2	Eddy-Difüzyon Kavramı	32
2.5.4	Standart k- ϵ Türbülans Modeli	32
2.5.5	Duvar Fonksiyonu (Wall Function).....	33
2.5.6	Serbest Su Yüzeyi Volume of Fluid (VOF) Modeli	35
2.6	Kullanılan Hesaplamalı Analiz Yöntemi.....	37
2.6.1	Segregated Çözüm Yöntemi.....	38
2.6.2	Sonlu Hacimler Yöntemi	40
2.6.3	Reynolds Transport Teoremi	41
2.6.4	Transport Denklemlerinin Ayrıklaştırılması	41
2.6.5	First Order Upwind Enterpolasyon Yöntemi.....	42
2.6.6	Zamana Bağlı Çözümler	43
2.6.7	Navier-Stokes Denklemlerinin Ayrıklaştırılması.....	44
2.6.8	SIMPLE Çözüm Algoritması	45
2.6.9	RANS Denklemlerinin Ayrıklaştırılması	47
2.6.10	Zaman Adımının Belirlenmesi	47
BÖLÜM 3		
MODEL DENEYLERİ, MODEL DENEYİNDE ve SAYISAL ANALİZLERDE KULLANILAN TEKNE		
MODELLERİ		
3.1	Model Deneyleri	48
3.1.1	FFG Tipi Savaş Gemisi M 367	49
3.1.2	Model İmalatı ve Boyutları	51
3.1.3	Direnç Deneyleri	56
3.1.4	Türbülans Yapıcılar.....	57
3.1.5	İz Ölçümleri ve Pitot Tüpü.....	59
3.2	Wigley Tekne Formu	60
3.3	KCS ve KVLCC2 Tekne Formları	61
BÖLÜM 4		
GEMİ DİRENCİNİN HAD YÖNTEMİ KULLANILARAK İNCELENMESİ		
4.1	Giriş	64
4.1.1	Gemi Direncinin Bileşenleri.....	64
4.2	Gemi Direncini Hesaplama Yöntemleri ve Kullanılan Bilgisayar Sistemi	70

4.2.1	Direnç Hesaplama Yöntemleri	70
4.2.2	Sayısal Hesaplama İçin Kullanılan Bilgisayar Sistemi	71
4.3	M 367 Tekne Modelinin Etrafındaki Serbest Yüzeyle Akışın İncelenmesi ...	72
4.3.1	Giriş	72
4.3.2	M 367 Tekne Modelinin 3 Boyutlu CAD Geometrisinin Hazırlanması	73
4.3.3	Hesaplama Hacminin Oluşturulması	74
4.3.4	Ağ Yapısının Oluşturulması	76
4.3.5	Sınır Şartlarının Tanımlanması	79
4.3.6	M 367 Tekne Direncinin HAD Yöntemleri Kullanılarak İncelenmesi	81
4.3.6.1	Ağ Yapısına Olan Bağımlılığın İncelenmesi ve Hata Analizi	82
4.3.6.2	Farklı Froude Sayılarında M 367 Takıntısız Tekne Modelinin Direncinin Deneysel ve HAD Yöntemleri Kullanılarak İncelenmesi	89
4.3.6.3	Sonuçların Değerlendirilmesi	99
4.3.7	Takıntıların Direnç Üzerine Olan etkisinin İncelenmesi	101
4.3.7.1	CAD Geometrisinin Oluşturulması	101
4.3.7.2	Hesaplama Hacminin ve Ağ Yapısının Oluşturulması	102
4.3.7.3	Sınır Şartlarının Tanımlanması	105
4.3.7.4	Farklı Froude Sayılarında M 367 Takıntılı Tekne Modelinin Direncinin Deneysel ve HAD Yöntemleri Kullanılarak İncelenmesi	105
4.3.7.5	Sonuçların Değerlendirilmesi	111
4.3.8	M 367 Tekne Form Faktörünün ve Dalga Direnç Katsayısının İncelenmesi	112
4.3.8.1	Giriş	112
4.3.8.2	Prohaska Yöntemi Kullanılarak Tekne Form Faktörünün İncelenmesi	112
4.3.8.3	Çift Gövde Yaklaşımı Kullanılarak Tekne Form Faktörünün İncelenmesi	117
4.3.8.4	Dalga Direnç Katsayısının Tespit Edilmesi	123
4.3.8.5	Sonuçların Değerlendirilmesi	124
4.4	KCS, Wigley Tekne Formları Etrafındaki Serbest Yüzeyle Akışın İncelenmesi	127
4.4.1	Giriş	127
4.4.2	Wigley Tekne Formu Etrafındaki Akışın İncelenmesi	127
4.4.3	KCS Tekne Formu Etrafındaki Akışın İncelenmesi	129
4.4.4	Sonuçların Değerlendirilmesi	131
4.5	Sonuçların Değerlendirilmesi	132
BÖLÜM 5		
GEMİ HAREKETLERİNİN HAD YÖNTEMİ KULLANILARAK İNCELENMESİ		134
5.1	Giriş	134
5.2	KVLCC2 Tekne Formunun Baştan Gelen Düzenli Dalgalarda Baş-Kıç Vurma ve Dalıp-Çıkma Bileşik Hareketinin İncelenmesi	135

5.2.1 Hesaplama Hacminin Oluşturulması.....	135
5.2.2 Ağ Yapısının Oluşturulması ve Sınır şartlarının Tanımlanması	136
5.2.3 Analizlerin Gerçekleştirilmesi ve Test şartları	138
5.2.4 Frekans Analizlerinin Gerçekleştirilmesi	145
5.2.5 Ek Dalga Direncinin Hesaplanması.....	148
5.2.6 Sonuçların Değerlendirilmesi.....	152
BÖLÜM 6	
SONUÇ VE ÖNERİLER	154
KAYNAKLAR	157
ÖZGEçMİş	164

SİMGE LİSTESİ

m	Tekne kütlesi
f	Tekne üzerine etkiyen kuvvet
V	Tekne hızı
t	Zaman
M	Tekne atalet tensörü
n	Tekne üzerine gelen toplam moment
ω_T	Teknenin açısal hızı
x	Teknenin ilerleme modundaki konumu
y	Teknenin yan öteleme modundaki konumu
z	Teknenin dalıp-çıkma modundaki konumu
u	Teknenin ilerleme modundaki hız bileşeni
v	Teknenin yan öteleme modundaki hız bileşeni
w	Teknenin dalıp-çıkma modundaki hız bileşeni
ϕ	Teknenin yalpa modundaki konumu
θ	Teknenin baş-kıç vurma modundaki konumu
ψ	Teknenin savrulma modundaki konumu
p	Teknenin yalpa modundaki hız bileşeni
q	Teknenin baş-kıç vurma modundaki hız bileşeni
r	Teknenin savrulma modundaki hız bileşeni
F_p	Basınç kuvveti
M_p	Basınç momenti
F_τ	Tekne yüzeyinde meydana gelen sürtünme kaynaklı kuvvet
M_τ	Tekne yüzeyinde meydana gelen sürtünme kaynaklı moment
F_g	Yerçekimi etkisiyle meydana gelen kuvvet
g	Yer çekimi ivmesi
λ	Dalga boyu
T	Dalga periyodu
c	Dalga hızı
ζ	Dalga genliği
H	Dalga yüksekliği
k_ω	Dalga sayısı
ω_e	Karşılaşma frekansı
u_i	Akışkanın hız alanı

t_{ij}	Gerilme tensörü
μ	Moleküler viskozite
s_{ij}	Birim deformasyon
P	Basınç
U_i	Ortalama hız
$u'_i(x, t)$	Hızın çalkantı bileşeni
$-\overline{u'_i u'_j}$	Reynolds gerilme tensörü
k	Türbülans kinetik enerjisi
T'	Türbülans şiddeti
$\mathcal{N}(u_i)$	Navier-Stokes operatörü
ε	Viskoz kayıp
ν_T	Türbülans viskozitesi
σ_k	Türbülans Prandtl (Schmidt) sayısı
τ_w	Kayma gerilmesi
Rn	Reynold sayısı
Rn_s	Geminin Reynold sayısı
Rn_m	Modelin Reynold sayısı
α	Akışkan fazların bulunma oranları
ρ_{eff}	Efektif yoğunluk
ν_{eff}	Efektif viskozite
Φ	Skaler değişken
Γ	Difüzyon katsayısı
S_ϕ	Hesaplama hacmindeki Φ kaynağı
$\vec{v}$	Akış içerisinde oluşan hız vektörü
N_{yuzey}	Hücreyi çevreleyen yüzey sayısı
ϕ_f	f yüzeyinden konveksiyonla taşınan ϕ
A_f	Yüzey alanı
Pe	Peclet sayısı
μ_t	Türbülans viskozitesi
N_{CFL}	CFL sayısı
2D	2 Boyut
3D	3 Boyut
L_{BP}	Dikeyler arası boy
L_{WL}	Su hattı boyu
L_{WS}	Islak boy
B	Tekne genişliği (maks)
T	Su çekimi mastori
T_A	Su çekimi baş pik
T_F	Su çekimi kış pik
D	Tekne yüksekliği
∇	Deplasman hacmi
Δ	Deplasman
A_{WS}	Islak yüzey alanı
A_R	Toplam dümen alanı
A_A	Toplam takıntı alanı
A_T	Kış ayna alanı

C_B	Blok katsayısı
C_P	Prizmatik katsayısı
C_M	Orta kesit alan katsayısı
C_{WP}	Su hattı alan katsayısı
LCB	Hacim merkezinin boyuna yeri
LCF	Yüzme merkezinin boyuna yeri
V_S	Geminin Servis hızı
T_s	Ortam sıcaklığı
V_x	Eksenel hız
V_t	Teğetsel hız
V_r	Radyal hız
KG	Tekne ağırlık merkezinin düşey konumu
LCG	Tekne ağırlık merkezinin boyuna konumu
k_{xx}	Yalpa jirasyon yarı çapı
k_{yy}	Baş-kıç vurma jirasyon yarı çapı
k_{zz}	Yan öteleme jirasyon yarı çapı
R_T	Toplam tekne direnci
D	Deneylerden elde edilen toplam tekne direnci
f_{Tam}	Tam çözüm
$f_{Yaklaşık}$	Yaklaşık çözüm
$H(h)$	Ağ yapısından kaynaklanan hata değeri
h	Ağ yapısının boyutuyla ilgili parametre
P	Seriye açılan terim sayısı
δ_{REG}^*	Ağ yapısı üzerinde meydana gelen hata değeri
U_G	HAD analizinden kaynaklanan belirsizlik değeri
R_{TC}	Tekne toplam direncine ait tam değer
R_W	Dalga direnci
R_F	Sürtünme direnci
R_{VP}	Viskoz basınç direnci
k_f	Tekne form faktörü
C_{Ts}	Geminin toplam direnç katsayısı
C_{Fs}	Geminin sürtünme direnç katsayısı
C_{Ws}	Geminin dalga direnç katsayısı
C_{Tm}	Modelin toplam direnç katsayısı
C_{Fm}	Modelin sürtünme direnç katsayısı
C_{Wm}	Modelin dalga direnç katsayısı
ΔC_F	Yüzey pürüzlülüğünden kaynaklanan ek sürtünme direnç katsayısı
C_{AA}	Tekne etrafında meydana gelen hava kaynaklı direnç katsayısı
$x(n)$	Ayrık zamanlı sinyal
X_k	Ayrık zamanlı sinyalin Fourier dönüşümü
N	Örnek sayısı (sinyal sayısı)
C_{aw}	Dalgalardan kaynaklanan ek direnç katsayısı
$\overline{R_{aw}}$	Dalgalı sudaki ortalama direnç
R_{calm}	Sakin suda meydana gelen toplam direnç
R_T	Sakin suda meydana gelen toplam direnç

KISALTMA LİSTESİ

BAP	Bilimsel Araştırmaları Destekleme Projesi
BEM	Sınır Elemanları Yöntemi
CAD	Bilgisayar Destekli Dizayn
CFL	Courant-Frederich-Lewis Sayısı
DNS	Direkt-Benzeşim
DTMB	David Taylor Model Basin
FDM	Sonlu Farklar Yöntemi
FEM	Sonlu Elemanlar Yöntemi
FFG	Guided Missile Frigate
FFL	Light Frigate
FVM	Sonlu Hacimler Yöntemi
HAD	Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği
ITTC	International Towing Tank Test Conference
KCS	Kriso Container Ship
LES	Büyük-Eddy Benzeşimi
M	Milyon
M 367	Model 367
RANSE	Zaman Ortalamalı Navier-Stokes Denklemleri
SIMPLE	Basınç Bağlantılı Denklemler İçin Yarı Kapalı Yöntem
SPH	Smooth Particle Hydrodynamic
VOF	Volume of Fluid Serbest Su Yüzeyi Modeli

ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 1. 1 Güverte ıslanması	7
Şekil 2. 1 Koordinat sistemi ve altı serbestlik dereceli gemi hareketleri	18
Şekil 2. 2 Yere sabitlenmiş referans koordinat sistemi (XYZ) ve gövdeye sabitlenmiş koordinat sistemi ($X_0Y_0Z_0$).....	19
Şekil 2. 3 Gemi hareketlerinin HAD ile çözümü için kullanılan yöntem	22
Şekil 2. 4 Hesaplama hacminin t^n ve t^{n+1} anlarında konumu	22
Şekil 2. 5 Sinusoidal dalga formu	23
Şekil 2. 6 Dalga konvansiyonu	25
Şekil 2. 7 Türbülans modelleri	28
Şekil 2. 8 Türbülanslı sınır tabaka içerisinde meydana gelen hız profili	34
Şekil 2. 9 Kontrol hacimleri üzerinde meydana gelen faz dağılımları	37
Şekil 2. 10 Segregated çözüm yönteminin şematik gösterimi	40
Şekil 2. 11 ϕ değerinin değişik Peclet sayıları için $x=0$ ve $x=L$ arasındaki değişimi.....	43
Şekil 2. 12 Kaydırılmış ağ yapısı.....	45
Şekil 3. 1 M 367 modelinin baş posta kesitleri.....	50
Şekil 3. 2 M 367 modelinin kıç posta kesitleri.....	50
Şekil 3. 3 M 367 modelinin su hatları resmi.....	51
Şekil 3. 4 M 367 modelinin profil resmi	51
Şekil 3. 5 M 367 tekne modelinin ön imalat resmi	53
Şekil 3. 6 M 367 takıntısız modelin genel resmi.....	54
Şekil 3. 7 M 367 takıntısız modelin baş ve kıç resimleri.....	54
Şekil 3. 8 M 367 takıntılı tekne modeli.....	55
Şekil 3. 9 Deney tankının şematik ve genel görünümü	56
Şekil 3. 10 Deney arabası ve model	57
Şekil 3. 11 Tekne başına ve dümen üzerine yerleştirilen türbülans yapıcılar	58
Şekil 3. 12 İz ölçümü ve pitot tüpü.....	60
Şekil 3. 13 Wigley tekne formu ve üç boyutlu CAD geometrisi	61
Şekil 3. 14 KCS tekne formunun üç boyutlu CAD geometrisi.....	62
Şekil 3. 15 KVLCC2 tekne formunun üç boyutlu CAD geometrisi	62
Şekil 4. 1 Gemi direncini hesaplamak amacıyla kullanılan yöntemler	70
Şekil 4. 2 Form tasarımında kullanılan yöntemlerin iş akışı	71
Şekil 4. 3 Sayısal analizler de kullanılan bilgisayar sistemi	72
Şekil 4. 4 M 367 takıntısız tekne CAD modelin genel resmi.....	74
Şekil 4. 5 Serbest su yüzeyli analiz için oluşturulan hesaplama hacmi	75

Şekil 4. 6	M 367 takıntısız direnç analizi için hazırlanan ağ yapısı (Seyrek)	77
Şekil 4. 7	M 367 takıntısız analiz için oluşturulan blok yapıları	78
Şekil 4. 8	Analiz için tanımlanan sınır şartları	80
Şekil 4. 9	$Fn=0.201$ M 367 takıntısız analiz için elde edilen yakınsama grafiği (Seyrek)	83
Şekil 4. 10	Seyrek, Az yoğun, Yoğun ve Çok yoğun ağ yapılarında gerçekleştirilen analiz sonucunda M 367 modelinin zamana bağlı olarak gelişen direnç değerleri ($Fn=0.201$)	85
Şekil 4. 11	Seyrek, Az yoğun, Yoğun ve Çok yoğun ağ yapılarında gerçekleştirilen analiz sonucunda M 367 üzerinde meydana gelen y^+ değerleri ($Fn=0.201$)	86
Şekil 4. 12	Farklı Fn sayılarında HAD'den elde edilen toplam direnç değerleri (Takıntısız Model)	90
Şekil 4. 13	M 367 tekne modelinin farklı Fn sayılarında HAD analizlerinden ve deneylerden elde edilen toplam direnç değerleri (Takıntısız Model)	90
Şekil 4. 14	M 367 tekne modelinin farklı Fn sayılarında meydana gelen y^+ değerleri (Takıntısız Model)	92
Şekil 4. 15	Deney ve HAD analizi baş dalga deformasyonları ($Fn=0.264$)	93
Şekil 4. 16	Deney ve HAD analizi kıç dalga deformasyonları ($Fn=0.264$)	94
Şekil 4. 17	Analizlerden elde edilen baş dalga sistemlerinin perspektif görünüşü	95
Şekil 4. 18	Analizlerden elde edilen kıç dalga sistemlerinin perspektif görünüşü	96
Şekil 4. 19	Analizlerden elde edilen genel dalga sistemlerinin üstten görünüşü	97
Şekil 4. 20	Model üzerinde ve $Y=0$ (Simetri) düzlemi boyunca meydana gelen dalga deformasyonları	98
Şekil 4. 21	Tekne modeli boyunca sınır tabakanın değişimi ($Fn=0.264$)	98
Şekil 4. 22	M 367 Takıntısız durum için tekne arkasında elde edilen eksenel iz değerleri ($Fn=0.411$)	99
Şekil 4. 23	M 367 takıntılı tekne CAD modeli	101
Şekil 4. 24	M 367 Takıntılı direnç analizi için hazırlanan ağ yapısı (Yoğun)	103
Şekil 4. 25	M 367 Takıntılı analiz için oluşturulan ağ yapısı, tekne etrafında ve su hattı düzleminde oluşturulan bloklar (Yoğun)	104
Şekil 4. 26	M 367 tekne modelinin farklı Fn sayılarında HAD analizlerinden ve deneylerden elde edilen toplam direnç değerleri (Takıntılı Model)	106
Şekil 4. 27	M 367 tekne modeli için farklı Fn sayılarında HAD analizlerinden ve deneylerden elde edilen ek takıntı direnci	106
Şekil 4. 28	M 367 tekne modelinin farklı Fn sayılarında meydana gelen y^+ değerleri (Takıntılı Model)	108
Şekil 4. 29	Deney ve HAD analizleri sonucunda pervane düzleminde elde edilen eksenel iz dağılımı ($Fn=0.411$)	109
Şekil 4. 30	İz bölgesinde meydana gelen akım çizgileri	110
Şekil 4. 31	M 367 tekne modelinin deneyden ve sayısal çözümden elde edilen dalga deformasyonu ($Fn=0.201$)	115
Şekil 4. 32	M 367 tekne modelinin Prohaska yöntemine göre deneysel çalışmadan elde edilen form faktörü	116
Şekil 4. 33	M 367 tekne modelinin Prohaska yöntemine göre analizlerden elde edilen form faktörü	116

Şekil 4. 34	Çift-model yaklaşımı için oluşturulan hesaplama hacmi ve ağ yapısı (Çok Yoğun)	118
Şekil 4. 35	Çift model yaklaşımı için kullanılan ağ yapıları	119
Şekil 4. 36	Çift-model analizleri sonucunda farklı Reynolds sayılarının tekne gövdesi üzerinde meydana gelen y^+ değerleri	121
Şekil 4. 37	M 367 tekne modelinin deney ve HAD analizlerinden elde edilen dalga direnç katsayısı.....	123
Şekil 4. 38	Hesaplama hacmi, hesaplama hacmi boyutları ve Wigley tekne formu üzerinde kullanılan ağ yapısı	128
Şekil 4. 39	Farklı Fn 'lerde Wigley tekne formu etrafında meydana gelen dalga deformasyonları	129
Şekil 4. 40	KCS tekne formu etrafında meydana gelen dalga deformasyonlarının tekne başından ve kıçından görünümü ($Fn=0.26$)	130
Şekil 4. 41	KCS tekne formu etrafında ve tekne baş, kıç bölgesinde meydana gelen dalga deformasyonlarının deneysel veriler ile karşılaştırılması ($Fn=0.26$)	131
Şekil 5. 1	Deney ve HAD analizlerinde kullanılan koordinat sistemi	135
Şekil 5. 2	Hesaplama hacmi ve KVLCC2 tekne formu üzerinde oluşturulan ağ yapısı.....	136
Şekil 5. 3	KVLCC2 hareket analizi için oluşturulan hesaplama hacmi ve sınır şartları	138
Şekil 5. 4	KVLCC2 tekne formunun dalıp-çıkma ve baş-kıç vurma bileşik hareketinin zamana bağlı değişimi	140
Şekil 5. 5	KVLCC2 tekne formunun hareketinin bir periyodu içerisinde meydana gelen dalga yüksekliklerinin değişiminin tekne başından perspektif görünüşü ($Fn=0.142$)	141
Şekil 5. 6	KVLCC2 tekne formunun hareketinin bir periyodu içerisinde meydana gelen dalga yüksekliklerinin değişiminin tekne kıçından perspektif görünüşü ($Fn=0.142$)	142
Şekil 5. 7	KVLCC2 tekne formunun hareketinin bir periyodu içerisinde meydana gelen dalga yüksekliklerinin değişiminin kıçtan ve yandan görünüşü ($Fn=0.142$)	143
Şekil 5. 8	KVLCC2 tekne formunun hareketinin bir periyodu içerisinde meydana gelen y^+ değerleri ($Fn=0.142$)	144
Şekil 5. 9	KVLCC2 formu için HAD analizlerinden elde edilen Dalıp-Çıkma ve Baş-Kıç vurma hareketine ait frekans cevapları ($Fn=0.142$)	147
Şekil 5. 10	Ek direnç grafiği	148
Şekil 5. 11	KVLCC2 tekne formu etrafında meydana gelen dalga deformasyonu ($Fn=0.142$)	149
Şekil 5. 12	KVLCC2 sakin ve dalgalı suda meydana gelen direnç değişimi ($Fn=0.142$)	150
Şekil 5. 13	KVLCC2 dalgalı suda meydana gelen direnç değişiminin frekans cevabı ...	151

ÇİZELGE LİSTESİ

	Sayfa
Çizelge 1. 1 Gemi hidrodinamiğin de hesaplamalı akışkanlar dinamiği metodları	5
Çizelge 2. 1 Gemi hareket notasyonları	17
Çizelge 3. 1 FFG gemisine ait ana ve model boyutları	52
Çizelge 3. 2 Takıntılar	53
Çizelge 3. 3 Deneysel çalışma ve HAD analizleri için ortam şartları	57
Çizelge 3. 4 Wigley teknesine ait model boyutları	61
Çizelge 3. 5 KVLCC2 ve KCS teknelerinin ana gemi ve model boyutları	63
Çizelge 4. 1 M 367 takıntısız model formunun HAD ile direnç analizi için oluşturulan ağ yapıları	79
Çizelge 4. 2 Farklı ağ yapılarında tekne üzerinde meydana gelen ortalama y^+ değerleri ($Fn=0.201$)	84
Çizelge 4. 3 Analizlerden ve deneyden elde edilen toplam direnç değeri ve analiz süreleri ($Fn=0.201$)	85
Çizelge 4. 4 Birinci durum için elde edilen hata ve belirsizlik değerleri ($Fn=0.201$)	88
Çizelge 4. 5 İkinci durum için elde edilen hata ve belirsizlik değerleri ($Fn=0.201$)	89
Çizelge 4. 6 M 367 tekne modelinin farklı Fn sayılarında HAD analizlerinden ve deneylerden elde edilen toplam direnç değerleri (Takıntısız model)	91
Çizelge 4. 7 HAD ile takıntılı tekne formunun direnç analizi için oluşturulan ağ yapıları (Yoğun)	102
Çizelge 4. 8 M 367 tekne modelinin farklı Fn sayılarında HAD analizlerinden ve deneylerden elde edilen toplam direnç değerleri (Takıntılı model)	105
Çizelge 4. 9 M 367 tekne modeli için farklı Fn sayılarında HAD analizlerinden ve deneylerden elde edilen ek takıntı direnci	107
Çizelge 4. 10 Prohaska yöntemine göre form faktörünün eldesi için hazırlanan değerler	114
Çizelge 4. 11 Prohaska yöntemine göre deney ve HAD analizlerinden elde edilen form faktörleri	115
Çizelge 4. 12 Çift model yaklaşımı kullanılarak elde edilen analiz sonuçları	120
Çizelge 4. 13 Çift model yaklaşımı kullanılarak elde edilen k form faktörü katsayıları	122
Çizelge 4. 14 M 367 tekne modelinin deney ve HAD analizlerinden elde edilen dalga direnç katsayısı	124
Çizelge 4. 15 Wigley tekne formu için deney ve HAD sonucu	127
Çizelge 4. 16 KCS tekne formu için deney ve HAD sonucu ($Fn=0.26$)	130
Çizelge 5. 1 HAD ile hareket analizi için oluşturulan ağ yapıları	137

Çizelge 5. 2	KVLCC2 HAD analizleri için kullanılan test şartları	139
Çizelge 5. 3	KVLCC2 deney ve HAD frekans analizi sonuçları	146
Çizelge 5. 4	Ek direnç için analizlerden elde edilen değerler	152

GEMİ DİRENCİNİN VE HAREKETLERİNİN HESAPLAMALI AKIŞKANLAR DİNAMİĞİ YÖNTEMİ KULLANILARAK İNCELENMESİ

Yavuz Hakan ÖZDEMİR

Gemi İnşaatı ve Gemi Makineleri Mühendisliği Anabilim Dalı

Doktora Tezi

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Tamer YILMAZ

Bu çalışmada deneysel ve HAD ile gemi direnci ve hareketleri incelenmiştir. İ.T.Ü Ata Nutku Gemi Model ve Deney Laboratuvarı'nda direnç deneyleri gerçekleştirilmiş ve sonuçlar HAD sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Gemi hareketlerinin HAD ile modellenmesi için literatürde deneysel sonuçları bulunan KVLCC2 tekne formu kullanılmış ve HAD analizlerinin doğruluğunun test edilebilmesi için ihtiyaç duyulan deneysel veriler literatürden tespit edilmiştir. Dalgalar içerisinde tekne direncinin değişimi ve ek dalga direnci de çalışmaya dahil edilmiştir.

RANS denklemleri sonlu hacimler metodu kullanılarak ayrıklaştırılmıştır. Türbülans viskozitesi için standard k- ϵ türbülans modeli kullanılmıştır. Serbest su yüzeyi VOF (Volume of Fluid) modeli kullanılarak incelenmiştir. HAD analizleri STAR CCM+ paket programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Hesaplamalı akışkanlar dinamiği, gemi direnci, gemi hareketleri, model deneyi, türbülans

**INVESTIGATION OF THE SHIP RESISTANCE AND MOTIONS USING
COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS**

Yavuz Hakan ÖZDEMİR

Department of Naval Architecture and Marine Engineering

Phd. Thesis

Adviser: Prof. Dr. Tamer YILMAZ

In this study ship resistance and ship motions are investigated by using experiments and computational fluid dynamics. Model resistance experiments are performed at Istanbul Technical University Towing Tank basin. The total resistance of the ship model is compared with the experimental results. For the investigation of ship motions KVLCC2 model is used. The ship resistance components in waves are also analyzed to study the viscous effects on the added resistance coefficient.

The Reynolds Averaged Navier Stokes (RANS) equations and the nonlinear free surface boundary conditions are discretized by means of an overset grid finite volume scheme. In the numerical turbulent flow calculations, the relationship between the Boussinesq's hypothesis of turbulence viscosity and the velocities are obtained through the standard k- ϵ turbulence model. Simulations of turbulent free surface flows around the model are performed by using Star CCM+ solver and Volume of Fluid (VOF) model to capture the free surface between air and water.

Keywords: Computational fluid dynamics, ship resistance, ship motions, model experiment, turbulence

**YILDIZ TECHNICAL UNIVERSITY
GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES**

GİRİŞ

Bilgisayar teknolojisindeki gelişmeye bağlı olarak son yıllarda Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği teknikleri dikkate değer bir ilerleme göstermiştir. Kişisel bilgisayarların kullanımının yaygınlaşması ve geliştirilen yazılımlar sayesinde günümüzde HAD analizleri birçok mühendislik problemine başarıyla uygulanmaktadır. Genel olarak dizayn yöntemleri model deneylerini kullanmaktadır. Model deneyleri zaman alıcı ve pahalı yöntemlerdir bunun yanında kullanılan ölçme sistemlerinin kalibrasyon eksikliği veya hatası, ölçek faktörü model deneylerinin en büyük dezavantajıdır. Mevcut durum model deneylerine yardımcı yöntemlerin kullanılmasını zorunlu kılmaktadır.

HAD teknikleri deneysel yöntemlere yardımcı olarak geliştirilmiş olup bu yöntemin model deneylerine göre çeşitli avantajları bulunmaktadır ve aşağıda liste halinde verilmiştir:

- HAD ile gerçekleştirilen çözümler kolaylıkla tekrarlanabilir,
- Model deneylerinde engel olarak karşımıza çıkan ölçek etkisi ortadan kalkar,
- Akış alanının tamamında tüm skaler ve vektörel büyüklüklere ait özellikler kolayca elde edilebilir,
- Modelleme aşamasında alternatif tasarımların karşılaştırılmasını ve uygun olan modelin seçilmesini sağlar.

HAD yöntemlerinin yukarıda sıralanan bu avantajlarının yanında eksiklikleri bulunmaktadır ve bunlardan bazıları şunlardır:

- Akışı yöneten temel denklemleri programlamak zordur,

- Viskoz çözümler gerçekleştirilirken kullanılan türbülans modelleri yaklaşık çözüm yöntemleridir,
- Zamana bağlı çözümler uzun sürmektedir,
- Ticari yazılımlar ve kullanılacak olan bilgisayar sistemlerinin ilk yatırım maliyeti yüksektir,
- Analiz edilecek cisimlerin 3 boyutlu CAD tasarımlarının çizimi ve akış alanında oluşturulan ağ yapılarının hazırlanması yoğun çalışma gerektirmektedir,
- Doğru kullanılamaması durumunda elde edilen sonuçlar tasarımcıyı yanıltacaktır.

Bu sebeplerden dolayı HAD yöntemleri deneysel çalışmalar ile birlikte kullanılmalı ve uygun çözüm deneysel verilerin yardımıyla elde edilmelidir.

Tekne formlarının direnç ve hidrodinamik karakteristiklerinin dizayn aşamasında tespit edilebilmesi tasarım aşamasındayken tekne formunun iyileştirilebilmesi ve amaca uygun formun oluşturulabilmesi açısından önem taşır. Dizayn aşamasında tekne direncinin tespit edilebilmesi amacıyla mevcut tekne formu model deneyine tabi tutularak direnç değeri ve dalga deformasyonları gözlemlenir. Tekne formunda yapılacak olan düzeltmeler deneysel olarak gözlemlenir ve yeni modellerin üretilmesi ile deneyler tekrarlanarak deneme-yanılma yoluyla uygun formun elde edilmesi tek bir proje için amaçlanır. Pek çok modelin hazırlanması ve deneysel olarak incelenmesi prosedürü zaman alıcı olmakla birlikte pahalı bir yöntemdir. HAD ye dayalı çözüm yöntemleri kullanılarak modelleme aşamasında gerçekleştirilecek deney sayısı azaltılabilir ve tekne formları içerisinde en uygun olanına karar verilebilir [1].

Gemiler her zaman sakin suda seyahat etmezler ve çoğunlukla dalgalı deniz şartlarında bulunurlar. Açık denizlerde meydana gelen dalgalı deniz ortamını deneysel olarak modellemek zordur. Gemi hareketlerini modellemek için de çeşitli sayısal yöntemler mevcuttur.

Bu çalışmada gemi direnci ve gemi hareketleri HAD yöntemleri kullanılarak incelenmiştir. Sayısal çözümlerde RANS denklemleri kullanılmış ve elde edilen sonuçlar model deney sonuçları ile karşılaştırılarak uygun analiz yöntemleri geliştirilmiştir.

Geçtiğimiz yüzyıldan beri gemilerin dalga direncinin ve hareketlerinin incelenmesi alanında çok sayıda araştırma yapılmıştır. Son kırk yıl boyunca dalga direnci ve gemi hareketlerinin sayısal olarak incelenmesi çalışmaları hız kazanmıştır. Günümüzde modern denizcilik ve tekne direnci analizleri değişik teknikler kullanılarak gerçekleştirilmektedir.

1.1 Literatür Özeti

Gemilerin dalga direncinin belirlenebilmesi amacıyla yapılan ilk çalışma yaklaşık yüz yıl önce Michell [2] tarafından gerçekleştirilmiştir. Michell'in geliştirdiği teori ancak aşağıdaki şartlar sağlandığında geçerlidir:

- Akış tamamen potansiyel,
- Teknenin genişliği boyuna oranla küçük,
- Tekne tarafından üretilen dalgaların genliği boylarına oranla küçük,
- Tekne suda tamamen trimsiz yüzüyor.

Michell tarafından geliştirilen bu yaklaşım yöntemi ancak narin ve sınırlı sayıda teknelere uygulanabilir bir yöntemdir. Bu sınırlamaların üstesinden gelebilmek için çeşitli potansiyel çözüm yöntemleri geliştirilmiştir. Havelock [3] tekne yüzeyine kaynak ve kuyu elemanlarını dağıtarak teknelerin lineerleştirilmiş serbest su yüzeyi sınır şartı için dalga direncini hesaplamıştır. Hess ve Smith [4], Bal [5] iki boyutlu bir hidrofolin su altında herhangi bir kavitasyon oluşturmada sabit hızda ilerlemesi durumunda meydana getireceği dalga deformasyonlarını incelemişler ve potansiyel temelli bir panel yöntemi sunmuşlardır. Bal [5] elde ettiği sonuçları literatürde var olan değerler ile karşılaştırarak sunulan yöntemin başarılı olduğunu belirtmiştir. Dawson [6] serbest su yüzeyi sınır şartı lineerleştirilerek ve serbest su yüzeyini de panelleyerek tekne kaynaklı dalga direncini daimi akış için incelenmiştir. Dawson [6] tarafından geliştirilen bu yöntem çift gövde (Double-Body) yaklaşımı olarak bilinmektedir ve serbest su yüzeyine yerleştirilen sınır elemanları Rankine panelleri olarak adlandırılır. Tarafder [7], Rigby vd. [8], Kara vd. [9] çalışmalarında çift gövde yaklaşımını kullanarak standart

Wigley teknesinin dalga direncini doğrusal ve doğrusal olmayan serbest su yüzeyi sınır şartı için incelemişlerdir. Elde ettikleri sonuçları literatürde bulunan değerler ile karşılaştırdıklarında doğrusal teoremin tekne Froude sayısının $0.4 < F_n < 0.7$ arasında olması durumunda dalga direncini tahmin edemediğini doğrusal olmayan teoremin ise doğrusal teoriye göre daha başarılı sonuçlar elde ettiğini belirtmişlerdir. Dawson [6] tarafından geliştirilen yöntem serbest su yüzeyi altında ilerleyen cisimlerin üzerinde meydana gelen kavitasyonu incelemek için de kullanılmıştır. Bal vd. [10], Bal ve Kinnas [11], Lee ve Kinnas [12] tarafından gerçekleştirilen çalışmalar bu yöntemin su altında bulunan 2 ve 3 boyutlu cisimlerin kavitasyon tahmininde başarılı olduğunu göstermektedir.

Literatürde bulunan potansiyel akış çözümlerinin tamamına yakınında Standart serilerden meydana gelen Seri 60, Wigley gibi formlar veya hidrofoiller kullanılmıştır. Potansiyel akış kabulü ile geliştirilen bu yöntemler standart gemilerin dalga direncini, ve hareketlerini tahmin etmede güvenilir olmakla birlikte tekne formunun düzlemselliğinin azalması durumunda geçerliliğini kaybetmektedir. Ayrıca akış potansiyel olduğundan viskoz etkiler göz ardı edilmektedir. Tüm eksikliklerine rağmen potansiyel akış kabulü yapan bu yöntemler analiz sürelerinin kısa olması sebebiyle günümüzde RANSE çözüm yöntemleriyle beraber kullanılmaktadır ve güncelliğini korumaktadır.

Bilgisayar teknolojisindeki yetersizliklerden dolayı, 1970'lerin başında Navier-Stokes denklemlerini, uygun sınır koşulları altında gemi için uygulayıp çözmek mümkün olmamıştır [13]. Mevcut literatür incelendiğinde tekne etrafındaki akışın modellenmesi için RANS denklemlerinin çözümüne dayanan programlar 1980'li yıllardan itibaren geliştirilmeye başlanmıştır [13]. 3 boyutlu RANS denklemlerinin çözümünün zorluğu sebebiyle bu yıllarda yapılan ilk çalışmalar gemi etrafındaki sınır tabakanın modellenmesi üzerine yoğunlaşmıştır [13]. Sınır tabaka akışının teknenin kıç bölgesinde geçerli olmayışı ve iz bölgesinde meydana gelen hız alanını tahmin edemeyışı sebebiyle çalışmalar 3 boyutlu RANSE çözümler üzerine yoğunlaşmıştır. Gerçekleştirilen ilk analizlerde cebrik modeller kullanılarak türbülans viskozitesi modellenmiştir. 1985'te Göteborg'da yapılan 2. Uluslararası Gemi Viskoz Direnci Sempozyumu'nda, dikkati çeken noktalardan birisi, araştırmacıların kullandıkları

denklemlerdir. Daha önceleri çoğunlukla kullanılan sınır tabaka denklemleri yerine, parabolik Navier-Stokes denklemleri veya RANS denklemleri kullanılmıştır [13],[14]. Bilgisayar sistemlerinin gelişmesiyle birlikte analizlerde cebrik türbülans modelleri yerine iki denklem modelleri kullanılmaya başlanmıştır. Barlas [13] tarafından 2000 yılında gerçekleştirilen çalışmada gemi hidrodinamiğinde hesaplamalı akışkanlar dinamiği metodları Çizelge 1.1'deki gibi gruplandırmıştır.

Çizelge 1. 1 Gemi hidrodinamiğin de hesaplamalı akışkanlar dinamiği metodları [13]

	Direnç ve Akış Hesapları	Pervane ve Kav. Hesapları	Denizcilik Hesapları	Manevra Hesapları
Temel Pot. Akış Metodları	Geleneksel	Geleneksel	Geleneksel	Geleneksel
Panel Metodları	Kabul Görmüş	Kabul Görmüş	Kabul Görmüş	Yeni
Sınır Tabaka Metodları	Geleneksel	Geleneksel	Geleneksel	-
Navier-Stokes Metodları	Yeni	Yeni	Gelecekte	Gelecekte

Barlas [13] çalışmasında RANSE çözümlerin 2000 yılı için gelişmekte olduğunu ve potansiyel teoriye dayalı çözümlerin literatürde kabul gördüğünü belirtmiştir. Daha önceden de belirtildiği gibi potansiyel çözümler yaygın olarak kullanılmakla birlikte düzlemselliğin azaldığı geometriler için çözüm güçleşmektedir. Bilgisayar sistemlerinin ilerlemesi ile birlikte 2000'li yıllardan itibaren RANSE çözümler hız kazanmaya başlamıştır. 2005 yılında Tokyoda gerçekleştirilen HAD konferansında düzlemselliğin az olduğu geometrilere sahip KCS, DTMB 5415, KVLCC2 teknelerinin HAD ile elde edilen direnç değerleri deneylerle karşılaştırılmış ve RANSE çözümlerin direnç tahmininde yeterli hassasiyeti sağladığı belirtilmiştir. Günümüzde RANS denklemleri kullanılarak tekne direncini tespit etme çalışmaları devam etmektedir. Gorski [15], Bulgarelli vd. [16], Parolini ve Quarteroni [17], Ahmed ve Guedes Soares [18], Sridhar vd. [19] gerçekleştirdikleri çalışmalarda tekne etrafındaki akışı modellemişler getirdikleri yenilikleri raporlamışlardır. Türbülanslı akışın deneysel ve sayısal olarak modellenmesi Wackers vd. [20], Xing vd. [21] ve Tingqiu vd. [22] tarafından gerçekleştirilmiş olup akış

analizleri hareketli ağ elemanları kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Leroyer vd. [23] çalışmalarında serbest su yüzeyini VOF yaklaşımını kullanarak modellemiş RANS denklemlerinin çözüm hızını arttırabilmek için iki farklı sayısal yaklaşım önermişlerdir. Guo vd. [24] KVLCC2 modelinin hareketlerini baştan gelen düzenli dalgalar için RANS denklemlerini çözerek incelemişler ve ek direnç tahmininde bulunmuşlardır. Guo vd. [24] elde ettiği sonuçları deneysel verileriyle karşılaştırarak RANSE çözücülerin modellemede başarılı olduğunu göstermişlerdir. Kandasamy vd. [25] makalelerinde yüksek süratli katamaran tipi bir yolcu teknesinin serbest su yüzeyini RANS denklemlerini çözerek ve deneysel yöntemleri kullanarak incelemişlerdir. Kandasamy vd. [25] çalışmalarında sahil bölgelerinde meydana gelecek olan erozyonun önlenmesi için iz bölgesinde en az türbülans oluşturan formu tasarlamayı amaçlamışlardır. Bu çalışmada sayısal sonuçların kontrolü için kullanılan deneysel veriler tam ölçekli tekne formundan elde edilmiş olup sayısal analizlerde tam ölçek için gerçekleştirilmiştir. Kandasamy vd. [25] çalışmalarında HAD ile elde ettiği sonuçların tam ölçekli gemi için deneysel verilerle uyumlu olduğunu belirtmişlerdir. Takai vd. [26] su jeti ile sevk edilen yüksek süratli teknenin HAD analizlerini gerçekleştirmişler ve su jeti geometrisini optimize etmişlerdir. Bucon vd. [27] çalışmalarında tanker modelinin etrafındaki akışı serbest yüzeyli olarak STAR CCM+ yazılımını kullanarak modellemişler ve yazılımın direnç tespiti de başarılı olduğunu belirtmişlerdir. Seo vd. [28] 3600 TEU konteyner gemisinin başa ve kıça trimli durumları için serbest su yüzeyini STAR CCM+ yazılımını kullanarak modellemişler ve elde ettikleri sonuçları yaptıkları direnç deneyleri ile karşılaştırmışlardır. Seo vd. [28]'de bu çalışmalarında STAR CCM+ yazılımının direnç tahmininde başarılı olduğunu belirtmişlerdir.

Tekne tasarımı gerçekleştirilirken teknenin dalgalı deniz ortamında hayatta kalıp kalamayacağı, kendisinden beklenen görevleri yerine getirip getirmeyeceği, hareket genliklerinin ve ivmelerinin kabul edilebilir sınırlar içerisinde olup olmadığı tespit edilmelidir. Ayrıca dalgalı suda ilerleyen bir teknenin direnci sakin su direncine göre artış gösterecektir. Ek direnç adı verilen bu değerin tekne formları için tespit edilmesi denizcilik kabiliyeti yüksek olan tekne formlarının tasarlanabilmesi için gereklidir [29].

HAD yöntemleri ile tasarlanan tekne formlarının denizcilik kabiliyeti ve ek direnç gibi özelliklerinin yanı sıra tekne güvertesinin ıslanıp ıslanmadığı da incelenebilir. Şekil 1.1’de güverte ıslanması meydana gelen bir tekne gösterilmiştir.



Şekil 1. 1 Güverte ıslanması [30]

Tekne güvertesinin ıslanması yaşam mahalini olumsuz etkileyecek güverte üzerinde ek su yükü meydana getirecektir. Bu sebeplerden dolayı tasarım aşamasında teknelerin denizcilik davranışları da göz önüne alınmalıdır.

Dalgalı ortamda ilerleyen bir geminin hareket deneylerini gerçekleştirmek direnç deneylerine göre çok daha zordur ve bu durumun sebepleri aşağıda sıralanmıştır:

- Teknenin hareketi ve üzerine gelen dalga formunun zamanla değişmesi sebebiyle gemi gövdesi üzerinde oluşacak kuvvet ve momentler zamana göre değişecektir. Zamana göre değişen bu büyüklükleri ölçmek zordur,
- Dalga üreticinde üretilen dalga genliği tekne üzerine gelene kadar değişir ve tam gövdeyle temas anında bu genliğin değerini ölçmek zordur,
- İmal edilen modelin ağırlık merkezinin yerinin ve kütle atalet momentlerinin sağlanması zordur. Bu durumun üstesinden gelebilmek için model üzerine ağırlıklar dağıtılır. Deneyler esnasında bu ağırlıkların hareket etmemesi gerekmektedir ve aşırı genlikli hareketlerde jirasyon yarıçaplarında değişme meydana gelmektedir,

- Teknenin Froude sayısına sahip olması yani teknenin de hareketli olması durumunda elde edilecek bilgi sayısı deney tankının boyutlarına bağlıdır,
- Ölçüm cihazlarında kalibrasyon eksikliği olabilir,
- Tüm testlerde olduğu gibi ölçek faktörü deneyin en büyük dezavantajıdır.

Yukarıda verilmiş olan bu sebeplerden dolayı gemi hareket deneylerine yardımcı veya alternatif olarak sayısal analiz yöntemleri geliştirilmiştir. Geçtiğimiz yüzyılda bu konuyla ilgili pek çok çalışma yapılmıştır. Havelock [31] noktasal bir kaynak elemanının serbest su yüzeyi altında hareketini incelemiş ve meydana gelen dalga deformasyonlarını analitik olarak modellemiştir. Bir tek panel için geliştirilen bu formülasyon Ursell [32] tarafından kullanılarak serbest su yüzeyi içerisinde bulunan dairesel bir silindirin salınım hareketi analitik olarak modellenmiştir. Ursell [33] gerçekleştirmiş olduğu bu çalışmada ise dairesel silindirin yalpa hareketini noktasal bir kaynak elemanından faydalananarak modellemiştir. Ursell [32], Ursell [33] tarafından gerçekleştirilen bu çalışmalar gemi hareket teorisinin temelini oluşturmuştur. Gemi hidrodinamik katsayılarının ve hareketlerinin birbirleri üzerine olan etkilerinin tespitinin zorluğu sebebiyle yapılan ilk çalışmalar doğrusal teoriye dayanmaktadır. Bu teoriye göre gemi hareketleri doğrusallaştırılır ve teknenin üzerine gelen dalgayla aynı frekansa hareket ettiği kabul edilir. Bu teoriyi kullanan ilk çalışmalar tekne kesitleri üzerine uygulanmıştır. Tekne boyunca alınan herbir kesidin salınım frekansı tekne üzerine gelen dalganın frekansı ile aynı kabul edilerek kesitlerin hidrodinamik katsayıları tespit edilir ve bu katsayılar tekne boyunca integre edilerek formun ek su kütlesi, sönüm katsayısı gibi hidrodinamik özellikleri elde edilir. Araştırmacılar Lewis [34] tarafından geliştirilen uyumlu dönüşüm yöntemini gemi kesitlerine uygulayarak kesitleri daire denklemleri ile ifade etmeyi başarmışlar ve tekne dilimleri üzerindeki potansiyelleri daire yardımıyla elde etmişlerdir. Geliştirilen bu yöntem yuvarlak karinalı olmayan tekneleri, ayna kış ve yumru baş gibi geometrileri uyumlu dönüşüm yardımıyla tam olarak temsil edememektedir. Frank [35] bu problemin üstesinden gelmiş ve Frank Close-Fit metodunu geliştirmiştir. Frank [35] tarafından geliştirilen bu yöntem ile tekne kesitlerini tam olarak temsil etmek mümkün olmuştur. Bu yöntemler gemi kesitlerine uygulanabileceği gibi teknenin tüm gövdesi panellerle salınım hareketi

modellenebilir. Lewis [34] ve Frank [35] tarafından geliştirilen bu yöntemler potansiyel teoriyi kullanarak kesitlerin hidrodinamik katsayılarını tahmin etmektedir. Son zamanlarda tekne dilimlerine RANS denklemleri uygulanarak ek kütle ve sönüm katsayısı tahmini yapan çalışmalar yapılmaya başlanmıştır. Querard vd. [36] çalışmalarında iki boyutlu bir tekne kesitinin hareketini RANS denklemleri kullanarak modellemişlerdir. Bu yaklaşım potansiyel teoriye göre daha doğru olmakla birlikte doğrusal teoriyi kullanan bu yöntemlerde teknenin veya kesitlerin hareket frekansının dalga frekansıya eşdeğer olması kabulü önemli bir eksikliktir. Bu problem Dawson [6] tarafından geliştirilen ve dalga direncinin tespitinde kullanılan çift-gövde yaklaşımının gemi gövdelerinin hareketlerine uygulanarak çözülmeye çalışılmıştır. Bu yaklaşım ile doğrusal olmayan gemi hareketleri istenilen serbestlik dercesinde doğrusal veya doğrusal olmayan serbest su yüzeyi sınır şartları kullanılarak modellenebilir. Chen ve Zhu [37] çalışmasında DTMB 5415 formunun baş-kıç vurma ve dalıp-çıkma bileşik hareketini zaman düzleminde modellemişler ve teknenin transfer fonksiyonlarını elde etmişlerdir. Elde ettiği sonuçları doğrusal teori ve deneysel verilerle karşılaştırarak bu yöntemin doğrusal teoriye göre daha iyi sonuç verdiğini göstermişlerdir. Zhang vd. [38] makalesinde standart Wigley teknesinin doğrusal olmayan baş-kıç vurma ve dalıp-çıkma bileşik hareketini Rankine panelleri kullanarak zaman düzleminde incelemişlerdir. Zhang vd. [38] de Chen vd. [37]'ye benzer şekilde elde ettiği sonuçları deneysel veriler ile karşılaştırmışlar ve bu yöntemin doğrusal teoriye göre daha iyi sonuç verdiğini belirtmişlerdir. Hareketin zamana bağlı olarak incelendiği bu yöntemde zamanla meydana gelecek dalga deformasyonları sebebiyle serbest su yüzeyinin ve teknenin su altında kalan kısmının geometrisi her bir zaman adımında değişecektir ve bu değişimi modellemek de bu tekniğin dezavantajıdır. Doğrusal olmayan gemi hareketlerinin Rankine panelleri kullanılarak modellenmesi çalışmaları halen devam etmektedir.

Gemi hareketleri ve dalga direnci potansiyel akış çözüm teknikleriyle incelenebilir fakat akışın ideal kabul edilmesi viskozite ve türbülans etkilerinin göz önüne alınmaması bu yöntemlerin hepsinin ortak eksikliğidir. Potansiyel teorinin yetersizliğinden dolayı gemi direncinin RANSE ile tespiti çalışmalarıyla birlikte 3 boyutlu gemi hareketlerinin de modellenmesi çalışmaları hız kazanmıştır. Gemi hareketlerinin viskoz akış ile

modelleme çalışmaları 1980'li yıllara dayanmakta olup 2000'li yıllara kadar süren araştırmaların çoğu hareketlerden ziyade gemi direncini RANSE ile belirleme üzerine yoğunlaşmıştır. 2000 yılında Gothenburg'da gerçekleştirilen HAD özömleri toplantısında sunulan çalışmaların tamamı tekne direncini tespit etmeye yoğunlaşmış olup hareketlerle ilgili bir bildiri sunulmamıştır [24]. Bu toplantıdan önce gemi hareketlerine RANS denklemlerinin uygulanması ile ilgili ilk çalışmanın Sato vd. [39] tarafından gerçekleştirildiği kabul edilmektedir. Sato vd. [39] çalışmalarında baştan gelen düzensiz dalgalarda Wigley ve Seri 60 teknelerinin baş-kıç vurma ve dalıp-çıkma bileşik hareketini incelemişlerdir. Elde ettiği sonuçları deneysel verilerle karşılaştırmış ve HAD analizlerinin Wigley için deneysel verilerle uyum içerisinde olduğunu fakat Seri 60'a ait analiz sonuçlarının deneyleri sağlamadığını belirtmişlerdir. Weymouth vd. [40] makalelerinde standart Wigley teknesinin baş-kıç vurma ve dalıp-çıkma bileşik hareketini RANS denklemlerini kullanarak modellemişlerdir. Elde ettikleri sonuçlar deneylerle uyumludur. Weymouth vd. [40] çalışmalarında gemi hareketlerinin analiz sistematığını de geliştirmişlerdir. Bu çalışmanın en göze batan eksikliği hareketin kısa dalga boylarında incelenmemiş olmasıdır. Deng vd. [41] gerçekleştirdikleri çalışmalarında kısa dalga boylarında konteyner gemisinin hareketlerini deneysel ve HAD yöntemlerini kullanarak incelemişler ve ek direnç için hata değerini %50 olarak belirlemişlerdir.

2005 yılında Tokyoda düzenlenen toplantı gemi hareketleriyle ilgili test modellerinin deney sonuçlarının HAD özömleri ile karşılaştırıldığı ilk toplantıdır [24]. Bu toplantıda gemi hareketleriyle ilgili 4 farklı grup çalışmalarını sunmuşlardır. Gerçekleştirilen RANSE temelli HAD alışmaları deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Bu sonuçlara göre toplam direncin ve tekneyi dalıp-çıkmaya zorlayan kuvvetin deneylerle mukayesesi sonucunda sıfırncı harmoniklere ait ortalama hata oranları %4.5 ve %6.7 olarak belirlenmiştir. Elde edilen bu sonuçlar memnun edici olmakla birlikte baş-kıç vurma momentine ait sıfırncı harmoniğin toplam hata oranı %70 civarındadır. 2005 yılında gerçekleştirilen bu toplantıdan çıkan sonuca göre HAD yöntemlerinin gemi direncini tespit edebilir fakat gemi hareketlerini modellemekte yetersizdir. Bu toplantıdan sonra gemi hareketlerini sayısal olarak modelleme çalışmaları hız kazanmıştır. 2005 yılında gerçekleştirilen toplantıda araştırmacılar ortak bir dil geliştirmek amacıyla KCS, KVLCC2,

DTMB 5415 formlarının üzerinde çalışmaların gerçekleştirilmesini kararlaştırmışlar ve bu formları deneysel ve sayısal analiz için ortak çalışma alanı olarak belirlemişlerdir. Günümüzde gemi hareketlerini HAD ile modelleyen çeşitli yazılım ve çalışmalar mevcuttur. Bu yazılımların test edilebilmesi ve elde edilen sonuçların değerlendirilmesi için 2010 yılında Gothenburg da bir toplantı daha düzenlenmiştir ve toplantıya 4 farklı ülkeden 5 grup analiz sonuçlarını bildirmek için katılmıştır. Bu toplantıda gemi hareketleri için kompleks geometrilere sahip düzlemselliğin az olduğu KCS ve KVLCC2 formları test model olarak belirlenmiştir. KCS'nin denizcilik deneyi sonuçları takıntılı tekne formu (dümen ve pervane) için verilmiş olup KVLCC2'nin üzerinde ise herhangi bir takıntı söz konusu değildir. Bu toplantıda sunulan HAD sonuçları tüm ayrıntılarıyla [42]'da bulunabilir. Son toplantıda iki denklemlili türbülans modellerinin yanı sıra LES ve DES gibi daha gelişmiş türbülans denklemleri de kullanılmıştır. HAD çalışmalarında kullanılan ağ yapıları farklılık göstermekte olup ağ sayıları da 0.3 M'dan 70 M kadar değişmektedir.

1.2 Tezin Amacı

Geliştirilen analiz prosedürü sayesinde dizayn aşamasında yüzen bir cismin direnç birleşenlerinin ve hidrodinamik karakteristiklerinin elde edilmesi amaçlanmıştır. Bu çalışma kapsamında gemi direnci ile birlikte dalıp-çıkma ve baş-kıç vurma birleşik gemi hareketlerinin türbülanslı akış ortamında incelenmiştir. Elde edilen sonuç ile dizayn aşamasındaki bir geminin sakin sudaki direnç birleşenleri, teknenin hareket halinde olması durumunda ise denizcilik özelliklerinin hesaplanabilmesi ve elde edilen sonuçlar sayesinde form üzerinde gerekli olan değişikliklerin yapılabilmesi için tasarımcıya bir simülasyon yönteminin sunulması planlanmıştır. Bunun yanında RANSE çözümler ekonomik ve gereklilik yönünden incelenmiştir.

Günümüzde türbülanslı akışı modelleyen ticari ve akademik yazılımlar mevcuttur. Gerçekleştirilen çözümlerin doğruluğunu test edebilmek ve sonuçları değerlendirebilmek için model deneylerine ihtiyaç duyulmaktadır. Model deneylerinin gerekliliği sebebiyle ortaya çıkacak olan karışıklığı engellemek amacıyla KCS, DTMB 5415, KVLCC2 tekneleri üzerinde fikir birliğine varılarak çalışmalar bu formlar üzerinde yoğunlaşmıştır. Seri 60, Wigley gibi teknelerle karşılaştırıldığında bu formlar çok daha

kompleks yapıya sahiptir. KCS ve KVLCC2 teknelerinin baş bölgesinde bulunan yumru baş, DTMB 5415'in baş bölgesinde bulunan sonar yuvası ve teknelerin ayna kılı oluğu sebebiyle tekne düzlemselliği azalmaktadır. Bu formlar tüm HAD çalışmalarında referans olarak kullanılmaktadır ve formlara ait direnç değerleri literatürde mevcuttur. Literatür incelendiğinde bu teknelere ait direnç deney sonuçları sınırlı sayıdaki hız değerleri için verilmiştir. HAD analizleri belli hızlarda deney sonuçları ile uyum içerisinde olabilir fakat sonuçların birden çok hız için test edilmesi gerekmektedir. Bu ihtiyacı karşılamak amacıyla Şener [43] tarafından doktora tez çalışması kapsamında tasarlanan FFG tipi Fırkateynin direnç deneyleri İ.T.Ü Ata Nutku Gemi Model Deney Laboratuvarında takıntılı ve takıntısız durumların herbiri için 16, toplam 32 farklı hızda gerçekleştirilmiş ve elde edilen analiz sonuçları bu değerler kullanılarak test edilmiştir. Şener [43] tarafından doktora tez çalışmasında tasarlanan bu teknenin modeli M 367 kod numarasıyla İ.T.Ü deney tankında imal edilmiştir.

Dalgalı su ortamında ilerleyen teknenin direnç değerleri sakin suda ilerleyen teknenin direnç değerlerine göre artış gösterecek dalgalardan kaynaklanan ek dalga direnci ve güverte ıslanması gibi problemleri beraberinde getirecektir. Dilim teorisi gemi hareketlerinin modellenmesinde yaygın olarak kullanılan sayısal bir yöntem olup düşük ve yüksek frekanslı hareketlerde iyi sonuç vermemektedir. Bilgisayar kullanımının yaygınlaşması üç boyutlu teorilerin gelişmesine hız kazandırmış ve dilim teorisinin eksiklerinin bir kısmı iyileştirilmiştir. Mevcut olan bu teorilerin çoğu tekne üzerine tekil kaynak elemanlarının dağıtılarak gemi hareketlerini ve direncini modellemeyi amaçlamaktadır. 2000'li yılların başından itibaren, ticari yazılımların hızlı bir şekilde yaygınlaşması ve akademik kodların geniş çevrelere ulaşması ile gemi inşaatındaki HAD uygulamaları daha da artmıştır [13]. Artık denizcilik, manevra gibi özel uygulamalar da dahil, HAD teknikleri başarılı bir şekilde uygulanabilmektedir. En son geliştirilen metotlar ile gemilerin sakin deniz ve dalgalı denizdeki altı serbestlik dereceli hareketleri de rahatlıkla modellenabilmektedir. Bu çalışmada gemi hareketleri hesaplamalı olarak incelenmiş ve elde edilen sonuçlar deneysel verilerle karşılaştırılmıştır.

Direnç analizlerinde olduğu gibi HAD ile geliştirilen hareket analizlerinin deneysel verilerle karşılaştırılması gerekmektedir. Tez çalışması kapsamında hazırlanan hareket analizlerinin geçerliliğinin kontrol edilebilmesi için 2010 yılında Gothenburg'da

gerçekleştirilen toplantıda hareket simülasyonları için seçilen iki test modelden biri olan KVLCC2 tekne formu kullanılmıştır. Direnç ve hareket analizleri için gerçekleştirilen HAD çözümlerinin tamamında akış türbülanslı ve zamana bağımlı olup RANS denklemleri k- ϵ türbülans modeli kullanılarak modellenmiştir.

Çalışmanın 2. Bölümünde gemi hareket denklemleri, kullanılan türbülans modeli tanıtılmıştır. Modelleme sırasında akış tamamen türbülanslı olup pratik sanayi uygulamalarında yaygın olarak kullanılan ve iki denklemlilik model olarak bilinen standart k- ϵ türbülans modeli kullanılmıştır. Analizlerde serbest su yüzeyini modelleyebilmek amacıyla çok fazlı akışlar için hazırlanmış olan VOF (Volume Of Fluid) modeli kullanılmıştır. VOF modeli kullanılarak gerçekleştirilen çözümlerde hücrelerdeki fazların son halini almasıyla dalga deformasyonları elde edilmekte ve bu deformasyona bağlı olarak gemi yüzeyindeki basınç dağılımı değişmektedir. Viskoz akım çözüldüğünden bu basınç değişimi viskoz basınç etkisini de içermektedir. Matematiksel denklemlerin çözümünde kullanılan sonlu hacimler metodu ve transport denklemlerinin ayrıştırılması bu bölümde ayrıntılı bir şekilde anlatılmıştır.

İ.T.Ü Ata Nutku Gemi Model Deney Laboratuvarında gerçekleştirilen direnç deneyleri ile birlikte deneysel ve HAD çalışmalarında kullanılan FFG tipi savaş gemisinin ve hareket analizlerinde test model olarak kullanılan KVLCC2 tekne formunun ana ve model boyutları, test şartları, geometrik özellikleri 3. Bölümde anlatılmıştır. Geliştirilen direnç analiz yöntemi Wigley ve KCS formları için de test edilmiş olup bu formlara ait geometrik özellikler bu bölümde tanıtılmıştır.

4. Bölümde sakin suda M 367 tekne formunun HAD analizleri gerçekleştirilerek elde edilen sonuçlar gerçekleştirilen direnç deneyleri ile karşılaştırılmıştır. Bu bölümde tekne form faktörü, tekne pervane düzleminde meydana gelen iz dağılımı ve takıntıların direnç üzerine olan etkisi de incelenmiştir. Bu bölümde ayrıca M 367 model formunun direnç analizi için geliştirilen HAD prosedürü Wigley ve KCS tekne formları kullanılarak test edilmiştir.

HAD ile hareketlerin modellenmesi ve hidrodinamik özelliklerin elde edilebilmesi için literatürde pek çok simülasyon stratejisi bulunmaktadır. Sliding mesh, overlapping mesh, moving mesh bunlardan bazılarıdır. Bu yaklaşımlar kullanılarak yapılan analizlere

göre RANS denklemleri zamana bağılı olarak çözülür, her bir zaman adımı için yüzen cismin üzerine gelen kuvvet ve momentler elde edilir. Elde edilen kuvvet ve momentlere göre gemi hareket denklemleri çözülerek yer değiştirmeler hesaplanır. Bu modellerde ağ yapısı her bir zaman adımı sonunda değişir. Yöntemin en büyük dezavantajı da budur. Ağ yapısını sürekli olarak değişmesi sonucunda hesaplama hacmi içerisinde negatif veya çarpıklık oranı yüksek hacim elemanlarının meydana gelmesi bu yöntemin kullanılabilirliğini kısıtlamaktadır. Yeni geliştirilen body attacehed mesh metodu bu problemin üstesinden gelmiştir. Bu tekniğe göre her bir zaman adımının sonunda hesaplanan kuvvet ve momentler kullanılarak tüm hesaplama hacmi hareketin serbestlik derecesine bağılı olarak dönme veya öteleme hareketi yapar. Bu sayede kullanılan ağ yapısında herhangi bir deformasyon meydana gelmemiş olur. Bu çalışmada gemi hareketlerinin modellenmesinde body-attacehed mesh yöntemi kullanılmıştır. 5. Bölümde KVLCC2 tekne formunun baştan gelen düzenli dalgalarda baş-kıç vurma ve dalıp-çıkma bileşik hareketi HAD yöntemleri kullanılarak incelenmiş ve elde edilen sonuçlar literatürde bulunan deneysel verilerle karşılaştırılarak uygun analiz prosedürü geliştirilmiştir. Ayrıca bu bölümde 4. Bölümde geliştirilen direnç analiz prosedürü KVLCC2 tekne formuna da uygulanmış ve ek dalga direnç katsayısı da incelenmiştir.

1.3 Hipotez

Bu tezde yapılan çalışmalar ile:

- Direnç ve hareket analizleri için uygun sayısal yöntemlerin, hesaplama hacmi, ağ yapısı, sınır şartlarının tespit edilmesi ve çözüm yönteminin bilgisayar ortamında hazırlanması,
- Gün geçtikçe kullanımı yaygınlaşan ve güncelliği artan RANSE çözümlerin güvenilirliğinin ve gerekliliğinin incelenmesi,
- İ.T.Ü Ata Nutku Gemi Model Deney Laboratuvarında gerçekleştirilen deney ve HAD analiz sonuçları ileride yapılacak olan çalışmalar için test sonuçlarının elde edilmesi,

- Tasarım aşamasında bulunan bir teknenin direnç ve hareket analizleri gerçekleştirilerek ITTC-78 tarafından önerilen yöntemlere göre tekne formlarını inceleme yönteminin sunulması,
- HAD analizi ile gerçekleştirilen çözümlerinin sınırlarının tespit edilmesi

amaçlanmıştır.

MATEMATİKSEL MODEL

2.1 Gemi Hareket Denklemleri ve Hidrodinamik Katsayılar

2.1.1 Giriş

Sistemlerin analiz ve tasarımlarında en önemli problem ele alınan sistemin matematiksel olarak modellenmesidir. Gemi hareket denklemleri ötelemeli, dönel yada her ikisi birlikte olacak şekilde ifade edilebilir. Gemi hareketini belirleyen denklemler genellikle doğrudan yada dolaylı olarak Newton hareket yasasından türetilir [44].

2.1.2 Gemi Hareket Denklemleri

Bir geminin kütle merkezinin öteleme hareketine ait denklem;

$$m \frac{dV}{dt} = f \quad (2.1)$$

ile verilmektedir. Burada m geminin kütlesini, f gemi üzerine etki eden toplam kuvveti, V kütle merkezinin hızını göstermektedir. gövdeyle ilişkilendirilmiş koordinat eksenine göre teknenin açısal momentum denklemi ise aşağıdaki verilmektedir;

$$M \frac{d\omega_T}{dt} + \omega_T \times M \omega_T = n \quad (2.2)$$

Burada M atalet tensörünü, ω_T teknenin açısal hızını, n tekne üzerine gelen toplam momenti göstermektedir. Bu denklemler üzerinde gerekli düzenlemelerin yapılmasından sonra en genel halde 6 serbestlik dereceli bir geminin hareket denklemleri elde edilir.

Gemi hareketleri üç öteleme ve üç dönme hareketinin toplamı olarak altı serbestlik dereceli olarak tanımlanmaktadır. Bu hareketlerin aşağıda kısaca tanımlanmıştır [44].

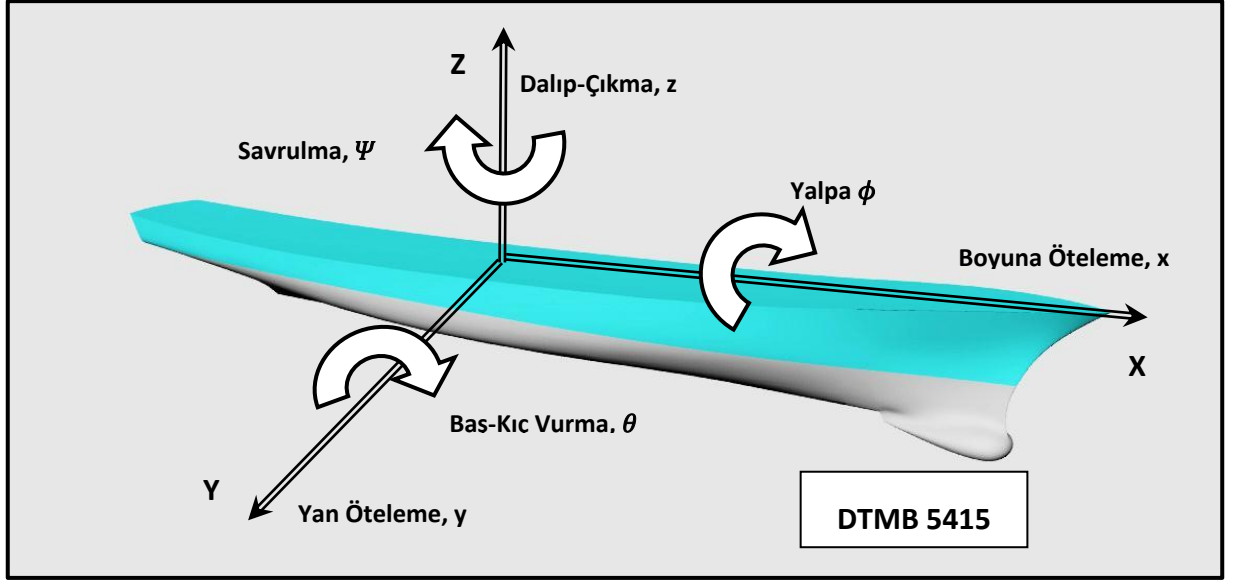
1. İlerleme: Boyuna ekseninde geminin ileri ve geri doğrusal hareketi
2. Yan öteleme: Enine ekseninde geminin her iki yöndeki doğrusal hareketi
3. Savrulma: Geminin düşey eksen etrafındaki dönel veya açısal hareketi
4. Dalıp-çıkma: Düşey ekseninde geminin her iki yöndeki doğrusal hareketi
5. Yalpa: Geminin boy eksen etrafında yaptığı dönme hareketi
6. Baş-kıç vurma: Geminin enine ekseninde kıçta ve başta açısal hareketi

Altı serbestlik dereceli gemi hareketlerini üç doğrusal ve de üç açısal hareket oluşturmaktadır, altı farklı hareket bileşeni Çizelge 2.1’de gösterilmiştir [44].

Çizelge 2. 1 Gemi hareket notasyonları [44]

NO	Hareketler	Kuvvet -Momentler	Hızlar	Konumlar
1	İlerleme	X	$u = \frac{dx}{dt}$	x
2	Yan öteleme	Y	$v = \frac{dy}{dt}$	y
3	Dalıp çıkma	Z	$w = \frac{dz}{dt}$	z
4	Yalpa	K	$p = \frac{d\phi}{dt}$	ϕ
5	Baş-kıç vurma	M	$q = \frac{d\theta}{dt}$	θ
6	Savrulma	N	$r = \frac{d\Psi}{dt}$	Ψ

Konumlar $[x \ y \ z]^T$ ve $[\phi \ \theta \ \Psi]^T$; lineer hızlar $[u \ v \ w]^T$ ve açısal hızlar $[p \ q \ r]^T$; sırası ile kuvvet ve momentler $[X \ Y \ Z]^T$, $[K \ M \ N]^T$ gövdeye sabitlenmiş eksen takımına göre ifade edilir. Çizelge 2.1 de tanımlanan gemi hareketleri Şekil 2.1’de gösterilmiştir.



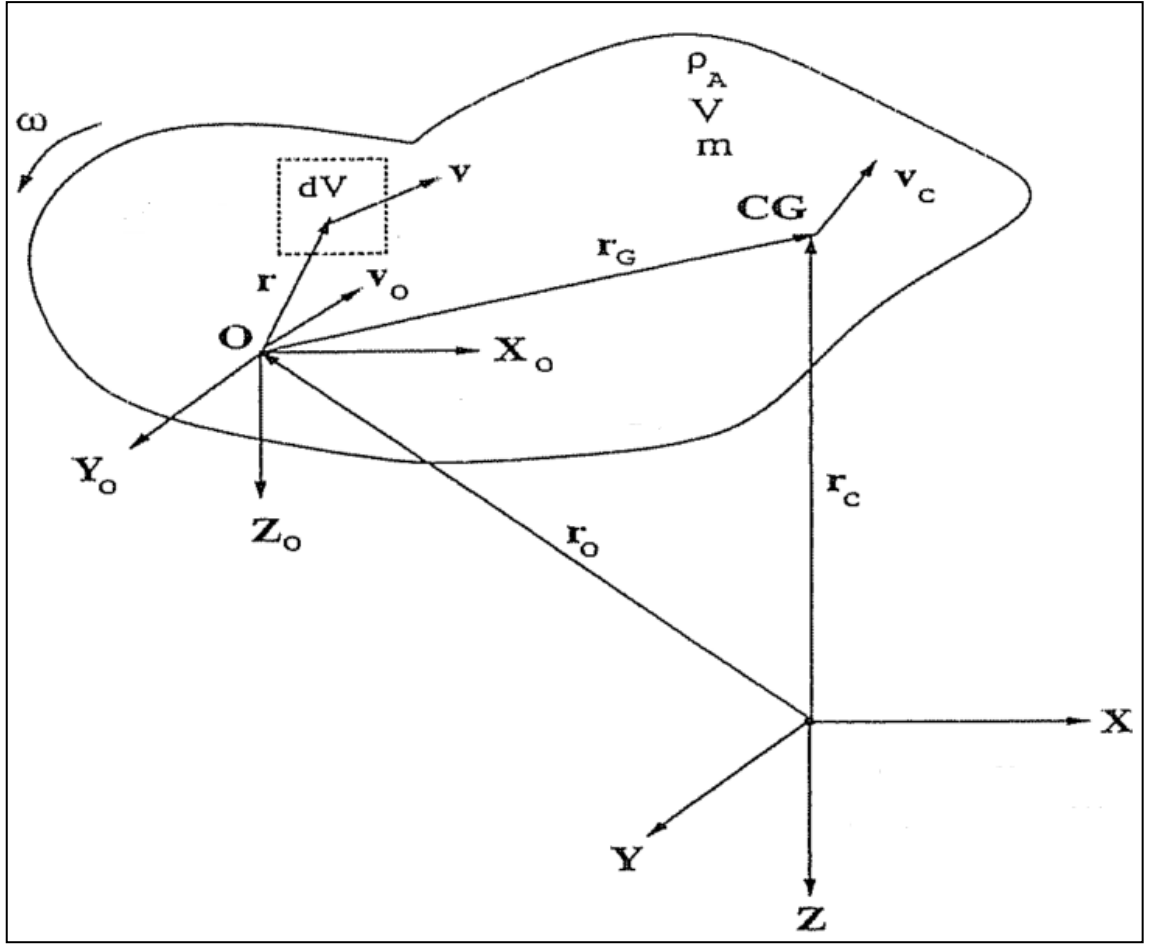
Şekil 2. 1 Koordinat sistemi ve altı serbestlik dereceli gemi hareketleri [29]

2.1.3 Newton-Euler Yöntemi ile Gemi Hareket Denklemlerinin Elde Edilmesi

Bir gemi gövdesinin dinamik modeli, gemi gövdesinin dinamik davranışını belirleyen hareket eşitliklerinden oluşur [29]. Gemi hareketlerinin basitçe ifade edilebilmesi için aşağıdaki bazı kabuller yapılmıştır. Bunlar kısaca şöyle ifade edilebilir:

- Dinamik analiz sırasında gemi kütlesi sabittir,
- Gemi katı bir cisimdir.

Bu kabuller altında geminin üç tane doğrusal üç tanede açısal yer değiştirmeden kaynaklanan hareketi söz konusudur [29]. Gemi hareketlerinin analizlerinin gerçekleştirilmesi için iki ayrı koordinat sistemi tanımlanır. Bunlar $(X_0Y_0Z_0)$ önce geminin orijinine yerleştirilen referans eksen takımı ve (XYZ) yere bağlı sabit bir eksen takımıdır. Bu eksen takımları Şekil 2.2’de görülmektedir.



Şekil 2. 2 Yere sabitlenmiş referans koordinat sistemi (XYZ) ve gövdeye sabitlenmiş koordinat sistemi ($X_0Y_0Z_0$) [44]

Yere sabitlenmiş eksen takımına göre ($X_0Y_0Z_0$) orijin merkezini kütle hareket merkezi seçilerek öteleme hareket denklemleri [44];

$$\begin{aligned} m[\ddot{u} - vr + wq - x_G(q^2 + r^2) + y_G(qp - \dot{r}) + z_G(pr + \dot{q})] &= X \\ m[\ddot{v} - wp + ur - y_G(p^2 + r^2) + z_G(qr - \dot{p}) + x_G(pq + \dot{r})] &= Y \\ m[\ddot{w} - uq + vp - z_G(p^2 + q^2) + x_G(rq - \dot{q}) + y_G(qr + \dot{p})] &= Z \end{aligned} \quad (2.3)$$

dönme hareket denklemleri [44];

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

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

$$I_z \ddot{r} + (I_y - I_x) p q - (\dot{q} + r p) I_{zy} + (q^2 - p^2) I_{xy} + (r q - \dot{p}) I_{zx} + m [x_G (\dot{v} - w p + u r) - y_G (\dot{u} - v r + w q)] = N \quad (2.4)$$

formulleriyle ifade edilir. Burada u, v, w doğrusal hız ve p, q, r açısal hız bileşenlerini; X, Y, Z kuvvet ve K, M, N moment bileşenlerini göstermektedir.

2.1.4 Hidrodinamik Katsayılar

Akışkan içerisinde ivmeli hareket gerçekleştiren herhangi bir cisim hareketiyle orantılı olarak belli bir miktar akışkan kütlelerini de harekete zorlayacaktır ve bu akışkan kütlelerine ek kütle adı verilmektedir. Bu ek kütleyle beraber akışkan hareketi sönümlemeye çalışır ve bu terimde sönüm katsayısı adı verilmektedir. Denklem (2.3) ve Denklem (2.4) ile tanımlanan hareket denklemlerinin çözülebilmesi için denklem takımında gösterilmiş olan ek su kütlesi ve sönüm katsayısı terimlerinin her bir hareket modu için hesaplanması gerekmektedir. Bu terimlerin hesaplanması için potansiyel teoriye dayalı yöntemler geliştirilmiştir. Potansiyel teoriye dayalı olarak tekne formlarına ait ek su kütlesi ve sönüm katsayıları üç boyutlu geometri için hesaplanabildiği gibi genellikle iki boyutlu kesitler incelenir ve elde edilen sonuçlar tüm tekne formu için integre edilerek hesaplanır. Hidrodinamik katsayıların ilavesiyle elde edilen gemi hareketlerine ait doğrusal olmayan formdaki denklemler kaynak [44]'den ayrıntılı bir şekilde elde edilebilir.

Gemi hareketlerinin modellenmesi için tekne gövdesi üzerine gelen kuvvetlerin ve momentlerin ayrıntılı olarak hesap edilmesi gerekir. Potansiyel teori ile gerçekleştirilen modelleme ile tekne üzerine gelen viskoz etkiler, aerodinamik etkiler ve pervanenin yol açtığı etkiler ihmal edilir [29]. Bu çalışmada viskoz etkiler ve aerodinamik etkiler ihmal edilmeyecek ve pervane kaynaklı etkilerin olmadığı kabul edilecektir. Sonuç olarak tekne üzerine gelen toplam kuvvet ve momentler akışkan kaynaklı basınç ve sürtünmedir. Gemi hareketlerinin HAD ile çözümü için kullanılan yöntem alt Bölüm 2.2 de anlatılmıştır.

2.2 Gemi Hareketlerinin HAD ile Çözümü için Kullanılan Yöntem

Bir önceki bölümde belirtildiği gibi hareketlerinin ve direncinin çözümü için geleneksel potansiyel akış metotları kullanılmayıp türbülans ve viskoz etkilerin de göz önüne alındığı body-attached mesh algoritması çözüm için kullanılmıştır. Javanmardi vd. [45] yapmış oldukları çalışmada trimaran sınıfı bir teknenin hareketlerini bu yöntemi kullanarak modellemişler ve elde ettiği sonuçları deneysel verilerle karşılaştırdıklarında kullanılan bu yöntemin potansiyel metodlara göre daha iyi sonuç verdiğini gözlemlemişlerdir. Panahi vd. [46] çalışmalarında katamaran sınıfı bir teknenin zamana bağlı olarak yunuslama hareketini incelemişler ve elde ettikleri sonuçları deneysel verilerle ve SPH (Smooth particle Hydrodynamic) ile elde edilen sonuçlarla karşılaştırmışlardır. Bu çalışmada Panahi vd. [46] body-attached ağ algoritmasının deneysel verilerle karşılaştırıldığında SPH yöntemine göre daha güvenilir olduğunu belirlemişlerdir. Body-attached mesh algoritmasına göre yapılan çözümün aşamaları Şekil 2.3’de gösterilmiştir.

Kullanılan bu yöntemde akış içerisinde bulunan cisim dönme ve öteleme hareketini hesaplama hacmi ile birlikte gerçekleştirmektedir ve hesaplama hacmi katı bir cisim gibi davranmaktadır. Şekil 2.4’de iki farklı zaman adımıda meydana gelen dönme hareketi gösterilmiştir.

Şekil 2.3 ve Şekil 2.4 incelendiğinde hareket sistemini çözmek için ek su kütlesi ve sönüm katsayısı değerlerine ihtiyaç duyulmamaktadır. Dönme ve öteleme hareketleri hesaplama hacminin tamamı döndürülerek ve ötelenerek gerçekleştirilmektedir.

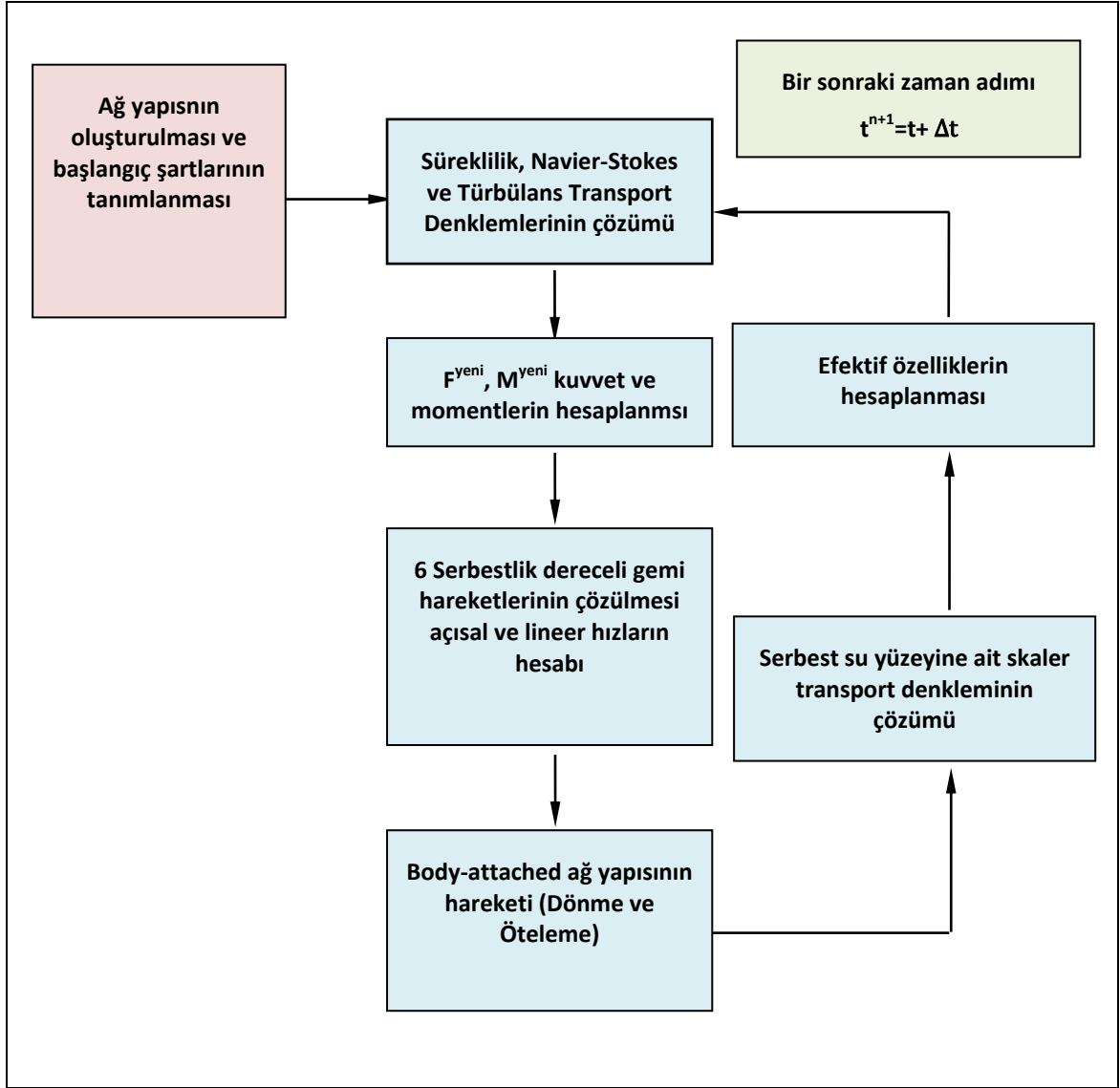
Her bir zaman adımıda yerdeğiştirmelerin hesap edilebilmesi için gövde üzerine gelen toplam kuvvet ve momentlerin bilinmesi gerekir. Yukarıda da belirtildiği gibi akış viskoz olup türbülanslıdır, kuvvet ve momentler aşağıda verilen formüller kullanılarak hesaplanır [47].

Basınç kuvveti:

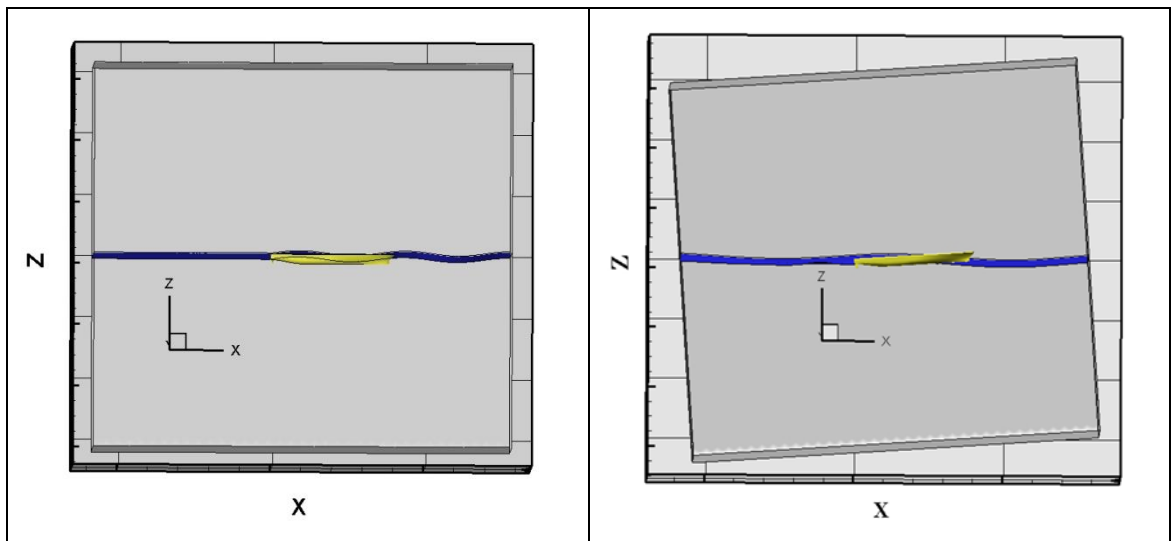
$$F_p = \sum_f p_f a_f \quad (2.5)$$

Basınç momenti:

$$M_p = \sum_f [r_f \times (p_f a_f)] \quad (2.6)$$



Şekil 2. 3 Gemi hareketlerinin HAD ile çözümü için kullanılan yöntem [46]



Şekil 2. 4 Hesaplama hacminin t^n ve t^{n+1} anlarında konumu [46]

Sürtünmeden kaynaklanan kuvvet:

$$F_{\tau} = - \sum_f \tau_f a_f \quad (2.7)$$

Sürtünmeden kaynaklanan moment:

$$M_{\tau} = \sum_f [r_f \times (\tau_f a_f)] \quad (2.8)$$

Bu kuvvetlere ek olarak yer çekimi etkisiyle meydana gelen kuvvet:

$$F_g = mg \quad (2.9)$$

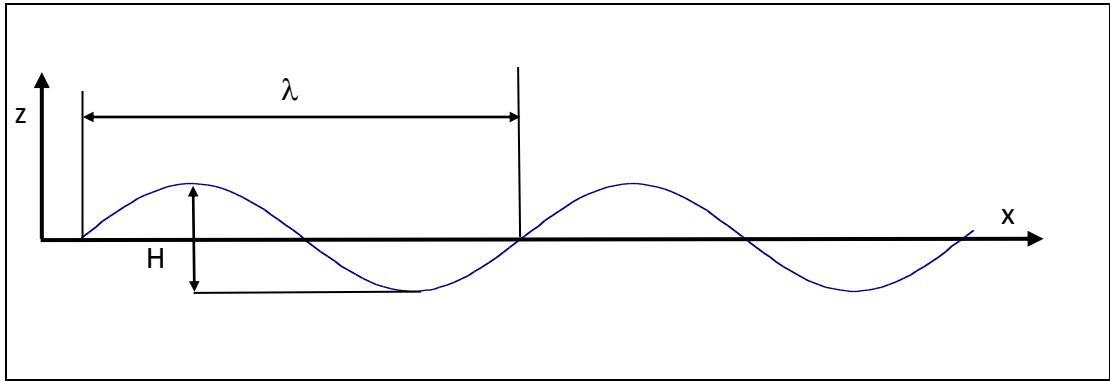
Yukarıda verilen eşitliklerde, p_f basınç olup f yüzeyine etkimektedir. f yüzeyinin alanı a_f , r_f ise f yüzeyinin tekne ağırlık merkezine olan uzaklığıdır. Her bir yüzeydeki kayma gerilmeleri τ_f ile gösterilmiştir. Tekne üzerine gelen toplam kuvvet;

$$f = F_p + F_{\tau} + F_g \quad (2.10)$$

ve toplam moment:

$$n = M_p + M_{\tau} \quad (2.11)$$

Hesaplama hacmini dolayısıyla tekne gövdesini hareket ettirebilmek için zorlayıcı bir kuvvete ihtiyaç duyulmaktadır. Sistemi zorlayıcı kuvvet olarak sinusoidal dalga formu kullanılmıştır ve kullanılan lineer dalga formu Şekil 2.5’de gösterilmiştir.



Şekil 2. 5 Sinusoidal dalga formu [29]

Bu düzenli dalganın lineer teoriye göre temel fiziksel özellikleri aşağıdaki gibidir:

Dalga boyu:

$$\lambda = \frac{gT^2}{2\pi} \quad (2.12)$$

Dalga frekansı:

$$\omega = \sqrt{\frac{2\pi g}{\lambda}} \quad (2.13)$$

Dalga periyodu:

$$T = \sqrt{\frac{2\pi\lambda}{g}} \quad (2.14)$$

Dalga hızı:

$$c = \frac{\lambda}{T} = \frac{gT}{2\pi} \quad (2.15)$$

Dalga yüksekliği:

$$H = 2\zeta \quad \zeta: \text{Dalga Genliği} \quad (2.16)$$

Dalga sayısı:

$$k_\omega = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{\omega^2}{g} \quad (2.17)$$

Dalga profili:

$$\zeta = \zeta_a \cos(kx - \omega t + \varepsilon) \quad \varepsilon: \text{Faz Farkı} \quad (2.18)$$

Hareket analizlerinin gerçekleştirilmesi esnasında başlangıç sınır şartı ve hız giriş sınır şartı için sinusoidal dalga formu tanımlanmıştır.

2.3 Karşılaşma Frekansı

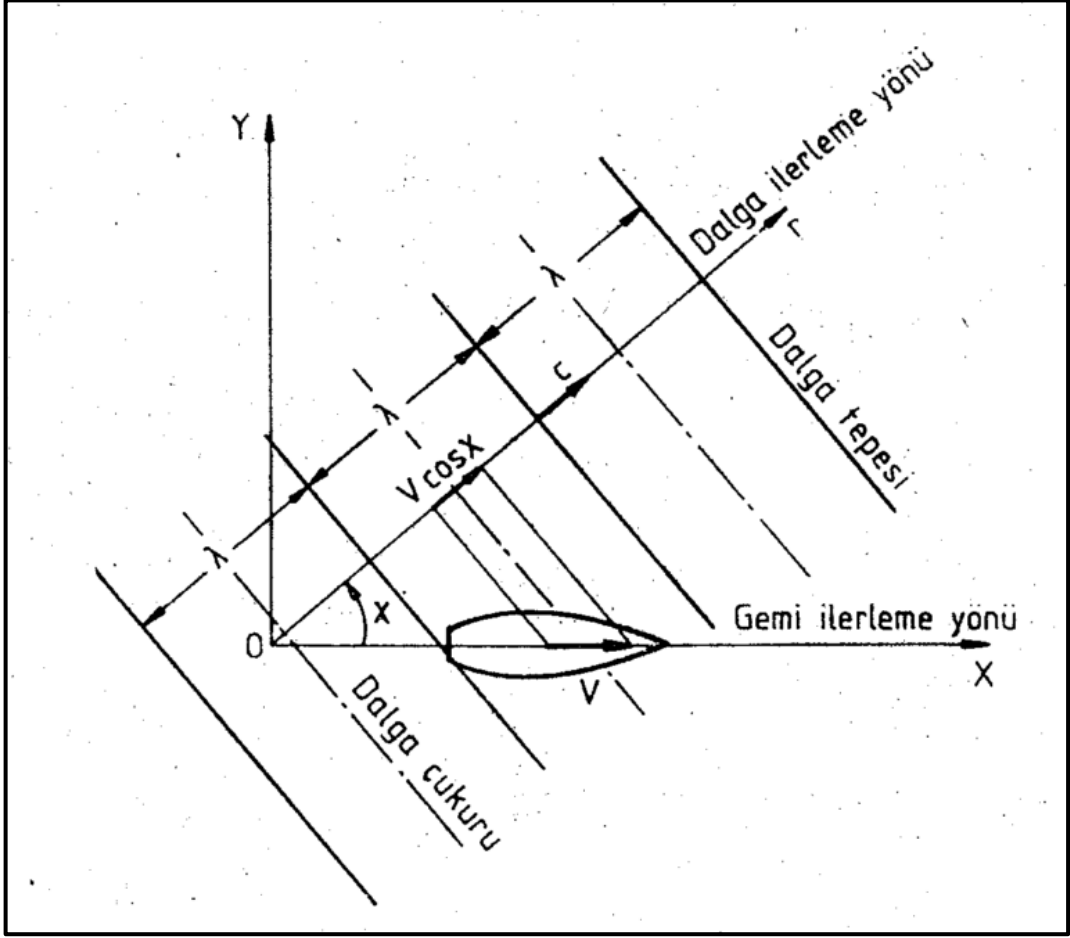
Düzgün dalgalara karşı U_c hızıyla ilerleyen bir gemi dalgalar tarafından periyodik olarak f_e karşılaşma frekansı ile zorlanır [48].

Teknenin karşılaşma frekansı dalgaların tekne üzerine geliş açısı ve hızına bağlıdır. Eğer $\chi = 0^\circ$ ise gemi dalgaları kıçtan, $\chi = 180^\circ$ ise baştan alır. Bu çalışmada tekne üzerine gelen dalgaların tekneyle yapmış olduğu açı 180° derece kabul edilmiştir. Sonuç olarak gemi baştan gelen düzenli dalgalarda harekete zorlanmıştır.

Baştan gelen düzenli dalgalarda karşılaşma frekansı aşağıdaki formülle verilmektedir:

$$f_e = \sqrt{\frac{g}{2\pi\lambda}} + \frac{U_c}{\lambda} \quad (2.19)$$

Denklemleri ile gemi hızı, dalga frekansı ve karşılaşma frekansı arasındaki bağıntı verilmiştir.



Şekil 2. 6 Dalga konvansiyonu [48]

2.4 Akışkanlar Dinamiği Denklemleri

2.4.1 Giriş

Gemi inşaatında HAD yöntemleri gemilerin hidrodinamiği ile ilgili problemlerin çözümünde günümüzde etkili bir hesaplama yöntemi olarak kullanılmaktadır. Mühendislerin esas amacı su içerisinde dalmış halde bulanık veya yüzen cisimlerin etrafındaki basınç dağılımını ve hızın üç eksenindeki bileşenlerini hesaplamaktır. Bu sayede su içerisinde hareket eden taşıtın üzerinde meydana gelen kuvvet ve momentlerin hesaplanabilmesi mümkündür [49].

Hareketin diferansiyel denklemlerini çözmek çok zordur ve ayrıca bunların genel matematiksel özellikleri hakkında çok az şey bilinmektedir. İlk olarak denklemler çözülmemiş olsalar bile akışkanın hareketini düzenleyen temel boyutsuz parametreleri ortaya çıkarırlar. Daimi akış ve sıkıştırılamaz akış kabulleri yapılırsa önemli sayıda yararlı çözümler elde edilebilir. Üçüncü ve oldukça büyük bir basitleştirme sürtünmesiz akış kabulüdür ve Bernoulli denklemini geçerli kılar ve çok çeşitli idealleştirilmiş, ya da ideal akışkan, muhtemel çözümleri sağlar.

Bu bölümde akışkan hareketini analiz etmek için akışkanlar mekaniğinin temel diferansiyel denklemleri ve türbülanslı hareketi analiz etmek için temel basitleştirme yöntemleri anlatılacaktır.

2.4.2 Navier-Stokes Denklemleri

Akışkan hareketini temsil etmek için kullanılan temel diferansiyel denklemler temel fizik kanunları kullanılarak türetilmektedirler. Bu denklemler:

- Kütlenin korunumunun diferansiyel denklemi,
- Momentumun korunumunun diferansiyel denklemidir.

En genel halde üç boyutlu sıkışamaz akım için momentumun korunumu denklemi tansörel formda aşağıdaki gibi verilmektedir [50]:

$$\rho \frac{\partial u_i}{\partial t} + \rho u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial t_{ij}}{\partial x_j} + S_i \quad (2.20)$$

Süreklilik denklemi ise:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (2.21)$$

formülleri ile gösterilir [50].

Momentum denklemindeki t_{ij} gerilme tensörünü gösterir ve aşağıdaki formülle verilir [50]:

$$t_{ij} = 2\mu s_{ij} \quad (2.22)$$

Denklem (2.22)'de μ moleküler viskoziteyi ve s_{ij} de birim deformasyonu göstermektedir [50]:

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (2.23)$$

Momentumun korunumu denklemlerinde bu formüller yerine yazılır ise kapalı formda Navier-Stokes denklemleri elde edilir [50]:

$$\rho \frac{\partial u_i}{\partial t} + \rho \frac{\partial}{\partial x_j} (u_j u_i) = - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} (2\mu S_{ij}) + S_i \quad (2.24)$$

2.5 Türbülans Modelleri

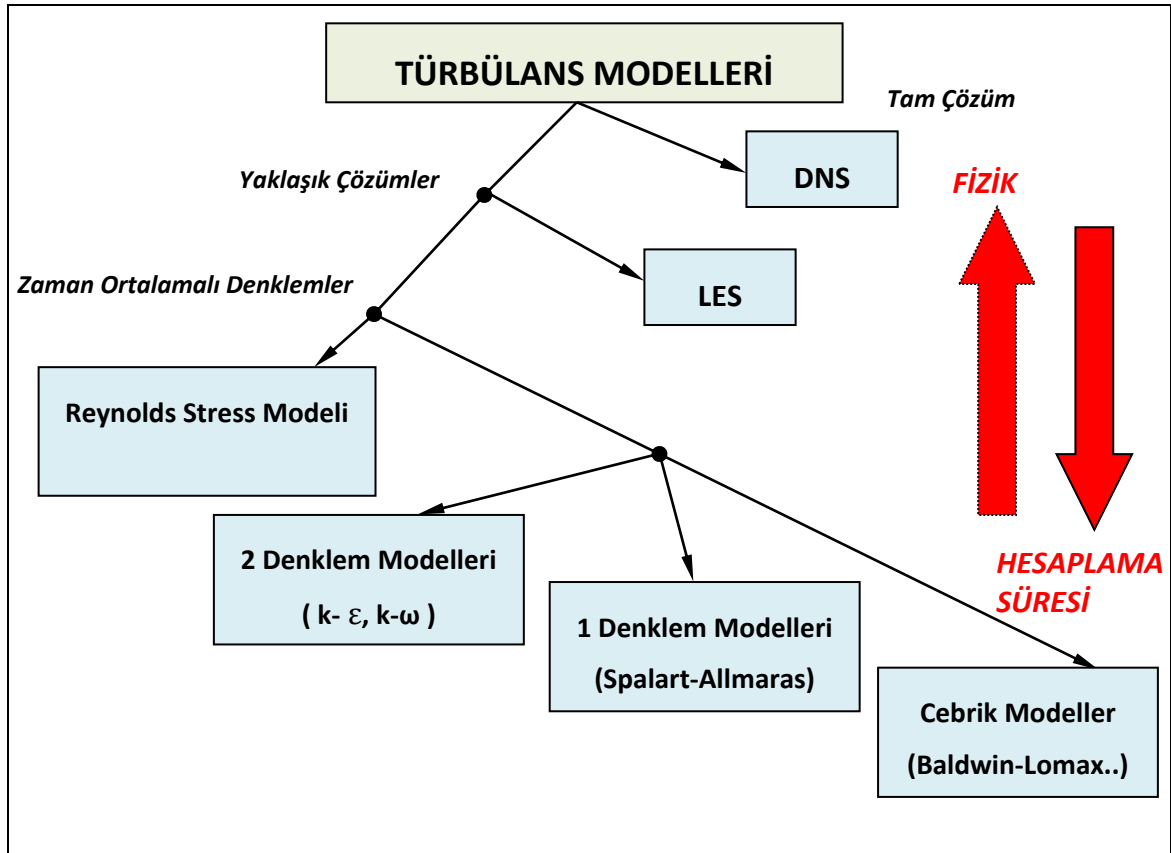
Pratikte karşılaşılan problemlerin çoğu türbülanslı akım karakteristiğine sahiptir, yani akışkan hareketi genellikle rastgele, kararsız ve üç boyutludur [49]. Akışkan için atalet kuvvetlerinin viskoz kuvvetlere oranı Reynolds sayısı ile verilir. Reynolds sayısı akışın rejimini belirlemede önemli bir rol oynamaktadır. Yüksek Reynolds sayılarında türbülanslı akış görülmeye başlanır, akışkanın hız ve basınç değerleri rastgele bir şekilde değişmeye başlar. Türbülanslı bir problemin çözümü de doğası gibi karmaşılaşır. Hareket denklemlerinin zaman ortalamasının alınması sonucunda karşımıza çıkan türbülanslı harekete ait ek terimleri ana akış terimleri cinsinden ifade etmemiz gerekir. Bu olaya türbülans modellenmesi adı verilir[49].

Bilgisayar teknolojisindeki gelişmeler türbülanslı akımları tam olarak tanımlayabilen denklemlerin sayısal olarak çözümlenmesine imkan vermeye başlamıştır. Günümüzde türbülanslı akış problemlerini tanımlamak için ne yazık ki tek bir türbülans modeli tanımlanamamıştır. Türbülans modelinin seçimi problemin doğasına ve hesaplama imkanlarına bağlıdır. Türbülans ile ilgili teori veya modeller aşağıdaki gibi gruplandırılabilir[49]:

- İstatistiksel modeller (k- ε, k-ω, Spalart Allmaras)
- Büyük-eddy benzeşimi (Large-eddy simulation-LES)
- Direkt benzeşim (DNS)

Türbülanslı akışları modellemek için henüz tek bir türbülans modeli geliştirilememiştir. Bu modellerden DNS ile yapılan çözümler sınırlı olmakla birlikte çalışmalar devam etmektedir. Pratik sanayii uygulamalarında en yaygın olarak 2 denklem modelleri kullanılmaktadır. Mevcut modellerin birbirlerine göre avantaj ve dezavantajları Şekil

2.7’de özetlenmiştir. Bilgisayarların gelişmesine paralel olarak mühendislik çözümleri için LES türbülans modeli de kullanılmaya başlanmıştır.



Şekil 2. 7 Türbülans modelleri [51]

Bu çalışmada iki-denklemler türbülans modeli olarak bilinen ve sanayi uygulamalarında yaygın olarak kullanılan k- ϵ türbülans modeli kullanılmıştır. k- ϵ türbülans modeli zaman ortalamalı Navier-Stokes denklemlerinin istatistiki olarak modellenmesiyle elde edilmiştir.

2.5.1 Zaman Ortalamalı Navier-Stokes (RANS) Denklemleri

Türbülanslı akış içerisinde verilen herhangi bir noktada, anlık hız ve tüm diğer anlık süreli özelliklerin doğrultu ve zamana göre ortalama bir değer etrafında hızla ve düzensiz olarak salındıkları gözlemlenmiştir. Türbülanslı akışın analizinin başlangıç noktası u gibi anlık bir değişkenin değerinin, değişkenin zamana göre ortalama birleşeninin U ve çalkantı birleşenlerinin u' toplamı olarak ifade edilmesine dayanır [50]:

$$u_i(x, t) = U_i + u_i'(x, t) \quad (2.25)$$

$$U_i(x, t) = \frac{1}{T} \int_t^T u_i(x, t) dt \quad (2.26)$$

Kararlı bir akışta u zamanla değişmez. Çalkantı bileşeninin ortalaması ise sıfırdır. Çalkantı bileşenlerinin ortalama değeri sıfır olmasına karşın iki çalkantı bileşeninin çarpımının neticesi olan değerlerin zamana göre ortalaması sıfır olmayacaktır.

Denklem (2.25) ile verilen hız ifadesi (2.20) ve (2.21) denklemlerinde yerine yazılıp zamana göre ortalaması alınırsa türbülanslı akıma ait “Reynolds Denklemleri” ve süreklilik denklemi elde edilebilir. Tansörel formda bu denklemler aşağıdaki gibi verilmektedir [50]:

$$\rho \frac{\partial U_i}{\partial t} + \rho U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = - \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} (2\mu s_{ij} - \rho \overline{u'_j u'_i}) + S_i \quad (2.27)$$

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0 \quad (2.28)$$

Bu denklemlerdeki türbülans çalkantı bileşenleri ile ilgili terimler “Reynolds Gerilmeleri” olarak isimlendirilirler. Aşağıda verilmiş olan ikinci dereceden tansörün toplam dokuz tane Reynolds gerilmesi vardır:

$$\tau_{ij} = -\overline{u'_i u'_j} \quad (2.29)$$

τ_{ij} Reynolds gerilme tansörü simetrik bir tansör olup RANS denklemlerinin sonucu olarak altı adet bilinmeyen özellik üretilmiştir. Normal yöndeki Reynolds-Gerilmelerinin karelerinin toplamının yarısı türbülans kinetik enerjisi olarak adlandırılır [50]:

$$k = \frac{1}{2} (\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2}) = \frac{1}{2} \overline{u'_i u'_i} \quad (2.30)$$

Türbülans şiddeti yüzde olarak [50]:

$$T' = 100 \sqrt{\frac{2}{3} \frac{k}{U_e^2}} \quad (2.31)$$

Genel bir üç boyutlu akış probleminde ortalama akışın dört ana bilinmeyen özelliği, basınç ve üç hız bileşeni bulunmaktadır. Türbülanslı akış için bilinmeyen sayısı Reynolds gerilmeleriyle beraber ona ulaşır. Bu on bilinmeyen özelliği ve Reynolds gerilmelerinin ortalama akım üzerine olan etkilerini tahmin edebilmek için çeşitli türbülans modelleri geliştirilmiştir.

2.5.2 Reynolds-Gerilme Eşitliği

Türbülanslı akış probleminin çözülebilmesi için ek denklemlere ihtiyaç duyulmaktadır. Navier-Stokes denklemlerinin çalkantı birleşenleri ile çarpılıp toplanması ve elde edilen sonucun zaman ortalamasının alınması ile Reynolds-Gerilme eşitliği elde edilir. $\mathcal{N}(u_i)$ "Navier-Stokes operatörü" olarak tanımlanırsa [50]:

$$\mathcal{N}(u_i) = \rho \frac{\partial u_i}{\partial t} + \rho u_k \frac{\partial u_i}{\partial x_k} + \frac{\partial p}{\partial x_i} - \mu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_k \partial x_k} \quad (2.32)$$

Navier-Stokes denklemi sembolik olarak aşağıdaki şekilde yazılabilir [50]:

$$\mathcal{N}(u_i) = 0 \quad (2.33)$$

Denklemlerin çalkantı birleşenleri ile çarpılıp toplanması ve elde edilen sonucun zaman ortalamasının alınması sonucunda sonuç sıfıra eşit olacaktır. Bu moment alınır ve gerekli düzenlemeler yapılır ise Reynolds-Gerilme denklemi elde edilir [50]:

$$\frac{\partial \tau_{ij}}{\partial t} + U_k \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_k} = -\tau_{ik} \frac{\partial U_j}{\partial x_k} - \tau_{jk} \frac{\partial U_i}{\partial x_k} + \varepsilon_{ij} - \Pi_{ij} + \frac{\partial}{\partial x_k} \left[\nu \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_k} + C_{ijk} \right] \quad (2.34)$$

burada;

$$\Pi_{ij} = \frac{p'}{\rho} \left(\frac{\partial u'_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u'_j}{\partial x_i} \right) \quad (2.35)$$

$$\varepsilon_{ij} = 2\nu \frac{\partial u'_i}{\partial x_k} \frac{\partial u'_j}{\partial x_k} \quad (2.36)$$

$$\rho C_{ijk} = \rho \overline{u'_i u'_j u'_k} + \overline{p' u'_i} \delta_{jk} + \overline{p' u'_j} \delta_{ik} \quad (2.37)$$

Navier-Stokes denklemlerinin daha yüksek dereceden momentleri alınarak bilinmeyen ek terimler elde edilebilir. Çıkarılan (2.34) denklemi türbülans kapama probleminin temelini oluşturur.

2.5.3 Türbülans Kinetik Enerjisi Transport Denklemi

Türbülanslı akışa ait ana akımın kinetik enerji denklemi ilk olarak Tennekes ve Lumley [52] tarafından önerilmiş olup (2.34) denkleminde $i=j$ yazılması ile elde edilir:

$$\frac{\partial k}{\partial t} + U_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \tau_{ij} \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \varepsilon + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\nu \frac{\partial k}{\partial x_j} - \frac{1}{2} \overline{u'_i u'_i u'_j} - \frac{1}{\rho} \overline{p' u'_j} \right) \quad (2.38)$$

Eşitliğin sol tarafındaki birinci terim k' 'daki değişim miktarını, ikinci terim konveksiyonla k' 'nın taşınımını göstermektedir. Sağ taraftaki terimler ise sırasıyla türbülans üretimini, k' 'nın kayıp miktarını, viskoz gerilme etkisiyle k' 'nın taşınımı, Reynolds gerilme etkisiyle k' 'nın taşınımı ve basınç etkisiyle k' 'nın taşınımıdır. Transport denkleminde ε ile viskoz kayıp terimi gösterilmiştir:

$$\varepsilon = \nu \frac{\partial u'_i}{\partial x_k} \frac{\partial u'_i}{\partial x_k} \quad (2.39)$$

Viskoz kayıp terimi k denkleminde negatif katkıda bulunmaktadır. Türbülans kinetik enerji denkleminde esas kayıp terimidir. Denklem (2.30) sıkışamaz akıma ait türbülansın kinetik enerji denklemdir. Bu çalışmada incelenen problemlerde akışkan sıkışamaz olup, Π_{ij} ifadesi sıfıra eşit olacaktır.

2.5.3.1 Eddy-Viskozitesi Kavramı

Eddy-Viskozitesi kavramı Boussinesq tarafından ileri sürülmüş olup laminar akımdaki viskoz gerilmeler ile ilgili bir analogidir [49]. Bu yaklaşımın temelinde viskoz gerilmelerin ve Reynolds gerilmelerinin ortalama akım üzerine benzer etkilerinin olduğu kabul edilir. Sıkıştırılmaz bir akış için gerilme yer değiştirme ilişkisi aşağıdaki denklem ile verilmektedir [50]:

$$\tau_{ij} = 2\mu S_{ij} = \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (2.40)$$

Boussinesq benzer bir yaklaşım kullanarak Reynolds gerilmeleri ile ortalama hız birleşenleri için aşağıda verilen lineer bağıntıyı önermiştir [50]:

$$\tau_{ij} = 2\nu_T S_{ij} - \frac{2}{3} k \delta_{ij} \quad (2.41)$$

Denklem (2.40) ve denklem (2.41) incelendiğinde her iki denklemde de gerilme ile yer değiştirmenin birbirlerine benzer katsayılar kullanılarak bağlandığı görülmektedir.

Burada ν_T türbülans viskozitesidir. Akışkanın belirli bir özelliği olan moleküler viskozite μ 'nın aksine türbülans viskozitesi ν_T akışa ait bir özelliktir[47].

2.5.3.2 Eddy-Difüivite Kavramı

Türbülansın momentum transferiyle ilgili bir analogidir. Özellikle k-ε türbülans modelinde türbülansa ait skaler özelliklerin taşınımı için genel yaklaşım moleküler transport teoremine göre aşağıdaki gibi verilmektedir:

$$\frac{1}{2} \overline{u'_i u'_i u'_j} + \frac{1}{\rho} \overline{p' u'_j} = - \frac{\nu_T}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \quad (2.42)$$

Burada σ_k , türbülans Prandtl veya Schmidt sayısıdır. Prandtl sayısı ısı transferi, Schmidt sayısı ise kütle transferi içindir [49].

2.5.4 Standart k- ε Türbülans Modeli

Mühendislik uygulamalarında iki denklem modelleri içerisinde en popüler olan türbülans modelidir. Launder ve Spalding [53] tarafından önerilen bu model iki tane transport denklemi içermektedir. Bu denklemlerden bir tanesi türbülans kinetik enerjisi k diğeri ise viskoz kayıp terimi ε için yazılır. Bu iki değer akış içerisinde verilmiş herhangi bir noktanın hız ölçeğini ve uzunluk ölçeğini tanımlamak için kullanılır[53].

Viskoz sönüm katsayısı ε gibi benzer türbülans özelliklerine ait transport denklemleri de Navier-Stokes denklemlerinden elde edilebilir. Navier-Stokes denklemlerinde aşağıda verilen moment alma işlemi uygulanır ise [50]:

$$2\nu \frac{\partial u'_i}{\partial x_j} \frac{\partial}{\partial x_j} [N(u_i)] \quad (2.43)$$

Ara işlemlerin yapılmasından sonra viskoz sönüm katsayısı için transport denklemi:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + U_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = & 2\nu [\overline{u'_{i,k} u'_{j,k}} + \overline{u'_{k,i} u'_{j,k}}] \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - 2\nu \overline{u'_k u'_{i,j}} \frac{\partial^2 U_i}{\partial x_k \partial x_j} - 2\nu \overline{u'_{i,k} u'_{l,m} u'_{k,m}} - \\ & 2\nu^2 \overline{u'_{i,k,m} u'_{l,k,m}} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\nu \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} - \nu \overline{u'_j u'_{i,m} u'_{l,m}} - 2 \frac{\nu}{\rho} \overline{p'_{,m} u'_{j,m}} \right] \end{aligned} \quad (2.44)$$

Yukarıda verilmiş olan denklem türbülansın kinetik enerjisi için elde edilen denkleme göre daha karmaşıktır. Hız ve basıncın çalkantı bileşenleri için iki ve üç katlı ek bilinmeyen terimler görülmektedir. Bu terimleri deney ile tam doğru bir şekilde ölçmek mümkün değildir. Bu durum istatistiki yaklaşımların kullanılmasını zorunlu kılmaktadır.

(2.38) ile verilen kinetik enerji denkleminde (2.41) ve (2.42) denklemleri yerine yazılır ise standart k- ε türbülans modelinin kullandığı transport denklemi elde edilir [50]:

$$\frac{\partial k}{\partial t} + U_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \varepsilon + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\nu + \frac{\nu_T}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \quad (2.45)$$

Viskoz sönüm katsayısı için transport denklemi [50]:

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + U_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} \tau_{ij} \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - C_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\nu + \frac{\nu_T}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] \quad (2.46)$$

Kinematik eddy viskozitesi [50]:

$$\nu_T = C_\mu k^2 / \varepsilon \quad (2.47)$$

Transport denklemlerinde kullanılan kapama katsayıları [50]:

$$C_{\varepsilon 1} = 1.44, C_{\varepsilon 2} = 1.92, C_\mu = 0.09, \sigma_k = 1.0, \sigma_\varepsilon = 1.3 \quad (2.48)$$

$$\omega = \varepsilon / (C_\mu k), l = C_\mu k^3 / \varepsilon \quad (2.49)$$

2.5.5 Duvar Fonksiyonu (Wall Function)

Gerçekleştirilen deneyler sonucunda duvar yakınında türbülanslı akışa ait hız profili Şekil 2.8’de gösterilmiştir. Şekil 2.8’de verilen hız profili incelendiğinde 3 farklı akış bölgesi görülmektedir.

Viskoz bölge $0 < y^+ < 5$ arasında bulunan bölge olup atalet kuvvetleri ihmal edilebilir. Laminer akış geçerlidir. Bu bölgede;

$$u^+ = y^+ \quad (2.50)$$

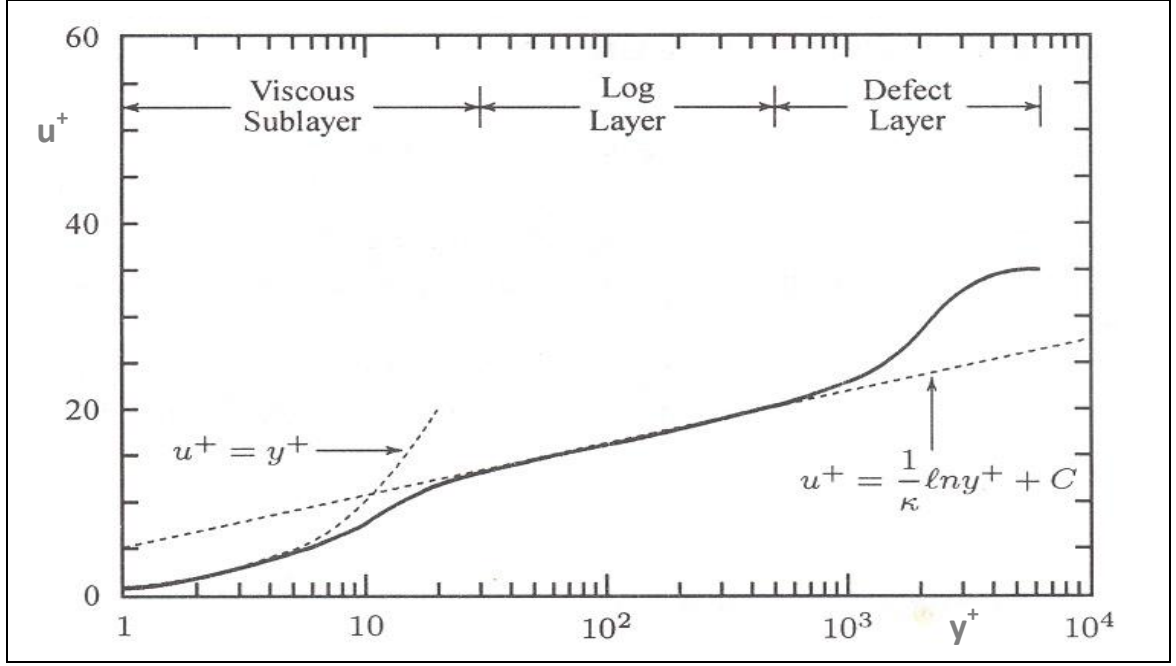
Koşulu geçerlidir.

Geçiş bölgesi $5 < y^+ < 30$ arasında değişen bölge olup geçiş bölgesi olarak da bilinmektedir. Türbülans ve laminer akış özellikleri birlikte geçerlidir ve bu bölge için henüz herhangi bir fonksiyon geliştirilmemiştir.

Logaritmik bölge $30 < y^+ < 300$ arasında bulunan bölge olup türbülans özelliklerinin baskın olduğu bölgedir ve;

$$u^+ = \frac{1}{\kappa} \ln y^+ + C \quad (2.51)$$

denklemi geçerlidir. Burada $\kappa = 0.41$ Karman sabitidir ve pürüzsüz yüzeyler için $C = 5.0$ dır.



Şekil 2. 8 Türbülanslı sınır tabaka içerisinde meydana gelen hız profili [50]

Denklem (2.50) ile verilmiş olan boyutsuz büyüklükler aşağıdaki formüllerle ifade edilir [50]:

$$y^+ = \frac{yu^*}{\nu} \quad (2.52)$$

$$u^+ = \frac{u}{u^*} \quad (2.53)$$

Burada, y oluşturulan ağ yapısında duvara en yakın olan hacim elemanının merkezinin duvar normal doğrultusundaki uzaklığı, ν kinematik viskozite, u duvara en yakın noktadaki ağ elemanının duvara paralel doğrultudaki hız bileşeni, u^* referans hız değeridir ve aşağıdaki formülle ifade edilir;

$$u^* = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}} \quad (2.54)$$

Burada τ_w duvar üzerinde meydana gelen kayma gerilmesini göstermektedir. Geliştirilen türbülans modellerinin duvar yakınında çözülmesi uygun görülmemiş olup duvar üzerinde meydana gelen akışları modellemek için ek formülasyonlar geliştirilmiştir. Geliştirilen bu formüller standart duvar fonksiyonu ile karıştırılmamalıdır. Mevcut üç farklı duvar fonksiyonu bulunmaktadır ve bunlar:

- Yüksek y^+ değerleri için kullanılan duvar fonksiyonu türbülanslı bölge için geçerlidir. Bu fonksiyonun kullanılması durumunda duvar üzerinde $y^+ > 30$ olmalıdır.
- Düşük y^+ değerleri için geliştirilen duvar fonksiyonu kullanılan ağ yapısının viskoz alt tabaka için yeterli çözümü vermesi durumunda geçerlidir ve düşük Rn sayıları için tanımlanmıştır. Bu fonksiyonunun kullanılması durumunda $y^+ \leq 5$ şartı sağlanmalıdır.
- Yüksek-Düşük y^+ değerleri için geliştirilen bu fonksiyon tüm Rn sayıları için geçerlidir.

İlk verilen fonksiyon kullanılması durumunda oluşturulan ağ yapısına ait ilk grid noktasının logaritmik bölgede olması gerekir ve bu yöntem kullanılan ağ sayısından tasarruf etmemizi sağlar. İkinci fonksiyon için viskoz tabaka da kullanılan ağ yapısının yeterli çözünürlüğü sağlaması gerekir ve bu durumda kullanılan ağ sayısı artacaktır. Bu çalışmada yüksek ve düşük Rn sayıları için geçerli olan duvar fonksiyonu kullanılmıştır ve analiz sonunda elde etmemiz gereken y^+ değerlerinin logaritmik bölgede veya viskoz bölgede olması gerekmektedir.

Analizlerde yüksek ve düşük y^+ değerleri için aşağıda verilen formülasyon kullanılmıştır:

$$u^* = \sqrt{g\nu/y + (1 - g)C_\mu^{1/2}k} \quad (2.55)$$

Verilen bu denklemde k türbülans kinetik enerjisini göstermektedir. g fonksiyonu ise aşağıdaki formüllerle ifade edilmiştir:

$$g = \exp\left(-\frac{Re_y}{11}\right), Re_y = \sqrt{k}y/\nu \quad (2.56)$$

2.5.6 Serbest Su Yüzeyi Volume of Fluid (VOF) Modeli

RANS denklemleri kullanarak serbest su yüzeyinin modellenebilmesi için günümüzde iki yaklaşım metodu yaygın bir şekilde kullanılmaktadır: ara yüz takibi (interfacetracking) ve ara yüz korunumu (interfacecapturing)

Ara yüz takibi metotlarında serbest su yüzeyi deformasyonlarının bulunduğu bölgelerdeki ağ yapıları deformasyonun durumuna göre yeniden şekillenir. Ağ yapılarında meydana gelen bu deformasyonların sonunda serbest su yüzeyi elde edilir. Ara yüz korunumu yönteminde ise ağ yapılarında herhangi bir bozulma olmaz.

Ağ yapılarının her zaman adımında yeniden şekillendirilmesi sırasında karmaşık geometriye sahip tekne formları için negatif hacme sahip veya çarpıklık oranı yüksek elemanlar meydana gelecek bu durum analiz sonucunu olumsuz yönde etkileyecektir. Ara yüz korunumu yönteminde dalga deformasyonlarının meydana geldiği bölgede akışı kontrol eden denklemler akışın her zaman adımı için yeniden şekillenir ve ağ yapısında herhangi bir değişiklik olmaz. Ağ yapısında deformasyonun meydana gelmemesi bu yöntemin en büyük avantajıdır. Gerçekleştirilen analizlerde ara yüz korunumu yöntemlerinden olan VOF modeli kullanılmıştır.

VOF modeli birbiri içerisine nüfuz etmeyen çift fazlı akış problemleri için yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Her bir hücre için akış özellikleri her iki fazın ortak özelliği olarak tanımlanır ve her iki fazın konumunu bilindiği kabul edilir. Tanımlanan herhangi bir hücre için akış özellikleri fazlardan herhangi birine bağlı olabileceği gibi her iki fazın karışımına da bağlı olabilir. Başka bir deyişle 1. fazın hücrede bulunma oranı α ile tanımlanır ise aşağıda verilen üç durum tanımlanabilir:

- $\alpha = 0$ ise; hücre boştur, bu hücrede 1. akışkan bulunmaz,
- $\alpha = 1$ ise; hücre doludur, bu hücre de tamamen 1. akışkan bulunur,
- $0 < \alpha < 1$ ise; hücre de 1. akışkan ile beraber iki veya daha fazla akışkan bulunmaktadır.

Şekil 2.9'da VOF model yaklaşımında kullanılan α büyüklüğünün faz dağılışı gösterilmiştir.

Birinci faz	0.0	0.0	0.0	0.0
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.47	0.32	0.09	0.0	0.0
1.0	1.0	0.94	0.90	0.74
1.0	1.0	1.0	1.0	ikinci faz

Şekil 2. 9 Kontrol hacimleri üzerinde meydana gelen faz dağılımları [46]

Herbir hücre için hesaplanan α lokal değerleri kullanılarak o hücreye ait akışkan özellikleri belirlenir. α büyüklüğünün hücreler üzerindeki faz dağılımlarının belirlenebilmesi için akışı yöneten denklemlere ek olarak 1 adet transport denkleminin çözülmesi gerekmektedir [46]:

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\alpha \vec{u}) = 0 \quad (2.57)$$

Yukarıda verilen transport denkleminin çözülmesinin ardından her bir hücreye ait efektif özellikler tanımlanır (yoğunluk ve kinematik viskozite) akışın çift fazlı olduğu kabul edilirse [46]:

$$\rho_{\text{eff}} = \alpha \rho_1 + (1 - \alpha) \rho_2 \quad (2.58)$$

$$\nu_{\text{eff}} = \alpha \nu_1 + (1 - \alpha) \nu_2 \quad (2.59)$$

Momentum denklemi ve süreklilik denklemleri denklem (2.40) ve denklem (2.41)'de elde edilen efektif özellikler kullanılarak çözümlenir.

2.6 Kullanılan Hesaplamalı Analiz Yöntemi

Akışkan hareketini tanımlayan kısmi diferansiyel denklemleri bilgisayarlar yardımıyla sayısal olarak çözmemiz mümkündür. Kısmi diferansiyel denklemlerin sayısal olarak

özölmesi için bu denklemlerin ayrılaştırılması gerekmektedir. Matematiksel olarak kullanılan temel ayrılaştırma yöntemleri şunlardır:

- Sonlu farklar yöntemi,
- Sonlu elemanlar yöntemi,
- Sonlu hacimler yöntemi,
- Sınır elemanları (Panel method) yöntemi.

Bu yöntemler ayrıntılı bir şekilde Versteeg ve Malalasekera [54], Smith [55], Patankar [56], Katz ve Plotkin [57] tarafından verilmiştir. Yukarıda verilen ilk üç yöntem matematiksel olarak birbirlerine çok yakın yöntemler olup değişik mühendislik uygulamalarında kullanılmaktadırlar. Sınır elemanları yöntemi aerodinamik ve hidrodinamikçiler tarafından potansiyel akış uygulamalarında kullanılıp akışkanlar mekaniğinde viskoz akışın etkili olduğu problemlerin çözümünde sonlu hacimler yaklaşımı günümüzde en popüler yöntemdir. Bu çalışmada FLUENT ve STAR CCM+ yazılımları kullanılmış olup bu yazılımlarda iki farklı sayısal çözücü bulunmaktadır [58]:

- Segregated çözücü,
- Coupled çözücü.

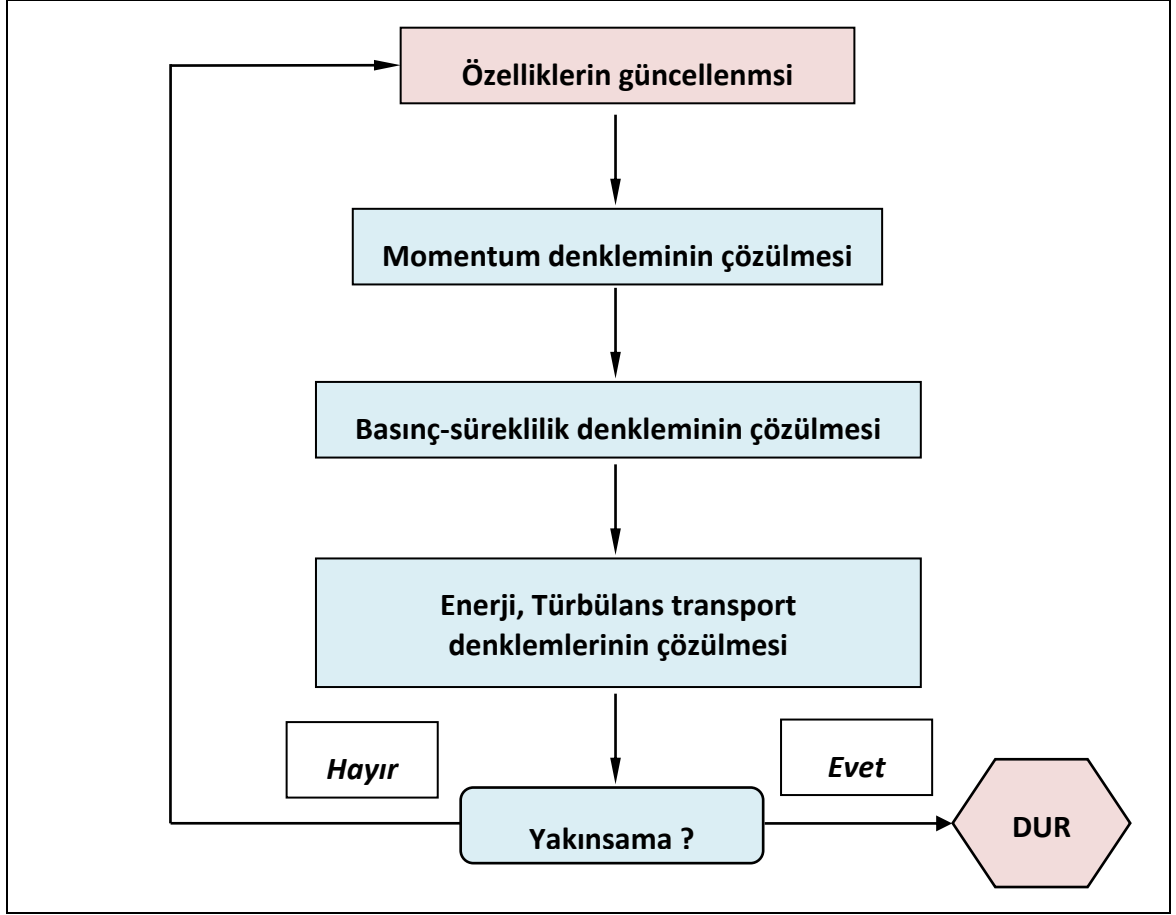
Bu yöntemlerden herhangi bir tanesinin kullanılması durumunda ticari yazılımlar akışkan hareketini tanımlayan süreklilik, momentumun korunumu veya diğer skaler özellikler için tanımlanmış olan transport denklemlerini çözerler. Her iki çözücüde ayrılaştırma işlemlerini sonlu hacimler metoduna göre gerçekleştirirler. Bu çalışmada Segregated çözüm yöntemi kullanılmıştır. Kullanılan denklemler ve çözüm yöntemi tanıtılırken problem 2D olarak ele alınmıştır ve 3D analizlerde de benzer formülasyonlar geçerlidir.

2.6.1 Segregated Çözüm Yöntemi

Segregated çözüm yönteminde temel diferansiyel denklemler sırayla çözölür. Bu yöntemle ait çözüm aşamaları [58]:

- Mevcut olan duruma göre akışkana ait özellikler düzeltilir. Eğer analize yeni başlanılmış ise akışkanın başlangıç özellikleri için tanımlanan değerler kullanılır,
- Mevcut olan özelliklere göre u, v ve w hızları için momentum denklemleri çözülür,
- İkinci adımda elde edilen hız değerleri süreklilik denklemini sağlamaz. Bu aşamada Süreklilik denklemleri çözülerek basınç için düzeltme değeri, basınç için elde edilen düzeltme değerlerinin yardımıyla hızlar için düzeltme değerleri elde edilir,
- Enerji, Türbülans, Radyasyon gibi skaler özelliklere ait Transport denklemleri çözülür,
- Yakınsama sağlanmamış ise birinci aşamaya geri dönülür.

Segregated çözüm algoritmasını özetleyen şematik gösterim Şekil 2.10'da gösterilmiştir. Segregated ve Coupled çözüm yöntemlerinin her ikisinde de temel denklemlerin ayrıştırılması Sonlu Hacimler Yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmektedir.



Şekil 2. 10 Segregated çözüm yönteminin şematik gösterimi [58]

2.6.2 Sonlu Hacimler Yöntemi

Sonlu hacimler yöntemi kısmi diferansiyel denklemlerin çözümünde kullanılan sayısal bir yöntemdir. Çözüm sonucunda korunumlu değişkenlerin değerleri kontrol hacmi üzerinde hesaplanır. Sonlu hacimler yönteminde kısmi diferansiyel denklem kontrol hacmi üzerinde entegre edilir. Bu hacim entegrasyonundaki diverjans içeren terimler diverjans teoremi ile yüzey entegrallerine dönüştürülür. Daha sonra bu terimler her bir sonlu hacmin yüzeyindeki akılar olarak değerlendirilir. Bir hacme giren akı miktarı ona komşu hacimden çıkan akı miktarına eşit olacağından yöntem korunumlu bir yöntemdir. Yapısal çözüm ağlarında olduğu kadar yapısal olmayan çözüm ağlarında da başarılı sonuçlar vermesi bu yöntemin bir avantajıdır [59].

2.6.3 Reynolds Transport Teoremi

Akışı yöneten denklemler incelenir ise denklemler arasında birçok ortak yön görülür. Eğer genel bir değişken olan ϕ 'yi düşünür ve bu ortak yönlerden yola çıkarsak genel bir taşınım denklemi aşağıdaki şekilde yazılabilir:

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \text{div}(\rho\phi\vec{v}) = \text{div}(\Gamma\text{grad}\phi) + S_\phi \quad (2.60)$$

Yukarıdaki denklem sonlu hacimler yönteminde hesaplama işlemi için başlangıç noktasıdır. Denklemdaki ϕ yerine 1, u, v, w, Γ için de uygun difüzyon katsayısı koyularak çözüm yapılır. Sonlu hacimler yönteminde önemli bir işlem yukarıdaki denklemin kontrol hacmi üzerinde entegrasyondur.

2.6.4 Transport Denklemlerinin Ayırıştırılması

Denklem (2.60)'ın zamana bağlı terimi ihmal edilerek kontrol hacmi üzerinden entegre edilmiş şekli aşağıdaki biçimde ortaya çıkar [54]:

$$\int \text{div}(\rho\phi\vec{v}) dV = \int \text{div}(\Gamma\text{grad}\phi)dV + \int S_\phi dV \quad (2.61)$$

Yukarıdaki hacim entegrasyonu üzerinde diverjans teoremini kullanırsak elde edilen denklem bir kontrol hacmindeki akı dengesini göstermektedir. Sol taraftaki terim net taşınım akısını, sağ taraftaki terimler ise net difüzyon akısını ve hacimdeki ϕ kaynağını gösterirler. Daha sonra elde edilen bu denklem kullanılarak ayırıştırılmış ifadeler bulunur. Denklem kontrol hacmi üzerinde entegre edilir ve diverjans teoremi uygulanırsa oluşan denklem aşağıdadır [54]:

$$\oint \rho\phi\vec{v} \cdot d\vec{A} = \oint \Gamma_\phi \nabla\phi \cdot d\vec{A} + \int S_\phi dV \quad (2.62)$$

Bu denklem kontrol hacmi üzerindeki akı dengesini göstermektedir. Eşitliğin sol tarafı net konvektif taşınımı, sağ tarafındaki ilk terim difüzif taşınımı ve sağ taraftaki ikinci terimde ϕ 'nin kontrol hacmi içerisindeki üretimini veya yıkımını göstermektedir. Denklem (2.62) hesaplama hacmi içerisinde bulunan herbir kontrol hacmine uygulanır. Herhangi bir kontrol hacmine uygulandığında:

$$\sum_f^{N_{\text{yuzey}}} \rho_f \vec{v}_f \phi_f \cdot \vec{A}_f = \sum_f^{N_{\text{yuzey}}} \Gamma_\phi (\nabla\phi)_n \cdot \vec{A}_f + S_\phi V \quad (2.63)$$

Burada;

N_{yuzey} : Hücreyi çevreleyen yüzey sayısı,

ϕ_f : f yüzeyinden konveksiyonla taşınan ϕ ,

$\rho_f \vec{V}_f \cdot A_f$: yüzeyden geçen akı miktarı,

A_f : Yüzey alanı,

$(\nabla \phi)_n$: $\nabla \phi$ 'nin yüzey normali yönündeki büyüklüğü,

V : kontrol hacmi.

olarak verilmektedir. Φ skaler büyüklüğünün hesap edilebilmesi için upwind yaklaşımı kullanılmıştır.

2.6.5 First Order Upwind Enterpolasyon Yöntemi

Analizlerde first order upwind enterpolasyon yaklaşımı kullanılmış olup bu modelde ϕ_f büyüklüğü hücre merkezlerindeki değerlere eşit olarak alınmaktadır. Problemi basitleştirmek için zamandan bağımsız olan transport denklemini bir boyutlu kabul edersek [58]:

$$\frac{d}{dx}(\rho u \phi) = \frac{d}{dx} \Gamma \frac{d\phi}{dx} \quad (2.64)$$

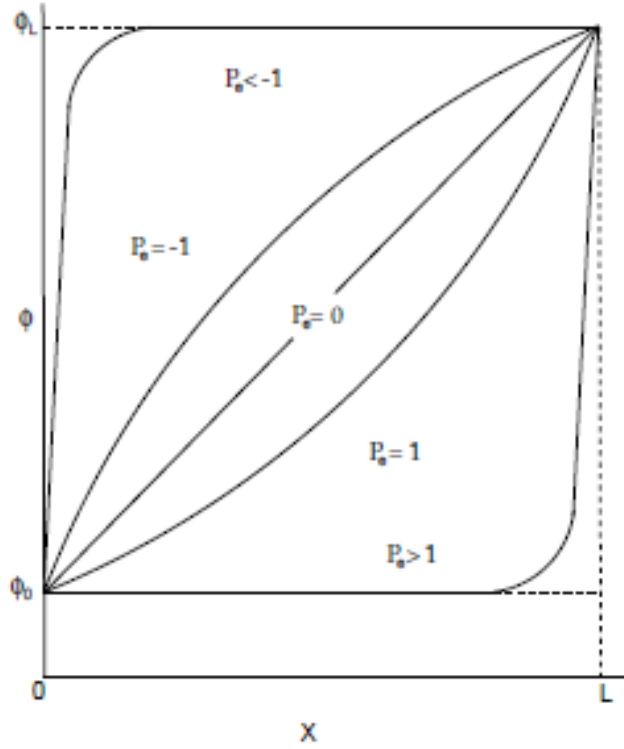
Denklem (2.64)'ün analitik olarak çözülmesi ϕ değerinin x boyunca değişimini bize verecektir [58]:

$$\frac{\phi_{(x)} - \phi_0}{\phi_L - \phi_0} = \frac{\exp(Pe \frac{x}{L}) - 1}{\exp(Pe) - 1} \quad (2.65)$$

Burada Pe Peclet sayısını göstermektedir:

$$Pe = \frac{\rho u L}{\Gamma} \quad (2.66)$$

Peclet sayısına bağlı olarak $\phi_{(x)}$ değerinin $x=0$ ve $x=L$ arasındaki değişimi Şekil 2.11'de gösterilmiştir.



Şekil 2. 11 ϕ değerinin değişik Peclet sayıları için $x=0$ ve $x=L$ arasındaki değişimi [58]

Şekil 2.11'den görüldüğü gibi büyük Peclet sayılarında $x=L/2$ de ϕ 'nin değeri hücre merkezindeki değere (upstreamvalue) eşittir. Upwind differencing yaklaşımı akışın yönünü analize dahil eder. Konveksiyon teriminde görülen ϕ değerinin hücre merkezindeki değeri akışın yönüne bağlı olarak bir sonraki hücre merkezindeki değerine eşit alınır.

2.6.6 Zamana Bağlı Çözümler

Zamana bağlı çözümlerde akışı yöneten temel denklemler hem konuma göre hem de zamana göre ayrıklaştırılır. Analizler gerçekleştirilirken temel diferansiyel denklemler her bir zaman adımında entegre edilir. Genel olarak explicit ve Implicit olmak üzere iki yöntem mevcut olup bu çalışmada Implicit çözüm algoritması kullanılmıştır. Zamana bağlı olarak değişen ϕ skaler büyüklüğünün genel denklemi [58]:

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = F(\phi) \quad (2.67)$$

İle verilmiş olsun. Zamana bağlı türev terimi ileri fark yaklaşımı kullanılarak yazılır ise:

$$\frac{\phi^{n+1} - \phi^n}{\Delta t} = F(\phi) \quad (2.68)$$

yazılabilir. Eğer $F(\phi)$ gelecek zaman adımında ki değer seçilirse [58]:

$$\frac{\phi^{n+1}-\phi^n}{\Delta t} = F(\phi^{n+1}) \quad (2.69)$$

ϕ^n değeri başlangıç olarak seçilir ise bilinmeyen ϕ^{n+1} değeri hesaplanabilir. ϕ^{n+1} ile ϕ^n arasındaki fark azalınca analiz durdurulur.

2.6.7 Navier-Stokes Denklemlerinin Ayrıklaştırılması

Skaler ϕ değerine ait transport denklemleri incelendiğinde konvektif terimin hesaplanması için lokal hız değerinin büyüklüğünün ve yönünün bilinmesi gerekmektedir. Transport denklemlerini ayrıştırırken hız büyüklüğünün bilindiği kabul edilmişti. Genel olarak hız değeri bilinmez ve bu değer hesaplanması çözümün bir parçasıdır [59].

Her yöndeki momentum eşitliklerine ait transport denklemlerinin elde edilebilmesi için Denklem (2.60)'da ϕ yerine u, v ve w yazılmasıyla elde edilen daimi laminar akışa iki boyutlu momentum denklemleri elde edilir [54]. Bu denklemlerde görülen basınç gradyanı ve kaynak terimleri mühendislik uygulamaları açısından önemlidir, ayrıca konvektif terim nonlineer olup momentum denklemlerinin çözümlenebilmesi için kaydırılmış ağ yapısı geliştirilmiştir.

Kaydırılmış ağ yapısı hız büyüklüklerinin depolandığı kontrol noktalarında basınç gradyanlarının tanımlanmasını amaçlamaktadır. İki boyutlu kaydırılmış ağ yapısı Şekil 2.12'de gösterilmiştir. Basınç büyüklüğü nodlar, hız büyüklükleri kontrol hacminin (CV) sınırları kullanılarak elde edilecektir. u hızının büyüklüğü e ve w noktalarında, v hızının büyüklüğü p ve s noktalarında depolanmış olup basınç gradyanlarının bu noktalarda elde edilmesi amaçlanmaktadır [58].

Denklem (2.70)'de p basıncın gerçek değerini, p^* tahmin edilen değeri, p' düzeltme değerini göstermektedir. Düzeltme değeri gerçek değer ile tahmin edilen değer arasındaki farktır. Benzer yaklaşım hız büyüklükleri için yapılırsa [54]:

$$u = u^* + u' \quad (2.71)$$

$$v = v^* + v' \quad (2.72)$$

$$w = w^* + w' \quad (2.73)$$

SIMPLE algoritmasının çözüm aşamaları özetlenecek olursa:

- SIMPLE algoritmasının başlangıcında bir basınç p^* alanı tahmin edilir,
- Tahmin edilen bu p^* basınç alanı ile ayrıklaştırılmış momentum denklemleri çözülür ve buna karşılık gelen hız değerleri u^*, v^*, w^* bulunur,
- Gerçek ayrıklaştırılmış denklemlerden, tahmini basınç alanını koyarak elde ettiğimiz denklemleri çıkarırsak, düzeltme hız alanını düzeltme basınç alanının fonksiyonu olarak elde edebiliriz. Bu durumu aşağıdaki şekilde gösterebilir [59]:

$$u' = g(p') \quad (2.74)$$

$$v' = g(p') \quad (2.75)$$

$$w' = g(p') \quad (2.76)$$

- Doğru hız alanı da, tahmini hız alanı ile düzeltme basınç alanına bağlı fonksiyonunun toplamı haline gelir [59],
- Buraya kadar sadece momentum denklemi ile işlemler yapıldı. Halbuki hız alanı süreklilik denklemini de sağlamalıdır. Yukarıda ulaşılan doğru hız alanı ayrıklaştırılmış süreklilik denkleminde yerine konursa düzeltme basınç alanı için bir denklem takımı oluşur. Bu denklem takımı çözülerek her bir grid noktası için düzeltme basınç değerine ulaşılır. Bundan sonra artık iterasyonun bir sonraki adımında kullanılacak basınç ve hız değerleri süreklilik ve momentum denklemleri yardımıyla bulunabilir. İterasyonlar sonucunda bulunan doğru değerler eşit ise yakınsama gerçekleşmiş doğru değerlere ulaşılmış demektir [59].

2.6.9 RANS Denklemlerinin Ayırıklaştırılması

Hesaplamalara türbülansın dahil edilmesi durumunda RANS denklemlerinin çözümü laminar akış denklemlerinin çözümüne benzemekte olup aradaki fark moleküler viskozite μ 'nın yerine moleküler viskoziteye türbülans viskozitesinin ilave edilmesiyle elde edilen efektif viskozitenin $\mu_{\text{eff}} = \mu + \mu_t$ kullanımından kaynaklanmaktadır. Bu çalışmada $k - \varepsilon$ türbülans modeli kullanılmış olup bu model kinetik enerji ve viskoz sönüm katsayısı için iki adet transport denklemi kullanmaktadır. Süreklilik ve momentum denklemlerinin çözülmesinden sonra türbülansa ait transport denklemleri çözülür. Transport denklemlerinin çözümlenmesinden elde edilen sonuçlar kullanılarak türbülans viskozitesi tahmin edilir ve moleküler viskoziteye ilave edilerek iterasyona devam edilir.

2.6.10 Zaman Adımının Belirlenmesi

Zamana bağımlı akış analizlerinin gerçekleştirilmesi esnasında en önemli aşamalardan biride zaman adımının belirlenmesidir. Analizlerde zaman adımının belirlenmesi için Courant-Frederich-Lewis (CFL) sayısı göz önüne alınmıştır. CFL sayısı Denklem (2.77) ile gösterilmiş olup ayrıntılı bilgi için Patankar ve Spalding [60], Joel ve Fergizer [61] tarafından gerçekleştirilen çalışmalar incelenebilir:

$$N_{\text{CFL}} = \frac{U\Delta t}{\Delta x} < 1 \quad (2.77)$$

Burada Δt zaman adımının büyüklüğü, Δx kullanılan ağ yapısının boyutunu, U akış hızını göstermektedir.

MODEL DENEYLERİ, MODEL DENEYİNDE ve SAYISAL ANALİZLERDE KULLANILAN TEKNE MODELLERİ

Bu doktora tez çalışması Yıldız Teknik Üniversitesi (Y.T.Ü) Bilimsel Araştırmaları Destekleme Projesi tarafından desteklenmiş olup proje kapsamında gerçekleştirilecek olan HAD analizlerinin deneysel verilerle mukayese edilebilmesi için Şener [43] tarafından tasarlanan FFG tipi savaş gemisinin direnç deneyleri İ.T.Ü Ata Nutku Gemi Model ve Deney Laboratuvarı'nda gerçekleştirilmiştir. Tekne modelinin direnç analizleri takıntılı ve takıntısız durumların herbiri için 16, toplam 32 farklı hızda gerçekleştirilmiştir. FFG tipi savaş gemisi M 367 kod numarasıyla imal edilmiştir. M 367 için hazırlanan analiz yöntemi Wigley, KCS, KVLCC2 formları kullanılarak test edilmiş ve sonuçlar literatürden elde edilen deneysel veriler ile karşılaştırılmıştır.

Tezin giriş bölümünde de belirtildiği gibi hareket analizlerinin doğruluğunun test edilebilmesi için KVLCC2 tekne formu kullanılmıştır. Bu bölümde direnç ve hareket analizlerinde kullanılan M 367, Wigley, KCS ve KVLCC2 tekne formlarının geometrik özellikleri ve M 367 için gerçekleştirilen direnç deneyleri anlatılmıştır.

3.1 Model Deneyleri

Gemi tasarımının en önemli aşaması uygun tekne su altı formunun tespiti ve bu forma bağlı olarak geminin direnç değerlerinin elde edilmesidir. Gemi tasarımında ortaya çıkan bu problem sayısal olarak veya model deneyleri yardımıyla çözülmeye çalışılır.

Bir geminin belirli bir ölçekte küçültülerek yapılan ağaç veya parafin modeli deney havuzunda değişik hızlarda çekilerek direnç sonuçları ölçülmekte ve benzerlik kanunlarından faydalanılarak, gerçek gemi direnç değerleri bulunarak sonuçta istenilen hız için, gerekli makine gücü hesaplanmaktadır. Böylece deney sonuçlarına göre, gerektiğinde gemi formundaki kusurlu kısımlar düzeltilebileceği gibi, tam ölçekli gemi haline göre ölçme ve ekonomik açıdan zorluklar da giderilmiş olur [62].

Farklı büyüklükteki cisimlerin, mekanik bir olay karşısındaki davranışlarının benzer olabilmesi koşullarını araştırmak, benzerlik ve model teorisi ile incelenmektedir [62]. İki sistemdeki (model-gemi, gemi-gemi, model-model) karşıt uzunluklar oranı sabit ise, iki sistem birbirine geometrik benzerdir. Geometrik benzer iki sistem üzerinde cisim veya akışkan üzerine gelen karşıt kuvvetler oranı eşit ise, iki sistem dinamik benzerdir [29]. Böyle bir sistemde herhangi iki kuvvetin oranı, diğer sistemde de aynı olur.

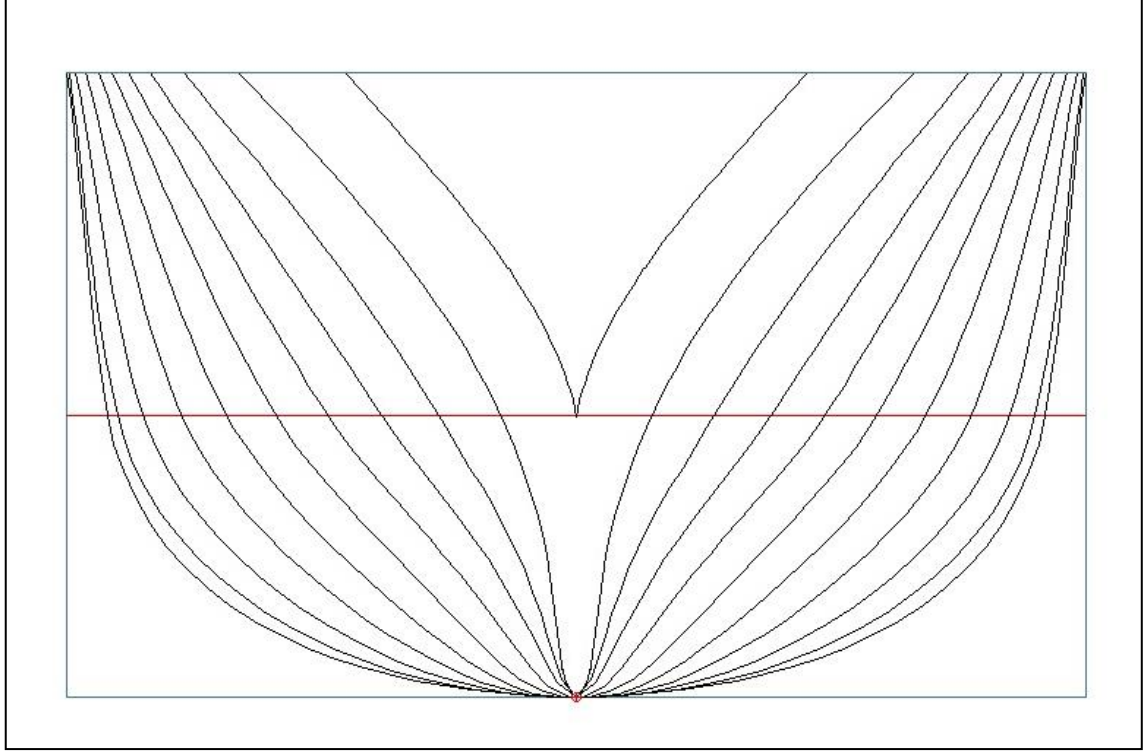
3.1.1 FFG Tipi Savaş Gemisi M 367

Bu çalışmada direnç deneyleri gerçekleştirilen M 367 formu askeri amaçlar için tasarlanmış günümüz donanmalarının asli unsuru haline gelmiş olan Firkateyn tipi savaş gemisidir. Firkateynler 2. Dünya Savaşı'ndan itibaren büyük gemileri destekleyen nispeten küçük, orta derecede silahlı refakatçi savaş gemileri olarak hizmet vermiştir. Ancak günümüzde firkateynler, korvet ve destroyer tanımlarının sınırlarının belirsizleşmesi ile çok büyük bir alanı kaplayan ve pek çok donanmanın asli unsuru haline gelmeye başlayan yüksek derecede silahlı savaş gemileri haline gelmeye başlamıştır Şener [43].

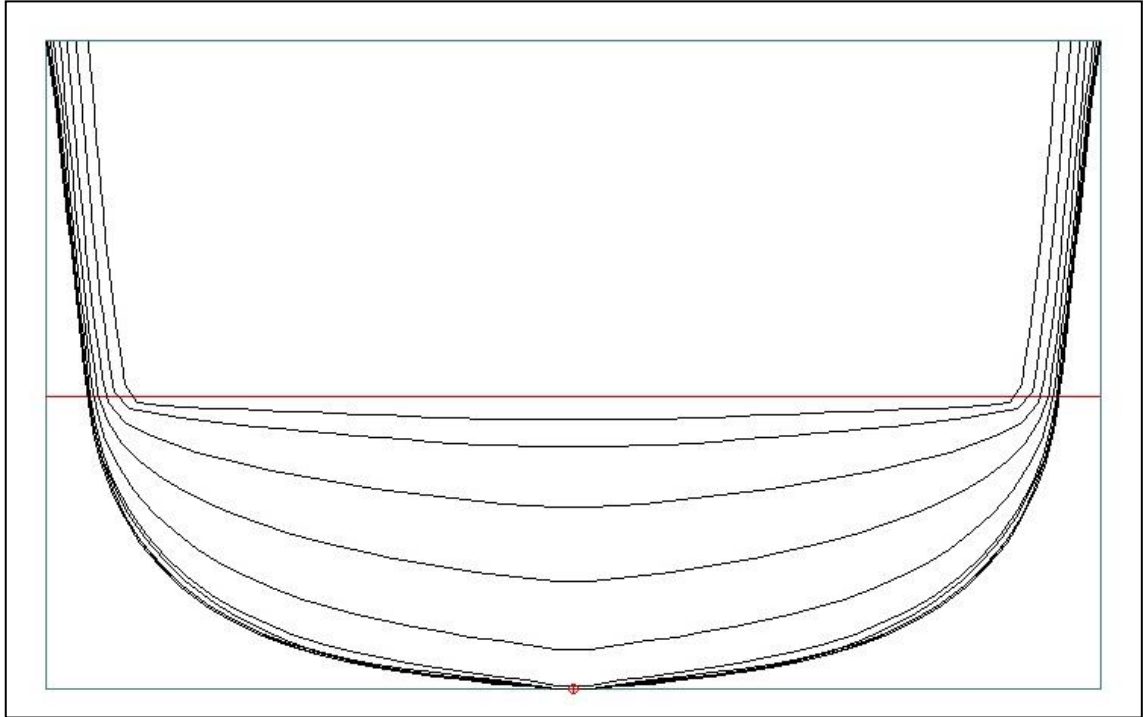
Günümüzde firkateynler 1500 tondan 6500 tonlara kadar çıkabilen, uzun menzilleriyle devriye, akın ve destek görevlerini yerine getirebilen savaş gemileridir. Firkateynler güdümlü füze taşıyıp taşımadıklarına göre ikiye ayrılırlar. (FFL-Light Frigate ve FFG-GuidedMissileFrigate) Şener [43].

DeneySEL ve HAD analizleri gerçekleştirilecek olan FFG gemisinin tasarımı Y.T.Ü Gemi İnşaatı ve Gemi Makineleri Mühendisliği Bölümü'nde Şener [43] tarafından doktora tez çalışması kapsamında gerçekleştirilmiştir. Geliştirilen tekne formunun modeli İ.T.Ü Ata Nutku Gemi Model Deney Laboratuvarı'nın model imalat atölyesinde 1/36 ölçekli M 367

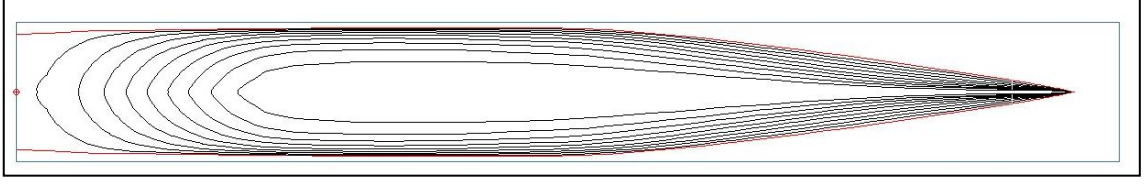
kod numarası ile imal edilmiş ve direnç deneyleri gerçekleştirilmiştir. Tekne formunun baş posta kesitleri Şekil 3.1’de, kıç posta kesitleri Şekil 3.2’de, su hatları resmi Şekil 3.3’de ve profil resmi Şekil 3.4’de verilmiştir.



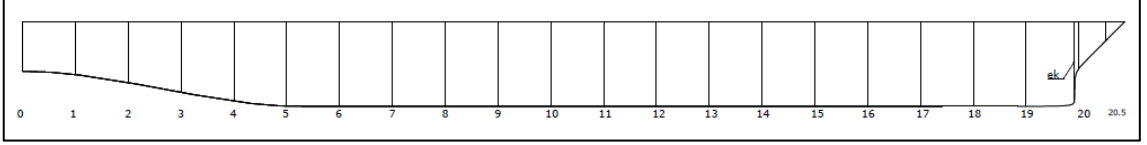
Şekil 3. 1 M 367 modelinin baş posta kesitleri



Şekil 3. 2 M 367 modelinin kıç posta kesitleri



Şekil 3.3 M 367 modelinin su hatları resmi



Şekil 3.4 M 367 modelinin profil resmi

Endaze planı Şekil 3.1-4’de verilen Fırkateynin ana ve model boyutları Çizelge 3.1’de verilmiştir. Teknenin direnç deneyleri ve HAD analizleri tekne takıntılarının var olduğu ve olmadığı durumlar için gerçekleştirilmiştir. Deneylerde ve analizlerde kullanılan takıntılar Çizelge 3.2’de gösterilmiştir.

3.1.2 Model İmalatı ve Boyutları

Ana boyutları Çizelge 3.1’de verilen M 367 kod numaralı model Ata Nutku Gemi Model Deney Laboratuvarı’nın model imalat atölyesinde 1/36 ölçekli olarak ağaçtan imal edilmiştir. Bu model tek yükleme durumunda (dizayn suhattında) direnç deneylerine tabi tutulmuştur. Hazırlanan teknenin ön imalat aşamasına resmi Şekil 3.5’de gösterilmiştir. Ön imalat resmi Şekil 3.5’de verilen modelin direnç deneyleri takıntılı ve takıntısız durumlar için gerçekleştirilmiştir. Takıntısız durumda tekne modelinin genel resmi Şekil 3.6’da, baş ve kıç resimleri Şekil 3.7’de gösterilmiştir.

Takıntı olarak şaft, braket ve şaft volanları dikkate alınmıştır. Dümen teknenin bir parçası olarak düşünülmüş ve takıntı olarak dikkate alınmamıştır. Sonuç olarak direnç deneyleri için suda takıntısız ve takıntılı durumlar için ayrı ayrı yapılmış olup model baş-kıç vurma ve dalıp çıkmaya karşı serbest, yan öteleme ve dalıp çıkmaya karşı sabitlenmiştir. Şekil 4.8’de takıntılı tekne modeline ait resimler gösterilmiştir.

Çizelge 3. 1 FFG gemisine ait ana ve model boyutları

Ölçek	1/36		
Yükleme Durumu	Dizayn	FFG Gemi	M 367 Model
Dikeyler arası boy	$L_{BP}(m)$	139	3.861
Su hattı boyu	$L_{WL}(m)$	139.07	3.863
Islak boy	$L_{WS}(m)$	139.07	3.863
Genişlik (maks)	$B (m)$	18.20	0.506
Draft (mastori)	$T (m)$	5.050	0.140
Draft (AP)	$T_A(m)$	5.050	0.140
Draft (FP)	$T_F(m)$	5.050	0.140
Yükseklik	$D(m)$	11.20	0.311
Deplasman hacmi	$\nabla(m^3)$	5768.24	0.124
Deplasman	$\Delta(ton)$	5912.45	0.124
Islak yüzey alanı	$A_{WS}(m^2)$	2442.56	1.884
Toplam dümen alanı	$A_R(m^2)$	56.46	0.043
Toplam takıntı alanı	$A_A(m^2)$	116.36	0.089
Kıç ayna alanı	$A_T(m^2)$	103.6	0.079
Blok katsayısı	C_B	0.489	0.489
Prizmatik katsayı	C_P	0.605	0.605
Orta kesit alan katsayısı	C_M	0.810	0.810
Su hattı alan katsayısı	C_{WP}	0.793	0.793
Hacim merkezinin boyuna yeri	$LCB (m)$	-7.013	-0.195
Yüzme merkezinin boyuna yeri	$LCF (m)$	-11.817	-0.328
Baş-kıç vurma jirasyon yarıçapı	K_{yy}/L_{PP}	0.25	0.25
Yan öteleme jirasyon yarıçapı	K_{zz}/L_{PP}	0.25	0.25
Yalpa jirasyon yarıçapı	K_{xx}/B	0.37	0.37
Servis hızı	$V_S(knot)$	18	3.0

Çizelge 3. 2 Takıntılar

Takıntı
Şaft
“A” Braket
Şaft Volan



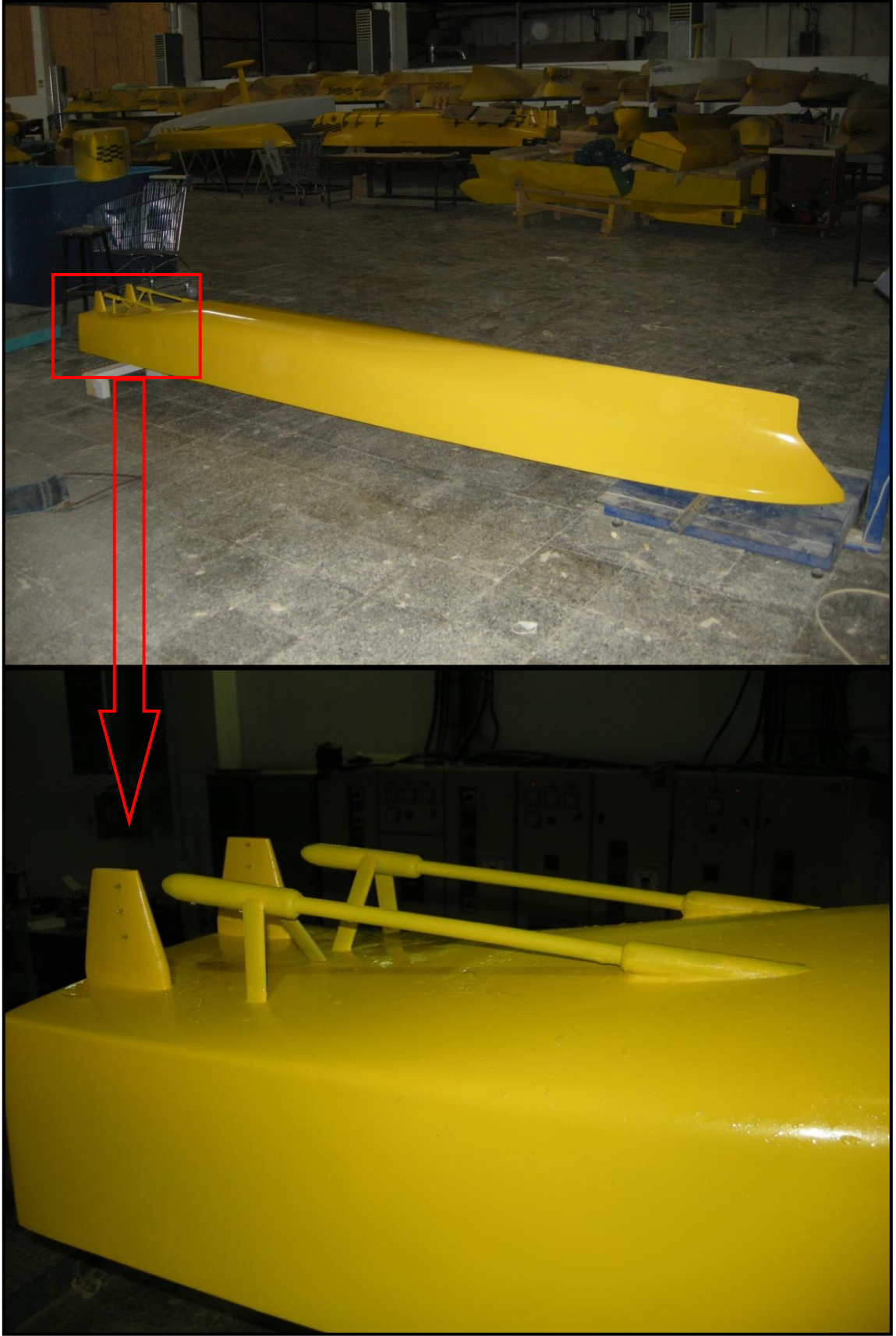
Şekil 3. 5 M 367 tekne modelinin ön imalat resmi



Şekil 3. 6 M 367 takıntısız modelin genel resmi



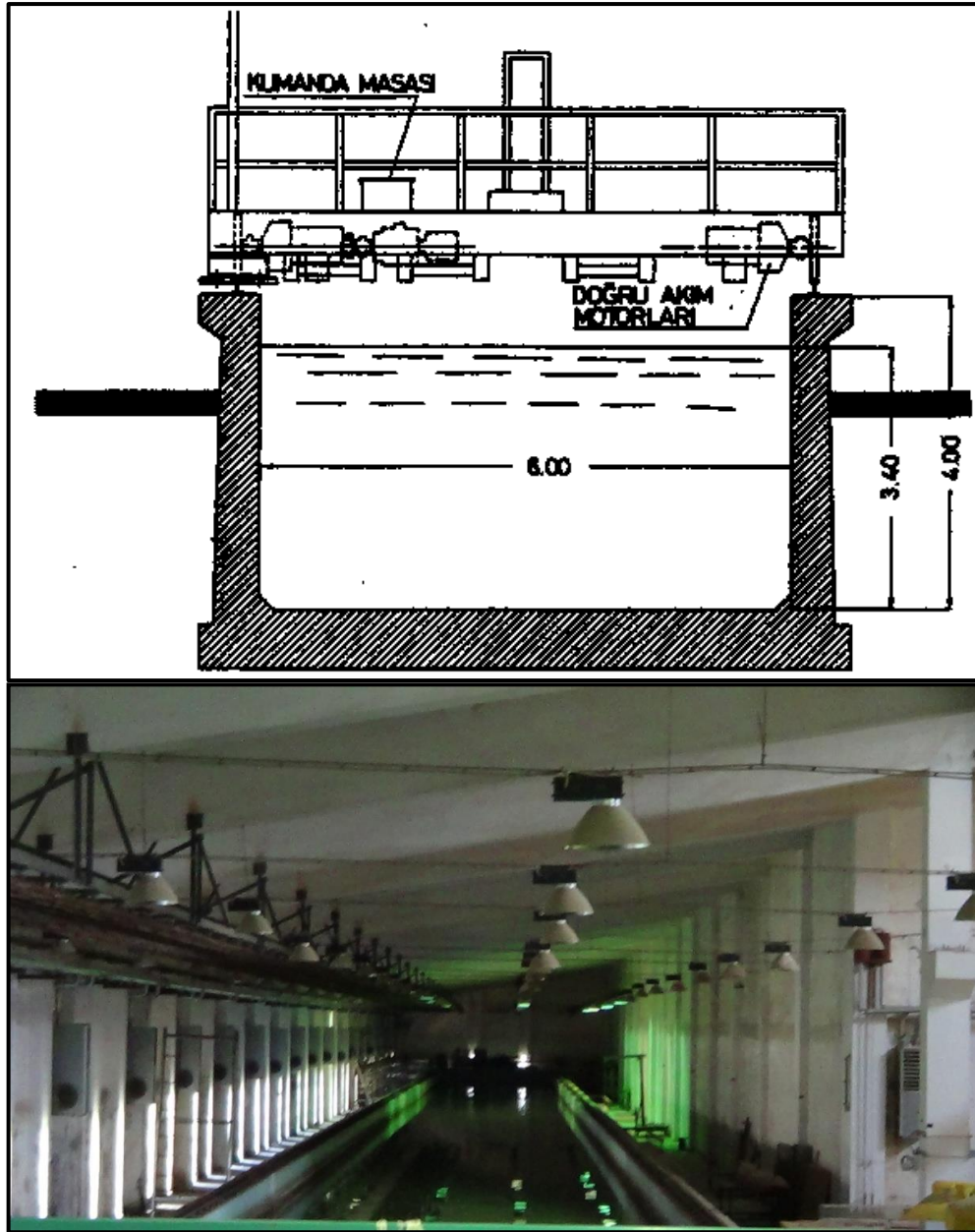
Şekil 3. 7 M 367 takıntısız modelin baş ve kıç resimleri



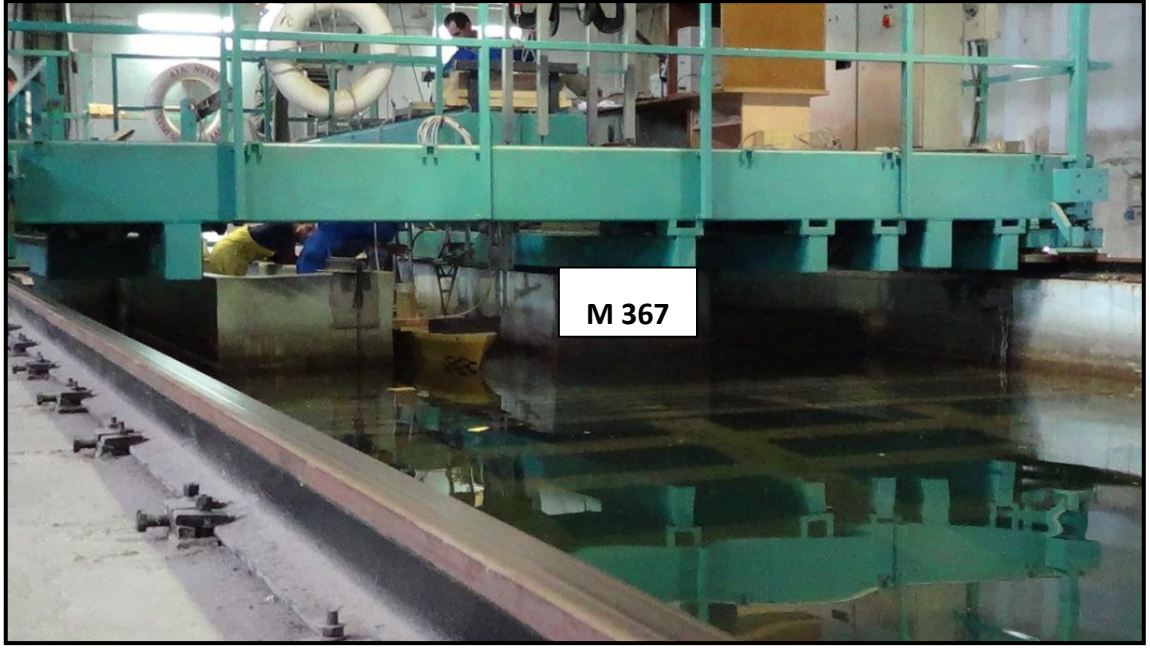
Şekil 3. 8 M 367 takınlı tekne modeli

3.1.3 Direnç Deneyleri

M 367'nin direnç deneyleri, Ata Nutku Gemi Model Deney Laboratuvarı büyük deney havuzunda yapılmıştır. Tank; 160 m uzunluğunda, 6 m genişliğinde ve 3.4 m derinliğinde olup deney tankının genel görüntüsü Şekil 3.9'da gösterilmiştir. Direnç deneyleri gerçekleştirilirken tekne modeli deney arabasına sabitlenir ve araba raylar üzerinde sabit bir hızla ilerlerken modelin direnci belirlenir. Ata Nutku deney tankında bulunan deney mürettebatı tarafından idare edilen deney arabası ve sabitlenmiş model Şekil 3.10'dan görülebilir.



Şekil 3. 9 Deney tankının şematik ve genel görünümü



Şekil 3. 10 Deney arabası ve model

Çizelge 3. 3 Deneysel çalışma ve HAD analizleri için ortam şartları

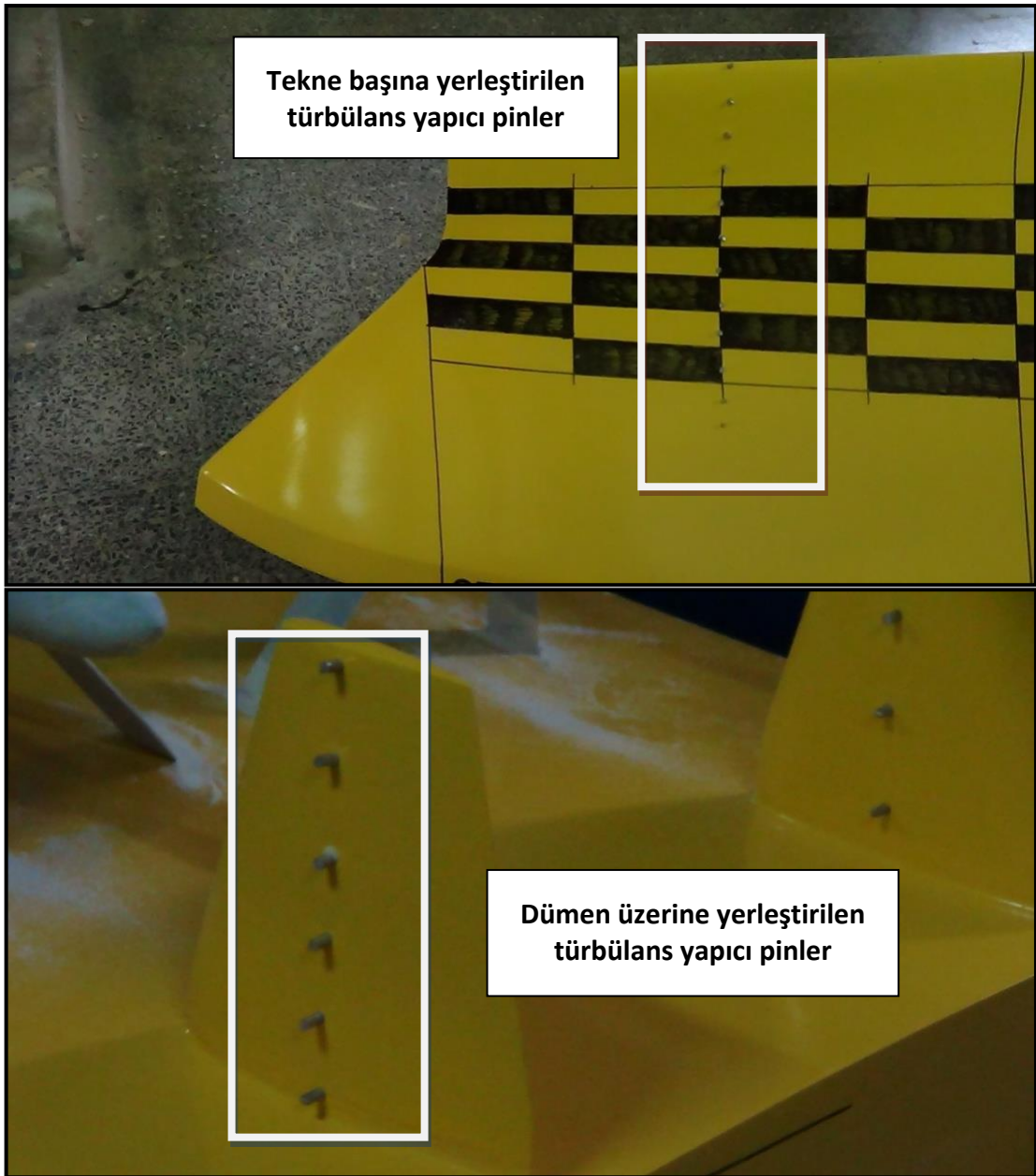
T (sıcaklık)	16	C°
Ölçek	36	-
ρ (yoğunluk)	998.9	$\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$
Tekne ıslak alanı	1.096	m ²
Toplam takıntı alanı	0.089	m ²
Su hattı boyu	3.863	m
g (Yerçekimi ivmesi)	9.80665	$\frac{\text{m}}{\text{s}^2}$
v (Kinematik viskozite)	1.10966	cSt

3.1.4 Türbülans Yapıcılar

Modellerin boy ve hızlarının küçük oluşundan dolayı, model deneyleri oldukça düşük Reynolds sayılarında yapılırlar [62]. Bu nedenle model etrafındaki akım genelde laminar, bazen de türbülanslı olur [62]. Aynı Reynolds sayısında laminar akım halinde direnç, türbülanslı halden daha az olduğundan, etrafında laminar akım olan model

deneylerinde ölçülen hız ve direnç değerlerinden yararlanıp, benzerlik kanunlarını kullanarak, bulunan geminin hız ve direnç değerleri hassas ve güvenilir olmaz [62]. Bunun için model etrafındaki laminar akımı, türbülanslı hale dönüştürecek teknikler kullanılır [62].

Teknenin direnç deneyleri gerçekleştirilirken akışın türbülanslı olması istenmiş olup akışın tam türbülanslı hale getirilebilmesi için tekne başına ve dümen bölgesine türbülans yapıcı pinler yerleştirilmiştir. Şekil 3.11’de model üzerine yerleştirilen türbülans yapıcı pinler görülmektedir.



Şekil 3. 11 Tekne başına ve dümen üzerine yerleştirilen türbülans yapıcılar

3.1.5 İz Ölçümleri ve Pitot Tüpü

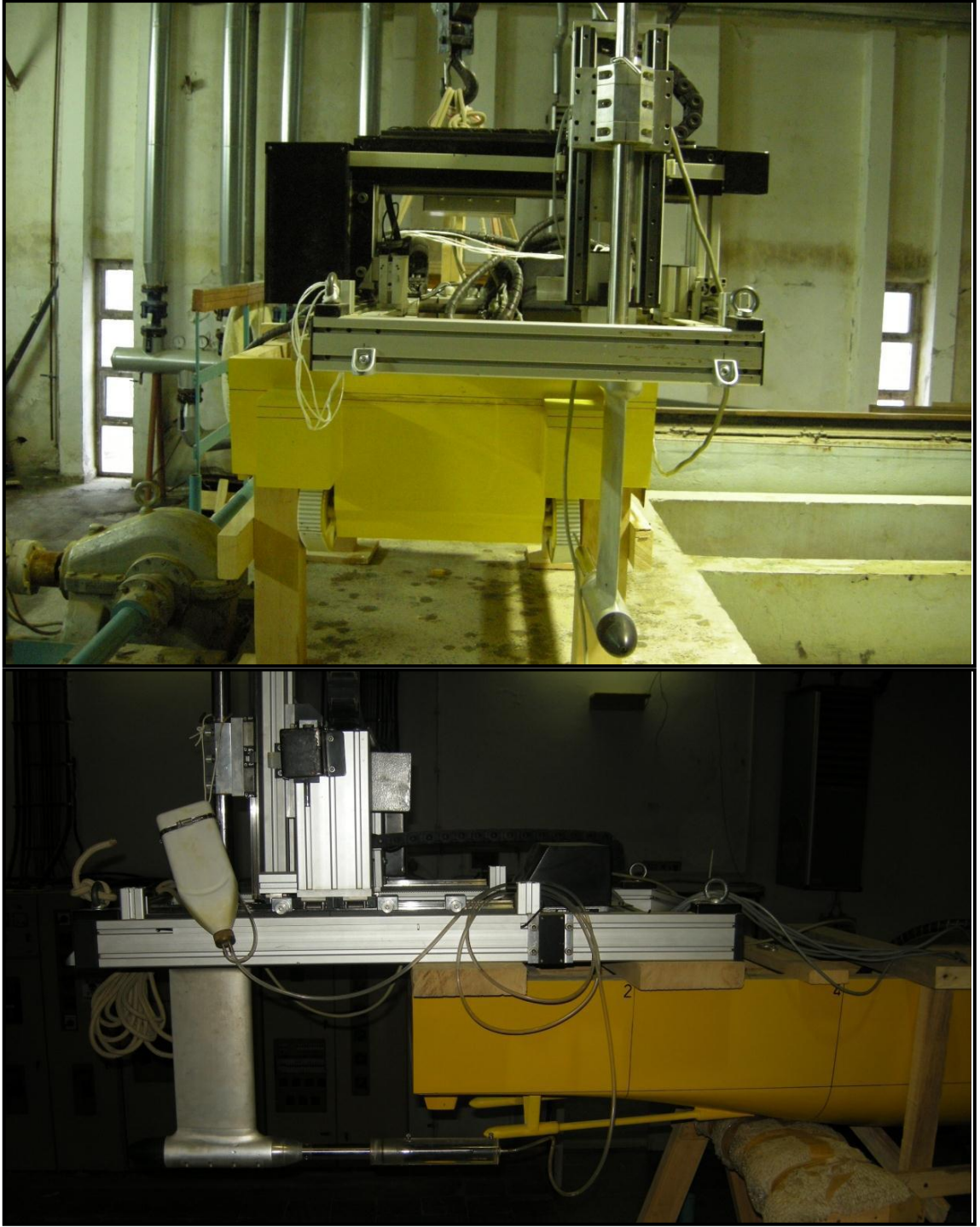
Tekne arkasında meydana gelecek iz bölgesi gemilerin formuna bağlı olup her geminin kendine özel bir iz bölgesinin olduğu söylenebilir [63]. Tekne arkasında meydana gelecek olan akımın kalitesi tekne verimi açısından hayati öneme sahiptir. İyi tasarlanmış bir formunda tekne arkasında akımın toplanması ve pervane veriminin azalmaması gerekmektedir.

Gemi arkasındaki akımın kalitesinin öğrenilmesi amacı ile Şekil 3.12’de görülen beş delikli, bilgisayar kontrollü pitot tüpü kullanılmıştır. Pitot tüpü üç ekseninde hız ölçme kapasitesine haizdir. Pervane diskindeki hızlar, 0 (üst ölü nokta) derece de 360 dereceye kadar ölçülmüştür. Sonra, üç boyutlu izin gösterimindeki standart tanımlara uygun olarak, ölçüm yarıçaplarında hız değerleri interpolate edilerek 10’ar derecelik aralıkla eksenel, teğetsel, ve radyal izler haline dönüştürülmüştür. İzin 180 derecesi alt ölü noktayı, 90 derecesi ise tekne arkasından başa doğru bakarken sancak tarafı göstermektedir.

Nominal eksenel, teğetsel ve radyal hız oranları aşağıda tanımlanmıştır:

$$\frac{V_x}{V_s}, \frac{V_t}{V_s}, \frac{V_r}{V_s} \quad (3.1)$$

Burada V_x , V_t ve V_r sırası ile eksenel, teğetsel ve radyal hızlardır. Teğetsel hız V_t , saat yönünde sancak tarafa pozitifdir. Radyal hız V_r , dışa doğru pozitifdir. İz deneyleri 30 knot gemi hızına karşılık gelen hızda ve tam yüklü dizayn su hattında gerçekleştirilmiştir.



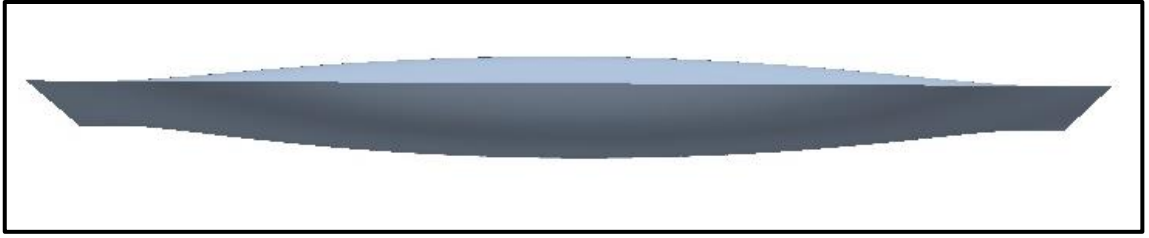
Şekil 3. 12 İz ölçümü ve pitot tüpü

3.2 Wigley Tekne Formu

Wigley matematiksel olarak tanımlanabilen bir tekne formu olup serbest su yüzeyinin ve tekne hareketinin incelenmesi probleminde test formu olarak kullanılmıştır. Wigley tekne geometrisine ait matematiksel formülasyon Denklem (3.2) ile tanımlanmıştır:

$$\frac{y}{B} = (1 - x^2/L^2)(1 - z^2/T^2) \quad (3.2)$$

Tekne modelinin 3 boyutlu CAD geometrisi Şekil 3.13’de ve boyutlarıyla beraber test şartları Çizelge 3.4’de tanımlanmıştır [63]. Şekil 3.13 incelendiğinde tekne formunun başa ve kıça göre simetrik olduğu ve yüzey eğriselliğinin az olduğu görülmektedir. Wigley akış için tasarlanmış ideal bir formdur ve günümüzde kullanılan tekne geometrileri çok daha karmaşık yapıya sahiptir. Bu çalışmada Wigley tekne formunun direnç analizleri $Fn=0.20$ ve $Fn=0.31$ Froude sayılarında gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3. 13 Wigley tekne formu ve üç boyutlu CAD geometrisi

Çizelge 3. 4 Wigley teknesine ait model boyutları

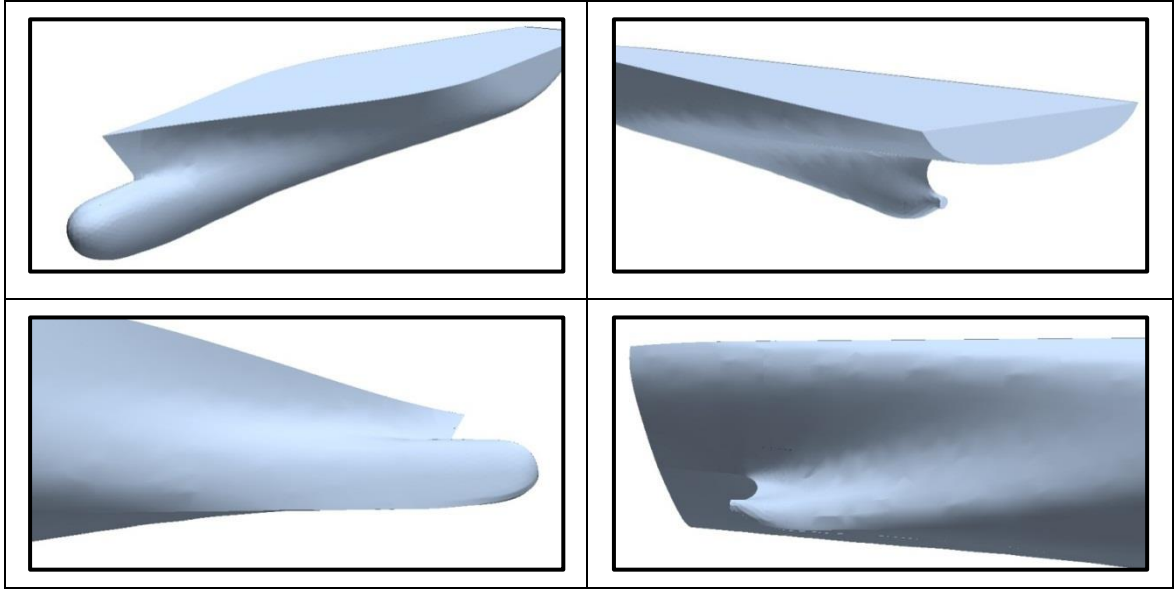
Wigley	
Ana Boyutlar	
Tekne boyu L (m)	6.096
Genişlik B (m)	L/5
Draft T (m)	T/16

3.3 KCS ve KVLCC2 Tekne Formları

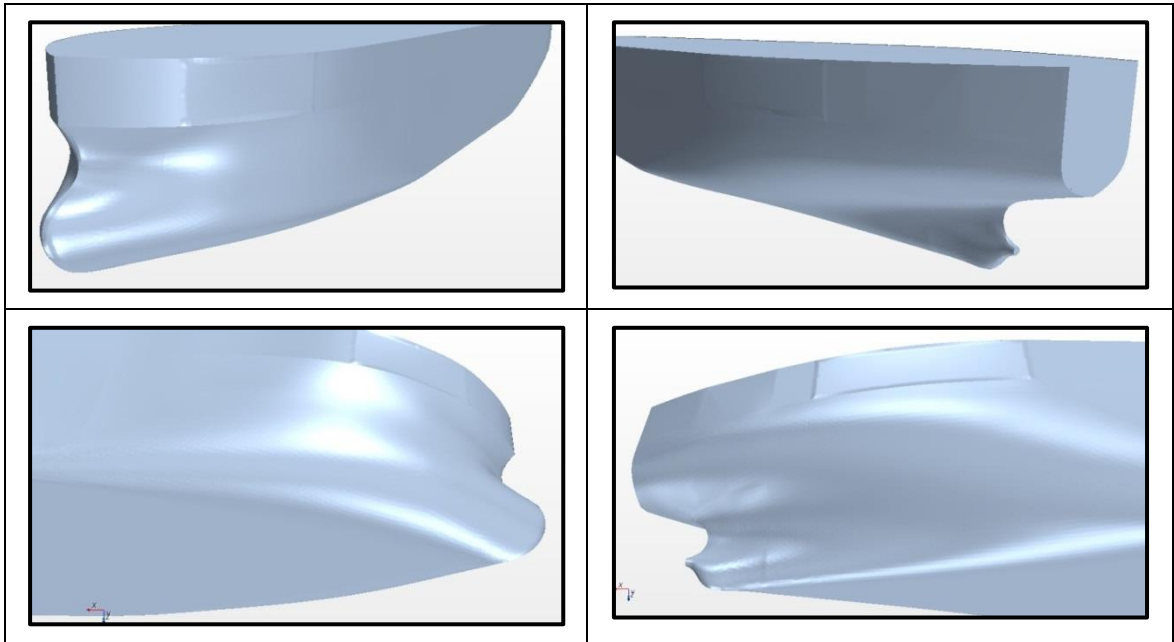
KCS ve KVLCC2 tekne formları HAD ile gerçekleştirilecek olan direnç ve hareket analizlerinde test formu olarak kullanılmak üzere Kore Araştırma Enstitüsü tarafından (Korea Research Institute for Ships and Ocean Engineering (MOERI)) geliştirilmiştir [42]. KVLCC2 tekne modeli 2010 yılında Gothenburgda gerçekleştirilen HAD konferansında KCS tekne formuyla birlikte hareket ve direnç analizleri için test model olarak seçilmiştir [42].

Her iki tekne formunda Standart serilere göre tasarlanan tekne formlarına göre çok daha kompleks yapıya sahiptir ve günümüzde kullanılan gemi modellerine daha uygundur. Şekil 3.14’de KCS, Şekil 3.15’de KVLCC2 tekne formlarının üç boyutlu CAD geometrileri gösterilmiştir. Bu çalışmada her iki teknenin direnç analizleri HAD ile

gerçekleştirilmiş olup hareket analizlerinde yalnızca KVLCC2 formu kullanılmıştır. Teknelerin geometrik bilgileri literatürde mevcut olup her iki formun ana boyutları ve HAD analizlerinde kullanılan model boyutları Çizelge 3.5’de verilmiştir [42].



Şekil 3. 14 KCS tekne formunun üç boyutlu CAD geometrisi



Şekil 3. 15 KVLCC2 tekne formunun üç boyutlu CAD geometrisi

Çizelge 3. 5 KVLCC2 ve KCS teknelerinin ana gemi ve model boyutları

Model Numarası	KVLCC2		KCS	
Ana Boyutlar	Tam Ölçek	Model	Tam Ölçek	Model
Ölçek	1	58	1	31.6
Dikeyler arası boy L_{BP} (m)	320	5.517	230	7.278
Genişlik (maks) B (m)	58	1.000	32.2	1.019
Draft (mastori) T (m)	20.8	0.359	10.8	0.341
Yükseklik D (m)	30	0.517	19	0.601
Deplasman hacmi $\nabla(m^3)$	312622	1.602	52030	1.648
Deplasman Δ (ton)	312278.115	1600.507	51972.767	1647.079
Islak yüzey alanı $A_{WS}(m^2)$	27194	8.084	9424	9.437
Toplam dümen alanı $A_R(m^2)$	273.3	0.081	115	0.115
Blok katsayısı C_B	0.809	0.809	0.650	0.650
Hacim merkezinin boyuna yeri LCB (m) (+baş)	3.48	3.48	-1.48	-1.48
Ağırlık merkezinin dikey yeri KG (m) (+baş)	18.6	0.321	7.28	0.230
Baş-kıç vurma jirasyon yarıçapı K_{yy}/L_{BP}	0.25	0.25	0.25	0.25
Yan öteleme jirasyon yarıçapı K_{zz}/L_{BP}	0.25	0.25	0.25	0.25
Yalpa jirasyon yarıçapı K_{xx}/B	0.40	0.40	0.40	0.40
Servis hızı V_S (knot)	15.5	2.03	24	4.29
Froude Sayısı	0.142	0.142	0.26	0.26

GEMİ DİRENCİNİN HAD YÖNTEMİ KULLANILARAK İNCELENMESİ

4.1 Giriş

Hidrodinamik kuvvet ve momentler çekme deneyi ile kolayca elde edilebilir fakat akış özellikleri olan basınç ve hız değerlerinin çekme deneyi ile elde edilmesi pahalı ve zordur. Bu sebepten dolayı akış özelliklerinin elde edilebilmesi için HAD teknikleri kullanılmaktadır. Tezin bu bölümünde gemi direnci ve bileşenleri sayısal olarak hesaplanmaya çalışılacaktır. Bu amaçla deneyleri gerçekleştirilen M 367 tekne formunun etrafındaki viskoz akışın HAD analizi incelenmiştir. M 367 tekne formunun HAD analizi için geliştirilen prosedür Wigley, KCS ve KVLCC2 tekneleri kullanılarak test edilmiştir. Wigley ve KCS formunun direnç analizi sonuçları bu bölümde, KVLCC2'nin direnç analizi sonuçları hareketlerinin de incelendiği 5. Bölüm de sunulmuştur.

4.1.1 Gemi Direncinin Bileşenleri

Gemi direnci basitçe, geminin ilerlemesine karşı hava ve suyun gösterdiği tepki olarak tanımlanabilir. Model deneylerinden yararlanarak tam ölçekli bir geminin direnç değerlerini tespit edilebilmesine yönelik ilk bilimsel çalışma Froude [65] tarafından gerçekleştirilmiştir. Froude, gemi ve modelin aynı Froude sayısında hareket etmesi halinde, model ölçeğine bağlı olarak boyutların değiştiğini; fakat birbirinin tam benzeri dalga şekilleri oluşturduklarını fark ederek, aynı Froude sayılarında hareket ettiklerinde gemi ve modelin dalga-yapma dirençlerinin (artık dirençlerinin) deplasmanları ile

orantılı olarak değiştiği sonucunu bulmuştur [62]. Froude tarafından tanımlanan ve adı ile anılan boyutsuz sayı Denklem (4.1) ile verilmiştir:

$$Fn = \frac{V}{\sqrt{gL}} \quad (4.1)$$

Denklem (4.1)'de görülen Fn Froude sayısını, V servis hızını, L tekne boyunu ve g yerçekimi ivmesini göstermektedir.

Froude model deneylerinden yararlanılarak toplam gemi direncinin belirlenmesindeki güçlüğü (Fn ve Rn değerlerinin aynı anda sağlanması gerektiğini); toplam direnci, sürtünme ve artık direnç olarak iki bileşene ayırmak suretiyle çözmüştür. Froude yönteminde toplam direnç:

$$R_T = R_F + R_R \quad (4.2)$$

Deneysel ve sayısal çalışmalar ile elde edilen direnç değerleri boyutsuzlaştırılarak tam ölçekli gemi direncinin belirlenmesi amacıyla boyutsuz direnç katsayıları elde edilir. Denklem (4.3)'de boyutsuz toplam direnç katsayısının formülü gösterilmiştir:

$$C_T = \frac{R_T}{0.5\rho SV^2} \quad (4.3)$$

Burada:

- ρ (kg/m^3) akışkanın yoğunluğu,
- S (m^2) teknenin ve/veya modelin ıslak alanı,
- V (m/s) teknenin ve/veya modelin hızı.

Benzer yaklaşım kullanılarak sürtünme direnç katsayısı C_F ve artık direnç katsayısı C_R için de aşağıdaki ifadeler yazılabilir:

$$C_F = \frac{R_F}{0.5\rho SV^2} \quad (4.4)$$

$$C_R = \frac{R_R}{0.5\rho SV^2} \quad (4.5)$$

ITTC-57 [66] (International Towing Tank Test Conference) tarafından sürtünme katsayısı için Denklem (4.6) ile verilen formül sürtünme direnç katsayısının hesaplamada başarılı bir şekilde kullanılmaktadır.

$$C_F = \frac{0.075}{(\log_{10} Rn - 2)^2} \quad (4.6)$$

Denklem (4.6)'dan görüleceği gibi ITTC-57'nin [66] önermiş olduğu bu formül sadece Rn sayısına bağlı olup başka herhangi bir parametreye veya katsayıya bağlı değildir. Denklem (4.7) ile Reynolds sayısı gösterilmiştir.

$$Rn = \frac{VL}{\nu} \quad (4.7)$$

Denklem (4.7)'de görülen Rn Reynolds sayısını, V servis hızını, L tekne boyunu ve ν kinematik viskoziteyi göstermektedir. ITTC-57 [66]'nin vermiş olduğu bu formül ile sürtünme direnç katsayısı başarılı bir şekilde elde edilebilir. Daha önceden de belirtildiği gibi deneysel çalışmalar da toplam direncin hesaplanmasının ardından ITTC-57 [66] tarafından verilen formül kullanılarak modelin sürtünme direnci elde edilir. Toplam direnç ile sürtünme direncinin farkı teknenin artık direncini (R_R) gösterecektir.

Sürtünme direnci Rn sayısına artık direnç değeri ise hem Rn hem de Fn sayısına bağlı olduğu için Froude tarafından yapılan bu ayrım teorik olarak tam doğru değildir. Hughes [67] geminin toplam direncinin üç ana direnç bileşenine ayrılmasının daha doğru olacağını belirlemiştir. Hughes [67] tarafından belirlenen direnç bileşenleri:

- Dalga direnci,
- Sürtünme direnci,
- Viskoz basınç direnci.

$$R_T = R_W + R_F + R_{PV} \quad (4.8)$$

Dalga direnci, geminin hareketi esnasında oluşturduğu dalgalar için harcadığı enerji olarak tarif edilir. Yerçekimi sebeblidir. Oluşmasında viskozitenin etkisi yoktur. Ancak gemi etrafında özellikle kıç bölgedeki viskoz akış potansiyel akış şartlarını bozduğundan dalga direnci bu anlamda viskoziteden etkilenmektedir [68]. Teorik olarak gemi dalga direncini hesaplamak için gemi etrafındaki potansiyel akımı uygun sınır şartları ile çözmek yeterlidir. Ancak serbest su yüzeyi, olayı nonlineer hale getirmekte ve çözümü zorlaştırmaktadır. Günümüzde dalga direncinin hesaplanması ve dalga direncinin optimizasyonu için potansiyel teoriye dayalı çeşitli yöntemler bulunmaktadır fakat bu

yöntem ile yapılan hesaplamalarda viskozitenin etkisi ihmal edildiğinden dalga direncinin kesin tespiti açısından deney vazgeçilmez olmaktadır [68].

Sürtünme direnci, suyun viskozitesinden dolayı gemi yüzeyinde oluşan teğetsel kuvvetler (kayma gerilmeleri) olarak tarif edilebilir. Oluşumun sebebi viskozite ve yüzey pürüzlülüğüdür [68].

Viskoz basınç direnci, serbest su yüzeysiz tamamen batmış ve ideal bir akışkan içerisinde hareket eden bir cismin direnci sıfırdır. Yani cisim üzerindeki basınç dağılımının ilerleme yönündeki bileşenleri toplamı sıfırdır. Viskozite olaya dahil 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, k form faktörünü göstermek üzere [68]:

$$k = \frac{R_{PV}}{R_F} \quad (4.9)$$

formülü ile gösterilir.

Böylece bir geminin direnci Hughes [67] yaklaşımında viskoz direnç ve dalga direnci olmak üzere fiziksel açıdan daha doğru bir şekilde bileşenlerine ayrılmıştır. Viskoz direnç aşağıdaki formül ile ifade edilir.

$$R_V = R_F + R_{PV} \quad (4.10)$$

Hughes [67] yöntemine göre model deneylerinden hareketle tam ölçekli geminin toplam direncinin belirlenmesinde aşağıdaki sıra takip edilir [29], [69]:

- λ ölçeğinde yapılan model, gerçek gemi ile aynı F_n değerine sahip olacak şekilde ($F_{n_m}=F_{n_s}$), farklı $v_m = v_s/\sqrt{\lambda}$ hızlarında çekilir,
- Söz konusu hızlarda modelin R_{Tm} toplam direnci ölçülür,
- ITTC-57 [66] tarafından önerilen Denklem (4.6) kullanılarak modelin sürtünme direnç katsayısı (C_{Fm}), modelin Reynold sayısına (Rn_m) bağlı olarak hesaplanır. Sürtünme direnç katsayısı kullanılarak Denklem (4.3)'ün yardımıyla modelin sürtünme direnç değeri (R_{Fm}) elde edilir,
- k form faktörü belirlenir,

- Modelin viskoz direnç katsayısı hesaplanır,

$$C_{Vm} = C_{Fm} + C_{VPm} = (1 + k) \times C_{Fm} \quad (4.11)$$

- Modelin toplam direnç katsayısından viskoz direnç katsayısı çıkarılarak, modelin dalga direnç katsayısı elde edilir,

$$C_{Wm} = C_{Tm} - C_{Vm} \quad (4.12)$$

- Gemi ve model aynı Fn değerlerine sahip ve geometrik benzer oldukları için, dalga direnç katsayıları aynı olacaktır ($C_{Ws} = C_{Wm}$),
- ITTC-57 [66] tarafından önerilen Denklem (4.6) kullanılarak geminin sürtünme direnç katsayısı (C_{Fs}), geminin Reynolds sayısına (Rn_s) bağlı olarak hesaplanır. Sürtünme direnç katsayısı kullanılarak Denklem (4.3)'ün yardımıyla geminin sürtünme direnç değeri (R_{Fs}) elde edilir,
- Geminin viskoz direnç katsayısı (C_{Vs}), toplam direnç katsayısı (C_{Ts}) ve dolayısıyla geminin toplam direnci (R_{Ts}) hesaplanır. Model için hesaplanan k form faktörünün hız ve ölçekle değişmediği kabul edildiğinden, gemi için de k form faktörü aynı değere sahip olacaktır.

$$C_{Vs} = C_{Fs} + C_{PVS} = (1 + k) \times C_{Fs} \quad (4.13)$$

$$C_{Ts} = C_{Ws} + (1 + k) \times C_{Fs} \quad (4.14)$$

Formüller de kullanılan s alt indisi tam ölçekli gemiyi, m indisi modeli ifade etmektedir.

Hughes [67] yönteminde kullanılan form faktörü üç farklı şekilde hesaplanabilir:

- Amprik formüller yardımıyla,
- Düşük Froude sayılarında gerçekleştirilen model deneyleri ile,
- Çift modelle yapılan model deneyleri ile.

k form faktörü katsayısının çift modelle yapılan model deneyleri ile hesaplanabilmesi için gemi formundan su hattı düzlemine kadar simetriğinin bir adet daha yapılması ve bu modellerin su hattı düzleminde yapılmış halde ve tam batmış olarak deney havuzunda çekilmesi gerekmektedir. Ancak bu yöntem model imalatı açısından pahalıdır ve derin su çekme deney tankına ihtiyaç duyulmaktadır [68]. Çift model

yaklaşımının zorluğundan dolayı k form faktörü katsayısı genellikle düşük Froude sayılarında gerçekleştirilen model deneyleri ile hesaplanır.

Tekne direncinin bu direnç bileşenlerinin yanına aşağıda verilen direnç bileşenlerinin de ilave edilmesi gerekmektedir [29]:

- Takıntı direnci: Şaft, dümen, şaft braketleri, şaft bosası, yalpa omurgası vs. gibi gemi çıplak teknesine takılan takıntılara harcanan enerjiyi temsilen direnç bileşenidir.
- Pürüzlülük direnci: Gemi korozyonu ve boyamasına harcanan enerjiyi temsil eden direnç bileşenidir.
- Hava direnci: Geminin su üstü formunun maruz kaldığı direnç bileşenidir.
- Karışık (veya düzenli) dalga direnci: Karışık (veya düzenli) dalgalardan dolayı oluşan gemi hareketlerinin sebep olduğu direnç bileşenidir.

ITTC-78 (International Towing Tank Test Conference) [70] şakin su da ilerleyen bir teknenin toplam direnç katsayısı için aşağıda verilen formülü önermiştir.

$$C_{TS} = (1 + k)C_{FS} + C_W + \Delta C_F + C_{AA} \quad (4.15)$$

Burada C_{TS} toplam direnç katsayısı, k form faktörü, C_F sürtünme direnç katsayısı, C_W dalga direnci katsayısı, ΔC_F yüzey pürüzlülüğünden kaynaklanan ek sürtünme direnç katsayısı, C_{AA} tekne etrafında meydana gelen hava kaynaklı direnç katsayısıdır. Formülde kullanılan S alt indisi tam ölçekli gemiyi ifade etmektedir.

Gemi direncinin bileşenlerinin hesap edilebilmesi için araştırmacılar tarafından çeşitli yöntemler geliştirilmiştir. Bu yöntemler Şekil 4.1’de özetlenmiştir. HAD yöntemlerinin ve deneysel çalışmaların dışında kalan yöntemler teknenin temel geometrik özelliklerini kullanarak sonuç elde etmeye çalışırlar [68]. Geleneksel tekne formlarının haricinde kompleks bir geometriyle karşılaşıldığında veya yeni bir form tasarımı gerçekleştirildiğinde bu yöntemlerle direnç tahmini yapmak mümkün değildir. Bu durum deneysel çalışmayı ve HAD yöntemlerini zorunlu kılmaktadır.

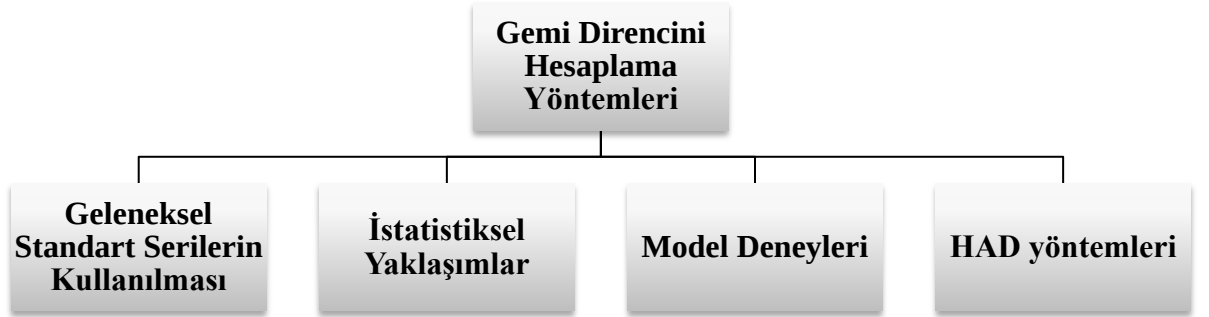
Deneysel çalışmalar mühendisler için vazgeçilmez olmakla birlikte kullanılan teknenin ölçek faktörü, deneysel çalışmanın zaman alıcı ve pahalı oluşu, az sayıda akışkan

özelliğinin ölçülebilmesi HAD yöntemlerini deneysel çalışmalar ile birlikte kullanılmasını cazip kılmaktadır.

4.2 Gemi Direncini Hesaplama Yöntemleri ve Kullanılan Bilgisayar Sistemi

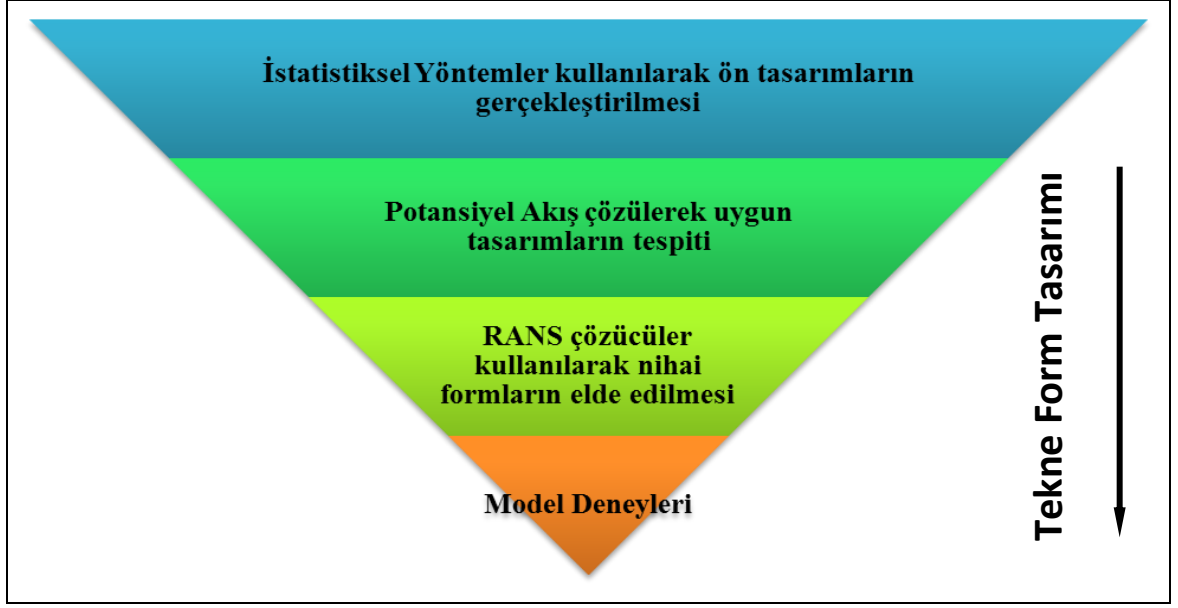
4.2.1 Direnç Hesaplama Yöntemleri

Teknelerin dalga direncinin elde edilebilmesi için gemi etrafındaki potansiyel akışı çözmek yeterlidir. Sınır elemanları yöntemi günümüzde potansiyel akış problemlerinin çözümü için yaygın olarak kullanılmakta olup bu yöneme dayanan ticari yazılımlar da bulunmaktadır. Potansiyel akış vizkoziteyi ve türbülans etkilerini gözardı etmektedir, bunun yanında potansiyel çözücülerin hesaplama sürelerinin kısa oluşu sebebiyle dizayn aşamasında uygun formların tespiti için kullanılabilir. Günümüzde tekne formlarının tasarımı için istatistiki yöntemler, potansiyel çözücüler ve RANSE çözücüler beraber kullanılmaktadır Şekil 4.1. Şekil 4.2’de tekne tasarımı gerçekleştirilirken sayısal yöntemlerin kullanılma sırası gösterilmiştir.



Şekil 4. 1 Gemi direncini hesaplamak amacıyla kullanılan yöntemler

Şekil 4.2’de gösterildiği gibi form tasarım aşamalarında mevcut olan tüm sayısal yöntemlerden faydalanılmaktadır ve nihai formun hidrodinamik özelliklerine deneysel çalışma ile karar verilmektedir. RANSE gelişen teknoloji ile birlikte hergeçen gün popürlüğünü arttırmakta olup günümüzde en güçlü sayısal çözüm yöntemidir.

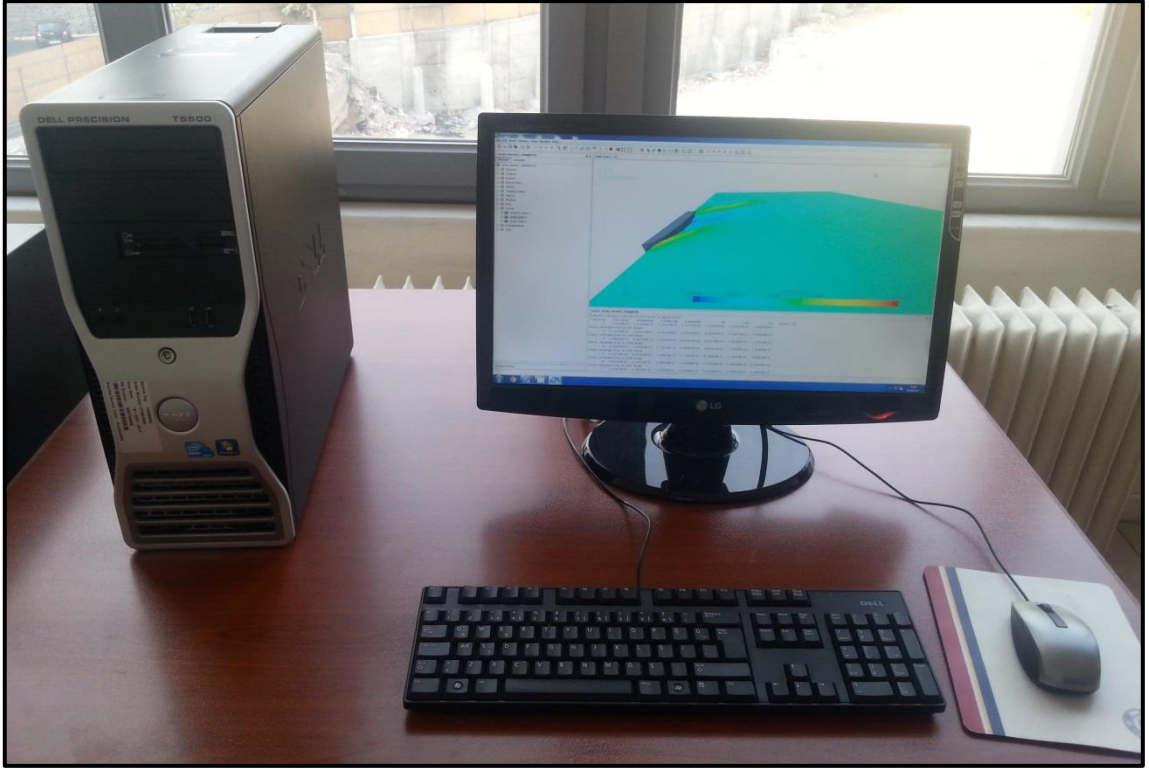


Şekil 4. 2 Form tasarımında kullanılan yöntemlerin iş akışı

4.2.2 Sayısal Hesaplama İçin Kullanılan Bilgisayar Sistemi

Bilgisayar teknolojisinin gelişmesiyle birlikte 3 boyutlu cisimler etrafındaki akış modellerini oluşturmak mümkün olmuştur. Bu çalışmada statik ve dinamik durumda tekne etrafında meydana gelen akış incelenmiştir. Teknenin herhangi bir hız değerinde direnç veya hareket analizlerini gerçekleştirebilmek için yaklaşık 50000 iterasyona ihtiyaç duyulmaktadır. Tüm parametrelerin ve sınır şartlarının uygun seçilmesi ortalama 50000 iterasyon sonunda problem çözülebilmektedir bu sebepten dolayı ihtiyaca cevap verecek altyapının bulunması gerekmektedir. Analizlerde kullanılan 8 çekirdekli bilgisayar sistemi Şekil 4.3’de gösterilmiştir. Kullanılan bu bilgisayar sistemi Y.T.Ü Gemi İnşaatı ve Denizcilik Fakültesi Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği Lab. da HAD çalışmaları için kullanılmaktadır.

Şekil 4.3’de görülen mevcut sistem bir hız için gerekli olan direnç değerini (yaklaşık 50000 iterasyon) 2 güne yakın bir sürede tespit edebilmektedir. Bu analiz süresine kullanılan ağ yapısının sıklığı ve zaman adımının büyüklüğü doğrudan etkimektedir. Çok sık ağ yapılarının kullanılması veya daha küçük zaman adımıyla analizlerin gerçekleştirilmesi durumunda hesaplama süresi artacaktır.



Şekil 4. 3 Sayısal analizler de kullanılan bilgisayar sistemi

4.3 M 367 Tekne Modelinin Etrafındaki Serbest Yüzeyli Akışın İncelenmesi

4.3.1 Giriş

Tekne etrafındaki akışın modellenenebilmesi için geçtiğimiz yüzyıl boyunca bilim adamları tarafından pek çok çalışma yapılmıştır. Navier-Stokes denklemlerinin çözümünün zor olması nedeniyle yapılan çalışmaların çoğu potansiyel akış teorisine dayanmaktadır.

Günümüzde tekne etrafındaki akış türbülanslı olarak modellenmeye ve bu konuyla ilgili çalışmalar yayınlanmaya başlanmıştır. Problemin karmaşıklığı sebebiyle sayısal ve deneysel yöntemler birlikte kullanılmaktadır. Başarılı bir tekne formunun tasarımı ve optimizasyonu için tekne etrafında meydana gelen akış probleminin çözülmesi ve akış özelliklerinin bilinmesi gerekmektedir.

Bu bölümde teknenin toplam direnci incelenecek olup elde edilen sonuçlar deneysel veriler ile karşılaştırılacaktır. Çoğu mühendislik problemi geometri karmaşıklığı nedeniyle, analitik olarak çözülememekte ancak geometrinin sonlu sayıda alt hacimlere bölünmesiyle çözülebilmektedir [59]. Gemi formu, hidrodinamik akış ve direnç karakteristikleri açısından hesaplamalı akışkanlar dinamiği tekniklerinden sonlu

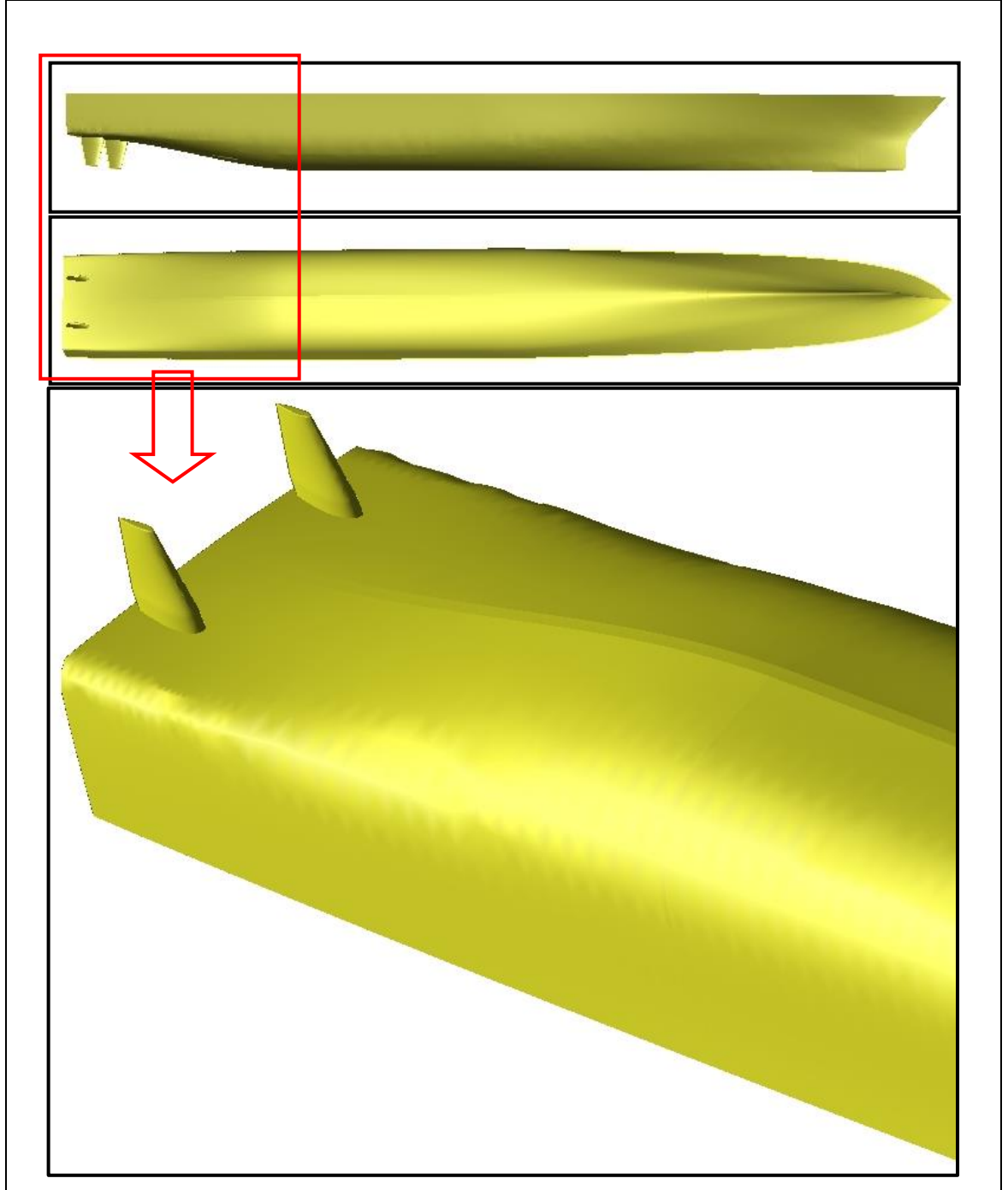
hacimler yöntemi kullanılarak analiz edilmiştir. Gemi direncinin tüm bileşenleri hesaplanmış ve deney sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Sayısal hesaplama işleminde karşılaştırma yapılabilmesi ve direnç değerlerinin ayrı ayrı hesaplanabilmesi için aşağıda verilen sıra takip edilmiştir:

- Geometrinin modellenmesi,
- Hesaplama hacminin oluşturulması,
- Ağ yapısının oluşturulması,
- Sınır şartlarının tanımlanması,
- Analiz sonuçlarının elde edilmesi.

STAR CCM+ Navier-Stokes ve RANS denklemlerini çözerek cisim üzerinde oluşan kuvvetleri hesaplayabilmektedir.

4.3.2 M 367 Tekne Modelinin 3 Boyutlu CAD Geometrisinin Hazırlanması

Ana boyutları Çizelge 3.1’de verilen bu teknenin deneysel ve HAD çalışmalarında kullanılmak üzere 3 boyutlu CAD geometrisi takıntısız durum için hazırlanmıştır. Şekil 4.4’de takıntısız tekne formu için genel görünüm gösterilmiştir. Şekil 4.4 incelendiğinde tasarlanan geometrinin gerçeğe uygun olmasına dikkat edilmiş tekne geometrisi üzerindeki skeg omurga da modellenmiştir.

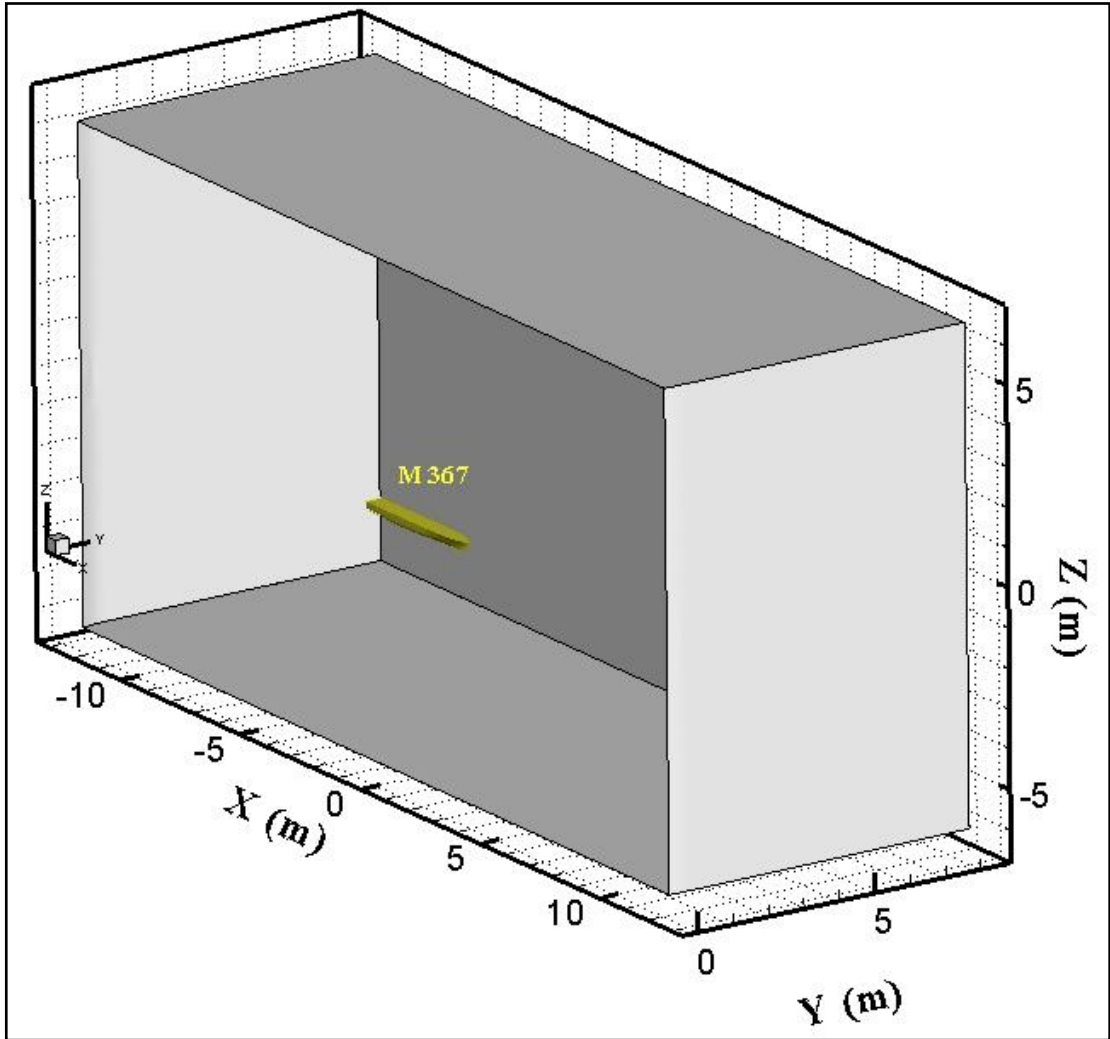


Şekil 4. 4 M 367 takıntısız tekne CAD modelin genel resmi

4.3.3 Hesaplama Hacminin Oluşturulması

Hesaplama hacminin boyutlarının tasarımı analizin en önemli adımlarındandır. Yeterince büyük hacim seçilmemesi durumunda problem yakınsama sorunu çekecek gerekenden büyük hacim oluşturulması durumunda ise ağ sayısı artacağından bilgisayarın hesap yükü ve çözüm süresi artacaktır. HAD kullanıcıları tarafından uygun

olan boyutlara deneme yanılma yoluyla veya tecrübeye bağlı olarak karar verilir. Hesaplama hacmi oluşturulurken tekne etrafında meydana gelecek dalga deformasyonlarının çıkış bölgesine kadar sönümlenmesi gerekliliği göz önüne alınmış model kıçından itibaren hesaplama hacminin boyutu en az üç dalga boyu kadar uzatılmıştır. Analizlerde kullanılan hesaplama hacmi ve boyutları Şekil 4.5’de gösterilmiştir.



Şekil 4. 5 Serbest su yüzeyli analiz için oluşturulan hesaplama hacmi

Şekil 4.5’den görüldüğü gibi analizlerde kullanılan kontrol hacmi dikdörtgenler prizması şeklinde seçilmiştir. Formun simetrik olması sebebiyle teknenin yarısı modellenmiş ve etrafındaki akış incelenmiştir. Bu sayede ağ sayısından ve hesaplama süresinden tasarruf edilmiştir. Hesaplama hacminin yüksekliği ve genişliği $2xL_{BP}$, hacmin teknenin

başına olan uzaklığı $1.5 \times L_{BP}$ ve teknenin kıçına olan uzaklığı $2.5 \times L_{BP}$ olarak tasarlanmıştır.

4.3.4 Ağ Yapısının Oluşturulması

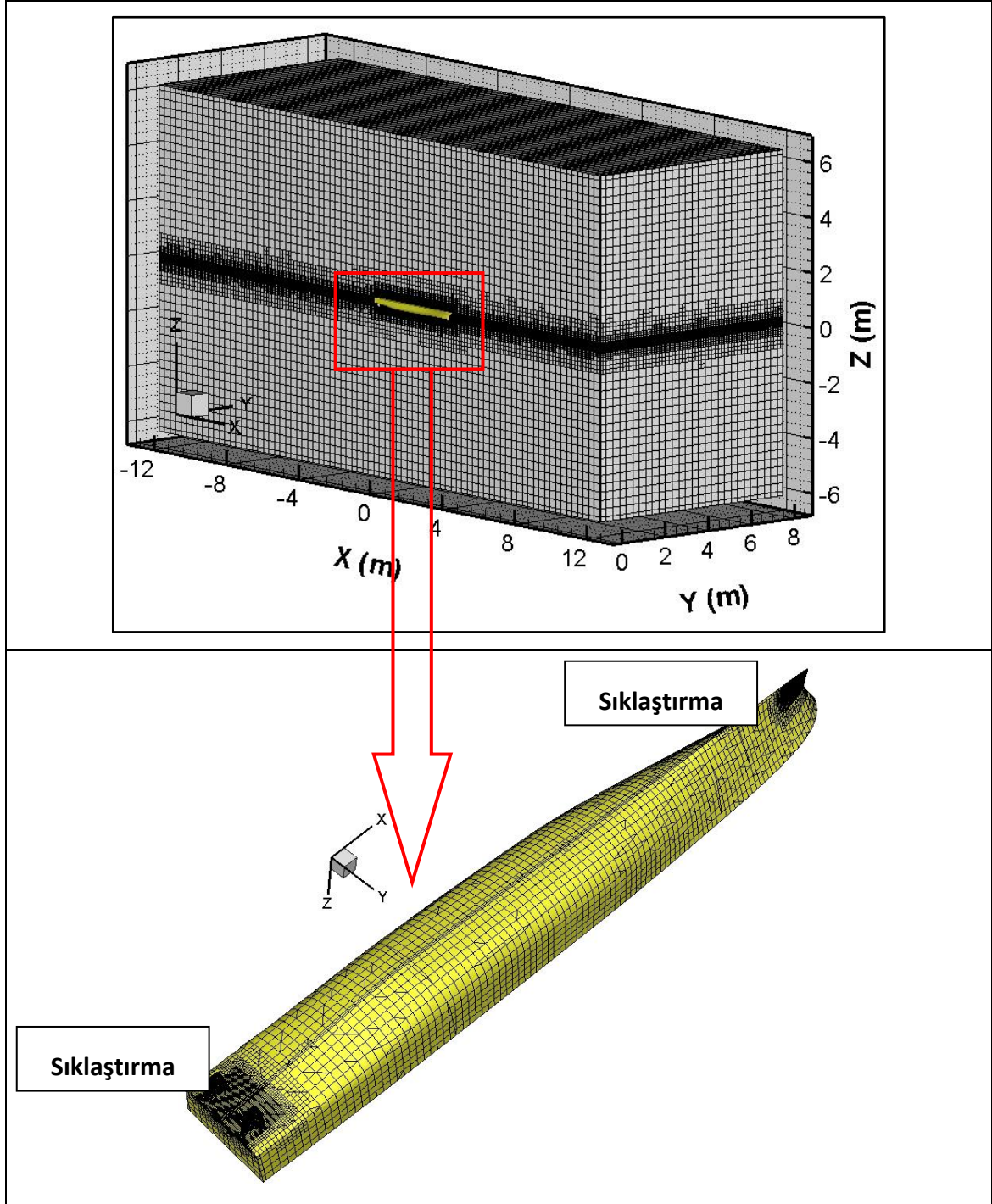
HAD analizlerinde akışın incelendiği hesaplama hacmi çok fazla sayıda alt hacimlere bölünmüştür. Kullanılan alt hacimlerin sayısı geometrinin ve akış analizinin gerçekleştirileceği hacmin tam olarak temsil edilebilmesi için önemlidir. HAD analizlerinin güvenilir olabilmesi için kullanılan ağ yapısı ve kalitesi hayati önem taşımaktadır. Aşağıda sağlıklı bir ağ yapısının oluşturulabilmesi için gerekli olan şartlar kısaca belirtilmiştir:

- Ağ yapıları arasındaki geçişin yavaş olması ve yapının ani değişiklikler göstermemesi gerekir,
- Kritik bölgelerde örneğin su hattı düzlemi ve tekne formunun ani değişim gösterdiği bölgelerde hacmin genelinde kullanılan yapıya oranla daha sık ağ oluşturulması,
- Oluşturulan ağ yapısında herhangi bir negatif hacmin veya çarpıklık oranı (skew ratio) yüksek ağ yapılarının oluşturulmaması gerekmektedir.

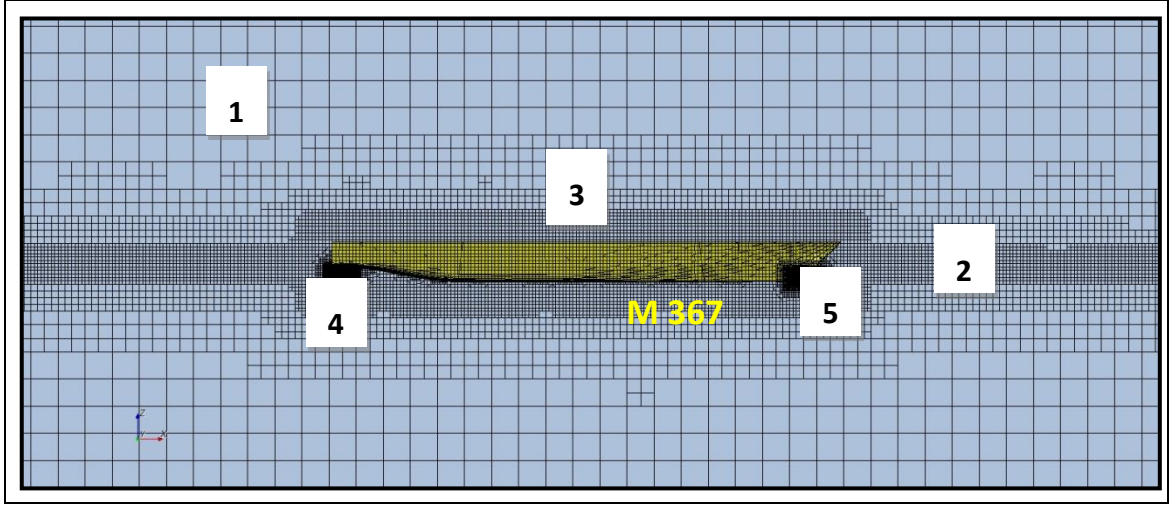
HAD analizlerinde üç ana ağ yapısı kullanılmakta olup bunlar; yapılandırılmış (Hexahedral), yapılandırılmamış (Tetrahedral) ve multiblok ağ yapılarıdır. Yapılandırılmış ağ yapısı kare, dikdörtgen, daire gibi basit geometriler için yaygın olarak kullanılmaktadır. Hesaplama hacimleri için ağ yapıları oluşturulurken hacme ait yüzeylerin eğriselliğinin fazla olduğu durumlarda yapılandırılmış ağ yapısını kullanmak çok zordur. Yüzey eğriselliğinin fazla olduğu durumlar için yapılandırılmamış elemanlar kullanılarak ağ yapısının oluşturulması durumunda çarpıklığı yüksek veya negatif değere sahip hacim elemanları meydana gelecektir. Bu durum yapılandırılmamış veya multiblok ağ yapılarının kullanılmasını zorunlu kılmaktadır. Bu çalışmada yapısal olmayan multiblok ağ yapıları kullanılmıştır.

Tekne üzerinde akım ayrılmalarının meydana geldiği kıç formu ile birlikte serbest su yüzeyi deformasyonlarının meydana geleceği su hattı düzleminde hacmin geneline oranla daha sık ağ yapılarının kullanılması gerekmektedir. Bu durum kontrol hacmi

sayısını arttıracğından hesaplama hacminin mümkün olduğunca küçük seçilmesi gerekmektedir. Gerçekleştirilecek olan sayısal çalışmada gerekli minimum hacim elemanı sayısının belirlenebilmesi için en az üç tane olmak şartıyla farklı sayılarda ağ yapılarının oluşturulması gerekmektedir ve şekil 4.6'da analiz için oluşturulan ağ yapısı görülmektedir.



şekil 4. 6 M 367 takınıtırsız direnç analizi için hazırlanan ağ yapısı (Seyrek)



Şekil 4. 7 M 367 takıntısız analiz için oluşturulan blok yapıları

Teknenin baş ve kıç bölgelerinin yanı sıra dalga deformasyonlarının meydana geleceği su hattı düzleminde de ağ yapısı genele oranla daha sık oluşturulmuştur. Özellikle su hattı düzleminde ağ yapısının sıklaştırılması sebebiyle kullanılan hacim elemanı sayısı artmıştır. Şekil 4.7’de oluşturulan blok yapıları gösterilmiştir. Gerekli minimum hacim elemanı sayısının belirlenebilmesi için 4 farklı ağ yapısı oluşturulmuştur. Oluşturulan her bir blok elemanına ait ağ yapısının boyutları Çizelge 4.1’ de verilmiştir.

HAD yöntemlerinden elde edilen sonuçların güvenilirliğinin test edilebilmesi için deneysel çalışma ile elde edilen verilerle karşılaştırılması gerekmektedir. Deneysel çalışmaların bulunmadığı veya deney maliyetinin yüksek olduğu durumlarda elde edilen sayısal çalışmaların hata analizlerinin incelenmesi elde edilen sonuçların güvenilirliği açısından önemlidir. Sayısal analizlerde meydana gelen sayısal hataların haricinde deneysel çalışmalarda da ölçek faktörü, ölçüm cihazlarının hassasiyeti, oluşturulan modelin gerçek geometriye uygunluğu, çekme tankının boyutları gibi parametrelere bağlı olarak deneysel hataların meydana gelmesi kaçınılmazdır. İmal edilen modelin ıslak alanı (Dümen+Tekne modeli) $S=2.0105 \text{ m}^2$ olarak hesaplanmıştır. Boyutsuz katsayılar tespit edilirken bu ıslan alan göz önüne alınmıştır. Bu çalışmada ağ yapısı kaynaklı hatalar incelenmiş ve diğer hata parametreleri ihmal edilmiştir.

Kullanılan ağ yapısı analiz için yetersiz veya gereğinden sık olabilir. Yetersiz ağ yapıları kullanılarak gerçekleştirilen analizlerden elde edilen sonuçlara güvenilemez, gereğinden fazla sıklıkta oluşturulan ağ yapıları hesap yükünü ve analiz süresini aşırı arttıracığından ağ yapısının uygun seçilmesi gerekmektedir.

Çizelge 4. 1 M 367 takıntısız model formunun HAD ile direnç analizi için oluşturulan ağ yapıları

Yenileme oranı $r_G = \sqrt{2}$					
Ağ Yapısının Boyutu					
Blok No	Blok Adı	Seyrek	Az Yoğun	Yoğun	Çok Yoğun
1	Kontrol hacminin geneli	0.169 L _{BP}	0.120 L _{BP}	0.085 L _{BP}	0.060 L _{BP}
2	Serbest su yüzeyi düzeltmesi	0.019 L _{BP}	0.014 L _{BP}	0.01 L _{BP}	0.007 L _{BP}
3	Gemi etrafı için düzeltme	0.019 L _{BP}	0.014 L _{BP}	0.01 L _{BP}	0.007 L _{BP}
4	Gemi kığı dümen ve takıntılar için düzeltme	0.0039 L _{BP}	0.0028 L _{BP}	0.002 L _{BP}	0.0014 L _{BP}
5	Gemi baş formu için düzeltme	0.0039 L _{BP}	0.0028 L _{BP}	0.002 L _{BP}	0.0014 L _{BP}
Toplam Hesaplama Hacmi		245346	649300	1344206	3462161

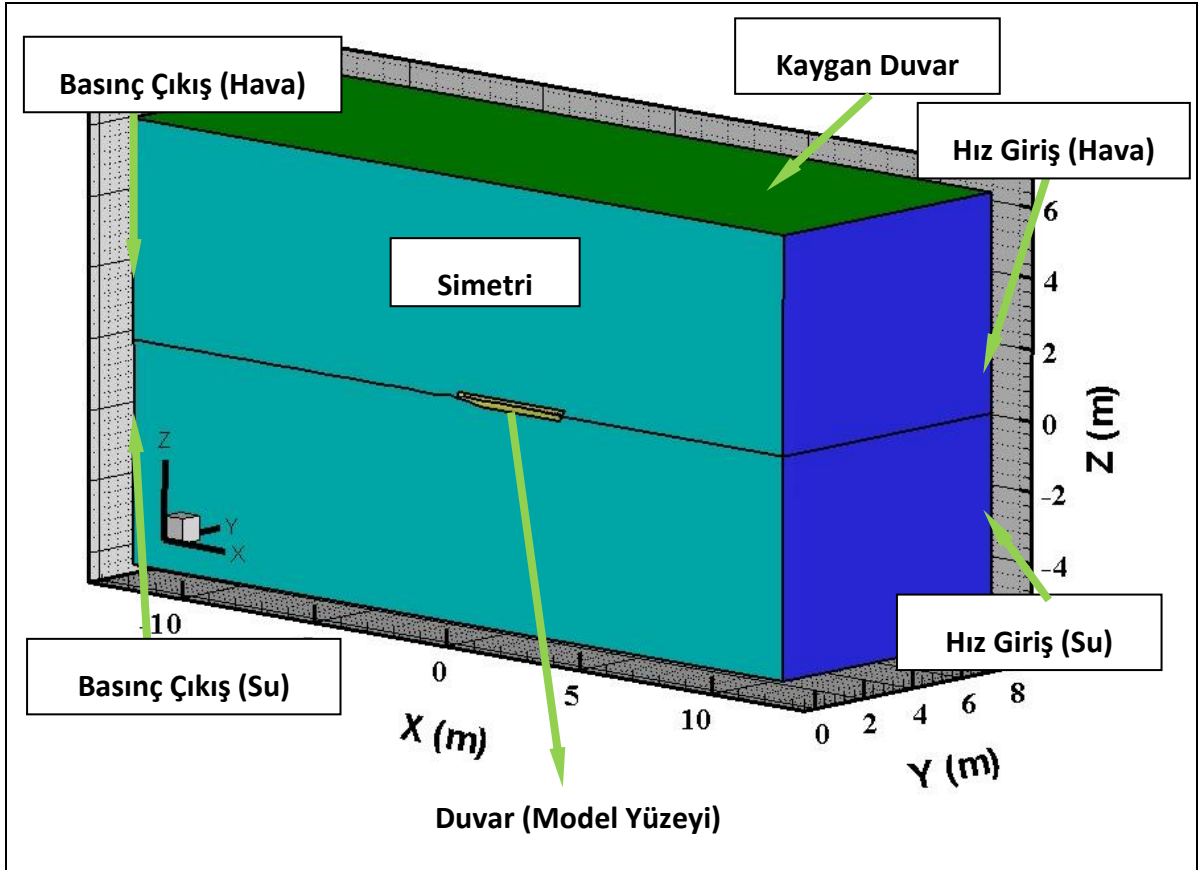
4.3.5 Sınır Şartlarının Tanımlanması

İkinci bölümde verilen denklem sistemlerinin çözülebilmesi için sınır şartlarına ihtiyaç duyulmaktadır. Bu bölümde analizlerde kullanılan sınır şartları tanıtılmıştır. Analize bağlı olarak bazı anahtar parametreler sınır şartlarının tanımlanmasında kullanılır bunlar:

- Hız veya basınca bağlı sınır şartı tanımlanacak ise bu değerlerin büyüklükleri, sınır şartının tanımlanacağı yüzey boyunca dağılımları ve yönlerinin belirtilmesi gerekir,
- Türbülans modellerinin kullanılması durumunda giriş ve çıkış bölgelerindeki türbülans özelliklerinin belirtilmesi gerekir.

Su yüzeyi deformasyonlarının incelendiği hesaplama hacmine ait sınır şartları Şekil 4.8’de gösterilmiştir. Giriş sınır şartı için hız giriş, çıkış sınır şartı için basınç çıkış, ve alt,

üst, yan duvarlar için kaygan duvar şartları tanımlanmıştır. Tekne gövdesi için duvar sınır şartı tanımlanarak yüksek ve düşük y^+ değerleri için geliştirilen duvar fonksiyonu yaklaşımı kullanılmıştır. Fonfach [71], Repetto [72], yapmış oldukları çalışmalarda benzer sınır şartlarını kullanmışlardır:



Şekil 4. 8 Analiz için tanımlanan sınır şartları

- Giriş sınır şartında hız büyüklüğünün değeri yüzey normali yönünde akış yönünde dikkate alınarak tanımlanmıştır. Giriş sınır şartına ait türbülans şiddeti 0.1 ve türbülans viskozitesi kinematik viskozite ile aynı mertebede seçilmiştir.
- Çıkış sınır şartı için hidrostatik basınç değeri tanımlanmıştır. Çıkış basıncı çıkış yüzeyi boyunca sabit olmayıp derinlikle artmaktadır:

$$p_{\text{çıkış}} = \rho gh \quad (4.16)$$

Çıkış yüzeyinde türbülansa ait özellikler giriş yüzeyi için tanımlanan türbülans özelliklerine eşit alınmıştır.

- Kaygan duvar, yüzeyde sürtünmenin olmadığı kabulü ile gerçekleştirilen sınır şartıdır. Bu sınır şartında yüzeyin normali yönündeki hız bileşeni sıfır olmakla birlikte yatay yönde hız bileşeni mevcuttur. Yüzeylere ait normal vektör $\vec{n}$ ile tanımlanır ise:

$$u_i \cdot \vec{n} = 0 \quad (4.17)$$

ve gerilme tensörü:

$$\tau_{ij} = 0 \quad (4.18)$$

- Teknenin simetrik oluşu sebebiyle yarısı için analizler gerçekleştirilmiş olup gövdenin diğer yarısı için simetri sınır şartı kullanılmıştır. Simetri sınır şartının kullanılması durumunda akış probleminin sınır şartı tanımlanan yüzeye göre simetriği alınır. Hızın ve akış içerisinde bulunan skaler özelliklerin simetri yüzeyinin normalindeki bileşenleri sıfırdır. Hız için kaygan duvar sınır şartına benzer yaklaşımla:

$$u_i \cdot \vec{n} = 0 \quad (4.19)$$

Skaler özellikler için:

$$\frac{\partial \phi}{\partial n} = 0 \quad (4.20)$$

yazılabilir.

4.3.6 M 367 Tekne Direncinin HAD Yöntemleri Kullanılarak İncelenmesi

Bu çalışmada teknenin HAD analizlerinden elde edilen sonuçları deneysel sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Dizayn su hattında model deneyleri ve HAD analizleri gerçekleştirilmiştir. Deneyin ortam şartları Çizelge 3.4’de verilmiş olup analizlerde bu değerler kullanılmıştır.

Deneyler tekne takıntılarının bulunduğu ve bulunmadığı durumların herbiri için 16 farklı hızda gerçekleştirilmiştir. Tekne form faktörünün hesap edilebilmesi amacıyla çekme deneyleri düşük hızdan başlayarak yüksek hızlara kadar gerçekleştirilmiştir.

Akış tamamen türbülanslı olup zamana bağımlıdır (Unsteady). Türbülanslı akış Standart $k - \epsilon$ modeli kullanılarak modellenmiştir. RANS denklemlerinin ayrıklaştırılması için

sonlu hacimler yöntemi kullanılmıştır. Denklemlerin ayrıklaştırılmasında Segregated çözüm algoritması, dalga deformasyonlarının modellenmesi için VOF (Volume of fluid) yaklaşımı kullanılmıştır. Zaman adımının seçimi Courant-Frederich-Lewis (CFL) sayısına göre yapılmıştır. Analiz sonuçlarının güvenilir olabilmesi için CFL sayısının $U\Delta t/\Delta x$ herbir hacim elemanı için 1'den küçük olması gerekmektedir. Bu çalışmada CFL sayısı 0.3 ile 0.6 arasında değişmektedir. Basınç alanının hesaplanabilmesi için SIMPLE çözüm algoritması kullanılmıştır.

4.3.6.1 Ağ Yapısına Olan Bağımlılığın İncelenmesi ve Hata Analizi

HAD yöntemlerinden elde edilen sonuçların güvenilirliğinin test edilebilmesi için deneysel çalışma ile elde edilen verilerle karşılaştırılması gerekmektedir. Deneysel çalışmaların bulunmadığı veya deney maliyetinin yüksek olduğu durumlarda elde edilen sayısal çalışmaların hata analizlerinin incelenmesi elde edilen sonuçların güvenilirliği açısından önemlidir. Sayısal bir analizde sonuca etkiyen hatalar aşağıda sıralanmıştır:

- Ağ yapısından kaynaklanan hatalar,
- Zamana bağlı analizlerde zaman adımının seçiminden kaynaklanan hatalar,
- İteratif hatalar.

Sayısal analizlerde meydana gelen bu nümerik hataların haricinde deneysel çalışmalarda da ölçek faktörü, ölçüm cihazlarının hassasiyeti, oluşturulan modelin gerçek geometriye uygunluğu, çekme tankının boyutları gibi parametrelere bağlı olarak deneysel hataların meydana gelmesi kaçınılmazdır. Bu durumda sayısal çalışmada meydana gelen nümerik hatalar ile birlikte deneysel çalışmada meydana gelen hatalarda göz önüne alınarak toplam hata tahminin yapılması gerekmektedir. Bu çalışmada yalnızca ağ yapısından kaynaklanan hatalar incelenmiştir, iteratif ve zaman adımı kaynaklı hatalar çok düşük seviyelerde olması sebebiyle ihmal edilmiştir.

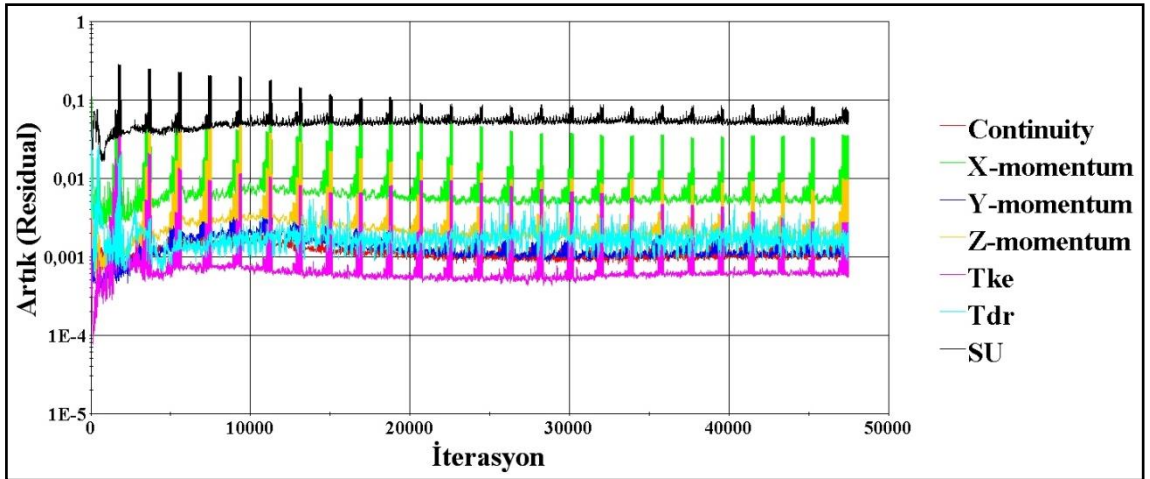
Sayısal bir çözümün ağ yapısından kaynaklanan hata analizi için sistematik bir yaklaşım Richardson [73] tarafından geliştirilmiştir. Richardson [73] tarafından geliştirilen bu yöntem bugün ITTC 78 tarafından hata analiz prosedürü olarak önerilmiştir. Zhang [74] çalışmasında bu prosedüre göre KCS teknesinin serbest su yüzeyi analizini ve meydana

gelen belirsizliği incelemiştir. Bu çalışmada modellemede herhangi bir hatanın olmadığı kabul edilip ağ yapısından kaynaklanan hatalar ITTC [75] tarafından tanımlanan yöntemle göre incelenmiştir.

Richardson [73] tarafından verilen yöntemle göre en az üç adet ağ yapısının kullanılması gerekir. Kartezyen koordinat sisteminde ağ yapısının her üç eksenindeki iyileştirme oranı r_G aşağıdaki formülle verilir:

$$r_G^{i,j,k} = \frac{\Delta X_A}{\Delta X_B} \quad (4.21)$$

Burada ΔX_A ve ΔX_B her üç yöndeki ağ yapılarının eski ve yeni boyutlarının birbirine olan oranını yani kısaca ağ yapısındaki küçültme oranını göstermektedir. Bu çalışmada literatürdeki örneklerden faydalanılarak (Richardson Extrapolation Scheme) $r_G = \sqrt{2}$ alınmıştır. Çizelge 4.1 de kullanılan dört farklı ağ yapısı ve hesaplama hacmi sayıları detaylı bir şekilde açıklanmıştır. Çizelge 4.1’de verilen ağ yapısı Şekil 4.7’de görülen hesaplama hacmine uygulanmıştır. Tekne Froude sayısı $Fn=0.201$ için analizler gerçekleştirilmiştir. HAD modelinin analize hazırlanmasının ardından çözüme verilmiş yakınsama sağlanıncaya kadar analize devam edilmiştir. Şekil 4.9’da $Fn=0.201$ için elde edilen yakınsama grafiği gösterilmiştir.



Şekil 4. 9 $Fn=0.201$ M 367 takıntısız analiz için elde edilen yakınsama grafiği (Seyrek)

Gemi model yüzeyine (M 367) çok yakın noktalarda yeterince sık ağ yapısı kullanılmadığı için tüm analizlerde y^+ değeri 1 den büyük çıkmıştır. Elde edilen sonuçlar Çizelge 4.2’de verilmiştir. [58], Zwart vd. [76] tarafından belirtildiği gibi gerçekleştirilen analizlerde elde edilen y^+ değerlerinin:

- $y^+ \leq 5$ veya,
- $30 \leq y^+ \leq 300$

şartlarını sağlaması gerekmektedir. Kullanılan duvar fonksiyonu yukarıda tanımlanan şartlar için geçerlidir. Gemi model yüzeyine en yakın ağ noktası üzerindeki y^+ değerleri eğer 5 ila 30 arasında olur ise kullanılan ağ yapısına ait ilk grid noktası viskoz bölge ile logaritmik bölge arasındaki geçiş bölgesine denk gelmektedir ve bu durumda duvar fonksiyonu sağlıklı sonuçlar vermemektedir. STAR CCM+ tarafından düşük ve yüksek Reynolds sayıları için tanımlanmış olan All y^+ treatment duvar fonksiyonu kullanılmıştır. Salim ve Cheah [77] çalışmalarında ağ yapısı ve y^+ arasındaki ilişkiyi farklı türbülans modelleri için incelemişlerdir ayrıntılı bilgi bu kaynaktan elde edilebilir.

Sonuç olarak Çizelge 4.2 incelendiğinde tekne üzerinde meydana gelen y^+ değerleri $30 \leq y^+ \leq 300$ şartını sağlamıştır ve ağ yapılarından elde edilen sonuçlar sağlıklıdır.

Çizelge 4. 2 Farklı ağ yapılarında tekne üzerinde meydana gelen ortalama y^+ değerleri (Fn=0.201)

	Seyrek 4	Az Yoğun 3	Yoğun 2	Çok Yoğun1
Toplam hacim elemanı	245346	649300	1344206	3462161
Ortalama y^+	250	110	66	49

Ağ yapısının yakınsayıp yakınsamadığına aşağıda verilen oran formülü kullanılarak karar verilir:

$$R_G = \frac{\varepsilon_{21}}{\varepsilon_{32}} = \frac{S_2 - S_1}{S_3 - S_2} \quad (4.22)$$

$S_{1,2,3}$ değeri çözümde seçilen herhangi bir parametre olabilir. Bu çalışmada tekne direnci ile ilgilenildiğinden dolayı S değeri toplam direnç olarak seçilmiştir. Eğer:

- $0 < R_G < 1$ ise çözümün yakınsadığı,
- $R_G < 0$ ise çözümün salınım gösterdiği,
- $R_G > 1$ ise çözümün ıraksadığı kabul edilir.

(4.23)

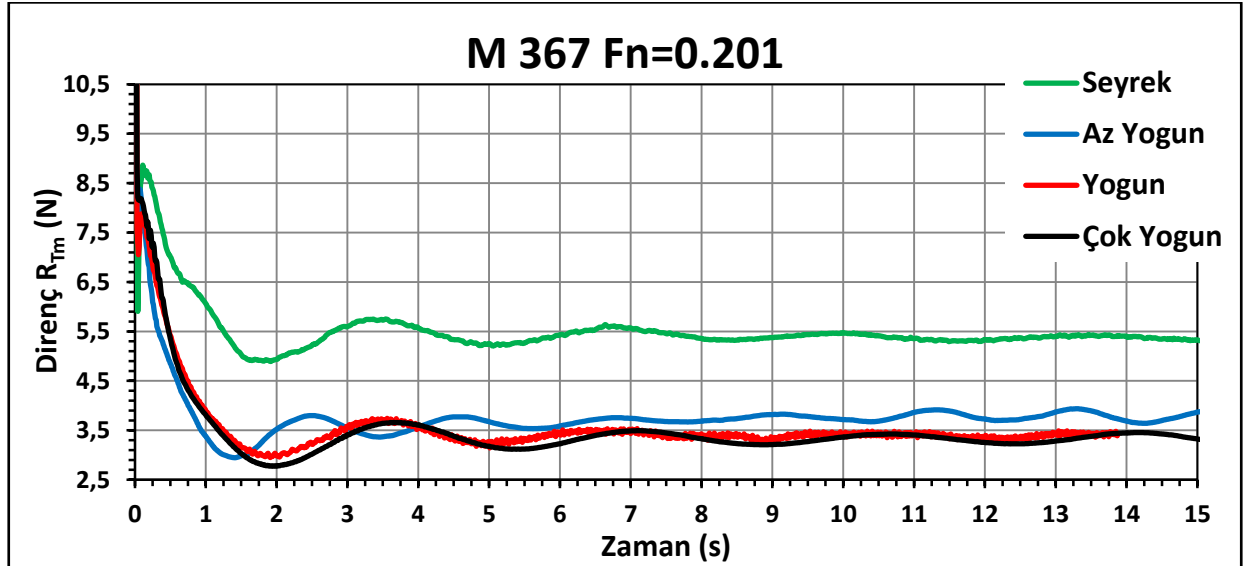
Üç farklı ağ yapısı için Fn=0.201'de elde edilen direnç değerleri ve herbir analiz için gereken süreler deneysel sonuçlarla beraber Çizelge 4.3'de gösterilmiştir.

Çizelge 4. 3 Analizlerden ve deneyden elde edilen toplam direnç değeri ve analiz süreleri (Fn=0.201)

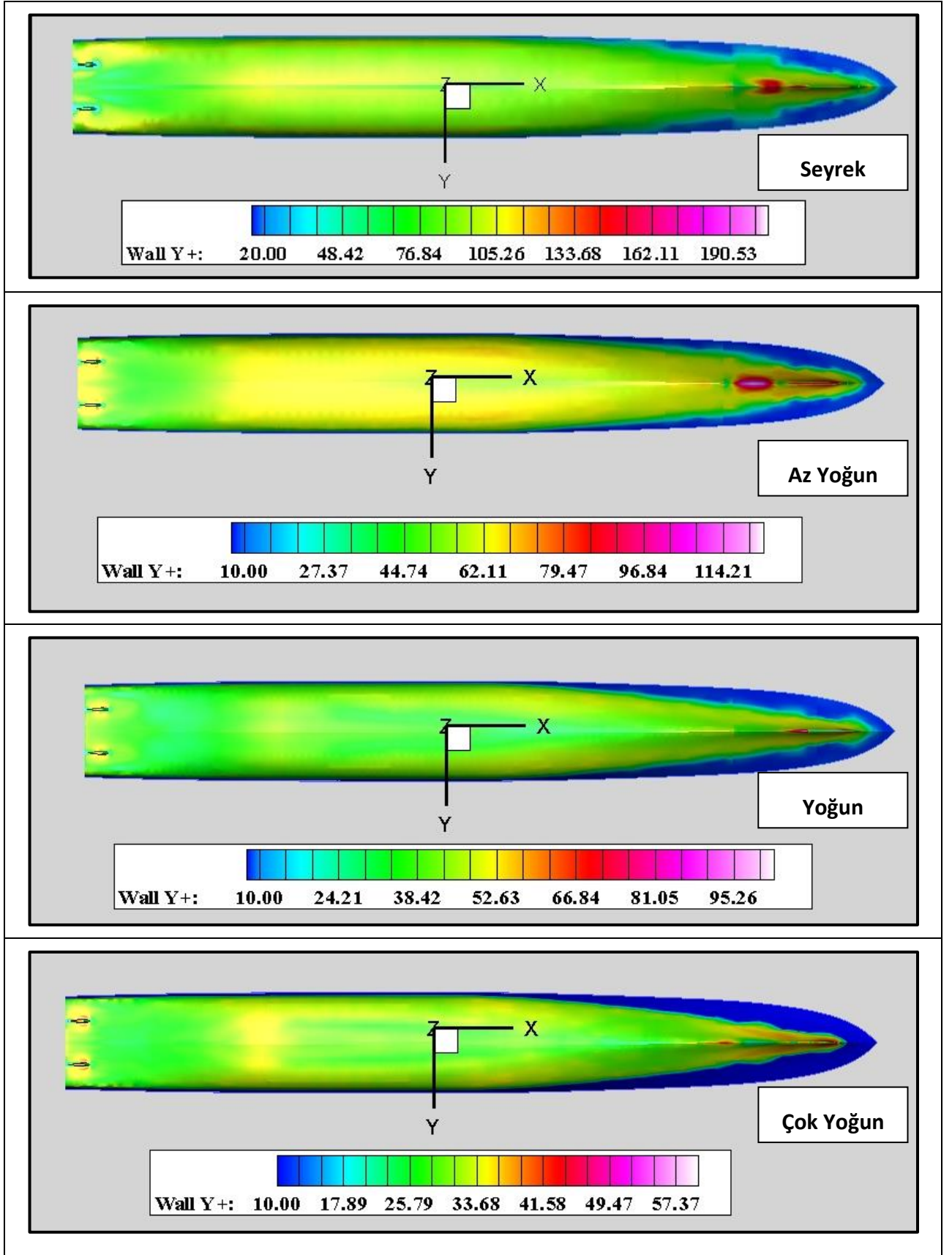
	Deney	Seyrek 4	Az Yoğun 3	Yoğun 2	Çok Yoğun1
Toplam direnç (R_T) [N]	6.874	10.940	7.659	6.892	6.837
Hesaplama süresi [saat]	754	12	18	42	76
Hata % $\left \frac{HAD-D}{D} \right $	-	% 59.15	% 11.41	% 0.26	% 0.53

Çizelge 4.3 incelendiğinde Seyrek ağ yapısı ile elde edilen sonuç ile deney arasındaki farkın 59.15%, az yoğun ağ yapısı ile %11.41 ve yoğun ağ yapısı ile %0.26 olduğu görülmektedir. Ağ yapısının artmasıyla birlikte sonuçlar arasındaki fark azalmakta fakat analiz süreleri artmaktadır. Analizlerin sonucunda elde edilen toplam dirençlerin zamana bağlı olarak değişimi Şekil 4.10’da verilmiştir.

Analizler sonucunda her bir ağ yapısında tekne gövdesine en yakın ağ elemanı için elde y^+ değerleri Şekil 4.11’de ve ortalama y^+ değerleri ise Çizelge 4.2 de gösterilmiştir. Ağ yapısının sıklığının artmasıyla birlikte tekne üzerinde meydana gelen ortalama y^+ değerlerinin azaldığı görülmektedir.



Şekil 4. 10 Seyrek, Az yoğun, Yoğun ve Çok yoğun ağ yapılarında gerçekleştirilen analiz sonucunda M 367 modelinin zamana bağlı olarak gelişen direnç değerleri (Fn=0.201)



Şekil 4. 11 Seyrek, Az yoğun, Yoğun ve Çok yoğun ağ yapılarında gerçekleştirilen analiz sonucunda M 367 üzerinde meydana gelen y^+ değerleri ($F_n=0.201$)

Denklem (4.22) ve Denklem (4.23)'de verilen yönteme çözümlerin kararlılık ve belirsizlik analizi için 3 adet ağ yapısı gerekmektedir. Bu bölümde iki farklı durum ele alınmıştır. 1. Durum da Seyrek, Az Yoğun ve Yoğun ağ yapıları kullanılmış ikinci durum da ise Az yoğun, Yoğun ve Çok Yoğun ağ yapıları kullanılmıştır.

- Durum Seyrek, Az yoğun ve Yoğun ağ yapıları kullanılarak hata ve belirsizlik analizleri:

$$R_G = \frac{\varepsilon_{32}}{\varepsilon_{43}} = \frac{S_3 - S_2}{S_4 - S_3} = 0.233 \text{ elde edilmiştir, } 0 < R_G < 1 \text{ sağlanmış ve çözüm yakınsamıştır.}$$

Sayısal olarak gerçekleştirilen çalışmalar tam çözüm olmayıp belirli bir hata değeriyle sonuç elde ederler:

$$f_{\text{Tam}} = f_{\text{Yaklaşık}} + H(h) \quad (4.24)$$

Burada f_{Tam} doğru çözümü, $f_{\text{Yaklaşık}}$ sayısal yöntemle yapılan yaklaşık çözümü, $H(h)$ 'da hata değerini göstermektedir. Hata ifadesi Taylor serisine açılırsa yaklaşık olarak aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$H(h) \approx Ah^P \quad (4.25)$$

Burada A sabit bir sayı, h ağ yapısının boyutuyla ilgili bir parametre, P ise seriye açılan terim sayısını göstermektedir. Roache [78] tarafından gerçekleştirilen çalışmada en uygun P değerinin 2 olduğu belirtilmiştir. Bu tez çalışmasında $r_G = \sqrt{2}$ alınmıştır ve teorik olarak $P_{th}=2$ seçilmesi durumunda ITTC [75] prosedürüne ve Richardson [73] yöntemine göre yoğun ağ yapısı üzerinde meydana gelen hata:

$$\delta_{\text{REG}}^* = \frac{\varepsilon_{32}}{r_G^{P_G-1}} \quad (4.26)$$

Denklem (4.26)'da görülen P_G :

$$P_G = \frac{\ln(\varepsilon_{43}/\varepsilon_{32})}{\ln r_G} \quad (4.27)$$

formülleri ile verilmektedir.

Gerçekleştirilen analizler sonucunda $P_G = 4.203$, $\delta_{\text{REG}}^* = 0.232$ sonuçları elde edilmiştir. Teorik olarak beklenen hata değeri ile analizlerden hesaplanan hata değerlerinin birbirlerine oranı:

$$C_G = \frac{r_G^{P_G} - 1}{r_G^{P_{th}} - 1} \quad (4.28)$$

Formülü ile verilir.

$C_G \approx 1$ olması durumunda çözümün asimtotik bir şekilde yakınsadığı kabul edilir ve hata değeri olarak:

$$\delta_{G1} = C_G \delta_{REG}^* \quad (4.29)$$

kabul edilir, belirsizlik ise:

$$U_{G1} = |(1 - C_G) \delta_{REG}^*| \quad (4.30)$$

Eğer C_G değeri 1'den çok büyük veya çok küçük ise Denklem (4.33) kullanılarak belirsizlik tahmininde bulunulamaz bu durumda belirsizliğin tahmin edilebilmesi için ITTC [75] tarafından önerilen Denklem (4.31) kullanılmalıdır:

$$U_G = |C_G \delta_{REG}^*| + |(1 - C_G) \delta_{REG}^*| \quad (4.31)$$

Analizler sonucunda $C_G = 3.291$ elde edilmiştir ve bu değer 1'den yeterince büyüktür.

$$\delta_G^* = |C_G \delta_{REG}^*| = 0.767 \quad (4.32)$$

$$U_{GC} = |(1 - C_G) \delta_{REG}^*| = 0.531 \quad (4.33)$$

$$U_G = |C_G \delta_{REG}^*| + |(1 - C_G) \delta_{REG}^*| = 1.298 \quad (4.34)$$

Analizlerin sonucunda elde edilen belirsizlik değeri $U_G = 1.298$. Direnç değerine ait tam sonuç ise:

$$R_{TC} = 6.892 - \delta_G^* = 6.125 \quad (4.35)$$

Birinci durum da elde edilen hata ve belirsizlik analizi için elde edilen sonuçların tamamı Çizelge 4.4'de verilmiştir.

Çizelge 4. 4 Birinci durum için elde edilen hata ve belirsizlik değerleri (Fn=0.201)

R_G	P_G	C_G	U_G	δ_G^*	U_{GC}	R_{TC}	Deney
0.233	4.203	3.291	1.298	0.767	0.531	6.125	6.874
			(21.20% R_{TC})	(12.52% R_{TC})	(8.66% R_{TC})		

1. Durum için R_G değeri 0.233 elde edilmiştir. Bu sonuca göre kullanılan ağ yapısı yakınsamaktadır ve analizler için kullanılabilir fakat Çizelge 4.4’de Yoğun ağ yapısına ait verilen R_{TC} değerine ait tam sonuç incelendiğinde ilk hesaplanan değere göre azalma gösterdiği ve deneysel veri ile arasındaki farkın arttığı görülmektedir. Belirsizlik değerinin %21.20 çıkması da bu durumu desteklemektedir.

- 2. Durum Az yoğun, Yoğun ve Çok yoğun ağ yapıları kullanılarak hata ve belirsizlik analizleri:

Bir önceki aşamada verilen formuller aynı şekilde Az yoğun, Yoğun ve Çok yoğun ağ yapısı içinde uygulanmıştır. Çok yoğun ağ yapısı için elde edilen hata ve belirsizlik değerleri Çizelge 4.5’de verilmiştir.

Çizelge 4. 5 İkinci durum için elde edilen hata ve belirsizlik değerleri ($F_n=0.201$)

R_G	P_G	C_G	U_G	δ_G^*	U_{GC}	R_{TC}	Deney
0.071	7.632	13.084	0.105	0.055	0.050	6.731	6.874
			(1.55% R_{TC})	(0.81% R_{TC})	(0.74% R_{TC})		

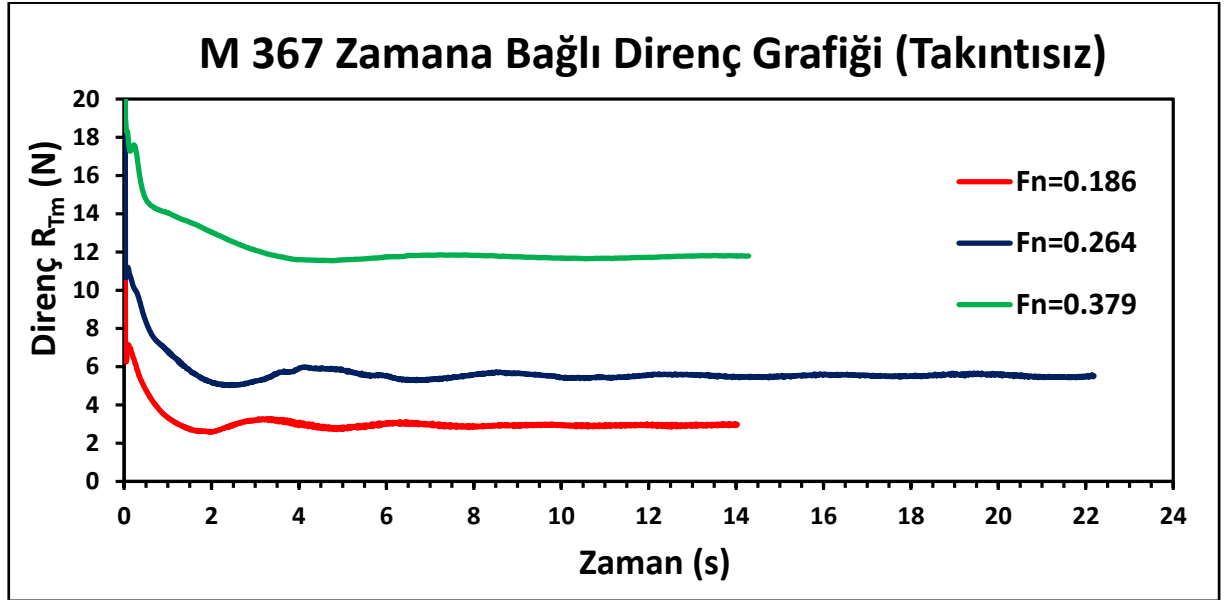
2. durum için gerçekleştirilen hesaplamaların ardından belirsizlik değeri 1. Duruma göre azalma göstermiştir. Her iki durum için deney, R_{TC} ve belirsizlik değerleri göz önüne alındığında ağ yapısının sıklığının artmasıyla birlikte analizlerden kaynaklanan belirsizlik azalmakta ve deneysel sonuca yaklaşılmaktadır. Uygulanan bu yöntem sayesinde deneysel verilerin mevcut olmadığı durumlarda ağ yapısının sıklığı artırılarak veya azaltılarak sonuçların güvenilirliği hakkında bilgi edinilebilir.

Çizelge 4.4 ve Çizelge 4.5 incelendiğinde Yoğun ve Çok yoğun ağ yapılarının her ikisinde HAD analizi için kullanılabilir fakat Çizelge 4.4’de verilen hesaplama süreleri göz önüne alınarak Yoğun ağ yapısı bu çalışmada tercih edilmiştir.

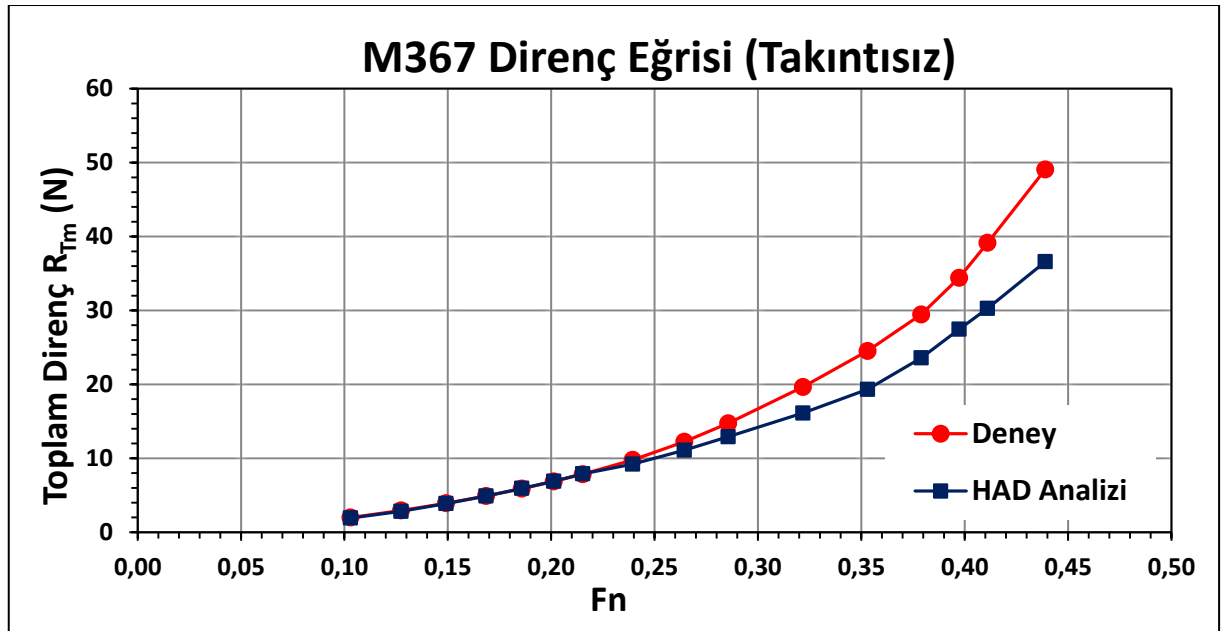
4.3.6.2 Farklı Froude Sayılarında M 367 Takıntısız Tekne Modelinin Direncinin Deneysel ve HAD Yöntemleri Kullanılarak İncelenmesi

$F_n=0.201$ için model etrafında uygun ağ yapısının oluşturulmasının ardından benzer analizler farklı Froude sayılarında gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.12’de 3 farklı Froude sayısı için zamana bağlı olarak elde edilen direnç eğrisi grafiği görülmektedir.

Ağ sayısından ve dolayısıyla analiz süresinden tasarruf edebilmek amacıyla teknenin simetri özelliğinden faydalanılmış ve formun yarısı modellenmiş olmasından dolayı yarım tekne formu için direnç değerleri elde edilmiştir. Modelin toplam direncinin elde edilebilmesi için sonuçların ikiyle çarpılması gerekmektedir.



Şekil 4. 12 Farklı F_n sayılarında HAD'den elde edilen toplam direnç değerleri (Takıntısız Model)

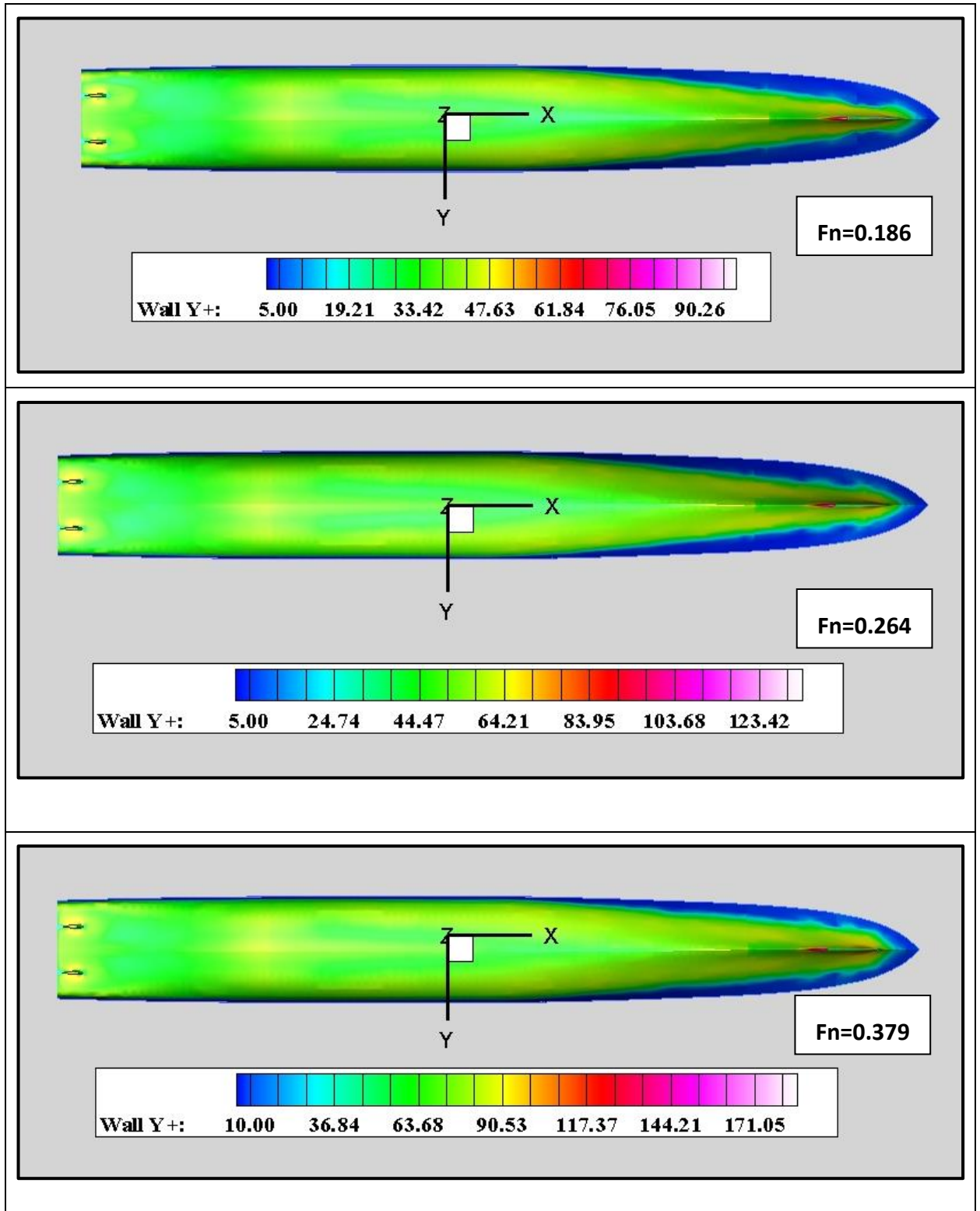


Şekil 4. 13 M 367 tekne modelinin farklı F_n sayılarında HAD analizlerinden ve deneylerden elde edilen toplam direnç değerleri (Takıntısız Model)

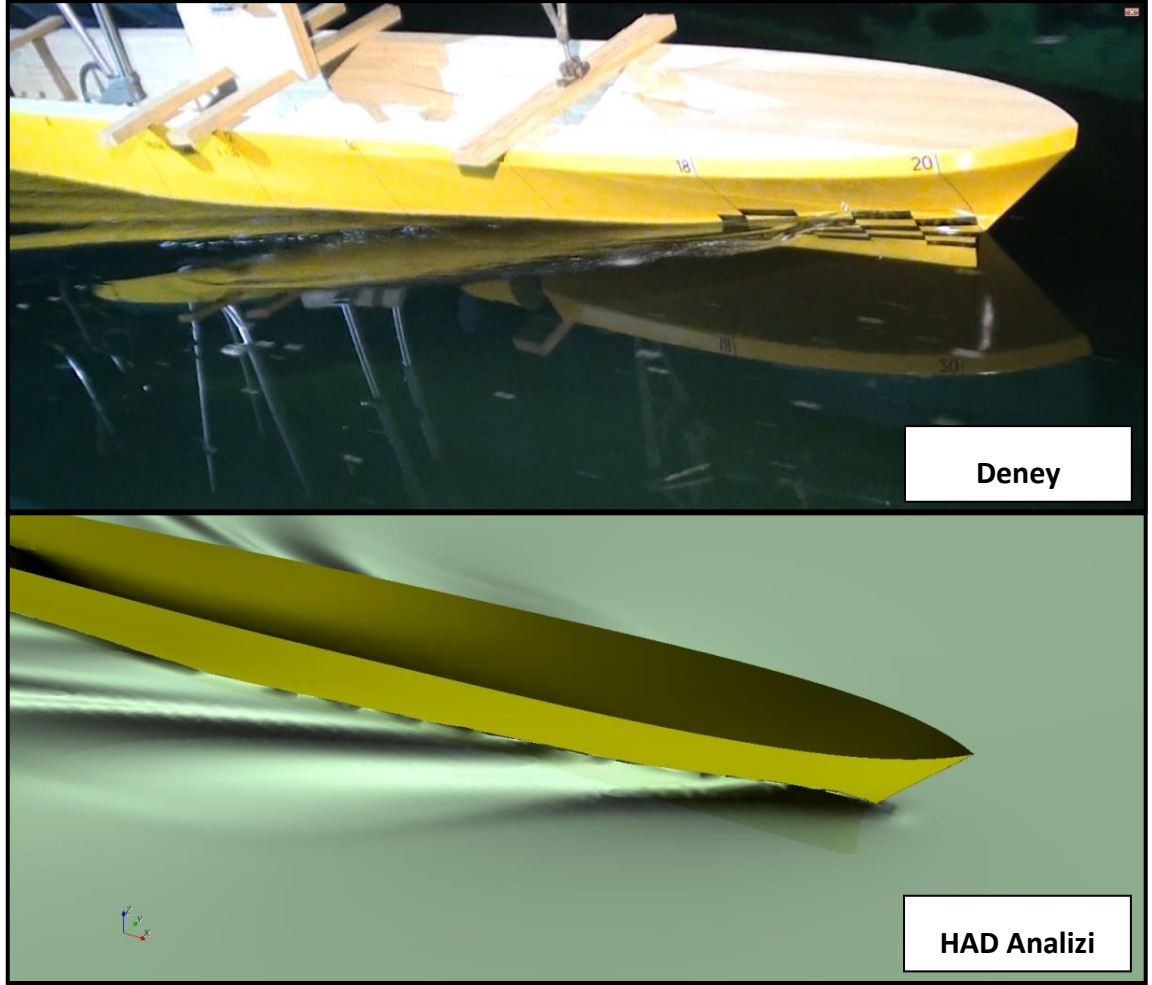
Deneyssel ve sayısal çalışma sonucunda takıntısız tekne formu için elde edilen toplam direnç grafiği Şekil 4.13 ve değerler de Çizelge 4.6'da verilmiştir. Analizlerin sonucunda elde edilen y_+ değerleri üç farklı Froude sayısı için Şekil 4.14'de gösterilmiştir.

Çizelge 4. 6 M 367 tekne modelinin farklı Fn sayılarında HAD analizlerinden ve deneylerden elde edilen toplam direnç değerleri (Takıntısız model)

DENEY					HAD ANALİZİ			
NO	Fn	V _m (m/s)	R _{Tm} (N)	C _{Tm} *1000	R _{Tm} (N)	C _{Tm} *1000	Hata %	$\frac{HAD-D}{D}$
1	0.103	0.634	1.988	4.928	1.926	4.775	% 3.11	
2	0.127	0.784	2.947	4.773	2.822	4.571	% 4.24	
3	0.149	0.918	3.913	4.627	3.879	4.586	% 0.86	
4	0.168	1.037	4.902	4.540	4.893	4.532	% 0.18	
5	0.186	1.143	5.893	4.489	5.929	4.516	% 0.61	
6	0.201	1.239	6.874	4.461	6.892	4.472	% 0.26	
7	0.215	1.325	7.845	4.452	7.900	4.483	% 0.70	
8	0.239	1.474	9.785	4.488	9.208	4.223	% 5.89	
9	0.264	1.628	12.245	4.597	11.090	4.163	% 9.43	
10	0.286	1.758	14.736	4.741	12.909	4.153	% 12.39	
11	0.322	1.980	19.650	4.982	16.123	4.087	% 17.94	
12	0.353	2.173	24.517	5.171	19.326	4.076	% 21.17	
13	0.379	2.333	29.454	5.391	23.577	4.315	% 19.95	
14	0.397	2.445	34.412	5.731	27.456	4.572	% 20.21	
15	0.411	2.530	39.145	6.090	30.280	4.711	% 22.64	
16	0.439	2.702	49.054	6.693	36.587	4.992	% 25.41	

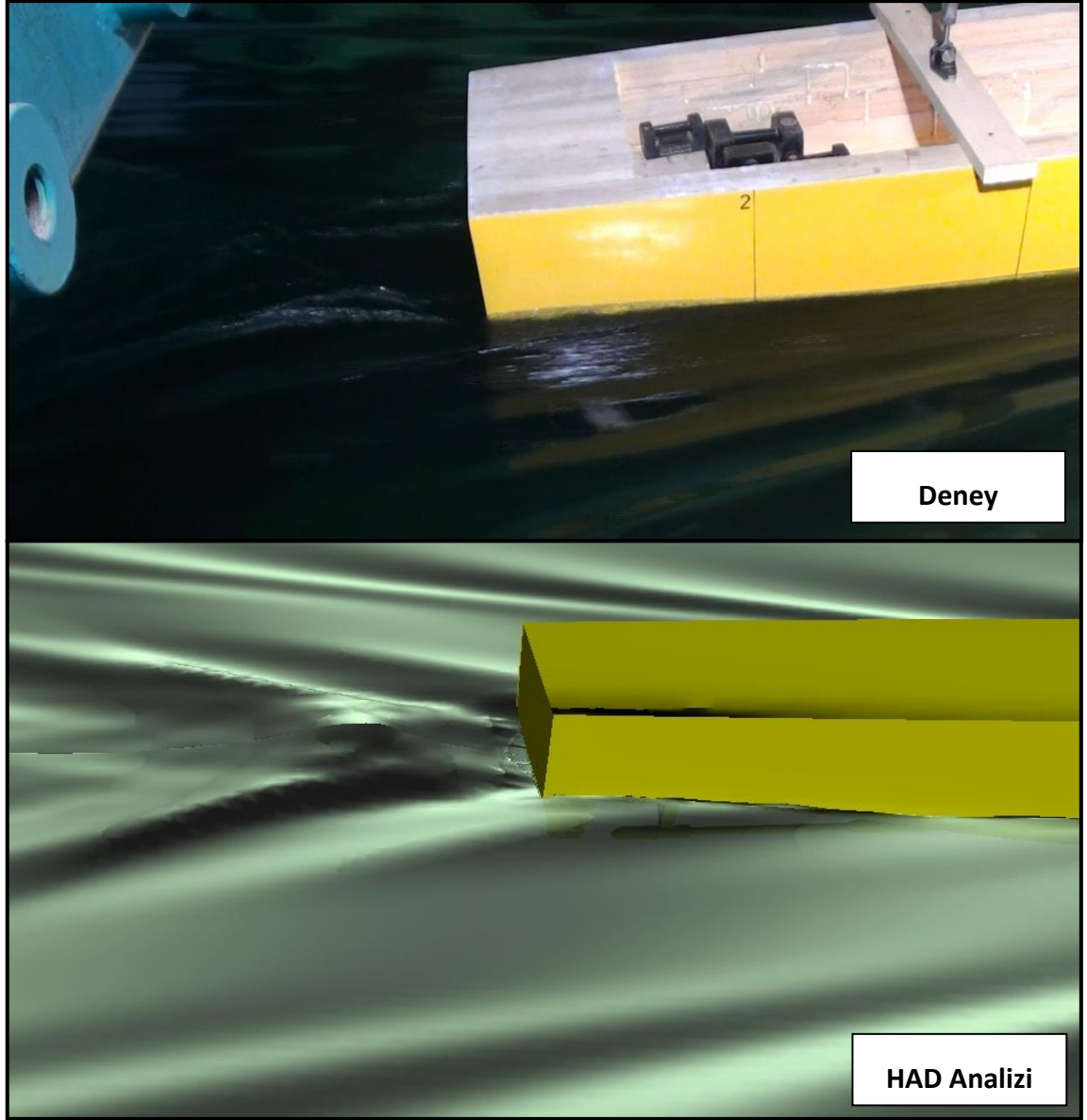


Şekil 4. 14 M 367 tekne modelinin farklı Fn sayılarında meydana gelen y+ değerleri (Takıntısız Model)



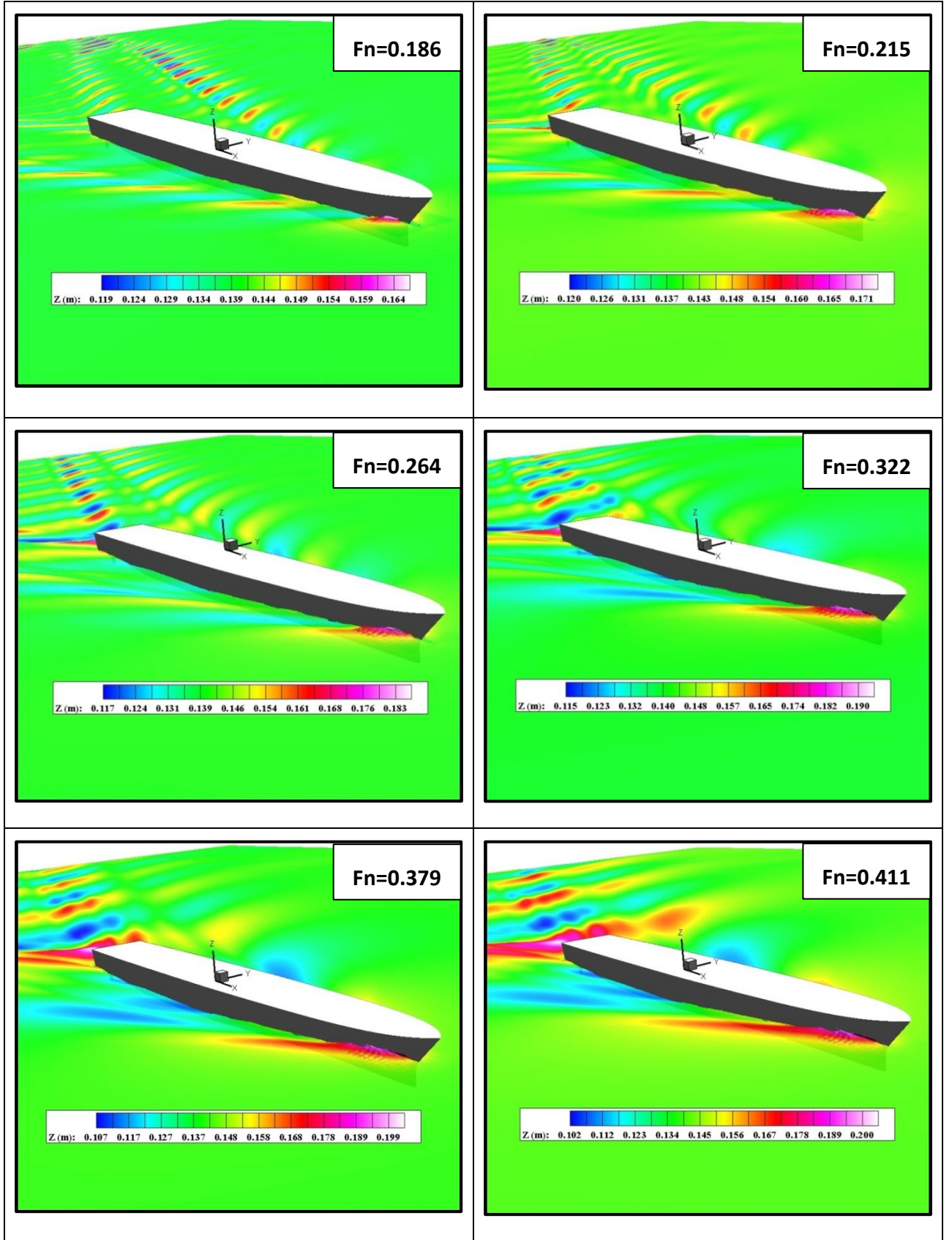
Şekil 4. 15 Deney ve HAD analizi baş dalga deformasyonları ($F_n=0.264$)

Dalga deformasyonları yapılan deneyde ölçülemediğinden nicelik değil ancak nitelik olarak karşılaştırılabilmekte olup deneysel ve sayısal sonuçlar $F_n=0.264$ için Şekil 4.15’de baş dalgaları, Şekil 4.16’da kıç dalgaları gösterilmiştir.

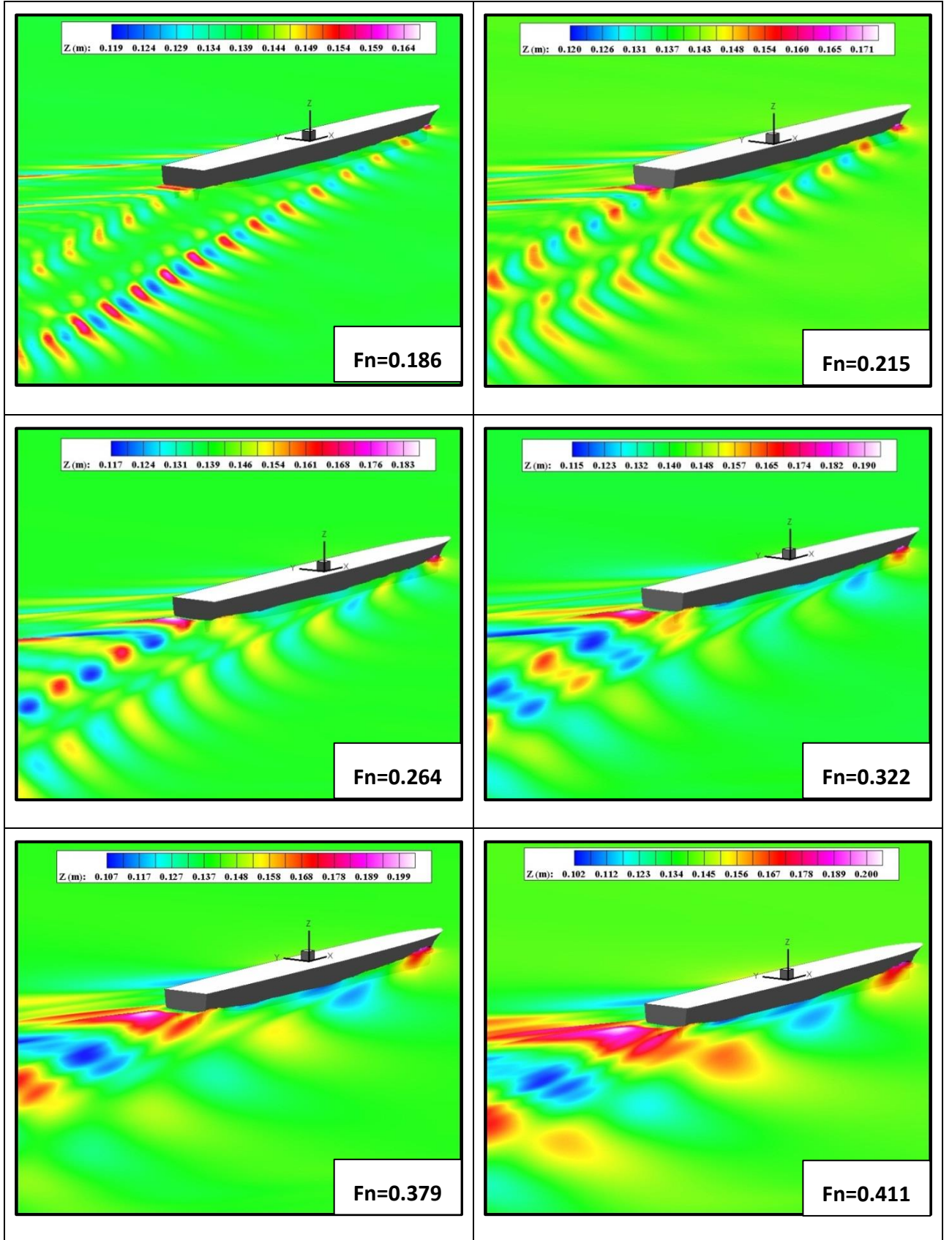


Şekil 4. 16 Deney ve HAD analizi kıç dalga deformasyonları ($F_n=0.264$)

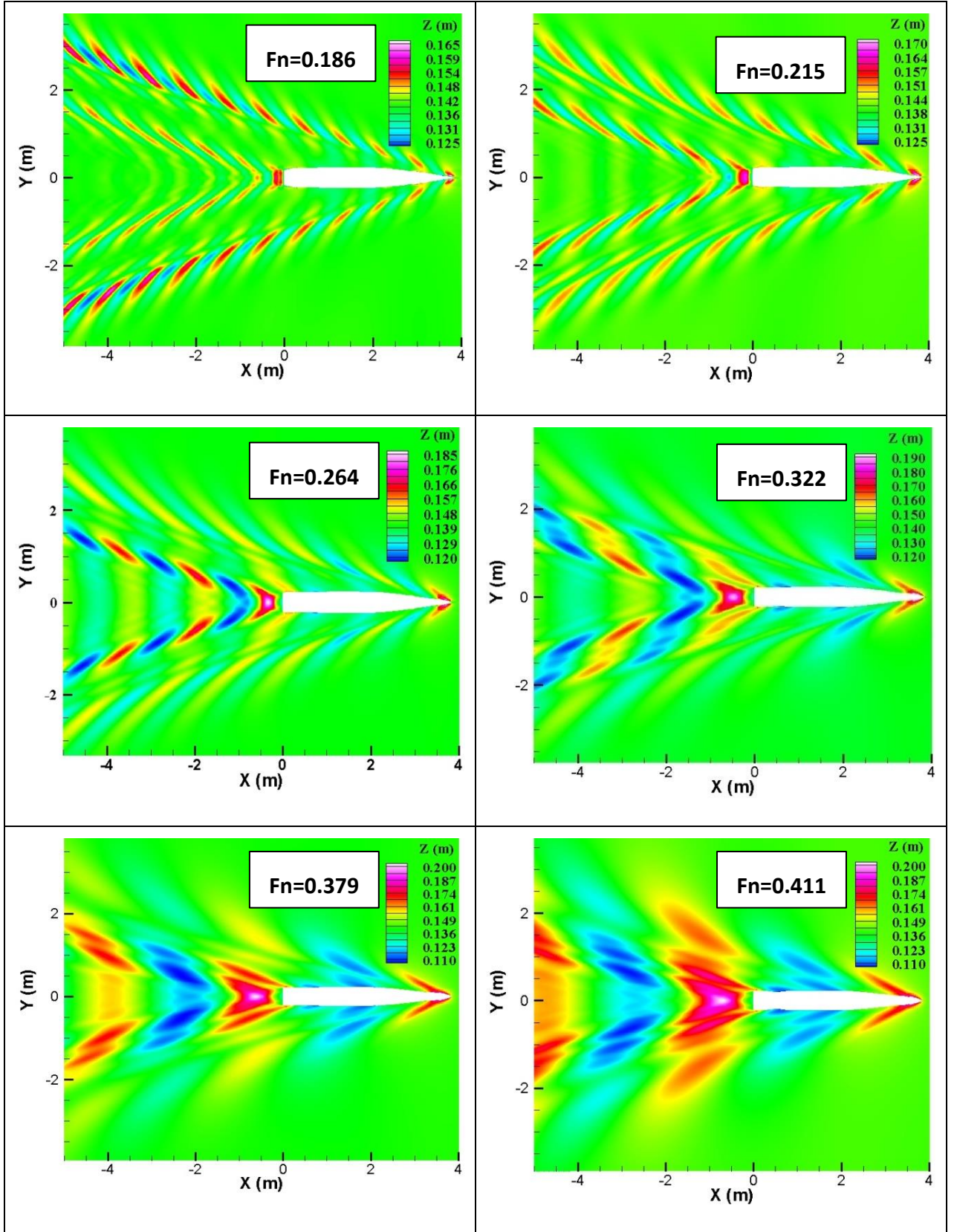
Şekil 4.17 ve Şekil 4.18’de dalga sistemlerinin perspektif görünüşü verilmiş olup Froude sayısının artmasıyla birlikte serbest su yüzeyinde meydana gelen dalga deformasyonlarının artışı görülebilir. Şekil 4.19’da HAD analizleri sonucunda takıntısız durum için elde edilen dalga sistemlerinin üstten görünüşü verilmiştir.



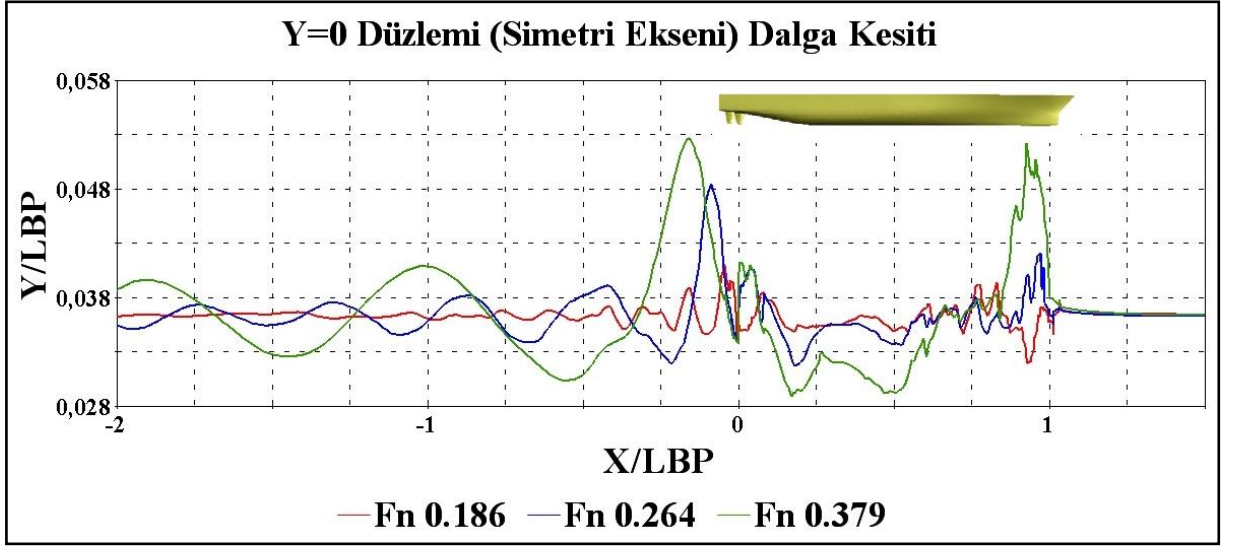
Şekil 4. 17 Analizlerden elde edilen baş dalga sistemlerinin perspektif görünüşü



Şekil 4. 18 Analizlerden elde edilen kıç dalga sistemlerinin perspektif görünüşü

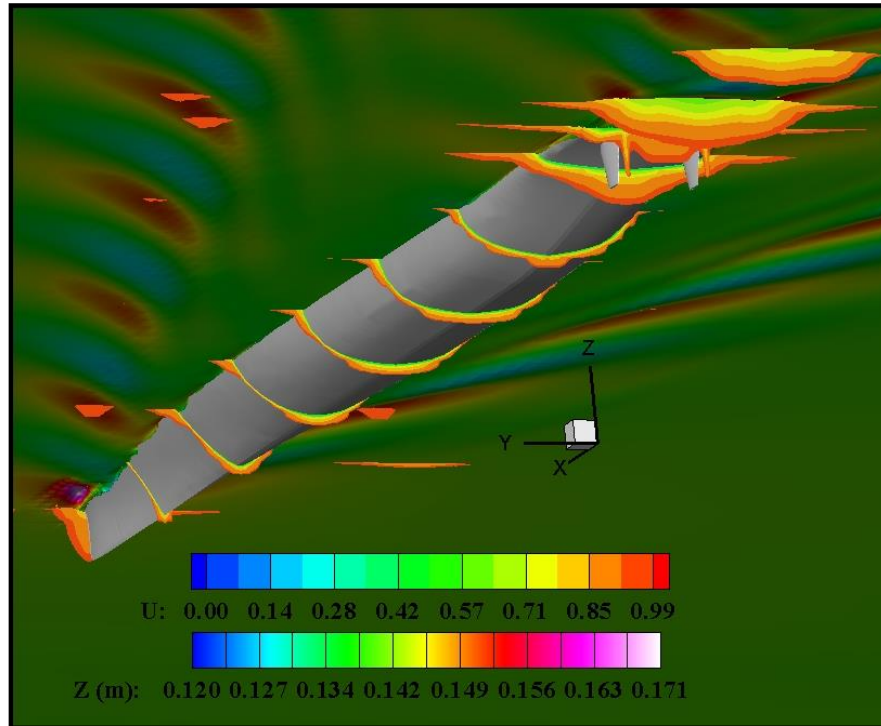


Şekil 4. 19 Analizlerden elde edilen genel dalga sistemlerinin üstten görünüşü

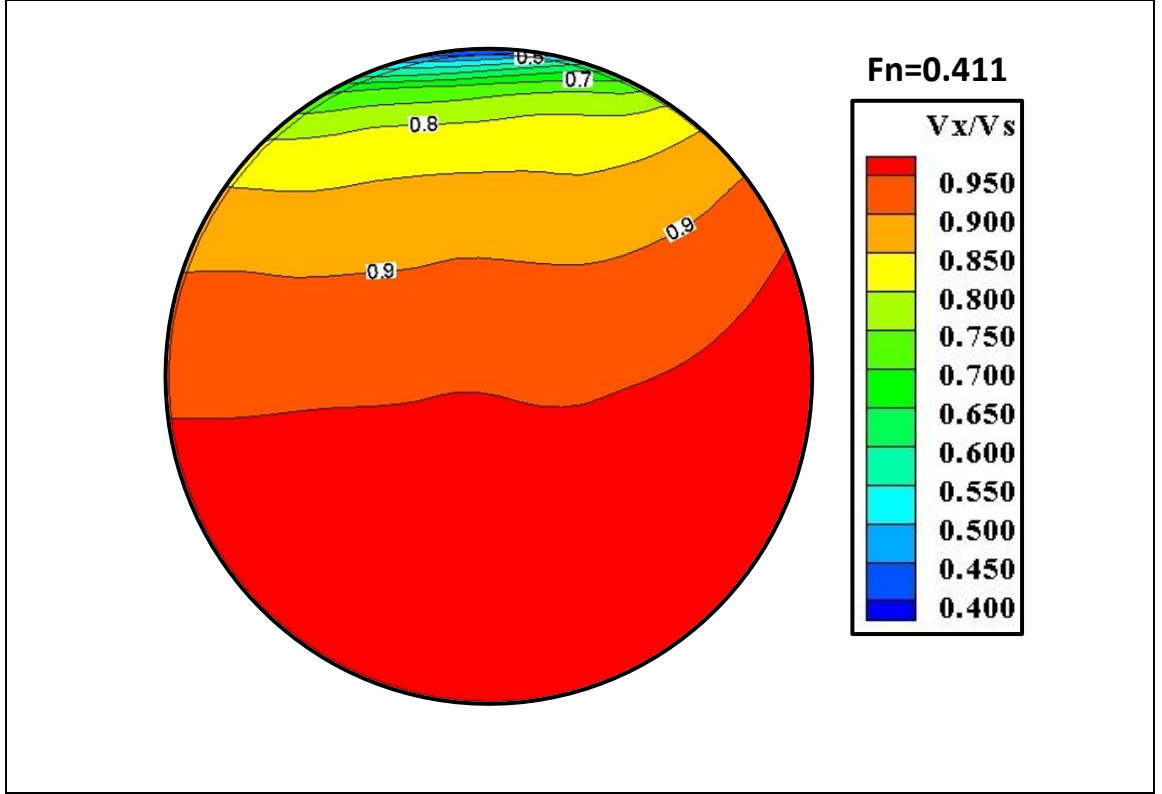


Şekil 4. 20 Model üzerinde ve $Y=0$ (Simetri) düzlemi boyunca meydana gelen dalga deformasyonları

Şekil 4.20’da üç farklı hız için tekne üzerinde ve simetri düzlemin de meydana gelen dalga deformasyonları gösterilmiştir. Şekil 4.20 incelendiğinde Froude sayısı 0.2’yi geçtikten sonra dalga deformasyonlarının arttığı görülmekte olup tekne başında gövdesine göre dalga yüksekliğinin daha fazla olduğu görülmektedir. Şekil 4.21’de $Fn=0.264$ için sınır tabakanın gelişimi gösterilmiştir. Teknenin kık bölgesine doğru sınır tabaka kalınlığının artışı görülmektedir.



Şekil 4. 21 Tekne modeli boyunca sınır tabakanın değişimi ($Fn=0.264$)



Şekil 4. 22 M 367 Takıntısız durum için tekne arkasında elde edilen aksenal iz değerleri ($Fn=0.411$)

Tekne arkasında meydana gelen iz değerleri tekne geometrisine bağlı olup her teknenin kendine özel bir iz dağılımı mevcuttur [63]. Tekne arkasında meydana gelen iz dağılımı pervanenin çalışma ortamını etkileyecek olup düzgün olmayan bir iz dağılımı pervane verimi azaltacak ve kavitasyon, titreşim gibi problemlere yol açacaktır. Alt Bölüm 3.1.5’de iz deneylerinin takıntılı tekne formu ve 30 knot servis hızı için gerçekleştirildiği açıklanmış olup Şekil 4.22’de takıntısız durum için elde edilen iz dağılımı gösterilmiştir. Takıntılı durum için ölçülen iz değerlerinin sayısal sonuçlarla karşılaştırılması bir sonraki bölümde verilmiştir.

4.3.6.3 Sonuçların Değerlendirilmesi

Çalışmanın bu bölümünde tekne etrafındaki serbest su yüzeyli akış deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir. RANS denklemleri $k - \varepsilon$ türbülans modeli ile incelenmiş ayrıklaştırma işlemi için sonlu hacimler yöntemi kullanılmıştır. Gerçekleştirilen analizler ile aşağıda verilen sonuçlar elde edilmiştir:

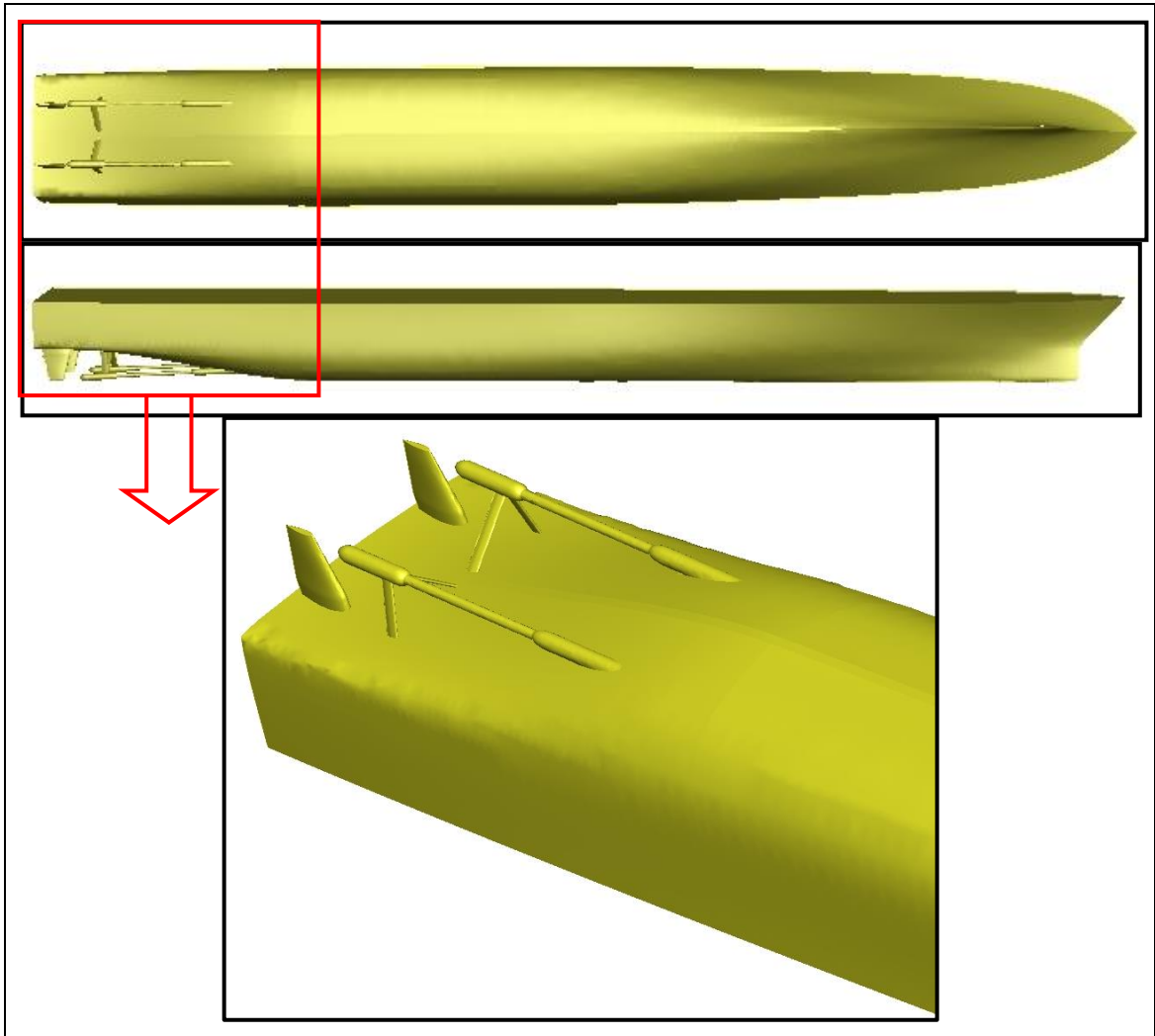
- Tekne direncini tespit edebilmek amacıyla tekne geometrisine bağı olarak hesaplama hacmi boyutları, hesaplama zamanı göz önüne alınarak en uygun ağ yapısı, sınır şartları tespit edilmiştir. Hata ve belirsizlik analizlerine göre hazırlanan model tekne direncini tespit etmek için uygundur.
- Deneysel veriler ile karşılaştırıldığında gerçekleştirilen HAD analizleri tekne direncini hesaplamada ve serbest su yüzeyini modellemede başarılı olmuştur. Akım ayrılmalarının meydana geldiği yüksek hızlarda ($Fn > 0.3$) model ile deney arasındaki fark artmaktadır. Seçilen türbülans modeli ($k - \epsilon$) düşük Reynolds sayıları için uygundur.
- Kullanılan ağ sayısının arttırılması ile hata azalmakta fakat hesaplama süresi artmaktadır. Hacmin geneline göre teknenin baş ve kış bölgesinde daha sık ağ yapısı kullanılmıştır. Oluşturulan bu ağ yapısı sayesinde teknenin başında ve kışında meydana gelen dalga deformasyonları tespit edilebilmiştir. Ağ sayısının arttırılması ile hesaplama süresinin artmasının yanın da çoğu zaman bilgisayar sisteminin yeterli işlem gücünün olmayışı sebebiyle analize dahi başlayamamaktadır. Tüm bu durumlar göz önüne alınarak en uygun hesaplama hacmi ve ağ sistemi belirlenmiştir.
- Deneyler ve analizler toplam 16 farklı hız için gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde, ticari bir yazılım olan STAR CCM+ ile yapılan çözümler uygun olmakla birlikte HAD analizi sonuçlarının $Fn < 0.35$ için kullanılması önerilmektedir.
- Daha güçlü bir bilgisayar sistemi kullanılarak Şekil 4.9'da görülen VOF modelinden kaynaklanan artıkların azaltılması sağlanabilir.
- Elde edilen bu sonuçlar tamamen takıntısız tekne formu için sınırlandırılmıştır. Tekne gövdesine eklenen takıntıların direnç üzerine olan etkisi ayrıca incelenmiştir.

4.3.7 Takıntıların Direnç Üzerine Olan etkisinin İncelenmesi

Takıntıların tekne gövdesine ilave edilmesiyle birlikte direnç testi deneyi 16 farklı hız için tekrarlanmıştır. Analizlerin gerçekleştirilmesi için bir önceki bölümde verilen sıra takip edilmiştir. İlk olarak takıntılı tekne formuna ait CAD geometrisi oluşturulmuştur.

4.3.7.1 CAD Geometrisinin Oluşturulması

Şener [43] tarafından tasarlanan ve Çizelge 3.2’de verilen tekne takıntıları GAMBIT üç boyutlu CAD yazılımı kullanılarak modellenmiştir. Kullanılan takıntılar 3. Bölümde Çizelge 3.2’de açıklanmış ve M 367 modeliyle birlikte Şekil 3.8’de gösterilmiştir. Bu takıntıların bilgisayar ortamında hazırlanan 3 boyutlu CAD görüntüsü Şekil 4.23’de gösterilmiştir.



Şekil 4. 23 M 367 takıntılı tekne CAD modeli

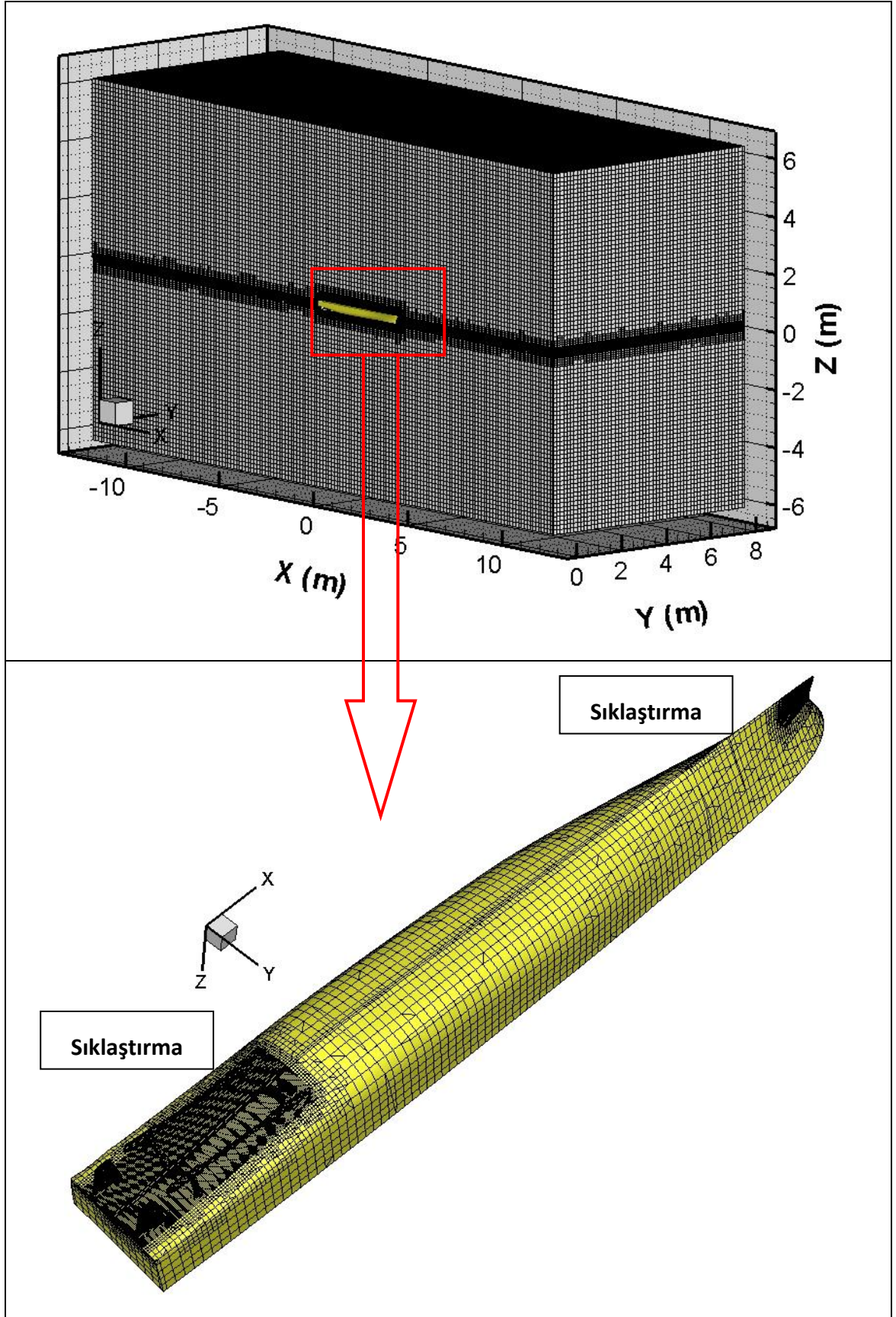
4.3.7.2 Hesaplama Hacminin ve Ağ Yapısının Oluşturulması

Takıntılı tekne formu için tasarlanan hesaplama hacminin boyutları takıntısız analizler için kullanılan hesaplama ile benzer ölçülerde tasarlanmıştır. Oluşturulan hesaplama hacmine ait genel görünüm ve oluşturulan ağ yapısı Şekil 4.24’de gösterilmiştir. Şekil 4.24’den görüleceği gibi takıntılar ve dümenin bulunduğu bölge ile tekne başının bulunduğu bölgede hacmin geneline oranla daha sık ağ yapıları kullanılmıştır. Takıntısız tekne formu için ağ yapısına olan bağımlılık incelenmiş olup yoğun ağ yapısı kullanılmış olup bu bölümde de yoğun ağ yapısına ait ölçüler kullanılarak analizler gerçekleştirilmiştir. Analiz için hazırlanan ağ yapısına ait blok numaraları Şekil 4.25’de gösterilmiştir. Şekil 4.25 incelendiğinde takıntısız analizlerde kullanılan blok oluşturma işlemine benzer şekilde analiz blokları hazırlanmıştır.

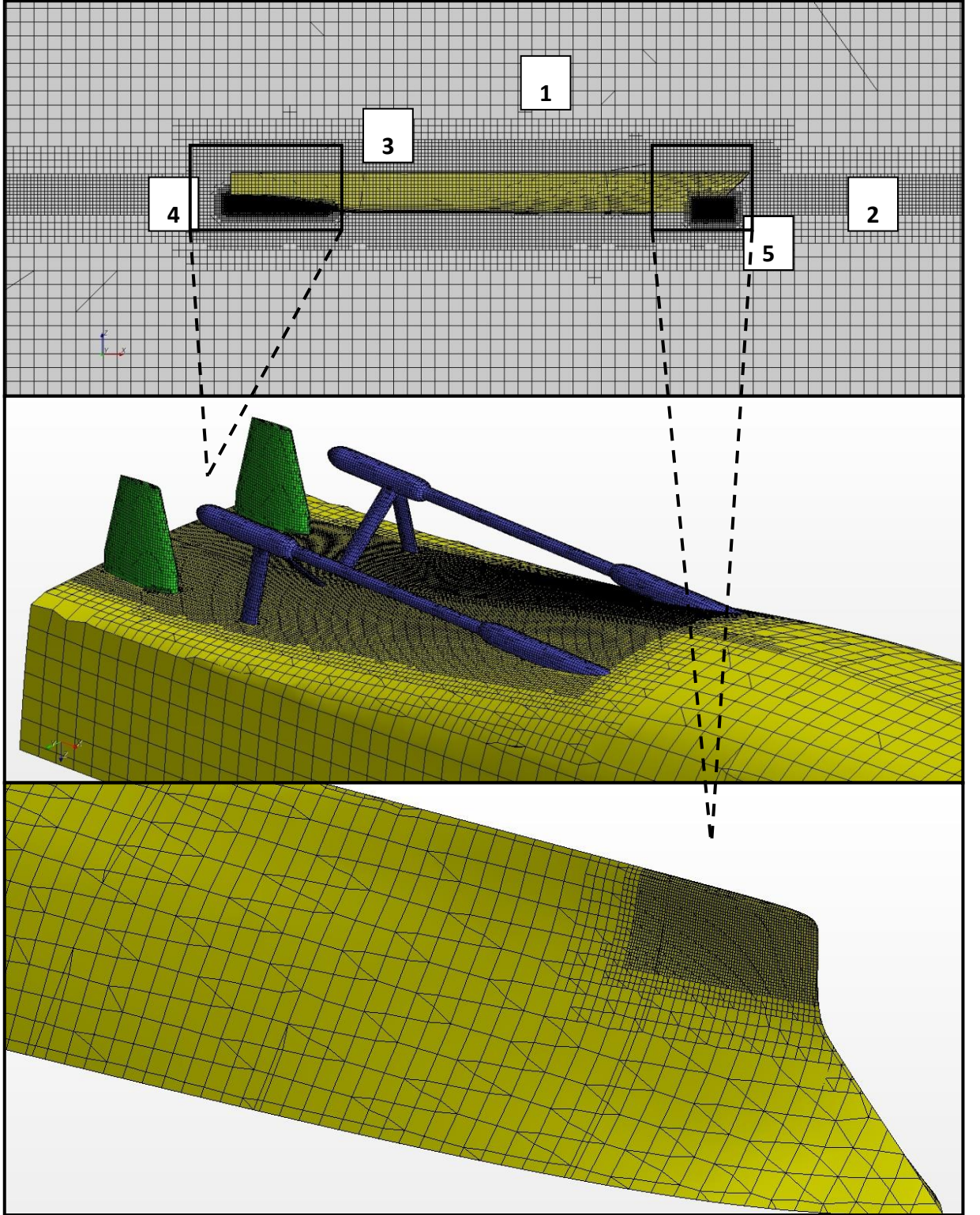
Takıntıların ilavesiyle birlikte teknenin kış bölgesinde oluşturulan 4 nolu blok takıntısız analizlerdeki blok hacmine göre daha büyük tutulmuş ve bu durum toplam hacim sayısının artmasına sebep olmuştur. Blok numaralarına bağlı olarak ağ yapılarının boyutları Çizelge 4.7’de gösterilmiştir.

Çizelge 4. 7 HAD ile takıntılı tekne formunun direnç analizi için oluşturulan ağ yapıları (Yoğun)

Blok No	Blok Adı	Ağ Yapısının Boyutu
1	Kontrol hacminin geneli	0.085 L_{BP}
2	Serbest su yüzeyi düzeltmesi	0.01 L_{BP}
3	Gemietrafı için düzeltme	0.01 L_{BP}
4	Gemi kışı dümen ve takıntılar için düzeltme	0.002 L_{BP}
5	Gemi baş formu için düzeltme	0.002 L_{BP}
Toplam Hesaplama Hacmi		1497643



Şekil 4. 24 M 367 Takıntılı direnç analizi için hazırlanan ağ yapısı (Yoğun)



Şekil 4. 25 M 367 Takıntılı analiz için oluşturulan ağ yapısı, tekne etrafında ve su hattı düzleminde oluşturulan bloklar (Yoğun)

4.3.7.3 Sınır Şartlarının Tanımlanması

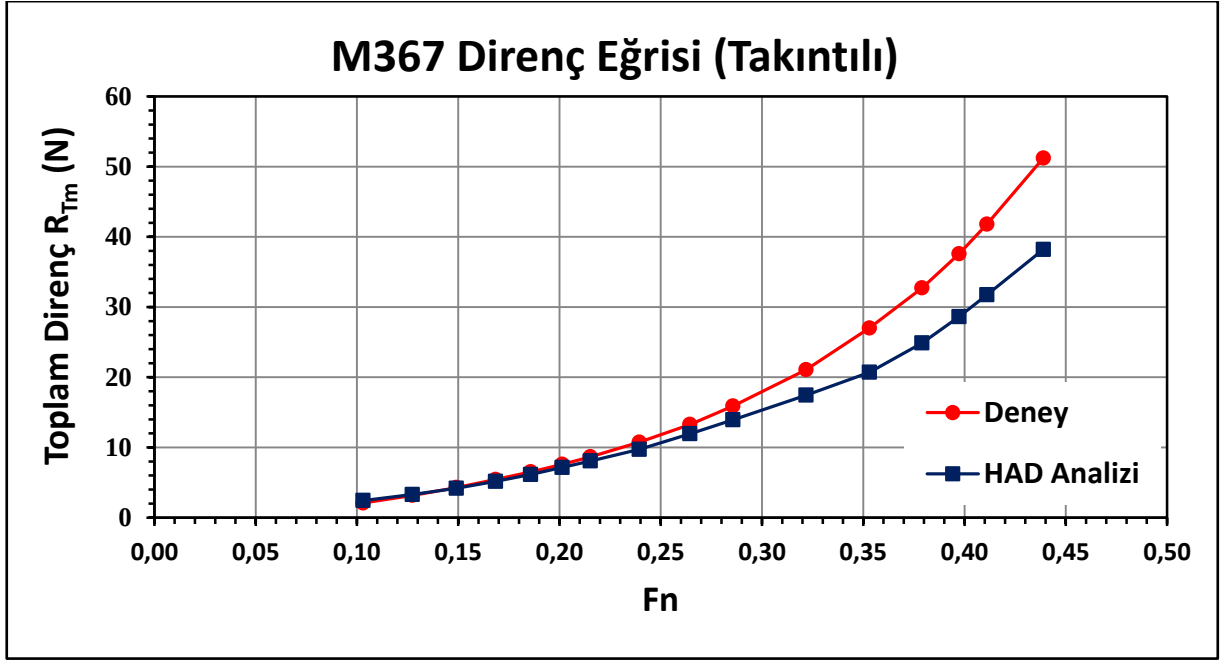
Takıntılı tekne formu için gerçekleştirilen analizlerde kullanılan sınır şartları takıntısız analizlerdeki sınır şartlarına benzer alınmıştır. Şekil 4.8’de analizlerde kullanılan sınır şartları görülmektedir.

4.3.7.4 Farklı Froude Sayılarında M 367 Takıntılı Tekne Modelinin Direncinin DeneySEL ve HAD Yöntemleri Kullanılarak İncelenmesi

Takıntıların direnç üzerine olan etkisinin incelenebilmesi için takıntılı tekne formunun direnç deneyleri ve HAD analizleri takıntısız form ile aynı Froude sayılarında gerçekleştirilmiştir.

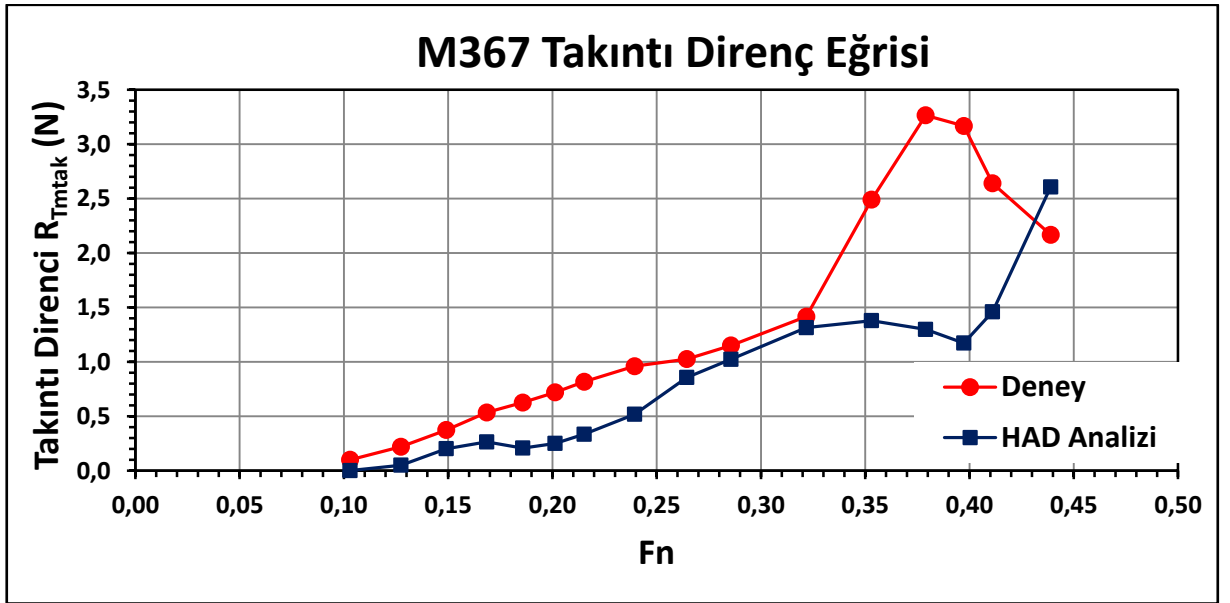
Çizelge 4. 8 M 367 tekne modelinin farklı Fn sayılarında HAD analizlerinden ve deneylerden elde edilen toplam direnç değerleri (Takıntılı model)

DENEY					HAD ANALİZİ			
NO	Fn	V _m (m/s)	R _{Tm} (N)	C _{Tm} *1000	R _{Tm} (N)	C _{Tm} *1000	Hata %	$\frac{HAD-D}{D}$
1	0.103	0.634	2.088	4.956	2.432	5.774	% 16.48	
2	0.127	0.784	3.167	4.911	3.295	5.111	% 4.06	
3	0.149	0.918	4.287	4.853	4.177	4.728	% 2.58	
4	0.168	1.037	5.436	4.821	5.158	4.574	% 5.12	
5	0.186	1.143	6.519	4.755	6.137	4.476	% 5.86	
6	0.201	1.239	7.593	4.718	7.142	4.437	% 5.94	
7	0.215	1.325	8.662	4.706	8.062	4.380	% 6.92	
8	0.239	1.474	10.745	4.718	9.726	4.271	% 9.47	
9	0.264	1.628	13.270	4.778	11.946	4.301	% 9.97	
10	0.286	1.758	15.886	4.902	13.932	4.299	% 12.30	
11	0.322	1.980	21.066	5.122	17.437	4.240	% 17.22	
12	0.353	2.173	27.006	5.454	20.704	4.181	% 23.33	
13	0.379	2.333	32.719	5.734	24.875	4.360	% 23.97	
14	0.397	2.445	37.579	5.933	28.628	4.565	% 23.81	
15	0.411	2.530	41.785	6.225	31.740	4.729	% 24.03	
16	0.439	2.702	51.221	6.692	38.180	4.988	% 25.46	



Şekil 4. 26 M 367 tekne modelinin farklı Fn sayılarında HAD analizlerinden ve deneylerden elde edilen toplam direnç değerleri (Takıntılı Model)

Deneylerden ve HAD analizlerinden elde edilen toplam direnç değerleri Şekil 4.26 ve Çizelge 4.8’de gösterilmiştir.



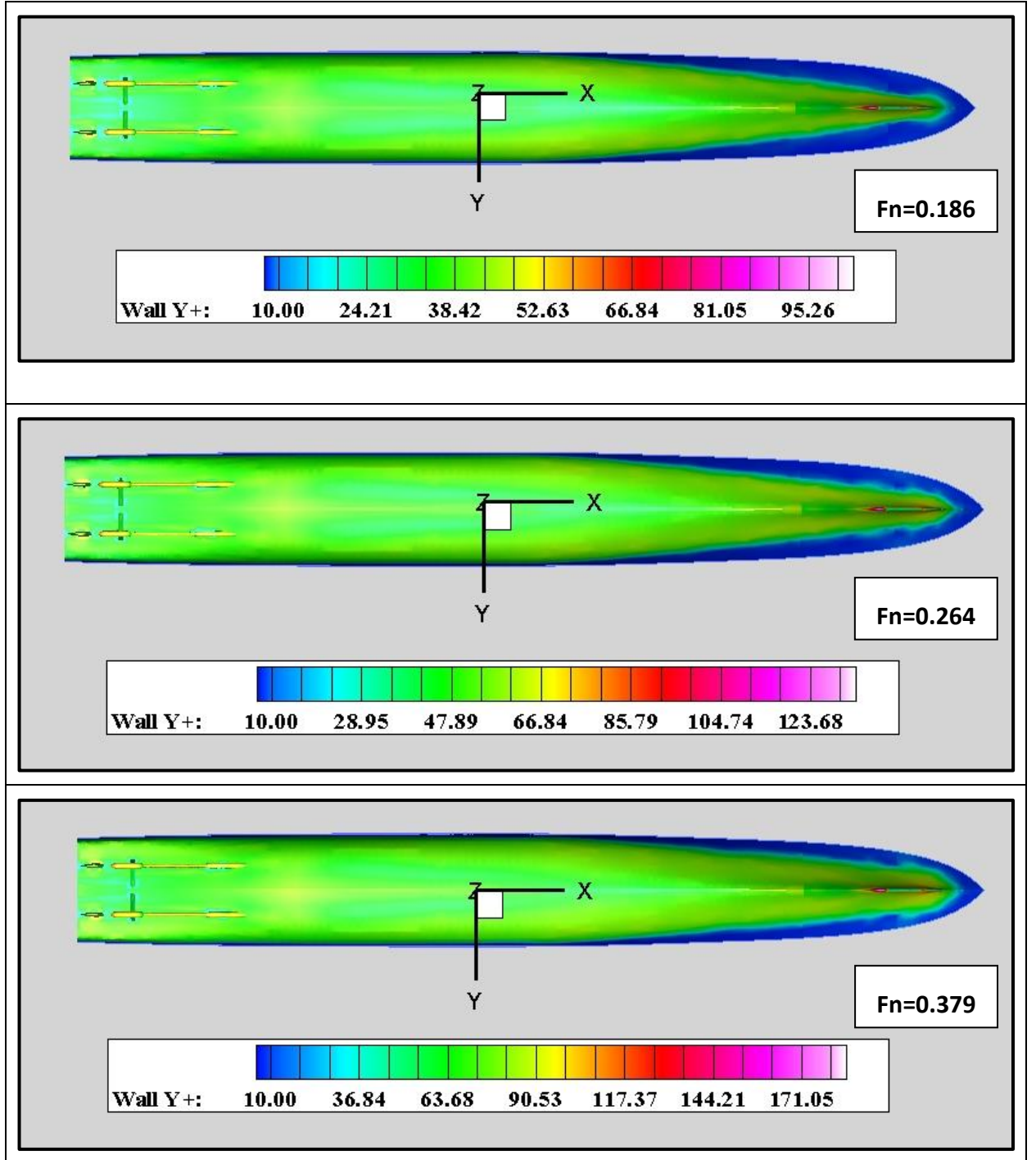
Şekil 4. 27 M 367 tekne modeli için farklı Fn sayılarında HAD analizlerinden ve deneylerden elde edilen ek takıntı direnci

Çizelge 4. 9 M 367 tekne modeli için farklı Fn sayılarında HAD analizlerinden ve deneylerden elde edilen ek takıntı direnci

DENEY			HAD ANALİZİ		
NO	Fn	V_m (m/s)	R_{Tmtak} (N)	R_{Tmtak} (N)	Hata % $\left \frac{HAD-D}{D} \right $
1	0.103	0.634	0.100	0.001	% 98.78
2	0.127	0.784	0.220	0.050	% 77.14
3	0.149	0.918	0.374	0.202	% 46.09
4	0.168	1.037	0.535	0.265	% 50.54
5	0.186	1.143	0.626	0.208	% 66.77
6	0.201	1.239	0.719	0.250	% 65.16
7	0.215	1.325	0.817	0.335	% 58.97
8	0.239	1.474	0.960	0.518	% 46.01
9	0.264	1.628	1.025	0.856	% 16.45
10	0.286	1.758	1.150	1.023	% 11.07
11	0.322	1.980	1.416	1.314	% 7.20
12	0.353	2.173	2.490	1.378	% 44.65
13	0.379	2.333	3.265	1.298	% 60.24
14	0.397	2.445	3.167	1.172	% 62.99
15	0.411	2.530	2.640	1.460	% 44.69
16	0.439	2.702	2.167	2.607	% 20.30

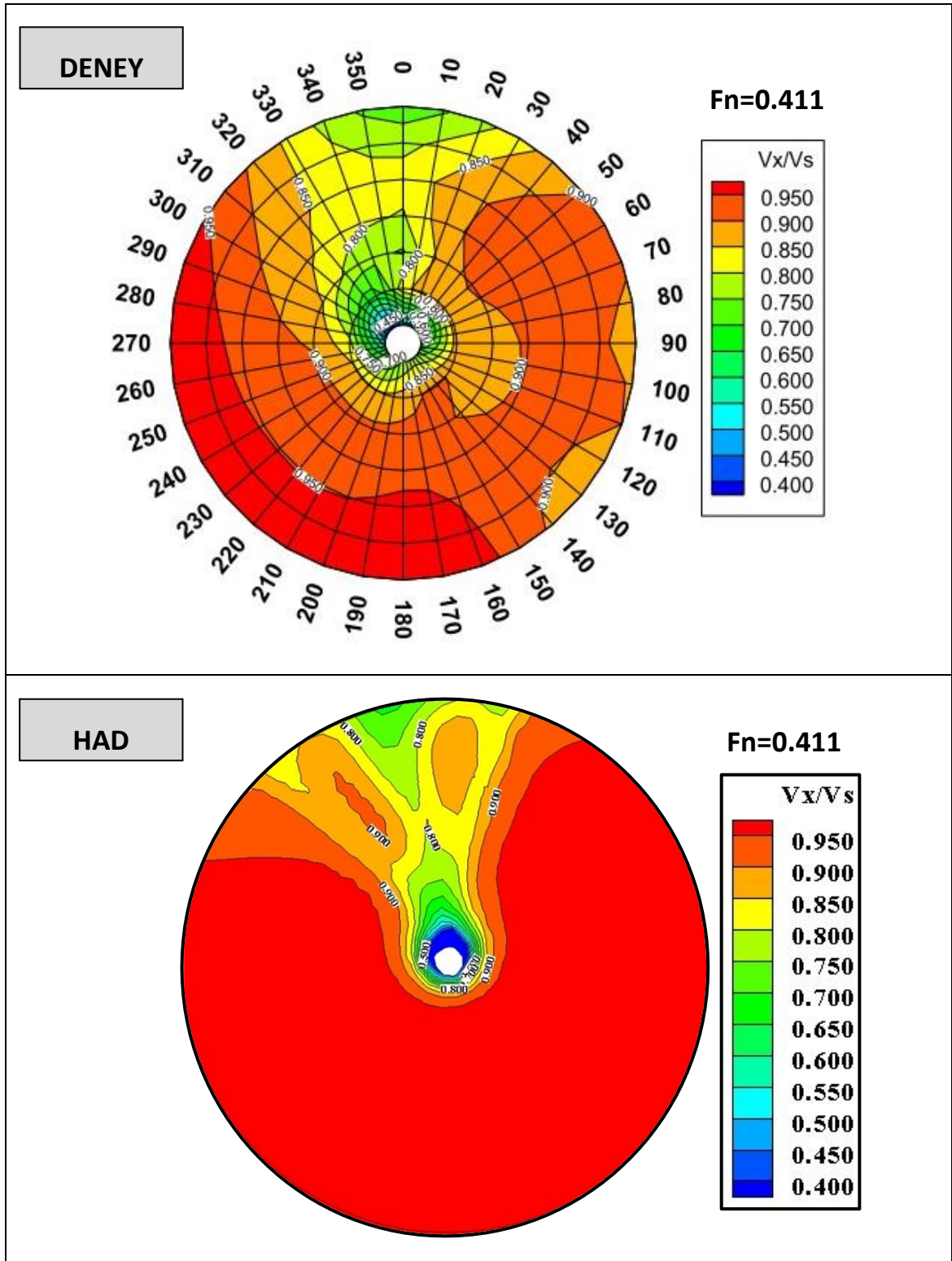
Tekne üzerine takıntıların ilave edilmesiyle gerçekleştirilen deney ve analizlerin sonucunda toplam direnç katsayısı hesaplanırken ıslak alan üzerine takıntı alanları da dahil edilmiştir. Tekne formuna eklenen takıntıların direnç değerinde meydana getirdiği artım değerleri Çizelge 4.9 ve Şekil 4.27’de gösterilmiştir.

Şekil 4.28 incelendiğinde tekne üzerindeki y^+ değerlerinin değişimi görülmekte olup yüksek hızlarda y^+ değerleri artmaktadır. y^+ değerleri 30 ile 300 arasında değişmelidir ve bu şart analizlerde sağlanmıştır.



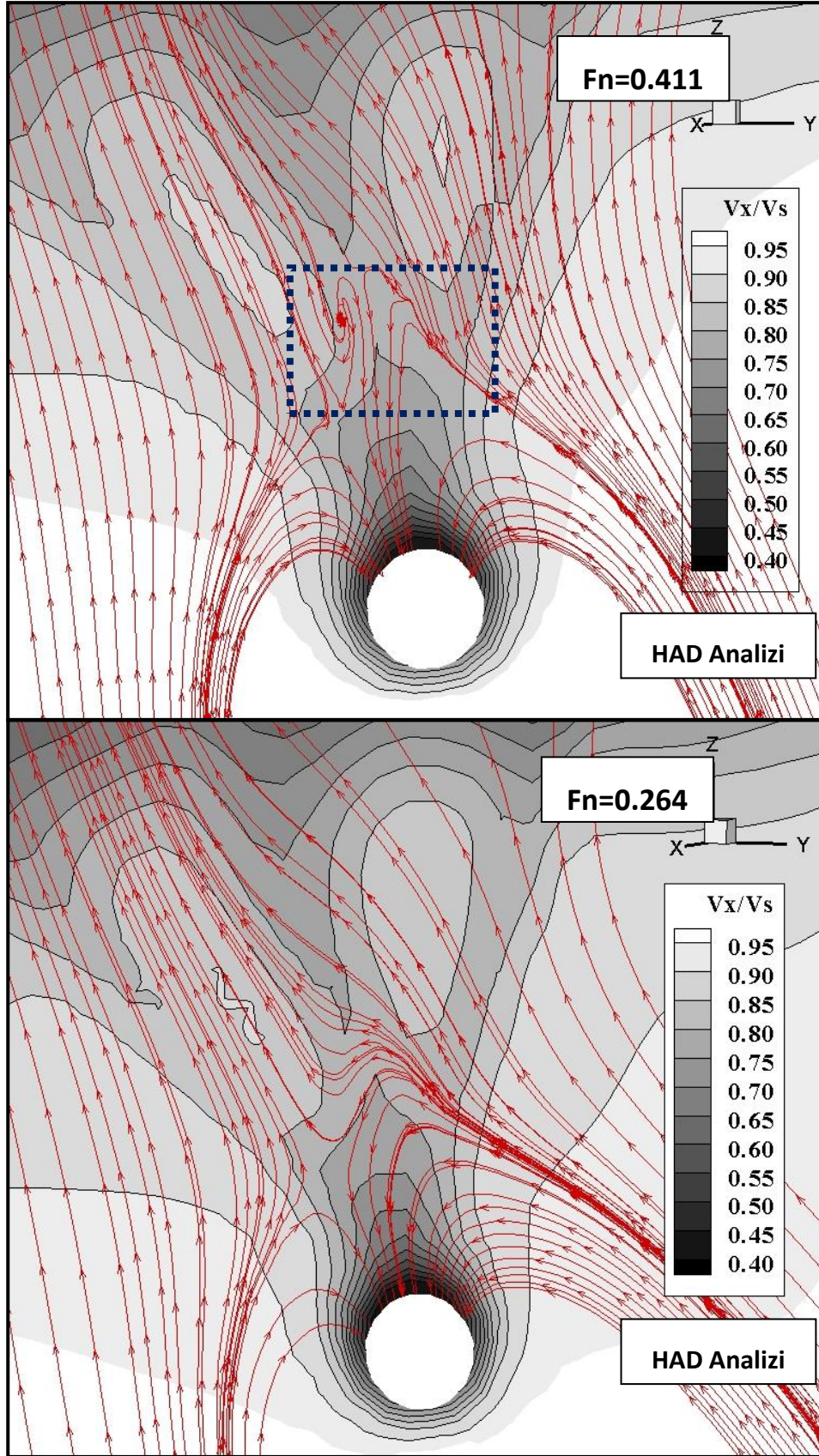
Şekil 4. 28 M 367 tekne modelinin farklı F_n sayılarında meydana gelen y^+ değerleri (Takıntılı Model)

Deneyden ve HAD'den elde edilen pervane düzlemindeki aksenal iz dağılımları Şekil 4.29'da gösterilmiştir.



Şekil 4. 29 Deney ve HAD analizleri sonucunda pervane düzleminde elde edilen eksenel iz dağılımı ($Fn=0.411$)

Şekil 4.30’da farklı Froude sayılarında HAD’dan elde edilen pervane düzlemindeki eksenel iz dağılımları ve meydana gelen akım hatları görülmektedir.



Şekil 4.30 İz bölgesinde meydana gelen akım çizgileri

Şekil 4.30'dan görüleceği gibi yüksek Fn sayılarında pervane düzleminde girdap oluşmaktadır.

4.3.7.5 Sonuçların Değerlendirilmesi

Bu bölümde deneylerden ve HAD analizlerinden elde edilen sonuçlar aşağıda sıralanmıştır:

- Şekil 4.26 incelendiğinde takıntılı durum için geliştirilen HAD yöntemi deneylerle karşılaştırıldığında toplam dirence ait sonuçlar genel olarak $Fn=0.30$ değerine kadar uyum içerisindedir. Froude sayısının artmasıyla birlikte sonuçlar arasındaki fark artmaktadır ve bu durum Şekil 4.26'dan görülebilir.
- Takıntılardan kaynaklanan direnç artışı Şekil 4.27 ve Çizelge 4.9'da verilmiştir. HAD yöntemi takıntılardan kaynaklanan ek direnç değerlerini yüksek ve düşük Froude sayılarında tahmin edememiştir. Takıntılardan kaynaklanan ek direnç değerlerinin düşük olması sebebiyle toplam direnç üzerine hatanın etkisi az olmuştur.
- Şekil 4.28'de tekne ve takıntılar üzerinde elde edilen y^+ değerleri verilmiştir. Analiz sonucunda beklenen değerlere ulaşılmış olup ağ oluşturma zor olduğu takıntı ve tekne baş bölgesinde formun geneline oranla y^+ değerlerindeki artış görülmektedir.
- Şekil 4.29 da elde edilen takıntılı tekne formuna ait iz değerleri Şekil 4.22 ile verilen takıntısız iz değerleri ile karşılaştırıldığında takıntılardan kaynaklanan iz katsayısını değiştirdiği görülmektedir. Tekne geometrisine uygun pervane tasarımı gerçekleştirilirken takıntılı tekne formuna ait iz değerleri göz önüne alınmalıdır.
- Şekil 4.29 de HAD analizlerinden elde edilen iz değerleri deneysel sonuçlar ile karşılaştırılmıştır ve hazırlanan HAD yöntemi $Fn=0.411$ için iz tahmininin başarılı olmuştur.
- Şekil 4.30 incelendiğinde Froude sayısının artmasıyla birlikte teknenin iz bölgesinde girdapların meydana geldiği görülmektedir. Bu durum pervanenin çalışmasını olumsuz etkileyecek olup titreşim ve gürültü problemi

oluşturacaktır. Sunulan yöntem sayesinde birden fazla hız değeri için pervane düzleminde veya istenilen herhangi bir akış kesitinde meydana gelen hız dağılımı tespit edilebilir.

4.3.8 M 367 Tekne Form Faktörünün ve Dalga Direnç Katsayısının İncelenmesi

4.3.8.1 Giriş

Tekne form faktörü tekne geometrisinin düzgünlüğünün veya akışa karşı uyumluluğunun belirlenmesinde tasarımcı tarafından kullanılan önemli parametrelerden biridir. Form faktörünün bilinmesi direnç bileşenlerinin belirlenebilmesi için gereklidir. Bu bölümde tekne form faktörü Prohaska [79] yöntemine göre ve çift gövde yaklaşımı kullanılarak incelenecektir.

4.3.8.2 Prohaska Yöntemi Kullanılarak Tekne Form Faktörünün İncelenmesi

Form faktörü k , aşağıda verilen iki kabul ile kullanılmaktadır:

$$1 + k = \lim_{F_n \rightarrow 0} \frac{R_T}{R_F} = \lim_{F_n \rightarrow 0} \frac{C_T}{C_F} \quad (4.36)$$

- Modelin form faktörü ile tam ölçekli teknenin form faktörü birbirine eşittir,

$$(1 + k)_m = (1 + k)_s \quad (4.37)$$

- Form faktörü tekne hızından bağımsızdır.

Denklem 4.36'da görülen F_n Froude sayısını, R_T toplam tekne direncini, R_F toplam sürtünme direncini, m alt indisi tekne modelini, s indisi ise gemiyi göstermektedir. Daha önceden de belirtildiği gibi teknelerin sürtünme direnci ITTC-57 [66] tarafından önerilen Denklem (4.6) kullanılarak hesaplanabilir. Teknelerin sürtünme direnç katsayısı bu formül ile elde edilmesi mümkün olup viskoz basınç direncinin dolayısıyla form faktörünün ITTC-57 [66] ile elde edilmesi mümkün değildir. Model deneyleri ile viskoz basınç direncinin elde edilebilmesi için teknenin su hattına göre simetriği yapılır ve derin suda çekme deneyi gerçekleştirilir bu yöntemin pahalı, zahmetli oluşu en önemli dezavantajıdır ve bu deneyin gerçekleştirilebilmesi için derin su çekme tankına ihtiyaç duyulmaktadır [68].

Bu yöntemle alternatif olarak tekne form faktörünün hesap edilebilmesi için model serbest yüzeyli akış içerisinde sıfıra yakın hızlarda direnç deneyine tabi tutulur [80]. Düşük hızlarda direnç değerlerinin elde edilmesinde sonra form faktörünün hesap edilebilmesi için iki farklı yöntem geliştirilmiştir [80]:

- Geliştirilen ilk yöntemle göre koordinat düzleminde $x = F_n$ ve $y = C_{Tm}/C_{Fm}$ kabul edilerek en küçük kareler yöntemine göre:

İkinci dereceden : $y = ax^2 + bx + c$ veya

Üçüncü dereceden : $y = ax^3 + bx^2 + cx + d$

polinom denklemi sağlanır. Denklem (4.9) ile gösterilen form faktörünün tanımı kullanılır ise $1 + k = \lim_{F_n \rightarrow 0} \frac{R_T}{R_F} = \lim_{F_n \rightarrow 0} \frac{C_{Tm}}{C_{Fm}} = \lim_{x \rightarrow 0} y$ değerine eşit olacaktır. x değeri sıfıra giderken polinom denklemlerinde y değeri yani form faktörü sabite (c veya d) eşit olacaktır [80].

- Serbest su yüzeyli analizler kullanılarak form faktörünün hesabı için kullanılan ikinci yöntemle göre düşük hızlarda tekne direnci aşağıdaki formülle ifade edilir:

$$C_{Tm} = (1 + k)C_{Fm} + aF_n^n \quad (4.38)$$

Burada a değeri dalga direnci ile ilgili belirlenen sabit bir katsayıdır. Bu yöntem Prohaska [79] tarafından geliştirilmiş olup n değeri 4-6 arasında sabit bir sayıdır. Bir önceki yöntemle benzer şekilde [80]:

$$x = \frac{F_n^n}{C_{Fm}}, y = \frac{C_{Tm}}{C_{Fm}} \quad (4.39)$$

Formulleri kullanılarak koordinat eksen tanımlanır ve bu eksen üzerinde x ve y 'ye bağlı olarak değişen bir doğru denklemi meydana getirilir. Oluşturulan bu doğru denkleminin sabit değeri tekne form faktörüdür. n sayısı blok katsayısı $C_B=0.8$ 'den küçük olan gemilerde 4, C_B 0.8'den büyük olan gemilerde 4-6 arasında seçilmelidir [81]. Prohaska [79] yöntemine göre form faktörünün tespit edilebilmesi için model F_n sayısının 0.100-0.220 aralığında değiştiği düşük hızlarda direnç deneyine tabi tutulur [81].

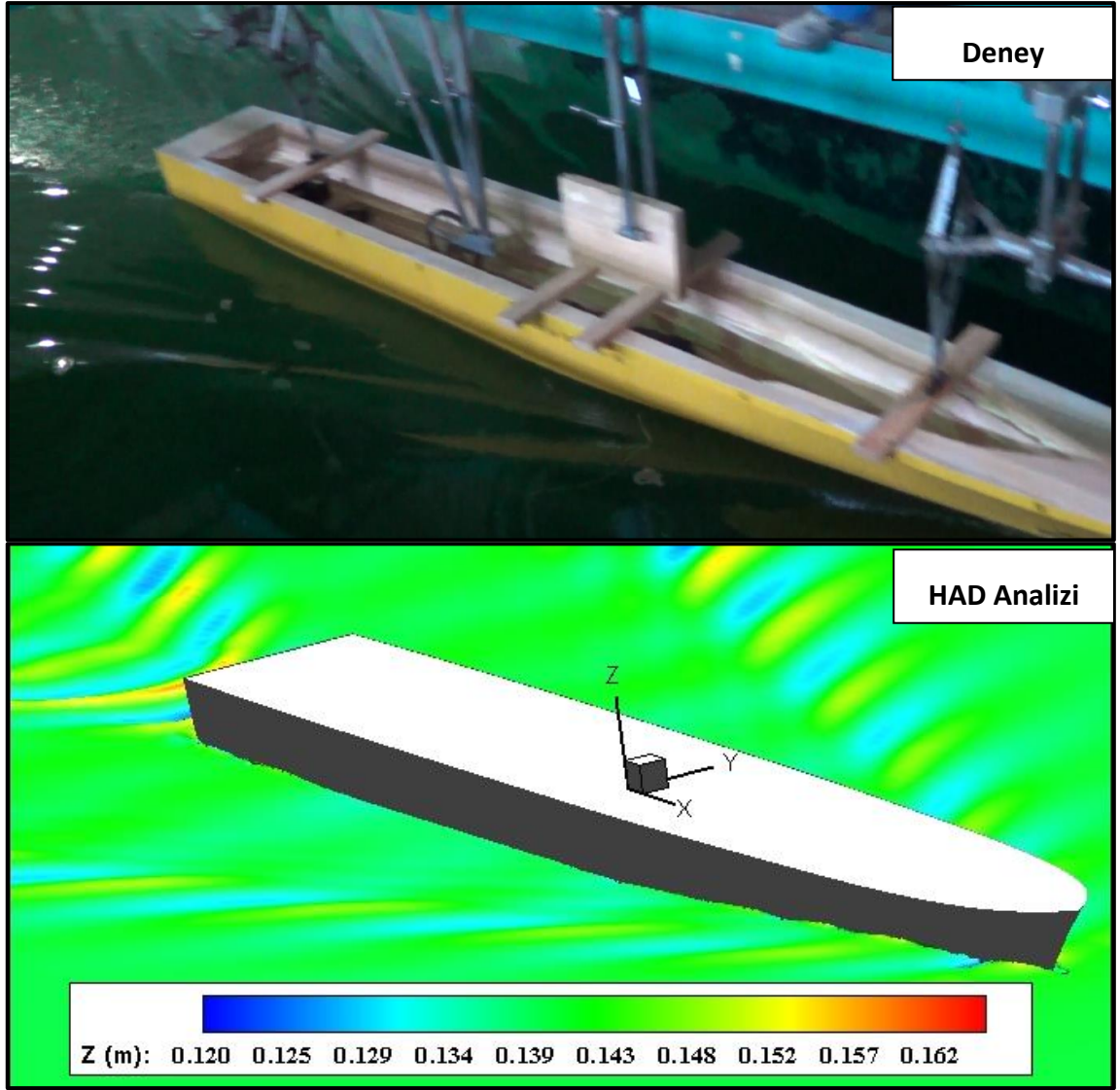
Bu bölümde ilk olarak tekne form faktörü Prohaska [79] yöntemine göre incelenecektir. Bu metodun uygulanabilmesi için Deneylerden ve HAD analizlerinden 6 farklı hız için elde edilen sonuçlar Çizelge 4.10'da gösterildiği gibi düzenlenmiştir.

Çizelge 4. 10 Prohaska yöntemine göre form faktörünün eldesi için hazırlanan değerler

NO	Fn	ITTC-57			DENEY		HAD ANALİZİ	
		Rn _m *10 ⁶	C _{Fm} *1000	Fn ⁴ /C _{Fm}	C _{Tm} *1000	C _{Tm} /C _{Fm}	C _{Tm} *1000	C _{Tm} /C _{Fm}
1	0.103	2.206	3.975	0.0283	4.928	1.240	4.775	1.201
2	0.127	2.729	3.811	0.0691	4.773	1.252	4.571	1.199
3	0.149	3.194	3.697	0.1338	4.627	1.252	4.586	1.241
4	0.168	3.609	3.611	0.2231	4.540	1.257	4.532	1.255
5	0.186	3.979	3.545	0.3361	4.489	1.266	4.516	1.274
6	0.201	4.312	3.492	0.4702	4.461	1.278	4.472	1.281

Fn=0.201 tekne etrafında deneysel ve sayısal çalışmadan elde edilen dalga deformasyonu Şekil 4.31’de gösterilmiştir. Düşük hızlarda meydana gelen ölçüm zorluğundan dolayı modelin form faktörü tespiti için bir miktar dalga oluşumuna izin verilmiştir ve Şekil 4.31’de meydana gelen dalga deformasyonu görülmektedir.

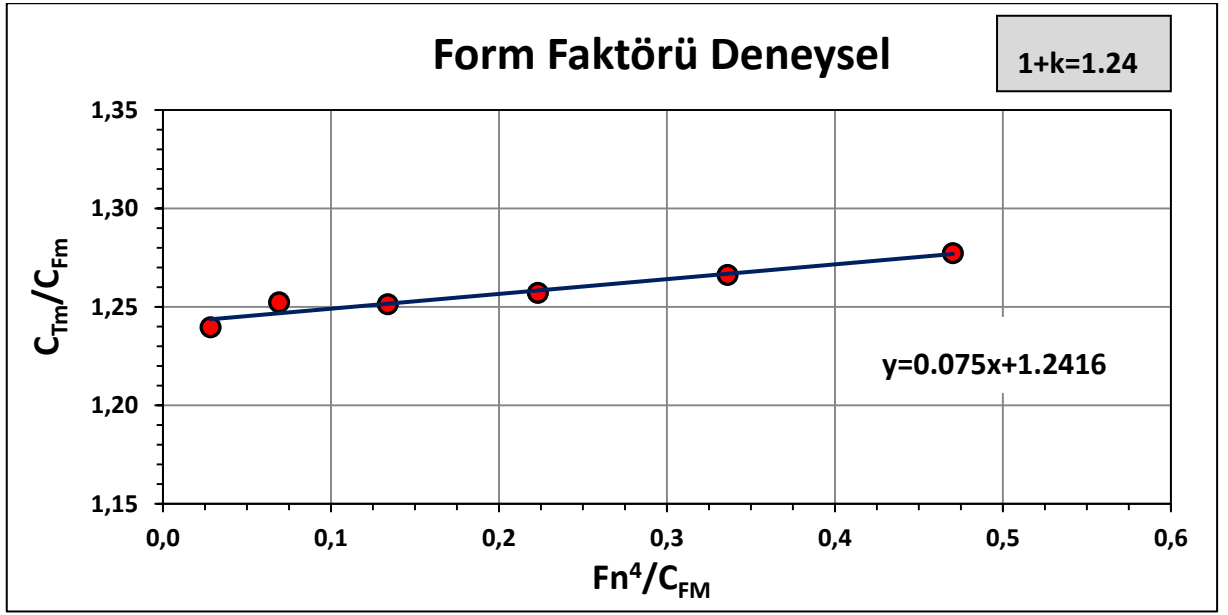
Çizelge 4.10’nun hazırlanmasının ardından form faktörünün tespit edilebilmesi için Denklem (4.41)’de gösterilen formüller kullanılarak deneysel analiz için Şekil 4.32 ve HAD analizi sonuçları için Şekil 4.33 hazırlanmıştır. Hazırlanan grafikte noktalardan geçen lineer doğru denkleminde sabit terim tekne form faktörünü vermektedir ve model ile tam ölçekli gemi için aynı değere sahip olduğu kabul edilir. Grafiklerden elde edilen form faktörleri Çizelge 4.11’de gösterilmiştir.



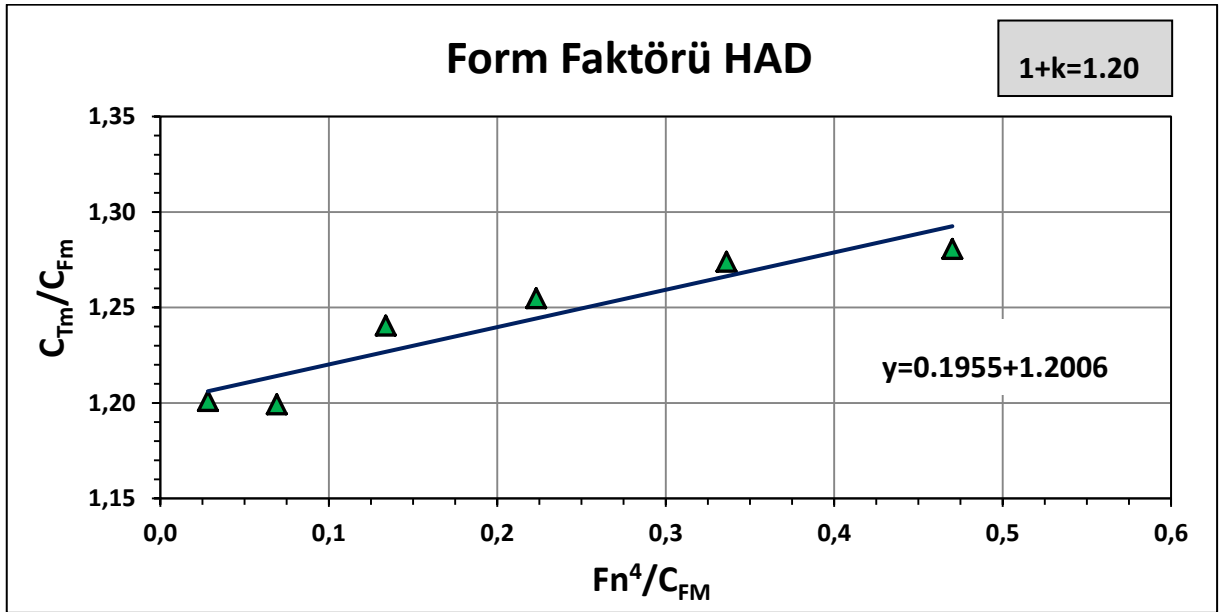
Şekil 4. 31 M 367 tekne modelinin deneyden ve sayısal çözümden elde edilen dalga deformasyonu ($F_n=0.201$)

Çizelge 4. 11 Prohaska yöntemine göre deney ve HAD analizlerinden elde edilen form faktörleri

Form Faktörü	
$1+k$	
Deney	1.24
HAD analizi	1.20
Hata %	$\frac{ HAD-D }{D}$ % 3



Şekil 4. 32 M 367 tekne modelinin Prohaska yöntemine göre deneysel çalışmadan elde edilen form faktörü



Şekil 4. 33 M 367 tekne modelinin Prohaska yöntemine göre analizlerden elde edilen form faktörü

Çizelge 4.11 incelendiğinde serbest yüzeyli HAD analizleri ile yapılan hesaplamalar sonucunda elde edilen form faktörü değerinin deneysel sonuçlardan elde edilen değere yakın olduğu ve hata değerinin %3 olduğu görülmektedir.

4.3.8.3 Çift Gövde Yaklaşımı Kullanılarak Tekne Form Faktörünün İncelenmesi

Prohaska yöntemine göre tekne form faktörü model ölçeği için (1/36) elde edilmiş olup form faktörünün elde edilebilmesi için model düşük hızlarda direnç deneyine tabi tutulmuştur. Bu yöntemle elde edilen modele ait form faktörünün tam ölçekli geminin form faktörü ile aynı olduğu kabul edilerek direnç bileşenleri hesaplanır. Form faktörünün ve direnç bileşenlerinin tespiti için bu yöntem yaygın bir şekilde kullanılıyor olmasına rağmen model ile tam ölçekli teknenin form faktörü değerlerinin birbirinden farklı olduğunu hatta model ölçeğine göre tekne form faktörünün değiştiği Min ve Kong [80], Gomez [82], tarafından yapılan çalışmalarda gösterilmiştir.

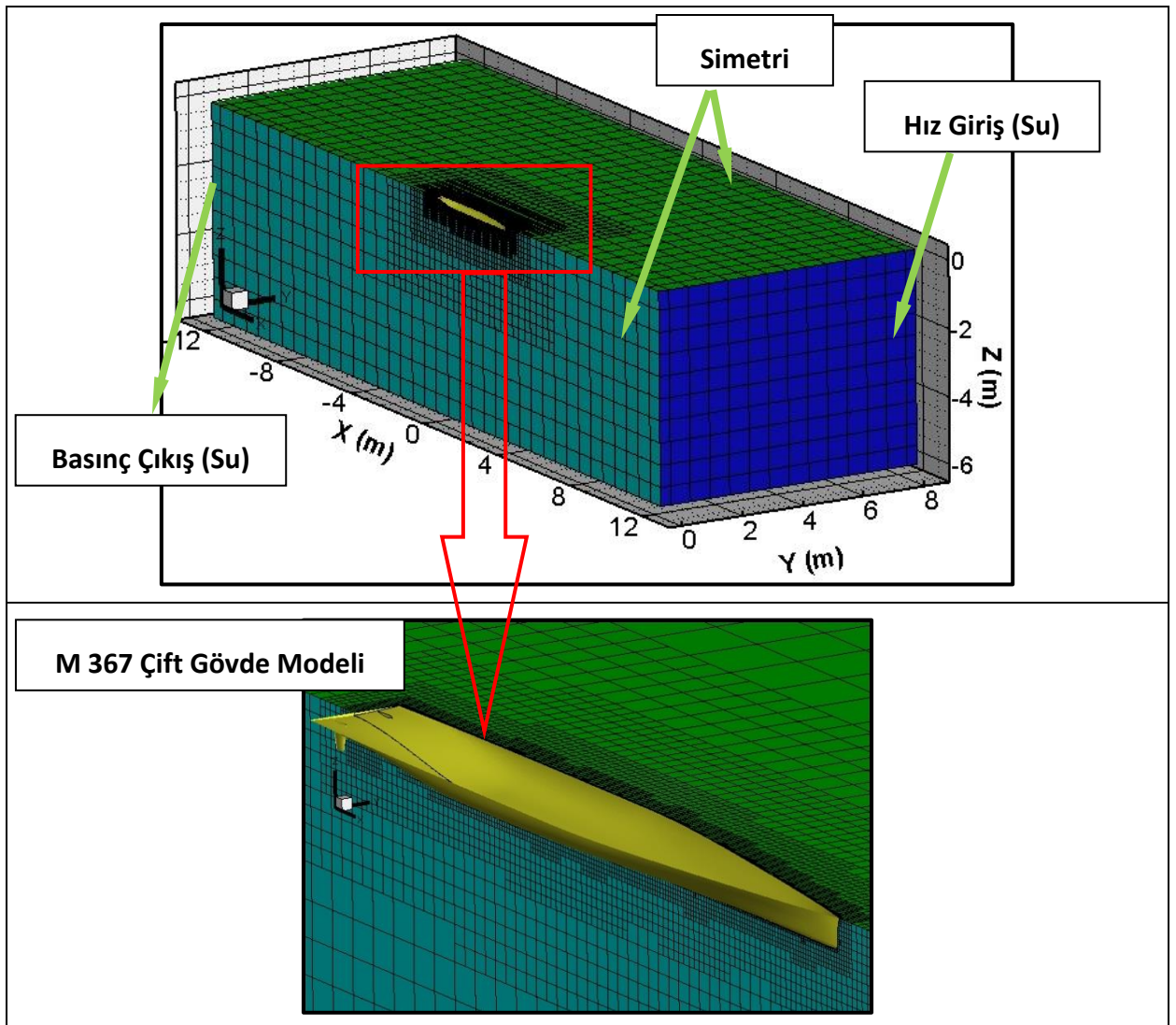
Min ve Kong [80] çalışmalarında birbirinden farklı formlarda 3 ayrı tekne geometrisinin 4'er adet ölçekli modelini hazırlayarak Prohaska [79] yöntemine göre form faktörlerini incelemiştir. Min ve Kong [80] çalışmalarının sonunda tekne form faktörünün tüm modellerde artan ölçekle beraber arttığını belirtmişlerdir.

Gomez [82] çalışmasında form faktörü üzerine ölçek etkisini incelemiştir. Farklı ölçeklerdeki modellerin düşük hızlarda çekme deneylerini gerçekleştirmiş ve modellerin form faktörlerini Prohaska [79] yöntemine göre hesaplamıştır. Model boyutları arttıkça form faktörünün arttığını belirtmiştir. Gomez [82] bu çalışmada C_F değerlerini ITTC-57 [66] formülasyonunu kullanılarak hesaplamıştır.

Form faktörünün Prohaska yönteminin haricinde bölümün başında da belirtildiği gibi çift gövde (double-body) yaklaşımı kullanılarak hesap edilebilmesi mümkündür. Deneysel olarak bu yöntemin zahmetli oluşu tercih sebebi değildir fakat HAD yöntemleri kullanılarak bilgisayar ortamında analizleri kolayca gerçekleştirmek mümkündür. Model boyutlarının artmasıyla birlikte tekne boyuna ve hızına bağlı olarak R_n sayısı artacak ve form faktörü değişecektir. Form faktörü direkt olarak model boyutları ve dolayısıyla Reynold sayısı ile değişmektedir. Yüksek R_n sayılarında form faktörünün inceleyebilmek için eğer modelin ölçeği küçük ise yüksek hızlarda çekilmeli veya model hızı düşük tutularak model boyutlarının arttırılması gerekmektedir. Model hızını veya model boyutlarını arttırmak çok zordur ve bu durum yüksek R_n sayılarında tekne form faktörünün hesap edilebilmesi için bilgisayar ile gelişmiş analiz tekniklerini zorunlu kılmaktadır.

Kouh vd. [83] çalışmalarında çift gövde yaklaşımını kullanarak geometrik olarak farklı tekneler etrafındaki akışı modellemişler ve Rn sayısının form faktörü üzerine olan etkisini incelemişlerdir. Kouh vd. [83] çalışmalarında Rn sayısının artmasıyla birlikte form faktörünün arttığını belirtmişlerdir. Standart Wigley gibi akım ayrılmalarının daha az meydana geldiği teknelerde Rn sayısı ile beraber form faktöründeki artış KCS, KVLCC2, DTMB 5415 gibi teknelere oranla daha azdır.

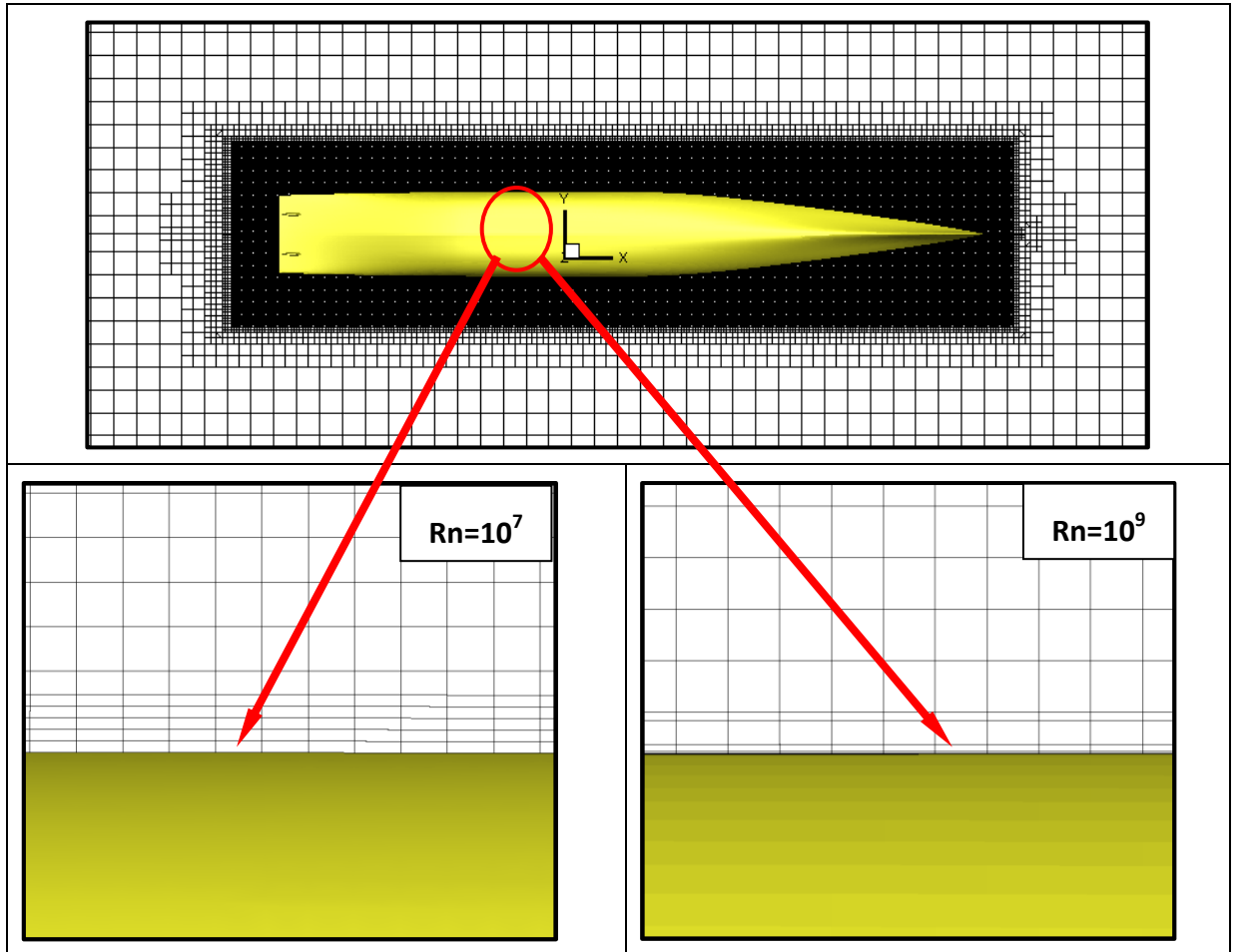
Çalışmanın bu bölümünde M 367 takıntısız modelinin form faktörü Rn sayısına bağlı olarak çift gövde yaklaşımı kullanılarak incelenecektir. Tekne etrafında meydana gelen akış tamamen türbülanslı olup akış daimi olarak modellenmiştir.



Şekil 4. 34 Çift-model yaklaşımı için oluşturulan hesaplama hacmi ve ağ yapısı (Çok Yoğun)

Çift gövde yaklaşımında teknenin su altında kalan ıslak alanı analize tabi tutulur ve serbest su yüzeyine simetri sınır şartı tanımlanır. Bu sayede su hattına göre simetrik tekne formu elde edilir. Şekil 4.34’de çift gövde yaklaşımı için kullanılan sınır şartları, hesaplama hacmi ve ağ yapısı görülmektedir. Serbest su yüzeyinin bulunmayışı sebebiyle hesaplama hacmi sayısı azalmış olup analizler için yoğun ağ yapısına ait ölçüler kullanılmıştır. Çift-gövge yaklaşımı için gerçekleştirilen analizler de yaklaşık olarak 400000 hacim elemanı kullanılmıştır.

Analizler düşük Reynolds sayılarından başlanarak tam ölçekli geminin sevkı sırasında akışın oluşturacağı yüksek Reynolds sayılarına kadar çıkmıştır. Reynolds sayısının artmasıyla birlikte y^+ değerlerinin artışı önlemek için kullanılan ağ yapısının geometrisi değiştirilmiştir. Sonuç olarak duvar üzerinde meydana gelen y^+ değerleri 30 ile 300 arasında olacak şekilde sınır tabaka ağ yapısı artan Reynolds sayılarıyla birlikte duvara daha yakın alınmıştır. Şekil 4.35’de kullanılan ağ yapısı gösterilmiştir.



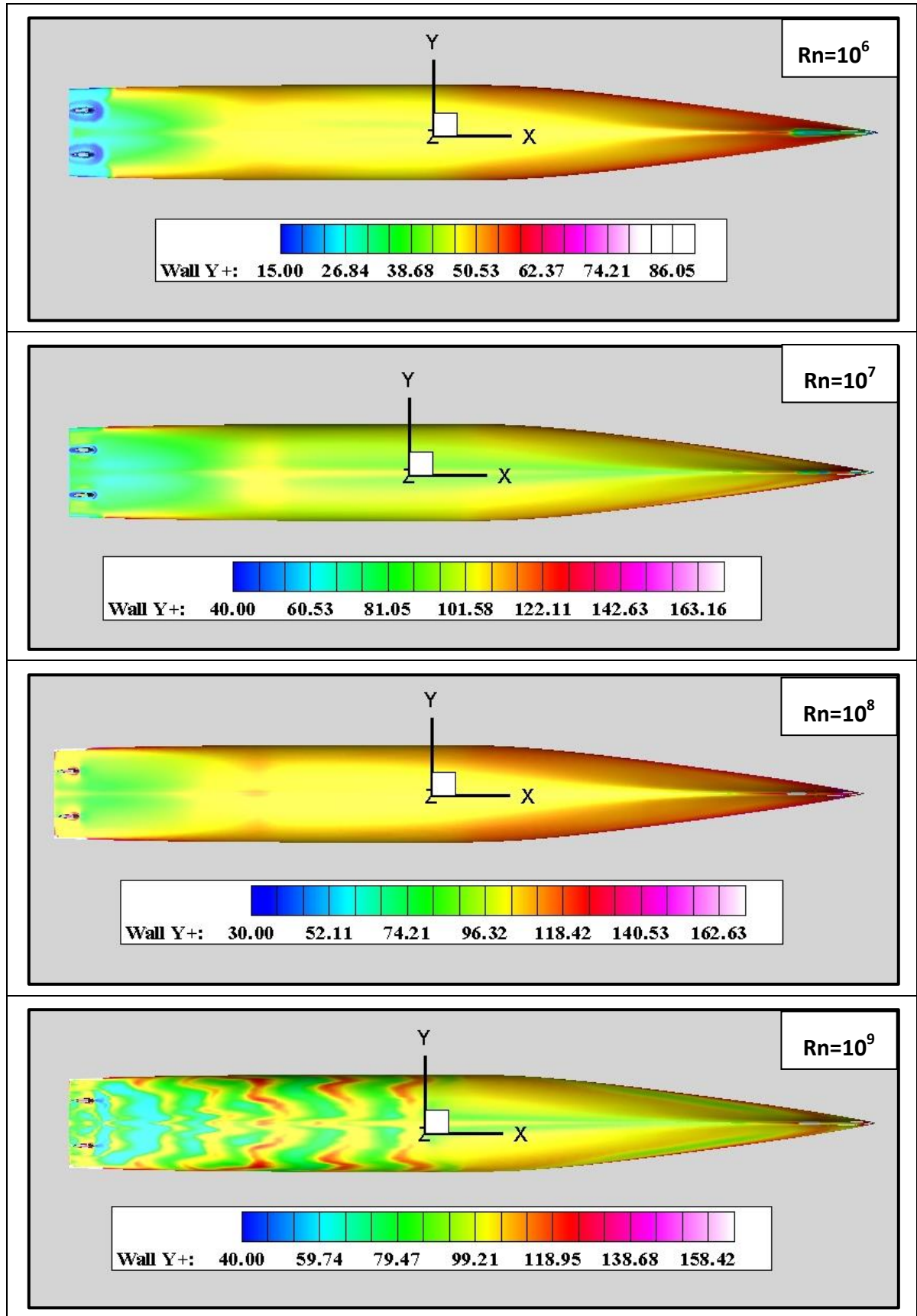
Şekil 4. 35 Çift model yaklaşımı için kullanılan ağ yapıları

Analizlerde standart $k-\varepsilon$ türbülans modeli kullanılmış olup serbest su yüzeyi bulunmadığı için akış daimi olarak modellenmiştir. Analiz sonucunda elde toplam direnç katsayısı C_{Tm} , sürtünme direnci C_{Fm} , viskoz basınç direnci C_{Pvm} ve ortalama y^+ değerleri Çizelge 4.12’de gösterilmiştir.

Çizelge 4. 12 Çift model yaklaşımı kullanılarak elde edilen analiz sonuçları

NO	Rn	$C_{Fm} * 1000$	$C_{Pvm} * 1000$	$C_{Tm} * 1000$	$C_{Fm} * 1000$	ΔC_{Fm}	y^+
		HAD	HAD	HAD	ITTC57	Fark% $\left \frac{HAD-D}{D} \right $	
1	10^6	4.358	0.255	4.613	4.688	% 7	15-86
2	10^7	2.893	0.319	3.212	3.000	% 3.6	40-163
3	10^8	2.053	0.337	2.390	2.083	% 1.5	30-162
4	10^9	1.513	0.354	1.868	1.531	% 1.1	40-158

Artan Reynolds sayılarında ağ yapısına ait ilk grid noktası duvara yaklaştırılarak y^+ değerlerinin istenen aralıkta kalması sağlanmıştır. Çizelge 4.12 incelendiğinde ITTC-57 [66] tarafından önerilen C_{Fm} katsayısı ile HAD analizlerinden elde edilen sonuçların birbirine yakın olduğu görülebilir. Reynolds sayısının artmasıyla birlikte tekneye C_{Fm} ve C_{Tm} katsayıları azalmaktadır. Viskoz basınç direnç katsayısı C_{Pvm} Reynold sayısı 10^7 değerine kadar hızlı artış göstermekle birlikte geri kalan Reynolds sayılarında hemen hemen sabit değerdedir. Çift gövde yaklaşımı ile elde edilen analizlerin sonucunda tekne gövdesi üzerinde meydana gelen y^+ değerlerinin Reynolds sayısına göre değişimi Şekil 4.36’da gösterilmiştir.



Şekil 4. 36 Çift-model analizleri sonucunda farklı Reynolds sayılarının tekne gövdesi üzerinde meydana gelen y^+ değerleri

Bu bölümün başında gemi direnci bileşenleri ayrıntılı bir şekilde anlatılmış olup Denklem (4.15) toplam direnç katsayısının formülasyonu verilmiştir. Bu denklemde hava kaynaklı ve yüzey pürüzlülüğü kaynaklı dirençler sıfır kabul edilirse geriye viskoz, viskoz basınç ve dalga direnci terimleri kalacaktır. Analizlerde çift gövde yaklaşımı kullanıldığı için dalga direnci de olmadığından Denklem (4.15) aşağıdaki gibi yazılabilir [18]:

$$k = \frac{C_{Tm}}{C_{Fm}} - 1 \quad (4.40)$$

Kouh vd. [83] tarafından k form faktörü iki farklı yol izlenmiş olup bunlar:

- k^* , C_{Fm} direnç katsayısı HAD ile elde edilen sonuç kullanılarak elde edilen form faktörü,
- k , C_{Fm} direnç katsayısı ITTC-57 tarafından önerilen form faktörüdür.

Bu iki tanıma göre elde edilen form faktörü katsayıları Çizelge 4.13’de gösterilmiştir.

Çizelge 4. 13 Çift model yaklaşımı kullanılarak elde edilen k form faktörü katsayıları

NO	Rn	$C_{Fm} * 1000$	$C_{Fm} * 1000$	$C_{Tm} * 1000$	k^*	k
		HAD	ITTC-57	HAD		
1	10^6	4.358	4.688	4.613	0.059	-
2	10^7	2.893	3.000	3.212	0.110	0.070
3	10^8	2.053	2.083	2.390	0.164	0.147
4	10^9	1.513	1.531	1.868	0.234	0.220

Çizelge 4.13 incelendiğinde Reynolds sayısının artmasıyla birlikte tekne form faktörünün arttığı görülmektedir. Prohaska [79] yöntemine göre HAD ve deneysel çalışmadan elde edilen form faktörü ile çift-gövde yaklaşımının 10^9 Reynold sayısında elde edilen form faktörleri birbiyle hemen hemen aynıdır. Sonuç olarak model ölçeğinde gerçekleştirilen çift-gövde analizleri form faktörü için geçerli sonuç vermeyecektir.

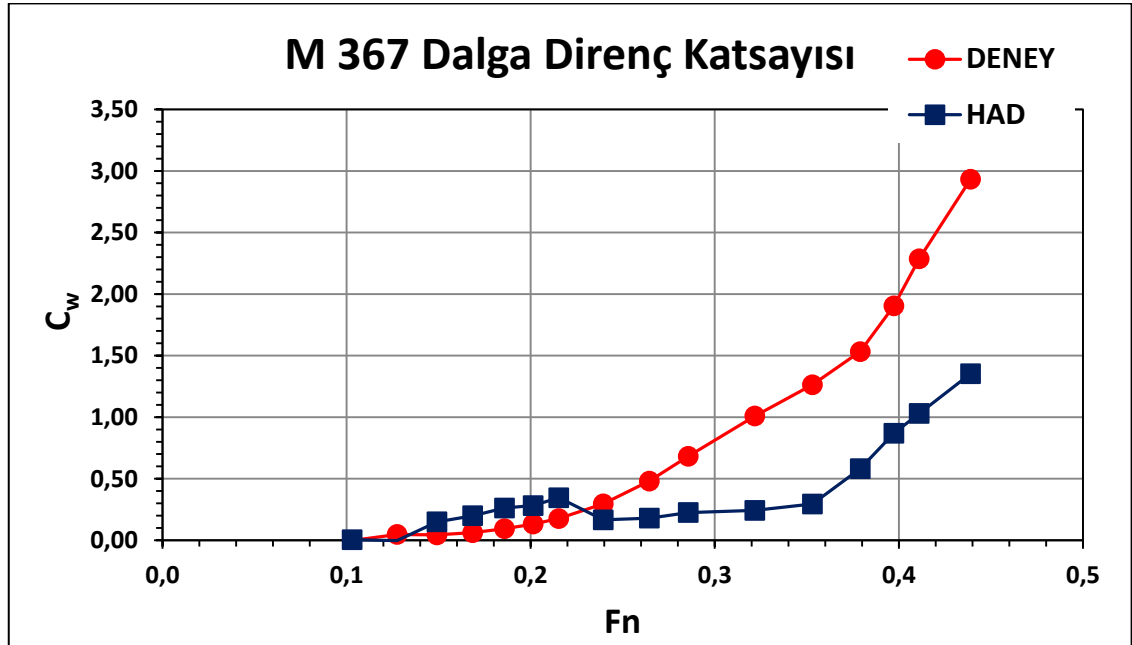
4.3.8.4 Dalga Direnç Katsayısının Tespit Edilmesi

Teknenin toplam direnç katsayısının bileşenleri Denklem (4.18) ile verilmiş olup yüzey pürüzlülüğünden kaynaklanan direnç katsayısı ve tekne etrafında meydana gelen hava kaynaklı direnç katsayısı ihmal edilirse toplam direnç katsayısı form faktörü ile birlikte aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$C_{TS} = (1 + k)C_{FS} + C_w \quad (4.41)$$

Çalışmanın bu bölümünde teknenin dalga direnç katsayısı tartışılacaktır. Tekne form faktörünün belirlenmesi ile tekne dalga direnci katsayısı Denklem (4.41) kullanılarak hesap edilebilir. Denklem (4.41) incelendiğinde dalga direnç katsayısının hesap edilebilmesi için form faktörü katsayısı k ve sürtünme direnç katsayısı C_F kullanılmaktadır. Form faktörü için Bölüm 4.4.2 de Prohaska yöntemine göre elde edilen değerler ve C_{Fm} için ITTC-57 formülasyonu kullanılacaktır. Bölüm 4.4.2’de k katsayısı hesaplanırken C_{Fm} için ITTC-57 kullanılmıştır.

Dalga direnç katsayısının tespiti için hesap edilen değerler Çizelge 4.14’de ve dalga direnç katsayısı sonuçları Şekil 4.37’de gösterilmiştir.



Şekil 4. 37 M 367 tekne modelinin deney ve HAD analizlerinden elde edilen dalga direnç katsayısı

Çizelge 4. 14 M 367 tekne modelinin deney ve HAD analizlerinden elde edilen dalga direnç katsayısı

NO	Fn	ITTC-57	DENEY (1+k=1.24)			HAD (1+k=1.20)
		C _{Fm} *1000	C _{Tm} *1000	C _w *1000	C _{Tm} *1000	C _w *1000
1	0.103	3.975	4.928	-----	4.775	0.005
2	0.127	3.811	4.773	0.047	4.571	-----
3	0.149	3.697	4.627	0.043	4.586	0.150
4	0.168	3.611	4.540	0.062	4.532	0.199
5	0.186	3.545	4.489	0.094	4.516	0.262
6	0.201	3.492	4.461	0.131	4.472	0.282
7	0.215	3.448	4.452	0.176	4.483	0.345
8	0.239	3.381	4.488	0.296	4.223	0.166
9	0.264	3.320	4.597	0.481	4.163	0.179
10	0.286	3.273	4.741	0.682	4.153	0.225
11	0.322	3.204	4.982	1.009	4.087	0.242
12	0.353	3.151	5.171	1.263	4.076	0.295
13	0.379	3.112	5.391	1.532	4.315	0.581
14	0.397	3.086	5.731	1.904	4.572	0.869
15	0.411	3.067	6.090	2.287	4.711	1.030
16	0.439	3.032	6.693	2.932	5.992	1.353

4.3.8.5 Sonuçların Değerlendirilmesi

Bu bölümde tekne form faktörü deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir. Çalışmanın ilk bölümünde form faktörü katsayısı Prohaska [79] yöntemine göre incelenmiştir. Bu yöntemle göre analizler gerçekleştirilirken serbest su yüzeyi hesaba katılmış ve akış zamana bağlı olarak modellenmiştir, elde edilen sonuçlar Çizelge 4.11 de gösterilmiştir. Sonuçlar değerlendirildiğinde:

- Çizelge 4.11 incelendiğinde deneysel ve analiz sonuçlarından elde edilen sonuçların arasındaki farkın % 3 olduğu görülmüştür. Meydana gelen bu farkın türbülans yapıcılarından kaynaklandığı düşünülmektedir. Prohaska [79]

yöntemine göre form faktörünün tespitinde hazırlanan HAD analiz yöntemi başarılıdır.

- Form faktörünün hesabı için yaygın olarak kullanılan bir diğer yöntem çift-gövde yaklaşımı olup bu yöntemde göre yapılan analizlerde serbest su yüzeyi göz önüne alınmaz. Teknenin yalnızca su altında kalan kısmının modellendiği bu yöntemde göre form faktörü katsayısının tespiti için HAD analiz prosedürü geliştirilmiş ve bu yöntem sayesinde tam ölçekli bir teknenin etrafında akışın meydana geldiği Rn sayılarında çözüm yapılabilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre form faktörünün Rn sayısı ile birlikte arttığı tespit edilmiştir.
- Klasik aerodinamikten bilindiği gibi cisimlerin form faktörlerinin sabit kalması Reynolds sayısına göre değişmemesi gerekmektedir fakat düşük Reynolds sayılarında türbülanslı akışın tam olarak gelişmemesi sebebiyle form faktörü sabit kalmamaktadır.
- Çift gövde yaklaşımına göre elde edilen form faktörü katsayıları ITTC-57 ve HAD analizleri için Çizelge 4.13’de verilmiştir. Çizelge 4.13 incelendiğinde tam ölçekli gemiye ait 10^9 gibi yüksek Reynolds sayılarında elde edilen form faktörü değerleri ile Prohaska [79] yöntemine göre elde edilen form faktörlerinin birbirine yakın olduğu görülmektedir.
- Gerçekleştirilen bu çalışma yüksek Reynolds sayılarında tam ölçekli gemi etrafındaki viskoz akışı modellemeye imkan sağlayacaktır.
- Form faktörünün değişiminde Reynolds sayısı ile birlikte etkin olan bir diğer boyutsuz parametre Froude sayısı olup dalga direnci ile form faktörü arasındaki ilişki henüz tam olarak çözülememiştir ve halen bir araştırma konusu olarak durmaktadır [83]. Tasarlanan HAD analiz yöntemi ile potansiyel çözüm yöntemleri birlikte kullanılarak form faktörünün dalga direnci ile ilişkisi incelenebilir.
- Ölçek etkisi, Reynolds sayısı, Froude sayısı, serbest su yüzeyi tekne form faktörünü etkileyen önemli parametrelerdir. HAD analizleri ve deneysel yöntemlerle tekne form faktörünü kesin olarak tespit etmek mümkün olmayıp

ancak geometrinin akışa uyumluluğu hakkında fikir edinmemizi sağlayan pratik bilgiler elde edilebilir.

- Deneysel verilerden elde edilen sonuç teknenin form faktörü kabul edilirse ($1+k=1.24$) bu değer bir savaş gemisi için yüksektir ve düşürülmesi gerekir.
- Toplam direnç katsayısı incelendiğinde sürtünme kaynaklı direnç en yüksek direnç bileşenini oluşturmaktadır ve bu direnci düşürmek için mümkün olduğunca ıslak alan azaltılmalıdır.
- Dalga direnç katsayısı hesaplanırken form faktörü yaklaşımı kullanılmış, deney ve analiz için form faktörleri Prohaska [79] yöntemine göre elde edilmiştir. Prohaska yöntemine göre elde edilen form faktörü tüm Froude sayılarında sabit kabul edilmiştir. Alt bölüm 4.4’de form faktörünün artan Rn sayılarıyla birlikte arttığı yapılan çalışmalar ile gösterilmiştir.
- Şekil 4.37 incelendiğinde Froude sayısının 0.2 den küçük olduğu bölgede sayısal sonuçlar deneysel sonuçlardan yüksek çıkmakta, 0.2 den büyük olduğu bölgede ise deneysel sonuçlar artış göstermesine rağmen analiz sonuçları 0.4’e kadar sabit kalmaktadır.
- HAD ile yapılan analizler dalga direnç katsayısının $F_n=0.35$ değerine kadar sabit kaldığı Froude sayısının 0.35’i geçmesi ile birlikte dalga direncinin arttığını göstermektedir. HAD sonuçlarına göre tekne formunun artan Froude sayılarında dalga direnç katsayısını sabit kalacak şekilde modellendiği görülmektedir.
- Dalga direnç katsayısı için RANSE çözümler ile deneysel veriler arasında yüksek Froude sayılarında uyum sağlanamamıştır.

4.4 KCS, Wigley Tekne Formları Etrafındaki Serbest Yüzeyle Akışın İncelenmesi

4.4.1 Giriş

M 367 tekne formuna ait direnç analizi sonuçları incelendiğinde yönteminin $F_n < 0.3$ için başarılı olduğu görülmüştür. Çalışmanın bu bölümünde geliştirilen yöntemin farklı geometrilere sahip tekne formlarına uygulanması ile güvenilirliğinin test edilmesi amaçlanmıştır. Literatürde deneysel sonuçları bulunan ve HAD analizlerinde yaygın olarak kullanılan KCS ve Wigley teknelerinin direnç analizleri sayısal olarak incelenmiştir. KVLCC2 teknesinin direnç analizi ek dalga direnç hesabının yapıldığı Bölüm 5.2.5'e dahil edilmiştir.

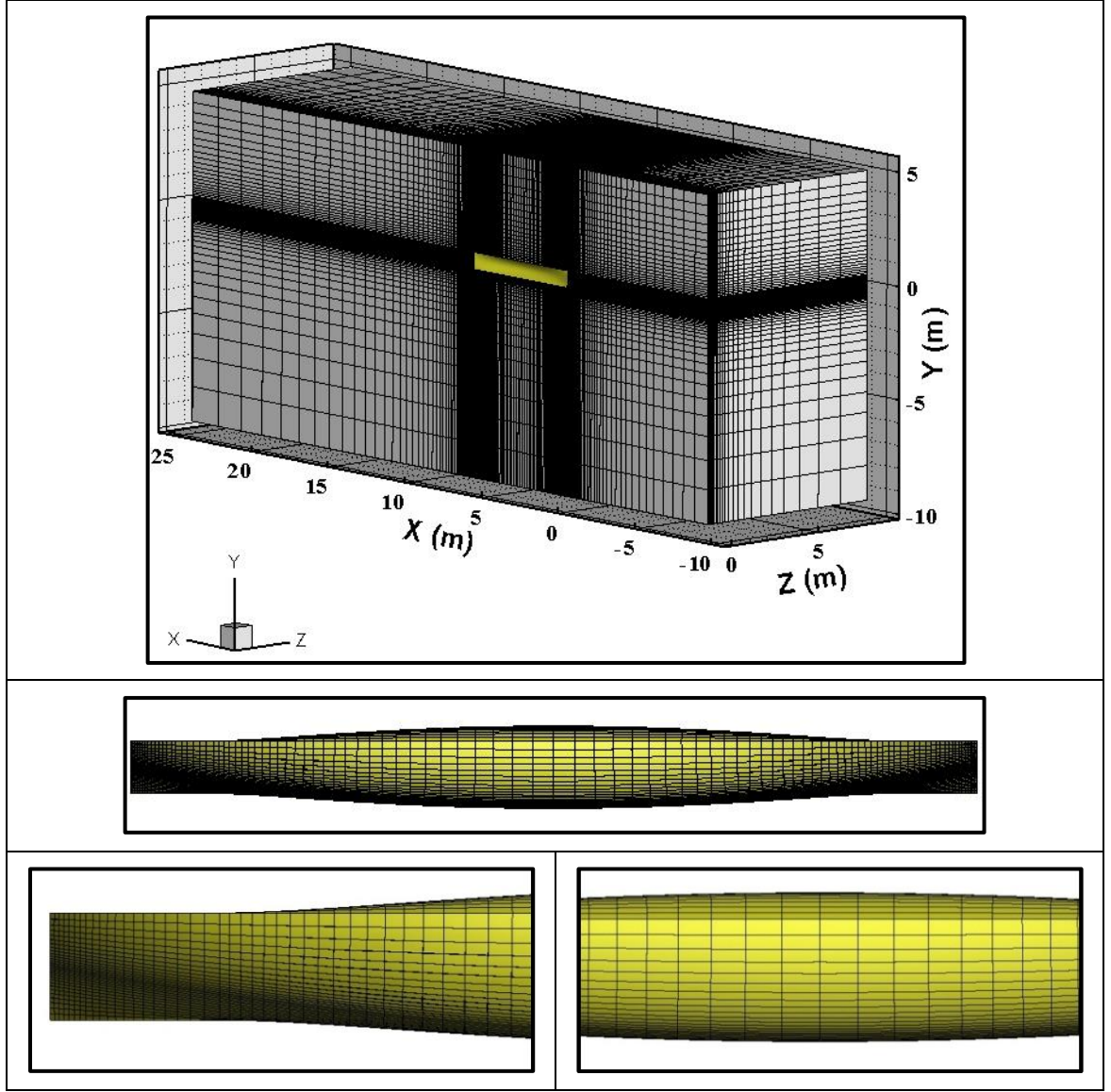
4.4.2 Wigley Tekne Formu Etrafındaki Akışın İncelenmesi

Standart Wigley teknesi matematiksel bir forma sahip olup uzun yıllar araştırmacılar tarafından HAD analizleri için test formu olarak kullanılmıştır [64]. Tekne formunun düzlemselliği sebebiyle form üzerinde hesaplama hacminde yapılandırılmış hacim elemanları kullanılmıştır. Şekil 4.38'de form üzerinde ve hesaplama hacminde kullanılan ağ yapısı görülmektedir.

Analizler için 500000 hacim elemanı kullanılmıştır. Akış tamamen türbülanslı ve zamana bağımlıdır. M 367 formu için tanımlanan sınır şartları burada da kullanılmıştır. Direnç analizleri $F_n = 0.20$ ve $F_n = 0.31$ için gerçekleştirilmiş olup elde edilen toplam direnç değeri kaynak [84]'den alınan deneysel sonuç ile birlikte Çizelge 4.15'de gösterilmiştir.

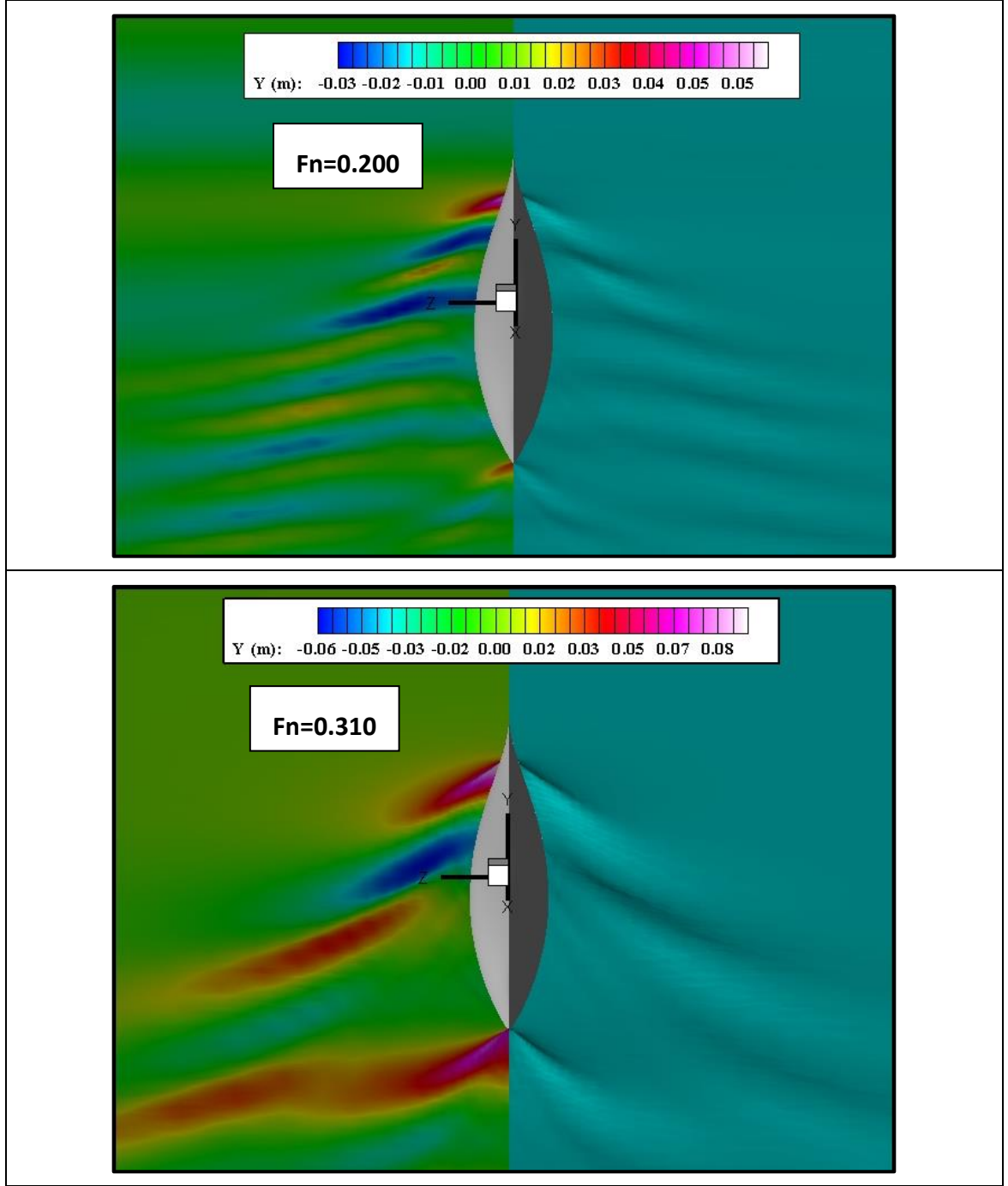
Çizelge 4. 15 Wigley tekne formu için deney ve HAD sonucu

	Fn=0.200			Fn=0.310		
	Deney	HAD	Hata % $\left \frac{HAD-D}{D} \right $	Deney	HAD	Hata % $\left \frac{HAD-D}{D} \right $
Toplam Direnç (R_T) [N]	12.45	11.95	% 4.01	38.04	36.14	% 5
Hesaplama Süresi [Saat]	-	12	-	-	16	



Şekil 4. 38 Hesaplama hacmi, hesaplama hacmi boyutları ve Wigley tekne formu üzerinde kullanılan ağ yapısı

Çizelge 4.15 incelendiğinde HAD'nin toplam direnç değerini en fazla % 5 gibi bir hatayla elde ettiği görülmektedir. Analiz sonucunda elde edilen dalga deformasyonları Şekil 4.39'da gösterilmiştir. Tekne formunun hızının artmasıyla birlikte dalga yüksekliğinde meydana gelen artış görülebilir.

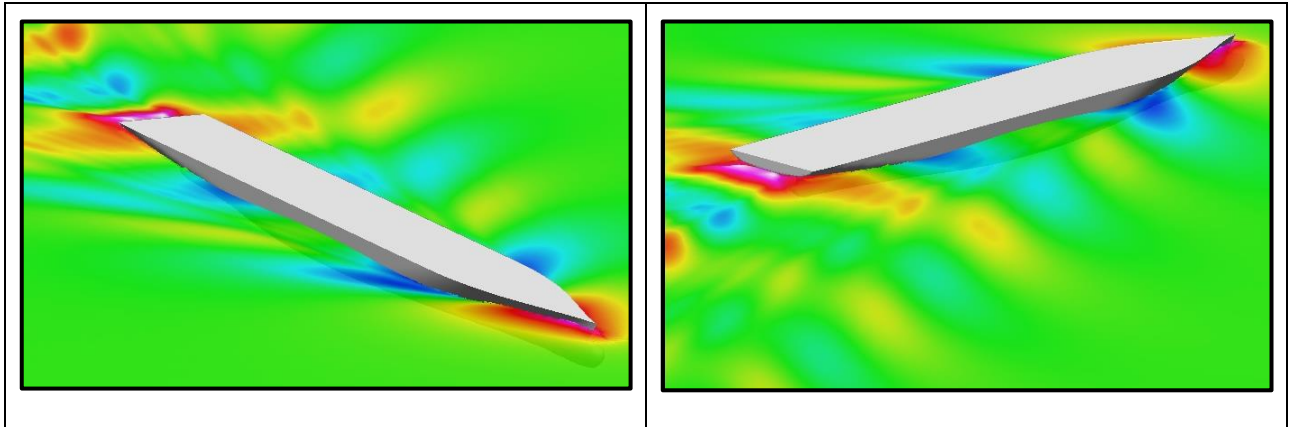


Şekil 4. 39 Farklı F_n 'lerde Wigley tekne formu etrafında meydana gelen dalga deformasyonları

4.4.3 KCS Tekne Formu Etrafındaki Akışın İncelenmesi

KCS başta bulunan yumrubaş ve kıçta bulunan topuk geometrisi sebebiyle yüzey eğriselliğinin fazla olduğu tekne formudur. Bu sebepten dolayı serbest su yüzeyi analizlerinde test formu olarak Wigley'in yerini almış bulunmaktadır. Bu bölümde KCS tekne formu etrafındaki serbest yüzeyli akış HAD ile modellenmiştir. HAD sonuçları

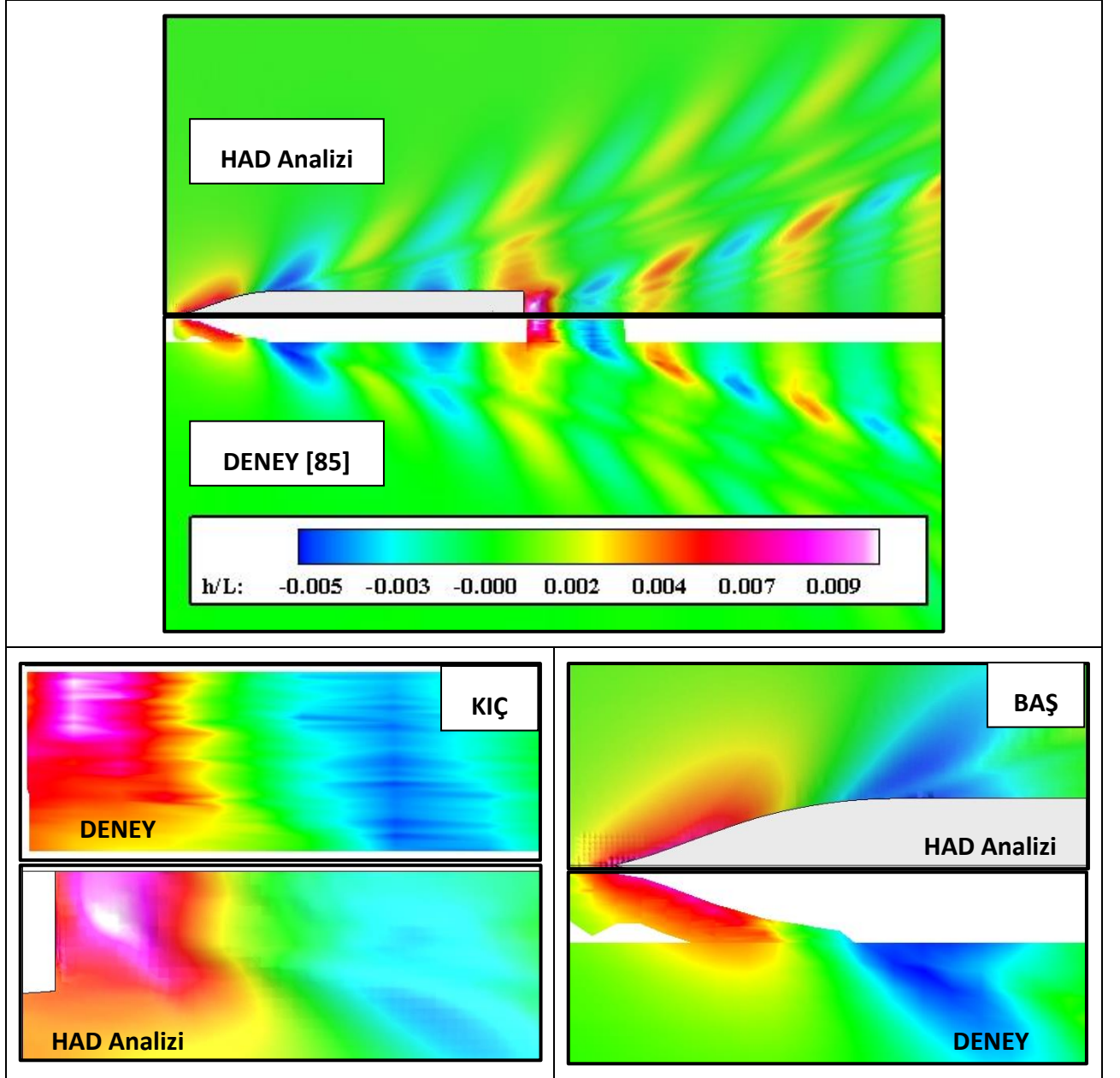
[85]'den elde edilen deneysel veriler ile karşılaştırılmıştır. Bu formun direnç analizi için yapısal ağ elemanı kullanmak mümkün olmamış olup M 367 için kullanılan blok hacim elemanları tercih edilmiştir. KCS tekne formu için kullanılan hesaplama hacmi boyutları, ağ yapısı, ağ yapısının boyutları ve sınır şartları M 367 için oluşturulan model ile aynı alınmıştır. Hesaplama için 2200000 hacim elemanı kullanılmıştır. Tekne etrafındaki akış $k - \varepsilon$ türbülans modeli kullanılarak incelenmiş ve zaman adımının seçimi CFL sayısına göre yapılmıştır. Analizler model ölçeğinde $Fn=0.26$ sayısı için gerçekleştirilmiştir. Analiz sonucunda elde edilen dalga deformasyonlarının baştan ve kıçtan perspektif görünüşü Şekil 4.40'da gösterilmiştir. Tekne etrafında meydana gelen dalga deformasyonlarının deneysel veriler ile karşılaştırılması Şekil 4.41'de gösterilmiştir. Analiz sonucunda elde edilen toplam direnç değeri ve hesaplama süresi Çizelge 4.16'da verilmiştir. Çizelge 4.16 incelendiğinde HAD çözüm ile deneysel sonuç arasındaki farkın %3'den az olduğu görülmektedir.



Şekil 4. 40 KCS tekne formu etrafında meydana gelen dalga deformasyonlarının tekne başından ve kıçından görünümü ($Fn=0.26$)

Çizelge 4. 16 KCS tekne formu için deney ve HAD sonucu ($Fn=0.26$)

	Deney	HAD	Hata % $\left \frac{HAD-D}{D} \right $
Toplam Direnç (R_T) [N]	80.6	83	% 2.97
Hesaplama Süresi [Saat]	-	60	-



Şekil 4. 41 KCS tekne formu etrafında ve tekne baş, kış bölgesinde meydana gelen dalga deformasyonlarının deneysel veriler ile karşılaştırılması ($F_n=0.26$)

Şekil 4.41 incelendiğinde dalga deformasyonlarının ve dalga yüksekliklerinin kullanılan yöntem ile başarılı bir şekilde tahmin edildiği görülmektedir.

4.4.4 Sonuçların Değerlendirilmesi

Çalışmanın bu bölümünde M 367 tekne formu için hazırlanan analiz yöntemi literatürde deneysel sonuçları bulunan Wigley, KCS tekne formları kullanılarak test edilmiştir. Bu bölümde aşağıda verilen sonuçlar elde edilmiştir:

- HAD analiz sonuçları ile deneysel veriler karşılaştırıldığında her iki tekne formunda da hatanın %5'den küçük olduğu görülmektedir ve M 367 için geliştirilen yöntem farklı geometriye sahip tekne formları üzerinde test edilerek yöntemin başarılı olduğu görülmüştür.
- Wigley tekne formu ve hesaplama hacmi için yapısal ağ tasarlanmıştır. Yapısal ağ elemanları kullanılarak ağ sayısından ve hesaplama süresinden tasarruf etmek mümkün olmuştur ve elde edilen sonuçlar blok ağ yapılarında olduğu gibi başarılıdır.
- Yapısal ağ yapılarının bu avantajının yanısıra tekne geometrisi ve hesaplama hacminde bu ağ yapısını tasarlamak çok daha zor ve zaman alıcıdır.
- Tasarlanan HAD analiz yönteminin KCS tekne formu için elde edilen analiz sonuçları direnç değerleri ile birlikte dalga deformasyonları da kullanılarak deneysel verilerle karşılaştırılmış ve sonuçlar Şekil 4.41'de verilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre tasarlanan HAD analiz yöntemi toplam direnç değerleri ile birlikte dalga deformasyonlarını da başarılı bir şekilde tahmin etmiştir.

4.5 Sonuçların Değerlendirilmesi

Çalışmanın bu bölümünde elde edilen sonuçlar:

- Bekir [43] tarafından tasarlanan ve M 367 kod numarasıyla üretilen FFG tipi savaş gemisinin takıntılı ve takınısız modeli için direnç deneyleri İ.T.Ü Ata Nutku Gemi Model ve Deney Laboratuvarın da gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışma sonunda elde edilen direnç değerleri bu bölümde tekne hızına bağlı olarak sunulmuştur. Deneysel çalışma ile elde edilen sonuçlar ileride yapılacak olan çalışmalar için deneysel veri ihtiyacını karşılayacaktır.
- Elde edilen deneysel veriler kullanılarak M 367 tekne formunun HAD ile direnç analizleri gerçekleştirilmiş hesaplama için tekne geometrisine bağlı olarak en uygun ağ yapısı ve hesaplama hacminin boyutları tespit edilmiştir ve deneysel veriler ile uyumlu sonuçlar bulunmuştur. M 367 için geliştirilen HAD yönteminin başarılı olduğu söylenebilir.

- Modellenen HAD analiz yöntemi literatür de yaygın olarak kullanılan Wigley ve KCS tekne formları ve bu formlara ait deneysel veriler kullanılarak test edilmiş ve geliştirilen yöntemin bu formlar için de direnç ve dalga deformasyonlarını tespit etmede başarılı olduğu görülmüştür.
- M 367 tekne model formunun direnç analizleri ile birlikte tekneye ait form faktörü HAD ve Deneysel veriler kullanılarak Prohaska [79] yöntemine göre incelenmiş ve geliştirilen yöntem form faktörünü %3 lük bir farkla tespit etmiştir dolayısıyla form faktörü tespitinde yöntem başarılıdır. C_{Fm} katsayısı için ITTC-57 [66] tarafından önerilen formül kullanılmıştır.
- Teknenin üzerinde meydana gelecek olan dalga deformasyonları sebebiyle ıslak alanı değişecektir. Islak alan değişimi ile birlikte tekne modeli için tanımlanan direnç katsayıları da değişecektir. Direnç katsayılarının daha hassas hesap edilebilmesi için meydana gelen ıslak alan değişimi göz önüne alınmalıdır. Islak alan üzerinde meydana gelen bu değişimi deneysel olarak hesaplamak zor olmakla birlikte HAD ile belirlemek mümkündür.
- M 367 için gerçekleştirilen analizlerde $Fn > 0.3$ değeri için takıntılı ve takıntısız durumların her ikisinde de HAD modeli ile deney arasındaki fark Fn sayısı ile birlikte artmaktadır. HAD yönteminin yüksek Fn sayılarındaki başarısının ölçülebilmesi için, farklı gemi modelleri kullanılarak araştırmaların yapılması gerekmektedir ayrıca sonuçlar üzerine türbülans yapıcıların etkisinin olduğu düşünülmektedir.

GEMİ HAREKETLERİNİN HAD YÖNTEMİ KULLANILARAK İNCELENMESİ

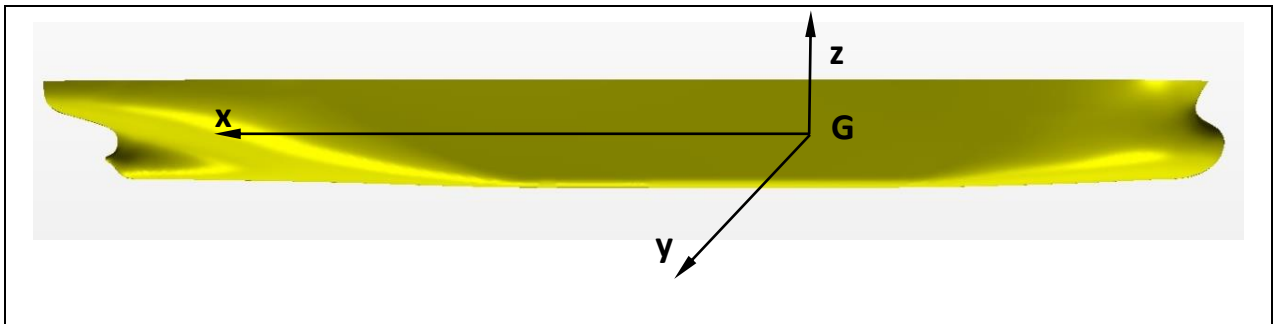
5.1 Giriş

Sakin suda ilerleyen bir teknenin hidrostatik bilgilerinin bilinmesi dizayn aşamasında yeterli olmayıp gemiler ve su üstü yapıları nadiren sakin suda hareket ederler. Serbest su yüzeyinde meydana gelen dalga, rüzgar, dış kuvvetler gemi hareketine sebep olan ana kaynaklar olup teknenin su içerisindeki performansını önemli derecede etkiler [86]. Tekne geometrisinin su içerisindeki hareketlerini modellemek zor bir problem olup tekne formları genellikle sakin suda meydana getirdiği direnç özellikleri gözönüne alınarak tasarlanmaktadır. Bozucu etkiler ve su üstü yapılarının direnci, teknenin performansını ve dengesini olumsuz yönde etkileyecek olup dinamik şartlar altında da formun incelenmesi gerekmektedir. Gerçek deniz şartlarını hem deneysel hem de sayısal çalışmalarda modellemek zordur. Gerçek deniz ortamı sağlanamamakla birlikte belirli dalga formları için gemi hareketleri incelenerek teknenin denizcilik özelliği hakkında bilgi edinilebilir. Alternatif tekne formlarını denizcilik yönünden karşılaştırabilmek ve uygun olan formun seçimini gerçekleştirebilmek için genellikle tekne hareketleri baştan gelen düzenli dalgalar için modellenir. Literatür taramasında gemi hareketlerini modellemek için kullanılan yöntemler tanıtılmış olup doktora tez çalışmasının bu bölümünde KVLCC2 tekne formunun baştan gelen düzenli dalgalarda hareketi ticari bir yazılım olan Star CCM+ kullanılarak incelenmiştir. Problemin çözümünden elde edilen sonuçlar literatür de bulunan deneysel verilerle

karşılaştırılarak uygun analiz yöntemi hazırlanmış ve RANSE çözümlerin güvenilirliği ve gerekliliği incelenmiştir.

5.2 KVLCC2 Tekne Formunun Baştan Gelen Düzenli Dalgalarda Baş-Kıç Vurma ve Dalıp-Çıkma Bileşik Hareketinin İncelenmesi

Denizcilik analizleri tabiri baş-kıç vurma, yalpa ve dalıp-çıkma bileşik hareketi anlamına gelmektedir. Yalpa hareketine ait genlikler diğer hareket modlarının genliklerine göre düşük seviyelerde kaldığından ihmal edilir ve problem baş-kıç vurma ve dalıp-çıkma bileşik hareketine indirgenir. Baş-kıç vurma ve dalıp çıkma hareket denklem sistemi alt Bölüm 2.1.3’de anlatılan yöntemle göre çözülmüştür. Bu yöntemle göre yapılan analizlerde ek su kütlesi ve sönüm katsayısı gibi terimlerin hesaplanması gerekmez ve direkt olarak analizlerden yer değiştirmeler elde edilir. Elde edilen yer değiştirmelerin ve eksenlerde meydana gelen kuvvetlerin analizi aşağıda ayrıntılı bir şekilde anlatılmıştır. Deneyel çalışmada teknenin ağırlık merkezi hareketli referans sistemi olarak seçilmiş ve bu referans sistemi HAD analizlerinde de kullanılmıştır. Teknenin ağırlık merkezi ve hareketli referans sistemi Şekil 5.1’de gösterilmiştir.

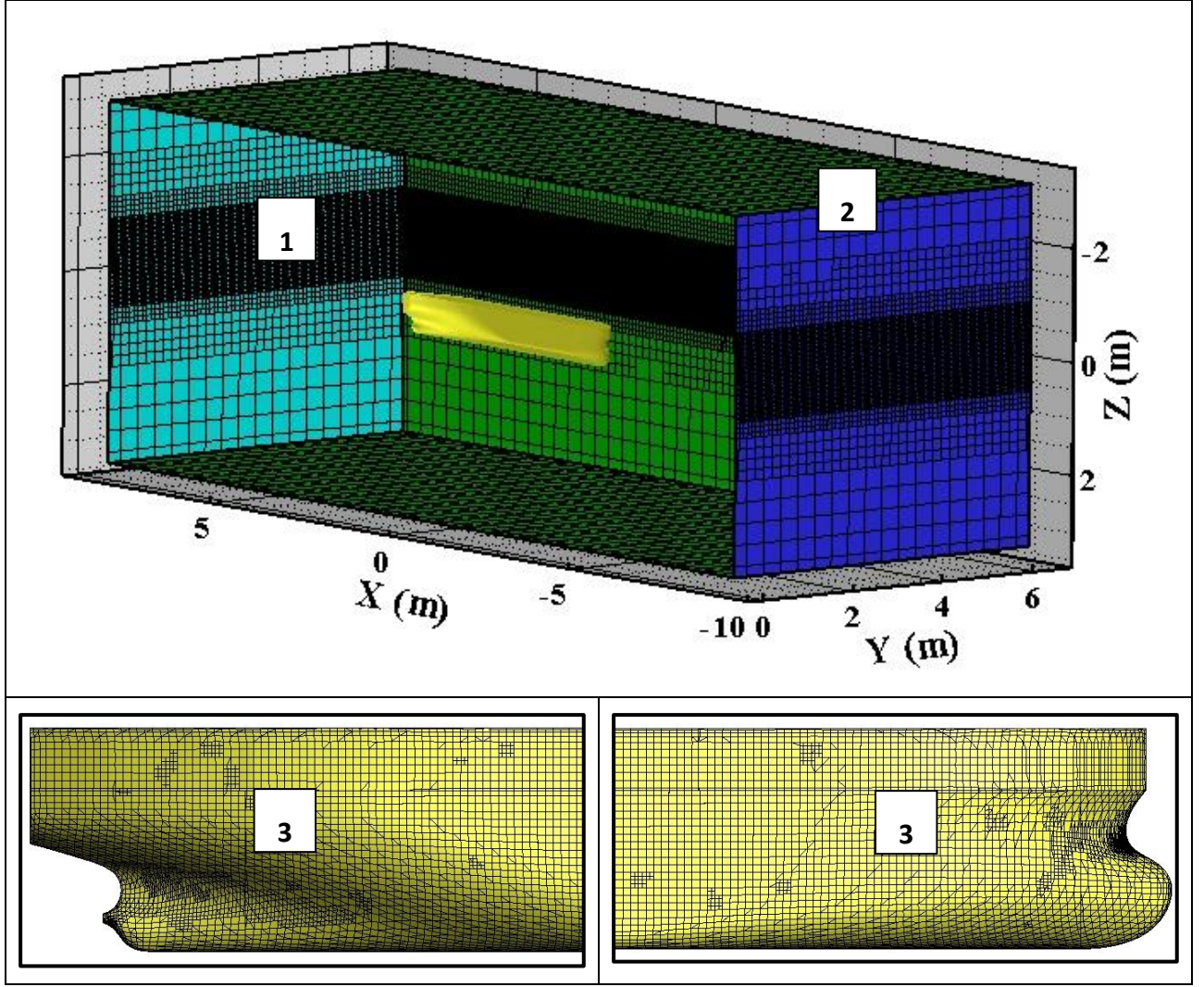


Şekil 5. 1 Deney ve HAD analizlerinde kullanılan koordinat sistemi [24]

Problemin çözümünün ilk aşamasında hesaplama hacmi oluşturulmuştur.

5.2.1 Hesaplama Hacminin Oluşturulması

Tasarlanacak hesaplama hacminin büyük ölçüde kullanıcıya bağlı olduğu, oluşturulacak hesaplama hacminin boyutlarının ağ sayısını ve yapısını etkileyeceği alt Bölüm 5.4.3’de ayrıntılı olarak anlatılmıştı. Hareket analizlerinde tekneyle birlikte tüm hacim öteleme ve dönme hareketlerini gerçekleştirecek olup Şekil 5.2’de KVLCC2’nin hareket analizleri için oluşturulan hesaplama hacmi ve genel hacim için oluşturulan ağ yapısı gösterilmiştir.



Şekil 5. 2 Hesaplama hacmi ve KVLCC2 tekne formu üzerinde oluşturulan ağ yapısı

5.2.2 Ağ Yapısının Oluşturulması ve Sınır Şartlarının Tanımlanması

Alt bölüm 5.4.4’de ağ yapısı oluşturulurken dikkat edilmesi gereken noktalar ayrıntılı olarak açıklanmıştır. Hareket analizleri için de multiblok ağ yapıları kullanılmış olup kullanılan yapı Şekil 5.2’de gösterilmiştir. Ağ yapısı tasarlanırken mevcut bilgisayar sisteminin hesaplama kapasitesi göz önüne alınarak kullanılabilinecek en fazla sayıda hesaplama hacmi kullanılmıştır.

Şekil 5.2’de serbest su yüzeyini sıklaştırmak amacıyla kullanılan 2 nolu blok genel yapıya göre göre daha sık tutulmuştur. Yukarıdada anlatıldığı gibi 2 nolu blok elemanı geniş tutularak öteleme ve dönme hareketleri sonucunda serbest su yüzeyinin ağ yapısının dışına taşması engellenmiştir. Şekil 5.2’de gösterilen blokların yanısıra

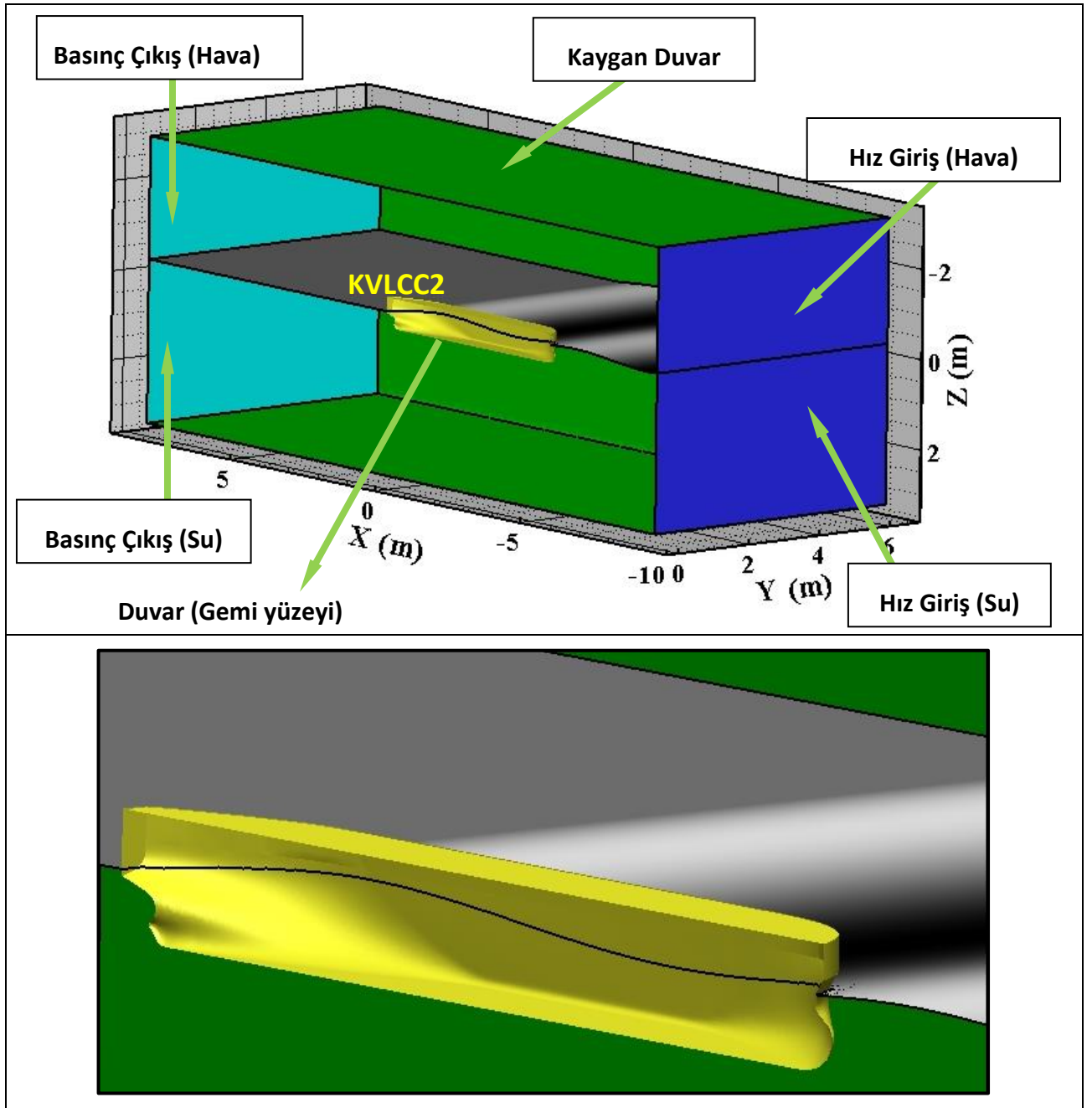
teknenin geometrisini daha iyi temsil edebilmek amacıyla hacmin geneline göre yüzey üzerinde daha sık ağ yapısı kullanılmıştır. Hesaplama hacminin genelinde ve tekne üzerinde kullanılan ağ yapısı Şekil 5.2’de gösterilmiştir.

Direnç analizlerine benzer sınır şartları tanımlanmış olmakla birlikte giriş sınır şartı için sinusoidal dalga formu kullanılmıştır. Analiz için tanımlanan sınır şartları Şekil 5.3’de gösterilmiştir.

Çizelge 5. 1 HAD ile hareket analizi için oluşturulan ağ yapıları

Blok No	Blok Adı	Ağ Yapısının Boyutu
1	Kontrol hacminin geneli	0.1921 L_{BP}
2	Serbest su yüzeyi düzeltmesi	0.0960 L_{BP}
3	Tekne geometrisi düzeltmesi	0.0192 L_{BP}
Toplam Hesaplama Hacmi		6254714

Analizler Çizelge 5.1’de verilen ağ yapısına göre gerçekleştirilmiştir. Mevcut bulunan bilgisayar sistemi ile çözümlenebilecek en sık ağ yapısı tercih edilmiştir.



Şekil 5. 3 KVLCC2 hareket analizi için oluşturulan hesaplama hacmi ve sınır şartları

5.2.3 Analizlerin Gerçekleştirilmesi ve Test Şartları

Literatürde bulunan teorik çalışmalar da tekne üzerine gelen dalgalar boylarına göre üçe ayrılmıştır [87]:

- $L_{BP}/\lambda < 0.5$ uzun boylu dalgalar,
- $0.5 < L_{BP}/\lambda < 1.5$ orta boylu dalgalar,
- $1.5 < L_{BP}/\lambda$ kısa boylu dalgalar.

Deney sonuçları orta boylu dalga için verilmiş olduğundan dolayı teknenin denizcilik analizleri orta boylu dalga için incelenecektir. Dalga boyunun tespit edilmesinin ardından hareket analizlerinde karşımıza çıkan bir diğer problem dalga genliğinin belirlenmesidir. Genliğin tespiti gerçekleştirilirken teknenin fribord değeri göz önüne alınır [87]. Yüksek genlikli dalgaların seçilmesi durumunda tekne güvertesinde ıslanma meydana gelecek ve bu durum güverte üzerinde ek kütle ve momentlere sebep olacaktır.

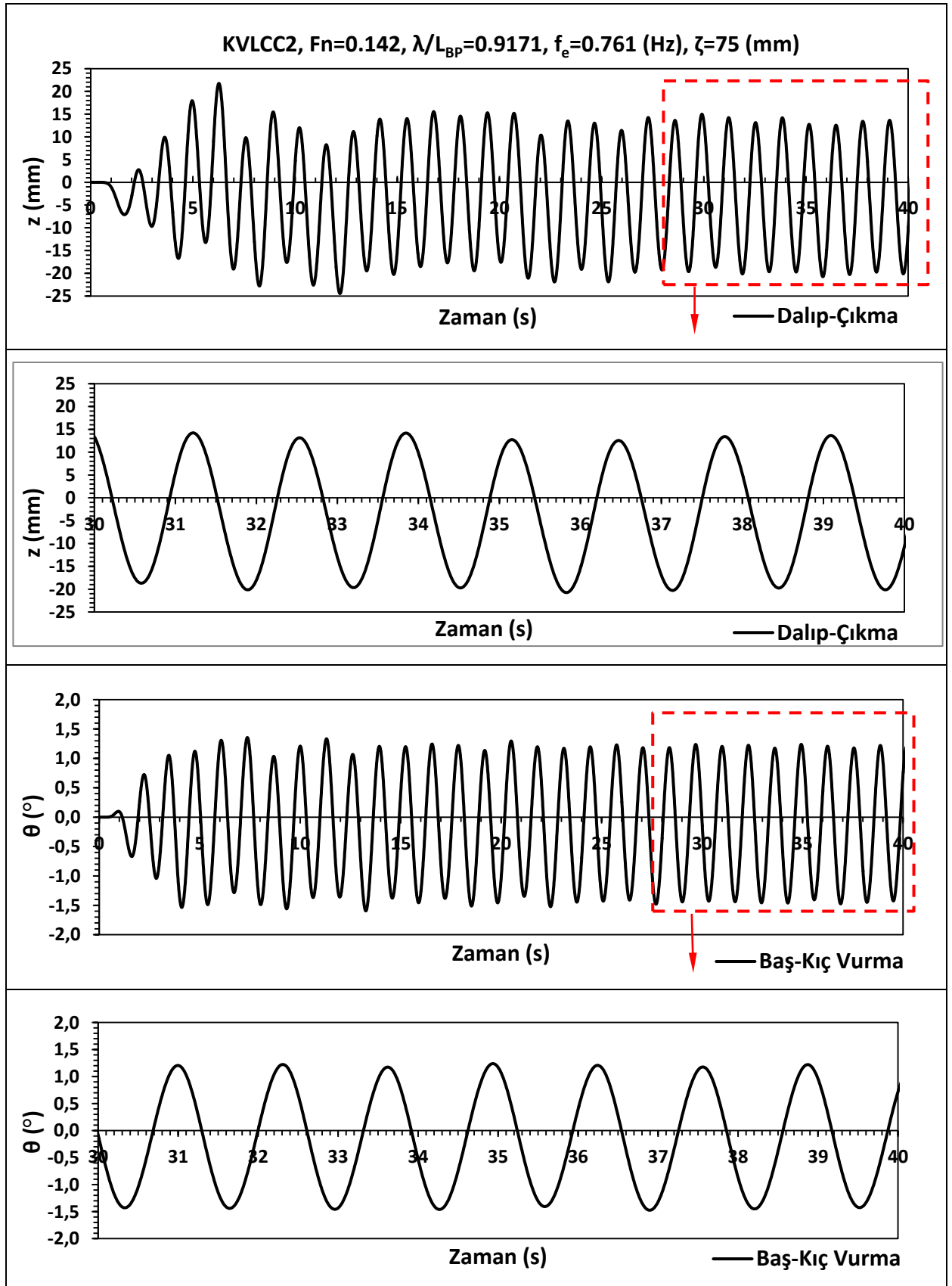
Bu çalışmada teknenin HAD analizlerinden elde edilen sonuçlar deneysel sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. KVLCC2'nin baştan gelen düzenli dalgalarda bileşik hareketi için [24]'den alınan deneysel veriler kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan dalga boyu ve genliği Çizelge 5.2'de gösterilmiştir.

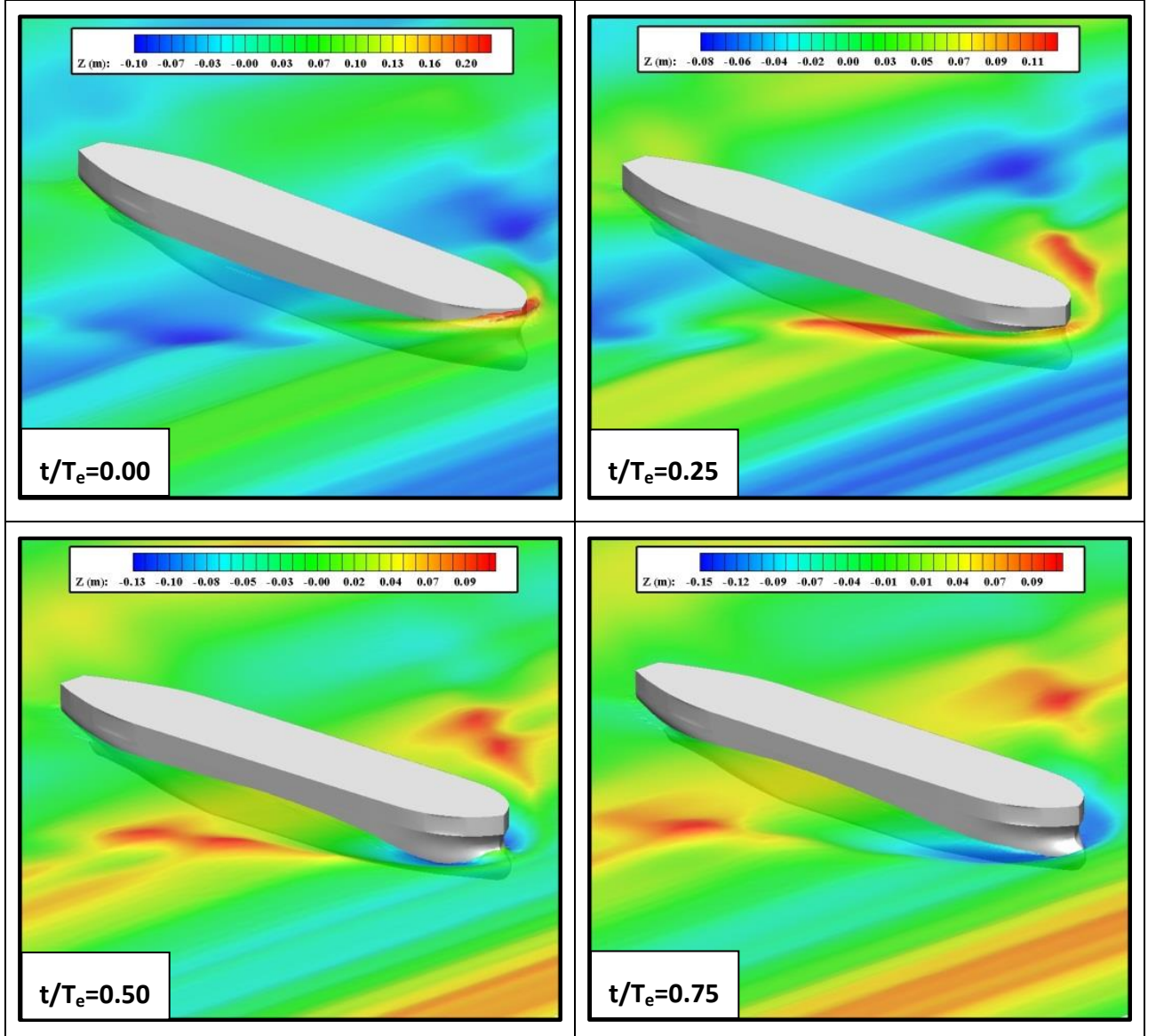
Çizelge 5. 2 KVLCC2 HAD analizleri için kullanılan test şartları

Fn=0.142				
λ/L_{BP}	λ (m)	H (m)	T (s)	f_e (Hz)
0.9171	5.0616	0.15	1.801	0.761

Çizelge 5.2'de, λ dalga boyunu, H dalga yüksekliğini, T dalga'nın periyodunu, f_e karşılaşma frekansını göstermektedir. Tekneyi harekete zorlayan sinusoidal dalga için derin su yaklaşımı kullanılmıştır. Akış tamamen türbülanslı olup k- ϵ türbülans modeli kullanılmıştır. Hareket analizlerinde de direnç analizlerinde kullanılan Segregated çözüm algoritması ve serbest su yüzeyi için VOF modeli kullanılmıştır. Zaman adımının seçiminde Courant-Frederich-Lewis (CFL) sayısı göz önüne alınmıştır. Seçilecek zaman adımının CFL sayısından küçük olması gerekmektedir. Dinamik bir analiz söz konusu olduğundan ve teknenin hareket periyodunun karşılaşma periyoduna eşit olması veya yakın olması beklendiğinden dolayı zaman adımının seçimi gerçekleştirilirken CFL sayısı ile birlikte teknenin hareket periyodunda göz önüne alınmalıdır ve bu çalışmada $CFL = \Delta T = T_e/125$ zaman adımı kullanılmıştır.

Analizlerin gerçekleştirilmesi sonucunda zamana bağlı dalıp-çıkma ve baş-kıç vurma hareketine ait genliklerin zamana bağlı değişimi Şekil 5.4'de verilmiştir. Baş-kıç vurma ve dalıp-çıkma hareketine ait genlik değerleri teknenin ağırlık merkezi referans alınarak elde edilmiştir.

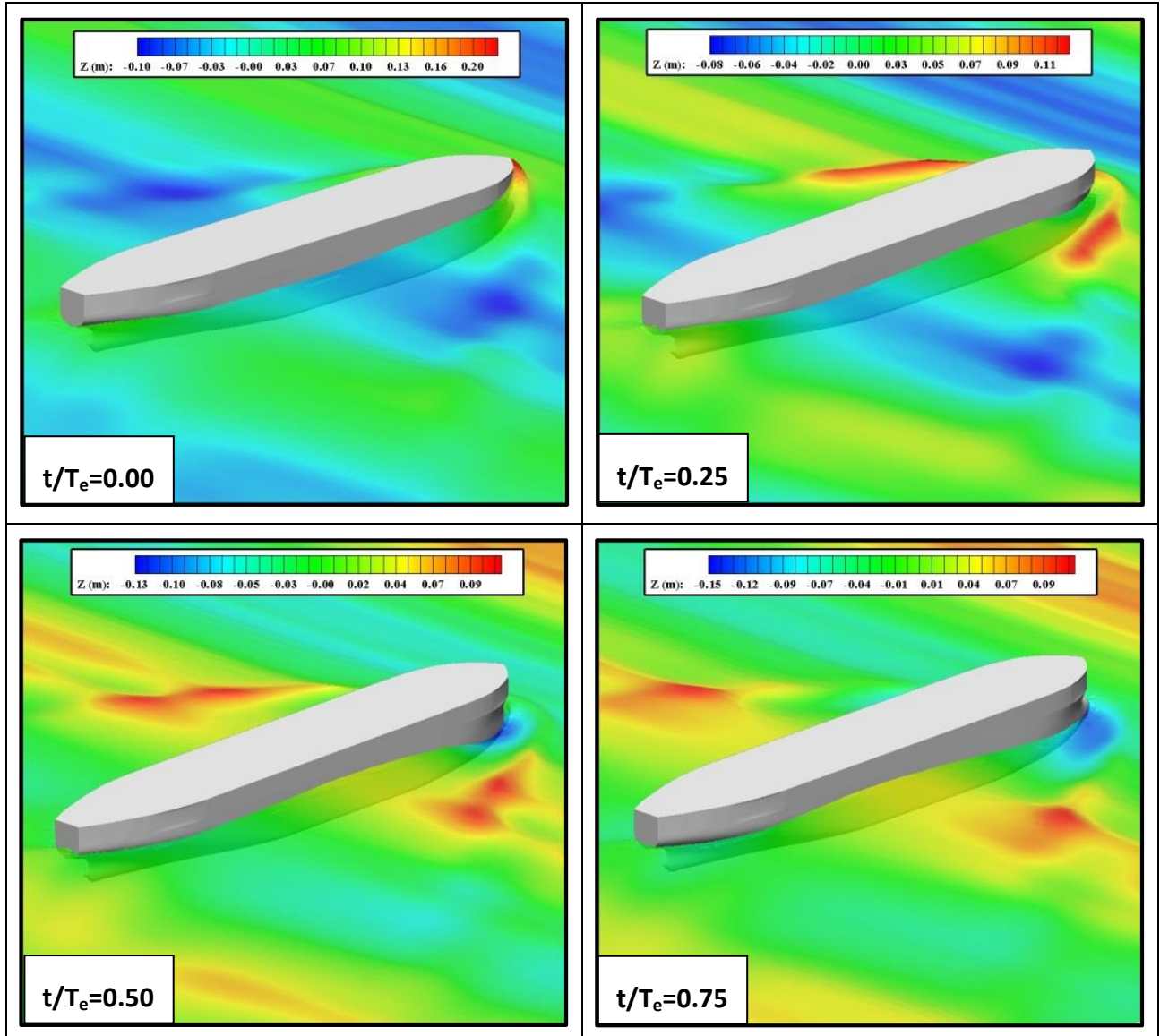




Şekil 5. 5 KVLCC2 tekne formunun hareketinin bir periyodu içerisinde meydana gelen dalga yüksekliklerinin değişiminin tekne başından perspektif görünüşü ($Fn=0.142$)

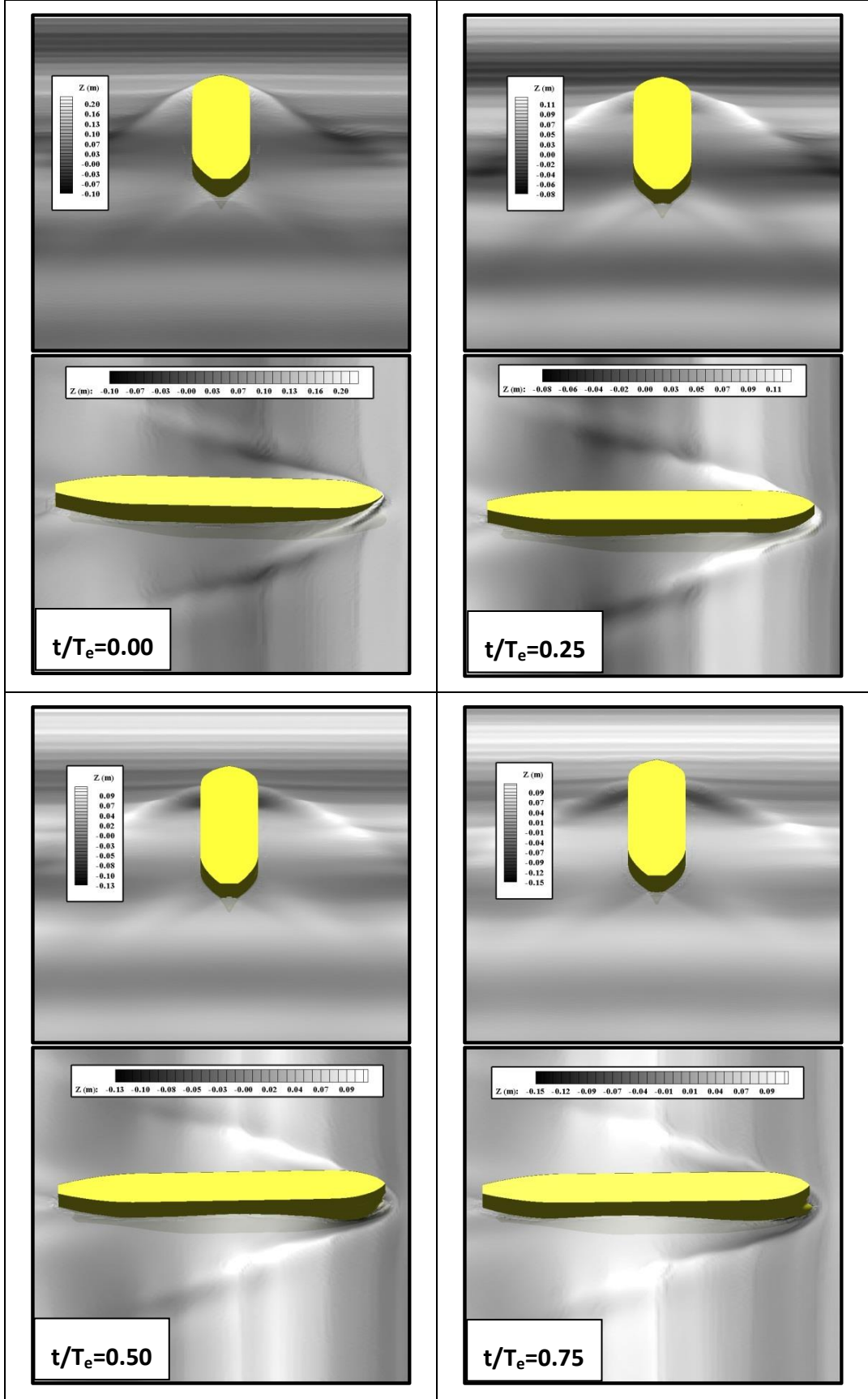
Şekil 5.4 incelendiğinde tüm hareket simülasyonlarında 0-1 saniye arasında teknenin hareket etmediği görülmektedir. Analiz başladığında akış özelliklerinin tam olarak yerleşebilmesi için dinamik analize geçilmemiş ilk 1 saniye hareket kısıtlanmıştır. HAD analizinde yaklaşık olarak ilk 8-10 periyot boyunca dalıp-çıkma, baş-kıç vurma hareketlerine ait geçici cevabın devam ettiği ve hareket genliklerinin değişimi görülmektedir. Harekete ait daimi cevap yaklaşık 10 periyot sonunda elde edilmektedir. Gerçekleştirilen analizlerin sonucunda KVLCC2 tekne formunun hareketinin bir periyodu içerisinde meydana gelen dalga yüksekliklerinin değişiminin perspektif olarak görünüşü Şekil 5.5 ve Şekil 5.6'da, yandan ve tekne arkasından

görünüşü ise Şekil 5.7’de gösterilmiştir. Şekil 5.5, Şekil 5.6 ve Şekil 5.7’de gösterilen resimlerde teknenin sakin sudaki draft değeri referans alınmıştır.

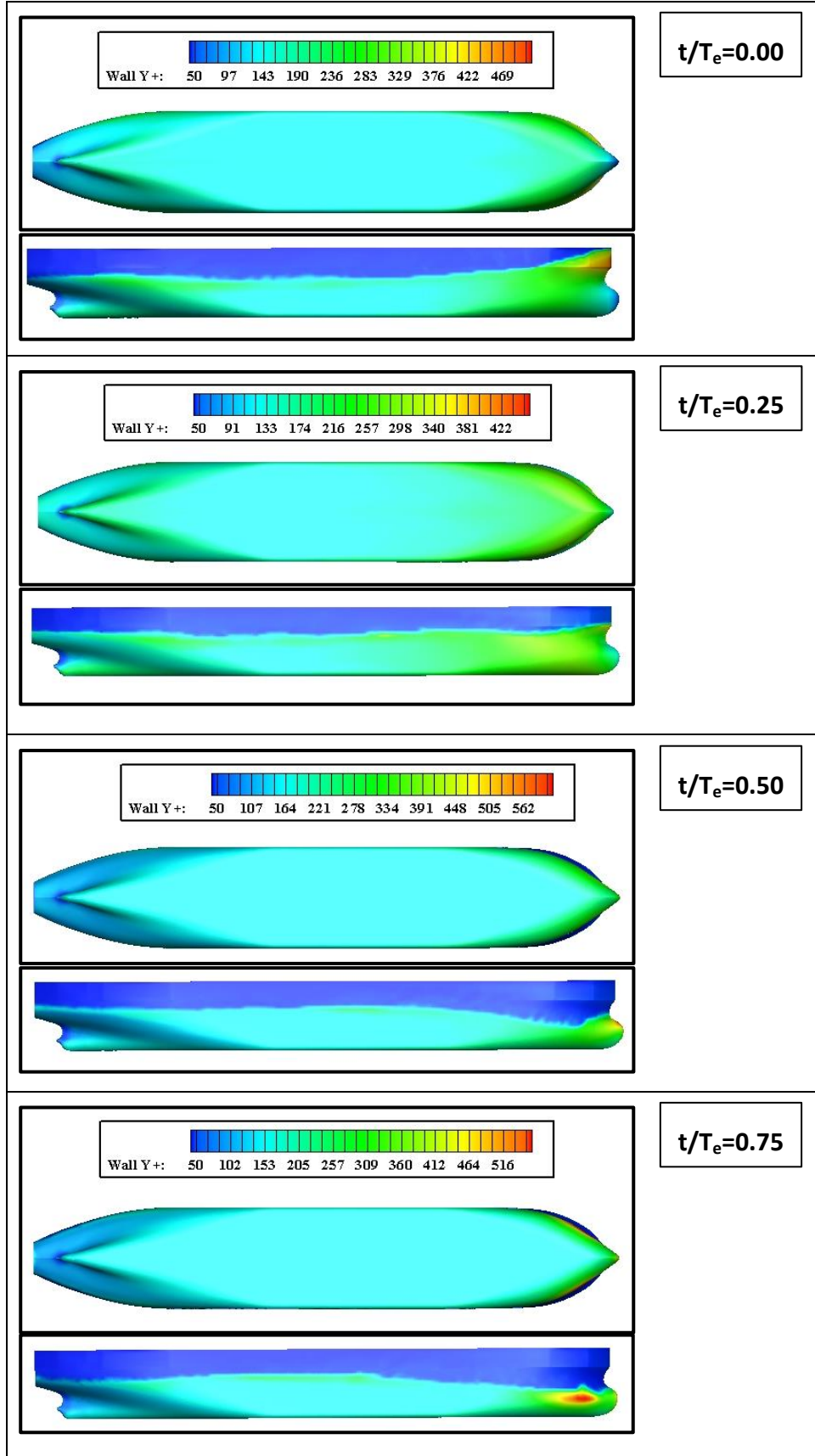


Şekil 5. 6 KVLCC2 tekne formunun hareketinin bir periyodu içerisinde meydana gelen dalga yüksekliklerinin değişiminin tekne kıyından perspektif görünüşü ($F_n=0.142$)

Analizlerde yer değiştirmelerin sağlıklı bir şekilde hesap edilebilmesi için tekne üzerine gelen kuvvetlerin dolayısıyla y^+ değişimlerinin doğru hesaplanması gerekmektedir. Şekil 5.8’de $F_n=0.142$ için bir hareket periyodu süresince tekne modeli üzerinde meydana gelen y^+ değişimleri görülebilir. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde $30 < y^+ < 300$ arasında değiştiği görülmektedir ve olması beklenen durumdur.



Şekil 5. 7 KVLCC2 tekne formunun hareketinin bir periyodu içerisinde meydana gelen dalga yüksekliklerinin değişiminin kıçtan ve yandan görünüşü ($F_n=0.142$)



Şekil 5. 8 KVLCC2 tekne formunun hareketinin bir periyodu içerisinde meydana gelen y^+ değerleri ($F_n=0.142$)

5.2.4 Frekans Analizlerinin Gerçekleştirilmesi

Düzgün sinusoidal bir dalganın etkisiyle harekete zorlanan geminin baş-kıç vurma ve dalıp-çıkma hareketine ait yerdeğiştirmeler Fourier serisine açılabilir [88]. Tekne üzerine gönderilen sinusoidal bir dalganın Fourier serisi açılımı [88]:

$$\zeta_1(t) = \zeta_{I0} + \zeta_{I1} \cos(2\pi f_e t + y_{I1}) + \zeta_{I2} \cos(4\pi f_e t + y_{I2}) + \zeta_{I3} \cos(6\pi f_e t + y_{I3}) \quad (5.1)$$

benzer şekilde dalıp-çıkma ve baş-kıç vurma hareketine ait yer değiştirmelerin Fourier serisi açılımı [88]:

$$z_1(t) = z_{I0} + z_{I1} \cos(2\pi f_e t + \gamma_{z1}) + z_{I2} \cos(4\pi f_e t + \gamma_{z2}) + z_{I3} \cos(6\pi f_e t + \gamma_{z3}) \quad (5.2)$$

$$\theta_1(t) = \theta_{I0} + \theta_{I1} \cos(2\pi f_e t + \gamma_{\theta1}) + \theta_{I2} \cos(4\pi f_e t + \gamma_{\theta2}) + \theta_{I3} \cos(6\pi f_e t + \gamma_{\theta3}) \quad (5.3)$$

elde edilir. Tekne hareketinin genliği ve faz farkı dalıp çıkma hareketi için:

$$z(t) = z_{I1} \cos(2\pi f_e t + \gamma_{xz1}) \quad (5.4)$$

baş-kıç vurma hareketi için:

$$\theta(t) = \theta_{I1} \cos(2\pi f_e t + \gamma_{x\theta1}) \quad (5.5)$$

formulleri ile ifade edilir.

Burada $z(t)$ dalıp-çıkma hareketini, z_{I1} dalıp-çıkma hareketinin genliğini, $\theta(t)$ baş-kıç vurma hareketini, θ_{I1} baş-kıç vurma hareketinin genliğini, γ_{z1} ve $\gamma_{\theta1}$ hareketlerin faz farklarını göstermektedir.

Fourier serisi açılımı kabaca zaman düzleminde verilmiş sürekli zamanlı veya ayrık zamanlı sinyallerin frekans düzlemindeki bileşenlerinin elde edilmesi anlamına gelmektedir. Zaman düzleminde verilen bu sinyaller sinusoidal, exponansiyel veya kompleks olabilir. Gerçekleştirilen analizler ayrık zamanlı olup zaman adımına bağlıdır. Herhangi ayrık zamanlı bir sinyalin Fourier ve ters Fourier dönüşümü (DFT) aşağıdaki gibi verilir [89]:

$$x(n) = \sum_{k=0}^{N-1} X_k e^{j(2\pi/N)kn} \quad (5.6)$$

$$X_k = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x(n) e^{-j(2\pi/N)kn} \quad (5.7)$$

Burada $x(n)$ ayrık zamanlı sinyali, X_k ayrık zamanlı sinyalin Fourier dönüşümünü, N örnek sayısını göstermektedir. N örnek sayısının ve örnekleme zamanının seçimi dönüşümün sağlıklı yapılabilmesi için önem taşımaktadır. N örnek sayısı 2'nin kuvvetlerini sağlayacak şekilde seçilmelidir.

$$N = 2^n \quad n = 1, 2, 3, \dots \dots \dots N \quad (5.8)$$

Ayrık zamanlı Fourier dönüşümünde kullanılacak olan örnek sayısı 2'nin katlarına uyma zorunluluğu bulunmaktadır. Bu çalışmada frekans analizleri DFT yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

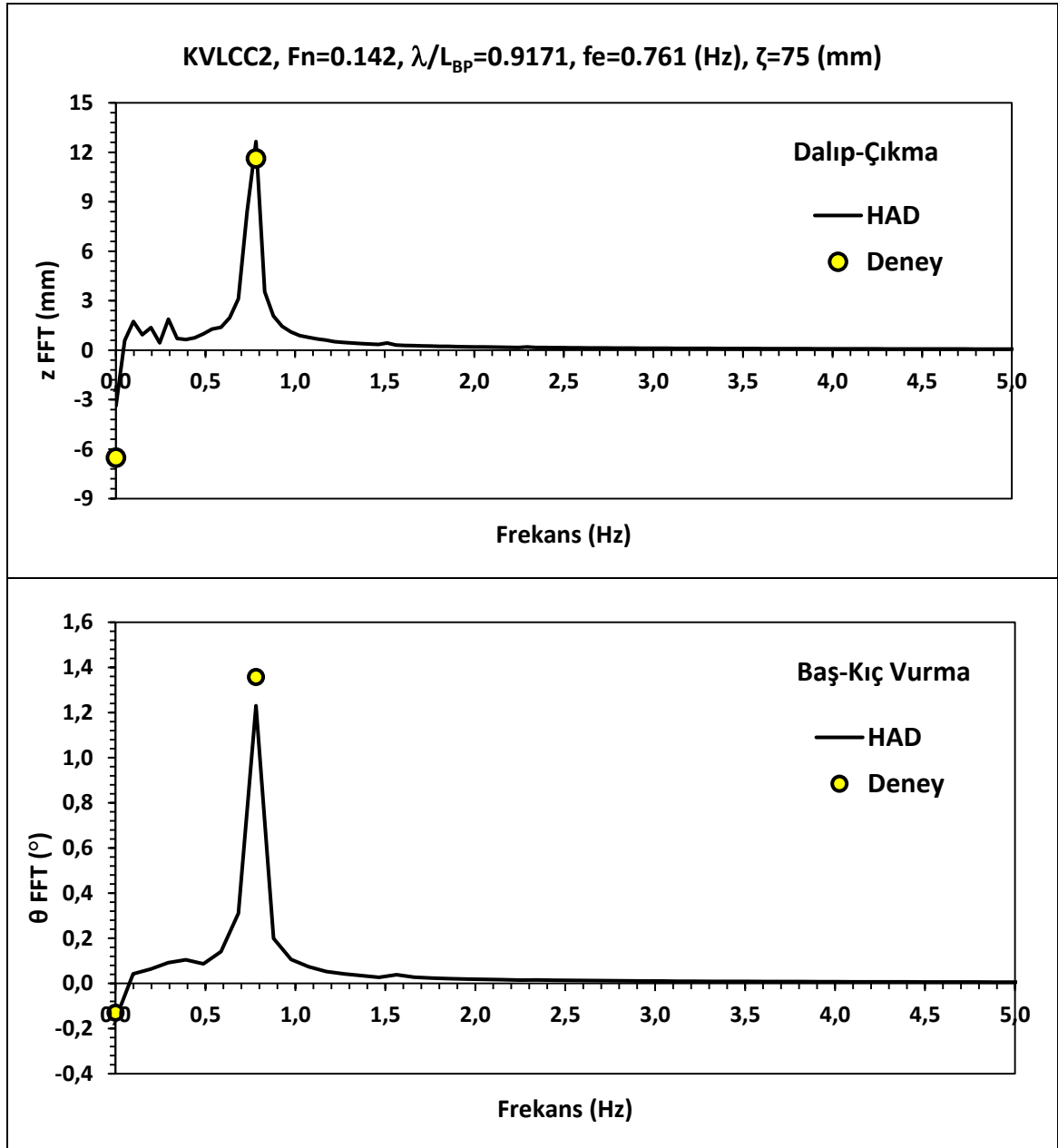
Catiglione vd. [90], Carrica vd. [91] çalışmalarında teknenin maksimum genliklerini belirleyebilmek için hareket cevabına Fourier dönüşümlerini uygulamışlardır ve ayrıntılı bilgi bu referans kaynaklardan elde edilebilir.

Frekans analizlerinde kullanılan örnekleme periyodu hareket analizlerinde tanımlanan zaman adımıdır ($CFL = \Delta T = T_e/125$). Frekans cevabı incelenirken hareketin geçici hal cevabının sönümlendiği zaman dilimi Fourier dönüşümüne dahil edilmemiş, hareketin periyodik olarak değiştiği zaman dilimi göz önüne alınmıştır. Gerçekleştirilen frekans analizleri sonucunda harmoniklere ait değerler, teknenin hareket frekansı değerleri [24]'den alınan deneysel sonuçlar ile birlikte Çizelge 5.3'de gösterilmiştir.

Çizelge 5. 3 KVLCC2 deney ve HAD frekans analizi sonuçları

	Fn=0.142	f_e (Hz)=0.761	CFL=ΔT=T_e/125
	HAD	DENEY	Hata % $\left \frac{HAD-D}{D} \right$
z₁₀	-3.375	-6.516	% 48.2
z₁₁	12.655	11.631	% 8.8
θ₁₀	-0.120	-0.137	% 11.8
θ₁₁	1.270	1.357	% 6.3
f_e	0.781	-	-
Hesaplama Süresi (saat)	240	-	-

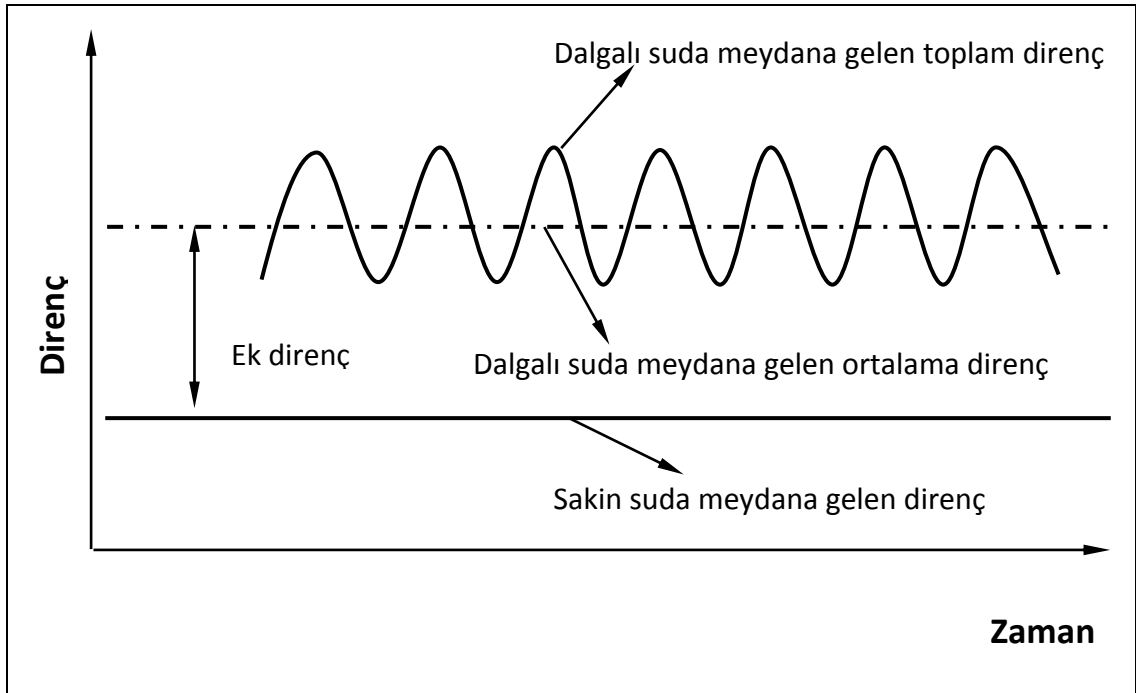
Çizelge 5.3’de analiz sonucu [24]’den alınan deneysel sonuçlar ile karşılaştırılmış ve aradaki hata yüzde ile ifade edilmiştir. Hareketin frekans analizi 30-40 saniye arasındaki örnekler kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Çizelge 5.3’e göre HAD dalıp-çıkma hareketine ait birinci harmonik ile baş-kıç vurma hareketine ait harmonikler hesaplayabilmiştir. Şekil 5.9’da dalıp-çıkma ve baş-kıç vurma bileşik hareketinin frekans cevabı deney [24] ve HAD analizi için gösterilmiştir.



Şekil 5. 9 KVLCC2 formu için HAD analizlerinden elde edilen Dalıp-Çıkma ve Baş-Kıç vurma hareketine ait frekans cevapları ($F_n=0.142$)

5.2.5 Ek Dalga Direncinin Hesaplanması

Baştan gelen düzenli dalgalarda KVLCC2'nin hareket analizlerinin yapılması sonucunda forma ait yer değiştirmeler elde edilmiş ve hareket sisteminin nonlineer olduğu görülmüştür. Dalgalı suda ilerleyen bir teknenin direnç değerleri aynı hızda sakin suda ilerlemesi durumunda oluşturacağı dirence göre daha yüksek olacaktır. Tekne üzerinde meydana gelen bu direnç değeri ek dalga direnci olarak adlandırılır ve form tasarımları gerçekleştirilirken ek dalga direncinde göz önüne alınması gerekir. Dalgalı suda ve sakin suda meydana gelen dirençler teorik olarak Şekil 5.10'da tanımlanmıştır.



Şekil 5. 10 Ek direnç grafiği

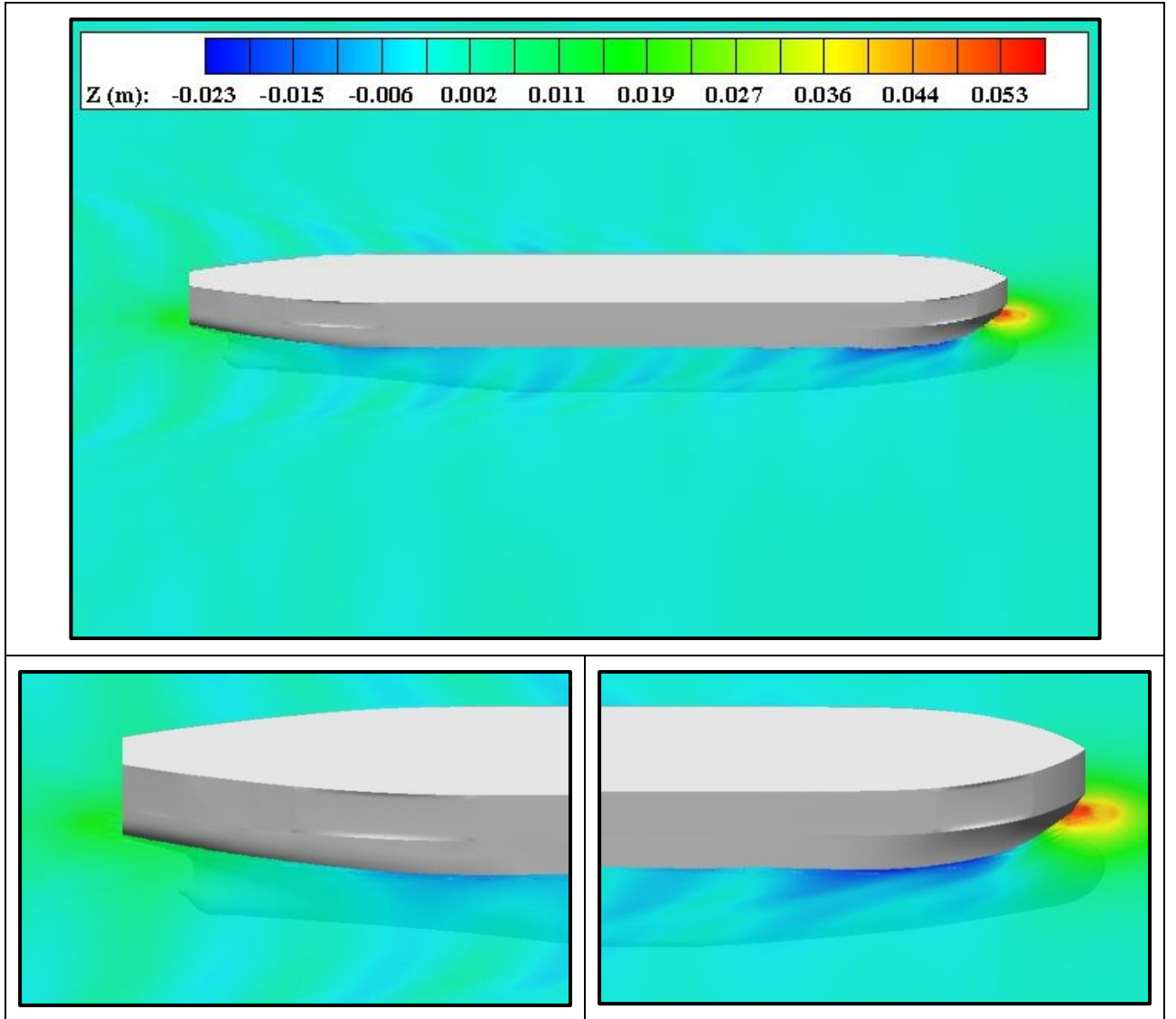
Şekil 5.10 incelendiğinde dalgalı suda tekne üzerinde meydana gelecek ek direnç periyodik olarak değişen toplam direncin ortalaması alınarak hesaplanır ve ek direnç katsayısı aşağıdaki formüller kullanılarak elde edilir:

$$C_{aw} = \frac{R_{aw}}{\rho g \zeta^2 B^2 / L_{BP}} \quad (5.9)$$

Burada C_{aw} ek direnç katsayısı, ρ yoğunluk, g yer çekimi ivmesi, ζ tekne üzerine gönderilen dalganın genliği, B teknenin maksimum genişliğini göstermektedir. R_{aw} ise aşağıdaki formülle verilmektedir:

$$R_{aw} = \overline{R_{aw}} - R_{calm} \quad (5.10)$$

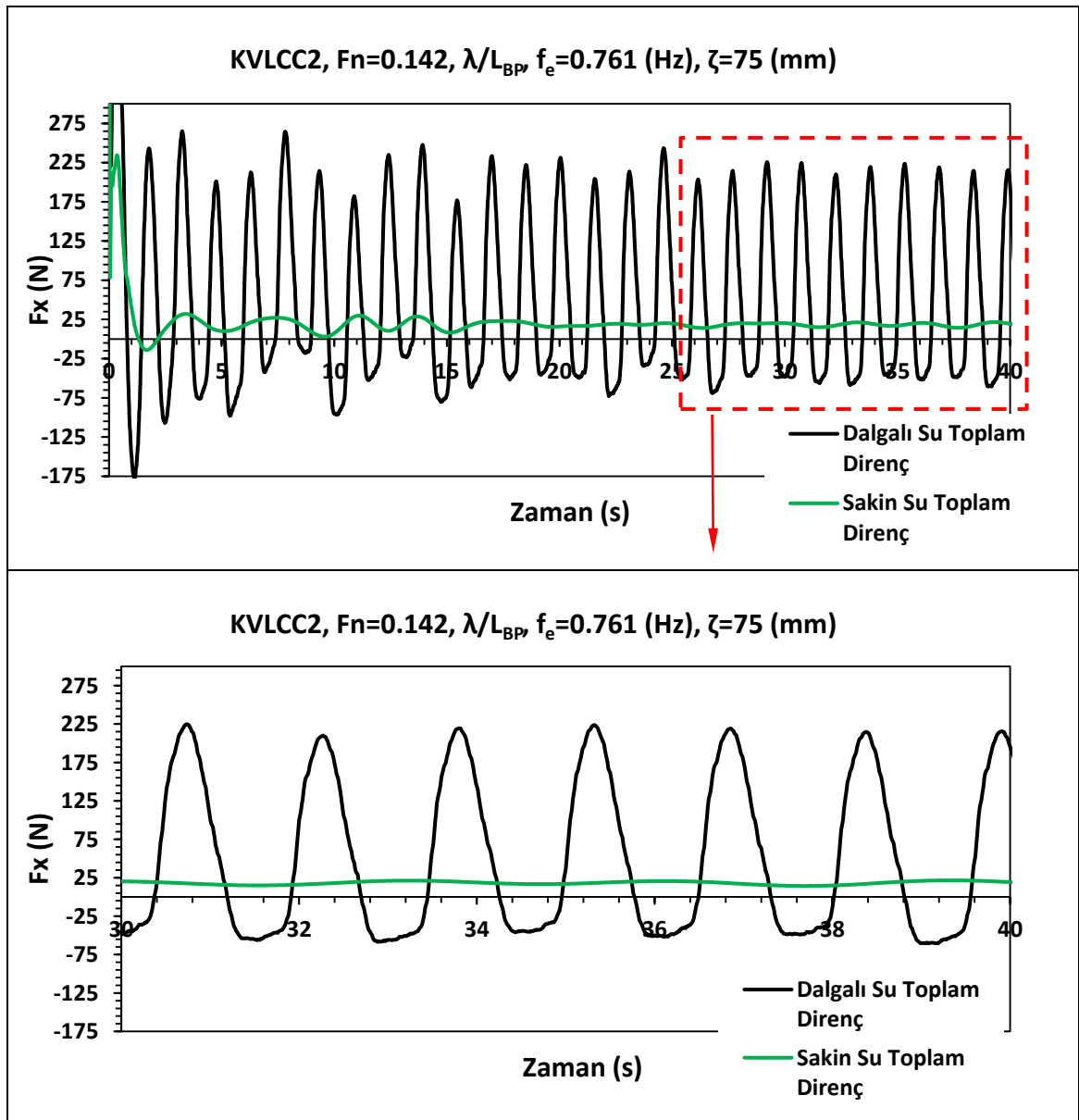
Denklem 5.10’da görülen $\overline{R_{aw}}$ dalgalı sudaki ortalama direnci, R_{calm} sakin suda meydana gelen toplam direnç değerini göstermektedir. Dalgalı suda tekne direncinde meydana gelen değişimi hesaplamak için potansiyel teoriye dayalı çeşitli yöntemler geliştirilmiştir [92], [93]. Potansiyel teoriye dayalı olarak gerçekleştirilen analizlerde tekne üzerinde meydana gelen basınç değişimi tekne gövdesi üzerinde integre edilerek kuvvetin zamana bağlı değişimi hesaplanır. Viskozitenin ihmal edilmesi bu yöntemin en önemli dezavantajıdır.



Şekil 5. 11 KVLCC2 tekne formu etrafında meydana gelen dalga deformasyonu
($F_n=0.142$)

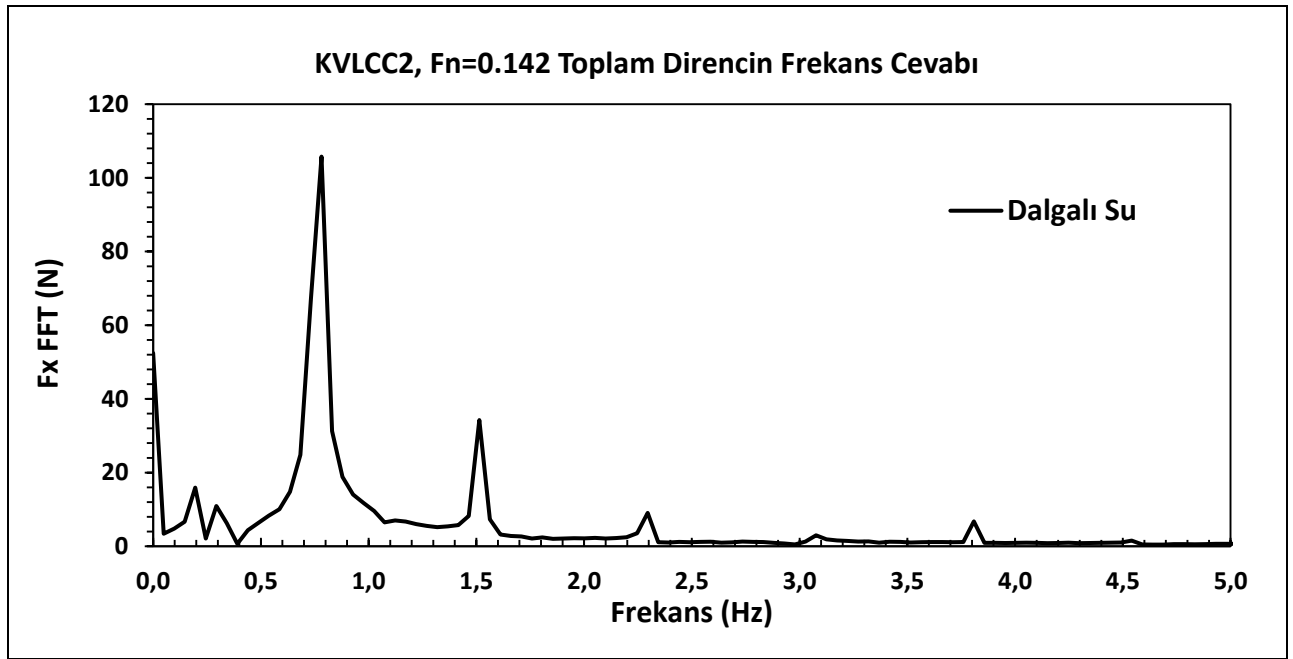
KVLCC2 tekne formunun ek dalga direncinin hesap edilebilmesi için sakin su direnç analizleri gerçekleştirilmiştir. Sakin su direnç analizleri için 5. Bölümde M 367 için

geliştirilen prosedür kullanılmıştır. KVLCC2 nin sakin suda $F_n=0.142$ sayısında etrafında meydana gelen dalga deformasyonları Şekil 5.11’de gösterilmiştir. Akış tamamen türbülanslı olup zamana bağımlıdır. Türbülans modellemesi için Standart k- ϵ türbülans modeli kullanılmıştır. Zaman adımını seçimi CFL sayısı göz önüne alınarak gerçekleştirilmiştir. Analizler sonucunda elde edilen sakin su ve dalgalı suda meydana gelen toplam direncin zamana bağlı değişimi Şekil 5.12’de gösterilmiştir. Analizler yarım tekne formu için gerçekleştirilmiş olduğundan Şekil 5.12’de verilen değerler analiz sonuçlarının 2 ile çarpılmış halidir.



Şekil 5. 12 KVLCC2 sakin ve dalgalı suda meydana gelen direnç değişimi ($F_n=0.142$)

Şekil 5.12 incelendiğinde dalgalı suda meydana gelen direnç değerinin değişimi görülebilir. Sakin su analizlerinde tekne direncinin 18 N değerine yakınsadığı görülmektedir. Dalgalı suda meydana gelen direnç değerlerinin ortalamasının tespit edilebilmesi için frekans analizlerinin gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Frekans analizinin gerçekleştirilmesi sonucunda sıfırıncı harmonik ortalama değeri verecektir. Dalgalı suda meydana gelen direnç değerinin frekans cevabı Şekil 5.13’de gösterilmiştir.



Şekil 5. 13 KVLCC2 dalgalı suda meydana gelen direnç değişiminin frekans cevabı

Frekans analizleri hareketin değişiminin periyodik olduğu 30-40 saniye arasındaki sonuçlar kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Şekil 5.13 incelendiğinde ortalama değeri veren 0. Harmoniğe ait sonuç görülebilir. Dalgalı suda meydana gelen toplam direncin frekans cevabında 5. Harmoniğe kadar sonuç elde edilmiştir. Harmonikler karşılaşma frekansının katlarında meydana gelmiş ve baskın olan genlik 1. Harmoniktir.

Frekans analizlerinden elde edilen ortalama direnç değerleri kullanılarak ek direnç hesaplamaları gerçekleştirilmiş ve elde edilen sonuçlar [24]'den alınan deneysel sonuçlar ile karşılaştırmalı olarak Çizelge 5.4'de verilmiştir.

Çizelge 5. 4 Ek direnç için analizlerden elde edilen değerler

Fn=0.142	$\zeta=75$ (mm)	$\lambda/L_{pp}=0.9171$		
	HAD	DENEY	Hata %	$\frac{ HAD-D }{D}$
R_{calm}	18.173	18.200	% 0.14	
$\overline{R_{aw}}$	52.474	-	-	
R_{aw}	34.301	-	-	
C_{aw}	3.431	4.601	% 25.42	

Çizelge 5.4 incelendiğinde HAD ile gerçekleştirilen analizlerin sonucunda ek dalga direnci değeri yaklaşık olarak % 25 fark ile tahmin edilebilmiştir.

5.2.6 Sonuçların Değerlendirilmesi

Bu bölümde baştan gelen düzenli dalgalar içerisinde KVLCC2 tekne formunun baş-kıç vurma ve dalıp-çıkma bileşik hareketi incelenmiştir. HAD analizinin deneysel verilerle karşılaştırılmış ve aşağıda verilen sonuçlar elde edilmiştir:

- Baştan gelen düzenli dalgalarda teknenin gerçekleştirilen hareket analizlerinde hareket sisteminin doğrusal olmadığı görülmektedir. HAD analizleri sonucunda teknenin hareketinin baskın olan frekans değerinin ve bu frekanstaki genliğin elde edilebilmesi için Fourier analizleri gerçekleştirilmiş olup sonuçlar Şekil 5.9 ve Çizelge 5.3’de verilmiştir. Frekans analizlerinden elde edilen sonuçlara göre tüm analizlerde baskın olan frekans ile karşılaşma frekansının hemen hemen aynı olduğu görülmektedir ve tasarlanan HAD modeli başarılıdır.
- Frekans analizlerinden elde edilen maksimum genlik değerleri [24]’den alınan deneysel verilerle Çizelge 5.3’de karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde HAD çözüm yöntemi dalıp-çıkma hareketine ait sıfıncı harmoniği tahmin etmede zorlanmış olmakla birlikte diğer harmonikleri tahmin etmede başarılı olmuştur.
- 4. Bölümde gemi direnç analizi geliştirilen prosedür bu bölümde KVLCC2 için de test edilmiş olup elde edilen direnç değeri deneysel veri ile birlikte Çizelge 5.4’de verilmiştir. Çizelge 5.4 incelendiğinde de direnç analizi için elde edilen hata

değerinin %1'den küçük olduğu ve analiz prosedürünün KVLCC2 formu için de başarılı olduğu görülebilir.

- Ek dalga direncinin hesap edilebilmesi için modelin dinamik analizi ile birlikte sakin su direnç analizleri gerçekleştirilmiştir. Direnç yönünde meydana gelen kuvvetin dalgalı suda zamanla değişim göstermesi sebebiyle ortalama değerin tespiti için frekans analizleri gerçekleştirilmiş ve elde edilen sonuçlar [24]'den alınan deneysel veriler ile birlikte Çizelge 5.4'de verilmiştir. Çizelge 5.4 incelendiğinde RANSE çözümün sakin su direnç değerini çok düşük bir hatayla hesapladığı fakat ek dalga direncini tahmin etmede zorlandığı görülmektedir.
- Gemi hareketlerinin RANSE çözümden elde edilen sonuçları deneysel verilerle karşılaştırıldığında aradaki fark direnç analizlerinden elde edilen fark değerlerine göre artış göstermiş olmakla birlikte geliştirilen HAD yönteminin başarılı olduğu düşünülmektedir.
- Elde edilen sonuçlar hesaplama hacmi ve tekne geometrisi üzerindeki ağ yapısı sıklaştırılarak, zaman adımı azaltılarak ve daha gelişmiş türbülans modelleri kullanılarak daha da iyileştirilebilir.

SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada gemi direnci ve hareketleri HAD ve deneysel akışkanlar mekaniği yöntemleri kullanılarak incelenmiştir. 2. Bölümde kullanılan matematiksel yöntem tanıtılmış ve akışı yöneten temel diferansiyel denklemler verilmiş ve bu denklemlerin sayısal çözümü anlatılmıştır. RANS denklemleri $k - \epsilon$ türbülans modeli kullanılarak incelenmiş ayrıklaştırma işlemi için sonlu hacimler yöntemi kullanılmıştır. Bu çalışmada elde edilen sonuçlar özetlenecek olursa:

- Kullanılan sayısal modelin sonucunun test edilebilmesi için deneysel verilere ihtiyaç duyulmaktadır. Literatürde tekne formlarının sınırlı sayıda F_n sayısı için deneysel sonuçları bulunmakta olup mevcut olan deneysel veri ihtiyacını karşılamak için İ.T.Ü Ata Nutku Gemi Model ve Deney Laboratuvarı'nda direnç deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deneylerde kullanılan tekne formu Y.T.Ü Gemi İnşaatı ve Gemi Makineleri Bölümü'nde Şener [43] tarafından doktora tez çalışması kapsamında geliştirilen FFG tipi savaş gemisidir ve bu geminin 1/36 ölçekli modeli M 367 model numarası ile imal edilmiştir. Deneysel çalışma için kullanılan bu model ile birlikte direnç ve hareket analizlerinde kullanılan Wigley, KCS, KVLCC2 tekne formları 3. Bölümde tanıtılmıştır. M 367 tekne modelinin gerçekleştirilen deneylerinden elde edilen sonuçlar ileride yapılacak olan çalışmalar için kullanılabilir.
- 4. Bölümde M 367 model tekne formunun direnç analizi HAD yöntemleri kullanılarak incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar deneysel verilerle

karşılaştırıldığında RANSE çözümlerin $F_n < 0.3$ için başarılı olduğu görülmüştür. Tekne form faktörü geometrinin akışa uygunluğu hakkında fikir edinmemizi sağlar ve RANSE çözümler kullanılarak form faktörü tahmini yapılabilir. Bu çalışmada kullanılan RANSE çözümleri genel olarak direnç tahmininde başarılı olmuştur. Ayrıca bu bölümde literatürde yaygın olarak kullanılan tekne formları üzerinde hazırlanan HAD modeli test edilmiş ve model bu formlar içinde başarılı olmuştur.

- Gemi hareketlerinin HAD ile hareket analizleri için literatürde deneysel verileri mevcut bulunan KVLCC2 tekne formu kullanılmıştır. KVLCC2 tekne formunun geometrik özellikleri 3. Bölümde verilmiştir. Hareket analizleri bu form kullanılarak gerçekleştirilmiş ve sonuçlar 5. Bölümde sunulmuştur. Literatürden yalnızca bir dalga boyu ve genliği için deneysel veriler temin edilebilmiş ve bu sebepten dolayı analizler bir dalga boyu ve genliği için gerçekleştirilmiştir. HAD sonuçları deneysel verilerle karşılaştırıldığında tasarlanan HAD yönteminin hareket genliklerini tahmin etmede başarılı olduğu, sonuçlar arasında meydana gelen farkın ise tekne geometrisinin zorluğundan ve test için kullanılan dalga boyundan kaynaklandığı düşünülmektedir.
- Bilgisayar teknolojisinin gelişmesiyle birlikte analizlerde kullanılan ağ sayısı arttırılarak ve daha gelişmiş türbülans modelleri kullanılarak çözümler iyileştirilebilir.
- RANS denklemleri kullanılarak gerçekleştirilen çözümler uzun sürmektedir ve bu durum yöntemin en büyük eksikliğidir. Bunun yanında geometrinin bilgisayar ortamında modellenmesi ve ağ yapılarının hazırlanması da hesaplama süresini uzatmaktadır.
- Bu çalışmada elde edilen sonuçlara göre HAD yöntemleri tekne formunun tasarımında ve/veya alternatif formların karşılaştırılmasında kullanılabilir. Sayısal analizler kesin sonuçlar olmamakla birlikte deneysel çalışmalar ile birlikte tercih edilen bir yöntem olmaya başlamıştır.
- Hazırlanan analiz prosedürü farklı formlara sahip tekne modellerinin direnç ve hareket analizleri için kullanılabilir.

- HAD ile hareket analizi sonucunda elde edilen kuvvet, moment ve yerdeşiştirmelerin zamana bağlı serileri kullanarak teknenin hidrodinamik katsayıları tahmin edilebilir. Elde edilen sonuçlar da herhangi bir şekilde ölçüm gürültüsünün bulunmayışı yöntemin önemli bir avantajıdır.
- HAD yöntemleri kullanarak tekne modelinin istenilen herhangi bir bölgesinde basıncın zamanla değişimi hesap edilebilir. Basınc değişiminin zamana bağlı serileri kullanarak akış kaynaklı gürültü değeri elde edilebilir.
- HAD yöntemleri, model deneylerindeki ölçek etkisini ortadan kaldırmak da yararlı olacaktır.
- HAD ile gerçekleştirilen çözümler model deneylerine göre daha ucuzdur ve daha az insan gücü gerektirmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] Özdemir, Y.H., (2007). Gemi Etrafındaki Akışın HAD Yöntemleri Kullanılarak İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi ve Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [2] Michell, J.H., (1898). "The Wave Resistance of a Ship", *Philosophical Magazine*, 45 (5): 106-123.
- [3] Havelock, T.H., (1951). "Wave Resistance Theory and Its Applications to Ship Problems", *SNAME Transactions*, 59: 13-24.
- [4] Hess, J.L. ve Smith, A.M.O., (1967). "Calculation of potential flow around arbitrary bodies", *Progress in Aeronautical Sciences*, 8.
- [5] Bal, S., (1999). "A Panel Method for the Potential Flow Around 2-D Hydrofoils", *Tr. J. of Engineering and Environmental Science*, 23: 349-361.
- [6] Dawson, C.W., (1977). "A Practical Computer Method for Solving Ship-Wave Problems", *Proc. of 2nd Int. Conf. on Numer. Ship Hydro.*, Berkeley, 30-38.
- [7] Tarafder, S., (2006). "Third order contribution to the wave-making resistance of a ship at finite depth of water", *Ocean Engineering*, 34: 32-44.
- [8] Rigby, S.G., Nicolaou, D., Sproston, J.L. ve Millward, A. (2006). "Numerical Modeling of the Water Flow Around Ship Hulls", *Journal of Ship Research*, 45(2): 85-91.
- [9] Kara, F., Tang, C.Q. ve Vassalos, D., (2007). "Time domain three-dimensional fully nonlinear computations of steady body-wave interaction", *Ocean Engineering*, 34: 776-789.
- [10] Bal, S., Kinnas, S.A. ve Lee, S.H., (2001). "Numerical Analysis of 2-D and 3-D Cavitating Hydrofoils Under a Free Surface", *Journal of Ship Research*, 45(1): 34-39.
- [11] Bal, S. ve Kinnas, S.A., (2003). "A Numerical wave tank model for cavitating hydrofoils", *Computational Mechanics*, 32: 259-268.
- [12] Lee, S.H. ve Kinnas, S.A., (2005). "A BEM for the modelling of unsteady propeller sheet cavitation inside of a cavitation tunnel", *Computational Mechanics*, 37: 41-51.

- [13] Barlas, B., (2000). "Gemi ön dizaynı ve hesaplamalı akışkanlar dinamiği", Deniz Harp Okulu Bülteni, 227(36).
- [14] Barlas, B., (1999). Gemi Etrafındaki sınır Tabakanın İncelenmesi, Doktora Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [15] Gorski, J.J., (2002). "Present state of numerical ship hydrodynamics and validation experiments", Journal Offshore Mechanics and Arctic Engineering–Trans, ASME 124(2): 74-80.
- [16] Bulgarelli, U.T., Lugni, C. ve Landrini, M., (2003). "Numerical modeling of free-surface flows in ship hydrodynamics", International Journal for Numerical Methods in Fluids, 43(3): 465-481.
- [17] Parolini, N. ve Quarteroni, A., (2005). "Mathematical Models and Numerical Simulations for the America's Cup", Comp. Meth. Appl. Mech. Eng. 194 (9-11): 1001–1026.
- [18] Ahmed, Y. ve Guedes Soares, C., (2009). "Simulation of free surface flow around a VLCC hull using viscous and potential flow methods", Ocean Engineering, 36(9): 691-696.
- [19] Sridhar, D., Bhonuprakash, T.V.K. ve Das H.N., (2010). "Frictional resistance calculations on a ship using CFD", International Journal of Computer Applications, 11(5): 24-31.
- [20] Wackers, J., Koren, B., Raven, H.C., Van der Ploeg, A., Starke, A.R., Deng, G.B., Queutey, P. ve Visonneau, M., (2011). "Free-surface viscous flow solution methods for ship hydrodynamics", Arch Comput. Methods Eng., 18: 1–41.
- [21] Xing, T., Bhushan, S. ve Stern, F., (2012). "Vortical and turbulent structures for KVLCC2 at drift angle 0, 12, and 30 degrees", Ocean Engineering, 55: 23–43.
- [22] Tingqiu, L., Matusiak ve Lehtimati R., (2001). "Numerical simulation of viscous flows with free surface around realistic hull forms with transom", International Journal for Numerical Methods in Fluids, 37 (5): 601-624.
- [23] Leroyer, A., Wackers, J., Queutey, P. ve Guilmineau, E., (2011). "Numerical strategies to speed up CFD computations with free surface - Application to the dynamic equilibrium of hulls", Ocean Engineering, 38(17-18): 2070–2076.
- [24] Guo, B.J., Steen, S. ve Deng, G.B., (2012). "Seakeeping prediction of KVLCC2 in head waves with RANS", Applied Ocean Research, 35: 56-57.
- [25] Kandasamy, M., Ooi, S.K., Carrica, P., Stern, F., Campana, E.F., Peri, D., Osborne, P., Cote, J., Macdonald, N. ve De, W.N., (2011). "CFD validation studies for a high-speed foil-assisted semi-planning catamaran", Journal of Marine Science and Technology, 16(2): 157-167.
- [26] Takai, T., Kandasamy, M. ve Stern, F., (2011). "Verification and validation study of URANS simulations for an axial waterjet propelled large high-speed ship", Journal of Marine Science and Technology, 16(4): 434-447.

- [27] Bucon, K., Buca, M.P., ve Ruzic, S., (2012). "Numerical Modeling of the Flow Around the Tanker Hull at a Model Scale", Brodogradnja, Journal of Naval Architecture and Shipbuilding Industry, 59(2): 117-122.
- [28] Seo, K.C., Atlar, M. ve Sampson, R. , (2012). "Hydrodynamic development of inclined keel hull-resistance", Ocean Engineering 47: 7–18.
- [29] Yılmaz, T., (2006). Gemi Mühendisliği El Kitabı, Birinci Basım, Gemi Mühendisleri Odası Yayınları, İstanbul.
- [30] Lloyd, A.R.J.M., (1989). Seakeeping Ship Behaviour in Rough Weather, Birinci Basım, John Wiley, New York.
- [31] Havelock, Sir.T.H., (1928). "The Wave Pattern of a Doublet in a Stream", Procs. Of the Royal Society, 121(A): 515-523
- [32] Ursell, F., (1949). "On the heaving motion of a circular cylinder in the surface of a fluid", Quart. J. Mech. Appl. Math, 2: 218-231
- [33] Ursell, F., (1949). "On the rolling motion of a circular cylinder in the surface of a fluid", Quart. J. Mech. Appl. Math., 2: 335-353
- [34] Lewis, F.M., (1929). "The inertia of water surrounding a vibrating ship", Transactions, Society of Naval Architects and Marine Engineers, 27: 1-20
- [35] Frank, W., (1967). "Oscillation of Cylinders in or Below the Free Surface of Deep Fluids", DTNSRDC Report No. 2375
- [36] Querard, A.B.G., Temarel, P. ve Turnock, S.R., (2010). "The hydrodynamics of ship-like sections in heave, sway and roll motions predicted using an unsteady Reynolds averaged Navier-Stokes method", Engineering for the Maritime Environment, 233
- [37] Chen, J.P. ve Zhu, M., (2010). "Numerical Simulations of Wave-Induced Ship Motions in Time Domain by a Rankine Panel Method", Journal of Hydrodynamics, 22(3): 373-380.
- [38] Zhang, J., Bandyk, P. ve Beck, R.F., (2010). "Seakeeping computations using double-body basis flows", Applied Ocean Research, 32(3): 471-482.
- [39] Sato, Y., Miyata, H. ve Sato, T., (1999). "CFD simulation of 3-dimensional motion of a ship in waves: application to an advancing ship in regular heading waves", Journal of Marine Science and Technology, 4: 108-116.
- [40] Weymouth, G.D., Wilson, R.V. ve Stern, F., (2005). "RANS computational fluid dynamics predictions of pitch and heave motion in head seas", Journal of Ship Research, 49(2): 80-97.
- [41] Deng, G.B., Queutey, P. ve Visonneau, M., (2009). "Seakeeping prediction for a container ship with RANS computation", 22nd Chinese conference in hydrodynamics.
- [42] Larsson, L., Stern, F. ve Visonneau, M., (2010). Numerical Ship Hydrodynamics an assessment of the Gothenburg, Birinci Basım, Springer, New York.

- [43] Şener, B., (2012). Fırkateyn Tipi Tekne Serisi Geliştirilmesi ve Hidrodinamik form Optimizasyonu, Doktora Tezi, YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [44] Fossen, T.I., (1994). Guidance and Control of Ocean Vehicles, İkinci Basım, John Wiley & Sons Book Co., New York.
- [45] Javanmardi, M.R., Seif, M.S., Jahanbakhsh ve Sayyaadi, E. H., (2008). "Hydrodynamic Analysis of Trimaran Vessels", Polish Maritime Research, 1(55): 11-18
- [46] Panahi, R., Jahanbakhsh, E. ve Seif, M.S., (2009). "Towards simulation of 3D nonlinear high-speed vessels motion", Ocean Engineering, 36: 256-265
- [47] Star CCM+ Users Manual
- [48] Sabuncu, T., (1983). Gemi Hareketleri, Birinci Basım, İstanbul Teknik Üniversitesi Yayınevi, İstanbul.
- [49] Yüksel, Y., Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği ve Hidrolik, Birinci Basım, Yıldız Teknik Üniversitesi Yayınevi, İstanbul.
- [50] Wilcox, D.C, (1994). Turbulence Modelling for CFD, İkinci Basım, DCW Industries, Colifornia.
- [51] Easom, G., (2000). Improved Turbulence Models Computational Wind Engineering, Doktora Tezi, Universtiy of Nottingham Fort, Nottingham.
- [52] Tennekes, H. ve Lumley, J. L., (1972). A First Course in Turbulence, Birinci Basım, MIT Press Cambridge, London.
- [53] Launder, B. E. ve Spalding, D. B., (1974). "The Numerical Computation of Turbulent Flows", Compt. Methods Apply. Mech. Eng., 3: 269-289
- [54] Versteeg, H. K. ve Malalasekera, W., (1996). An Introduction to Computational Fluid Dynamics The Finite Volume Method, Üçüncü Basım, Longman Scientific and Technical, London UK.
- [55] Smith, G. D., (1978). Numerical Solution of Partial Differential Equations-The Finite Difference method, Clarendon Press, Oxford, UK
- [56] Patankar, S. V., (1980). Numerical Heat Transfer and Fluid Flow, Hemisphere-Mc Graw Hill, New York, USA
- [57] Katz, J. ve Plotkin, A., (1991). Low-Speed Aerodynamics, Birinci Basım, Hemisphere-Mc Graw Hill, New York, USA
- [58] Fluent Users Manual
- [59] Uçar, G., (2006). Helikopter Etrafındaki Akışın Sonlu Hacimler Yöntemiyle Analizi, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [60] Patankar, S.V ve Spalding, (1972). "A Calculation Procedure for Heat, Mass and Momentum Transfer in Three-dimensional Parabolic Flows", Int. J. Heat Mass Transfer, 15: 17-87
- [61] Joel, H., ve Fergizer M. P., (2002). Computational Methods for Fluid Dynamics, Springer, Üçüncü Basım, New York

- [62] Baykal, R. ve Dikili, A.C., (2002). Gemilerin Direnci ve Makine Gücü, Birinci Basım, T.C. İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi Matbaası , İstanbul Türkiye.
- [63] Carlton, J., (2007). Marine Propellers and Propulsion, İkinci Basım, Elsevier Ltd., Burlington USA.
- [64] Ozdemir, Y.H., Barlas, B. ve Bayraktar, S., (2011). “Turbulent Flow Computations For Slender Ships With Free Surface”, 1st International Symposium on Naval Architecture and Maritime
- [65] Froude, W., (1878). “The fundamental principles of the resistance of ships”, Proc. Roy. Inst. Gt. Brit., 8: 188-213
- [66] International Towing Tank Conference, (1957). Proceeding of the 8th ITTC
- [67] Hughes, G., (1954). “Friction and Form Resistance in Turbulent Flow and a Proposed Formulation for Use in Model and Ship Correlation”, Trans. RINA, 96: 314-376.
- [68] Gül, Y., Kaydıhan, L., Çehreli, Z.N., Uçar, G. ve Esiregemez, E., (2005).“ Gemilerin Hidrodinamik Dizaynında CFD Uygulamaları”, T.M.M.O.B Gemi Mühendisleri Odası Gemi ve Deniz Teknolojisi Dergisi, 163: 4-9
- [69] Çelik, F., (2014). Gemi Direnci ve Sevki, Ders Notları, YTÜ, İstanbul.
- [70] Report of the Performanca Committee, (1978). Proceeding of the 15th ITTC
- [71] Fonfach, J.F.A., (2010). Numerical study of the hydrodynamic interaction between ships in viscous and inviscid flow, Doktora Tezi, Instituto Superior Tecnico, Lizbon.
- [72] Repetto, R.A., (2001). Computation of Turbulent Free-Surface Flows Around Ships and Floating Bodies, Doktora Tezi, Vom Promotionsausschub der Technischen Universitat, Hamburg.
- [73] Richardson, L. F., (1910). “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, 210: 307-357.
- [74] Zhang, Z.R., (2010). “Verification and validation for RANS simulation of KCS container ship without/with propeller”, In: Proceedings of 11 th ITTC, Society of Naval Architects of Japan Tokyo, pp 65-66
- [75] ITTC-Quality Manual 7.5-03-01-01, CFD General Uncertainty Analysis in CFD Verification and Validation Methodology and Procedures.
- [76] Zwart, P.J., Godin, P.G., Penrose, J., ve Rhee, T.H., (2008). “Simulation of unsteady free surface flow around a ship hull a fully coupled multiphase flow method”, Journal of Marine Science and Technology, 13: 346-355.
- [77] Salim, M.S. ve Cheah, S.C., (1992). “Wall y^+ strategy for dealing with wall-bounded turbulent flows ”, International MultiConference of Engineers and Computer Scientists, 18-20 Mart 2009, Hong Kong.

- [78] Roache, P.J., (1994). "Perspective: a method for uniform reporting of grid refinement studies", ASME J. Fluids. Engrg., 116: 405-413
- [79] Prohaska, C.W., (1966). "A Simple method for the evolution of the form factor and low-speed wave resistance", In: Proceedings of 11 th ITTC, Society of Naval Architects of Japan Tokyo, pp 65-66.
- [80] Min, K.S. ve Kong, S.H., (2010). "Study on the form factor and full-scale ship resistance prediction method", Journal of Marine Science and Technology, 16(4): 108-118.
- [81] Dgiuli, N., Hadzic, N., Buca Pedisic, M.ve Semijalac, G., (2007). "Form Factor Determination of the Full, Large, Breadth and Shallow Draught Ship Series", Brodogradnja, Journal of Naval Architecture and Shipbuilding Industry, 58(4): 380-388.
- [82] Gomez, A.G., (2000). "On the form factor scale effect", Ocean Engineering, 26: 97-109.
- [83] Kouh, J.S., Chen, Y.J. ve Chau, S.W., (2009). "Numerical study on scale effect of form factor", Ocean Engineering, 36: 403-413.
- [84] Shearer, J.R. ve Cross, J.J., (1965). "The experimental determination of the components of ship resistance for a mathematical model", London at a meeting of The Royal Institution of Naval Architects.
- [85] Kim, W.J, Van, D.H. ve Kim, D.H., (2001). "Measurement of flows around modern commercial ship models", Experiment Fluids, 31: 567-578.
- [86] Bhattacharyya, R., (1972). Dynamics of marine vehicles , Birinci Basım, John Wiley & Sons., New York U.S.A.
- [87] Guo, B.J. ve Steen, S., (2011). "Evaluation of added resistance of KVLCC2 in short waves", Journal of Hydrodynamics, 23(6): 709-722.
- [88] Martin Irvine, Jr., Longo, J. ve Stern, F., (2008). "Pitch and Heave tests and Uncertainty Assessment for a Surface Combanant in Regular .Head Waves", Journal of Ship Research, 52(2): 146-163.
- [89] Manolakis, R.G., Ingle, V.K., ve Kogon, S.M., (2000). Statisticel and Adaptive Signal Processing, Birinci Basım, McGraw-Hill book, New York U.S.A.
- [90] Catiglione, T., Stern, F., Bova, S., ve Kandasamy, M., (2011). "Numerical investigation of the seakeeping behaviour of a catamaran advancing in regular head waves", Ocean Engineering, 38: 1806-1822.
- [91] Carrica, P.M., Fu, H., ve Stern, F., (2011). "Computations of self-propulsion free to sink and trim and of motions in head waves of the KRISO Container Ship (KCS) model", Applied Ocean Research, 33: 309-320.
- [92] Theorder, A. ve Paul, D.S., (1978). "Some Extensions Of The Classical Approach To Strip Theory Of The Ship Motions Including The Mean Added Force And Moments", Journal of Ship Research, 22(1).

- [93] Gerritsma, Ir.J., Vanden Bosch, Ir.J ve Beuckelman, W., (1961).” Propulsion In Regular and Irregular Waves”, International Shipbuilding Progress, 8(82).

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Yavuz Hakan ÖZDEMİR
Doğum Tarihi ve Yeri : 05.09.1982, Ağrı
Yabancı Dili : İngilizce
E-posta : yhakanozdemir@hotmail.com.tr

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Y. Lisans	Gemi İnş. ve Gemi Mak. Müh. Anabilim Dalı	Y.T.Ü	2007
Lisans	Gemi İnş. ve Gemi Mak. Müh. Bölümü	Y.T.Ü	2005
Lise	Fen	Erzurum İbrahim Hakkı Fen Lisesi	1999

İŞ TECRÜBESİ

Yıl	Firma/Kurum	Görevi
2006-2014	Y.T.Ü	Araştırma Görevlisi

YAYINLARI

Makale

- [1] Ozdemir, Y.H., Barlas, B., Yilmaz,T., ve Bayraktar, S., (2014). "Numerical and Experimental Study of Turbulent Free surface Flow For a Fast Ship Model", Brodogradnja, Journal of Naval Architecture and Shipbuilding Industry, 65(1): 39-54.

Bildiri

- [1] Ozdemir, Y.H., Barlas, B. ve Bayraktar, S., (2011). "Turbulent Flow Computations For Slender Ships With Free Surface", 1st International Symposium on Naval Architecture and Maritime, (INT-NAM), 24-25 October 2011, İstanbul.