

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

**GEMİ ÖZİTME PARAMETRELERİNİN SAYISAL VE  
DENEYSEL OLARAK HESAPLANMASI**

**Metin Kemal GÖKÇE**

**DOKTORA TEZİ**

Gemi İnşaatı ve Gemi Makineleri Mühendisliği Anabilim Dalı

Gemi İnşaatı ve Gemi Makineleri Mühendisliği Programı

Danışman

Prof. Dr. Ahmet Dursun ALKAN

Şubat, 2020

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

**GEMİ ÖZİTME PARAMETRELERİNİN SAYISAL VE DENEYSEL  
OLARAK HESAPLANMASI**

Metin Kemal GÖKÇE tarafından hazırlanan tez çalışması 13.02.2020 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Gemi İnşaatı ve Gemi Makineleri Mühendisliği Anabilim Dalı, Gemi İnşaatı ve Gemi Makineleri Mühendisliği Programı **DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Ahmet Dursun ALKAN  
Yıldız Teknik Üniversitesi  
Danışman

**Jüri Üyeleri**

Prof. Dr. Ahmet Dursun ALKAN, Danışman  
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Abdi KÜKNER, Üye  
İstanbul Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Muhsin AYDIN, Üye  
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Fahri ÇELİK, Üye  
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Mehmet Ali BAYKAL, Üye  
İstanbul Gedik Üniversitesi

---

---

---

---

---

---

Danışmanım Prof. Dr. Ahmet Dursun ALKAN sorumluluğunda tarafımda hazırlanan Gemi Özitme Parametrelerinin Sayısal ve Deneysel Olarak Hesaplanması başlıklı çalışmada veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Metin Kemal GÖKÇE

Bu alışma, YÖK tarafından yürütölen Öđretim Üyesi Yetiřtirme Programı (ÖYP) ile desteklenmiştir.

*Eşime*  
*ve*  
*Anneme*

# TEŞEKKÜR

---

Teşekkür bölümüne geçmeden önce, doktora çalışmalarım esnasında yakın çevreme verdiğim rahatsızlıktan dolayı özür dileyerek başlamak isterim. Bu uzun ve zorlu süreci onların verdiği destek olmadan bitirebilmek mümkün değildi. Çevremde böyle insanların olmasının bana kendimi ne denli şanslı hissettirdiğini belirtmek benim için bir borçtur.

Öncelikle tez danışmanım Sayın Prof. Dr. Ahmet Dursun ALKAN'a teşekkürlerimi sunarım. Kendisi yürütmekte olduğu yoğun idari görevlere rağmen danışmanlığımı üstlenerek bana her zaman gerekli vakti ayırmış, akademik, idari ve psikolojik yönden desteğini hiç esirgememiştir.

Doktora tez izleme jürimin değerli üyeleri Prof. Dr. Abdi KÜKNER ve Prof. Dr. Muhsin AYDIN'a da geçen süreçte tez izleme kurullarım için ayırdıkları değerli vakitleri ve yönlendirmeleri için teşekkür ederim.

Makine mühendisliği temelinden gelen birisi olarak, bana gemiyi ve gemi hidrodinamiği disiplinini öğretmiş olan derin bilgili hocam, sabırlı ağabeyim ve çok değerli arkadaşım Doç. Dr. Ömer Kemal KINACI'ya ne kadar teşekkür etsem azdır.

Gemi sefer tecrübelerinden bolca faydalandığım değerli dostum Uzakyol İkinci Mühendis Ersan TÜRKMEN'e, lisansüstü eğitime devam etmemde beni yönlendiren ve vesile olan sevgili hocam Doç. Dr. Hasan SERİN'e, özel sektörde çalıştığım süreçte doktora çalışmalarımda bana kolaylık sağlayan eski işverenim Haluk HACIZEKERİAYOĞLU, şu anki teknik müdürüm Dr. Gregory SPINGLER ve idari müdürüm Hedi MAJERİ'ye, ve geçen süreçte bana destek olan ve adını tek tek anamadığım diğer kişilere teşekkürü borç bilirim.

Ve tabi ki eşim ve ailem..

Beşinci yılımızın içerisinde olduğumuz birlikteliğimizin tamamında doktora sürecime denk geldiğinden doktoramın zorluklarını en az benim kadar paylaşan, hafta sonları benimle birlikte zehir olan, istemeden de olsa ihmal ettiğim sabırlı ve fedakar eşim Eda GÖKÇE için de bu tezin anlamının büyük olduğunu düşünüyorum. Kendisine duyduğum minneti ne kadar ifade etsem de yetersizdir. İyi ki varsın.

Bir fen bilgisi öğretmeni olarak beni kendimi bildiğim günden beri hep daha iyisi ve ilerisi için programlayan ve yönlendiren annem Nilgün GÖKÇE... Benim için yaptıklarının tamamını burada ifade etmemin tez kısmına yer bırakmayacağından yalnızca şu kadarını söyleyebiliyorum, bu tez benim olduğu kadar senin de eserindir. Babam Mehmet Celalettin GÖKÇE ve ağabeyim Hakan GÖKÇE, bu tezin her satırında sizler de varsınız. Hepinize çok teşekkür ederim.

Metin Kemal GÖKÇE

# İÇİNDEKİLER

---

<b>SİMGE LİSTESİ</b>	<b>ix</b>
<b>KISALTMA LİSTESİ</b>	<b>xi</b>
<b>ŞEKİL LİSTESİ</b>	<b>xii</b>
<b>TABLO LİSTESİ</b>	<b>xv</b>
<b>ÖZET</b>	<b>xvii</b>
<b>ABSTRACT</b>	<b>xviii</b>
<b>1 Giriş</b>	<b>1</b>
1.1 Giriş.....	1
1.2 Literatür Özeti .....	2
1.3 Tezin Amacı.....	5
1.4 Hipotez .....	6
<b>2 Matematiksel Model</b>	<b>8</b>
2.1 Genel Denklemler .....	8
2.2 Yönetici Denklemler .....	10
2.2.1 RANS Denklemleri .....	10
2.2.2 Reynolds Gerilme Denklemi .....	11
2.2.3 Türbülans Modelleri .....	11
2.2.4 Akışkan Hacmi Yöntemi (VOF) .....	13
<b>3 HAD Yaklaşımı ve Model Deneyleri</b>	<b>15</b>
3.1 HAD Yaklaşımı.....	15
3.1.1 Tek Fazlı HAD Analizleri .....	16
3.1.2 Çift Fazlı HAD Analizleri .....	23
3.1.3 Pervaneli HAD Analizleri .....	26
3.1.4 HAD Analizleri İçin Doğrulama ve Onaylama Çalışmaları .....	31
3.2 Model Deneyleri .....	34
3.2.1 DTC Gemi Modeli Üretim Süreçleri.....	35



3.2.2	DTC Model Deneyleri.....	35
3.2.3	Deney Sonuçlarının Literatürdeki Deneylerle Karşılaştırılması .....	37
3.2.4	Deney Belirsizliği.....	39
3.3	Uygulanan HAD Yaklaşımının Deneyle Doğrulanması.....	41
3.3.1	Deney Şartlarında Gerçekleştirilen HAD Analizleri.....	41
3.3.2	Uygulanan HAD Yaklaşımı için Doğrulama ve Onaylama Çalışması ...	42
<b>4</b>	<b>İÖHY ve Uygulamaları</b>	<b>45</b>
4.1	İteratif Özitme Hesaplama Yönteminin Genel İfadesi.....	45
4.2	İÖHY Tabanlı Özitme Hesaplama Kodu .....	50
4.2.1	Gemi ile İlgili Girdilerin Tanımlanması .....	52
4.2.2	Açık-Su Pervane Girdilerinin Tanımlanması.....	53
4.2.3	Kod ile Özitme Parametrelerinin Belirlenmesi (Sonuçlar Bölümü) .....	55
4.3	İÖHY ile Farklı Deniz Taşıtları için Özitme Hesaplamaları .....	58
4.3.1	DTC Gemisi için Özitme Hesaplamaları .....	59
4.3.2	DARPA Suboff Denizaltısı için Özitme Hesaplamaları .....	67
4.3.3	JBC Gemisi Özitme Hesaplamaları .....	74
4.3.4	ONR Tumblehome Gemisi Özitme Hesaplamaları.....	82
4.3.5	KCS Gemisi Özitme Hesaplamaları.....	91
<b>5</b>	<b>Sonuçlar ve Öneriler</b>	<b>95</b>
	<b>Kaynakça</b>	<b>98</b>
	<b>Tezden Üretilmiş Yayınlar</b>	<b>102</b>

## SİMGE LİSTESİ

---

$B_{WL}$	Su hattı genişliği
$C_B$	Blok katsayısı
$C_F$	Sürtünme direnci katsayısı
$C_{PV}$	Viskoz basınç direnç katsayısı
$C_T$	Toplam direnç katsayısı
$C_W$	Dalga direnç katsayısı
$D$	Pervane çapı
$F_n$	Froude sayısı
$g$	Yer çekimi ivmesi
$J$	Pervane ilerleme katsayısı
$k$	Form katsayısı
$K_Q$	Pervane tork katsayısı
$K_T$	Pervane itme katsayısı
$L$	Gemi boyu
$L_{BP}$	Dikmeler arası mesafe
$LCG$	Gemi ağırlık merkezinin boyuna konumu
$m$	Model ölçeğindeki gemi indisi
$n$	pervane devir sayısı
$p_G$	Ağ yapısı doğruluk mertebesi
$r_G$	Ağ yapısı tasfiye katsayısı
$R_F$	Sürtünme direnci
$R_T$	Pervanesiz (yedekte) toplam direnç
$R_{PV}$	Viskoz basınç direnci
$R_W$	Dalga direnci
$R_{Tp}$	Pervaneli durumda toplam direnç
$R_n$	Reynolds sayısı
$s$	Tam ölçek gemi indisi
$S_\phi$	Kaynak terimi
$S_w$	Islak yüzey alanı
$t$	İtme azalması katsayısı
$T$	Su çekimi
$U$	Belirsizlik değeri

$V$	Gemi hızı
$\vec{V}$	Hız vektörü
$w$	İz katsayısı
$\phi$	Hız potansiyeli
$\rho$	Su yoğunluğu
$\lambda$	Geometrik benzerlik oranı
$\mu$	Dinamik viskozite
$\nu$	Kinematik viskozite
$\delta$	Hata değeri
$\eta_0$	Açık-su pervane verimi
$\eta_h$	Tekne verimi
$\eta_R$	Bağıl dönme verimi
$\nabla$	Deplasman

## KISALTMA LİSTESİ

---

BDT	Bilgisayar destekli tasarım
CNC	Computer numerical control
DARPA	Defense Advanced Research Projects Agency
DTC	Duisburg Test Case
DTMB	David Taylor Model Basin
ESD	Energy saving device
HAD	Hesaplmalı akışkanlar dinamiği
HSVA	Hamburg Ship Model Basin
IMO	International Maritime Organization
INSEAN	Italian National Institute for Naval Architecture Studies
ITTC	International Towing Tank Conference
İÖHY	İteratif özitme hesaplama yöntemi
JBC	Japan Bulk Carrier
LDV	Laser-Doppler Velocimetry
KCS	KRISO Container Ship
MRF	Moving reference frame
ONR	Office of Naval Research
RANSE	Reynolds averaged Navier-Stokes Equations
SFC	Skin friction correction
SVA	Schiffbau-Versuchsanstalt Potsdam
SHY	Sonlu hacimler yöntemi
VOF	Volume of Fluid

## ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1 Ağ Elemanlarındaki Faz Oranlarının Temsili Gösterimi .....	13
Şekil 3.1 Elipsoitin 3 Boyutlu Görünümü .....	16
Şekil 3.2 Akış Çevresinin Genel Görünümü ve Tanımlanan Yüzeyler .....	18
Şekil 3.3 Elipsoiti Çevreleyen Ağ Yapılarının Yakından Görünüşü .....	19
Şekil 3.4 Elipsoit ve Akış Çevresi Genelindeki Ağ Elemanları.....	20
Şekil 3.5 Çift Fazlı HAD Analizleri için Akış Çevresinin Genel Görünümü ve Tanımlanan Yüzeyler .....	24
Şekil 3.6 Bir Gemi Modelinin Çift Fazlı HAD Analizi için Oluşturulmuş Ağ Elemanlarının Genel Görünümü.....	25
Şekil 3.7 Kelvin Gemi Dalgaları Bölgesindeki Ağ Elemanları için Yapılan İyileştirmeler.....	25
Şekil 3.8 Pervanesiz (sol), Pervaneli (orta) ve Sanal Disk (sağ) Kullanılmış Bir Denizaltı HAD Analizinden Kıç Bölgesi Görüntüleri [34].....	27
Şekil 3.9 Pervane Bölgesinde Oluşturulan Bir Pervane Akış Çevresinin Görünümü.....	27
Şekil 3.10 Bir Pervane Akış Çevresi İçin Oluşturulan Ağ Elemanlarının Görünümü.....	28
Şekil 3.11 Hareketli Referans Sistemi Metodunun Çalışma Prensibi [34] .....	29
Şekil 3.12 DTC Modelinin İmalat ve Havuza İndiriliş Süreçleri .....	36
Şekil 3.13 Deneysel Çalışmalarla Elde Edilen Dalga Direnç Katsayılarının Karşılaştırılması.....	38
Şekil 3.14 DTC 1:100 Modeli HAD Analizi için Oluşturulmuş Ağ Elemanları.....	42
Şekil 3.15 DTC 1:100 Modeli için $F_n=0.256$ Hızında Deneyde ve HAD Analizinde Meydana Gelen Serbest Su Yüzeyi Deformasyonları .....	43
Şekil 3.16 DTC 1:100 Modeli için HAD Yaklaşımı ile Elde Edilen Sonuçların Deney Sonuçları ile Karşılaştırılması.....	44
Şekil 4.1 İÖHY için Akış Diyagramı [34].....	49
Şekil 4.2 İÖHY Tabanlı 1. Sürüm Kodun Arayüzü.....	51
Şekil 4.3 İÖHY Tabanlı 2. Sürüm Kodun Arayüzü.....	51
Şekil 4.4 DTC Pervanesinin Açık-su Performans Eğrileri için Uydurulmuş İkinci Dereceden Denklemler .....	54
Şekil 4.5 DTC Pervanesinin Açık-su Performans Verilerinin İÖHY Koduna Girilmesi	55
Şekil 4.6 (a) DTC Gemisinin ve Pervanesinin (b) Genel Görünümü .....	59
Şekil 4.7 $F_n=0.256$ 'da Pervaneli DTC Modeli HAD Analizinden Elde Edilen Serbest Su Yüzeyi ve Pervane Arkasındaki Akış Görüntüleri .....	60

<b>Şekil 4.8</b> DTC Gemisinin Özitme Durumunda HAD ve İÖHY ile Hesaplanan Pervane İlerleme Katsayılarının Karşılaştırılması.....	63
<b>Şekil 4.9</b> DTC Gemisinin Özitme Durumunda HAD ve İÖHY ile Hesaplanan Pervane İtme ve Tork Katsayılarının Karşılaştırılması.....	64
<b>Şekil 4.10</b> DTC Gemisinin Özitme Hesaplamalarında Sayısal Yöntemlerde Kullanılan SFC Değerlerinin Karşılaştırılması .....	65
<b>Şekil 4.11</b> DTC Gemisinin Özitme Durumunda HAD Ve İÖHY ile Hesaplanmış Model Pervane Devir Sayılarının Karşılaştırılması .....	66
<b>Şekil 4.12</b> DTC Gemisinin Özitme Durumunda HAD ve İÖHY ile Hesaplanmış Açık-Su Pervane Verimlerinin Karşılaştırılması .....	66
<b>Şekil 4.13</b> (a) DARPA Suboff Denizaltısının ve INSEAN E-1619 Pervanesinin (b) Genel Görünümü .....	67
<b>Şekil 4.14</b> Pervanesiz DARPA Suboff Denizaltısının HAD ile Hesaplanan Toplam Direnç Değerlerinin Deney Sonuçları ile Karşılaştırılması. ....	68
<b>Şekil 4.15</b> $V=5.35$ Knot Servis Hızında Özitme Durumunda HAD Analizi ile Elde Edilen Pervane Arkasındaki Akış Görüntüsü. ....	69
<b>Şekil 4.16</b> DARPA Suboff Denizaltısının Özitme Durumunda HAD ve İÖHY ile Hesaplanmış Pervane İlerleme Katsayılarının Karşılaştırılması .....	72
<b>Şekil 4.17</b> DARPA Suboff Denizaltısının Özitme Durumunda HAD ve İÖHY ile Hesaplanmış Pervane İtme Katsayılarının Karşılaştırılması.....	72
<b>Şekil 4.18</b> DARPA Suboff Denizaltısının Özitme Durumunda HAD ve İÖHY ile Hesaplanmış Pervane Devir Sayılarının Karşılaştırılması.....	73
<b>Şekil 4.19</b> (a) JBC Gemisinin Genel Görünümü (b) MP687 Pervanesinin Genel Görünümü.....	74
<b>Şekil 4.20</b> $F_n=0.142$ 'de JBC Modelinin HAD Analizi ile Elde Edilen Serbest Su Yüzeyi Deformasyonu ve Pervane Arkasındaki Akış Görüntüsü.....	76
<b>Şekil 4.21</b> JBC Gemisinin Özitme Durumunda HAD Yöntemi ve İÖHY ile Hesaplanan Pervane İlerleme Katsayılarının Karşılaştırılması .....	79
<b>Şekil 4.22</b> JBC Gemisinin Özitme Durumunda HAD Yöntemi ve İÖHY ile Hesaplanan Pervane İtme ve Tork Katsayılarının Karşılaştırılması .....	80
<b>Şekil 4.23</b> JBC Modelinin Özitme Durumunda HAD Yöntemi ve İÖHY ile Hesaplanan Pervane Devir Sayılarının Karşılaştırılması .....	81
<b>Şekil 4.24</b> JBC Gemisinin Özitme Durumunda HAD Yöntemi ve İÖHY ile Hesaplanan Açık-su Pervane Verimlerinin Karşılaştırılması .....	82
<b>Şekil 4.25</b> (a) ONRT Gemisinin (a) ve Pervanesinin (b) Genel Görünümü.....	83
<b>Şekil 4.26</b> $F_n=0.20$ 'de Pervaneli ONRT Modelinin HAD Analizi ile Elde Edilen Serbest Su Yüzeyi Deformasyonu ve Pervane Arkasındaki Akış Görüntüleri.....	85
<b>Şekil 4.27</b> ONRT Gemisinin Özitme Durumunda HAD Yöntemi ve İÖHY ile Hesaplanan Pervane İlerleme Katsayılarının Karşılaştırılması.....	88

<b>Şekil 4.28</b> ONRT Gemisinin Özitme Durumunda HAD Yöntemi ve İÖHY ile Hesaplanan Pervane İtme ve Tork Katsayılarının Karşılaştırılması.....	89
<b>Şekil 4.29</b> ONRT Modelinin Özitme Durumunda HAD Yöntemi ve İÖHY ile Hesaplanan Pervane Devir Sayılarının Karşılaştırılması.....	90
<b>Şekil 4.30</b> ONRT Gemisinin Özitme Durumunda HAD Yöntemi ve İÖHY ile Hesaplanan Açık-su Pervane Verimlerinin Karşılaştırılması.....	90
<b>Şekil 4.31</b> (a) KCS Gemisinin Genel Görünümü (b) KP505 Pervanesinin Genel Görünümü.....	92
<b>Şekil 4.32</b> $F_n=0.26$ 'da Pervaneli KCS Modeli için HAD Analizi ile Elde Edilen Serbest Su Yüzeyi Deformasyonu ve Pervane Arkasındaki Akış .....	93

## TABLO LİSTESİ

<b>Tablo 3.1</b> DTC Gemisi ve Modelinin Temel Boyutları .....	35
<b>Tablo 3.2</b> DTC 1:100 Modeli Çekme Deneyi Sonuçları .....	36
<b>Tablo 3.3</b> DTC 1:100 Modelinin $F_n=0.256$ Hızında Hesaplanan Deneysel Belirsizlik Değerleri .....	41
<b>Tablo 3.4</b> Oluşturulan Ağ Elemanları ile Elde Edilen Toplam Direnç Değerleri .....	43
<b>Tablo 3.5</b> Doğrulama ve Onaylama Çalışması Parametreleri .....	44
<b>Tablo 4.1</b> IMO Tarafından Önerilen İz Katsayısı Değerleri [46].....	52
<b>Tablo 4.2</b> DTC Gemi Modelinin Temel Boyutları .....	59
<b>Tablo 4.3</b> DTC Model Pervanesinin Temel Geometrik Özellikleri .....	59
<b>Tablo 4.4</b> DTC Gemisinin Farklı Servis Hızlarında HAD ile Hesaplanmış Sevk Parametreleri.....	61
<b>Tablo 4.5</b> DTC Gemisinin İÖHY ile Hesaplanan Özitme Parametreleri.....	62
<b>Tablo 4.6</b> DARPA Suboff Denizaltısının Temel Boyutları .....	67
<b>Tablo 4.7</b> INSEAN E1619 Pervanesinin Temel Geometrik Özellikleri .....	67
<b>Tablo 4.8</b> DARPA Suboff Denizaltısının Farklı Servis Hızlarında HAD ile Hesaplanmış Özitme Parametreleri.....	69
<b>Tablo 4.9</b> Oluşturulan Ağ Elemanları ile Hesaplanan Özitme Durumundaki Pervane Devir Sayıları.....	70
<b>Tablo 4.10</b> Doğrulama ve Onaylama Çalışması Parametreleri.....	70
<b>Tablo 4.11</b> DARPA Suboff Denizaltısının Farklı Hızlarda İÖHY ile Hesaplanan Özitme Parametreleri.....	71
<b>Tablo 4.12</b> JBC Gemi Modelinin Temel Boyutları .....	74
<b>Tablo 4.13</b> JBC Model Pervanesinin (MP687) Temel Geometrik Özellikleri.....	74
<b>Tablo 4.14</b> JBC 1:40 Modeli için Pervanesiz Durumda Gerçekleştirilen HAD Analizi Sonuçlarının Deney Sonuçlarıyla Karşılaştırılması. ....	75
<b>Tablo 4.15</b> Farklı Hızlarda HAD ile Hesaplanan Özitme Parametreleri.....	77
<b>Tablo 4.16</b> Oluşturulan Ağ Elemanları ile Elde Edilen Özitme Durumundaki Pervane Devir Sayıları. ....	77
<b>Tablo 4.17</b> Doğrulama ve Onaylama Çalışması Parametreleri.....	77
<b>Tablo 4.18</b> $F_n=0.142$ Hızında İÖHY ile Hesaplanan Özitme Parametrelerinin Deney Sonuçları ile Karşılaştırılması.....	78
<b>Tablo 4.19</b> İÖHY ile JBC Gemisi için Hesaplanan Özitme Parametreleri.....	78
<b>Tablo 4.20</b> ONRT Gemi Modelinin Temel Boyutları .....	83



<b>Tablo 4.21</b> ONRT Pervanesinin Temel Geometrik Özellikleri .....	83
<b>Tablo 4.22</b> ONRT Modeli için $F_n=0.20$ Hızında Deneyle ve HAD Yöntemi ile Hesaplanan Pervane Devir Sayıları.....	84
<b>Tablo 4.23</b> ONRT Gemisinin Farklı Servis Hızlarında HAD ile Hesaplanmış Özitme Parametreleri.....	85
<b>Tablo 4.24</b> Oluşturulan Ağ Elemanları ile Elde Edilen Özitme Durumundaki Pervane Devir Sayıları. ....	86
<b>Tablo 4.25</b> Doğrulama ve Onaylama Çalışması Parametreleri.....	86
<b>Tablo 4.26</b> İÖHY ile ONRT Gemisi için Hesaplanan Özitme Parametreleri.....	87
<b>Tablo 4.27</b> KCS Gemi Modelinin Temel Boyutları .....	92
<b>Tablo 4.28</b> KP505 Pervanesinin Temel Geometrik Özellikleri.....	92
<b>Tablo 4.29</b> KCS Modeli için HAD Yöntemiyle Elde Edilen Sonucun Deney Sonucu ile Karşılaştırılması .....	93
<b>Tablo 4.30</b> KCS Gemisi için Yapılan Özitme Hesaplamalarının Literatürde Bulunan Sonuçlarla Karşılaştırılması .....	94

## **Gemi Özitme Parametrelerinin Sayısal ve Deneysel Olarak Hesaplanması**

Metin Kemal GÖKÇE

Gemi İnşaatı ve Gemi Makineleri Mühendisliği Anabilim Dalı

Doktora Tezi

Danışman: Prof. Dr. Ahmet Dursun ALKAN

Deniz taşıtlarının özitme parametrelerinin doğru bir şekilde öngörülmesi uygun ana makine ve sevk sistemlerinin tercih edilmesi aşamasında son derece önemlidir. Bu tez çalışması kapsamında deniz taşıtlarının özitme parametrelerinin öngörülebilmesi için yeni bir sayısal yaklaşım geliştirilmiştir. Geliştirilen yaklaşımla farklı türde deniz taşıtlarının özitme parametreleri hesaplanmış, sonuçlar deneysel ve diğer sayısal yaklaşımlarla elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Sonuçların uyumlu olduğu gözlenmiş ve yaklaşımın özitme parametreleri hesaplamalarında incelenen deniz taşıtları ile benzer geometrik özelliklere sahip diğer deniz taşıtları için de uygulanabilir olduğu sonucuna varılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Özitme, gemi direnci ve sevki, HAD, gemi-pervane etkileşimi

## Numerical and Experimental Estimation of Self-Propulsion Parameters of Marine Vehicles

Metin Kemal GÖKÇE

Department of Naval Architecture and Marine Engineering

Doctor of Philosophy Thesis

Advisor: Prof. Dr. Ahmet Dursun ALKAN

Predicting self-propulsion parameters of marine vehicles correctly is essential at the stage of preferring the proper marine engine and the other propulsion systems. In the present work, a new numerical approach is developed for predicting the self-propulsion parameters of marine vehicles. By the new approach, self-propulsion parameters of different marine vehicles were estimated and the results were compared with other numerical and experimental results. The results are in good accordance with the other approaches and it is concluded that the new developed numerical approach is applicable for self-propulsion estimations of marine vehicles which are geometrically similar with the marine vehicles studied in the present work.

**Keywords:** Self-propulsion, ship resistance and propulsion, CFD, ship-propeller interaction

### 1.1 Giriş

Özitime noktası (self-propulsion point) hesaplamaları, bir deniz taşıtının hedeflenen bir servis hızında ilerleyebilmesi için pervanesinin sahip olması gereken hidrodinamik performans parametrelerinin belirlenmesi olarak ifade edilebilir. Bir deniz taşıtının ana makine ve diğer sevk sistemleri tercihi yapılmadan önce özitime parametrelerinin gerçeğe yakın bir şekilde öngörülebilmesi büyük önem taşımaktadır. Aksi halde ulaşılmak istenilen servis hızı için yeterli olmayan bir ana makine tercih edilebilecek veya ihtiyaç duyulandan daha güçlü bir ana makine seçilerek verimsizliklere neden olunabilecektir. Sevk sistemlerinin gemilerin en pahalı elemanlarından biri olduğu düşünüldüğünde konunun önemi daha iyi anlaşılmaktadır.

Gemilerin özitime noktalarının öngörülebilmesi deneysel ve sayısal yaklaşımlarla yapılabilmektedir. Bilgisayar teknolojilerinin günümüzde geldiği nokta bu alanda uygulanan sayısal yaklaşımların etkinliğini artırmış olup, araştırmacıların farklı sayısal yaklaşımlarla özitime hesaplamaları yapabilmelerine imkan vermiştir. Gemi-pervane etkileşimini incelemek adına araştırmacılar her geçen gün farklı sayısal yaklaşımlar geliştirmekte ve uygulamaktadır. Bu sayısal yaklaşımların güvenilirliği için gerekli en önemli kriter elde edilen sonuçların deneysel sonuçlar ile olan uyumluluğudur.

Bu tez çalışmasında yeni bir özitime hesaplama yaklaşımı geliştirilmiş ve yöntem farklı tipteki deniz taşıtlarının özitime noktası hesaplamaları için kullanılmıştır. Hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) yaklaşımı ile özitime parametrelerinin elde edilmesindeki en önemli zorluk, akış modellemelerinin pervanesiz durumdaki akış modellemelerine göre daha karmaşık olmasıdır. Bunun yanında hesaplamalarının gerçekleştirilebilmesi için kullanıcının ticari veya ticari olmayan bir yazılıma sahip olması gerekmektedir. Tez kapsamında geliştirilen yöntemin uygulanabilirliği mevcut HAD yaklaşımlarına göre daha kolay olup, herhangi bir yazılıma gerek olmaksızın çok daha hızlı sonuçlar verebilmektedir. Geliştirilen yaklaşımla hesaplanan parametreler, deneysel ve diğer

sayısal yaklaşımlarla elde edilen değerlerle karşılaştırılmış ve bu sayede yöntemin doğruluğu incelenmiştir.

## 1.2 Literatür Özeti

Gemilerin özitme ve sevk parametrelerinin öngörülmesi gemi hidrodinamiği alanında çalışan araştırmacılar için de her dönem revaçta olan bir konu olmuştur. Bu öngörülerin yapılabilmesi için kullanılan en güvenilir yaklaşım model deneyleridir. Deneysel yöntemlerin yüksek bütçeli ve gerçekleştirilmelerinin zor olması araştırmacıları sayısal yaklaşımlara yönlendirmiştir. Söz konusu öngörüler için sayısal yaklaşımların uygulanması geçtiğimiz yüzyılda başlamış olup günümüzde yaygın bir şekilde devam etmektedir. Potansiyel akış tabanlı sayısal yaklaşımların ardından viskozitenin de hesaplamalara dahil edildiği sonlu hacimler tabanlı yaklaşımlardaki hızlı gelişmeler özitme noktası hesaplamalarını da etkilemiştir. Stern vd. geliştirdikleri viskoz akış tabanlı kodlarıyla gemi-pervane etkileşimi üzerine çalışmışlar ve başarılı sonuçlar elde etmişlerdir [1]. Dönemine göre oldukça önemli bu çalışmanın ardından viskozitenin de hesaplamalara dahil edildiği HAD yaklaşımları ile gemi-pervane etkileşimi analizlerinin kullanım oranı artmıştır. Bugalski ve Hoffman uyguladıkları HAD yaklaşımıyla model deneyleri ile oldukça uyumlu sonuçlar elde etmişlerdir [2].

HAD yaklaşımları da deneylere benzer olarak genellikle model ölçekleri için uygulanmaktadır. Bunun nedeni gemi yüzeyi etrafındaki akışı modellerken çok yüksek Reynolds sayılarına ulaşmadan, daha büyük boyutta ve dolayısıyla daha az sayıda ağ elemanları kullanarak çözüme ulaşmak ve gerekli işlemci gücünü en az seviyede tutmaktır. Ancak Castro vd. bu alışkanlığın aksine KRISO konteyner gemisinin (KCS) özitme noktası hesaplamaları için HAD yaklaşımını tam ölçekteki gemi için uygulamışlardır [3]. Ponkratov ve Zegos ise tam ölçekteki gemi için farklı bir çalışma gerçekleştirmişler ve HAD yaklaşımı ile elde ettikleri sonuçları gerçek deniz koşullarındaki geminin özitme parametreleriyle karşılaştırmışlardır [4]. Özitme hesaplamalarının gerçekleştirilmesi için pervane bölgesinin modellenmesinde aktüator disk teorisi kullanımı da alternatif bir yöntemdir. Bu yöntemle pervane bölgesinin fiziksel olarak modellenmesi gerekmekte ve bu bölge yalnızca pervanenin hidrodinamik karakteristiklerini taşıyan sanal bir disk ile temsil edilebilmektedir. Bu sayede HAD analizlerinin modellenme süreçleri daha kolay olmakta ve pervane bölgesi

için gerekli olan küçük boyuttaki ağ elemanları oluşturulmaksızın toplamda daha az sayıda ağ elemanı ile analizler gerçekleştirilebilmektedir. Gao vd. çalışmalarında aktüvator disk teorisi kullanarak elde ettiği sonuçları, pervanenin direkt olarak modellendiği sayısal yaklaşımla elde edilen sonuçlarla ve deney sonuçları ile karşılaştırmışlardır [5].

Viskoz ve viskoz olmayan akış kabullerinin birlikte yapıldığı ve bu sayede hesaplama yükünü azaltan hibrit yaklaşımlar da literatürde yer almaktadır. HAD yaklaşımının viskoz akış kabulü yapan kısmı gemi yüzeyi etrafındaki akışı çözümlerken, yaklaşımın viskoz olmayan akış kabulü yapan kısmı ise pervane bölgesindeki akış için çözümlere gerçekleştirmektedir. Sözü geçen hibrit yaklaşıma örnek olarak, Gaggero vd. tarafından hibrit yaklaşımla gerçekleştirilen hesaplamalar gösterilebilir [6]. Benzer olarak Starke ve Bosschers de hibrit bir HAD yaklaşımı uygulayarak ölçek etkisinin gemi direnç ve sevk parametreleri üzerine etkisini incelemişlerdir [7]. Söz konusu hibrit yaklaşımlı çalışmalara bir diğer örnek olarak Greve vd. tarafından gerçekleştirilen çalışmalar gösterilebilir [8]. Hibrit yaklaşımlar yalnızca viskoz ve potansiyel akış tabanlı olmayıp, farklı viskozite tabanlı yöntemlerinin beraber kullanılması şeklinde de olabilmektedir. Queutey vd. tarafından yapılan çalışma buna bir örnek olarak gösterilebilir [9].

Özitime noktası hesaplamaları denizaltılar için de önemli bir konudur. Bu alanda yapılan çalışmalara örnek olarak Chase ve Carrica tarafından DARPA denizaltısı için E1619 pervanesi ile beraber gerçekleştirilen özitime hesaplamaları gösterilebilir [10]. Aynı denizaltı ve pervanesi için Sezen vd. de sonlu hacimler tabanlı HAD yaklaşımı ile özitime hesaplamaları gerçekleştirmişlerdir [11].

Pervane bölgesinin modellenmesi için örtüşen ağlar (overset mesh) metodu da araştırmacılar tarafından tercih edilen yöntemlerden birisidir. Chao vd. uyguladıkları HAD yaklaşımında pervane önünde buzlu bir akış bölgesi oluşturularak pervane ve buz arasındaki boşluğun pervanenin hidrodinamik karakteristiklerine olan etkilerini incelemişlerdir [12]. Wang vd. pervane çalıklık açısındaki değişimin pervane hidrodinamik performansına ve pervane arkasındaki ize olan etkilerini incelemişlerdir. DTMB pervane modellerinin açık-su analizleri için tamamen kayan ağ elemanları tekniğiyle çalışan viskoz akış tabanlı bir yaklaşım kullanmışlar ve deneyle uyumlu sonuçlar elde etmişlerdir. Çalıklıktaki artışın DTMB 4381,4382,4383 ve 4384'ün hidrodinamik performansını artırdığını belirtmişlerdir [13]. Benzer şekilde Go vd. nozul

kullanımının KP505 pervanesine olan etkilerini sayısal olarak analiz etmişlerdir. Doğrulama çalışmasının ardından farklı nozul çapları ve hücum açıları için sayısal analizler yapılmıştır. Nozulun pervane üzerine olan hidrodinamik etkilerini gösteren detaylı analiz sonrası görsellerini çalışmalarında sunmuşlardır [14].

Pervanenin hidrodinamik özelliklerini iyileştirmek için yapılan birçok sayısal çalışma bulunmaktadır. Tokyo'da 2015 yılında gemi hidrodinamiği alanında düzenlenen çalıştayda ele alınan konulardan birisi de pervane önüne takılan enerji tasarruf aparatlarının (ESD, Energy-Saving Device), pervanenin hidrodinamik özelliklerine olan etkileri olmuştur. Bu çalıştay kapsamında yapılan çalışmalardan birisi olan ve Yin vd. tarafından yapılan çalışmada araştırmacılar, OpenFOAM tabanlı olan ve kendi geliştirdikleri kurum içi kodlarıyla JBC gemisi ve pervanesini birlikte modelleyerek, özetme noktası analizi gerçekleştirmişlerdir. Özetme noktası hesabı ESD olan ve olmayan durumlar için ayrı ayrı yapılmış, JBC gemisi için ESD'nin yaklaşık %6.7 tasarruf sağladığı sonucuna ulaşmışlardır [15]. Aynı şartlar için yaptıkları simülasyonlarda Schuiling vd. bu oranı farklı bir kodla %3.2 olarak hesaplamışlardır [16]. Benzer olarak Korkmaz yüksek lisans tezinde aynı gemiyi ESD olan ve olmayan durumlar için daha geniş bir şekilde ele almış, sonlu hacimler tabanlı yazılımın yanında potansiyel tabanlı HAD yöntemlerini de kullanmıştır [17].

Ülkemizdeki araştırmacıların gemi-pervane etkileşimi ve gemilerin iz katsayılarıyla ilgili yapılmış çalışmalar da mevcuttur. Aydın ve Şalcı balıkçı gemilerinin iz katsayılarını farklı hızlar için Pitot tarağı yöntemini kullanarak deneysel olarak hesaplamışlar ve elde ettikleri bulguları çalışmalarında sunmuşlardır [18]. Kınacı ve Gökçe tarafından yapılan çalışmada DTC gemi modelinin etrafındaki akış analizi pervanesiyle beraber gerçekleştirilmiş, pervanenin varlığının serbest su yüzeyinde oluşan dalga yüksekliklerini artırdığı ve bunun yanında serbest su yüzeyinin varlığının pervanenin verimini artırdığı sonucuna ulaşılmıştır [19]. Duman vd. çift pervaneli yüksek hızlı bir savaş gemisinin etrafındaki akışı pervaneleri ve dümenleriyle beraber analiz etmişler ve özetme noktası hesabı yapmışlardır [20]. Kınacı doktora tezinde gemi gövde formu, dümen ve pervanenin sevk sistemi açısından etkileşimini detaylı olarak incelemiştir [21].

Önceki kısımda da ifade edildiği gibi özetme parametrelerinin öngörüsü için en güvenilir yöntem deneysel yaklaşımlardır. Her ne kadar günümüzde sayısal yaklaşımlar

hatırı sayılır bir seviyeye gelmiş olsalar dahi, gemilerin direnci ve sevki alanında uygulanan deneysel yaklaşımlarla elde edilen sonuçlar halen en güvenilir konumdadır. Bu tez çalışmasında uygulanan sayısal yaklaşımların doğrulanması ve onaylanması için kullanılan deneysel sonuçların yer aldığı çalışmalar bunlara örnek olarak gösterilebilir. El Moctar vd. tarafından literatüre kazandırılan ve Duisburg Test Case (DTC) gemi modelinin direnç ve sevk deney sonuçlarının yer aldığı çalışma, bu alanda çalışan birçok araştırmacı tarafından referans alınmış bir çalışmadır [22]. DARPA Suboff denizaltısı için gerçekleştirilen direnç ve sevk deneylerinin literatürde bulunan sonuç raporu ise denizaltı hidrodinamiği konusunda çalışan araştırmacılara zengin bir veri kaynağı sunmaktadır [23]. 2015 yılında Tokyo’da gerçekleştirilen gemi hidrodinamiği çalışmayı için farklı gemiler için gerçekleştirilen deneylerin sonuçları ise yine bu tez kapsamında referans olarak alınmıştır [24]. Pecoraro vd. tarafından gerçekleştirilen ve pervanenin kış bölgesindeki akışa olan etkisini Laser-Doppler Velocimetry (LDV) tekniği kullanarak deneysel olarak incelemişlerdir [25].

### **1.3 Tezin Amacı**

Deniz taşıtlarının özetme parametrelerinin öngörülmesi önceki bölümde ifade edildiği gibi zorlu ve zahmetli süreçlerdir. En güvenilir sonuçların alındığı deneysel yaklaşımların uygulanabilmesi için deney laboratuvarları veya uygun deney ekipmanları kullanılmakta ve bu durum yüksek bütçeler gerektirmektedir. Benzer şekilde sonlu hacimler tabanlı sayısal yaklaşımlarla sonuç alınabilmesi için gemi-pervane etkileşiminin en iyi şekilde modellenerek hesaplamaların yapılması şarttır. Bu uygulamalar için yüksek bilgisayar kapasiteleri, ticari veya ticari olmayan HAD yazılımları ve sayısal yaklaşımı uygulayacak donanıma sahip kullanıcılar gerekmektedir.

Yukarıda ifade edilen yaklaşımlarla özetme parametrelerinin belirlenmesi her ne kadar çok önemli olsa da, literatürde özellikle ön dizayn aşamasında kullanımı kolay ve hızlı bir şekilde sonuç veren bir sayısal yaklaşım bulunmamaktadır. Gemi mühendisliği disiplininden gelen bir kullanıcı tarafından belirli hidrostatik ve hidrodinamik parametreleri bilenen bir deniz taşıtı için kolaylıkla kullanılacak bir özetme parametreleri belirleme yaklaşımı, özellikle ön dizayn aşamasında oldukça faydalı olacaktır.



Bu bağlamda tez çalışması kapsamında deniz taşıtlarının özetme parametrelerinin belirlenmesi için yeni bir sayısal yaklaşım geliştirilmesi hedeflenmiştir. Geliştirilen yeni yöntemin yetkinliği şu şekilde incelenmiştir:

- Tez kapsamında uygulanacak HAD yaklaşımının doğrulanması ve onaylanabilmesi için daha önce literatürde farklı bir ölçekte deneyleri yapılan 1:100 model ölçeğindeki DTC gemi modelinin, Ata Nutku Gemi Model Deney Laboratuvarı'nda pervanesiz durumda çekme deneyleri gerçekleştirilmiştir.
- Modelin deneyle aynı hızlarda HAD yaklaşımı ile direnç analizleri gerçekleştirilmiş ve uygulanan HAD yaklaşımı için bir doğrulama ve onaylama çalışması yapılmıştır.
- Tez kapsamında geliştirilen yöntemin uygulanabilmesi için literatürde özetme deney sonuçları bulunan 5 farklı deniz taşıtı belirlenmiştir. Özetme deney sonuçları genellikle tek servis hızı için olduğundan, doğrulama ve onaylama çalışması yapılmış HAD yaklaşımı ile deneylerdeki servis hızına ek olarak farklı servis hızları için de özetme parametreleri belirlenmiştir.
- Son olarak belirlenen 5 farklı deniz taşıtı için tez kapsamında geliştirilen yöntemle elde edilen özetme parametreleri, deney sonuçları ve HAD yaklaşımı ile elde edilen parametrelerle karşılaştırılarak yöntemin yetkinliği incelenmiştir.

Tez kapsamında geliştirilen yöntemin yetkinliğinin yukarıda ifade edildiği gibi incelenmesi ile olumlu çıktılar elde edilmiş, yöntemin pratik olarak uygulanabilmesi için bir kod geliştirilmiş ve bir arayüz oluşturularak kodun tüm kullanıcılar için kolaylıkla kullanılabilmesi hedeflenmiştir. Geliştirilen özetme öngörü yaklaşımı ile çalışan kodun kullanılabilmesi için yüksek bilgisayar kapasiteleri gerekmemekte, ön dizayn aşamalarında farklı gemi ve pervane tercihleri için hızlı bir şekilde sonuç alınabilmektedir. Yöntem bu yönü ile oldukça kullanışlı olup, içerisinde bulundurduğu ampirik yaklaşımlar için gelecekte yapılacak iyileştirmelerin de yöntemde dahil edilmesiyle geliştirmeye açık bir özellik kazanmaktadır.

## **1.4 Hipotez**

Gemilerin özetme parametrelerinin öngörülere deneysel ve sayısal yaklaşımlarla gerçekleştirilmektedir. Bu yaklaşımların içerisinde deneysel yaklaşımlar en güvenilir sonuçları sunmaktadır. Hesaplamalı akışkanlar dinamiği yaklaşımı, özellikle bilgisayar

ve işlemci teknolojilerinde son yıllarda meydana gelen gelişmeler sayesinde deney sonuçlarıyla uyumlu sonuçlar vermektedir. Sözü geçen her iki yaklaşım da uygulamaları açısından kendi içerisinde zorluklar barındırmaktadır. Bu iki klasik yöntemin dışında özitleme parametrelerinin bazı basit mühendislik yaklaşımlarıyla da hesaplanabileceği düşünülmektedir. Geleneksel deney yaklaşımı, gemi direncini hesaplarken gemiyi pervane ve dümen gibi takıntıları olmadan ele alır. Pervane ise açık suda ele alınır; geminin kendisi pervanenin önünde bulunmaz. Ancak gemi ve pervane birlikte çalıştıklarında; gemi pervaneden, pervane ise gemiden etkilenmektedir. Bilindiği üzere pervanenin gemi üzerindeki etkisi itme azalması katsayısıyla, geminin pervane üzerindeki etkisi ise iz katsayısıyla ifade edilir. Bu tez kapsamında geminin özitleme parametrelerinin;

- gemi direnci,
- açık su pervane performansı,
- itme azalması katsayısı ve
- iz katsayısı

kullanılarak hesaplanabileceği gösterilmektedir.

## 2.1 Genel Denklemler

Tez kapsamında gemilerin direnç ve sevki için HAD yaklaşımı ile gerçekleştirilen hesaplamalar, sonlu hacimler yöntemi (SHY) kullanılarak yapılmıştır. Bu bölümde tez çalışmasında uygulanan HAD yönteminin matematiksel altyapısına değinilmiştir.

SHY tabanlı HAD yazılımları çözüm yaparken genel anlamda transport denklemini kullanırlar. Tez çalışması kapsamında kullanılan HAD yazılımının çözüm yaptığı denklemler ise transport denkleminin akış çözümleri için özel bir halidir [21]. Bu bağlamda transport denkleminin genel akış çözümlerinde nasıl kullanıldığı ifade edilmiştir.

Transport denklemi en genel halde şu şekilde ifade edilebilir:

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho\phi\vec{V}) = \nabla \cdot (\Gamma\nabla\phi) + S_\phi \quad (2.1)$$

(2.1) numaralı denklemde  $\phi$  akışkanla ilgili bir özelliği,  $S_\phi$  ise kaynak terimini simgelemektedir. Akışkanlar dinamiği problemlerinin çözümlenmesinde üç farklı korunum kanunu kullanılmaktadır. Bunlar kütleinin korunumu, momentumun korunumu ve enerjinin korunumu kanunları olup, akışkan içerisinde ‘kontrol hacmi’ adı verilen herhangi bir bölgeye uygulanabilirler.

Transport denkleminin sözü geçen korunum kanunları için kullanımları ise şu şekildedir:

### Kütleinin Korunumu

Transport denkleminde  $\phi$  değeri “1” olarak alındığında kütleinin korunumu denklemi elde edilir:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{V}) = 0 \quad (2.2)$$

Bu tez kapsamında gerçekleştirilen bütün HAD analizlerinde akışkan sıkıştırılmaz kabul edilmiştir. Dolayısıyla (2.2) numaralı denklem sıkıştırılmaz akışkan kabulü ile yeniden düzenlenirse:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho \nabla \cdot \vec{V} = 0 \quad (2.3)$$

halini alır. Benzer şekilde tez kapsamında gerçekleştirilen bütün HAD analizleri zamandan bağımsız şekilde gerçekleştirilmiştir. Bu durumda kütle korunumu denklemi zamandan bağımsız durum için:

$$\nabla \cdot (\rho \vec{V}) = 0 \quad (2.4)$$

şeklinde olur. Dolayısıyla sıkıştırılmaz ve zamandan bağımsız durum için kütle korunumu denklemi şu şekildedir:

$$\nabla \cdot \vec{V} = 0 \quad (2.5)$$

### Momentumun Korunumu

Transport denkleminde akışkanla ilgili özellik ( $\phi$ ) olarak x eksenindeki akışkan hızı ( $u$ ) ifadesi seçilirse bu yöndeki hareket denklemi elde edilmiş olur:

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u \vec{U}) = \nabla \cdot (\mu \nabla u) - \frac{\partial p}{\partial x} + \rho g_x \quad (2.6)$$

Benzer şekilde  $\phi$  yerine, y yönündeki akışkan hızı ( $v$ ) ve z yönündeki akışkan hızı ( $w$ ) seçilirse, bu yönlerdeki hareket denklemleri elde edilmiş olur:

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v \vec{U}) = \nabla \cdot (\mu \nabla v) - \frac{\partial p}{\partial y} + \rho g_y \quad (2.7)$$

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho w \vec{U}) = \nabla \cdot (\mu \nabla w) - \frac{\partial p}{\partial z} + \rho g_z \quad (2.8)$$

(2.6), (2.7) ve (2.8) numaralı denklemler momentumun korunumu denklemleri olup, Navier-Stokes denklem seti olarak bilinmektedir. Momentumun korunumu denklemleri zamandan bağımsız ve viskoz akış için x, y ve z yönleri için yeniden yazıldığında:

$$\nabla \cdot (\rho u \vec{U}) = \nabla \cdot (\mu \nabla u) - \frac{\partial p}{\partial x} + \rho g_x \quad (2.9)$$

$$\nabla \cdot (\rho v \vec{U}) = \nabla \cdot (\mu \nabla v) - \frac{\partial p}{\partial y} + \rho g_y \quad (2.10)$$

$$\nabla \cdot (\rho w \vec{U}) = \nabla \cdot (\mu \nabla w) - \frac{\partial p}{\partial z} + \rho g_z \quad (2.11)$$

halini alacaktır. Transport denkleminde  $\phi$  değeri yerine sıcaklık terimi yazıldığında ise enerjinin korunumu denklemi elde edilebilir. Bu tez çalışması kapsamındaki HAD analizlerinde bütün akışlar sıkıştırılamaz kabul edilmiş, basınçla sıcaklığın değişmediği kabul edildiğinden enerjinin korunumu ihmal edilmiştir [21].

## 2.2 Yönetici Denklemler

Akış çözümlemesi için bir önceki bölümde ifade edilen ve transport denkleminden türetilen denklemlerin analitik olarak çözülmesi mümkün olmamaktadır. Bu sebeple bu diferansiyel denklemler çeşitli yöntemlerle sayısal olarak çözülebilmektedir. Bu tez çalışması kapsamında kullanılan HAD yaklaşımında söz konusu denklemler ticari bir yazılımla sonlu hacimler yöntemi kullanılarak çözdürülmüştür. Ancak söz konusu bu denklemlerin sonlu hacimler yöntemi kullanılarak çözülebilmesi, bu denklemlerin özel bir denklem haline getirilmesiyle yapılabilir [26]. Bu denklemler RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes, Reynolds Ortalamalı Navier-Stokes) denklemleri olarak anılmaktadır.

### 2.2.1 RANS Denklemleri

Bir önceki bölümde (2.6), (2.7) ve (2.8) numaralı denklemlerle ifade edilen momentum denklemleri tansörel notasyon kullanılarak şu şekilde yazılabilir:

$$\rho \frac{Du_i}{Dt} = F_i - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \mu \nabla^2 u_i \quad (2.12)$$

Gemi ve pervane etrafındaki akış son derece türbülanslı olduğundan, bu tarz akışların karakteristiklerinin net olarak belirlenebilmesi için (2.12) numaralı denklem özel bir hale getirilmektedir [21]. Türbülanslı akışta gerçekleşen parametrelerin zaman içerisindeki ortalamalarının alınmasıyla (2.12) numaralı denklem Reynolds Ortalamalı Navier-Stokes (RANS) denklemi haline gelir:

$$\rho \frac{D\bar{u}_i}{Dt} = F_i - \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \mu \nabla^2 \bar{u}_i - \rho \left( \frac{\partial \overline{u'_i u'_j}}{\partial x_i} \right) \quad (2.13)$$

RANS denklemlerinde yer alan  $\bar{u}_i, \bar{p}$  ve  $u_i u_j$  değerleri, akışla ilgili parametrelerin zaman içerisindeki ortalamasıdır.

### 2.2.2 Reynolds Gerilme Denklemi

Reynolds gerilme denklemi en genel haliyle şu şekilde ifade edilebilir:

$$\frac{\partial \tau_{ij}}{\partial t} + U_k \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_k} = -\tau_{ik} \frac{\partial U_j}{\partial x_k} - \tau_{jk} \frac{\partial U_i}{\partial x_k} + \varepsilon_{ij} - \Pi_{ij} + \frac{\partial}{\partial x_k} \left[ v \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_k} + C_{ijk} \right] \quad (2.14)$$

$\Pi_{ij}$  basınç gerilme korelasyonu:

$$\Pi_{ij} = \overline{p' \left( \frac{\partial u'_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u'_j}{\partial x_i} \right)} \quad (2.15)$$

$\varepsilon_{ij}$  yayılma tansörü:

$$\varepsilon_{ij} = 2\mu \overline{\frac{\partial u'_i}{\partial x_k} \frac{\partial u'_j}{\partial x_k}} \quad (2.16)$$

$C_{ijk}$  türbülans taşınım tansörü:

$$C_{ijk} = \overline{\rho u'_i u'_j u'_k} + \overline{p' u'_i} \delta_{jk} + \overline{p' u'_j} \delta_{ik} \quad (2.17)$$

şeklinde ifade edilmektedir [27].

### 2.2.3 Türbülans Modelleri

#### Standart k-ε Türbülans Modeli

Türbülanslı akışlar için HAD analizlerinde, özellikle gemi mühendisliği problemlerinde en sık kullanılan türbülans modeli k-ε türbülans modelidir. Bu tez çalışması kapsamında da bir gemi hariç tüm deniz taşıtlarının HAD analizinde bu türbülans modeli kullanılmıştır.

Standart k-ε türbülans modeli Launder ve Spalding tarafından geliştirilmiş olup biri k ve diğeri ε olmak üzere iki model denkleminde oluşmaktadır [28]. k ve ε sırasıyla büyük

ölçekteki bir türbülanslı durumda hız ve uzunluk skalalarını ifade etmekte olup şu şekilde kullanılmaktadırlar:

$$v = k^{1/2} \quad (2.18)$$

$$l = \frac{k^{3/2}}{\varepsilon} \quad (2.19)$$

Eddy viskozitesi ise şu şekilde belirlenir:

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (2.20)$$

burada  $C_\mu$  boyutsuz bir sabittir.

Standart k- $\varepsilon$  türbülans modeli k ve  $\varepsilon$  için aşağıda verilen transport denklemlerini kullanır:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho k \vec{U}) = \nabla \cdot \left( \frac{\mu_t}{\sigma_k} \nabla k \right) + 2\mu_t S_{ij} + \rho \varepsilon \quad (2.21)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \varepsilon \vec{U}) = \nabla \cdot \left( \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \nabla \varepsilon \right) + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} 2\mu_t S_{ij} \cdot S_{ij} - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (2.22)$$

Standart k- $\varepsilon$  türbülans modelinin kullandığı yukarıdaki denklemler beş adet değiştirilebilir sabit içerirler ve bu sabitler geniş bir türbülanslı akış yelpazesi için şu değerleri alır [29]:

$$C_\mu = 0.09, \sigma_k = 1.00, \sigma_\varepsilon = 1.30, C_{1\varepsilon} = 1.44, C_{2\varepsilon} = 1.92 \quad (2.23)$$

#### Menter SST k- $\omega$ Türbülans Modeli

Tez çalışması kapsamında kullanılan bir diğer türbülans modeli olan Menter SST k- $\omega$  türbülans modeli, Menter tarafından geliştirilmiş ve literatüre sunulmuştur [30]. k- $\varepsilon$  türbülans modeli serbest akıştaki parametrelerden daha az etkilense de yüzey yakınındaki akış çözümlerinde performansı orijinal k- $\omega$  kadar iyi değildir. Ancak orijinal k- $\omega$  türbülans modelinin ise serbest akıştaki parametrelere karşı çok daha hassas olması bir dezavantaj olmaktadır. Bu yüzden Menter, hibrit bir türbülans modeli geliştirmiş ve k- $\varepsilon$  modelini k- $\omega$  modeli içerisinde kullanmıştır. Reynolds gerilme hesaplamaları ve k denklemleri Wilcox'un orijinal k- $\omega$  modelindeki gibi olup,  $\varepsilon$

denkleminin içerisinde  $\varepsilon=k\omega$  olarak kullanılmıştır [29],[30]. Bu durumda k- $\omega$  türbülans modeli:

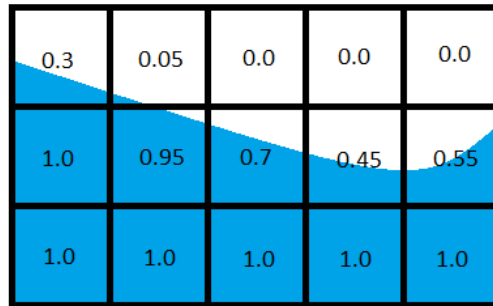
$$\frac{\partial(\rho\omega)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho\omega\vec{U}) = \nabla \cdot \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_{\omega,1}} \right) \nabla \omega \right] + \gamma_2 \left( 2\rho S_{ij} \cdot S_{ij} - \frac{2}{3} \rho \omega \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \delta_{ij} \right) - \beta_2 \rho \omega^2 + 2 \frac{\rho}{\sigma_{\omega,2}} \frac{\partial k}{\partial x_k} \frac{\partial \omega}{\partial x_k} \quad (2.24)$$

halini alır. Menter vd. bir dizi modifikasyon yaparak SST k- $\omega$  türbülans modelinin performansını optimize etmişlerdir [29],[31]. Bu optimizasyonlar sonrasında tavsiye edilen model sabitleri ise şu şekildedir:

$$\sigma_k = 1.00, \sigma_{\omega,1} = 2.00, \sigma_{\omega,2} = 2.00, \gamma_2 = 0.44, \beta_2 = 0.083, \beta^* = 1.92 \quad (2.25)$$

#### 2.2.4 Akışkan Hacmi Yöntemi (VOF)

Literatürde çok fazlı akış uygulamalarında sıklıkla kullanılan yöntem akışkan hacmi (Volume of Fluid, VOF) metodudur. VOF metodu ilk defa Hirt ve Nichols tarafından geliştirilmiş Euler akış tanımlaması yaklaşımı ile çalışan bir yöntem olup, teorik altyapısı ve detayları sözü geçen bilim insanları tarafından yayınlanan makalede geniş bir şekilde ifade edilmiştir [32]. Bu tez çalışmasında yer alan bütün çift fazlı HAD uygulamalarında çok fazlı akışlar VOF yöntemi kullanılarak modellenmiştir. VOF metodu birbirine karışmayan akışkanlardan oluşan çok fazlı akış problemlerinde kullanılan etkili bir yöntemdir. Esasında VOF metodu kullanılarak birbirine karışmayan akışkanların arasında oluşacak olan serbest yüzeyi (sıvı-sıvı arayüzeyi) modellenir. Analizdeki çoklu fazlar içerisinde seçilen bir fazın bir ağ elemanındaki oranı (C),  $0 \leq C \leq 1$  arasında değişecektir. Yani ağ elemanının içerisinde söz konusu faz hiç bulunmuyorsa  $C=0$  ya da tamamen o fazdan oluşuyorsa  $C=1$  olacaktır (bkz. Şekil 2.1).



Şekil 2.1 Ağ Elemanlarındaki Faz Oranlarının Temsili Gösterimi

Çok fazlı akışın su ve havadan oluştuğu düşünülürse söz konusu ağ elemanda bulunan akışkan yoğunluğu:



$$\rho = C\rho_s + (1 - C)\rho_h \quad (2.26)$$

olacaktır. Burada  $\rho_s$  su yoğunluğunu,  $\rho_h$  ise hava yoğunluğunu ifade etmektedir. Benzer şekilde ağ elemanının dinamik viskozite değeri:

$$\mu = C\mu_s + (1 - C)\mu_h \quad (2.27)$$

Şeklinde hesaplanır. (2.27) numaralı bağıntıda yer alan  $\mu_s$  su fazının dinamik viskozitesi,  $\mu_h$  ise hava fazının dinamik viskozitesini ifade etmektedir. Bu durumda C için transport denklemi şu şekilde ifade edilebilir:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \cdot \nabla C + \nabla \cdot \{C(1 - C)u_r\} = 0 \quad (2.28)$$

Burada u akış hızını  $u_r$  ise serbest su yüzeyini baskılayan yapay hız alanını ifade etmektedir.

Fazlar arasında meydana gelecek arayüzün belirlenmesi yani serbest su yüzeyinin HAD yöntemi ile oluşturulması fazlar için süreklilik denklemi çözdürülür:

$$\frac{1}{\rho_s} \left[ \frac{\partial}{\partial t} (c\rho_s) + \nabla \cdot (c\rho_s \vec{U}) \right] = S_C + \sum_{H=1}^n (\dot{m}_{hs} - \dot{m}_{sh}) \quad (2.29)$$

Bu ifadede  $\dot{m}_{hs}$  ve  $\dot{m}_{sh}$  su fazından hava fazına ve tersi yönde gerçekleşen faz geçişini temsil etmekte olup  $S_C$  ifadesi ise kaynak terimidir.

## HAD Yaklaşımı ve Model Deneyleri

---

### 3.1 HAD Yaklaşımı

Günümüzde gemilerin direnç ve sevk parametrelerinin belirlenmesinde model deneylerinden sonra en güvenilir yaklaşımlar HAD yöntemleridir. RANS denklemleri ile viskoz etkilerin de hesaplamalara dahil edildiği sonlu hacimler tabanlı yazılımların giderek yaygınlaşmasıyla, HAD uygulamaları gemi hidrodinamiği alanında her geçen gün daha fazla kullanılmaktadır. Geçtiğimiz yüzyılda önemli bir yer tutan potansiyel akış tabanlı HAD yöntemleri günümüzde tamamen terk edilmemiş olup pratik ve güvenilir sonuçlar verdiği alanlarda halen kullanılmaktadır. Özellikle son yıllarda işlemci teknolojilerindeki hızlı gelişim HAD yöntemlerini de etkilemiş ve böylelikle HAD analizlerinin çözüm sürelerinin kısalmasının yanında kullanıcıların daha yüksek ağ elemanına sahip analizleri gerçekleştirebilme imkanı doğmuştur.

Tez kapsamında gemilerin direnç ve sevk parametrelerinin belirlenmesi için gerçekleştirilen HAD analizleri kendi içerisinde şu şekilde sınıflandırılabilir:

- Tek fazlı HAD analizleri
- Çift Fazlı HAD analizleri
- Pervaneli HAD analizleri

Gemi hidrodinamiği alanında uygulanan tek fazlı HAD analizleri; dalga direnci parametresinin etkin olmadığı, serbest su yüzeyinde dalga oluşturmayacak derinlikte yer alan cisimlerin etrafındaki akışın hidrodinamik karakteristiklerini belirlemek için kullanılırlar. Yeterli derinlikteki (serbest su yüzeyinde dalga oluşturmayacak) denizaltı ve açık-su pervane analizleri gemi hidrodinamiği alanında en sık uygulanan tek fazlı HAD analizleridir.

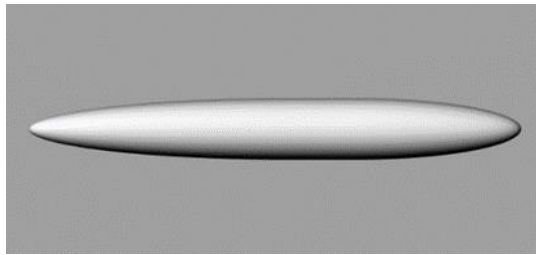
Bir cisim suya batmış halde serbest su yüzeyine yakın veya serbest su yüzeyini yararak yüzüyorsa, belirli bir hız değerine ulaştıktan sonra dalga oluşturacaktır. Bu durumda serbest su yüzeyinin varlığı cisim etrafındaki akış karakteristiğini değiştireceğinden, tek fazlı analizler tam olarak doğru sonuç vermeyecek ve bu durumda serbest su yüzeyinin hesaba katıldığı iki fazlı analizlerin uygulanması zorunlu olacaktır.

Pervaneli analizler ise isminden de anlaşılacağı gibi deniz taşıtının pervaneli durumdaki HAD analizleridir. Tek veya çift fazlı HAD analizlerine ilgili bölümde ifade edilecek yöntemlerle pervane bölgesi dahil edilebilir ve gemi-pervane etkileşimi hesaplamalara dahil edilerek sevk ile ilgili gerçekçi sonuçlar elde edilebilmektedir.

### 3.1.1 Tek Fazlı HAD Analizleri

Elipsoit geometrik olarak denizaltı gövdesine yakın ve basit bir yapıya sahiptir. Dolayısıyla tek fazlı HAD analizleri uygulamalarına elipsoit örneği ile başlamak bu analizlerin uygulanmasının daha kolay bir şekilde anlaşılabilmesi için iyi bir yöntem olacaktır. Takıntıları olmayan bir elipsoit etrafında ağ elemanları oluşturmak, karmaşık geometrilere sahip takıntılı gemi ve denizaltı geometrilerine göre nispeten kolaydır. Bilindiği üzere gemi hidrodinamiği alanındaki HAD problemlerinin en büyük zorluk kaynaklarından birisi akış karakteristiği incelenen geometrilerin karmaşık olmasıdır.

Tek fazlı HAD analizlerinde serbest su yüzeyi modellenmediğinden, ağ yapısı oluşturulması çift fazlı HAD analizlerine göre daha kolay olmakta ve daha düşük ağ elemanı sayısı nedeni ile çözüm süreleri kısa olmaktadır.



**Şekil 3.1** Elipsoitin 3 Boyutlu Görünümü

Şekil 3.1'deki gibi bir geometriye sahip ve serbest su yüzeyinden etkilenmeyecek derinlikte ilerleyen bir elipsoit etrafındaki akış, tek fazlı bir HAD analizi ile modellenebilir. Potansiyel tabanlı HAD yöntemlerinin ardından RANSE tabanlı, viskoz etkileri de hesaba katan HAD yöntemlerinin giderek gelişim göstermesiyle viskozitenin

etkilerini de görebilmek mümkün olmuştur. Bu sayede günümüzde gemi hidrodinamiği alanında kullanılan sonlu hacimler tabanlı HAD yaklaşımlarının çoğunda akışkanın viskoz etkileri de hesaplamalara dahil edilmektedir. Geline noktada gemilerin direnç ve sevk problemlerinde viskoz etkilerin göz ardı edilmesi mümkün olmamaktadır. Viskozitenin varlığının kaçınılmaz sonucu olan türbülansın HAD analizlerinde uygun bir şekilde modellenmesi gerekmektedir. Bunun yanında oluşacak olan sınır tabakaların belirli bir mertebede öngörülerek ağ yapılarının bu hassasiyet ile oluşturulması HAD analizlerinin güvenilirliğini artırmaktadır.

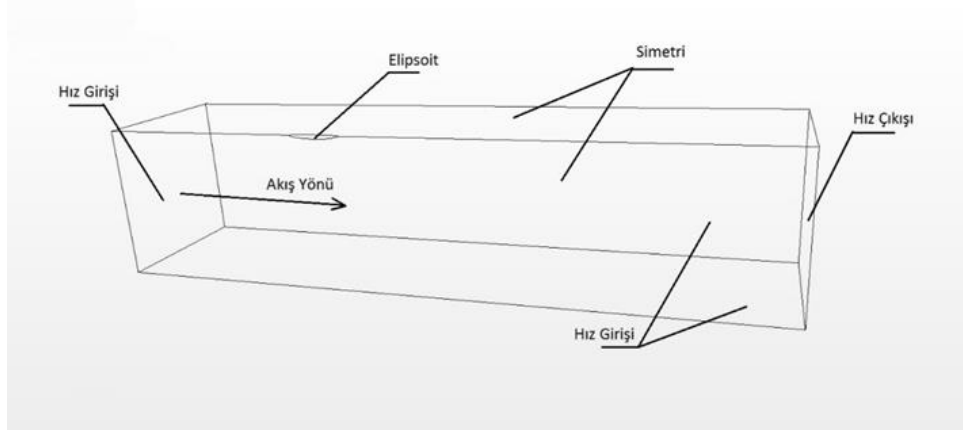
Bütün HAD analizlerinde ağ yapıları ile akış çevresini (domain) modellemeye başlamadan önce analiz edilmesi istenen akışın fiziksel özellikleri düşünülmeli, ağ yapısı ve program içerisindeki yaklaşımlar bu fiziksel özellikler göz önünde bulundurularak seçilmelidir. Akış çevresi modellenirken gemi mühendisliği uygulamaları için ITTC tarafından önerilen akış çevresi boyut önerileri dikkate alınabilir [33]. Bu boyutlar hidrodinamik özellikleri belirlenmek istenen cismin etrafındaki akışı etkileyecek kadar küçük, çok fazla ağ sayısına neden olacak kadar da büyük olmamalıdır. Akış çevresi; incelenecek akışa göre göre bir dikdörtgen prizma, silindir veya da küre olabilir.

Elipsoit geometrik olarak ele alındığında boyuna ve enine simetrik bir geometriye sahiptir. Ayrıca narin bir yapıya sahip olduğundan ardında yoğun akım ayrılımları ve girdaplar oluşturmamakta, dolayısıyla etrafındaki akış da hem boyuna hem enine eksenlerde simetrik olmaktadır. Bu durumda elipsoidin yalnızca boyuna kesitli halde yarısının veya hem enine hem boyuna kesitli halde çeyreğinin etrafındaki akışın incelenmesinde bir sakınca yoktur. Bu yaklaşımın amacı elipsoidin ve dolayısıyla akış çevresinin tamamını modellemek yerine yarısını veya çeyreğini modelleyerek yüksek ağ sayılarından kaçınmak ve böylelikle daha hızlı sonuçlar almaktır.

### **3.1.1.1 Akış Çevresinin ve Ağ Elemanlarının Oluşturulması**

BDT programıyla oluşturulan bütün haldeki elipsoit, ITTC'nin önerileri dikkate alınarak oluşturulmuş dikdörtgen prizmanın uzun kenarı boyunca, yine ITTC önerilerine uygun konumda, hacminin  $\frac{1}{4}$ 'ü dikdörtgen prizmanın içerisinde kalacak şekilde yerleştirilir. Bunun ardından BDT veya HAD programının içerisinde yer alan komutlarla, dikdörtgen prizmanın içerisinden elipsoidin hacmi çıkarılır ve elde

elipsoidin  $\frac{1}{4}$ 'lük kısmı oyulmuş halde bir dikdörtgen prizma hacmi kalır. Bu prizma, içerisinde çözüm ağlarının oluşturulacağı akış çevresidir. Bu akış çevresinin yüzeyleri program içerisinde bulunan yüzey türleriyle programa tanıtılmalıdır. Cismin çıkarıldığı ve cisim yüzeylerini temsil edecek olan yüzey 'duvar', akışkanın çözüm çevresine gireceği yüzey 'hız girişi', akışkanın ortamı terk edeceği yüzey 'basınç çıkışı', cismin ona göre simetrik olduğu düşünülen yüzeyler 'simetri' ve kalan diğer yüzeylerse 'hız girişi' olarak tanıtlılır. Hız girişi olarak tanımlanan ve Şekil 3.2'de de gösterilen kenarlardaki yüzeylerde tanımlanacak hız vektörü, akışkanın girdiği 'hız girişi' yüzeyinde tanımlanan hız vektörüyle aynı olmalıdır.

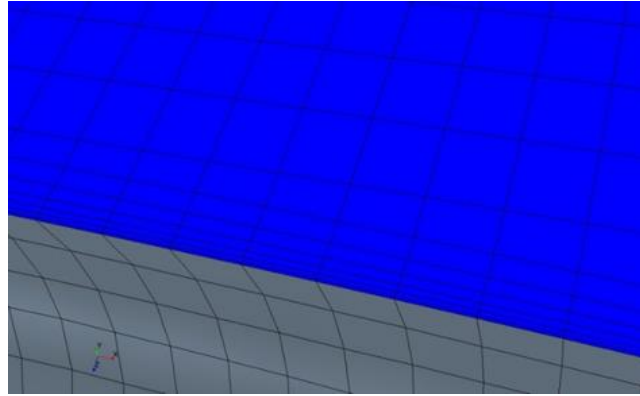


**Şekil 3.2** Akış Çevresinin Genel Görünümü ve Tanımlanan Yüzeyler

Bu aşamanın ardından sonlu hacimler yöntemi ile çözüm yapılabilmesi için hacmin ağ elemanlarına ayrılma işlemine geçilir. HAD analizinin amacı elipsoit etrafındaki akışın incelenmesi olacağından, elipsoit yüzeyi ve onu çevreleyen bölgedeki ağ yapısı, diğer bölgelere göre daha yoğun olmalıdır. Çok fazla sayıda eleman sonucun güvenilirliği açısından iyi olsa da eldeki işlemci gücü ağ elemanı sayılarını kısıtlamaktadır. Eğer akış problemi daha az sayıda ağ elemanı ile çözülebiliyorsa, fazladan oluşturulmuş ağ elemanları analizin çözüm süresini gereksiz yere uzatacaktır. Akışı gerçek anlamda modelleyecek kadar hassas oluşturulmamış az sayıdaki ağ sayıları analizlerin hızlı bir şekilde çözülmesini sağlasalar da sonuçları fazla güvenilir olmayacak ve hatta hatta bazı durumlarda çözümün ıraksayarak analizin hata vererek durmasına neden olacaktır.

Akış çevresi hacmini ağ yapılarına bölme işlemine kenarlardan başlanarak, bu kenarları oluşturan yüzeylerin ağlara bölünmesi sağlanır. İsteğe göre bir yüzeyin, belirli kenarları diğer kenarlarına nispeten daha fazla eleman sayısına bölünerek, yüzeyin o bölgesinde

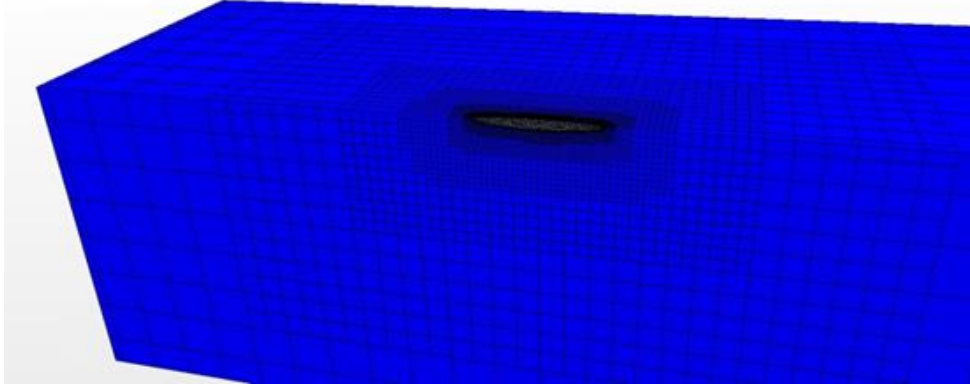
daha yoğun bir ağ yapısının oluşturulması sağlanır. Bu işlem iki boyutlu analizlerde daha çok uygulanmakta olup, buradaki amaç akışın hızlandığı veya girdapların yoğunlaştığı bölgelerde, oluşturulan daha yoğun ağ yapısı yardımıyla akışı daha iyi analiz etmektir. Akış çevresini çevreleyen bütün yüzeyler bu şekilde ağ yapılarına bölündükten sonra, tüm akış çevresi hacminin bu yüzeyler baz alınarak ağ elemanlarına bölünmesi işlemi gerçekleştirilir. Şekil 3.3'te gri renkte görülen ağlar elipsoit yüzeyi üzerinde oluşturulmuş ağ yapılarıdır, mavi renkteki ağlar ise elipsoit etrafındaki akışı modellemek için oluşturulmuştur. Elipsoide yakın olan ağların boyutları oldukça küçük olup giderek büyümektedir. Buradaki amaç, elipsoit etrafında oluşacak sınır tabaka içerisindeki akışı daha iyi modelleyebilmek için o bölgeyi daha fazla ağ yapısıyla çözmektir. Aksi takdirde buradaki viskoz etkiler tam anlamıyla hesaplamalara dahil edilemeyecek ve bu da analizin sonuçlarını kötü yönde etkileyecektir. Özellikle cisim etrafında oluşturulacak ağların boyutları belirlenmeden önce sınır tabaka kalınlığı ampirik formüllerle öngörü şeklinde hesaplanmalı, cisim yüzeyindeki ağ elemanları bu kalınlık dikkate alınarak oluşturulmalıdır.



**Şekil 3.3** Elipsoiti Çevreleyen Ağ Yapılarının Yakından Görünüşü

Bu yöntem analizlerin güvenilirliğini artırmaktadır. Elipsoit yüzeyinin ağ boyutlarının belirlenmesinin ardından, diğer yüzeylerin ağ elemanı boyutlandırılmasına geçilir. Diğer çevre yüzeylerin ağ elemanı boyutlarının elipsoit yüzeyindeki kadar küçük olmasına gerek yoktur. Aksi takdirde bütün hacim düşünüldüğünde ağ elemanı sayısı çok fazla olacaktır. Elipsoit yüzeyinden diğer yüzeylere doğru gidildikçe ağ yapılarının boyutları giderek büyüyecek ve son olarak çevre yüzeyler için belirlenen ağ yapısı ebatlarına ulaşacaktır. Burada dikkat edilmesi gereken konu, elipsoit yüzeyinden diğer yüzeylere geçişte ağ elemanı boyutlarının bir anda kritik bir şekilde değişmemesi

gerektiğidir. Bunun nedeni komşu ağlar arasındaki büyük boyut farkları, HAD kodunun bu elemanlar için yaptığı çözümleri olumsuz etkilemesidir. Dolayısıyla komşu ağ elemanlarının arasındaki boyut geçişi sert olmamalı, gerekirse iyileştirme yöntemleri kullanılarak bu geçişler yumuşatılmalıdır. Şekil 3.4'te elipsoit çevresi ve akış çevresindeki ağ elemanlarının dağılımı görülmektedir. Akış çevresini oluşturan ağ elemanları, artık HAD kodunun çözüm yapabilmesi için hazırdır. Programa RANSE kodunun çözüleceği hacim elemanları tanıtıldıktan sonra, uygulanacak fiziksel şartların programa girilmesi gerekmektedir.



**Şekil 3.4** Elipsoit ve Akış Çevresi Genelindeki Ağ Elemanları

### **3.1.1.2 Diğer Fiziksel Parametrelerin Tanımlanması**

Yeknesak ve sıkıştırılamaz akış kabulü ile modellenen hareketsiz bir elipsoit etrafındaki akışta zamana bağlı olarak çok büyük değişiklikler meydana gelmeyeceğinden, elipsoit ve benzer geometriler etrafındaki akış incelenirken zamandan bağımsız (steady) analizler gerçekleştirilebilir. Bu durumda RANSE kodu içerisindeki zamana bağlı ifadeler devre dışı bırakılmaktadır. Bir HAD analizinin zamandan bağımsız olarak çözülebilmesi, bu tür analizlerin çözüm sürelerinin nispeten daha kısa olması açısından önemlidir. Zamana bağlı analizler, akışın veya da cismin hareketinin özelliklerine göre belirlenen uygun zaman adımları ile çözümler. Kimi durumda bu zaman adımlarının oldukça küçük olarak uygulanması gerekmekte ve bu durum analiz sürelerini uzatmaktadır.

Viskoz etkilerin hesaplamalara dahil edilmesi için HAD programı içerisinde türbülanslı akış özelliği aktif edilmelidir. Buradaki bir önemli konu kullanılacak olan türbülans modeli seçimidir. Gemi mühendisliği problemlerinde incelenen cisimler genellikle narin

cisimler olup, bu cisimlerin etrafındaki akıştaki türbülansı en iyi şekilde temsil eden türbülans modelinin k-epsilon türbülans modeli olduğu bilgisi literatürde oldukça yaygındır. Ancak bu tez çalışması kapsamında ilerleyen bölümlerde de ifade edileceği gibi bazı yüksek blok katsayılı (dolgun) gemilerde k-omega türbülans modeli deney sonuçlarıyla daha uyumlu sonuçlar verebilmektedir.

Bu fiziksel kabullerin ardından yüzeylerin fiziksel sınır şartlarına geçilmiş ve fiziksel değerler girilmiştir. Bilindiği gibi çoğu HAD analizi, cisimler sabit olarak konumlandırılıp üzerine belirli hızda veya debide akış gönderilerek yapılır. Böylece cisim sanki akışkan içerisinde o hızda ilerliyormuş gibi modellenmiş olur. Bu durumun fiziksel olarak cismin durgun akışkan içerisinde ilerlemesinden hiçbir farkı yoktur. Bu yüzden akışkan çevresine giren akışın hızı, elipsoidin suyun içerisinde ilerleme hızı olmaktadır. Bu hız değeri yönüyle birlikte yani bir vektör olarak ‘hız girişi’ yüzeyine tanımlanır. Akışın çıktığı ‘basınç çıkışı’ için herhangi bir parametre girmeye gerek yoktur çünkü ‘basınç çıkışı’ yüzey türünün programda tanımlı özelliklerinden dolayı akışkanın bu yüzeyden hiçbir etkiye maruz kalmadan çıktığı varsayılır. Önceki bölümde de belirtildiği gibi simetri yüzeyleri haricinde kalan diğer kenarlar ‘hız girişi’ yüzey türüyle tanımlanabilir ve ‘hız girişi’ yüzeyinde tanımlanan hız vektörü parametresi girilir. Buradaki amaç artık o yüzeyler itibariyle akışın yeknesak akış hızına eşit olduğu ve değişmediğinin varsayılmasının programa tanıtılmasıdır. Elipsoidi kesen iki yüzey olan simetri yüzeyleri programda ‘simetri’ türünde seçilir.

Akışın fiziksel özelliklerinin programa tanıtılmasının ardından, analiz sonrasında programdan istenilecek fiziksel değerler, grafikler, görüntüler programa tanıtılır. Elipsoit etrafındaki bu akış analizinde direnç değerleri araştırılmaktadır. Dolayısıyla programdan elipsoit yüzeyindeki sürtünme (teğetsel) ve basınç (normal) kuvvetleri ayrı ayrı talep edilir bu sayede direnç bileşenleri ayrı ayrı incelenebilmektedir. Program çalıştırılır ve yeteri sayıda çözüm sayısının ardından sonuçlar yakınsadığında analiz sonlandırılır ve sonuçlar elde edilir. Unutulmamalıdır ki bu analizlerden elde edilen sonuçlar elipsoidin ¼’lük kısımları için olduğundan, elde edilen direnç değerleri 4 ile çarpılarak elipsoidin direnç değerleri hesaplanır. Yapılan HAD analizleri ile elde edilen sonuçların doğruluğunun incelenmesinin en iyi yolu model deneyi sonuçları ile yapılan karşılaştırmalardır. Eğer model deneyi sonuçları bulunmuyorsa, HAD analizleri içerisinde birtakım parametrelere dikkat edilmelidir. Bunlardan ilki sonuç değerlerinin



yakınsama durumudur. Bir HAD analizinin yakınsaması şu şekilde ifade edilebilir: HAD yöntemi ile hesaplanan değerlerin belirli bir çözüm sayısından sonra her ardışık işlem sonucunda birbirine yakın sonuçlar bulmasıdır. Eğer HAD analizi sonucunda her ardışık işlem sonucunda bulunan değerler arasında büyük farklar bulunuyorsa, ağ elemanları yapısında veya analizin fiziksel kurulumunda bir sorun bulunmaktadır. Ağ elemanlarının yeterli hassasiyette oluşturulduğu ve sonuçların bir türlü yakınsamadığı analizler fiziksel modelin hatalı olduğuna işaret eder. Fiziksel model oluşturulurken yapılan en yaygın hatalar; türbülans modeli, zamana bağımlılık durumu, zaman adımı, analiz başlangıç koşullarının yanlış seçilmesi şeklinde sıralanabilir.

Analiz sonuçları yakınsıyor olsa dahi her HAD analizi sonunda mutlaka  $y^+$  (boyutsuz duvar mesafesi) değeri incelenmelidir. Gemi mühendisliği problemleri için HAD analizi sonucunda incelenen cisim yüzeyindeki azami  $y^+$  değerinin ' $30 < y^+ < 100$ ' şartını sağlaması önerilmektedir. Sözü geçen bu değer üzerinde  $y^+$  değerinin elde edildiği analizlerin güvenilirliği azalmaktadır. Denizaltı için yapılacak tek fazlı HAD analizleri de benzer şekilde yapılmaktadır. Denizaltılar elipsoit uygulamasının aksine takıntılar içereceğinden çoğunlukla yalnızca boyuna simetrik geometriye sahiptirler. Bu sebeple denizaltı HAD analizleri genellikle boyuna şekilde yarım olarak modellenip aynı yaklaşımlar uygulanarak gerçekleştirilirler.

Tek fazlı HAD analizleri gemiler için de yapılabilmektedir. Bilindiği üzere tek fazlı analizlerde dalga direnci parametresi hesaplanamamaktadır. Bir sonraki bölümde anlatılacak olan çift fazlı analizlerle toplam direnç değeri hesaplanan bir gemi modelinin aynı servis hızında bir de yalnızca su altında kalan kısmının tek fazlı analizi yapılarak toplam direnç değeri hesaplanır. İki ayrı yaklaşımla hesaplanan toplam direnç değerlerinin arasındaki fark modelin o hızdaki dalga direnç değerini verecektir. Bu sayede geminin dalga direnç katsayısı değeri bulunabilecektir. Froude benzerliği uygulanarak aynı Froude sayılarında model ölçeğinde belirlenen dalga direnç katsayısı ile tam ölçekteki dalga direnç katsayıları aynı olacağından tam ölçekteki dalga direnci değeri de artık bilinmektedir. Tek fazlı HAD analizi ile elde edilen tam ölçekteki geminin toplam direnç değeri ve belirlenen dalga direnci değeri toplanarak tam ölçekteki geminin toplam direnç değeri bulunmuş olur. Bu yöntem alternatif bir yöntem olup tam ölçekte gerçekleştirilecek ve tek fazlı analize oranla çok daha fazla ağ

elemanına ihtiyaç duyacak çift fazlı gemi analizlerine ihtiyaç duymadan tam ölçekteki geminin toplam direnç değerini hesaplama imkanı vermektedir.

Unutulmamalıdır ki bu bölümde anlatılan tek fazlı HAD analizleri yalnızca pervanesiz durumdaki denizaltı ve gemi uygulamaları için geçerlidir. Pervanenin de modelleneceği HAD analizlerinde elipsoidin veya denizaltının tamamen modellenmesi gerekmektedir.

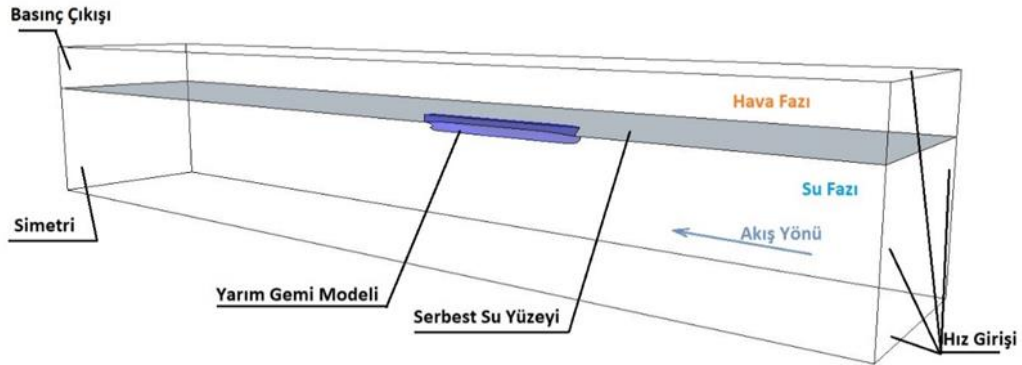
### **3.1.2 Çift Fazlı HAD Analizleri**

Tek fazlı HAD analizleri gemi mühendisliği için önemli yer tutsalar da bu alanda HAD yöntemi ile yapılan uygulamaların çok büyük bir kısmı çift fazlı problemlerden oluşmaktadır. Serbest su yüzeyi etkisinin hesaplamalara dahil edilmesi analizlerle yapılan öngörülerin güvenilirliğini artırmaktadır. İşlemci teknolojilerinin günümüzde geldiği seviye, tek fazlı HAD analizlerine göre çok daha fazla ağ elemanına ihtiyaç duyulan çift fazlı HAD analizlerinin yapılabilmesine imkan tanımaktadır. Çünkü çift fazlı analizlerde serbest su yüzeyindeki dalga oluşumunun hassas bir şekilde öngörülebilmesi için nispeten daha küçük elemanlarla temsil edilmesi gerekmektedir. Bu durum eleman sayısında ciddi bir artışa neden olmakta ve analiz sürelerini uzatmaktadır. Çift fazlı HAD analizlerinin uygulanması büyük oranda tek fazlı HAD analizlerine benzerdir. Bu bölümde çift fazlı HAD uygulamalarının tek fazlı uygulamalarından farklı olan yönleri üzerinde durulmuştur.

#### **3.1.2.1 Akış Çevresinin ve Ağ Elemanlarının Oluşturulması**

Çift fazlı HAD analizleri gerçekleştirilirken akış çevresi bir önceki kısımda tek fazlı HAD analizleri için ifade edilen yaklaşıma benzer olarak oluşturulmaktadır. Ek olarak geminin serbest su yüzeyinin üstünde kalan bölümünün de akış çevresine dahil edilmesi gerekmektedir. Akış çevresinin boyutları ve analiz edilecek olan geminin konumlandırılması yine ITTC önerileri göz önünde bulundurularak yapılır. Akış çevresine akışkanın giriş yapacağı yüzey ‘hız girişi’ olarak tanımlanır. Akışkanın akış çevresini terk edeceği yüzey ise ‘basınç çıkışı’ şekilde tanımlanır. Gemi boyuna simetrik yapısından faydalanılarak düşük çözüm süreleri elde etmek adına HAD analizinde yarım olarak modellenmek isteniyorsa, gemiyi boyuna şekilde ikiye bölen yüzey ‘simetri’ yüzeyi olarak tanımlanmalıdır. Kalan yüzeyler ise ayrı ayrı ‘hız girişi’ olarak tanımlanabilirler. Şekil 3.5’te bir gemi modelinin çift fazlı bir HAD analizi için

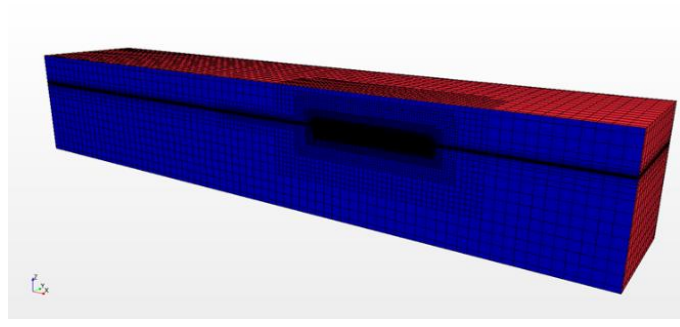
oluşturulan akış çevresinin yüzey tanımlamaları ile beraber genel görünümü gösterilmiştir.



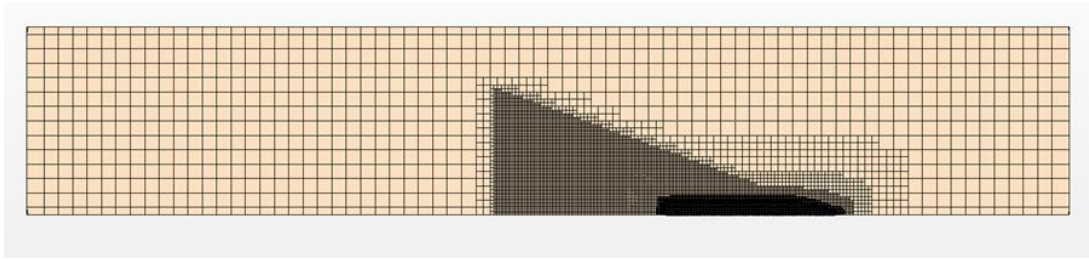
**Şekil 3.5** Çift Fazlı HAD Analizleri için Akış Çevresinin Genel Görünümü ve Tanımlanan Yüzeyler

Geminin serbest su yüzeyi altında kalan kısmı etrafında oluşturulacak ağ yapısı tek fazlı HAD analizlerindeki yaklaşımla oluşturulur. Geminin serbest su yüzeyinin üstünde kalan yüzeyleri etrafında ise fazla eleman sayısına neden olmaması için nispeten daha büyük ağ elemanları oluşturulabilir. Şekil 3.6'da ise Şekil 3.5'te gösterilen akış çevresi için oluşturulmuş ağ elemanlarının genel görünümü gösterilmiştir. Şekil 3.5 incelendiğinde serbest su yüzeyi bölgesinde oluşturulmuş elemanların sıklığı göze çarpacaktır. Serbest su yüzeyi bölgesinde bulunan elemanlar aynı anda su ve hava fazlarını temsil edebileceğinden, özellikle serbest su yüzeyine dik olan eksen doğrultusunda küçük elemanlara bölünmelidir. Benzer şekilde gemi modeli yüzeyinde ve çevresinde oluşturulan ağ elemanları diğer bölgelere göre daha küçük olmaktadır.

Çift fazlı analizlerin ağ elemanları oluşturulması evresinde bir diğer önemli konu geminin arkasında kalan bölgede oluşacak dalgalar için yapılacak iyileştirmelerdir. Oluşacak Kelvin gemi dalgaları için o bölgedeki ağ elemanlarında yapılacak iyileştirmeler gerek analizin yakınsaması gerekse hesaplanan değerlerin doğruluğunu artıracaktır. Şekil 3.7'de Kelvin gemi dalgaları bölgesindeki ağ elemanları için yapılan iyileştirmeler gösterilmiştir. Bu bölgede söz konusu iyileştirmeler yapılmadığı takdirde HAD analizi sonucunda Kelvin dalga oluşumu gözlenemeyecektir.



**Şekil 3.6** Bir Gemi Modelinin Çift Fazlı HAD Analizi için Oluşturulmuş Ağ Elemanlarının Genel Görünümü



**Şekil 3.7** Kelvin Gemi Dalgaları Bölgesindeki Ağ Elemanları için Yapılan İyileştirmeler

### 3.1.2.2 Diğer Fiziksel Parametrelerin Tanımlanması

Tez çalışması kapsamında gerçekleştirilen çift fazlı akış analizleri, bir önceki kısımda matematiksel ifadesi yapılan VOF yöntemi kullanılarak yapılmıştır. VOF metodu kullanılarak serbest su yüzeyi oluşturulacaksa serbest su yüzeyinin akış çevresinin dikey eksenindeki konumunun programa tanımlanması gerekmektedir. Bu yüzden gemi modeli BDT programında oluşturulurken serbest su yüzeyinin dikey ekseninde '0' koordinatında olması HAD programında VOF uygulanırken kullanıcıya kolaylık sağlayacaktır.

HAD analizinde kaç faz modellenecekse öncesinde programa tanıtılması gerekmektedir. Çift fazlı gemi analizlerinde kullanılacak fazlar hava ve su olacağından, bu fazların yoğunluk ve viskozite değerleri programda ilgili alanlara girilir. Daha sonra çift fazlı akışın hızı ve yönü programda belirtilir. Oluşturulan fazların akış çevresine hangi yüzeyden ve ne şekilde gireceği çevre yüzeylerin fiziksel modellenmesi sırasında ayarlanır.

Çift fazlı HAD analizlerinde fazların yoğunluklarına göre akış çevresinde doğru bir şekilde konumlanabilmesi için yerçekimi ifadesinin aktif olması gerekmektedir. Tez çalışması kapsamında gerçekleştirilen çift fazlı HAD analizlerinde türbülans modeli olarak tek fazlı analizlere benzer olarak k-epsilon ve k-omega türbülans modelleri kullanılmıştır. Bütün çift fazlı HAD analizleri zamandan bağımsız olarak gerçekleştirilmiştir. Akış çevresi içerisindeki başlangıç değerleri olarak çift fazlı akış için tanımlanan hız ve hacim oranı parametreleri girilir.

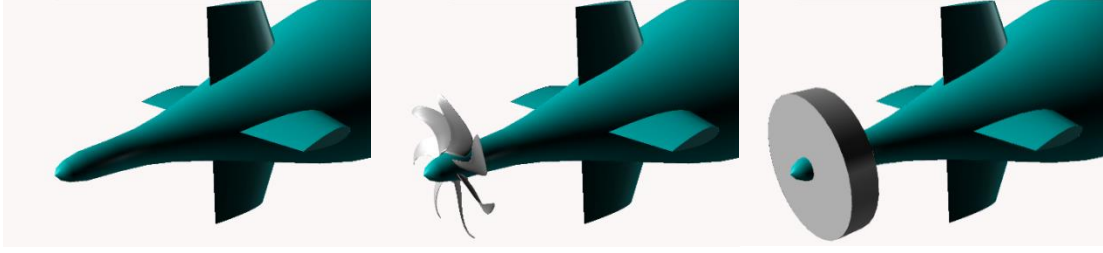
Son olarak programa HAD analizi ile hesaplanması istenen raporlar tanımlanır. Bu tez çalışması kapsamında gerçekleştirilen pervanesiz durumdaki çift fazlı HAD analizlerinde gemi yüzeyinde gerçekleşen kuvvet değerleri ölçülmüştür. Gemi modelinin yüzeyine teğet (sürtünme) ve dik (basınç) kuvvetlerin toplamı için HAD programı içerisinde bir rapor dosyası oluşturulur ve böylelikle modelin toplam direnç değerinin hesaplanması hedeflenir. Ayrıca oluşturulan rapor dosyasının çözüm adımlarına bağlı grafiğinin çizdirilmesi sağlanarak raporda istenilen sonuçların ilerleyen çözüm adımlarında yakınsayıp yakınsamadığı takip edilebilir.

Buraya kadar ifade edilen adımlar uygulandıktan sonra analiz başlatılır ve uygulanan adımlarda bir hata bulunmuyorsa analiz sonuçları birbirleri ile yakınsayana kadar analiz devam ettirilir. Analizin istenilen ölçütte yakınsamasının ardından analiz sonlandırılır ve programa tanımlanan sonuç rapor dosyaları okunarak modelin toplam direnç değeri bileşenleri ile beraber hesaplanmış olur.

### **3.1.3 Pervaneli HAD Analizleri**

Gemilerin direnç ve sevk parametrelerinin HAD yöntemi ile doğru bir şekilde belirlenebilmesi için pervanenin ve etrafındaki akışın da analizlere dahil edilmesi gerekmektedir. HAD yöntemi ile gerçekleştirilen pervaneli analizler Şekil 3.8’de de görülebileceği gibi iki ayrı gruba ayrılabilir:

- Pervanenin direkt olarak modellendiği analizler
- Pervanenin sanal disk kullanılarak modellendiği analizler

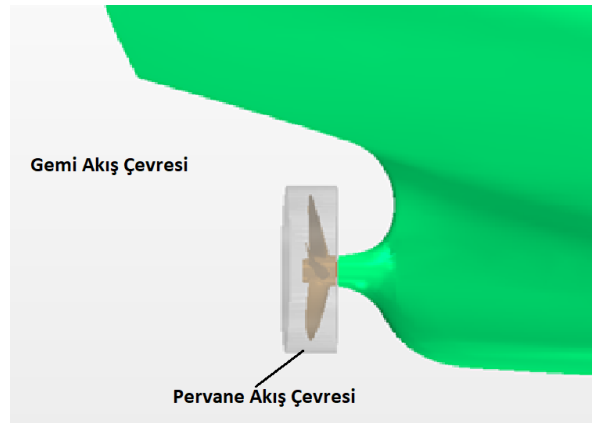


**Şekil 3.8** Pervanesiz (sol), Pervaneli (orta) ve Sanal Disk (sağ) Kullanılmış Bir Denizaltı HAD Analizinden Kıç Bölgesi Görüntüleri [34]

### 3.1.3.1 Pervanenin Direkt Olarak Modellendiği Analizler

Pervaneli gemi HAD analizlerinde pervane direkt olarak modellenmek isteniyorsa analizde ayrı bir pervane bölgesi oluşturulması gerekmektedir. Bu bölge ikinci bir akış çevresi olup içerisinde pervane geometrisini ve etrafında dönen akışkan bölgesini barındırmaktadır.

Pervaneli bir geminin HAD analizi gerçekleştirilirken öncelikle gemi veya denizaltı için önceki bölümlerde ifade edildiği şekilde bir akış çevresi oluşturulur. Gemi için oluşturulan akış çevresi geometrisinden Şekil 3.9’da da görülen, pervaneyi ve yakın bölgesini kapsayacak şekilde oluşturulan silindir hacmi çıkarılır. Çıkarılan bu silindir hacminin yerine içerisinden pervanenin geometrisinin çıkarıldığı aynı ölçülerdeki silindir hacmi yerleştirilir. Yerleştirilen bu hacim pervane etrafındaki dönel akışın modelleneceği pervane akış çevresidir.

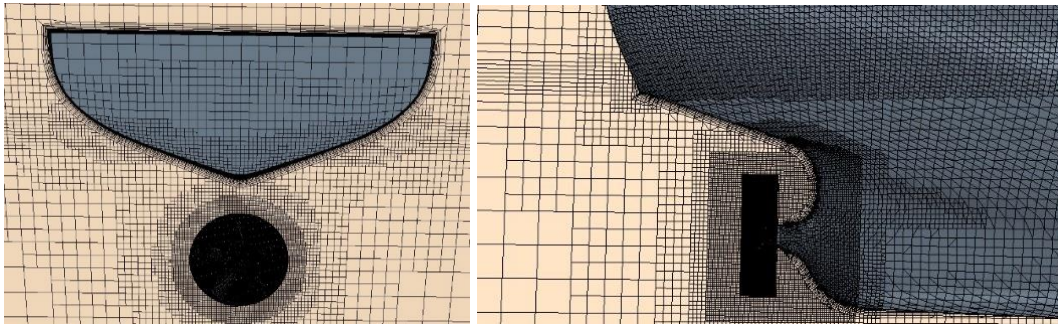


**Şekil 3.9** Pervane Bölgesinde Oluşturulan Bir Pervane Akış Çevresinin Görünümü

Pervane akış çevresinin dış yüzeylerini oluşturan silindirin yüzeyleri, gemi akış çevresinden çıkarılan silindirin yüzeyleri ile aynı konumda olsalar da program içerisinde farklı yüzeyler olarak tanınmaktadır. Gemi akış çevresinden gelecek olan

akışla ilgili parametrelerin pervane akış çevresine aktarabilmesi için bu iki yüzeyin arasındaki ilişkinin HAD programında ‘arayüz (interface)’ olarak tanımlanması gerekmektedir. Pervane akış çevresinin içerisinde bulunan ve pervaneyi temsil eden yüzeyler ise ‘duvar (wall)’ yüzey seçeneği ile tanımlanır.

Pervane akış çevresinin yüzeylerinin ve yüzey özelliklerinin tanımlanmasının ardından bu akış çevresi için ağ elemanları oluşturma adımına geçilir. Pervane akış çevresindeki akışkan hızlarının gemi akış çevresindeki akışkan hızlarına oranla oldukça yüksek olması sebebiyle, pervane akış çevresinde oluşturulacak ağ elemanlarının boyutlarının daha küçük olması gerekmektedir.

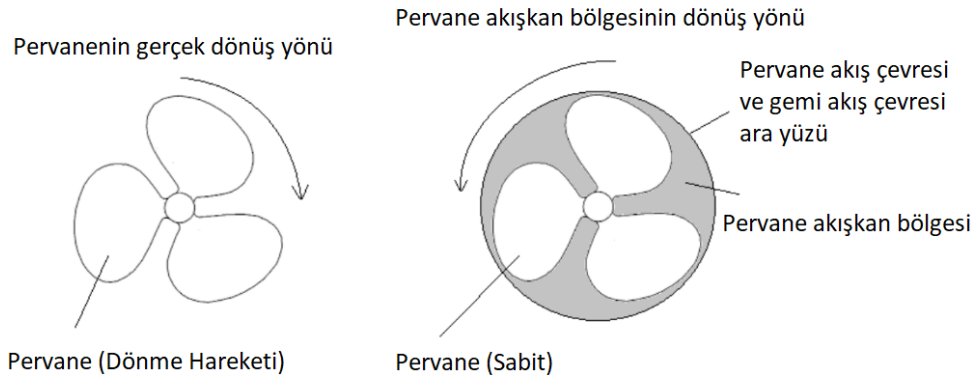


**Şekil 3.10** Bir Pervane Akış Çevresi İçin Oluşturulan Ağ Elemanlarının Görünümü

Şekil 3.10’da pervaneli bir gemi HAD analizinde pervane akış çevresi için oluşturulan ağ elemanlarının genel görünümü verilmiştir. Pervane akış çevresi için oluşturulan elemanların boyutlarının nispeten daha küçük olduğu ve gemi akış çevresindeki elemanların pervane akış çevresine yaklaşıncaya kademeli olarak küçültüldüğü görülebilmektedir. Bu kademeli geçiş gemi-pervane etkileşiminin doğru bir şekilde modellenmesi için gereklidir. Aksi halde gemi akış ve pervane akış çevrelerindeki ağ elemanları arasındaki veri aktarımı sağlıklı olmayacak ve bu durum analiz sonuçlarını etkileyecektir.

Pervanenin direkt olarak modellendiği pervaneli HAD analizlerinde, pervane akış çevresindeki dönel akışın modellenmesi iki farklı yöntemle yapılabilir. Bunlardan ilkinde pervane akış çevresindeki ağ elemanlarına direkt olarak pervanenin dönme hareketi yaptırılır ve pervanenin gerçekte yaptığı dönme hareketi modellenir. Bu yöntem uygulanmak isteniyorsa analizlerin zaman bağılı olarak gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Analizlerdeki zaman adımının pervane devir sayısına dikkat ederek seçilmesi ve analiz sonuçlarını etkileyecek kadar büyük zaman adımlarından

kaçınılması önemlidir. ITTC, HAD analizlerinde pervanenin her bir zaman adımında 0.5-2 derece arasında dönmesini önermektedir [35]. Eğer her bir zaman adımında pervanenin '1' derecelik dönme hareketi yaptığı varsayılırsa pervanenin yalnızca bir tam devir yapabilmesi için 360 zaman adımı gerekecektir. Örneğin her bir zaman adımı için '10' ardışık işlem yaptırılıyorsa, pervanenin bir tam devir yapabilmesi için toplamda '3600' ardışık işlem yaptırılması gerekecektir. Analiz edilen pervanenin '10 d/s' dönme hızına sahip olduğu varsayılırsa, analizin 1 saniyelik bölümü için '36000' ardışık işlem yaptırılması gerekmektedir. Gemi ve pervanenin beraber modellendiği bu analizlerde toplam ağ elemanı sayıları da yüksek olacağından bu yöntem kullanıldığında çözüm süreleri de oldukça uzun olacaktır.



**Şekil 3.11** Hareketli Referans Sistemi Metodunun Çalışma Prensibi [34]

Pervane etrafındaki akışın modellenebileceği bir diğer yöntem hareketli referans sistemi (Moving Reference Frame, MRF) yöntemidir. MRF yönteminde pervane sabit durmakta ve onu çevreleyen bölgeye dönme hareketi verilmektedir. Bu dönme hareketi gerçek bir dönme hareketi olmayıp pervane akış çevresindeki ağ elemanları analiz süresince sabit durmaktadır. Pervaneyi çevreleyen akışkana pervanenin gerçek dönüş yönüne zıt bir dönme hareketi tanımlanarak pervane etrafındaki akış modellenmektedir (bkz. Şekil 3.11). Analizde pervanenin gerçek bir dönme hareketi yapmamasının pervane itmesi, torku, itme azalması ve iz katsayısı gibi sevk parametrelerine kayda değer bir etkisi olmamaktadır. MRF yönteminin bir önceki paragrafta ifade edilen yöntemle göre en önemli avantajı, zaman ortalamalı çözüm gerçekleştirebilmesidir. Bu sayede bir önceki paragrafta ifade edilen zamana bağlı ve dolayısıyla uzun çözüm süreleri gerektiren analizlere ihtiyaç kalmamaktadır.



### 3.1.3.2 Pervanenin Sanal Disk Kullanılarak Modellendiği Analizler

Bir geminin özitme HAD analizleri pervane direkt olarak modellenmeden de gerçekleştirilebilmektedir. HAD yöntemi ile pervanenin bulunduğu yere yerleştirilen ve pervanenin açık-su pervane performans karakteristiğine sahip bir sanal disk kullanılarak özitme analizi yapılabilir. Sözü geçen sanal diskin nasıl oluşturulduğu Şekil 3.8’de görülebilmektedir [34]. Şekil 3.8 incelendiğinde pervane geometrisinin bulunmadığı ve pervanenin yalnızca silindir bir disk ile temsil edildiği görülmektedir. Yöntemin isminden de anlaşılacağı gibi bu sanal bir disk olup diskin hacmi için ağ elemanı oluşturmaya gerek olmamaktadır. Pervaneli durumdaki gemi HAD analizlerinde sanal disk kullanımının avantajları şu şekilde sıralanabilir:

- Bir önceki bölümde ifade edilen işlemlerle pervane akış çevresinin oluşturulmasına gerek olmadan, pervanenin basit bir silindir disk ile temsil edilebilmesiyle özitme analizlerinin uygulanması nispeten daha kolaydır.
- Pervanenin direkt olarak modellendiği bir analizde pervane akış çevresinde bulunacak çok sayıda ağ elemanının, sanal disk ile modellenen bir HAD analizinde bulunmaması toplam ağ elemanı sayısını azaltmakta ve çözüm süresini kısaltmaktadır.
- Geminin açık-su pervane performans parametreleri bilinen diğer pervaneler ile analizleri, pervanelerin direkt olarak modellenmeden yalnızca programa girilen açık-su verilerinin değiştirilmesiyle daha hızlı bir şekilde gerçekleştirilebilir.

Pervanenin sanal disk metodu ile modellendiği HAD analizlerinin yukarıda sıralanan avantajlarının yanında birtakım dezavantajları da bulunmaktadır. Bu dezavantajlar şu şekilde sıralanabilir:

- HAD analizinde sanal disk pervane metodunun kullanılabilmesi için geminin arkasında çalışacak olan pervanenin açık-su performans karakteristiğinin bilinmesi gerekmektedir. Aksi halde metod kullanılamayacak ve pervanenin direkt olarak modellenmesi gerekecektir.
- Analizde pervane direkt olarak kullanılmadığından analiz sonucunda pervane yüzeylerinde oluşacak basınç dağılımları, hız alanları, kavitasyon özellikleri vb. değerler incelenemeyecektir.

Bu tez çalışması kapsamında gerçekleştirilen pervaneli durumdaki gemi HAD analizlerinde pervane direkt olarak modellenmiştir. Pervane bölgesindeki akış zamandan bağımsız olarak MRF yöntemi kullanılarak modellenmiş ve özetme parametreleri bu şekilde hesaplanmıştır.

### 3.1.4 HAD Analizleri İçin Doğrulama ve Onaylama Çalışmaları

Sayısal yöntemlerle elde edilen sonuçların içerisinde hata ve belirsizliklerin olması kaçınılmaz bir durumdur. HAD yöntemlerinin giderek artan kullanımı, bu yöntemle elde edilen sonuçlar için doğrulama ve onaylama uygulamalarını zorunlu kılmaktadır. Bu tez çalışması kapsamında gerçekleştirilen HAD analiz sonuçları için Stern vd. tarafından geliştirilen doğrulama ve onaylama (Verification an Validation) yöntemi uygulanmıştır [36].

Hata ( $\delta$ ), sayısal yöntemle modellenerek hesaplanan bir fiziksel parametrenin onun gerçekteki değeri ile arasındaki farktır. Bu fiziksel parametrenin gerçekteki değerine en yakın değerler ise deney yöntemleri ile elde edilebilir. Ancak unutulmamalıdır ki gerçek değerlerin bulunması için yapılan deneylerle elde edilen sonuçların içerisinde dahi az da olsa hata ve belirsizlik olacaktır. Gemi model direnç deneylerindeki hata ve belirsizlik konusu Delen tarafından yapılan yüksek lisans tezinde detaylı bir şekilde incelenmiştir [37].

Belirsizlik ( $U$ ) ise hatanın aralığı şeklinde yorumlanabilir. Bir analiz sonucunda gerçekleşen hata ve belirsizlikler genel anlamda modelleme ve sayısal kaynaklı olmak üzere iki gruba ayrılabilir. Modelleme kaynaklı hata ve belirsizlikler fiziksel özelliklere (cisim geometrisi, sınır şartları, türbülans modelleri vb.) bağlıyken sayısal hata ve belirsizlikler ise HAD yazılımı içerisinde bulunan matematiksel denklemlerin çözümüyle alakalıdır [38].

Bir analiz sonucunda gerçekleşen hata ( $\delta_S$ ), sayısal yaklaşımla hesaplan değer ( $S$ ) ile gerçekteki değeri ( $T$ ) arasındaki farktır. Bir önceki paragrafta da belirtildiği gibi analiz sonucundaki hata, sayısal ( $\delta_{SN}$ ) ve modelleme hatalarından ( $\delta_{SM}$ ) meydana gelmektedir.

$$\delta_S = S - T = \delta_{SN} + \delta_{SM} \quad (3.1)$$

Benzer şekilde analiz belirsizliği ( $U_S$ ) şu şekilde hesaplanabilir;

$$U_S = \sqrt{U_{SN}^2 + U_{SM}^2} \quad (3.2)$$

bu ifadede  $U_{SN}$  sayısal  $U_{SM}$  ise modelleme belirsizlikleridir.

#### 3.1.4.1 Doğrulama

Doğrulama, sayısal belirsizlik ( $U_{SN}$ ) ile sayısal hatanın ( $\delta_{SN}$ ) büyüklüğünün ve işaretinin yanında hata tahminindeki belirsizliğin belirlenmesi olarak ifade edilebilir. Sayısal hata ( $\delta_{SN}$ ), iteratif ( $\delta_I$ ) ve ağ yapısı ( $\delta_G$ ) hatalarından meydana gelir. Dolayısıyla sayısal belirsizlik ( $U_{SN}$ );

$$U_{SN} = \sqrt{U_I^2 + U_G^2} \quad (3.3)$$

şeklinde yazılabilir. Burada  $U_I$  iteratif  $U_G$  ise ağ yapısı belirsizlikleridir. İteratif belirsizlik ( $U_I$ ) şu şekilde hesaplanabilir;

$$U_I = \frac{1}{2} |S_U - S_L| \quad (3.4)$$

$S_U$  ve  $S_L$  değerleri sırasıyla; yakınsayan bir HAD analizinde hesaplanmakta olan bir parametrenin ardışık işlemlere bağlı olarak çizdirilen eğrisinde meydana gelen salınımlardaki en yüksek ve en düşük değerlerdir. İteratif belirsizlik ( $U_I$ ) bir sonraki paragrafta ifade edilecek olan ağ yapısı belirsizliğine ( $U_G$ ) göre oldukça küçük gerçekleştiğinden genellikle dikkate alınmamaktadır. Bu durumda sayısal belirsizlik ( $U_{SN}$ ) direkt olarak ağ yapısı belirsizliğine ( $U_G$ ) eşit olacaktır.

Sonlu hacimler tabanlı HAD yöntemlerinde oluşturulan ağ yapılarının hesaplanmak istenen değerler üzerindeki etkisi oldukça fazladır. Dolayısıyla HAD yöntemi ile hesaplanan bir fiziksel parametredeki hata ve belirsizlikte ağ yapısının etkisinin incelenmesi gerekir. Bu incelemenin yapılabilmesi için ağ elemanı boyutları belirli bir katsayıda değiştirilmiş en az üç tane olacak şekilde ağ elemanı yapısı oluşturulur. Sonuç olarak ağ oluşturma yaklaşımları aynı ancak eleman sayıları birbirlerinden farklı ağ yapıları ile HAD analizleri gerçekleştirilir ve bulunması istenen fiziksel parametre hesaplatılır. Bu fiziksel parametreler ve referans çalışmada ifade edilen ağ yapısı belirsizliği ( $U_G$ ) şu şekilde hesaplanır;

$$U_G = |C_G \delta_{RE_{G1}}| + |(1 - C_G) \delta_{RE_{G1}}| \quad (3.5)$$

Burada CG ağ yapısı düzeltme faktörü  $\delta_{RE_{G1}}$  ise Richardson ekstrapolasyon yaklaşımı hata değeridir.

Ağ düzeltme faktörü ( $C_G$ ) şu şekilde hesaplanır;

$$C_G = \frac{r_G^{p_G} - 1}{r_G^{p_{Gest}} - 1} \quad (3.6)$$

$r_G$  ağ tasfiye katsayısı olup Richardson ekstrapolasyon yaklaşımına göre bu tez çalışması kapsamında bu değer  $\sqrt{2}$  olarak kabul edilmiştir.  $p_G$  ise ağ yapısının doğruluk mertebesi olup şu şekilde hesaplanır;

$$p_G = \frac{\ln(\varepsilon_{32G} - \varepsilon_{21G})}{\ln(r_G)} \quad (3.7)$$

(3.7) numaralı denklemde geçen  $\varepsilon$ , oluşturulan her bir ağ elemanı ile hesaplanan ortalama sonuç değeri  $S_M$  değerlerinin farkıdır.  $\varepsilon$  değerinin indisi farkları alınan ağ yapılarını ifade etmektedir.  $S_M$  şu şekilde hesaplanır;

$$S_M = \frac{1}{2} |S_U + S_L| \quad (3.8)$$

ve dolayısıyla  $\varepsilon_{21G}$  şu şekilde elde edilir;

$$\varepsilon_{21G} = S_{M2} - S_{M1} \quad (3.9)$$

(3.5) numaralı denklemde yer alan Richardson ekstrapolasyon yaklaşımı hata değeri ise şu şekilde hesaplanmaktadır;

$$\delta_{RE_{G1}} = \frac{\varepsilon_{21G}}{r_G^{p_G} - 1} \quad (3.10)$$

### 3.1.4.2 Onaylama

HAD yöntemi ile hesaplanan bir fiziksel parametrenin bir deney sonucu ile onaylanması, uygulanan sayısal yöntemin güvenilirliğinin anlaşılması açısından gereklidir. Aksi halde HAD analizleri ile elde edilen çıkarımların doğruluğunun savunulması söz konusu olamamaktadır. Bir önceki bölümde de ifade edildiği gibi deney sonuçları ( $D$ ) da kendi içlerinde deney hataları ( $\delta_D$ ) barındırmaktadır. Dolayısıyla

sayısal yöntemlerle hesaplanan bir değer (S) ile deneyle hesaplanan aynı değer arasındaki ilişki şu şekilde olmalıdır;

$$D - \delta_D = S - \delta_S \quad (3.11)$$

Deney sonuçları ile yapılan karşılaştırmalı hata (E) değeri şu şekilde hesaplanır;

$$E = D - S \quad (3.12)$$

Bu tez çalışması kapsamında kullanılan deney sonuçları için deneysel hata ( $\delta_D$ ) değeri '0' kabul edilmiştir. Dolayısıyla (3.11) ve (3.12) numaralı denklemler göz önünde bulundurulduğunda karşılaştırmalı hata değeri (E) direkt olarak analiz hatasına ( $\delta_S$ ) eşit olacaktır. Bir önceki bölümde de ifade edildiği gibi analiz belirsizliklerinin yalnızca ağ hatası belirsizliklerinden ( $U_G$ ) oluştuğu kabul edildiğinden, (3.12) numaralı ifade ile elde edilen karşılaştırmalı hata değerinin bu belirsizlik değerinin içerisinde yer alması HAD analizini onaylayacaktır,  $|E| < |U_G|$ .

Tez çalışması kapsamında uygulanan HAD yöntemlerinin doğrulama ve onaylama çalışmaları, bu bölümde ifade edilen yöntemle gerçekleştirilmiştir.

### 3.2 Model Deneyleri

Önceki bölümlerde de ifade edildiği gibi, gemilerin direnç ve sevki konusunda hidrodinamik parametrelerin öngörüsü için uygulanan bütün yaklaşımlar içerisinde model deneyleri en güvenilir sonuçların alındığı yöntemdir. Günümüzde en çok kullanılan bir diğer öngörü yaklaşımı olan HAD yöntemleri ile alınan sonuçlar ancak deney sonuçları ile doğrulandığı zaman güvenilir sayılabilir. Deney sonuçları ile doğrulanmamış HAD yöntemi ile elde edilen sonuçlar hidrodinamik açıdan fikir vermesi bakımından faydalı olsalar da nihai dizayn, sevk parametreleri ve uygun pervane seçimi vb. gibi kritik durumlarda genel olarak dikkate alınmazlar.

Bu bağlamda tez çalışması kapsamında özetleme hesaplamaları da gerçekleştirilen 1:100 model ölçeğindeki Duisburg Test Case (DTC) gemi modelinin takıntısız durumdaki model deneyleri İTÜ Ata Nutku Gemi Model Deney Laboratuvarı'nda (Ata Nutku STML) farklı hızlar için gerçekleştirilmiştir. Literatürde daha öncesinde DTC gemisinin 1:59.407 ölçeğindeki modeli için El Moctar vd. tarafından Schiffbau-Versuchsanstalt Potsdam'da (SVA Potsdam) gerçekleştirilen model deneyleri bulunmaktadır [22]. Bu

bölümde farklı model ölçeklerinde gerçekleştirilen bu deneylerle elde edilen sonuçların karşılaştırılması da yapılmıştır.

### 3.2.1 DTC Gemi Modeli Üretim Süreçleri

Tam ölçekte 355 m uzunluğa sahip olan Duisburg Test Case Post-Panamax Container gemisinin üretilen 1:100 ölçekteki modelinin ve tam ölçekteki hidrostatik ve geometrik özellikleri Tablo-1’de verilmiştir. Tablo 3.1’de verilen ifadelerden  $L_{pp}$  dikmeler arası mesafeyi,  $B_{WL}$  su hattı genişliğini,  $T_m$  su çekimini,  $\Delta$  deplasmanı,  $C_B$  blok katsayısını,  $S_w$  ıslak yüzey alanını ve  $L_{CG}$  gemi ağırlık merkezinin boyuna konumunu ifade etmektedir.

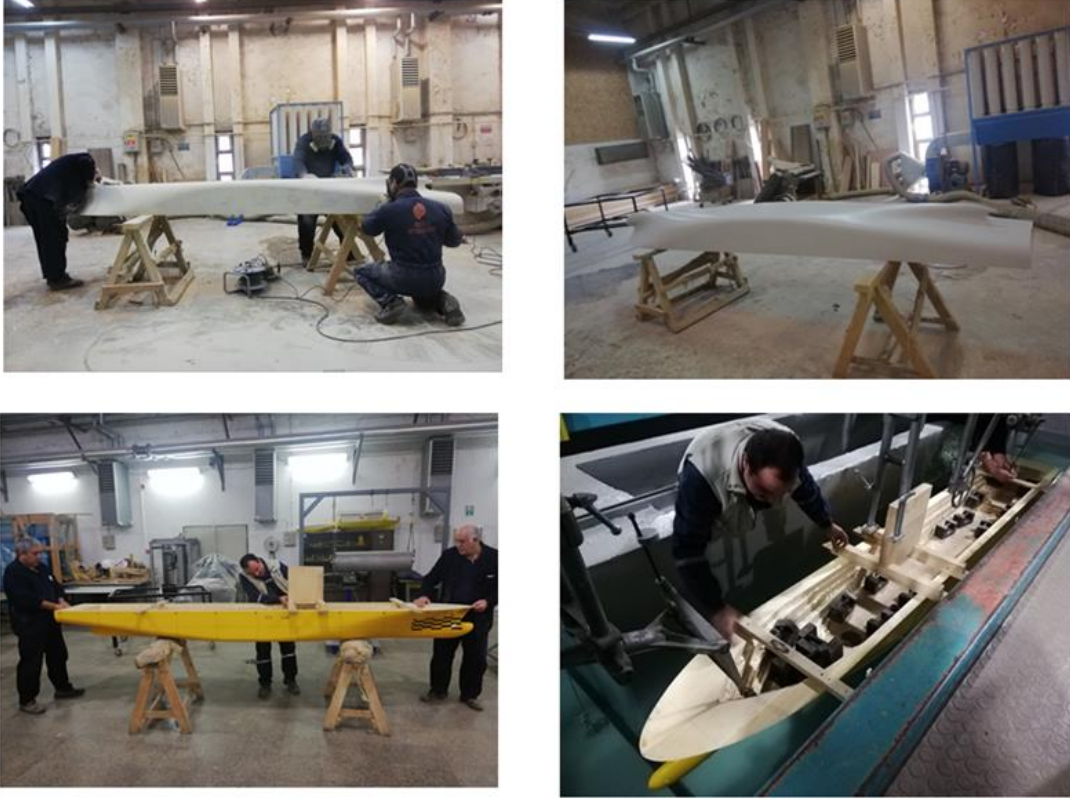
1/100 ölçeğindeki DTC modeli ITTC prosedürleri ve önerilerine sadık kalınarak üretilmiştir [39]. Ağaç model 5 eksenli CNC tezgahı ile işlenmiş, ardından zımparalama ve boyama işlemleri gerçekleştirilmiş ve son olarak da işaretlemeleri yapılarak deney için hazır hale getirilmiştir (bkz. Şekil 3.12).

**Tablo 3.1** DTC Gemisi ve Modelinin Temel Boyutları

Parametreler	$L_{BP}$	$B_{WL}$	$T_m$	$\nabla$	$C_B$	$S_w$	$L_{CG}$
Birimler	m	m	m	$m^3$	-	$m^2$	m
Tam Ölçek	355	51	14.5	173467	0.661	22032	174.06
Model 1:100	3.55	0.51	0.145	0.174	0.661	2.203	1.741

### 3.2.2 DTC Model Deneyleri

Ata Nutku Gemi Model Deney Laboratuvarı’nda yer alan çekme tankı 160 m uzunluğunda, 6 m genişliğinde ve 3.5 m derinliğindedir. Azami model hızı 5.5 m/s’ye kadar çıkabilmektedir. Ölçüm sistemi çekme arabası üzerinde yer almakta olup modele tek eksenli tam köprü strengaç dönüştürücüsü ile bağlanmıştır. Bu sistem sayesinde model dalıp-çıkma ve baş-kıç vurma hareketlerine serbest bir şekilde hareket edebilmektedir. Direnç deneyleri düşük hızdan yüksek hıza geniş bir hız yelpazesinde gerçekleştirilmiş, düşük hızlardan başlanarak servis hızına kadar ITTC önerilerine uyularak artırılmıştır [40][41]. Deneyi yapılan hızlar tam ölçek gemide 6.8-30.5 knot aralığına denk gelmektedir.



Şekil 3.12 DTC Modelinin İmalat ve Havuza İndiriliş Süreçleri

Tablo 3.2 DTC 1:100 Modeli Çekme Deneyi Sonuçları

V (m/s)	Fn	Rn * 10 <sup>-6</sup>	Trim (°)	Paralel batma (mm)	R <sub>T</sub> (N)	C <sub>T</sub> * 10 <sup>3</sup>
0.454	0.077	1.403	-0.036	2.85	1.170	5.150
0.589	0.100	1.820	-0.042	3.34	1.860	4.868
0.725	0.123	2.239	-0.044	3.40	2.780	4.808
0.836	0.142	2.582	-0.057	4.97	3.544	4.607
0.921	0.156	2.845	-0.064	5.29	4.168	4.463
1.014	0.172	3.132	-0.076	6.10	4.787	4.230
1.126	0.191	3.478	-0.092	6.50	5.804	4.159
1.211	0.205	3.740	-0.106	6.37	6.784	4.203
1.273	0.216	3.932	-0.113	7.09	7.582	4.251
1.401	0.237	4.327	-0.124	8.35	9.181	4.250
1.510	0.256	4.664	-0.141	9.93	10.830	4.315

DTC 1:100 modelinin çekme deneylerine hazır hale getirilmesinin ardından farklı hızlarda çekme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Çekme deneylerinde model; boyuna öteleme, dalıp-çıkma ve baş-kıç vurma hareketleri olmak üzere üç serbestlik derecesinde hareket etmektedir. Yapılan çekme deneylerinin sonucunda elde edilen toplam direnç değerleri Tablo 3.2'deki gibi ölçülmüştür.

### 3.2.3 Deney Sonuçlarının Literatürdeki Deneylerle Karşılaştırılması

Hughes yaklaşımına göre aynı Froude sayısında farklı ölçekteki modellerin dalga yapıları ve dalga direnç katsayıları aynı olmaktadır. Bu bilgiye dayanarak gerçekleştirilen model deneyleri ile elde edilen toplam direnç değerleri bileşenlerine ayrıştırılarak, dalga direnci bileşenleri SVA Potsdam'da 1:59.407 ölçeğinde gerçekleştirilen deneyler sonucunda elde edilen değerler ile karşılaştırılmıştır [22].

Hughes'in yaklaşımına göre gemi toplam direnci ( $R_T$ ) üç bileşenden oluşmaktadır:

$$R_T = R_F + R_{PV} + R_W \quad (3.13)$$

Burada  $R_F$  sürtünme direncini,  $R_{PV}$  ise viskoz basınç direncini,  $R_W$  ise dalga direncini ifade etmektedir. Sürtünme direnci şu ifade ile hesaplanabilir:

$$R_F = \frac{1}{2} \rho S V^2 C_F \quad (3.14)$$

Burada  $\rho$  su yoğunluğunu,  $S$  modelin ıslak alanını,  $V$  model hızını,  $C_F$  ise sürtünme direnci katsayısını ifade etmektedir.

Sürtünme direnci katsayısı  $C_F$ , ITTC 57 Korelasyonu ile hesaplanabilir;

$$C_F = \frac{0.075}{(\log Rn - 2)^2} \quad (3.15)$$

Bu denklemdeki  $Rn$ , Reynolds sayısını ifade etmekte olup şu şekilde hesaplanmaktadır;

$$Rn = \frac{VL}{\nu} \quad (3.16)$$

$\nu$  kinematik viskoziteyi ifade etmektedir. Bir diğer bileşen viskoz basınç direnci  $R_{PV}$ ;

$$R_{PV} = k R_F \quad (3.17)$$



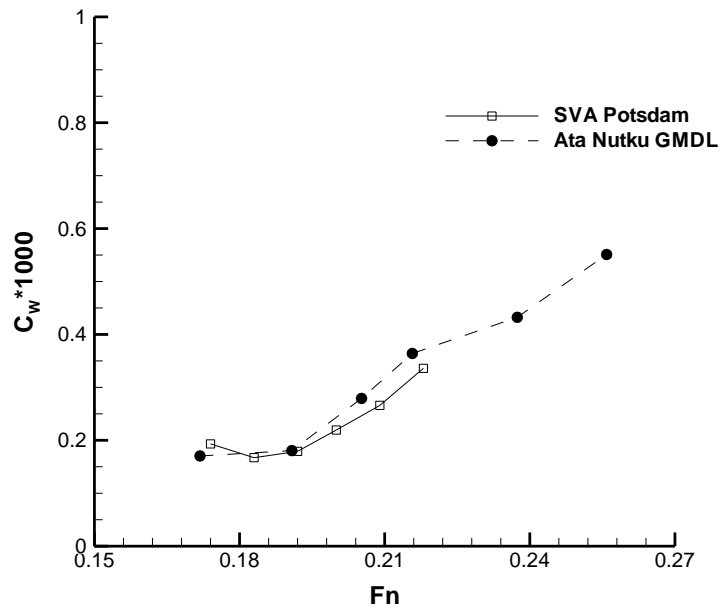
denklemleri ile hesaplanmaktadır. Buradaki  $k$  form faktörü olup, DTC gemisi için form faktörü değeri referans bilimsel makalede yer alan sayısal çalışmada  $\lambda=59.407$  ölçeğindeki model için  $k=0.094$  olarak ifade edilmektedir [22]. Form faktörü Watanabe tarafından önerilen şu ifade ile de hesaplanabilir;

$$k = -0.095 + \frac{25.6 C_B}{(L/B)^2 \sqrt{B/T}} \quad (3.18)$$

Toplam direnç bileşenlerinden ikisinin bu şekilde belirlenmesinin ardından, dalga direnci bileşeni ( $R_w$ ) bulunur. Buradan da dalga direnç katsayısı  $C_w$  şu ifade ile belirlenebilir:

$$C_w = \frac{2R_w}{\rho S V^2} \quad (3.19)$$

El Moctar tarafından  $\lambda=59.407$  model ölçeğinde yapılan deneysel çalışma ile elde edilen dalga direnç katsayıları ile Ata Nutku Deney Laboratuvarı'nda yapılan  $\lambda=100$  ölçeğinde yapılan mevcut çalışma ile elde edilen dalga direnç katsayılarının karşılaştırılması Şekil 3.13'teki gibi olmuştur.



Şekil 3.13 Deneysel Çalışmalarla Elde Edilen Dalga Direnç Katsayılarının Karşılaştırılması

Şekil 3.13'ten de anlaşılacağı gibi DTC gemisi için tez kapsamında Ata Nutku Gemi Model Deney Laboratuvarı'nda gerçekleştirilen deney sonuçları ile SVA Potsdam'da gerçekleştirilen deneylerde ölçülen sonuçlar birbirleriyle uyumludur.

### 3.2.4 Deney Belirsizliği

Deney sonuçlarının güvenilirliği tayini için deney şartlarında ortaya çıkan belirsizlik kaynaklarının sonuçlar üzerindeki etkisi incelenmesi ve bu belirsizlik kaynaklarının sonuçlar üzerindeki etkisi nicelik olarak da hesaplanmalıdır. Bu bölümde Ata Nutku Gemi Model Deney Laboratuvarı'nda gerçekleştirilen model çekme deneylerinin belirsizlik analizi gerçekleştirilmiştir. Direnç testlerinin belirsizlik analizi için literatürde birçok yöntem mevcut olup bu tez çalışmasında ITTC tarafından 2014 yılında yayımlanan metot kullanılmıştır [42]. Bu metoda göre deneysel belirsizlik hesaplanırken sonuçlar üzerinde baskın etkileri olan belirsizlik kaynakları irdelenirken, küçük etkileri olan belirsizlik kaynakları ise ihmal edilebilmektedir. Tez kapsamında gerçekleştirilen model çekme deneylerinde baskın olan deneysel belirsizlik kaynakları model geometrisi, deney düzeneğinin kurulumu, ölçüm sistemlerinin kalibrasyonu, ölçüm ve veri indirilmesi olarak sıralanabilir [37].

Model imalatında meydana gelen belirsizlikler ( $u'_1(R)$ ), ıslak yüzey alanı ( $u'_{11}(R)$ ) ve form boyunda ( $u'_{12}(R)$ ) oluşan belirsizliklerden kaynaklanmaktadır. Sözü geçen bu belirsizlikler arasındaki ilişki ise şu şekildedir:

$$u'_1(R) = \sqrt{(u'_{11}(R))^2 + (u'_{12}(R))^2} \approx 2/3 u'(\Delta) \quad (3.20)$$

Bir diğer belirsizlik kaynağı ise ölçüm sisteminin kalibrasyonundan kaynaklanan belirsizlik bileşenidir ( $u_2(R_T)$ ). Bu belirsizlik bileşeni Standart Hata Tahmini (Standard Error Estimation, SEE) yöntemi ile hesaplanabilir. SEE değerinin hesaplanması için literatürde bulunan referans kaynak incelenebilir [43].

Deney suyu sıcaklığının ölçümünden kaynaklı hataların su yoğunluğu üzerindeki etkisi ihmal edilebilir düzeydedir. Fakat bu hataların suyun viskozite değeri üzerinde etkisi yüksektir. Sıcaklık ölçümünden kaynaklanan viskozite belirsizliğinin toplam direnç katsayısı üzerindeki etkisi bağıl olarak şu şekilde belirlenir [42]:

$$u_3'(R_T) = \frac{C_F}{C_T} \frac{0.87}{\log_{10} Rn - 2} u'(v) \quad (3.21)$$

Burada  $u'(v)$  termometre ölçüm hassasiyetinin viskozite değeri üzerindeki etkisidir. Çekme arabasının hızındaki belirsizlik ölçülen toplam direnç değerini etkilemektedir. Çekme arabası hızının belirsizliği  $u'_4(R_T)$ , dinamik basınçların belirsizliği  $u'_{41}(R_T)$  ve Reynolds sayısının belirsizliği  $u'_{42}(R_T)$  değerleri cinsinden şu şekilde ifade edilebilir:

$$u_4'(R_T) = \sqrt{(u'_{41}(R_T))^2 + (u'_{42}(R_T))^2} \approx 2u'(V) \quad (3.22)$$

Tek bir deney ( $\hat{R}_T$ ) ve tekrarlı deneyler ( $\bar{R}_T$ ) için standart belirsizlik bileşeni, ölçüm sonuçlarındaki standart sapma değeri kullanılarak sırasıyla şu şekilde belirlenir:

$$u'_A(\hat{R}_T) = \frac{StDev}{\hat{R}_T} \quad (3.23)$$

$$u'_A(\bar{R}_T) = \frac{StDev/\bar{R}_T}{\sqrt{N}} \quad (3.24)$$

Burada N tekrar edilen deney sayısıdır. Böylece direnç deneyi için bileşik belirsizlik değeri  $u_c'(R_T)$  şu şekilde hesaplanır:

$$u_c'(R_T) = \sqrt{(u_1')^2 + (u_2')^2 + (u_3')^2 + (u_4')^2 + (u_A')^2} \quad (3.25)$$

Genişletilmiş standart belirsizlik ise şu şekilde belirlenir:

$$U_{R,\%t} = t \cdot u_R \quad (3.26)$$

Burada t güvenlilik katsayısı olup, birçok mühendislik uygulamalarında değerlerin %95'ini içerecek şekilde 2 olarak alınmaktadır [37]. Bu durumda %95 güvenlilik için toplam direnç değeri şu şekilde ifade edilir:

$$\bar{R} \pm U_{R,95} \quad (3.26)$$

Yukarıda ifade edilen yaklaşımla  $Fn=0.256$  hız değeri için deneysel belirsizlik analizi gerçekleştirilmiş ve sonuçlar Tablo 3.3'te verilmiştir.

Tablo 3.3'te görüldüğü üzere tekrarlı testlerin standart sapması sonuçlar üzerinde baskın bir belirsizlik kaynağıyken diğer belirsizlik bileşenlerinin sonuçlar üzerindeki etkisi ihmal edilebilir düzeydedir. Sonuç olarak DTC 1:100 modelinin  $Fn=0.256$  için toplam

direnç değeri genişletilmiş belirsizlik değeri ile birlikte '10.83 N ± %1.10' olarak belirlenmiştir.

**Tablo 3.3** DTC 1:100 Modelinin  $F_n=0.256$  Hızında Hesaplanan Deneysel Belirsizlik Değerleri

Belirsizlik Bileşenleri	Sembol	%CT-Ort.	Yorum
Islak yüzey alanı	$u_1'(R_T)$	%0.03	İhmal edilebilir
Dinamometre	$u_2(R_T)$	%0.03	İhmal edilebilir
Su sıcaklığı	$u_3'(R_T)$	%0.06	İhmal edilebilir
Hız	$u_4'(R_T)$	%0.07	İhmal edilebilir
Tekrarlı test, standart sapma	$u'_A(\hat{R}_T)$	%1.33	Baskın
Birleşik belirsizlik (N=1)	$u'_A(tek)$	%1.33	
Tekrarlı test, Ort. Standart sapma (N=6)	$u'_A(\overline{R}_T)$	%0.54	
Birleşik belirsizlik (N=6)	$u'_A(ort.)$	%0.55	
Genişletilmiş belirsizlik (t=2)	$U_{R,95}$	%1.10	

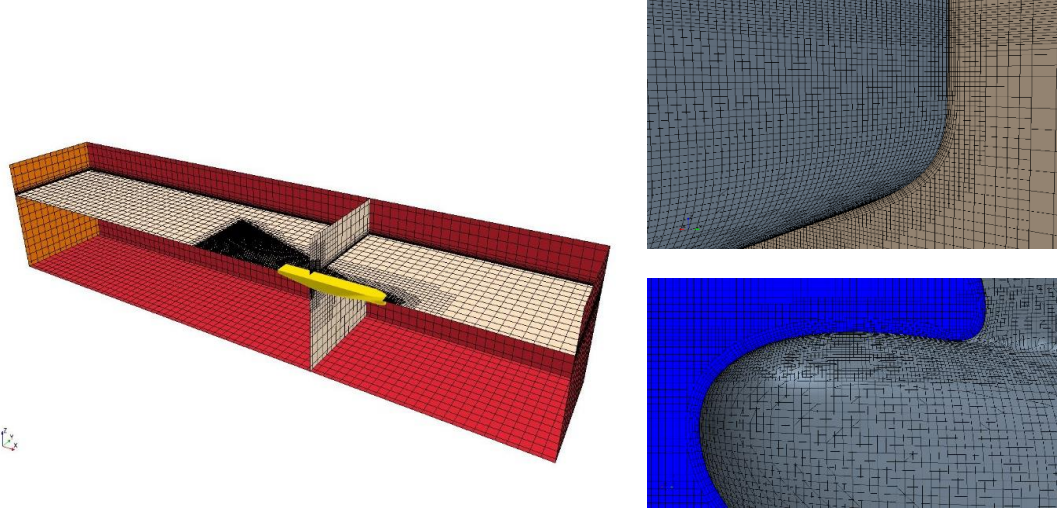
### 3.3 Uygulanan HAD Yaklaşımının Deneyle Doğrulanması

Bir sonraki işlem model deneyleri yapılan 1:100 ölçekli DTC gemi modelinin tez kapsamında uygulanan HAD yaklaşımıyla ve deneydeki aynı servis hızlarında akış analizlerinin gerçekleştirilmesidir. Deneysel çalışmada yer alan en yüksek 6 hız değeri seçilerek bu hızlarda takıntısız model için HAD analizleri gerçekleştirilmiştir.

#### 3.3.1 Deney Şartlarında Gerçekleştirilen HAD Analizleri

HAD analizleri için gerekli akış çevresi ITTC standartlarına sadık kalınarak oluşturulmuştur. Fazla ağ elemanı sayısından kaçınmak için akış çevresi modelin boyuna doğrultuda yarım olarak modellenmiş ve akış çevresinde oluşturulan ağ elemanlarının genel görüntüsü Şekil 3.14'teki gibi olmuştur.

HAD analizleri zamandan bağımsız (daimi akış) şekilde gerçekleştirilmiştir. Türbülans modellemesi için k-ε türbülans modeli kullanılmış ve çift fazlı akış VOF yöntemi kullanılarak modellenmiştir. Şekil 3.15'te  $Fn=0.256$  hızında deney ve HAD analizi sonucunda elde edilen serbest su yüzeyi deformasyonları görülmektedir.

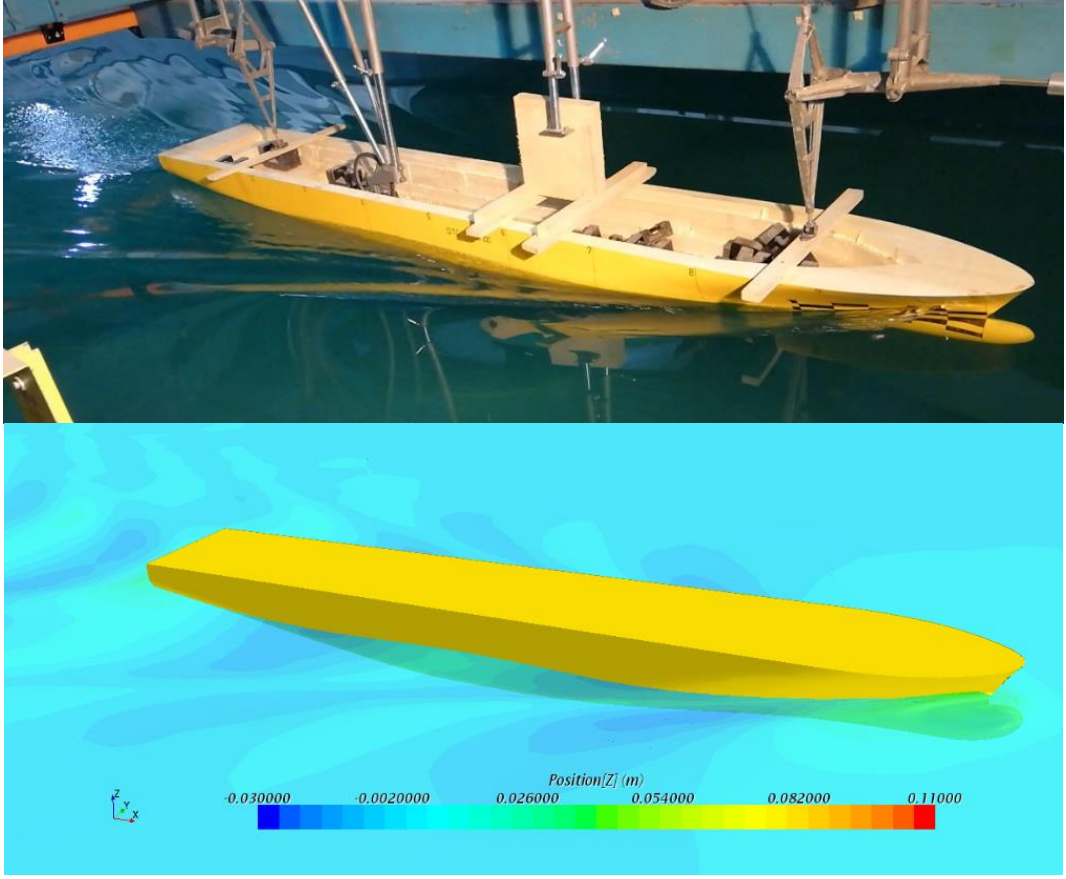


**Şekil 3.14** DTC 1:100 Modeli HAD Analizi için Oluşturulmuş Ağ Elemanları

Şekil 3.16'da ise deneysel sonuçları ve HAD yöntemi ile elde edilen takıntısız model deney toplam direnç değeri sonuçlarının karşılaştırılması görülmektedir.

### 3.3.2 Uygulanan HAD Yaklaşımı için Doğrulama ve Onaylama Çalışması

Tez kapsamında uygulanan HAD yaklaşımı ile elde edilen sonuçların deneyle elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmasında yalnızca Şekil 3.16'da yer alan eğriler üzerinden yorumlama yapmak doğru olmayacaktır. HAD yönteminin deney sonuçları kullanılarak doğrulama ve onaylama çalışmasının yapılması, uygulanan sayısal yaklaşımın geçerliliği hakkında daha güvenilir bilgiler verecektir. Bu bağlamda bir önceki bölümde ifade edilen yaklaşım ile doğrulama ve onaylama çalışması gerçekleştirilmiştir.  $Fn=0.256$  hızı dikkate alınarak, Richardson ekstrapolasyon tekniğinin uygulanabilmesi için eleman boyutları ' $r_G = \sqrt{2}$ ' oranında değişecek şekilde üç farklı ağ yapısı oluşturulmuştur. Tablo 3.4'te oluşturulan ağ yapılarıyla ilgili bilgiler ve bu ağ elemanları ile alınan sonuçlar verilmiştir.

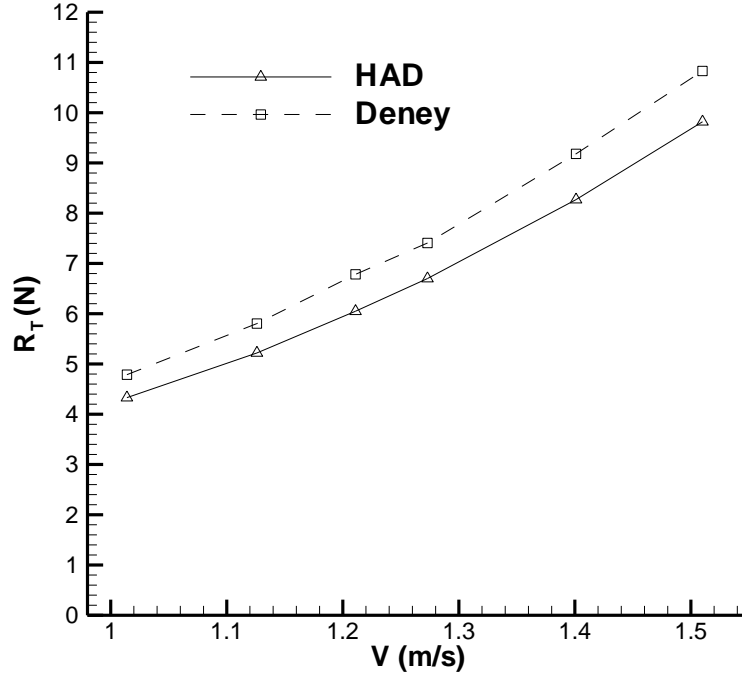


**Şekil 3.15** DTC 1:100 Modeli için  $F_n=0.256$  Hızında Deneyde ve HAD Analizinde Meydana Gelen Serbest Su Yüzeyi Deformasyonları

**Tablo 3.4** Oluşturulan Ağ Elemanları ile Elde Edilen Toplam Direnç Değerleri

	<b>Ağ-3</b>	<b>Ağ-2</b>	<b>Ağ-1</b>
<b>Ağ Elemanı Sayısı</b>	0.634M	1.764M	5.004M
<b><math>S_G(N)</math></b>	10.17	9.82	9.55

Tablo 3.4'te yer alan Ağ-2 baz alınarak belirsizlik analizi çalışması gerçekleştirilmiş ve %11SG ağ belirsizliğinde monoton yakınsama elde edilmiştir. Tablo 3.4'ten de anlaşılacağı gibi daha yüksek ağ elemanı sayılarında daha düşük belirsizlik değerleri elde edilebilecektir. Ancak bu durum analiz sürelerini uzatacak ve sonuç almayı daha zor bir hale getirecektir. Tablo 3.5'te yapılan doğrulama ve onaylama çalışması sonucunda elde edilen değerler görülmektedir.



**Şekil 3.16** DTC 1:100 Modeli için HAD Yaklaşımı ile Elde Edilen Sonuçların Deney Sonuçları ile Karşılaştırılması

**Tablo 3.5** Doğrulama ve Onaylama Çalışması Parametreleri

$\epsilon_{21}$	$\epsilon_{32}$	$R_{G2}$	$r_G$	$p_G$	$\delta_{RE}$	$C_G$	$U_G$
0.27	0.35	0.771	1.414	0.749	1.181	0.296	1.181

$F_n=0.256$  hızında toplam direnç değeri deneyle  $D=10.83$  ölçülürken, Tablo-4'te de görülebildiği üzere HAD yaklaşımında Ağ-2 ile elde edilen toplam direnç değeri  $S_G=9.82$  olmuştur. Bu durumda hata değeri  $|E|=1.01$  olmaktadır. Ağ belirsizliği  $U_G=1.181$  olmuştur. Hata değeri belirsizlik değerinin içerisinde olduğundan ( $|E| < U_G$ ) HAD yaklaşımı ile elde edilen sonuçlar deney sonuçları ile onaylanmıştır. Uygulanan HAD yaklaşımının deney sonuçları ile doğrulanması, tezin ilerleyen bölümlerinde aynı yaklaşımla analiz edilecek gemiler için elde edilecek sonuçların güvenilirliği açısından önemlidir. Bunun yanında ilerleyen bölümlerde incelenecek her gemi için, literatürde bulunan deney sonuçları kullanılarak doğrulama ve onaylama çalışması gerçekleştirilmiştir.

## İÖHY ve Uygulamaları

---

### 4.1 İteratif Özitme Hesaplama Yönteminin Genel İfadesi

Gemilerin özitme noktalarının belirlenmesi için yapılan havuz deneylerinin zorluğu ve yüksek bütçeli olmaları, araştırmacıları özellikle ön dizayn aşamalarında farklı çözüm yollarına yönlendirmektedir. Hesaplamalı akışkanlar dinamiği bu alanda faydalı bir yöntem olup, deney sonuçları ile uyumlu sonuçlar vermektedir. Ancak HAD yaklaşımı ile yapılan özitme noktası hesaplamaları yüksek Reynolds sayısı, pervane bölgesi için özel çözüm yöntemleri gibi nedenlerden dolayı uygulanması nispeten zor ve bunun yanında yüksek işlemci kapasitesi gerektiren uygulamalardır.

Bu tez çalışması kapsamında özitme noktası hesaplamaları için alternatif bir sayısal yaklaşım geliştirilmiş, bu yöntemin pratik bir şekilde uygulanabilmesi için bir kod ve kullanımının kolay olması için bir kullanıcı dostu bir arayüz oluşturulmuştur. Geliştirilen yeni yöntem çözüm yapısından dolayı İteratif Özitme Hesaplama Yöntemi (İÖHY) adı verilmiştir. İÖHY ile bir deniz taşıtının ve pervanesinin belirli hidrostatik ve hidrodinamik özellikleri bilindiğinde özitme noktası hesabı yapılabilmektedir. Model ölçeğindeki deniz taşıtının temel hidrostatik özellikleri (boy, genişlik, su çekimi ve blok katsayısı gibi) yanında İÖHY ile özitme noktası hesaplamaları yapabilmek için ihtiyaç duyulan dört parametre şunlardır:

- Pervanesiz durumdaki direnç ( $R_T$ ): Deniz taşıtının pervanesiz durumdaki direnç değeri; model deneyleri, HAD yöntemi veya ampirik bağıntılarla hesaplanabilmektedir.
- İz katsayısı ( $w$ ): Model deneyleri ve HAD yöntemleri ile belirlenebilir. Ayrıca literatürde gemilerin iz katsayılarını öngören ampirik bağıntılar bulunmaktadır.
- Açık-su pervane eğrileri: Açık-su pervane eğrilerinin elde edilmesinin en güvenilir yolu yine açık-su pervane model deneyleridir. Bunun yanında sonlu hacimler metodu veya potansiyel akış tabanlı HAD yaklaşımlarıyla da hesaplanabilir.



- İtme azalması katsayısı ( $t$ ): İtme azalması model deneyleri ve HAD Yöntemi ile hesaplanabilir. Ayrıca literatürde itme azalması parametresini öngören ampirik bağıntılar mevcuttur.

Modelin temel hidrostatik özellikleri ile beraber yukarıda ifade edilen dört hidrodinamik parametrenin bilinmesi durumunda aşağıda geniş bir şekilde ifade edilen yaklaşımın uygulanmasıyla özitme noktası parametreleri hesaplanabilecektir.

Pervaneli durumdaki modelin istenilen servis hızında gidebilmesi için direncinin pervane tarafından üretilen itme kuvveti ile karşılanması gerekmektedir. Dolayısıyla eşitliğin bir bölümü deniz taşıtı modeline etkiyen direnç kuvvetinden ( $R_{T_{P_m}}$ ), diğer bölümü ise pervanenin ürettiği itme kuvvetinden ( $T_m$ ) oluşmaktadır. Ancak bu hesaplamalar model boyutunda yapıldığından, gerçek boyuttaki deniz taşıtının özitme parametreleri hesaplanırken ITTC tarafından önerilen yüzey sürtünme doğrulaması (SFC) değerinin hesaba katılması gerekmektedir [44]. Bu durumda modele etkiyen toplam direnç kuvveti, pervane itmesi ve yüzey sürtünmesi doğrulaması değerlerinden oluşan eşitlik şu şekilde olmaktadır;

$$T_m = R_{T_{P_m}} - SFC \quad (4.1)$$

$R_{T_{P_m}}$  pervaneli durumdaki model direnci olup, pervanesiz durumdaki model direnci  $R_{T_m}$  ve itme azalması katsayısı ( $t$ ) değeri bilindiğinde şu şekilde hesaplanır:

$$R_{T_{P_m}} = \frac{R_{T_m}}{(1 - t)} \quad (4.2)$$

Yüzey sürtünmesi doğrulaması değeri SFC ise aşağıdaki bağıntı ile hesaplanır;

$$SFC = \frac{1}{2} \rho S_m V_m^2 (C_{T,m} - C_{T,s}) \quad (4.3)$$

$C_{T,M}$  ve  $C_{T,S}$  belirli bir servis hızında pervanesiz durumda ve aynı Froude sayısındaki model ve gerçek geminin toplam direnç katsayılarını simgelemektedir. Toplam direnç katsayısı;

$$C_T = \frac{2 R_T}{\rho S V^2} \quad (4.4)$$

bağıntısı ile elde edilir. Burada  $\rho$  su yoğunluğunu ( $\text{kg/m}^3$ ),  $S$  ıslak yüzey alanını ( $\text{m}^2$ ),  $V$  ise modelin veya geminin servis hızını ( $\text{m/s}$ ) ifade etmektedir. Modelin toplam direnç katsayısı değeri ( $C_{T,M}$ ) (4.4) numaralı denklem kullanılarak direkt olarak hesaplanabilir.

Tam ölçekteki geminin toplam direnç katsayısına ( $C_{T,S}$ ) ise Hughes yaklaşımı kullanılarak geçilebilmektedir. Gerçek geminin toplam direnç katsayısı şu şekilde bileşenlerine ayrılabilir:

$$C_{T,S} = C_{F,S} + C_{PV,S} + C_{W,S} \quad (4.5)$$

Burada  $C_{F,S}$  geminin sürtünme direnç katsayısını,  $C_{PV}$  geminin viskoz basınç direnç katsayısını ve  $C_W$  ise dalga direnç katsayısını simgelemektedir.

Hughes yaklaşımına göre bir geminin farklı model ölçeklerinde, aynı Froude sayısındaki dalga yapıları ve dalga direnç katsayıları aynı olmaktadır. Bu durumda (4.5) numaralı denklemde yer alan  $C_{W,S}$  değeri model ölçüğünde hesaplanan değer ( $C_{W,M}$ ) ile aynı olacaktır. Bir geminin Froude sayısı ise şu şekilde belirlenmektedir;

$$Fn = \frac{V}{\sqrt{gL}} \quad (4.6)$$

burada  $g$  yerçekimi ivmesi,  $V$  modelin veya geminin hızı ve  $L$  ise modelin veya geminin boyudur.

(4.5) numaralı bağıntıda hesaplanması gereken bir diğer parametre, gerçek geminin sürtünme direnç katsayısı  $C_{F,S}$  değeridir. Geminin sürtünme direnci katsayısı (4.7) numaralı bağıntı ile ifade edilen ITTC korelasyonu ile belirlenebilir [45]:

$$C_F = \frac{0.075}{(\log Rn - 2)^2} \quad (4.7)$$

Bu durumda (4.5) numaralı denklemde bilinmeyen tek parametre geminin viskoz basınç direnç katsayısıdır. Viskoz basınç direnç katsayısı  $C_{PV,S}$  şu şekilde hesaplanabilmektedir:

$$C_{PV,S} = k C_{F,S} \quad (4.8)$$

(4.8) numaralı denklemde  $k$ , form faktörünü simgelemektedir. Form faktörü model deneyleri ve HAD yöntemi ile belirlenebildiği gibi literatürde bulunan ve Watanabe

(1986) tarafından önerilmiş ampirik ifade ile de yaklaşık olarak hesaplanabilmektedir. Tez kapsamında geliştirilen yöntem ile model deneyi ve HAD yöntemi uygulamadan özitleme noktası hesabı yapılabilmesi hedeflendiğinden, İÖHY kapsamında yapılan özitleme hesaplamalarında form faktörü Watanabe tarafından önerilmiş (4.9) numaralı denklem ile hesaplanabilmektedir:

$$k = -0.095 + \frac{25.6 C_B}{(L/B)^2 \sqrt{B/T}} \quad (4.9)$$

Söz konusu ampirik bağıntıda  $C_B$  geminin blok katsayısını,  $B$  genişliğini ve  $T$  ise su çekimini ifade etmektedir. (4.5) numaralı denklemin son bilinmeyen olan geminin viskoz basınç direnç katsayısı değeri de belirlenmesiyle geminin toplam direnç katsayısı hesaplanmış olmaktadır. Geminin toplam direnç katsayısının belirlenmesinin ardından ise (4.3) numaralı denklem ile yüzey sürtünmesi doğrulaması (SFC) değeri de bulunmuş olacaktır.

Böylelikle (4.1) numaralı eşitliğin sağ tarafı yani direnç ile ilgili olan bölümü tamamen hesaplanmış olmaktadır. Eşitliğin sol tarafı yani pervane ile ilgili bölümünde yer alan model pervane itmesi, şu şekilde ifade edilebilir;

$$T_m = K_T \rho n_m^2 D_m^4 \quad (4.10)$$

(4.10) numaralı denklemde gerekli olan model pervane itme kuvveti ( $T_m$ ), su yoğunluğu ( $\rho$ ) ve model pervane çapı ( $D_m$ ) değerleri bilinirken, pervane itme katsayısı ( $K_T$ ) ve model pervane devir sayısı ( $n_m$ ) değerleri bilinmemektedir. Bir başka deyişle bir denklemde, iki bilinmeyen bulunmaktadır.

Açık-su pervane grafiklerinde yer alan  $K_T$  eğrisinden eğri uydurma yöntemi ile eğri denklemi çıkarılabilir ve bu sayede  $K_T$ ,  $J$ 'nin bir fonksiyonu olarak yazılabilir,  $K_T=f(J)$ . Pervane ilerleme katsayısı  $J$ 'nin;

$$J = \frac{V_{Am}}{n_m D_m} \quad (4.11)$$

olduğu bilinmektedir. Burada  $V_{Am}$ , model pervane düzlemine gelen ortalama hız değeri olup şu şekilde bulunur:

$$V_{Am} = V_m (1 - w) \quad (4.12)$$

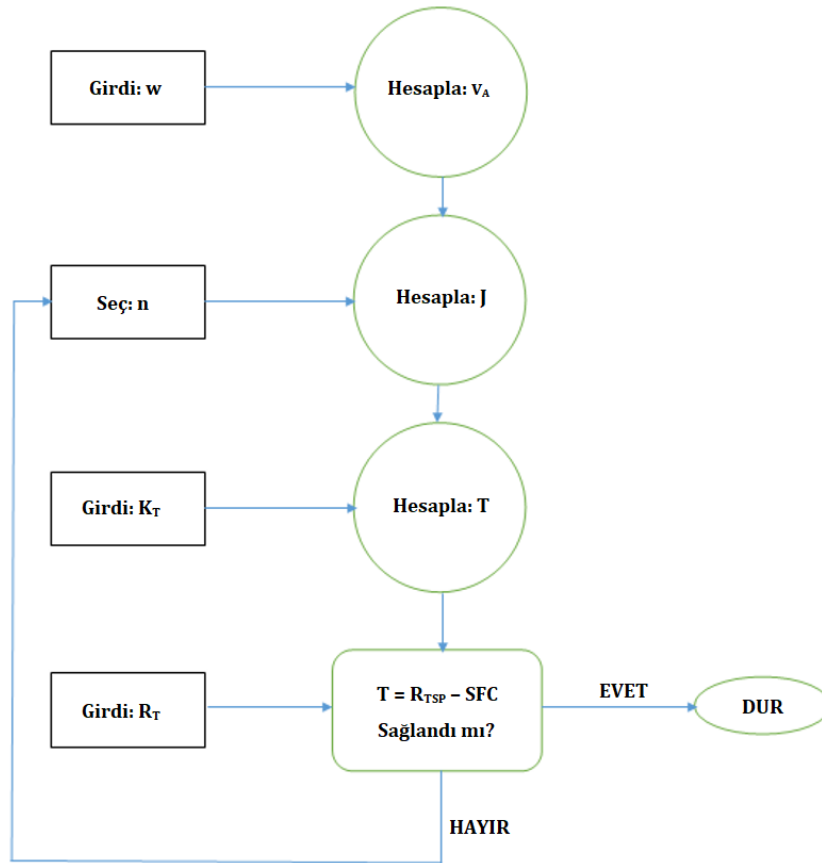
burada  $w$  iz katsayısıdır ve yöntemin uygulanabilmesi için bilinen girdi değerlerinden biridir. (4.12) numaralı denklemle  $V_{Am}$  değerinin de bulunmasının ardından (4.11) numaralı denklem göz önünde bulundurulursa pervane ilerleme katsayısının ( $J$ ), model pervane devir sayısının ( $n_m$ ) bir fonksiyonu olarak yazılabileceği görülebilir,  $J=f(n_m)$ . Dolayısıyla pervane itme katsayısı ( $K_T$ ), model pervane devir sayısının ( $n_m$ ) bir fonksiyonu haline gelmiş olur ( $K_T=f(n_m)$ ). Bu durumda (4.10) numaralı denklem şu şekilde yazılabilir;

$$T_m = f(n_m)\rho n_m^2 D_m^4 \quad (4.13)$$

(4.13) numaralı denklem (4.1) numaralı denklemde yerine koyulursa;

$$R_{T_{P_m}} - SFC = f(n_m)\rho n_m^2 D_m^4 \quad (4.14)$$

halini alır.



Şekil 4.1 İÖHY için Akış Diyagramı [34]

(4.14) numaralı denklem bu haliyle ‘bir denklem-bir bilinmeyen’ haline dönüştürülmüş olup çeşitli sayısal yöntemlerle çözülebilir hale getirilmiştir. Model pervane devrinin bu şekilde hesaplanmasının ardından buna bağlı olarak pervane ilerleme katsayısı ( $J$ ), itme katsayısı ( $K_T$ ), tork katsayısı ( $K_Q$ ) ve açık-su pervane verimleri ( $\eta_0$ ) bulunabilmektedir. Şekil 4.1’de İÖHY için oluşturulmuş akış diyagramı görülmektedir.

Yukarıda anlatılan matematiksel altyapıyı kullanarak özitme hesaplamaları yapan yöntemin, pratik bir şekilde kullanılabilmesi için kullanıcı dostu arayüze sahip iki farklı sürümde kodlar geliştirilmiştir. Geliştirilen kodun çalışma prensipleri ve kullanım açıklamaları bir sonraki bölümde geniş bir şekilde ifade edilmiştir.

## 4.2 İÖHY Tabanlı Özitme Hesaplama Kodu

Doktora tezi kapsamında geliştirilen İÖHY’nin hem pratik bir şekilde uygulanabilmesi hem de yöntemin içeriğinin bilinmeden diğer kullanıcılar tarafından da kullanılabilmesi için bir kod geliştirilmiştir. Yazılan kodun kullanımının daha da kolay olması için kullanıcı dostu bir arayüz oluşturulmuştur. Bu bölümde geliştirilen kodun söz konusu arayüzle nasıl kullanılacağı, bir önceki bölümde ifade edilen matematiksel ifadelerin de yardımıyla geniş bir şekilde açıklanmıştır.

Tez kapsamında geliştirilen İÖHY ile çalışan iki farklı sürümde kodlar geliştirilmiştir. Bunlardan ilki itme azalması, iz katsayısı ve form faktörü gibi değerleri girdi olarak istememekte ve bu bölümde ifade edilecek olan ampirik bağıntılarla kendisi hesaplanmaktadır. Birinci sürüm bu yönü ile daha çok genel kullanıcı kitlesine hitap etmektedir.

İkinci sürüm ise daha çok gemi hidrodinamiği konusunda belirli bir bilgi birikimine sahip kullanıcılara yöneliktir. İkinci sürüm de aynı ilk koddaki matematiksel altyapı ile çalışsa da itme azalması, iz katsayısı ve form faktörü değerlerini kullanıcıdan girmesini istemektedir. Bunun sebebi ise bu parametrelerin gerçek değerlerine ne kadar yakın girilirse elde edilecek özitme parametrelerinin o kadar doğru hesaplanacak olmasıdır. Dolayısıyla söz konusu parametrelerin kullanıcı tarafından farklı yöntemlerle hesaplanarak veya bilgi birikimini kullanarak yaklaşık olarak girilmesi gerekmektedir. Ayrıca birinci sürümdeki itme azalması, iz katsayısı ve form faktörü için kullanılan ampirik bağıntılar yalnızca gemiler için geçerli olup, denizaltılar için kullanılamamaktadırlar. Bu sebeple İÖHY bir denizaltı için kullanılacaksa ikinci

sürümün kullanılması gerekmektedir. Şekil 4.2 ve Şekil 4.3'te sırasıyla geliştirilen kodun iki sürümünün arayüzleri görülmektedir.

Model Girdileri		Açık-Su Pervane Eğrileri	
Model Boyu (L) (m)	Pervane Sayısı	KT Eğrisi	KQ Eğrisi
Model Geniliği (B) (m)	Model Hızı (m/s)	k0	g0
Model Su Çekimi (T) (m)	Pervanesiz Modelin Toplam Direnci	k1	g1
Blok Katsayısı (CB)	Model Ölçeği	k2	g2
Model Islak Yüzey Alanı (S) (m <sup>2</sup> )	Model Pervane Çapı (m)		
<b>HESAPLA</b>			
Sonuçlar			
İz Katsayısı	Pervane İlerieme Katsayısı	Pervane Devir Sayısı (Model)	
İtme Azalması	İtme Katsayısı	Pervane Devir Sayısı (Gemi)	
Form Faktörü	Tork Katsayısı	Gemi Hızı (m/s)	
SFC	Açık-Su Pervane Verimi	Gemi Toplam Direnci (N)	
	Tekne Verimi	Gemi Pervane İtmesi (N)	

Şekil 4.2 İÖHY Tabanlı 1. Sürüm Kodun Arayüzü

Model Girdileri		Açık-Su Pervane Girdileri	
Model Boyu (m)	Pervane Sayısı	KT Eğrisi	KQ Eğrisi
Model Islak Yüzey Alanı (m <sup>2</sup> )	Model Hızı (m/s)	k0	g0
Form Faktörü (k)	Pervanesiz Toplam Model Direnci (N)	k1	g1
İtme Azalması (t)	Model Ölçeği	k2	g2
İz katsayısı (w)	Model Pervane Çapı (m)		
<b>HESAPLA</b>			
Sonuçlar			
SFC	Pervane İlerieme Katsayısı	Toplam Direnc (Gemi) (N)	
Pervane Devir Sayısı (model)	Pervane İtme Katsayısı	Pervane İtmesi (Gemi) (N)	
	Pervane Tork Katsayısı	Gemi Hızı (m/s)	
	Açık-Su Pervane Verimi	Pervane Devir Sayısı (Gemi)	

Şekil 4.3 İÖHY Tabanlı 2. Sürüm Kodun Arayüzü

Şekil 4.2 ve Şekil 4.3 incelendiğinde iki sürüm arasında çok büyük farklar bulunmadığı görülmektedir. Daha önce de ifade edildiği gibi itme azalması, iz katsayısı ve form faktörü değerleri ilk sürümde sonuç parametrelerinin arasında yer alırken, ikinci sürümde bu parametreler girdi olarak istenmektedir. İlk sürümde ikinci sürümden farklı olarak istenilen geminin temel geometrik verileri ise söz konusu ampirik formüller için girdi olarak kullanılmaktadır. Birinci ve ikinci sürüm arasındaki fark yalnızca bu değerler olup, kalan kısımlar birbirleriyle tamamen aynı altyapı ile çalışmaktadır.

#### 4.2.1 Gemi ile İlgili Girdilerin Tanımlanması

**Form faktörü:** Kullanıcı tarafından tanımlanmıyorsa (birinci sürüm) Watenebe (1986) tarafından sunulan ve bir önceki bölümde (4.9) numaralı denklemlerle ifade edilen ampirik bağıntı ile kod tarafından hesaplanmaktadır. Birinci sürümde istenilen model boyu, model genişliği ve model su çekimi değerleri bu ampirik bağıntıya girdi olarak istenmektedir.

**İz katsayısı:** Kullanıcı tarafından tanımlanmıyorsa (birinci sürüm) Tablo 4.1’de görülen ve IMO tarafından önerilen değerler kullanılarak hesaplanmaktadır [46]. IMO tarafından önerilen iz katsayısı değerlerinin bir ve iki pervaneli durumlar için eğrileri çizdirilmiş ve bu eğrilerin denklemleri çıkarılarak koda tanımlanmıştır. Kullanıcı pervane sayısını girdiğinde (1 veya 2) kod ilgili denklemi çözerek blok katsayısına bağlı olarak iz katsayısı değerini belirlemektedir. Bu yönüyle kod bir ve iki pervaneli gemiler için çözüm yapabilmektedir.

**Tablo 4.1** IMO Tarafından Önerilen İz Katsayısı Değerleri [46]

Blok Katsayısı	Tek Pervane	Çift Pervane
0.5	0.14	0.15
0.6	0.23	0.17
0.7	0.29	0.19
0.8 ve üstü	0.35	0.23

**İtme azalması:** Kullanıcı tarafından tanımlanmıyorsa (birinci sürüm) kod içerisinde IMO tarafından önerilen şu bağıntı ile hesaplanmaktadır [46];

$$t = 0.7 w \quad (4.15)$$

Geliştirilen koda girilen diğer parametreler iki sürümde de aynı olup, girilecek değerler hakkındaki genel bilgiler aşağıda sıralanmıştır.

**Model boyu:** Deniz taşıtının model boyunu ifade etmektedir. (m) birimi ile girilmelidir.

**Modelin ıslak yüzey alanı:** Deniz taşıtı modelinin ıslak yüzey alanıdır. (m<sup>2</sup>) cinsinden tanımlanmalıdır.

**Pervane sayısı:** Özitme hesabı yapılan deniz taşıtının kaç pervaneli olduğunu belirten değerdir. Geliştirilen kod 1 ve 2 pervaneli gemiler için sonuç vermektedir. Daha fazla sayıdaki pervaneli gemiler için sonuç vermeyecektir.

**Model hızı:** Deniz taşıtının model hızını ifade etmektedir ve (m/s) cinsinden tanımlanmalıdır.

**Pervanesiz modelin toplam direnci:** Modelin, pervanesiz (barehull) durumda girilen model hızında ölçülen toplam direnç değeridir. (N) birimi ile tanımlanmalıdır.

**Model ölçeği ( $\lambda$ ):** Özitme noktası hesaplanacak gerçek boyuttaki geminin, yukarıdaki parametreleri kullanılan model boyutlarına göre oranıdır. Örneğin özitme noktası hesaplanacak 100 m uzunluğundaki bir deniz taşıtının, yukarıdaki değerleri 4 m uzunluğundaki bir model için girildiyse bu değer '25' olmalıdır. Eğer söz konusu özitme hesapları küçük ölçülerde bir deniz taşıtı için yapılıyorsa yani büyük bir ölçeği bulunmuyorsa bu değer '1' girilmelidir. Böylece kod tarafından SFC değeri '0' olarak hesaplanacak ve dolayısıyla özitme hesaplamaları model boyutu için yapılmış olacaktır.

**Model pervane çapı:** Model üzerinde bulunan pervanenin çapıdır. (m) birimi ile tanımlanmalıdır.

#### 4.2.2 Açık-Su Pervane Girdilerinin Tanımlanması

İÖHY ile özitme noktası hesabı yapılabilmesi için kullanılan pervanenin açık-su pervane performans parametrelerinin koda tanımlanması gerekmektedir. Açık-su performans eğrilerinde  $K_T$ ,  $K_Q$  ve  $\eta_0$  pervane ilerleme katsayısı  $J$ 'nin bir fonksiyonudur. Açık-su pervane verimi;

$$\eta_0 = \frac{J K_T}{2\pi K_Q} \quad (4.16)$$

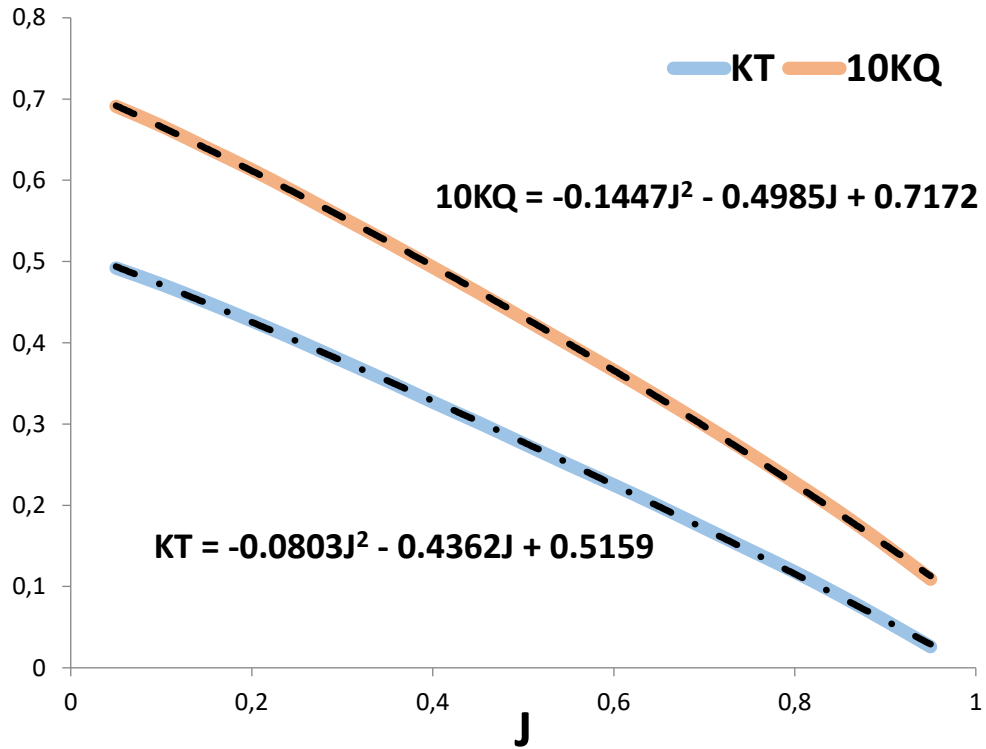


şeklinde hesaplandığından, açık-su pervane verimi eğrisinin koda tanımlanmadan  $K_T$  ve  $K_Q$  değerleri ile hesaplanması mümkün olmaktadır. Açık-su pervane grafiğinde  $K_T$  ve  $K_Q$  eğrileri için ' $aJ^2+bJ+c$ ' şeklinde 2. dereceden denklemler uydurulması eğrilerin tanımlanması için yeterli olmaktadır.  $K_T$  ve  $K_Q$  eğrileri için uydurulan denklemlerin kodun arayüzünde yer alan açık-su pervane girdileri kısmına girilmesi şu şekilde olmaktadır:

$K_T$  eğrisi için uydurulan ' $aJ^2+bJ+c$ ' formundaki denklemin a değeri  $k_2$ 'ye, b değeri  $k_1$ 'e ve c değeri ise  $k_0$  bölümüne girilmelidir.

$K_Q$  eğrisi için uydurulan ' $aJ^2+bJ+c$ ' formundaki denklemin a değeri  $g_2$ 'ye, b değeri  $g_1$ 'e ve c değeri ise  $g_0$  bölümüne girilmelidir.

Yukarıda anlatılan bu işlemlere örnek olması açısından DTC pervanesinin açık-su pervane verilerinin koda nasıl tanımlanacağı anlatılmıştır. Şekil 4.4'te DTC pervanesinin açık su pervane eğrileri ve eğriler için ' $ax^2+bx+c$ ' formatında uydurulmuş denklemler gösterilmiştir.



Şekil 4.4 DTC Pervanesinin Açık-su Performans Eğrileri için Uydurulmuş İkinci Dereceden Denklemler

Şekil 4.4'te görüldüğü gibi açık-su pervane eğrilerinin içerisinde kesikli çizgilerle görülen eğriler uydurulan denklemlerin eğrileridir. Açık-su performans eğrileri ve uydurulan denklemlerin eğrileri incelendiğinde, uydurulan denklemlerin ikinci dereceden olmasının yeterli olduğu anlaşılmaktadır. Şekil 4.5'te ise bu eğri denklemlerinin koda nasıl tanımlandığı gösterilmiştir.

Açık-Su Pervane Eğrileri			
KT Eğrisi		10 KQ Eğrisi	
$k_0$	0.5159	$g_0$	0.7172
$k_1$	-0.4362	$g_1$	-0.4985
$k_2$	-0.0803	$g_2$	-0.1447

Şekil 4.5 DTC Pervanesinin Açık-su Performans Verilerinin İÖHY Koduna Girilmesi

#### 4.2.3 Kod ile Özitme Parametrelerinin Belirlenmesi (Sonuçlar Bölümü)

Deniz taşıtı ve pervanesi ile ilgili girdilerin önceki bölümlerde anlatıldığı şekilde kodun arayüzüne girilmesinin ardından 'HESAPLA' butonuna basıldığı takdirde kod ile hesaplanan özitme parametreleri 'Sonuçlar' bölümünde gösterilecektir. Kod ile hesaplanacak özitme parametreleri ve nasıl hesaplandıkları ve ilgili açıklamalar aşağıda sıralanmıştır.

**Form faktörü, İz katsayısı ve İtme azalması:** Bu parametrelerin kullanıcı tarafından girilmediği ve kod tarafından ampirik formüller ile belirlendiği ikinci sürümde bulunmaktadır. Birimsiz değerler olup nasıl hesaplandıkları önceki bölümlerde ifade edilmiştir.

**Yüzey Sürtünmesi Doğrulaması (SFC):** Girdi bölümünde yer alan model ölçeği değeri 1'den büyük girildiğinde sonuç verecektir. Birimi Newton'dur (N). SFC değeri (4.3) numaralı denklem ile hesaplanmaktadır. (4.3) numaralı denklemde yer alan  $C_{T,M}$  ve  $C_{T,S}$  değerleri (4.5) numaralı denklemde ifade edildiği gibi bileşenlerine ayrılır ve aynı Froude sayısında  $C_w$  değerlerinin eşit olduğu kabul edilirse (4.3) numaralı denklem;

$$SFC = \frac{1}{2} \rho S V_m^2 (C_{F,m} - C_{F,s}) (1 + k) \quad (4.17)$$

halini alacaktır. (4.17) numaralı denklemde yer alan  $C_{F,M}$  ve  $C_{F,S}$  değerlerinin (4.7) numaralı denklem ile hesaplanabilmesi için Reynolds sayısının ( $Re$ ) kod tarafından hesaplanması gerekmektedir. Reynolds sayısı:

$$Rn = \frac{\rho V L}{\mu} \quad (4.18)$$

bağıntısı ile belirlenmektedir. Reynolds sayısının model ve tam ölçek için hesaplanması gerekmektedir. Tam ölçek için hesap yapılabilmesi için deniz taşıtının tam ölçek için boy ve hız değerlerinin bilinmesi gerekmektedir. Bu değerler koda girilen model ölçeği parametresi bunun için kullanılmaktadır. Deniz taşıtının tam ölçekteki boyu;

$$L_s = L_m \lambda \quad (4.19)$$

şeklinde belirlenir. Model ve tam ölçekteki deniz taşıtı aynı Froude sayısına sahip olduklarından, kod tarafından tam ölçekteki hız;

$$V_s = V_m \sqrt{\lambda} \quad (4.20)$$

olarak hesaplanmaktadır. Böylelikle (4.17) numaralı denklemde yer alan bütün değerler belirlenmiş olur ve SFC değeri hesaplatılır.

Model ölçeği değerinin '1' olarak girilmesi durumunda model ve tam ölçek için hesaplanan Reynolds sayıları aynı olacak ve dolayısıyla  $C_F$  değerleri de eşit olacaktır. Bu durumda (4.17) numaralı denklemin sonucu '0' bulunacak ve SFC değeri hesaplamalara dahil edilmeden yani model boyutları için özitleme parametreleri belirlenecektir.

**Pervane Devir Sayısı (model):** Model ölçeğinde pervane devir sayısının belirlenmesi kod içerisinde şu şekilde yapılmıştır: Öncelikle (4.11) numaralı denklemdeki pervane ilerleme katsayısı ( $J$ ) ifadesi, iz katsayısı ( $w$ ) ve model pervane çapı ( $D_m$ ) değerlerinin bilinmesi ile yalnızca model pervane devir sayısına ( $n_m$ ) bağlı bir denklem olarak girilmiştir. Bunun ardından pervane itme katsayısı ( $K_T$ ), açık-su pervane girdileri bölümüne girilen değerlerin yardımıyla pervane ilerleme katsayısına ( $J$ ) bağlı bir

fonksiyon olarak tanımlanmıştır. Model pervane itme kuvveti ( $T_m$ ) değeri de (4.10) numaralı denklem olarak koda tanıtılmıştır.

Kod içerisinde bir 'for' döngüsü oluşturulmuş ve bu sayede pervane devir sayısı ( $n$ ) değeri '1' değeri ile başlamak koşuluyla '0.01' kadar artırılarak (1) numaralı denklemde eşitlik sağlanana kadar ardışık işlemler yaptırılması istenmiştir. Pervane devir sayısının '1' gibi küçük bir değer ile başlatılıp artırılması nedeni ise ilk ardışık işlemde hesaplanacak pervane itme kuvveti değeri ( $T$ ), (4.1) numaralı denklemin sağ tarafından küçük olacaktır. Bu sebeple kod içerisinde hesaplanan pervane itme kuvveti değerinin (4.1) numaralı denklemin sağ tarafında yer alan ' $R_{TP_m} - SFC$ ' bölümünden büyük sonuçlandığı ilk ardışık işlemde çözüm durdurulmakta ve o ardışık işlemde kullanılan model pervane devir sayısı ( $n_m$ ) değeri sonuç değeri olmaktadır. Böylelikle model ölçeği için özitleme noktasındaki pervane devir sayısı bulunmuş olur.

**Pervane İlerleme Katsayısı (J):** İÖHY ile pervane ilerleme katsayısı (J) model pervane devir sayısına ( $n_m$ ) bağlı bir fonksiyon haline getirildiğinden, model pervane devir sayısının bulunması ile pervane ilerleme katsayısı da bulunmuş olur. Pervane ilerleme katsayısı birimsizdir.

**Pervane İtme Katsayısı ( $K_T$ ):** Açık-su pervane eğrilerinde pervane itme katsayısı ( $K_T$ ) pervane ilerleme katsayısının (J) bir fonksiyonu olduğundan, pervane ilerleme katsayısının belirlenmesi ile pervane itme katsayısı belirlenmiş olur. Pervane itme katsayısı birimsizdir.

**Pervane Tork Katsayısı ( $K_Q$ ):** Açık-su pervane eğrilerinde pervane tork katsayısı ( $K_Q$ ) pervane ilerleme katsayısının (J) bir fonksiyonu olduğundan, pervane ilerleme katsayısının belirlenmesi ile pervane tork katsayısı belirlenmiş olur. Pervane tork katsayısı birimsizdir.

**Bağlı Dönme Verimi ( $\eta_R$ ):** Pervane geminin arkasında çalışırken  $K_T$  değerine karşılık gelen  $K_Q$  değeri, açık-su pervane eğrilerinde aynı  $K_T$  değerine karşılık gelen  $K_{Q,0}$  değerinden farklıdır. Sözü edilen tork katsayıları arasındaki farklılık bağlı dönme verimi ile ifade edilir ve şu şekilde hesaplanır;

$$\eta_R = \frac{K_{Q,0}}{K_Q} \quad (4.21)$$

Rölatif-rotatif verim değeri genellikle 1'e çok yakın olmaktadır. İÖHY ile model pervanesinin tork değeri hesaplanmadığından bağıl dönme verimi değeri '1' olarak kabul edilmektedir. Dolayısıyla sonuçlar bölümünde kullanıcıya sunulan pervane tork katsayısı değeri, açık-su pervane eğrisinde hesaplanan pervane itme katsayısına denk gelen değerdir.

**Gemi Hızı:** Tam ölçekteki deniz taşıtı ile model ölçeğindeki deniz taşıtı aynı Froude sayısında ilerledikleri için tam ölçekteki hız (4.6) numaralı denklem ile ifade edilen Froude sayısı ile hesaplanır. Birimi m/s'dir.

**Toplam Direnç (Gemi):** Özitme noktası hesaplaması yapılan tam ölçekteki deniz taşıtının pervaneli durumdaki toplam direnç değeridir. Tam ölçekteki geminin toplam direnç katsayısının önceki bölümlerde bulunmasının ardından (4.4) numaralı denklem yardımıyla tam ölçekteki deniz taşıtının toplam direnç değeri bulunur. Ancak bu değer pervanesiz durumdaki direnç değeri olacağından (4.2) numaralı denklemin yardımı ile itme azalması katsayısı değeri de hesaba dahil edilerek tam ölçekteki deniz taşıtının pervaneli durumdaki toplam direnç değeri bulunmuş olur. Birimi Newton'dur (N).

**Pervane Devir Sayısı (Gemi):** Geliştirilen kod ile hesaplanan son parametre ise tam ölçekteki deniz taşıtının söz konusu servis hızında gidebilmesi için sahip olması gereken pervane devir sayısıdır. Model ölçeğinde hesaplanan pervane ilerleme katsayısı (J) değeri tam ölçek için de aynıdır. (4.11) numaralı denklem incelendiğinde tam ölçekteki pervane devir sayısının ( $n_s$ ) bulunabilmesi için tam ölçekte pervane düzlemine gelen ortalama akış hızının bilinmesi gerekmektedir. Bu değer (4.12) numaralı denklem ile bulunabilir. Tam ölçekteki gemi hızı ve iz katsayısı değeri bilindiğinden, tam ölçekte pervane düzlemine gelen ortalama akış hızı bulunur. Model ölçeği değeri de belli olduğundan tam ölçekteki pervane çapı değeri de bilinmektedir. Böylelikle artık (4.11) numaralı denklem ile tam ölçekteki pervane devir sayısı bulunabilecektir. Birimi d/s'dir.

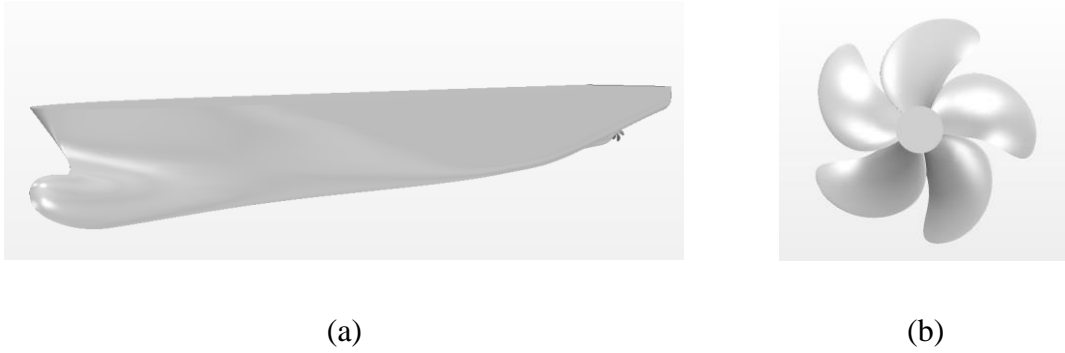
### 4.3 İÖHY ile Farklı Deniz Taşıtları için Özitme Hesaplamaları

Tez çalışması kapsamında geliştirilen İÖHY'nin özitme noktası hesaplamalarındaki yetkinliğinin araştırılabilmesi için yöntemin uygulanacağı, tez kapsamında model deneyleri gerçekleştirilen 1:100 ölçekli DTC gemi modelinin yanında literatürde deneysel sonuçları bulunan dört adet deniz taşıtı belirlenmiştir. Geometrik olarak

birbirleri ile benzemeyen gemi türleri seçilerek, İÖHY'nin farklı deniz taşıtı türleri içerisindeki yeteneklerinin ayrı ayrı incelenmesi hedeflenmiştir.

#### 4.3.1 DTC Gemisi için Özetme Hesaplamaları

Bu bölümde daha önceki bölümde farklı Froude sayılarında model deneyleri gerçekleştirilen 1/100 ölçekli DTC gemisinin HAD yöntemi ve İÖHY ile sevk parametreleri hesaplanmış ve sonuçların birbirleriyle karşılaştırmaları yapılmıştır. DTC gemisi Şekil 4.6'da görüldüğü gibi DTC geniş balblı, geniş ayna kılıklı ve tek pervaneli bir konteynır gemisidir. Geminin ve pervanesinin genel geometrik özellikleri sırasıyla Tablo 4.2 ve Tablo 4.3'te verilmiştir.



Şekil 4.6 (a) DTC Gemisinin ve Pervanesinin (b) Genel Görünümü

**Tablo 4.2** DTC Gemi Modelinin Temel Boyutları

Su hattı uzunluğu	$L_{WL}$	m	3.55
Azami su hattı genişliği	$B_{WL}$	m	0.51
Su çekimi	T	m	0.145
Islak yüzey alanı	S	$m^2$	2.203
Blok katsayısı	$C_B$	-	0.661
Model ölçeği	$\lambda$	-	100

**Tablo 4.3** DTC Model Pervanesinin Temel Geometrik Özellikleri

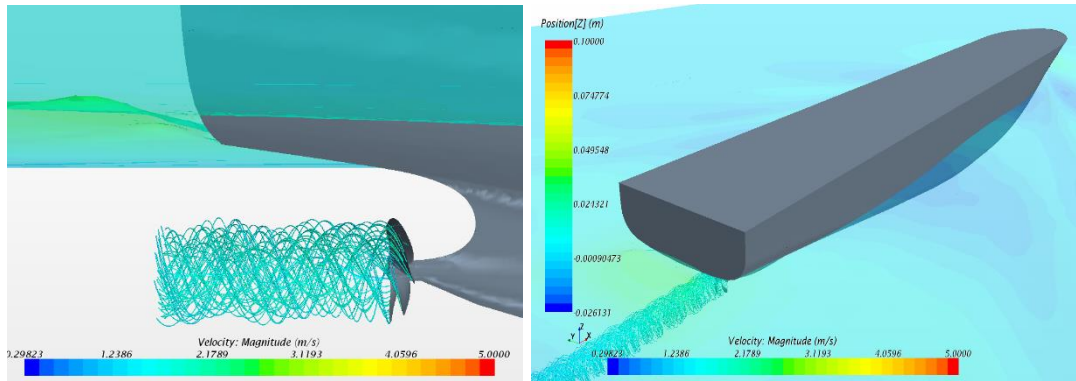
Çap	m	0.089
Kanat Sayısı	-	5
$P_{0.7}/D_P$	-	0.959
$A_e/A_0$	-	0.800
$c_{0.7}$	mm	0.054

Önceki bölümlerde, 1/100 ölçekli pervanesiz DTC gemi modelinin deneyi ile HAD yönteminin doğrulama çalışması gerçekleştirilmiştir. Literatürde söz konusu model ölçeğinde gerçekleştirilmiş pervaneli model deney sonuçları bulunmamaktadır. Bu

bölümde HAD yöntemi ve İÖHY kullanılarak DTC gemisi için 6 farklı servis hızında özitime hesaplamaları yapılmış ve sonuçlar karşılaştırılmıştır.

#### 4.3.1.1 DTC Gemisi için HAD Yaklaşımı ile Özitime Hesaplamaları

DTC gemisinin model deneyi yapılan 6 servis hızı için HAD yöntemi kullanılarak özitime parametreleri belirlenmiş ve sonuçlar Tablo 4.4'te gösterilmiştir. Tablo 4.4'te görülen pervanesiz durumdaki toplam direnç değerleri ( $R_{T_m}$ ) pervanesiz durumdaki HAD analizleri ile belirlenmiş olup bu değerler önceki bölümde deney sonuçları ile doğrulanmıştır. HAD yöntemi ile özitime parametrelerini hesaplamak için yapılan analizlerde türbülans modeli olarak k- $\epsilon$  türbülans modeli kullanılmıştır. Çift fazlı analizler VOF metodu kullanılarak zamandan bağımsız olarak gerçekleştirilmiş ve pervane bölgesindeki akışın modellenmesi için hareketli referans sistemi (MRF) metodu uygulanmıştır. Özitime hesaplamaları gerçek gemi boyutları için yapıldığından yüzey sürtünmesi doğrulaması (SFC) hesaplamalara dahil edilmiştir. HAD yaklaşımı ile özitime hesaplamaları gerçekleştirilirken form faktörü değeri referans çalışmadan alınmıştır. Bu değerler model ölçeği için k=0.094 iken gerçek gemi ölçeğinde k=0.145'tir [22]. Şekil 4.7'de Fn=0.256 servis hızında DTC modelinin pervaneli durumdaki HAD analizinden alınan serbest su yüzeyi deformasyonu ve pervane arkasındaki akış görüntüleri görülmektedir. Hesaplanan değerlerin ITTC önerilerine uyduğu görülmektedir.



Şekil 4.7 Fn=0.256'da Pervaneli DTC Modeli HAD Analizinden Elde Edilen Serbest Su Yüzeyi ve Pervane Arkasındaki Akış Görüntüleri

#### HAD Yaklaşımı için Doğrulama ve Onaylama Çalışması

DTC 1:100 modeli için HAD yöntemi ile elde edilen toplam direnç değerleri kullanılarak yapılan doğrulama ve onaylama çalışması, bir önceki bölümde yer alan

model deneyleri bölümünde yapılmıştır. Dolayısıyla bu bölümde uygulanan HAD yaklaşımı için yeni bir doğrulama ve onaylama çalışması yapılmasına gerek görülmemiştir.

**Tablo 4.4** DTC Gemisinin Farklı Servis Hızlarında HAD ile Hesaplanmış Sevk Parametreleri

$F_n$	0.172	0.191	0.205	0.216	0.237	0.256
$R_{T_{p_m}}$ (N)	4.84	5.76	6.63	7.30	8.97	10.57
$R_{T_m}$ (N)	4.33	5.22	6.05	6.70	8.27	9.82
$T_m$ (N)	2.36	2.73	3.16	3.48	4.33	5.18
$Q_m$ (Nm)	0.039	0.046	0.053	0.058	0.073	0.087
SFC (N)	2.48	3.03	3.47	3.82	4.64	5.39
$n_m$ (d/s)	13.3	14.5	15.6	16.4	18.32	20
<b><math>n_s</math> (d/s)</b>	<b>1.33</b>	<b>1.45</b>	<b>1.56</b>	<b>1.64</b>	<b>1.83</b>	<b>2.0</b>
$K_{T_m}$	0.212	0.207	0.206	0.205	0.205	0.206
$K_{Q_m}$	0.039	0.039	0.039	0.039	0.039	0.039
J	0.624	0.633	0.636	0.637	0.638	0.637
$K_{Q_t}$	0.035	0.034	0.034	0.034	0.034	0.034
w	0.270	0.275	0.269	0.269	0.258	0.248
t	0.105	0.093	0.087	0.082	0.078	0.071
$V_m$ (m/s)	1.014	1.126	1.211	1.273	1.401	1.510
$\eta_h$	1.23	1.25	1.25	1.26	1.24	1.24
$\eta_r$	0.89	0.89	0.89	0.88	0.88	0.87
$\eta_0$	0.60	0.61	0.61	0.61	0.61	0.61

#### 4.3.1.2 DTC Gemisi için İÖHY ile Özitme Hesaplamaları

Tez çalışması kapsamında geliştirilen İÖHY ile DTC gemisinin 6 farklı servis hızında özitme parametreleri belirlenmiştir. İÖHY ile elde edilen sonuçlar Tablo 4.5'te verilmiştir. İÖHY'nin bir girdisi olan pervanesiz durumdaki model toplam direnç değeri ( $R_{T_m}$ ) HAD yöntemi ile belirlenmiştir. Bir diğer girdi olan açık-su pervane verileri ise deneyi yapan araştırmacılar tarafından yayımlanan ve açık-su pervane deneyi sonuçlarının da sunulduğu bilimsel çalışmadan alınmıştır [22].



Tablo 4.5'te de görüldüğü üzere form katsayısı değeri olarak referans çalışmada kullanılan değer dikkate alınmıştır. İtme azalması ve iz katsayısı değerleri için IMO tarafından önerilen değerler dikkate alınmıştır.

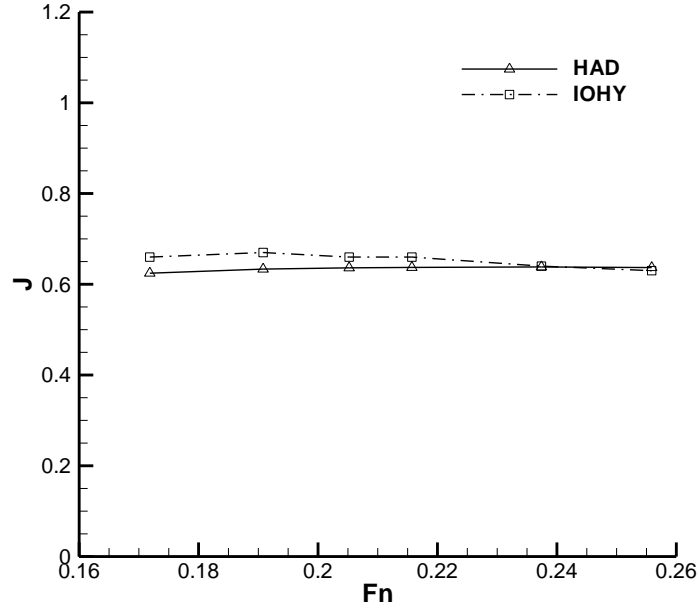
**Tablo 4.5** DTC Gemisinin İÖHY ile Hesaplanan Özitme Parametreleri

$F_n$	0.172	0.191	0.205	0.216	0.237	0.256
$k$	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09
$t$	0.192	0.192	0.192	0.192	0.192	0.192
$w$	0.274	0.274	0.274	0.274	0.274	0.274
$J$	0.66	0.67	0.66	0.66	0.64	0.63
$K_T$	0.191	0.189	0.192	0.195	0.202	0.210
$K_Q$	0.032	0.032	0.032	0.033	0.034	0.035
$n_m$ (d/s)	12.45	13.76	14.93	15.81	17.79	19.60
<b><math>n_s</math> (d/s)</b>	<b>1.25</b>	<b>1.38</b>	<b>1.49</b>	<b>1.58</b>	<b>1.78</b>	<b>1.96</b>
$\eta_0$	0.63	0.63	0.62	0.62	0.61	0.63
SFC (N)	2.84	3.41	3.88	4.24	5.03	5.74

#### 4.3.1.3 Hesaplanan Özitme Parametrelerinin Karşılaştırılması ve Yorumlanması

DTC gemisi özitme hesaplamaları için tez kapsamında 1:100 model ölçeğinde gerçekleştirilen pervanesiz direnç deneyleri içerisinde birbirleriyle sıralı olmak üzere 6 farklı servis hızı seçilmiştir. Önceki bölümlerde pervanesiz deney sonuçları ile doğrulanmış bu servis hızları için bu sefer HAD yöntemi ile pervaneli analizler gerçekleştirilerek özitme noktaları hesaplanmıştır. Tez çalışması kapsamında geliştirilen İÖHY'nin DTC gemisindeki yetkinliğinin geniş bir servis hızı yelpazesinde incelenebilmesi için gerekli veriler bu şekilde elde edilmiştir.

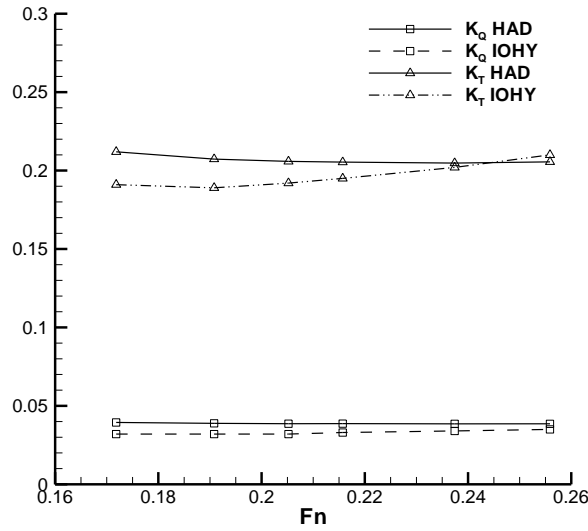
Şekil 4.8'de iki sayısal yaklaşımla, özitme durumunda farklı servis hızları için hesaplanan pervane ilerleme katsayılarının karşılaştırılması görülmektedir. Eğrilerden de anlaşılacağı gibi yüksek servis hızlarındaki uyum düşük servis hızlarına göre daha iyi olmuştur. Bu durumun nedenlerinin anlaşılabilmesi için diğer parametrelerin karşılaştırılmalarının da incelenmesi yararlı olacaktır.



**Şekil 4.8** DTC Gemisinin Özitme Durumunda HAD ve İÖHY ile Hesaplanan Pervane İlerleme Katsayılarının Karşılaştırılması

Şekil 4.9’da HAD yöntemi ve İÖHY ile hesaplanan pervane itme ve tork katsayılarının karşılaştırılması verilmiştir. Eğriler ayrı ayrı incelendiğinde pervane tork katsayısı için tüm servis hızlarında belirli bir uyum varken, pervane itme katsayıları arasındaki uyum düşük servis hızlarında nispeten daha azdır. Pervane itme katsayısı değerlerinin düşük servis hızlarındaki uyumsuzluğunun nedeni SFC parametresi ile ilişkilendirilebilir. Tam ölçekteki gemi için özitme hesaplamalarını mümkün kılan yüzey sürtünmesi doğrulama (SFC) parametresidir. Şekil 4.10’da verilen SFC karşılaştırmaları incelendiğinde HAD yönteminde ve İÖHY’de kullanılan SFC değerleri arasındaki fark tüm servis hızlarında hemen hemen aynıdır. Ancak bu sabit fark oransal olarak ele alındığında, düşük servis hızlarında kullanılan SFC değerinin gemi direnci ve pervane itmesi dengesine olan etkisi yüksek servis hızlarına oranla daha fazla olacaktır. Bunu rakamlarla açıklamak gerekirse  $F_n=0.172$  servis hızı dikkate alındığında, HAD yaklaşımında ve İÖHY’de kullanılan SFC değerleri arasındaki fark  $0.36N$  olmuştur. Benzer şekilde en yüksek servis hızı olan  $F_n=0.256$ ’da bu fark  $0.35 N$ ’dur (bkz. Tablo 4.4 ve Tablo 4.5). SFC değerlerindeki söz konusu fark  $F_n=0.172$  servis hızında HAD ile hesaplanan pervane itme kuvveti (T) değerinin yaklaşık %15’i iken, bu oran  $F_n=0.256$  servis hızında hesaplanan pervane itme kuvvetinin yaklaşık %6.5’i kadar olmaktadır. HAD yaklaşımı

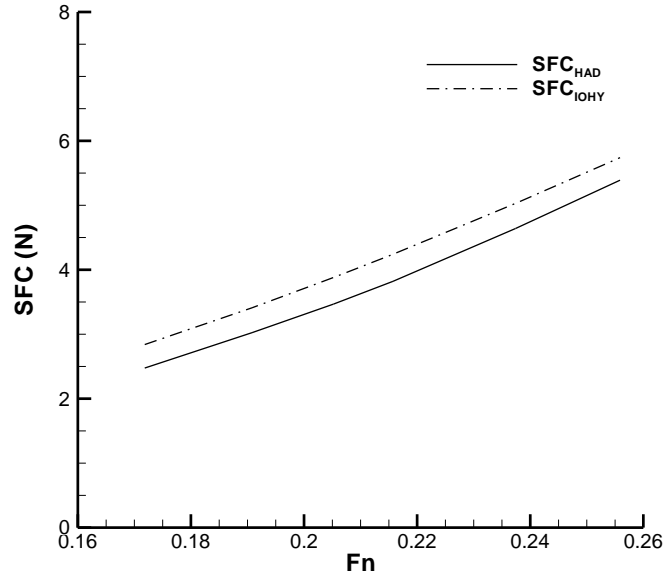
ve İÖHY’nde hesaplanan SFC değerlerinin farklı olmalarının nedeni form faktörü parametresidir. Önceki bölümde ifade edildiği gibi yüzey sürtünmesi doğrulama değeri hesaplamasında form faktörü sonucu direkt olarak etkilemektedir (bkz. Denklem 4.17). DTC gemisi için form faktörü değeri referans çalışmada model ve gerçek gemi boyutu için ayrı ayrı verilmiş ve HAD ile yapılan hesaplamalarda kullanılan SFC değeri bu form faktörü değerleriyle hesaplanmıştır. İÖHY’nde ise form faktörü değeri ilgili bölümde ifade edildiği gibi ampirik formülle hesaplanmış, dolayısıyla model ve gerçek gemi boyutu için aynı değer kullanılmıştır. Bu durum İÖHY ile hesaplanan SFC değerinin HAD yönteminde kullanılan değere göre bir miktar yüksek çıkmasına neden olmuştur.



**Şekil 4.9** DTC Gemisinin Özitme Durumunda HAD ve İÖHY ile Hesaplanan Pervane İtme ve Tork Katsayılarının Karşılaştırılması

Şekil 4.9’da yer alan pervane itme katsayısı değerleri arasında düşük servis hızlarındaki uyumsuzluğun nedenini tamamen SFC parametresi ile ilişkilendirmek doğru bir yaklaşım olmayacaktır. Yukarıda bahsedilen nedenlerin yanında itme azalması katsayısı ( $t$ ) değerleri de servis hızı ile birlikte değişmekte olup İÖHY ile ampirik formülle hesaplanan değerler HAD yöntemine göre bir miktar farklılık göstermektedir. Pervane iz katsayısı ( $w$ ) değeri ise nispeten HAD yöntemi daha uyumlu sonuçlar verse de yüksek servis hızlarında bu uyum azalmaktadır. Şekil 4.8 ve Şekil 4.9’da özellikle

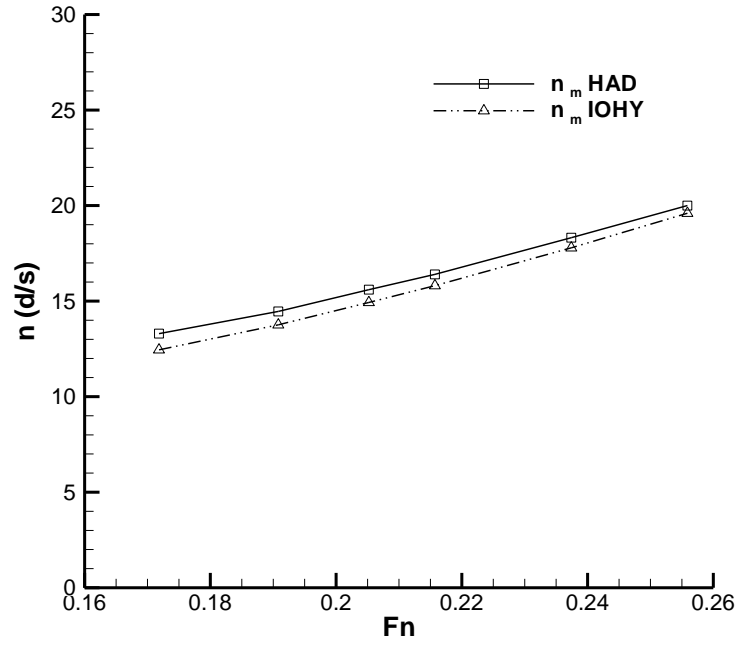
düşük servis hızlarında meydana gelen uyumsuzlukların nedenleri genel olarak bu şekilde özetlenebilir.



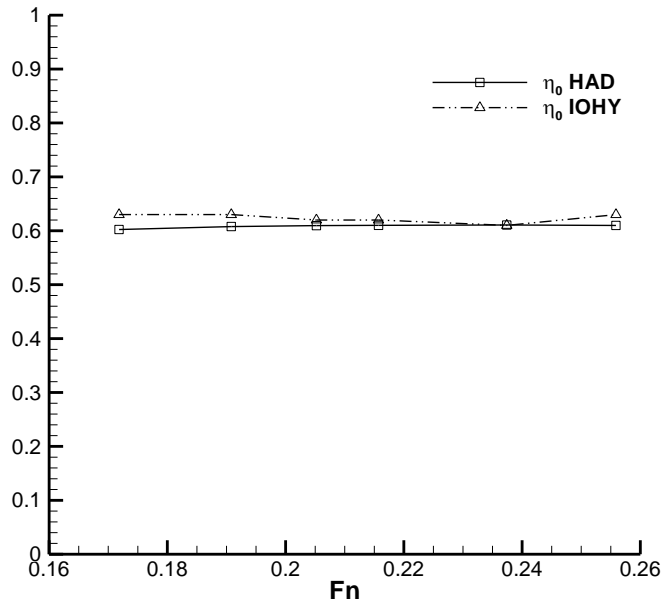
**Şekil 4.10** DTC Gemisinin Özitme Hesaplamalarında Sayısal Yöntemlerde Kullanılan SFC Değerlerinin Karşılaştırılması

Yukarıda açıklanan olumsuz yönlerine rağmen DTC gemisinin özitme durumu için HAD yöntemi ve İÖHY ile hesaplanan pervane devir sayıları Şekil 4.11’de görüldüğü gibi birbirleriyle uyumlu sayılabilir. Benzer şekilde bu uyum Şekil 4.12’de de görülebileceği gibi açık-su pervane verimleri için de geçerli olmuştur.

Sonuç olarak İÖHY ile DTC gemisinin 6 farklı servis hızında özitme parametreleri hesaplanmış ve sonuçlar HAD yöntemi ile hesaplanan sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Karşılaştırmalar yapılırken sonuçlar arasındaki uyumsuzlukların nedenleri incelenmiş ve İÖHY’nin yetkinliği sorgulanmıştır. Her ne kadar sonuçlar arasında küçük miktarda farklılıklar bulunsa da doktora tezi kapsamında geliştirilen İÖHY’nin DTC gemisinin özitme noktası hesabında tutarlı sonuçlar verdiği görülmüştür. DTC gemisi modern bir konteynır gemisi formu olması açısından geliştirilen İÖHY’nin bu gemi türünde yapılan uygulamasının başarılı sonuçlar vermesini görmek önemlidir.



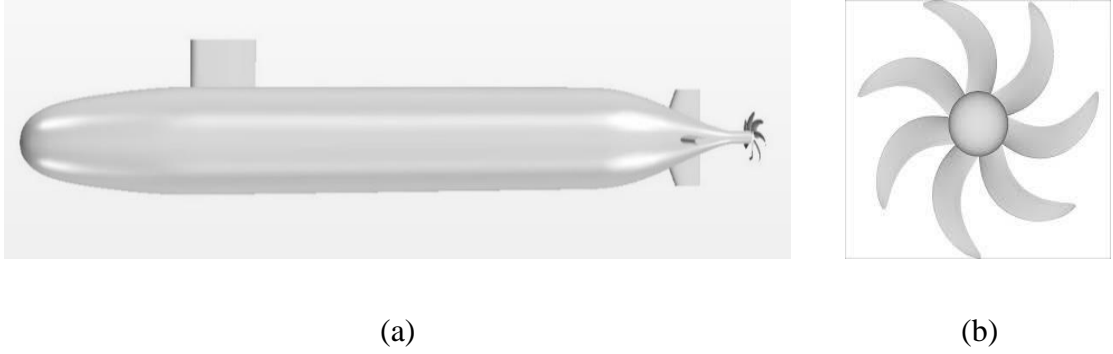
Şekil 4.11 DTC Gemisinin Özitme Durumunda HAD Ve İÖHY ile Hesaplanmış Model Pervane Devir Sayılarının Karşılaştırılması



Şekil 4.12 DTC Gemisinin Özitme Durumunda HAD ve İÖHY ile Hesaplanmış Açık-Su Pervane Verimlerinin Karşılaştırılması

### 4.3.2 DARPA Suboff Denizaltısı için Özitme Hesaplamaları

Bu bölümde literatürde deney sonuçları bulunan takıntılı DARPA Suboff denizaltısının farklı sayısal yaklaşımlarla farklı servis hızlarındaki özitme parametreleri hesaplamaları gerçekleştirilmiştir. DARPA Suboff denizaltısı ve E1619 pervanesinin genel görünüşleri Şekil 4.13'te gösterilmiştir.



**Şekil 4.13** (a) DARPA Suboff Denizaltısının ve INSEAN E-1619 Pervanesinin (b) Genel Görünümü

Tablo 4.6 ve Tablo 4.7'de ise sırasıyla DARPA Suboff denizaltısının ve INSEAN E1619 pervanesinin temel geometrik özellikleri verilmiştir.

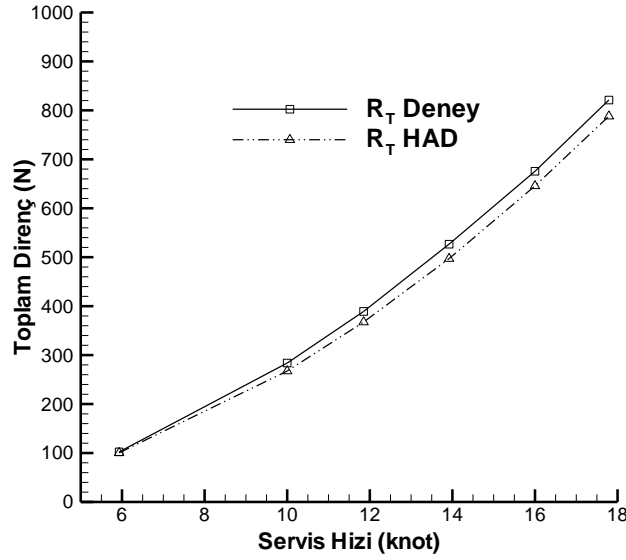
**Tablo 4.6** DARPA Suboff Denizaltısının Temel Boyutları

Uzunluk	L	m	4.356
Azami gövde çapı	$R_{max}$	m	0.384
Tam takıntılı ıslak yüzey alanı	S	$m^2$	6.338

**Tablo 4.7** INSEAN E1619 Pervanesinin Temel Geometrik Özellikleri

Pervane Çapı	m	0.262
Kanat sayısı	-	7
Göbek çap oranı	m	0.226
$0.7R$ 'de $P/D$	-	1.15
$A_E/A_0$	-	0.608

DARPA Suboff denizaltısının HAD yaklaşımı ile özitme hesaplamalarına geçmeden önce pervanesiz durumda tam takıntılı olarak HAD analizleri gerçekleştirilmiş ve bulunan toplam direnç değeri sonuçları literatürde bulunan deney sonuçları ile karşılaştırılmıştır. HAD yöntemi ile hesaplanan pervanesiz durumdaki toplam direnç değerlerinin deney sonuçları ile karşılaştırılması Şekil 4.14'te verilmiştir [47].



**Şekil 4.14** Pervanesiz DARPA Suboff Denizaltısının HAD ile Hesaplanan Toplam Direnç Değerlerinin Deney Sonuçları ile Karşılaştırılması.

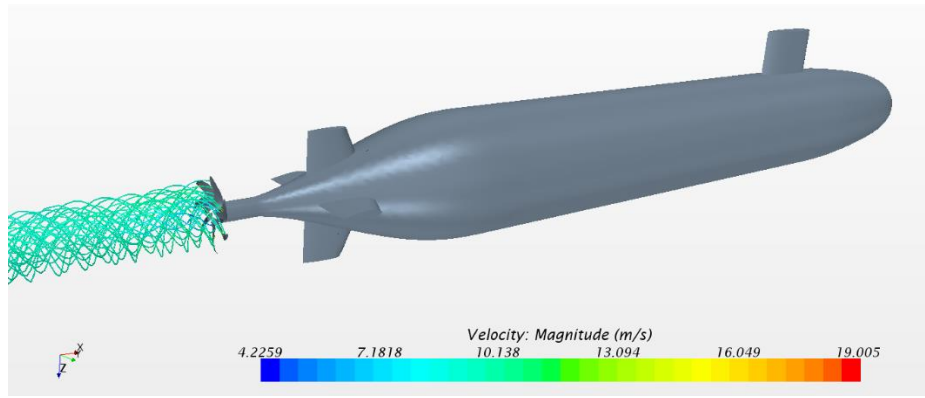
HAD yöntemi ile yapılan zamandan bağımsız analizlerde  $k-\varepsilon$  türbülans modeli kullanılmıştır. Denizaltının serbest su yüzeyinden etkilenmeyecek derinlikte olduğu varsayımıyla analizler tek fazlı olarak gerçekleştirilmiş ve böylelikle dalga direnci bileşeni hesaplamalara dahil edilmemiştir. Şekil 4.14'te de görüldüğü gibi pervanesiz durumda yapılan HAD analizleri ile elde edilen sonuçlar deney sonuçları ile uyumludur. Pervanesiz durum için HAD yaklaşımı ile yapılan hesaplamaların doğrulanmasının ardından aynı yaklaşımla pervaneli durumdaki özetme hesaplamalarına geçilmiştir.

#### 4.3.2.1 DARPA Suboff Denizaltısı için HAD Yaklaşımı ile Özetme Hesaplamaları

Tam takınlı DARPA Suboff denizaltısının pervanesiz durumdaki HAD analizleri ile elde edilen toplam direnç değerlerinin deney sonuçlarıyla doğrulanmasının ardından aynı servis hızlarında pervaneli analizleri gerçekleştirilmiş ve özetme parametreleri hesaplanmıştır. Denizaltının pervane bölgesindeki akışın modellenmesi MRF metodu kullanılarak gerçekleştirilmiş, denizaltı gövdesi etrafındaki akış ise pervanesiz HAD analizlerinde uygulanan yaklaşımla modellenmiştir. DARPA Suboff denizaltısının büyük boyutlarda bir ölçeği bulunmadığından, yapılan özetme hesaplamalarında SFC değeri dikkate alınmamıştır. Yapılan HAD analizleri ile özetme durumunda elde edilen sevk parametreleri Tablo 4.8'de verilmiştir.

**Tablo 4.8** DARPA Suboff Denizaltısının Farklı Servis Hızlarında HAD ile Hesaplanmış Özitime Parametreleri

V (knot)	5.35	5.93	10	11.85	13.92	16	17.79
$R_{T_p}$ (N)	97.8	118.9	318.1	438.3	594.2	773.6	945.5
$R_T$ (N)	82.6	100.3	267.4	367.5	497.1	645.6	788.1
T (N)	97.7	118.8	318.3	438	549.5	773.6	945.5
D (m)	0.262	0.262	0.262	0.262	0.262	0.262	0.262
<b>n (d/s)</b>	<b>9.48</b>	<b>10.49</b>	<b>17.48</b>	<b>20.63</b>	<b>24.16</b>	<b>27.69</b>	<b>30.72</b>
$K_T$	0.231	0.230	0.221	0.219	0.217	0.215	0.213
J	0.778	0.780	0.795	0.799	0.802	0.806	0.809
$K_{Qt}$	0.043	0.043	0.042	0.042	0.041	0.041	0.041
w	0.298	0.297	0.292	0.292	0.291	0.289	0.288
t	0.154	0.155	0.160	0.161	0.164	0.165	0.166
$\eta_h$	1.045	1.045	1.044	1.044	1.043	1.043	1.043
$\eta_0$	0.666	0.663	0.668	0.663	0.675	0.672	0.669



**Şekil 4.15**  $V=5.35$  Knot Servis Hızında Özitime Durumunda HAD Analizi ile Elde Edilen Pervane Arkasındaki Akış Görüntüsü.

Tablo 4.7’de INSEAN E1619 pervanesi için verilen boyutlar pervanenin gerçek boyutları içindir. HAD yöntemi ile yapılan özitime analizlerinde pervanenin  $\lambda=1:1.8512$  ölçeğindeki modeli kullanılmıştır. Bu sebeple Tablo 4.8’de verilen pervane çapı değeri analizde kullanılan pervanenin çapı değeridir. Şekil 4.15’te ise DARPA Suboff denizaltısının ve pervanesinin özitime durumunda HAD analizinde elde edilen pervane arkasındaki akış görüntüsü görülmektedir.

#### HAD Yaklaşımı ile Elde Edilen Değerler için Doğrulama ve Onaylama Çalışması

DARPA Suboff denizaltısı için HAD yaklaşımı ile yapılan hesaplamalarla elde edilen özitime parametreleri için doğrulama ve onaylama çalışması gerçekleştirilmiştir. Belirsizlik hesaplamaları için deney sonucu ve HAD yöntemi ile farklı ağ yapıları ile



elde edilen pervanesiz durumdaki denizaltının toplam direnç değerleri kullanılmıştır. Belirsizlik çalışmaları için akış çevresinde eleman boyutları Richardson ekstrapolasyon metoduna göre  $r_G = \sqrt{2}$  oranında değişecek şekilde üç farklı ağ elemanı yapısı oluşturulmuştur ve elde edilen sonuçlar Tablo 4.9'daki gibi olmuştur.

**Tablo 4.9** Oluşturulan Ağ Elemanları ile Hesaplanan Özitime Durumundaki Pervane Devir Sayıları

	Deney	Ağ-1	Ağ-2	Ağ-3
Ağ elemanı sayısı	-	145k	411k	1062k
$C_T$	$3.297 \cdot 10^{-3}$	$3.511 \cdot 10^{-3}$	$3.192 \cdot 10^{-3}$	$3.050 \cdot 10^{-3}$

Tablo 4.9'daki değerler kullanılarak doğrulama ve onaylama çalışması gerçekleştirilmiş ve ilgili sonuçlar Tablo 4.10'daki gibi gerçekleşmiştir.

**Tablo 4.10** Doğrulama ve Onaylama Çalışması Parametreleri

$\varepsilon_{21}$	$\varepsilon_{32}$	$R_{G2}$	$r_G$	$p_G$	$\delta_{RE}$	$C_G$	$U_G$
$1.418 \cdot 10^{-4}$	$3.192 \cdot 10^{-4}$	0.444	1.414	2.341	$2.551 \cdot 10^{-4}$	1.251	$3.832 \cdot 10^{-4}$

Tablo-5'e göre  $0 < R_{G2} < 1$  olduğundan monoton yakınsama durumu gerçekleşmektedir. Deney belirsizliği hesaplamalara dahil edilmediğinden, toplam belirsizlik değeri direkt olarak sayısal belirsizlikten dolayısıyla yalnızca ağ yapısı belirsizliğinden meydana gelmektedir ( $U_V \cong U_N$ ). Bu çalışmada kullanılan baz ağ yapısı Ağ-2 olduğundan sayısal belirsizlik değeri  $U_N = 11.62\% D$  olmuştur. Karşılaştırmalı hata değeri ise  $E=3.17\% D$  olmuştur. Karşılaştırmalı hata değeri sayısal belirsizlik değerinden düşük gerçekleştiğinden ( $E < U_V$ ), HAD yaklaşımı ile elde edilen sonuçlar onaylanmış olmaktadır.

#### 4.3.2.2 DARPA Suboff Denizaltısı için İÖHY ile Özitime Hesaplamaları

Bu bölümde tez kapsamında geliştirilen İÖHY ile DARPA Suboff denizaltısının farklı servis hızları için özitime hesaplamaları gerçekleştirilmiştir. İÖHY için gerekli bir girdi olan pervanesiz durumdaki toplam direnç değeri için bir önceki bölümde yer alan ve deney sonuçları ile doğrulanmış HAD toplam direnç değerleri kullanılmıştır. İÖHY yöntemi ile DARPA Suboff denizaltısı için hesaplanan özitime parametreleri Tablo 4.11'deki gibi olmuştur.

**Tablo 4.11** DARPA Suboff Denizaltısının Farklı Hızlarda İÖHY ile Hesaplanan Özitme Parametreleri

V (knot)	5.35	5.93	10.0	11.85	13.92	16.0	17.79
k	0.250	0.250	0.250	0.250	0.250	0.250	0.250
t	0.200	0.200	0.200	0.200	0.200	0.200	0.200
w	0.265	0.265	0.265	0.265	0.265	0.265	0.265
J	0.784	0.787	0.799	0.804	0.808	0.812	0.814
$K_T$	0.23	0.229	0.222	0.219	0.217	0.215	0.214
$K_Q$	0.042	0.042	0.041	0.041	0.041	0.040	0.040
n (d/s)	9.84	10.87	18.04	21.26	24.85	28.45	31.53
$\eta_0$	0.676	0.677	0.681	0.682	0.683	0.684	0.684

Denizaltılar için itme azalması, iz katsayısı ve form faktörü parametrelerini ampirik olarak hesaplayan bağıntılar bulunmadığı için, DARPA Suboff denizaltısının özitme hesaplamaları, İÖHY tabanlı çalışan ikinci sürüm kod ile yapılmıştır. Dolayısıyla DARPA Suboff denizaltısı için söz konusu değerler yöntem girdi olarak girilirken HAD analizlerinde elde edilen değerler dikkate alınmıştır. DARPA Suboff denizaltısının büyük ölçekte bir modeli bulunmadığından, hesaplamalar yalnızca Tablo-1’de verilen boyut için yapılmış ve yüzey sürtünmesi doğrulaması değeri hesaplamalara dahil edilmemiştir.

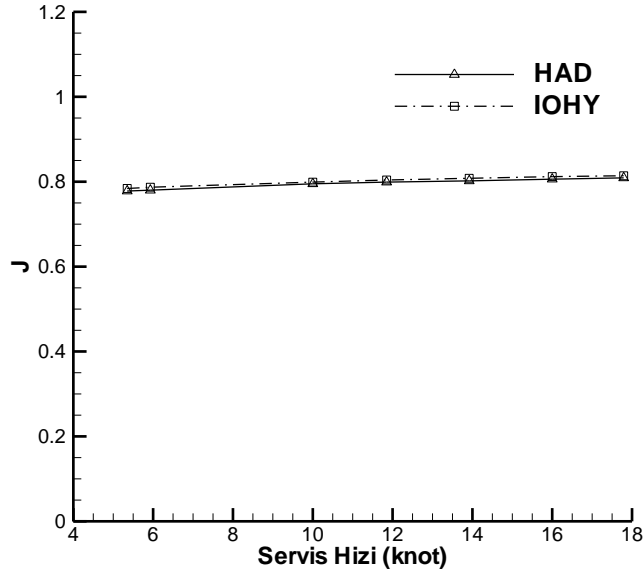
#### 4.3.2.3 Hesaplanan Özitme Parametrelerinin Karşılaştırılması ve Yorumlanması

DARPA Suboff denizaltısının farklı servis hızlarında HAD yöntemi ve İÖHY ile özitme parametreleri belirlenmiştir. Bir önceki bölümde de belirtildiği gibi DARPA Suboff denizaltısının daha büyük ölçekte bir modeli bulunmadığından, özitme hesaplamaları sadece bu model için yapılmış ve dolayısıyla hesaplamalara SFC değeri dahil edilmemiştir.

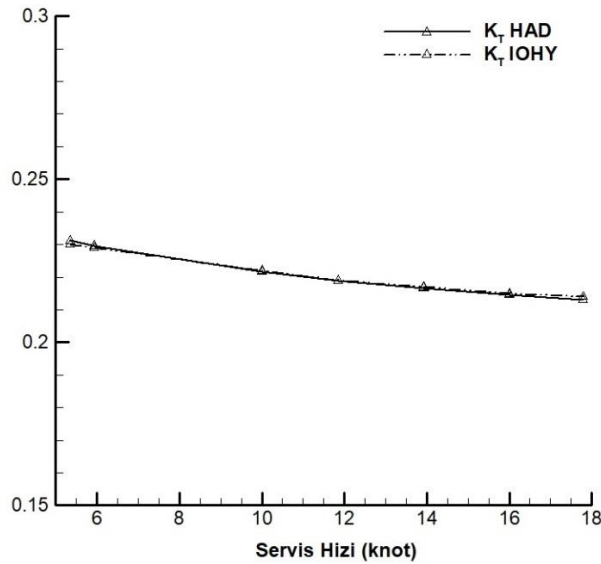
Önceki gemi türlerinde itme azalması, iz katsayısı ve form faktörü gibi değerler ampirik formüller ile yaklaşık olarak hesaplanabilirken denizaltılar için bu mümkün olmamaktadır. Bu parametreler için HAD yönteminde hesaplanan değerler dikkate alınmış dolayısıyla geliştirilen kodun ikinci sürümü kullanılmıştır. Bu nedenle HAD yöntemi ve İÖHY ile elde edilen sevk parametreleri birbirlerine oldukça yakın olmuştur.

Şekil 4.16’da HAD yöntemi ve İÖHY ile hesaplanan pervane ilerleme katsayısı değerlerinin karşılaştırılması görülmektedir. Şekilde görüldüğü gibi söz konusu yöntemlerde hesaplanan veya kullanılan itme azalması ve iz katsayısı değerlerinin

birbirine yakın olması, hesaplanan pervane ilerleme katsayısı değerlerinin neredeyse aynı sonucu vermesini sağlamıştır.



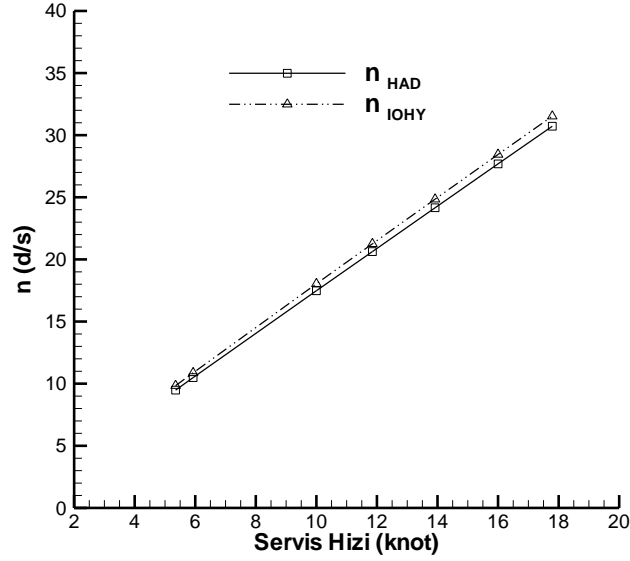
Şekil 4.16 DARPA Suboff Denizaltısının Özitme Durumunda HAD ve İÖHY ile Hesaplanmış Pervane İlerleme Katsayılarının Karşılaştırılması



Şekil 4.17 DARPA Suboff Denizaltısının Özitme Durumunda HAD ve İÖHY ile Hesaplanmış Pervane İtme Katsayılarının Karşılaştırılması

Şekil 4.17’de ise iki yöntemle hesaplanan pervane ilerleme katsayılarının karşılaştırılması görülmektedir. Pervane ilerleme katsayısı değeri itme benzerliği teorisi

ile belirlendiğinden, Şekil 4.17’de görülen uyum beklenen bir sonuçtur. İtme benzerliği yöntemine göre pervanede hesaplanan itme kuvveti ile pervane itme katsayısı belirlenir. Pervane ilerleme katsayısı, açık-su pervane eğrisinde pervane itme katsayısına denk gelen değerdir. Dolayısıyla Şekil 4.16’da görülen pervane ilerleme katsayılarının birbirleriyle uyumu Şekil 4.17’de karşılaştırılan pervane itme katsayılarında da görülmelidir.



**Şekil 4.18** DARPA Suboff Denizaltısının Özitme Durumunda HAD ve İÖHY ile Hesaplanmış Pervane Devir Sayılarının Karşılaştırılması

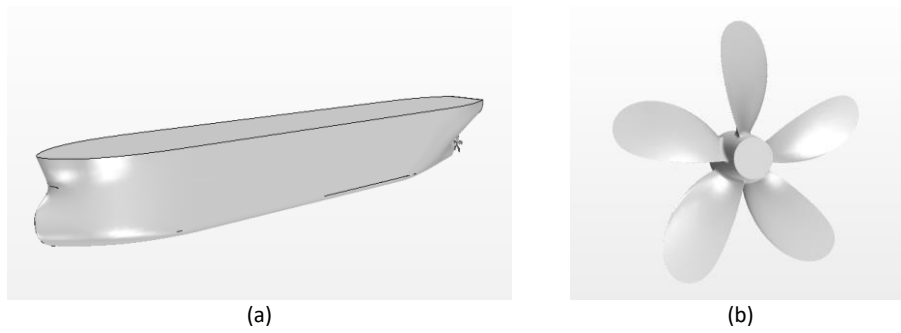
Son olarak Şekil 4.18’de iki yöntemle farklı servis hızlarında özitme durumunda hesaplanan pervane devir sayılarının karşılaştırılması gösterilmiştir. Görüldüğü gibi hesaplanan pervane devir sayıları da birbirlerine oldukça yakındır. Pervane devir sayılarının birbirleriyle uyumunda İÖHY’de kullanılan itme azalması ve iz katsayısı değerlerinin HAD yönteminde hesaplanan değerlere yakın olması etkilidir. DARPA Suboff denizaltısı uygulaması diğer gemi örneklerinden farklı olarak, itme azalması ve iz katsayısı değerlerinin kullanıcı tarafından belirlendiği bir örnektir. Bu yönü ile tez çalışması kapsamına alınmış ve İÖHY’nin gerçeğe daha yakın sonuç vermesinde itme azalması ve iz katsayısı parametrelerinin önemi gösterilmek istenmiştir.

DARPA Suboff denizaltısı örneğinde de görüldüğü gibi İÖHY’nde kullanılan itme azalması ve iz katsayısı değerleri gerçek değerlerine ne kadar yakın olursa, yöntemin

deniz taşıtlarının özetme parametrelerini doğru olarak belirleme yeteneği o denli artmaktadır.

### 4.3.3 JBC Gemisi Özetme Hesaplamaları

Japan Bulk Carrier (JBC) gemisi 2015 yılında Tokyo’da gerçekleştirilen HAD çalıştayında incelenen, gerçek ölçekte bulunmayan ve yalnızca model ölçeğinde ele alınmış bir gemidir. Dünya çapında farklı kurumlar tarafından bu gemi için yapılan deneysel ve sayısal çalışmalar, çalıştayın internet sitesinde ve de literatürde bulunmaktadır [48],[49]. Çalıştay öncesinde gemi ile ilgili farklı senaryolar belirlenmiş ve katılımcılar bu senaryolar içerisinden birini veya birkaçını seçerek sayısal çözümler gerçekleştirmişlerdir. Bu senaryolardan 1.5 numaralı olan durum, sakin sudaki dümensiz özetme noktası hesaplamalarını içermektedir [48]. JBC gemisinin ve pervanesinin (MP687) genel görünümü Şekil 4.19’deki gibidir.



Şekil 4.19 (a) JBC Gemisinin Genel Görünümü (b) MP687 Pervanesinin Genel Görünümü

Tablo 4.12 ve Tablo 4.13’te ise sırasıyla JBC gemi modelinin ve model pervanesinin temel hidrostatik ve geometrik özellikleri verilmiştir.

**Tablo 4.12** JBC Gemi Modelinin Temel Boyutları

Dikmelerarası uzunluk	m	7
Su hattı genişliği	m	1.125
Su çekimi	m	0.412
Dümensiz ıslak yüzey alanı	m <sup>2</sup>	12.22
Blok katsayısı	-	0.858
Model hızı	m/s	1.179

**Tablo 4.13** JBC Model Pervanesinin (MP687) Temel Geometrik Özellikleri

Pervane çapı	m	0.203
Kanat sayısı	-	5
Göbek çapı	m	0.041
$P_R/P_D$	-	0.75
$A_E/A_0$	-	0.5

Tez çalışmasının bu bölümünde yukarıda genel özellikleri verilen JBC gemisinin MP687 pervanesi ile çalışma durumunda farklı servis hızlarındaki özitime noktası hesaplamaları gerçekleştirilmiştir. Özitime noktası hesaplamaları HAD yöntemi ve doktora tezi kapsamında geliştirilen İÖHY ile gerçekleştirilmiş ve hesaplanan sonuçlar birbirleriyle karşılaştırılmıştır. Farklı servis hızlarında özitime noktası hesaplamaları yapılabilmesi ve İÖHY'nin daha geniş kapsamda değerlendirilebilmesi için 5 farklı servis hızı belirlenmiştir ( $F_n=0.101, 0.122, 0.142, 0.162$  ve  $0.184$ ). Bu hızlardan ( $F_n=0.142$ ), T2015 HAD çalışmayı için yayınlanan deneysel sonuçlarda kullanılmış olan servis hızıdır. Bu hız değeri özellikle seçilmiş olup bu sayede tez kapsamında kullanılan sayısal özitime hesaplama yöntemlerinin JBC gemi model deney sonuçlarıyla doğrulama çalışması yapılmıştır. Model deneyleri yalnızca bu servis hızı için yapıldığından, ek olarak belirlenen diğer hızlar için özitime durumunda HAD analizleri gerçekleştirilmiş ve elde edilen sonuçlar İÖHY yöntemi sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır.

#### 4.3.3.1 JBC Gemisi için HAD Yaklaşımı ile Özitime Hesaplamaları

JBC gemisinin 1:40 ölçeğindeki modelinin 5 farklı Froude sayısı için özitime hesaplamaları HAD yaklaşımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. JBC gemi modeli için uygulanan HAD yaklaşımında, diğer gemi türlerinden farklı olarak türbülans modeli olarak  $k-\omega$  türbülans modeli seçilmiştir. Bunun nedeni pervanesiz durumda  $k-\omega$  türbülans modeli ile sayısal olarak hesaplanan toplam direnç değeri sonuçlarının,  $k-\varepsilon$  türbülans modeli ile elde edilen sonuçlara göre daha uyumlu olmasıdır. Bu durum  $k-\varepsilon$  türbülans modelinin narin formlu gemilerde uyumlu sonuçlar verirken, JBC gibi büyük blok katsayılı gemilerde aynı başarıyı gösterememesi şeklinde açıklanabilir.

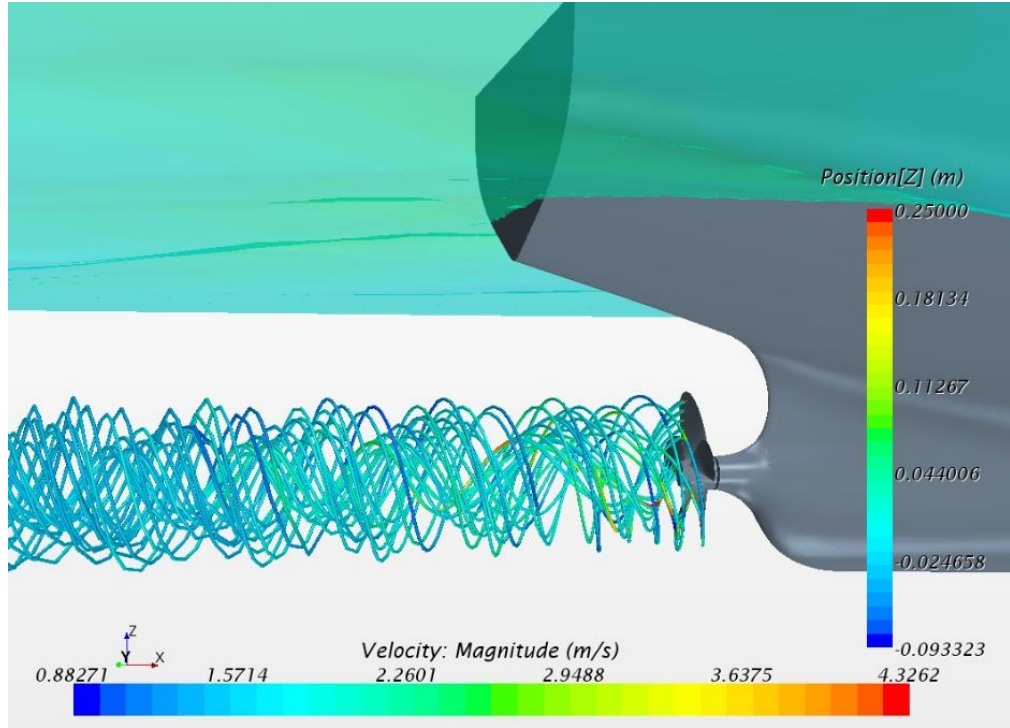
**Tablo 4.14** JBC 1:40 Modeli için Pervanesiz Durumda Gerçekleştirilen HAD Analizi Sonuçlarının Deney Sonuçlarıyla Karşılaştırılması.

$F_n=0.142$	Deney	$k-\varepsilon$	$k-\omega$
$C_T$	$4.289 \cdot 10^{-3}$	$3.926 \cdot 10^{-3}$	$4.138 \cdot 10^{-3}$
$R_T$	36.37 N	33.29 N	35.08 N

Tablo 4.14 incelendiğinde,  $k-\omega$  türbülans modeli ile yapılan sayısal çözümün deney sonucuyla daha uygun sonuç verdiği görülmüştür. Bu sebeple JBC gemisi için sayısal olarak yapılan özitime hesaplamalarında da  $k-\omega$  türbülans modeli kullanılmıştır.

Benzer şekilde JBC gemisinin HAD yöntemi ile  $k-\omega$  türbülans modeli kullanılarak, deney servis hızında özitime analizleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçların deney

sonuçları ile uyumlu olduğu görülmüştür. Deney servis hızında yapılan HAD analizinden elde edilen serbest su yüzeyi deformasyonu ve pervane arkasındaki akış görüntüsü Şekil 4.20'deki gibi olmuştur. HAD yöntemiyle elde edilen sevk parametrelerinin deney sonuçları ile uyumlu olduğunun görülmesinin ardından, belirlenen diğer servis hızlarında aynı HAD yöntemi kullanılarak özitleme noktası hesaplamaları gerçekleştirilmiş ve sonuçlar Tablo 4.15'teki gibi olmuştur.



**Şekil 4.20**  $F_n=0.142$ 'de JBC Modelinin HAD Analizi ile Elde Edilen Serbest Su Yüzeyi Deformasyonu ve Pervane Arkasındaki Akış Görüntüsü

*HAD yaklaşımı ile elde edilen değerler için doğrulama ve onaylama çalışması*

JBC gemisinin HAD yöntemi ile elde edilen sevk parametreleri için bir doğrulama ve onaylama çalışması gerçekleştirilmiştir. Belirsizlik hesaplamalarında farklı ağ yapıları ile özitleme durumunda hesaplanan ve deneyde ölçülen pervane devir sayısı değerleri kullanılmıştır. Doğrulama ve onaylama çalışmasını gerçekleştirebilmek için ağ elemanı boyutları  $r_G = \sqrt{2}$  oranında değişecek şekilde üç farklı ağ elemanı yapısı oluşturulmuş ve deney hızında özitleme durumundaki pervane devir sayıları hesaplanmıştır. Farklı ağ yapıları ile özitleme durumunda hesaplanan pervane devir sayıları Tablo 4.16'daki gibi olmuştur.

**Tablo 4.15** Farklı Hızlarda HAD ile Hesaplanan Özitme Parametreleri

$F_n$	0.101	0.122	0.142*	0.163	0.184
$R_{TP_m}$ (N)	20.89	29.33	39.35	55.17	74.41
$R_{T_m}$ (N)	18.8	26.1	35.08	46.4	63
$T_m$ (N)	10.62	15.4	21.29	31.32	46.5
$Q_m$ (Nm)	0.304	0.439	0.605	0.88	1.286
SFC (N)	10.27	13.93	18.06	22.85	27.91
$D_m$ (m)	0.203	0.203	0.203	0.203	0.203
$n_m$ (d/s)	5.5	6.65	7.85	9.45	11.35
$n_s$ (d/s)	<b>0.87</b>	<b>1.05</b>	<b>1.24</b>	<b>1.49</b>	<b>1.79</b>
$K_{T_m}$	0.207	0.205	0.204	0.207	0.213
$K_{Q_m}$	0.029	0.029	0.029	0.029	0.029
J	0.43	0.44	0.44	0.44	0.42
$K_{Q_t}$	0.027	0.027	0.027	0.027	0.028
w	0.42	0.41	0.40	0.38	0.36
t	0.104	0.106	0.119	0.141	0.149
$V_m$ (m/s)	0.837	1.008	1.179	1.35	1.521
$\eta_h$	1.545	1.520	1.472	1.387	1.338
$\eta_r$	0.925	0.937	0.947	0.944	0.966
$\eta_0$	0.530	0.531	0.532	0.531	0.508
*Deney hızı					

**Tablo 4.16** Oluşturulan Ağ Elemanları ile Elde Edilen Özitme Durumundaki Pervane Devir Sayıları.

	Deney	Ağ-1	Ağ-2	Ağ-3
Ağ elemanı	-	11.4M	3.8M	1.3M
$n_m$ (d/s)	7.8	7.87	7.85	8.15

Yukarıda ifade edilen değerler kullanılarak doğrulama ve onaylama çalışması gerçekleştirilmiş ve çalışma sonucunda elde edilen parametreler Tablo 4.17’de verilmiştir.

**Tablo 4.17** Doğrulama ve Onaylama Çalışması Parametreleri.

$\varepsilon_{21}$	$\varepsilon_{32}$	$R_{G2}$	$r_G$	$p_G$	$\delta_{RE}$	$C_G$	$U_G$
0.02	0.3	0.066	1.414	7.82	0.021	14.0	0.579

Tablo 4.17 incelendiğinde  $0 < R_{G2} < 1$  olduğundan monoton bir yakınsama oluştuğu görülmektedir. Belirsizlik analizleri Ağ-2 baz alınarak gerçekleştirilmiştir. Bu ağ elemanı yapısı için belirsizlik değeri 7.4%D olarak hesaplanmaktadır. Deney sonuçlarının temin edildiği referans çalışmada deneysel belirsizlikle ilgili herhangi bir ifade bulunmadığından belirsizlik değerinin tamamen sayısal belirsizlik değerinden



oluşturduğu kabul edilmiştir ( $U_V \cong U_N$ ). Ağ-2 için hesaplanan hata değeri ise  $0.64\%D$  olmuştur.

Doğrulama belirsizliği  $U_V = 7.4\%D$  ve karşılaştırmalı hata değeri  $E=0.64\%D$ ,  $|E| < U_V$  şartını sağladığından uygulanan HAD yöntemi onaylanmıştır.

#### 4.3.3.2 JBC Gemisi için İÖHY ile Özitme Hesaplamaları

JBC gemisinin İÖHY ile özitme noktasının hesaplanabilmesi için gerekli olan 5 farklı hızdaki pervanesiz model direnç değerleri HAD yaklaşımı kullanılarak bir önceki bölümde elde edilmiştir. Yöntem için gerekli diğer girdiler olan itme azalması ve iz katsayısı değerleri oluşturulan kodun içerisinde yer alan ve önceki bölümlerde ifade edilmiş ampirik formüller ile hesaplanmaktadır. JBC gemisinin açık su pervane verileri söz konusu çalıştay tarafından yayınlanmış ve İÖHY'ne girdi olarak bu değerler kullanılmıştır [48].  $Fn=0.142$  servis hızındaki özitme parametreleri İÖHY ile hesaplanmış ve Tablo 4.18'de deney sonuçları ile karşılaştırılmıştır. İÖHY ile elde edilen sevk parametrelerinin de deney sonuçları içinde uyum içinde olduğu görülmektedir. İÖHY ile diğer servis hızları için de özitme parametreleri hesaplanmış ve sonuçlar Tablo 4.19'daki gibi olmuştur.

**Tablo 4.18**  $Fn=0.142$  Hızında İÖHY ile Hesaplanan Özitme Parametrelerinin Deney Sonuçları ile Karşılaştırılması

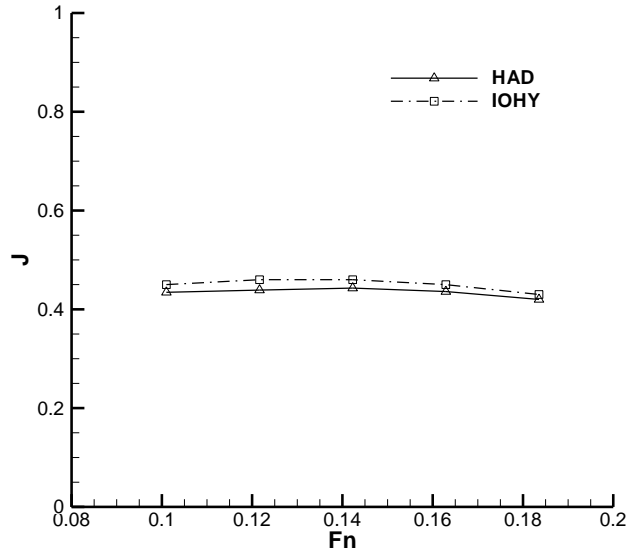
	$n_m$ (d/s)	t	w	J	$K_T$	$K_Q$	$\eta_0$
Deney	7.80	0.109	0.448	0.41	0.217	0.028	0.509
İÖHY	8.18	0.246	0.352	0.46	0.196	0.026	0.546

**Tablo 4.19** İÖHY ile JBC Gemisi için Hesaplanan Özitme Parametreleri

Fr	0.101	0.122	0.142*	0.163	0.184
t	0.246	0.246	0.246	0.246	0.246
w	0.352	0.352	0.352	0.352	0.352
$J_t$	0.45	0.46	0.46	0.45	0.43
$K_T$	0.200	0.198	0.196	0.201	0.210
$K_Q$	0.027	0.026	0.026	0.027	0.028
$n_m$ (d/s)	5.93	7.03	8.18	9.57	11.36
$n_s$ (d/s)	<b>0.94</b>	<b>1.11</b>	<b>1.29</b>	<b>1.51</b>	<b>1.80</b>
$\eta_0$	0.54	0.54	0.55	0.54	0.52
*Deney hızı					

#### 4.3.3.3 Hesaplanan Özitme Parametrelerinin Karşılaştırılması ve Yorumlanması

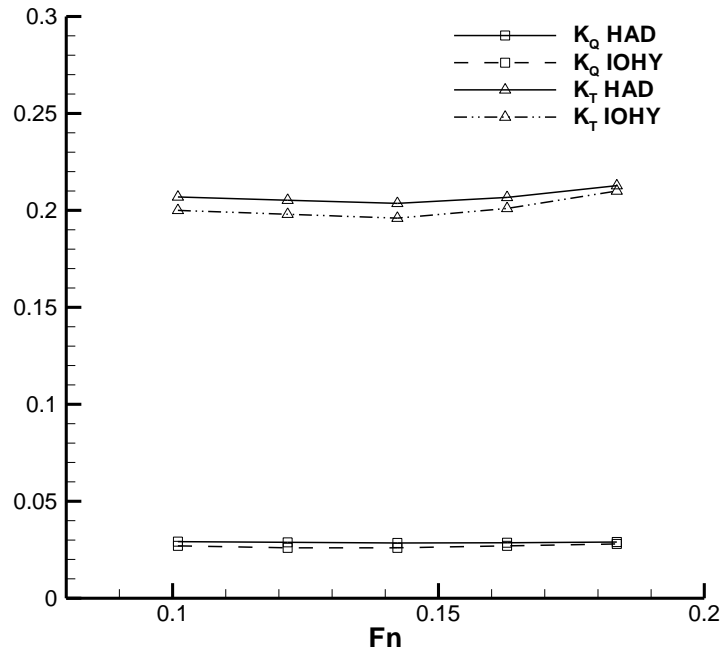
Bu bölümde JBC gemisi için farklı servis hızlarında farklı sayısal yöntemlerle yapılan özitme hesaplamalarının karşılaştırılması ve yorumlanması gerçekleştirilmiştir. Özitme hesaplamaları için en güvenilir sonuçları veren model deneyi sonuçları ile yapılan karşılaştırmalar önceki bölümlerde Tablo 4.14 ve Tablo 4.18’de verilmiştir. Tablo 4.15 dikkate alındığında HAD yöntemi ile hesaplanan özitme parametrelerinin deney sonuçları ile uyumlu olduğu görülmektedir. Benzer şekilde Tablo 4.18 incelendiğinde İÖHY ile hesaplanan özitme parametrelerinin de deney ile tutarlı sonuçlar verdiği söylenebilir. JBC gemisi tez kapsamında ele alınan gemi türlerine göre nispeten yüksek blok katsayısına sahip bir gemi olduğu için, İÖHY’nin etkinliği daha geniş bir servis hızı aralığında incelenmek istenmiştir. Bu sebeple deney servis hızına ek olarak 4 adet servis hızı belirlenmiş ve tüm servis hızlarında farklı sayısal yaklaşımlarla elde edilen özitme parametreleri karşılaştırılmıştır.



**Şekil 4.21** JBC Gemisinin Özitme Durumunda HAD Yöntemi ve İÖHY ile Hesaplanan Pervane İlerleme Katsayılarının Karşılaştırılması

Şekil 4.21’de JBC gemisi için özitme durumunda HAD yöntemi ve İÖHY ile elde edilen pervane ilerleme katsayılarının incelenmesi görülmektedir. Değerlerin birbirleri ile uyumlu olduğu gözlemlense de servis hızı arttıkça elde edilen değerlerin uyumunun iyileştiği görülmektedir. Bunun sebeplerini daha iyi anlayabilmek için Şekil 4.22’de gösterilen pervane itme ve tork katsayılarının karşılaştırılmasını incelemek daha doğru

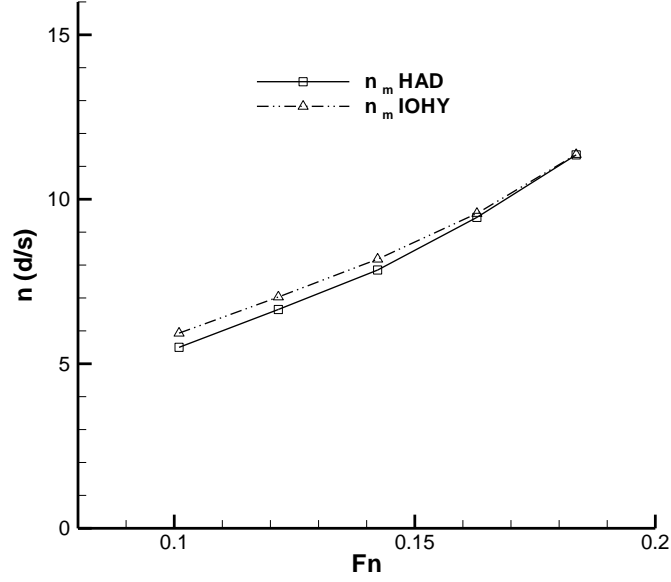
olacaktır. Şekil 4.22’de görüldüğü üzere iki sayısal yöntemle elde edilen pervane itme ve tork katsayıları değerleri birbirine yakındır. Bu eğrilerdeki değerler arasındaki uyum da tıpkı Şekil 4.21’de olduğu gibi servis hızı arttıkça iyileşmektedir. İtme azalması ve iz katsayısı değerlerinin sayısal yöntemlerle gerçeğe yakın olarak hesaplanması, İÖHY ile elde edilen pervane itme katsayısı ve dolayısıyla pervane ilerleme katsayısı parametrelerinin doğruluğunu belirlemektedir. Tablo 4.15 ve Tablo 4.18 incelendiğinde deney sonuçlarına göre HAD yönteminin itme azalması ve iz katsayısı değerlerini İÖHY’ne göre daha doğru hesapladığı görülebilmektedir. Söz konusu parametreleri servis hızından bağımsız ampirik yaklaşımlarla hesaplayan İÖHY ile elde edilen itme azalması ve iz katsayısı değerleri, yüksek servis hızlarında HAD ile daha uyum göstermiş ve bu durum İÖHY ile elde edilen sevk parametrelerinin yüksek servis hızlarında gerçeğe daha yakın sonuçlar vermesini sağlamıştır.



**Şekil 4.22** JBC Geminin Özitme Durumunda HAD Yöntemi ve İÖHY ile Hesaplanan Pervane İtme ve Tork Katsayılarının Karşılaştırılması

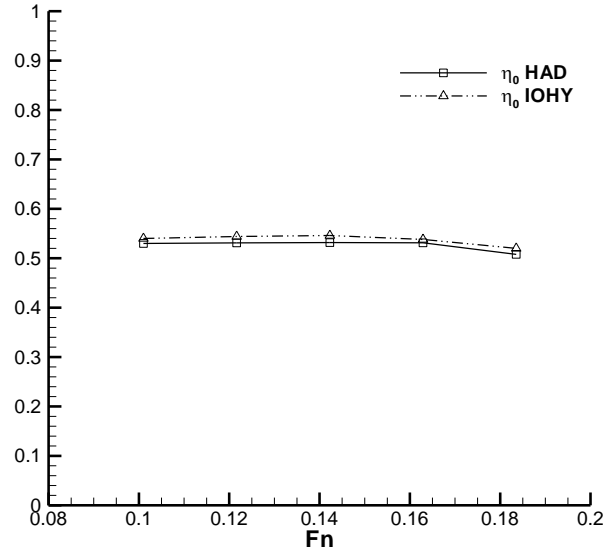
Şekil 4.23’te görülen pervane devir sayılarının karşılaştırılmalarında da aynı durum gözlemlenmektedir. Yüksek servis hızlarında İÖHY ile hesaplanan toplam gemi direnci ve pervane itme kuvveti dengesinin daha gerçekçi olması, İÖHY’nin HAD yöntemi ile neredeyse aynı pervane devir sayısı değerlerini bulmasını sağlamıştır.

Şekil 4.24'te yapılan karşılaştırmada da görüldüğü gibi HAD yöntemi ve İÖHY ile hesaplanan açık-su pervane verimi değerleri bütün servis hızlarında birbirleriyle uyumludur.



**Şekil 4.23** JBC Modelinin Özitime Durumunda HAD Yöntemi ve İÖHY ile Hesaplanan Pervane Devir Sayılarının Karşılaştırılması

JBC gemisi örneği tez kapsamında geliştirilen İÖHY'nin yüksek blok katsayılı (dolgun) gemilerde de uyumlu sonuçlar verdiğini göstermesi açısından önemlidir. Gemi direnç ve sevk parametrelerini belirlemede model deneylerinden sonra en etkili yöntem olan HAD yaklaşımında, yüksek blok katsayılı gemilerin analizleri düşük blok katsayılı (narin) gemi analizlerine göre daha zorlu olmaktadır. Dolgun formlu gemilerin HAD analizlerinde, geminin arka bölgesinde oluşan nispeten daha karmaşık akışın modellenebilmesi için fazladan ağ elemanlarına ihtiyaç duyulabilmekte ve hatta bu tez çalışmasında olduğu gibi farklı türbülans modellerinin uygulanması gerekebilmektedir. Bu gibi durumlar HAD yönteminin uygulanmasını zorlaştırmanın yanında çözüm sürelerini de artırmaktadır. Bu bağlamda İÖHY'nin yüksek blok katsayılı gemilerin özitime hesaplamalarında gerçeğe yakın ve hızlı sonuç vermesi, yöntemin bu tür gemiler için kullanılabilir olacağını göstermektedir.

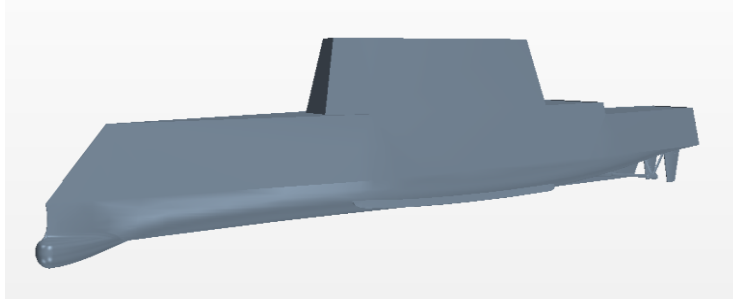


**Şekil 4.24** JBC Gemisinin Özitime Durumunda HAD Yöntemi ve İÖHY ile Hesaplanan Açık-su Pervane Verimlerinin Karşılaştırılması

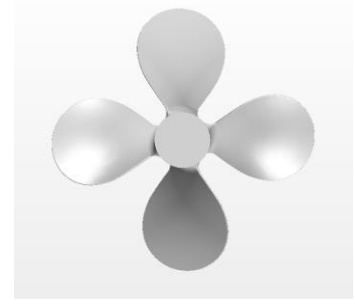
#### 4.3.4 ONR Tumblehome Gemisi Özitime Hesaplamaları

Tez çalışmasının bu bölümünde yine Tokyo 2015 HAD Çalıştayı'nda ele alınmış, gerçek ölçekte bulunmayan ve yalnızca model ölçeğinde incelenmiş çift pervaneli ONR Tumblehome (ONRT) gemisinin özitime hesaplamaları gerçekleştirilmiştir. Çalıştay kapsamında bu gemi için de JBC gemisinde olduğu gibi farklı senaryolar belirlenmiştir. İlgili deney sonuçları internet sitesinde yayınlanmış ve katılımcılar yaptıkları sayısal hesaplamalar ile elde ettikleri sonuçları deney sonuçları ile karşılaştırmışlardır [48]. Bu tez çalışması kapsamında Çalıştay için ONRT gemisi için belirlenen 3.9 numaralı senaryo kullanılmıştır. Bu senaryodaki deney sonuçları; sakin (dalgasız) suda serbest hareketli ve pervaneli modelin özitime durumundaki pervane devir sayısı değerini sunmaktadır. Verilen deney sonuçlarının yanında ONRT'de kullanılan pervanenin açık-su pervane parametreleri de yine Çalıştay'ın internet sitesinde yer almaktadır [48]. Bu geminin tez çalışması kapsamına alınmasının nedeni, geliştirilen İÖHY'nin çift pervaneli gemilerin özitime noktasını belirlemedeki yetkinliğini incelemektir. Söz konusu ONRT gemisinin ve pervanesinin genel görünümü Şekil 4.25'te gösterilmiştir.

Tablo 4.20 ve Tablo 4.21'de ise sırasıyla ONRT gemisi modelinin ve pervanesinin temel geometrik özellikleri verilmiştir.



(a)



(b)

**Şekil 4.25** (a) ONRT Gemisinin (a) ve Pervanesinin (b) Genel Görünümü

**Tablo 4.20** ONRT Gemi Modelinin Temel Boyutları

Su hattı uzunluğu	m	3.147
Azami su hattı genişliği	m	0.384
Su çekimi	m	0.112
Tam takıntılı ıslak yüzey alanı	m <sup>2</sup>	1.5
Blok katsayısı	-	0.535
Model hızı (Deney)	m/s	1.111

**Tablo 4.21** ONRT Pervanesinin Temel Geometrik Özellikleri

Çap	D	m	0.1066
Kanat Sayısı	z	-	4
Şaft Açısı	$\epsilon$	°	5

Yukarıda genel özellikleri verilen tam takıntılı ONRT gemisinin farklı servis hızları için özetme hesaplamaları gerçekleştirilmiştir. Özetme hesaplamaları tez çalışmasında yer alan diğer gemi örneklerinde olduğu gibi HAD yöntemi ve İÖHY ile gerçekleştirilmiş ve sonuçlar hem kendi aralarında hem de deney sonucu (yalnızca  $Fn=0.20$  için) ile karşılaştırılmıştır. Daha detaylı bir karşılaştırma için Çalıştay'da belirlenen ve deneyi yapılan servis hızına ( $Fn=0.20$ ) ek olarak üç servis hızı daha belirlenmiştir ( $Fn=0.25$ ,  $0.30$  ve  $0.35$ ). Bu sayede toplamda dört servis hızı olacak şekilde İÖHY'nin yetkinliği daha geniş bir kapsamda incelenmiştir.

#### 4.3.4.1 ONRT Gemisi için HAD Yaklaşımı ile Özetme Hesaplamaları

Bu bölümde Tablo 4.20'de hidrostatik özellikleri verilmiş ONRT modelinin 4 farklı servis hızında HAD yöntemi kullanılarak özetme noktası hesaplamaları gerçekleştirilmiştir. ONRT modelinin pervaneli durumdaki HAD analizlerinin yanı sıra bir sonraki bölümde kullanılacak olan İÖHY'nin bir girdisi olacak pervanesiz durumdaki toplam direnç değerinin ( $R_{T_m}$ ) belirlenebilmesi için belirlenen servis

hızlarında pervanesiz analizler de gerçekleştirilmiştir. Bu bölümde gerçekleştirilen HAD analizlerinin tümünde  $k-\varepsilon$  türbülans modeli kullanılmıştır. Ayrıca tüm HAD analizleri zamandan bağımsız olarak gerçekleştirilmiştir. Çift fazlı akış VOF yöntemi kullanılarak modellenmiştir. Pervane bölgesi için zamandan bağımsız analiz olanağı veren hareketli referans sistemi (MRF) metodu kullanılmıştır.

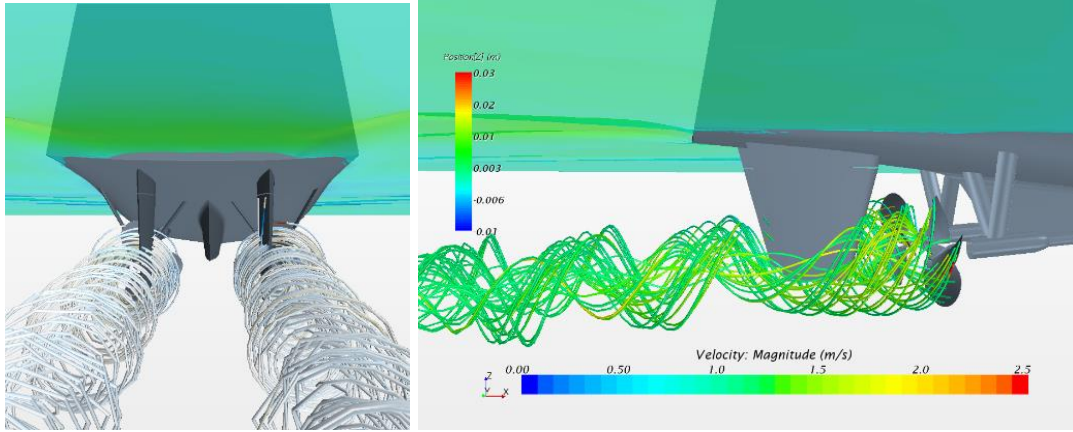
Tablo 4.22’de  $Fn=0.20$  servis hızındaki özitme durumunda model deneyi ve HAD yaklaşımı ile hesaplanan pervane devir sayıları görülmektedir. Söz konusu tabloda yer alan HAD yaklaşımı ile hesaplanan özitme noktasında yüzey sürtünmesi doğrulama (SFC) değeri dikkate alınmamıştır. Bunun nedeni JBC bölümünde yer alan model deneyinin aksine, ONRT model deneyinin geminin gerçek boyutundaki özitme noktası hesaplaması için değil manevra deneyleri için gerekli parametrelerin elde edilmesi için yapılmasıdır. Bu nedenle model deneylerinde yüzey sürtünmesi doğrulama değeri hesaplamalara dahil edilmemiştir. HAD yöntemi ile elde edilen pervane devir sayısının deney sonuçları ile uyumlu olduğu görülmüştür.

**Tablo 4.22** ONRT Modeli için  $Fn=0.20$  Hızında Deneyle ve HAD Yöntemi ile Hesaplanan Pervane Devir Sayıları

$Fn=0.20$	$n_m(d/s)$
Deney	8.97
HAD	9.35

HAD yönteminin deney ile doğrulanmasının ardından, belirlenen diğer servis hızları için de HAD yöntemi ile özitme analizleri gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.26’da deney hızında ( $Fn=0.20$ ) özitme durumunda gerçekleştirilen HAD analizi ile elde edilen serbest su yüzeyi deformasyonu ve pervane arkasında oluşan akışın görüntüleri görülmektedir.

HAD yöntemi ile ONRT gemisi için belirlenen 4 servis hızında hesaplanan sevk parametreleri Tablo 4.22’de verilmiştir. ONRT gemisi çift pervaneli olduğundan Tablo 4.22’de verilen pervane itmesi ( $T_m$ ) değeri, tek pervanede ölçülen itme değerini ifade etmektedir.



**Şekil 4.26**  $F_n=0.20$ 'de Pervaneli ONRT Modelinin HAD Analizi ile Elde Edilen Serbest Su Yüzeyi Deformasyonu ve Pervane Arkasındaki Akış Görüntüleri

**Tablo 4.23** ONRT Gemisinin Farklı Servis Hızlarında HAD ile Hesaplanmış Özitme Parametreleri

Fr	0.20*	0.20**	0.25	0.30	0.35
$R_{TP_m}$ (N)	6.10	6.36	9.21	13.27	17.71
$R_{T_m}$ (N)	4.78	4.78	7.18	10.70	14.58
$T_m$ (N)	1.95	3.18	2.97	4.38	5.90
$Q_m$ (Nm)	0.066	0.098	0.101	0.146	0.197
SFC (N)	2.20	0	3.27	4.51	5.91
$D_m$ (m)	0.107	0.107	0.107	0.107	0.107
$n_m$ (d/s)	8.30	9.35	10.35	12.5	14.52
$n_s$ (d/s)	<b>1.19</b>	<b>1.34</b>	<b>1.49</b>	<b>1.79</b>	<b>2.07</b>
$K_{T_m}$	0.219	0.281	0.215	0.217	0.217
$K_{Q_m}$	0.069	0.081	0.068	0.068	0.068
J	1.115	0.970	1.107	1.103	1.103
$K_{Q_t}$	0.065	0.078	0.064	0.064	0.064
w	0.112	0.130	0.120	0.118	0.122
t	0.219	0.247	0.220	0.192	0.179
$V_m$ (m/s)	1.111	1.111	1.389	1.667	1.945
$\eta_h$	0.880	0.865	0.888	0.916	0.936
$\eta_r$	0.939	0.960	0.949	0.942	0.948
$\eta_0$	0.599	0.557	0.588	0.595	0.591
* Deney servis hızı					
**Deney servis hızı (SFC uygulanmadan)					

*HAD yaklaşımı ile elde edilen değerler için doğrulama ve onaylama çalışması*

ONR gemisinin HAD yöntemi ile elde edilen özitme parametreleri için bir doğrulama ve onaylama çalışması gerçekleştirilmiştir. Doğrulama ve onaylama çalışmasında kullanılacak deney sonuçları elde edilirken SFC değeri hesaplamalara dahil edilmemiş, pervanelerin ürettiği toplam itme kuvvetinin direkt olarak modelin toplam direncine eşit



olduğu durumdaki pervane devir sayıları dikkate alınmıştır. Bu sebeple doğrulama ve onaylama çalışması için yapılan HAD analizleri SFC değeri hesaba alınmadan gerçekleştirilmiştir. Eleman boyutları Richardson ekstrapolasyon değeri  $r_G = \sqrt{2}$  oranında değişecek şekilde üç farklı ağ elemanı yapısına sahip akış çevresi oluşturulmuş ve yukarıda belirtilen durum için özetme analizleri gerçekleştirilmiştir. Farklı ağ yapıları ile özetme durumunda elde edilen pervane devir sayıları Tablo 4.24'teki gibi olmuştur.

**Tablo 4.24** Oluşturulan Ağ Elemanları ile Elde Edilen Özetme Durumundaki Pervane Devir Sayıları.

	Deney	Ağ-1	Ağ-2	Ağ-3
Ağ elemanı	-	1.87M	3.11M	10.11M
n (d/s)	8.97	9.8	9.35	9.33

Tablo 4.24'teki değerler kullanılarak doğrulama ve onaylama çalışması gerçekleştirilmiş ve çalışma sonucu elde edilen değerler Tablo 4.25'te görülmektedir.

**Tablo 4.25** Doğrulama ve Onaylama Çalışması Parametreleri

$\varepsilon_{21}$	$\varepsilon_{32}$	$R_{G2}$	$r_G$	$p_G$	$\delta_{RE}$	$C_G$	$U_G$
0.01	0.45	0.022	1.414	10.99	0.01	44.0	0.89

Tablo 4.25'e göre  $0 < R_{G2} < 1$  şartı gerçekleştiğinden oluşturulan ağ yapılarının sonuçları ele alındığında monoton bir yakınsama gerçekleşmektedir. Deney sonuçlarında belirsizlik değeri ile alakalı herhangi bir bilgi bulunmadığından, belirsizlik değerinin yalnızca ağ yapısı belirsizliğinden kaynaklandığı kabul edilmiştir ( $U_V \cong U_N$ ). Belirsizlik analizi Ağ-2 baz alınarak gerçekleştirildiğinden ağ elemanlarına bağlı belirsizlik değeri, deney sonucuna göre oranlandığında 9.9%D olmaktadır. Ağ-2'nin ise deney sonuçlarına göre karşılaştırmalı hata değeri (E) ise 4.06%D olmuştur.

Yapılan doğrulama ve onaylama çalışması sonucunda  $|E| < U_V$  şartı sağlanmış olduğundan, ONR gemisinin özetme noktası hesaplamaları için uygulanan HAD yaklaşımı onaylanmıştır.

#### 4.3.4.2 ONRT Gemisi için İÖHY ile Özetme Hesaplamaları

Bir önceki bölümde de ifade edildiği gibi İÖHY ile özetme noktası hesabı yapılabilmesi için pervanesiz durumdaki modelin toplam direnç değerlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu sebeple belirlenen servis hızlarında pervanesiz durumdaki modelin Tablo 4.23'te de yer alan toplam direnç değerleri HAD yöntemi kullanılarak hesaplanmıştır.

Tablo 4.26’da ONRT gemisi için 4 farklı servis hızında İÖHY ile hesaplanmış sevk parametreleri görülmektedir. Deney servis hızı ( $F_n=0.20$ ) göz önünde bulundurulduğunda İÖHY ile hesaplanan pervane devir sayısı (7.70 d/s), deneyde hesaplanan pervane devir sayısından (8.97 d/s) biraz farklıdır. Bu farklılığın nedenleri ile beraber İÖHY ile hesaplanan sevk parametrelerinin HAD yöntemi ile hesaplanan değerlerle karşılaştırılması ve irdelenmesi bir sonraki bölümde yapılmıştır.

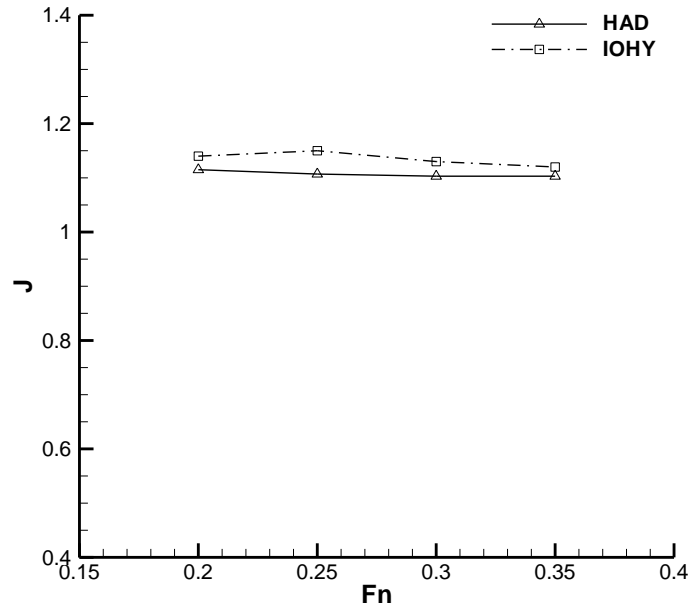
**Tablo 4.26** İÖHY ile ONRT Gemisi için Hesaplanan Özetme Parametreleri

$F_n$	0.20*	0.25	0.30	0.35
k	0.015	0.015	0.015	0.015
t	0.11	0.11	0.11	0.11
w	0.156	0.156	0.156	0.156
J	1.14	1.15	1.13	1.12
$K_T$	0.206	0.201	0.211	0.214
$K_Q$	0.06	0.06	0.06	0.06
$n_m$ (d/s)	7.70	9.56	11.68	13.69
<b><math>n_s</math> (d/s)</b>	<b>1.10</b>	<b>1.37</b>	<b>1.67</b>	<b>1.96</b>
$\eta_0$	0.62	0.62	0.62	0.61
*Deney servis hızı				

#### 4.3.4.3 Hesaplanan Özetme Parametrelerinin Karşılaştırılması ve Yorumlanması

Bu bölümde ONRT gemisi için farklı servis hızlarında farklı yöntemlerle yapılan özetme hesaplamalarının karşılaştırılması yapılmıştır. Tekrar belirtmek gerekir ki karşılaştırılan yöntemler arasında en güvenilir sonuçlar model deneyi sonuçlarıdır. Gerek HAD yöntemi gerekse İÖHY sayısal yaklaşımlar olup, yüksek maliyetli ve uğraş gerektiren model deneylerine alternatif olarak uygulanmaktadırlar. Dolayısıyla bu bölümde, uygulanan sayısal yaklaşımların değerlendirmesi diğer gemilerde olduğu gibi model deneyi sonuçlarına göre yapılmaktadır. Söz konusu deney sonucu yalnızca tek servis hızında ( $F_n=0.20$ ) özetme durumunda (SFC uygulanmadan) ölçülen pervane devir sayısından ibarettir [48]. Bu servis hızında model deneyinde özetme durumunda ölçülen pervane devir sayısı 8.97 d/s iken tez çalışması kapsamında uygulanan HAD yöntemi ile bu değer 9.35 d/s olmuştur. İÖHY ile ise bu değer 7.70 d/s olarak hesaplanmıştır. Bu durumda HAD yöntemi ONRT gemi modelinin özetme noktasını İÖHY’ne göre daha doğru bir şekilde hesapladığı söylenebilir. Ancak bu durum yalnızca sözü geçen servis hızı ( $F_n=0.20$ ) için bu şekilde gerçekleşmiştir. İÖHY’nin etkinliğini daha geniş bir açıdan inceleyebilmek için, iki sayısal yaklaşım ile farklı servis hızlarında hesaplanan özetme durumundaki parametrelerinin karşılaştırılması daha doğru olacaktır. HAD

yaklaşımının söz konusu servis hızında deneyle uyumlu sonuç vermesi, diğer servis hızlarında da doğruya yakın sonuçlar vereceğini göstermektedir. Bunun nedeni HAD yönteminin İÖHY'nin aksine ampirik formüller ile hesaplamalar yapmadan, sonlu hacimler yöntemi ile RANS denklemlerini çözmek suretiyle direkt olarak gemi etrafındaki akışı modelleyerek sonuç vermesidir. Şekil 4.27'de HAD yaklaşımı ve İÖHY ile farklı servis hızlarında özitleme durumunda hesaplanan pervane ilerleme katsayılarının karşılaştırılması görülmektedir.



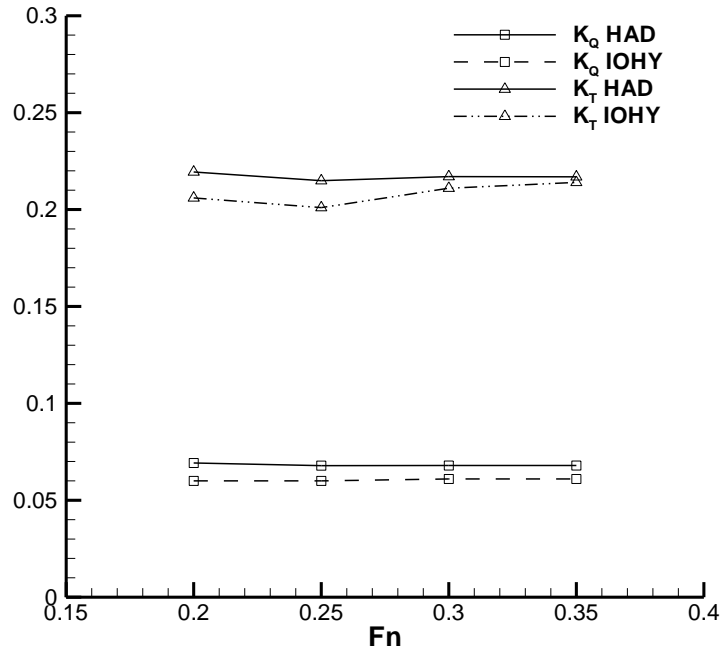
**Şekil 4.27** ONRT Geminin Özitleme Durumunda HAD Yöntemi ve İÖHY ile Hesaplanan Pervane İlerleme Katsayılarının Karşılaştırılması

Şekil 4.28'de ise özitleme durumunda farklı sayısal yaklaşımlarla hesaplanan pervane itme ve tork sayılarının karşılaştırılması görülmektedir.

HAD ve İÖHY ile farklı servis hızları için özitleme hesaplamaları ONRT gemisinin tam ölçekteki özitleme durumu için yapılmıştır. Bir başka deyişle hesaplamalarda tam ölçekteki gemiye geçebilmek adına yüzey sürtünmesi doğrulaması dikkate alınmış ve sevk parametreleri bu şekilde hesaplanmıştır.

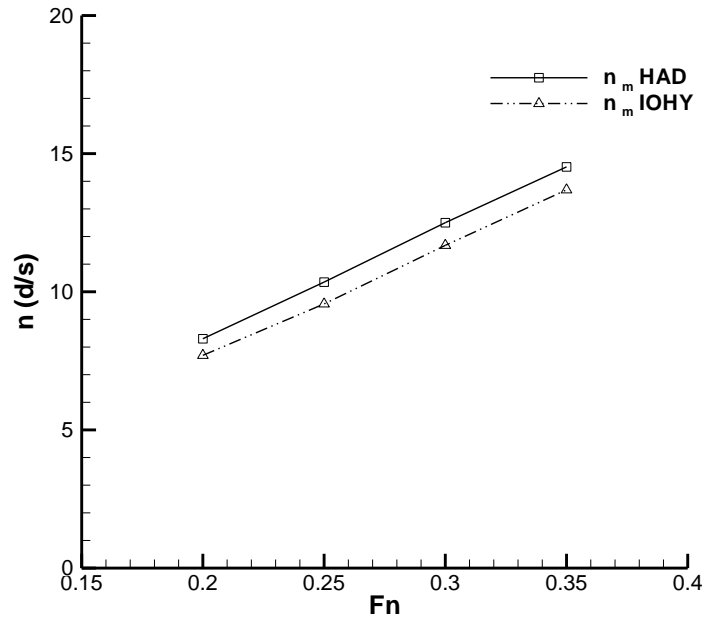
Şekil 4.27'de iki farklı yöntemle hesaplanmış pervane ilerleme katsayılarının karşılaştırılması görülmektedir. Eğriler incelendiğinde HAD yöntemi ve İÖHY'deki uyumun yüksek servis hızlarında daha iyi olduğu görülmektedir. Bu durum Şekil

4.28’de yer alan pervane itme katsayısı eğrilerinde de görülmektedir. Buna neden olarak İÖHY’de ampirik formüllerle hesaplanan iz katsayısı ve itme azalması değerlerinin geminin servis hızından bağımsız olarak hesaplanması gösterilebilir. Tablo 4.26 göz önünde bulundurulduğunda İÖHY ile hesaplanan form katsayısı, itme azalması ve iz katsayısı parametrelerinin servis hızı ile değişmediği görülmektedir. Oysaki Tablo 4.23’te HAD ile elde edilen sevk parametreleri incelendiğinde söz konusu parametrelerin geminin servis hızı ile değiştiği görülmektedir. Yüksek servis hızlarında iki yöntemle hesaplanan bu değerler birbirlerine yaklaştığı için hesaplanan pervane itme katsayısı ve buna bağlı olarak pervane ilerleme katsayıları daha uyumlu olmuştur.

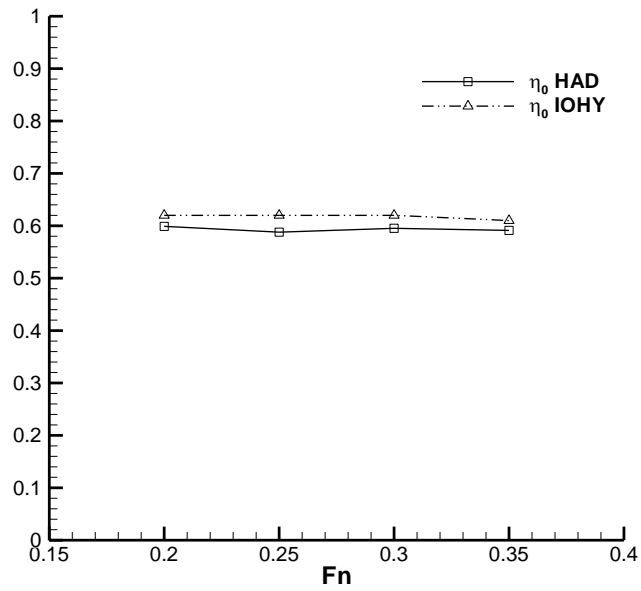


**Şekil 4.28** ONRT Geminin Özitme Durumunda HAD Yöntemi ve İÖHY ile Hesaplanan Pervane İtme ve Tork Katsayılarının Karşılaştırılması

Benzer şekilde model pervane devir sayıları arasında tüm servis hızlarında küçük bir fark bulunmaktadır (bkz. Şekil 4.29). Bunun nedeni itme azalması parametresinin İÖHY ile HAD yöntemine göre genel olarak düşük hesaplanmasıdır. İtme azalmasının İÖHY ile düşük hesaplanması sebebiyle pervaneli durumdaki toplam direnç değeri ( $R_{TP_m}$ ) olması gerekenden daha düşük olmakta ve buna bağlı olarak ihtiyaç duyulan pervane itme değeri ( $T_m$ ) daha az olmaktadır. Söz konusu servis hızlarında İÖHY ile hesaplanan pervane devir sayılarının düşük olması bu şekilde açıklanabilir.



Şekil 4.29 ONRT Modelinin Özitme Durumunda HAD Yöntemi ve İÖHY ile Hesaplanan Pervane Devir Sayılarının Karşılaştırılması



Şekil 4.30 ONRT Gemisinin Özitme Durumunda HAD Yöntemi ve İÖHY ile Hesaplanan Açık-su Pervane Verimlerinin Karşılaştırılması

Şekil 4.30’da iki yöntemle farklı servis hızlarında hesaplanan açık-su pervane verimleri görülmektedir. Önceki paragrafta belirtildiği gibi İÖHY ile hesaplanan pervane devir sayıları HAD yöntemine göre bir miktar düşük olduğundan İÖHY’de elde edilen pervane ilerleme katsayıları HAD yöntemine göre bir miktar yüksek olmuştur. ONRT pervanesinin açık-su pervane eğrisi incelendiğinde, bu bölgede pervane ilerleme katsayısı değerindeki artışın açık-su pervane verim değerinde düşüşe neden olduğu görülebilmektedir [48]. İki sayısal yöntemle hesaplanan açık-su pervane verimi değerleri arasındaki küçük farkın nedeni bu şekilde açıklanabilir.

Sonuç olarak iki yöntemle özitme durumunda farklı servis hızlarında hesaplanan; pervane ilerleme katsayısı, pervane itme katsayısı, pervane tork katsayısı, pervane devir sayısı ve açık-su pervane verimi değerlerinin karşılaştırmaları yapılmıştır. ONRT gemisi, tez çalışması kapsamında geliştirilen özitme hesaplama yönteminin çift pervaneli gemiler için de güvenilir sonuçlar verip vermediğinin incelenmesi açısından önemlidir. Günümüz şartlarında farklı servis hızlarındaki özitme parametrelerini bulmak için uzun süreçler alan HAD analizleri göz önünde bulundurulduğunda, İÖHY’nin çift pervaneli gemiler için de hızlı ve tutarlı sonuçlar verdiği görülmüştür.

#### **4.3.5 KCS Gemisi Özitme Hesaplamaları**

Bu bölümde KCS (KRISO Container Ship) gemisinin tek bir servis hızındaki özitme hesaplamaları, HAD ve İÖHY ile gerçekleştirilmiş ve elde edilen sonuçların literatürde bulunan sayısal ve deneysel sonuçlarla karşılaştırılması yapılmıştır. KCS gemisinin ve KP505 pervanesinin BDT programı ile deneydeki gibi 1:31.599 ölçeğinde bir modeli oluşturulmuş ve deney servis hızında ( $F_n=0.26$ ) pervanesiz ve pervaneli durumda HAD analizleri gerçekleştirilmiştir. Özitme durumu için iki yöntemle sayısal olarak hesaplanan özitme parametrelerinin karşılaştırılması yapılarak İÖHY’nin yeteneği incelenmiştir.

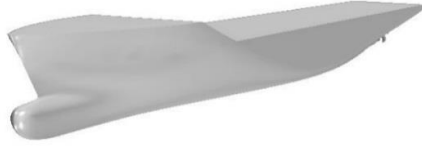
Tablo 4.27 ve Tablo 4.28’de KCS gemisi ve KP505 pervane modelinin temel geometrik özellikleri, Şekil 4.31’de ise KCS gemisinin ve KP505 pervanesinin genel görünümleri görülmektedir.

**Tablo 4.27** KCS Gemi Modelinin Temel Boyutları

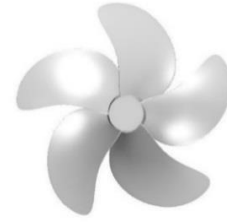
Dikmelerarası uzunluk	$L_{BP}$	m	7.2786
Su hattı genişliği	$B_{WL}$	m	1.019
Su çekimi	T	m	0.3418
Düzensiz ıslak yüzey alanı	S	$m^2$	9.4379
Blok katsayısı	$C_B$	-	0.6505
Orta-kesit katsayısı	$C_M$	-	0.985
Model hızı	$V_m$	m/s	2.196

**Tablo 4.28** KP505 Pervanesinin Temel Geometrik Özellikleri

Pervane çapı	m	0.25
Pervane kanat sayısı		5
Pervane göbek çapı	m	0.045
P/D (Ortalama)		0.95
$A_E/A_0$		0.80



(a)



(b)

**Şekil 4.31** (a) KCS Geminin Genel Görünümü (b) KP505 Pervanesinin Genel Görünümü

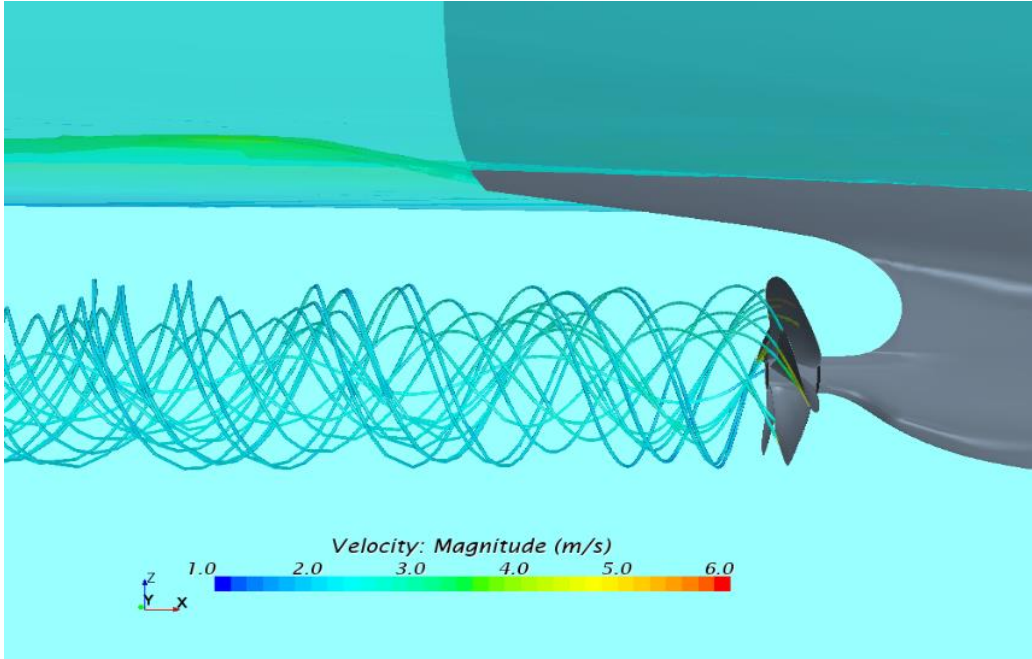
KCS gemi modelinin HAD yöntemi ile pervaneli durumdaki özetme noktası hesaplamalarının gerçekleştirilmesinden önce  $F_n=0.26$  servis hızında pervanesiz durumdaki HAD analizi gerçekleştirilmiştir. Bu servis hızı için literatürde bulunan pervanesiz durumdaki modelin toplam direnç değeri ile HAD yaklaşımı ile elde edilen toplam direnç değeri karşılaştırılmıştır (bkz. Tablo 4.29). Pervanesiz durumdaki toplam direnç değeri İÖHY için de girdi değeri olarak kullanılacaktır.

KCS gemi modeli için pervanesiz ve pervaneli olarak gerçekleştirilen tüm HAD analizlerinde  $k-\epsilon$  türbülans modeli kullanılmış olup, analizler zamandan bağımsız olarak gerçekleştirilmiştir. Çift fazlı akış VOF metodu kullanılarak modellenmiştir. Pervaneli HAD analizlerinde pervane bölgesindeki akış hareketli referans sistemi (MRF) metodu kullanılmıştır.

**Tablo 4.29** KCS Modeli için HAD Yöntemiyle Elde Edilen Sonucun Deney Sonucu ile Karşılaştırılması

	DENEY	HAD
$C_T$	$3.550 \cdot 10^{-3}$	$3.690 \cdot 10^{-3}$
$R_T$	80.59 N	83.8 N

Tablo 4.28'den de anlaşılacağı üzere pervanesiz durumda HAD yaklaşımı ile elde edilen sonuç, deney sonucuyla uyumlu olmuştur. Bu işlemin ardından pervaneli durumda HAD analizi gerçekleştirilmiş ve özitime noktası hesaplaması yapılmıştır. Özitime hesaplamaları model boyutunda gerçekleştirildiğinden referans çalışmada yer alan SFC değeri hesaplamalara dahil edilmiştir [50]. Şekil 4.32'de KCS modelinin  $Fn=0.26$  servis hızında ve özitime durumunda HAD analizi ile elde edilen serbest su yüzeyi deformasyonu ve pervane arkasındaki akışın görüntüsü görülmektedir.



**Şekil 4.32**  $Fn=0.26$ 'da Pervaneli KCS Modeli için HAD Analizi ile Elde Edilen Serbest Su Yüzeyi Deformasyonu ve Pervane Arkasındaki Akış

KCS gemisinin özitime noktasının HAD yaklaşımı ile hesaplanmasının ardından İÖHY ile de özitime noktasındaki sevk parametreleri belirlenmiştir. Tez kapsamında KCS gemisinin  $Fn=0.26$  servis hızında HAD yaklaşımı ve İÖHY ile hesaplanan sevk parametrelerinin ve literatürde diğer araştırmacıların HAD yaklaşımı ile elde ettikleri sonuçların deney sonuçları ile karşılaştırılması Tablo 4.30'da verilmiştir [5],[50],[51] [52],[53].



**Tablo 4.30** KCS Gemisi için Yapılan Özitme Hesaplamalarının Literatürde Bulunan Sonuçlarla Karşılaştırılması

	$n_m$ (d/s)	$C_T 10^3$	t	$w_T$	J	$K_T$	$K_Q$	$\eta_o$	$\eta_H$
Deney	9.50	3.966	0.147	0.208	0.728	0.170	0.029	0.682	1.077
Carrica vd. (DES)[50]	9.62	4.011	0.127	0.197	0.733	0.169	0.029	0.683	1.087
Carrica vd. (HSVA)[50]	9.56	3.942	0.135	0.211	0.725	0.170	0.030	0.667	1.096
Kim vd. [51]	9.70	-	0.157	0.198	0.726	0.168	0.029	0.664	1.051
Gao vd. [5]	-	3.964	0.148	0.228	0.714	0.165	0.029	-	1.104
Gaggero vd. [52]	9.20	3.754	0.109	0.253	-	0.169	-	-	1.193
Shen vd. [53]	9.32	3.840	0.114	0.128	0.736	0.168	0.029	0.679	1.016
Tez Çalışması (HAD)	9.68	3.999	0.116	0.206	0.721	0.168	0.028	0.687	1.113
Tez Çalışması (İÖHY)	9.28	-	0.187	0.267	0.694	0.189	0.031	0.665	1.109

Tablo 4.30 incelendiğinde KCS gemisi için HAD yaklaşımı ile yapılan özitme hesaplamaları sonucunda elde edilen sonuçların deney sonuçları ile uyumlu olduğu görülmüştür. İÖHY ile elde edilen sevk parametreleri HAD yöntemi kadar uyumlu sonuç vermese de literatürdeki diğer çalışmalarla ve deney sonuçları ile karşılaştırıldığında makul sonuçlar vermektedir.

İÖHY ile KCS gemisi için gerçekleştirilen hesaplamalarda itme azalması katsayısı ve iz katsayısı parametreleri geliştirilen kod içerisinde bulunan ampirik yaklaşımlarla hesaplanmıştır. Hesaplanan bu parametreler deney sonuçları ile karşılaştırıldıklarında yüksek olmaktadır. Buna bağlı olarak da özitme durumunda hesaplanan pervane devir sayısı deney sonuçlarından bir miktar farklıdır. Ancak karşılaştırılma yapılan diğer yaklaşımlara göre uygulanma kolaylığı, sonuç alma hızı gibi özellikleri göz önünde bulundurulduğunda İÖHY'nin oldukça etkili olduğu söylenebilir.

Deniz taşıtlarının hedeflenen bir servis hızında gidebilmesi ancak uygun ana makine ve sevk sistemi tercihi ile mümkün olabilmektedir. Yüksek kapasitelerde ana makine tercihi deniz taşıtlarının istenilen hız değerlerine çıkmalarını sağlasalar da yüksek maliyetleri, yakıt tüketimleri ve çevreye olan olumsuz etkileri göz önünde bulundurulduğunda mühendislik bakış açısıyla verimli olmamaktadırlar. Özitme parametrelerinin gerçeğe yakın bir şekilde öngörülebilmesi söz konusu verimsizliklerin önüne geçerek oldukça pahalı olan bu sistemlerin daha düşük maliyetlerle çalışabilmelerini sağlayabilmektedir. Bu nedenle gemi hidrodinamiği alanında özitme noktası öngörü çalışmaları her dönem için önemli bir konu olmuştur.

Özitme noktası parametrelerinin öngörülmesi konusunda en güvenilir sonuçlar deneysel yaklaşımlarla elde edilmektedir. Son dönemlerde gemi hidrodinamiği alanında deneysel yaklaşımlara uyumlu sonuçlar veren HAD yaklaşımları da özitme noktası öngörü hesaplamalarında sıkça kullanılmaktadır. Her iki yaklaşımın da uygulanması kendi içerisinde zorluklar barındırmaktadır. Bu tez çalışması kapsamında söz konusu yaklaşımlara alternatif olarak uygulanması nispeten kolay, hızlı ve gerçeğe yakın sonuçlar alınabilen sayısal bir özitme noktası öngörü yaklaşımı geliştirilmiştir.

Geliştirilen yöntem tez kapsamında geniş bir şekilde ifade edilmiştir. Yöntemin, farklı deniz taşıtı türlerinin özitme parametrelerinin öngörüsündeki yeteneklerini incelemek adına birbirleri ile geometrik olarak benzemeyen beş farklı deniz taşıtı belirlenmiştir. Belirlenen deniz taşıtları için İÖHY ile özitme parametrelerinin öngörülmesi gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar diğer araştırmacılar tarafından deneysel ve sayısal olarak elde edilmiş sonuçların yanında, daha geniş bir açıdan incelemek adına literatürde bulunmayan farklı servis hızları için bu tez çalışması kapsamında HAD yaklaşımı ile elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır.

Tez kapsamında gerçekleştirilen deneysel yaklaşımla doğrulanmış HAD yöntemi ile DTC gemisinin farklı servis hızlarında özitme parametreleri belirlenmiştir. Daha sonra söz konusu hızlar için İÖHY ile özitme parametreleri belirlenmiş ve sonuçların

birbirleri ile uyumlu olduğu gözlenmiştir. Bu gemi için iki farklı yaklaşımla hesaplanan parametrelerin arasındaki küçük farklara İÖHY içerisinde kullanılan ampirik bağıntıların HAD yöntemi ile farklı sonuçlar vermesinin neden olduğu görülmüştür.

DARPA Suboff gerek bir denizaltı olması bakımından gerekse de İÖHY'nin uygulanış şekli açısından tez kapsamında ele alınan deniz taşıtlarından farklıdır. İÖHY'nin birinci sürümü içerisinde yer alan ampirik bağıntılar yalnızca gemiler için geçerli olduğundan yöntem bir denizaltı için kullanılacaksa yöntemin ikinci sürümünün kullanılması gerekmektedir. DARPA Suboff denizaltısı için birinci sürümde ampirik ifadelerle hesaplanan parametreler yerine ikinci sürüm kullanılarak HAD yaklaşımından ele edilen değerler kullanılmıştır. Buradaki amaç yöntem için gerekli olan girdilerin gerçek değerlerine çok yakın bir şekilde girildiğinde sonuçların nasıl gerçekleşeceğini görmektir. İki farklı yaklaşımla elde edilen sonuçların birbirleriyle son derece uyumlu olması İÖHY'de itme azalması ve iz katsayısı değerlerinin doğruluğunun sonuçları nasıl etkilediğini göstermiştir.

JBC gemisi yüksek blok katsayısı değerine sahip dolgun bir geometriye sahip olduğundan tez kapsamına alınmış ve İÖHY'nin bu tipteki gemilerin özetme parametrelerini belirlemedeki yetenekleri incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar karşılaştırıldığında İÖHY'nin uyumlu sonuçlar verdiği gözlenmiştir. Sonuçlar arasındaki küçük farkların İÖHY'nin birinci sürümünde IMO tarafından önerilen ampirik bağıntılarla hesaplanan itme azalması ve iz katsayısı parametrelerinden kaynaklandığı tespit edilmiştir.

Çift pervaneli bir gemi olan ONRT gemisi için İÖHY ile gerçekleştirilen özetme parametreleri öngörüsünde de yapılan karşılaştırmalar incelendiğinde yöntemin başarılı sonuçlar verdiği söylenebilmektedir. Ancak belirtmek gerekir ki çift pervaneli gemilerde pervanelerin birbirleri üzerindeki hidrodinamik etkileşim kaçınılmazdır. İÖHY'de bu durum ihmal edilmekte, pervanelerin birbirinden etkilenmeden bağımsız bir şekilde çalıştığı varsayılmakta ve bu durum hesaplanan sonuçları az da olsa etkilemektedir.

Son olarak KCS gemisi için literatürde yer alan servis hızı için İÖHY ile özetme hesaplamaları gerçekleştirilmiş ve sonuçlar tez kapsamında gerçekleştirilen HAD analizi ve literatürde diğer araştırmacılar tarafından hesaplanmış sonuçlarla

karşılaştırılmıştır. Yapılan karşılaştırma sonucunda yöntemin KCS gemisi için de başarılı bir şekilde sonuç verdiği görülmüştür.

Yukarıda da özetlendiği gibi tez kapsamında farklı türde deniz taşıtlarının özitme parametrelerini başarıyla öngörebilen İteratif Özitme Hesaplama Yöntemi geliştirilmiştir. Geliştirilen yöntemin uygulanması diğer yaklaşımlara göre daha kolay, sonuç alma süreci ise son derece hızlı olmakla beraber yöntemin kullanıcılara herhangi bir maliyeti bulunmamaktadır. Yöntem içerisinde bulundurduğu ampirik yaklaşımların iyileştirilebilmesi yönü ile geliştirmeye açıktır. DARPA Suboff denizaltısı çalışmasında görüldüğü üzere itme azalması, iz katsayısı ve form faktörü parametrelerini gelecekte gerçeğe daha yakın bir şekilde hesaplayan ampirik bağıntıların geliştirilmesiyle İÖHY'nin özitme parametreleri öngörüsündeki başarısının artması kaçınılmaz olacaktır.

- [1] F. Stern, H.T. Kim, V.C. Patel, and H.C. Chen, “A Viscous-Flow Approach to the Computation of Propeller-Hull Interaction”, *Journal of Ship Research*, vol. 32, no. 4, 246-262, 1988.
- [2] T. Bugalski and P. Hoffman, “Numerical simulation of the Self-Propulsion Model Tests”, *Second International Symposium on Marine Propulsors – SMP’11*, Hamburg, Germany, 2011.
- [3] M.A. Castro, P.M. Carrica and F. Stern, “Full scale self-propulsion computations using discretized propeller for the KRISO container ship KCS”, *Computers&Fluids*, vol 51,35-47, 2011.
- [4] D. Ponkratov and C. Zegos, “Validation of Ship Scale CFD Self-Propulsion Simulation by the Direct Comparison with Sea Trials Results”, *Fourth International Symposium on Marine Propulsors – SMP’15*, Texas, USA, 2015.
- [5] Q. Gao, W. Jin, and D. Vassalos, “The calculations of propeller induced velocity by RANS and momentum theory”, *J. Marine Sci. Appl.*, vol.11, no. 2, 164-168, 2012.
- [6] S. Gaggero, D. Villa, and M. Viviani. “An extensive analysis of numerical ship self-propulsion prediction via coupled BEM/RANS approach”, *Applied Ocean Research*, vol. 66, 55-78, 2017.
- [7] B. Starke, and J. Bosschers, “Analysis of scale effects in ship powering performance using a hybrid RANS-BEM approach” , *29th Symposium on Naval Hydrodynamics*, Gothenburg, Sweden, 2012.
- [8] M. Greve, K. Wöckner-Kluwe, F. M. Abdel-Maksoud, and T. Rung, “Viscous-Inviscid Coupling Methods for Advanced Marine Propeller Applications”, *International Journal of Rotating Machinery*, vol. 2012, Article ID 743060, 1-12, 2012.
- [9] P. Queutey, E. Guilmineau, M. Visonneau, J. Wackers and G.B. Deng, “RANS and Hybrid RANS-LES Simulations around the Japan Bulk Carrier of the Tokyo 2015 CFD Workshop”, *19th Numerical Towing Tank Symposium-NuTTS’16*, Japan, 2015.
- [10] N. Chase and P.M. Carrica, “Submarine propeller computations and application to self-propulsion of DARPA Suboff, *Ocean Engineering*”, vol. 150, 68-80, 2018.
- [11] S. Sezen, A. Dogrul, C. Delen, and S. Bal, “Investigation of self-propulsion of DARPA Suboff by RANS method”, *Ocean Engineering, Ser. B*, vol. 60, 258-271, 2013.
- [12] W. Chao, S. Sheng-xia, C. Xin, and Y. Li-yu, “Numerical simulation of hydrodynamic performance of ice class propeller in blocked flow-using overlapping grids method”, *Ocean Engineering*, vol.141, 418-426, 2017.
- [13] L.Z. Wang, C.Y. Guo, Y.M. Su, and T.C. Wu, “A numerical study on the correlation between the evolution of propeller trailing vortex wake and skew of

- propellers”, International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering, vol. 10, no. 2, 212-224, 2018.
- [14] J.S. Go, H.S. Yoon, and J.H. Jung, “Effects of a duct before a propeller on propulsion performance”, Ocean Engineering, vol. 136, 54-66, 2017.
- [15] C. Yin, J. Wu, T. Sun, and D. Wan. “A numerical study for self-propelled JBC with and without energy saving device.”, Tokyo 2015 CFD Workshop, Japan, 2015.
- [16] B. Schuiling, J. Windt, D. Rijpkema, and T. van Terwisga, “Computational Study on Power Reduction by a Pre-Duct for a Bulk Carrier”, Tokyo 2015 CFD Workshop, Japan , 2015.
- [17] Korkmaz K. B., “CFD predictions of resistance and propulsion for the JAPAN Bulk Carrier (JBC) with and without an energy saving device.”, Chalmers University of Technology, Yüksek Lisans Tezi, 2015.
- [18] M. Aydın ve A. Şalcı, “Türkiye sularına uygun bir balıkçı gemisinin iz karakteristiklerinin incelenmesi”, İTÜ Dergisi, vol. 7, no. 1, 3-14, 2008.
- [19] O.K. Kinaci and M.K. Gokce, “Computational hydrodynamic analysis of Duisburg Test Case with free surface and propeller”, Brodogradnja, vol. 66, no. 4, 23-38, 2015.
- [20] S. Duman, S. Sezen and S. Bal, “URANS Approach in Hull-Propeller-Rudder Interaction of a Surface Combatant at High Speed.”, High Speed Marine Vehicles-HSMV XI, Napoli, İtalya, 2017.
- [21] O.K. Kinaci, “Gemi formu, dümen ve pervane etkileşiminin sayısal incelenmesi.”, İstanbul Teknik Üniversitesi, Doktora Tezi, 2013.
- [22] O. el Moctar, V. Shigunov, and T. Zorn, “Duisburg Test Case: Post-Panamax Container Ship for Benchmarking”, Ship Technology Research, vol. 59, no. 3, 50-65, 2012.
- [23] H.L. Liu and T.T. Huang, “Summary of DARPA Suboff experimental program data”, NSWCCD, Report no.: CRDKNSWC/HD-1298-11v, 1998.
- [24] T2015 Workshop, [accessed 2017 Dec. 7]. <http://www.t2015.nmri.go.jp>.
- [25] A. Pecoraro, F.D. Felice, M. Felli, F. Salvatore, and M. Viviani. “An improved wake description by higher order velocity statistical moments for single screw vessel”, Ocean Engineering, vol.108, 81-190, 2015.
- [26] A. Doğrul, “Gemi Direnci ve Serbest Yüzey Deformasyonlarının Deneysel ve Sayısal Olarak İncelenmesi.”, Yıldız Teknik Üniversitesi, Doktora Tezi, 2015.
- [27] D.C. Wilcox, “Turbulence modeling for CFD”, 1993.
- [28] B. E. Launder and D.B. Spalding, “The numerical computation of turbulent flows”, Comput. Methods Appl. Mech. Eng., vol. 3, no. 2, 269–289, 1974.
- [29] H.K. Versteeg and W. Malalasekera, “An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method”, 2007.
- [30] F. Menter, “Zonal Two Equation k-omega Turbulence Models for Aerodynamic Flows”, 23rd Fluid Dynamics, Plasmadynamics, and Lasers Conference, Orlando, FL, USA, 1993.

- [31] F. Menter, R. Kuntz, and R. Langtry, “Ten Years of Industrial Experience with the SST Turbulence Model”, 4th Internal Symposium, Turbulence, heat and mass transfer, Antalya, Turkey, 2003.
- [32] C.W. Hirt, and B.D. Nichols, “Volume of Fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries.”, *Journal of Computational Physics*; vol. 39, 201–225, 1981.
- [33] ITTC, “Practical Guidelines for Ship CFD Applications”, Recommended Procedures and Guidelines, 7.5-03-02-03, 1-18, 2011.
- [34] O.K. Kinaci, M. K. Gokce, A. D. Alkan, and A. Kukner, “On Self-Propulsion Assessment of Marine Vehicles”, *Brodogradnja*, vol. 69, no. 4, 29-51, 2018.
- [35] ITTC, “Practical Guidelines for Ship Self-Propulsion CFD”, Recommended Procedures and Guidelines, 7.5-03-03-01, 1-9, 2014.
- [36] F. Stern, R. V. Wilson, H. W. Coleman, and E. G. Paterson, “Comprehensive Approach to Verification and Validation of CFD Simulations – Part 1: Methodology and Procedures”, *J. Fluids Eng.*, vol. 123, no. 4, 793-802, 2001.
- [37] C. Delen, “Gemi Direncinin Deneysel Belirsizlik Analizi”, İstanbul Teknik Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, 2015.
- [38] M. K. Gokce ve O.K. Kinaci, “Gemi Mühendisliği Problemlerinin Sayısal Çözümü için Belirsizlik ve Hata Analizi”, *Gemi ve Deniz Teknolojisi*, vol. 203, 119-125, 2015.
- [39] ITTC, “Ship Models”, Recommended Procedures and Guidelines, 7.5-01-01, 1-9, 2017.
- [40] ITTC (2011a), “Resistance Tests,”, Recommended Procedures and Guidelines, 7.5-02-02-01.
- [41] ITTC (2011b), “Propulsion/bollard pull test,”, Recommended Procedures and Guidelines, 7.5-02-03-01.
- [42] ITTC (2014a), “General Guidelines for Uncertainty Analysis in Resistance Test,”, Recommended Procedures and Guidelines, 7.5-02-02-02.
- [43] H.W. Coleman and W. G. Steele, “Experimentation, Validation and Uncertainty Analysis for Engineers, 2018.
- [44] ITTC, “Resistance and Propulsion Test and Performance Prediction with Skin Frictional Drag Reduction Techniques”, Recommended Procedures and Guidelines, 7.5-02-02-03, 1-13, 2017.
- [45] ITTC, “Report of Resistance Committee”, Proceedings of 8th ITTC, Madrid, Spain, 1957.
- [46] IMO Resolution MEPC.232(65), “Interim Guidelines for Determining Minimum Propulsion. Power to Maintain the Manoeuvrability of Ships in Adverse Conditions”, Annex 16, 2013.
- [47] H.L. Liu and T.T. Huang, “Summary of DARPA Suboff Experimental Program Data.”, NSWCCD, Report no:CRDKNSWC/HD-1298-11v, 1998.
- [48] T2015 Workshop. Available at: <http://www.t2015.nmri.go.jp> .

- [49] J. Wackers, E. Guilmineau, and M. Visonneau, “Unsteady Behavior in RANS Simulation of the JBC and KVLCC2”, Numerical Towing Tank Symposium, Holland, 2017.
- [50] P.M. Carrica, A.M. Castro, and F. Stern, “Self-propulsion computations using a speed controller and a discretized propeller with dynamic overset grids”, Journal of Marine Science and Technology, vol. 15, 316-330, 2010.
- [51] J. Kim, R. Park, K.S. Kim, S.H. Van, and Y.C. Kim, “Development of a numerical method for the evaluation of ship resistance and self-propulsion performances”, Journal of the Society of Naval Architects of Korea, vol. 48, no. 2, 147-157, 2011 (In Korean).
- [52] S. Gaggero, D. Villa, and M. Viviani, “The KRISO Container Ship (KCS) test case: an open source overview”, VI International Conference on Computational Methods in Marine Engineering – MARINE 2015, Rome, Italy, 2015.
- [53] Z. Shen, D. Wan, and P.M. Carrica, “Dynamic overset grids in OpenFOAM with application to KCS self-propulsion and maneuvering”, Ocean Engineering, vol. 108, 287-306, 2015.



## Tezden Üretilmiş Yayınlar

---

**İletişim Bilgisi:** metinkemalgokce@gmail.com

### **Makaleler**

1. O.K. Kinaci, M. K. Gokce, A.D. Alkan, and A. Kukner, “On Self-Propulsion Assessment of Marine Vehicles.”, Brodogradnja, vol. 69, no. 4, 29-51, 2018.
2. M.K. Gokce, O.K. Kinaci, and A.D. Alkan, “Self-Propulsion Estimations for a Bulk Carrier.”, Ships and Offshore Structures, vol. 14, no. 7, 656-663, 2018.