

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DÖRT KUADRANTLI PERVANE AÇIK SU
HİDRODİNAMİK PERFORMANS VERİLERİ İLE GEMİ
İLERİ-GERİ ÖTELEME HAREKETİNİN PRATİK
HESABI

Mahmutcan ESENKALAN

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Gemi İnşaatı ve Gemi Makineleri Mühendisliği Anabilim Dalı

Gemi İnşaatı ve Gemi Makineleri Mühendisliği Programı

Danışman

Dr. Taner ÇOŞGUN

Eş Danışman

Prof. Dr. Ömer Kemal KINACI

Temmuz, 2024

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**DÖRT KUADRANTLI PERVANE AÇIK SU
HİDRODİNAMİK PERFORMANS VERİLERİ İLE GEMİ
İLERİ-GERİ ÖTELEME HAREKETİNİN PRATİK
HESABI**

Mahmutcan ESENKALAN tarafından hazırlanan tez çalışması 04.07.2024 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Gemi İnşaatı ve Gemi Makineleri Mühendisliği Anabilim Dalı, Gemi İnşaatı ve Gemi Makineleri Yüksek Lisans Programı **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Dr. Taner ÇOŞGUN
Yıldız Teknik Üniversitesi
Danışman

Prof. Dr. Ömer Kemal KINACI
İstanbul Teknik Üniversitesi
Eş-Danışman

Jüri Üyeleri

Dr. Öğr. Üyesi Taner ÇOŞGUN, Danışman
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Seyfettin BAYRAKTAR, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Ali DOĞRUL, Üye
Milli Savunma Üniversitesi

Danışmanım Dr. Taner ÇOŞGUN sorumluluğunda tarafımca hazırlanan “Dört Kuadrantlı Pervane Açık Su Hidrodinamik Performans Verileri ile Gemi İleri-Geri Öteleme Hareketinin Pratik Hesabı” 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.

Mahmutcan ESENKALAN

İmza



*Aileme
ve
dostlarima*

TEŞEKKÜR

Tez çalışmam boyunca beni yönlendiren ve destekleyen, bilgisini ve tecrübesini benimle paylaşan değerli danışman hocam Sayın Dr. Taner ÇOŞGUN ve eş danışman hocam Sayın Prof. Dr. Ömer Kemal KINACI'ya en içten teşekkürlerimi iletiyorum. Sabırları, yönlendirmeleri ve inançları olmadan bu çalışmayı başarıyla tamamlayamazdım.

Ayrıca, tezimin gelişiminde emeği geçen değerli hocalarım Doç. Dr. Ahmet YURTSEVEN, Arş. Gör. Hasan TİMURLEK, Arş. Gör. Oğuz SUSAM ve Arş. Gör. Olcay SERT'e minnettarlığımı sunmak isterim. Değerli öneri ve katkılarınız, bu çalışmanın niteliğini arttırmama önemli ölçüde katkı sağladı.

Son olarak, bu süreçte sabır ve sevgilerini her daim hissettiren aileme en derin teşekkürlerimi sunuyorum. Sizin sevgi dolu desteğiniz olmadan bu yolda ilerlemek imkansızdı. Sizlerin varlığı, her zorluğun üstesinden gelmemi sağladı ve beni daima ileriye taşıdı.

Mahmutcan ESENKALAN

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR	iv
SİMGE LİSTESİ	vii
KISALTMA LİSTESİ	ix
ŞEKİL LİSTESİ	x
TABLO LİSTESİ	xii
ÖZET	xiii
ABSTRACT	xv
1 GİRİŞ	16
1.2 Tezin amacı.....	2
1.3 Literatür Özeti.....	2
1.4 Hipotez.....	7
2 MATEMATİKSEL MODELLEME	8
2.1 Yönetici Denklemler.....	8
2.2 Türbülansın Modellenmesi.....	9
2.3 Geliştirilen SMot4QP kodunun matematiksel arka planı.....	10
3 HESAPLAMA YÖNTEMİ: DARPA SUBOFF DENİZALTI	16
3.1 Denizaltı ve Pervane Modelinin Geometrik Özellikleri.....	16
3.1.1 DARPA Suboff AFF-8 Denizaltı.....	16
3.1.2 INSEAN E1619 Pervane.....	17
3.2 Hesaplama Alanı ve Sınır Koşulları.....	18
3.3 Çözüm Ağı Yapısı.....	21
3.4 Çözüm Stratejisi.....	25
4 SONUÇLAR: DARPA SUBOFF DENİZALTI	30
4.1 Denizaltı Direnç Testleri.....	30
4.1.1 Doğrulama çalışması.....	30
4.1.2 Belirsizlik Analizi.....	31
4.2 Açık-su Pervane Testleri.....	34
4.3 FQP (Four Quadrant Propeller) Performans Eğrileri.....	35
4.4 Free-running Testleri.....	36
4.4.1 SMot4QP kodunun hesaplamalarında gerekli girdiler.....	39
4.4.2 Durum #1 – Tam ileri manevrası.....	42

4.4.3 Durum #2 – Ani kalkış manevrası	43
4.4.4 Durum #3 – Ani durma manevrası	44
4.4.5 Durum #4 – Tam geri manevrası	45
5 HESAPLAMA YÖNTEMİ: DTC KONTEYNER GEMİSİ	47
5.1 Geometri ve Ana Boyutlar	47
5.1.1 DTC Konteyner Gemisinin Hidrostatik ve Geometrik Özellikleri	47
5.1.2 DTC Model Pervanesinin Temel Geometrik Özellikleri	48
5.2 Hesaplama Alanı ve Sınır Koşulları	49
5.3 Çözüm ağı yapısı	53
5.4 Çözüm Stratejisi	56
6 SONUÇLAR: DTC KONTEYNER GEMİSİ	59
6.1 DTC Konteyner Gemisi Direnç Testleri	59
6.1.1 Doğrulama çalışması	59
6.1.2 Belirsizlik analizi	60
6.2 Açık-su Pervane Testleri	61
6.3 FQP (Four Quadrant Propeller) Performans Eğrileri	62
6.4 Free-running Testleri	63
6.4.1 SMot4QP kodu hesaplamaları için gerekli girdi parametreleri	65
6.4.2 Durum #1 – Tam ileri manevrası	67
6.4.3 Durum #2 – Ani kalkış manevrası	68
6.4.4 Durum #3 – Ani durma manevrası	70
6.4.5 Durum #4 – Tam geri manevrası	73
7 SONUÇ	76
KAYNAKÇA	79
TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR	85

SİMGE LİSTESİ

η_0	Açık-su pervane verimi
C_μ	Ampirik sabit
u'_i	Çalkantı hız bileşeni
∇	Deplasman hacmi
L_{BP}	Dikmeler arası mesafe
μ	Dinamik viskozite
m_x	Ek kütle
k_{xx}, k_{yy}, k_{zz}	Eylemsizlik yarıçapları
Fn	Froude sayısı
LCG	Gemi ağırlık merkezinin boyuna konumu
V	Gemi hızı
S	Gemi ıslak alanı
λ	Geometrik benzerlik oranı
B	Genişlik
t	İtme azalması katsayısı
w	İz katsayısı
S_k, S_ε	Kaynak terimleri
ν	Kinematik viskozite
m	Model ölçekli gemi indisi
P	Ortalama basınç
U_i	Ortalama hız bileşeni
D	Pervane çapı
n	Pervane devir sayısı
J	Pervane ilerleme katsayısı
K_T	Pervane itme katsayısı
K_Q	Pervane tork katsayısı
Re	Reynolds sayısı
T	Su çekimi
ρ	Su yoğunluğu

R_F	Sürtünme direnci
C_F	Sürtünme direnci katsayısı
f_2	Sönüm fonksiyonu
L_{OA}	Tam boy
s	Tam ölçekli (gerçek) gemi indisi
ν_t	Türbülanslı girdap viskozitesi
k	Türbülans kinetik enejisi
ε	Türbülans kinetik enerjisi yayılım oranı
$\sigma_k, \sigma_\varepsilon, C_{\varepsilon 1}, C_{\varepsilon 2}$	Türbülans model katsayıları
g	Yerçekimi ivmesi
R_T	Toplam direnç
C_T	Toplam direnç katsayısı
P_k, P_ε	Üretim terimleri
R_{VP}	Viskoz basınç direnci
F_D	Yüzey sürtünme doğrulaması
Δt	Zaman adımı
T_0	Zaman ölçeği

KISALTMA LİSTESİ

BEM	Boundary Element Method
BFM	Body Force Method
CFL	Courant-Friedrich-Lewy
CPU	Central Process Unit
DARPA	Defense Advanced Research Projects Agency
DFBI	Dynamic Fluid Body Interaction
DOF	Degree of Freedom
DPM	Discretized Propeller Method
DTC	Duisburg Test Case
DTMB	David Taylor Model Basin
EFD	Experimental Fluid Dynamics
FQP	Four-quadrant Propeller
GCI	Grid Convergence Index
GFM	Ghost Fluid Method
HRIC	High Resolution Interface Capturing
IMO	International Maritime Organization
ITTC	International Towing Tank Conference
INSEAN	Italian National Institute for Naval Architecture Studies
JBC	Japan Bulk Carrier
KCS	KRISO Container Ship
KVLCC	KRISO Very Large Crude Carrier
MRF	Moving Reference Frame
ONR	Office of Naval Research
PI	Proportional Integral
PID	Proportional Integral Derivative
RBM	Rigid Body Motion
SIMPLE	Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations
SMo4QP	Ship motions code with four-quadrant propeller performance
SVA	Schiffbau-Versuchsanstalt Potsdam
URANS	Unsteady Reynolds Averaged Navier-Stokes
VOF	Volume of Fluid

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1	Bu çalışmada kullanılan prosedür. Kurum içi kod, geminin hızını ve konumunu hesaplamak için girdi olarak HAD simülasyon sonuçlarını kullanır	11
Şekil 2.2	SMot4QP kodunun akış diyagramı	15
Şekil 3.1	DARPA AFF-8 denizaltı modelinin genel görünümü	17
Şekil 3.2	INSEAN E1619 pervane modelinin üç boyutlu geometrisi.....	18
Şekil 3.3	Hesaplama alanı ve sınır koşulları	20
Şekil 3.4	Overset çözüm ağı konfigürasyonu detayları	21
Şekil 3.5	Direnç analizlerinde uygulanan denizaltı etrafındaki çözüm ağı yapısı	23
Şekil 3.6	Açık-su durumunda pervane etrafındaki çözüm ağı yapısı.....	23
Şekil 3.7	Free-running simülasyonlarında kullanılan overset çözüm ağı konfigürasyonu	23
Şekil 3.8	Kıç bölgesindeki çözüm ağı yapısı: a-) Ayrıklaştırılmış pervane modeli (discretized propeller model), b-) gövde kuvveti yöntemi (body force method)	24
Şekil 3.9	$V = 5.144$ m/s ve $J = 0.55$ için DARPA Suboff denizaltısı ve INSEAN E1619 pervanesi kanatları üzerindeki wall y^+ dağılımı	25
Şekil 4.1	HAD ile hesaplanan DARPA Suboff denizaltısı direnç bileşenlerinin deney sonuçları ile karşılaştırılması.....	31
Şekil 4.2	INSEAN E1619 pervanesi HAD simülasyon sonuçlarının deneysel verilerle karşılaştırılması.....	35
Şekil 4.3	INSEAN E1619 dört kuadrantlı pervane performans eğrileri	36
Şekil 4.4	Denizaltı hızı üzerinde arka plan modelinin etkisinin karşılaştırılması	37
Şekil 4.5	Farklı servis hızlarındaki sevk noktalarının karşılaştırılması	41
Şekil 4.6	Tam ileri manevrası için simülasyon sonuçları	43
Şekil 4.7	Ani kalkış manevrası için simülasyon sonuçları.....	44
Şekil 4.8	Ani durma manevrası için simülasyon sonuçları	45
Şekil 4.9	Tam geri manevrası için simülasyon sonuçları.....	46
Şekil 5.1	DTC konteyner gemisinin genel görünümü.....	47
Şekil 5.2	DTC model pervanesinin üç boyutlu genel görünümü	49
Şekil 5.3	Free-running simülasyonlarında uygulanan hesaplama alanı boyutları ve sınır koşulları: (a) profil görünümü, (b) önden görünümü.....	51
Şekil 5.4	Free-running simülasyonlarında uygulanan overset konfigürasyonu ve sanal (virtual) disk modelinin detaylı görünümü	52

Şekil 5.5	Açık-su pervane simülasyonlarında uygulanan hesaplama alanı boyutları ve sınır koşulları: (a) profil görünümü, (b) önden görünümü	53
Şekil 5.6	Açık-su pervane simülasyonlarında kullanılan çözüm ağı yapısı	54
Şekil 5.7	Free-running simülasyonlarında kullanılan overset çözüm ağı yapısı: a) profil görünümü, b) önden görünüm, c) üstten görünüm.....	55
Şekil 5.8	$F_n = 0.238$ ve $J = 0.3$ için DTC konteyner gemisi ve model pervanesi üzerindeki wall y^+ dağılımı	56
Şekil 6.1	HAD ile hesaplanan DTC konteyner gemisi toplam direncinin deney sonuçları ile karşılaştırılması	60
Şekil 6.2	DTC konteyner gemisi model pervanesi HAD simülasyon sonuçlarının deneysel verilerle karşılaştırılması.....	62
Şekil 6.3	DTC konteyner gemisi model pervanesinin FQP performans eğrileri	63
Şekil 6.4	Pervane dönüş hızına karşılık gelen model gemi hızlarının karşılaştırılması	64
Şekil 6.5	Tam ileri manevrası için simülasyon sonuçları	67
Şekil 6.6	Tam ileri manevra senaryosunda geminin yaptığı yalpa hareketinin zaman düzlemindeki sonuçları.....	68
Şekil 6.7	Ani kalkış manevrası için simülasyon sonuçları.....	69
Şekil 6.8	Ani kalkış manevra senaryosunda geminin yaptığı yalpa hareketinin zaman düzlemindeki sonuçları.....	70
Şekil 6.9	Ani durma manevrası için simülasyon sonuçları	71
Şekil 6.10	Ani durma manevra senaryosunda geminin yaptığı yalpa hareketinin zaman düzlemindeki sonuçları.....	72
Şekil 6.11	Tam geri manevrası için simülasyon sonuçları.....	73
Şekil 6.12	Tam geri manevra senaryosunda geminin yaptığı yalpa hareketinin zaman düzlemindeki sonuçları.....	74

TABLO LİSTESİ

Tablo 3.1	DARPA AFF-8 denizaltı modelinin ana boyutları	16
Tablo 3.2	INSEAN E1619 pervanesinin temel özellikleri	18
Tablo 3.3	Simülasyonlarda kullanılan çözüm alanı boyutları	20
Tablo 4.1	Denizaltı toplam direnci açısından belirsiz analizi sonuçları	33
Tablo 4.2	Çözüm ağından bağımsızlık çalışması sonuçları	34
Tablo 4.3	INSEAN E1619 FQP performansı için eğriye uydurulmuş itme katsayıları	36
Tablo 4.4	İki farklı arka plan modeli için simülasyon senaryoları.....	37
Tablo 4.5	Kullanılan arka plan modelinin hesaplama verimi karşılaştırılması..	38
Tablo 4.6	Simülasyon senaryoları ve ilgili gemi manevra tipi	39
Tablo 4.7	Negatif yönde hesaplanan denizaltı direnç bileşenleri.....	40
Tablo 4.8	Farklı yönlerde hesaplanan direnç değerleri için uydurulan ikinci dereceden eğrinin katsayıları	40
Tablo 4.9	İtme azalması katsayısı için uydurulan eğri katsayıları ve denklemi .	42
Tablo 4.10	Nominal iz katsayısı için uydurulan eğri katsayıları ve denklemi	42
Tablo 5.1	DTC konteyner gemisinin tam ve model ölçekteki hidrostatik ve geometrik özellikleri	48
Tablo 5.2	DTC model pervanesinin geometrik özellikleri.....	49
Tablo 6.1	DTC konteyner gemisi toplam direnci açısından belirsizlik analizi sonuçları	60
Tablo 6.2	Çözüm ağından bağımsızlık çalışması sonuçları	61
Tablo 6.3	DTC model pervanesi FQP performansı için eğriye uydurulmuş itme katsayıları	63
Tablo 6.4	Simülasyon senaryoları ve ilgili manevra tipi	65
Tablo 6.5	Negatif yönde hesaplanan toplam gemi direnci.....	65
Tablo 6.6	Farklı yönlerde hesaplanan direnç değerleri için uydurulan ikinci dereceden eğrinin katsayıları	66
Tablo 6.7	SMot4QP için sevk parametreleri	66

Dört Kuadrantlı Pervane Açık Su Hidrodinamik Performans Verileri ile Gemi İleri-Geri Öteleme Hareketinin Pratik Hesabı

Mahmutcan ESENKALAN

Gemi İnşaatı ve Gemi Makineleri Mühendisliği Anabilim Dalı
Gemi İnşaatı ve Gemi Makineleri Mühendisliği Yüksek Lisans Programı
Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Dr. Taner ÇOŞGUN

Eş-Danışman: Prof. Dr. Ömer Kemal KINACI

Gemi sevki geleneksel olarak, geminin ileri yönde hareket ettiği durumları ve bu hareket sırasında pervanenin düzenli olarak dönüşünü odak noktasına alır. Bununla birlikte, doğrusal öteleme hareketi yalnızca ileri yönde sınırlı değildir; ani kalkış, ani durma ve tam geri hareketleri de geminin doğrusal öteleme hareketinin bir parçasıdır. Bu manevralar, sadece geleneksel gemi operasyonlarının bir parçası değil, aynı zamanda önceden belirlenmiş bir konuma ulaşmak için insansız gemilerin dinamik konumlandırma, hedef izleme ve otopilot operasyonları için de çok önemli bir rol oynamaktadır. Manevra senaryoları arasındaki fark geminin ilk hızından ve pervanenin dönüş yönünden kaynaklanmaktadır. Geleneksel manevra modelleri, pervanenin bahsedilen diğer senaryolardaki dinamiklerinin eksikliği nedeniyle tam ileri manevra durumu dışındaki hareketleri ele alamaz.

Bu tez çalışmasında, yukarıda bahsedildiği üzere dört farklı manevra durumundaki gemi performansı değerlendirilmiş, temelinde dört kuadrantlı pervane

hidrodinamik performansını ve gemi direnç test sonuçlarının kullanıldığı ve gemi hızı ile konumunu zaman alanında pratik bir şekilde simüle etmek için SMot4QP olarak adlandırılan kurum içi bir kod geliştirilmiştir. Geliştirilen kodun doğruluğunu değerlendirmek için elde edilen sonuçlar iki farklı sevk modelinin (Ayrıklaştırılmış pervane yöntemi ve gövde kuvveti yöntemi) kullanıldığı kendinden tahrikli free-running HAD simülasyonlarıyla karşılaştırılmıştır. Simülasyonlar model ölçekteki DARPA Suboff denizaltısı ve DTC Post-Panamax konteyner gemisi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. URANS HAD analizleri dinamik overset çözüm ağı yaklaşımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, hareketli ve sabit arka plan yaklaşımları, çözüm performansını karşılaştırmak için HAD simülasyonlarına uygulanmıştır. Simülasyonlar sırasında denizaltı tek serbestlik derecesi ile sınırlandırılırken, konteyner gemisi dört serbestlik derecesine sahiptir. Dört farklı manevra senaryosuna uygun gemi başlangıç hızı ve pervane dönüş hızı belirlenmiş ve free-running simülasyonları gerçekleştirilmiştir.

Sonuçlar, DARPA Suboff denizaltı modeli için tüm manevra durumlarında oldukça iyi bir uyum göstermiştir. Bununla birlikte, DTC konteyner gemisi için yapılan değerlendirmede, özellikle ani durma ve tam geri manevralarında HAD ve SMot4QP arasındaki farkın diğer senaryolara kıyasla oldukça belirgin olduğu gözlemlenmiştir.

Geliştirilen kodun sonuçları, free-running HAD simülasyonlarıyla kıyasla çok kısa sürede ve yüksek doğrulukta tahmin etmesi, büyük avantaj sağlamaktadır ve kodun kullanımını tercih edilir hale getirmektedir.

Anahtar Kelimeler: Dört kuadrantlı pervane hidrodinamik performansı, Free-running HAD, Gemi hareketleri, Kendi kendine sevk, Gemi manevraları

A Practical Approach to Compute Ships' Surge Motion Utilizing Four-quadrant Propeller Hydrodynamic Performance

Mahmutcan ESENKALAN

Department of Naval Architecture and Marine Engineering

Master of Science Thesis

Supervisor: Dr. Taner ÇOŞGUN

Co-supervisor: Prof. Dr. Omer Kemal KINACI

Ship propulsion traditionally focuses on situations where the ship is moving in the forward direction and the regular rotation of the propeller during this movement. However, surge motion is not limited to the forward direction; crash-ahead, crash-back and astern are also part of the ship's surge motion. These maneuvers are not only part of conventional ship operations, but also play a crucial role in dynamic positioning, target tracking and autopilot operations of unmanned ships to reach a pre-determined position. The difference between maneuvering scenarios is due to the initial speed of the ship and the direction of rotation of the propeller. Conventional maneuvering models cannot handle motions other than straight-ahead condition due to the lack of dynamics of the propeller in the other mentioned scenarios.

In this study, an in-house code, shortly named as SMot4QP, has been developed to evaluate ship performance in four maneuvering conditions as mentioned above, based on hydrodynamic performance of four quadrant propellers and ship resistance

test results, and to simulate ship speed and position in time domain in a practical way. To assess the accuracy of the developed code, the obtained results are compared with self-propelled free-running CFD simulations using two different propulsion models (Discretized propeller method and body force method). The simulations are performed using the model-scale DARPA Suboff submarine and the DTC Post-Panamax container ship. URANS CFD analyses have been conducted utilizing the dynamic overset grid approach. Furthermore, moving and fixed background approaches are implemented to the CFD computations to compare the solution performance in terms of the computation time and efficiency. During the computations, the submarine is constrained to one degree of freedom, while the container ship has four degrees of freedom. The ship initial speed and propeller rotation rate were determined for four different maneuver scenarios including straight-ahead, crash-ahead, crash-back and astern, and the free-running simulations have been carried-out accordingly.

The results illustrated excellent agreement for the DARPA Suboff submarine model in all maneuvering conditions. Nevertheless, the assessment for the DTC container ship showed that the difference between CFD and SMot4QP is quite noticeable compared to the other scenarios, especially in the crash-back and astern maneuvers.

The fact that the developed code predicts the results in a short time and with high accuracy compared to free-running CFD simulations provides a great advantage and makes the use of code preferable.

Keywords: Four-quadrant propeller hydrodynamic performance, Free-running CFD, Ship Motions, Self-propulsion, Ship maneuvering

Gemi direnç testleri sadece ileri yöndeki hareketi dikkate alır ve farklı servis hızlarında gemi yüzeyine etki eden kuvveti ölçer. Öte yandan, açık su pervane testleri, farklı ilerleme katsayılarında bir pervanenin itme kuvvetini ve torkunu belirlemeyi sağlamaktadır. Geleneksel gemi sevki öncelikle düzenli pervane dönüşü ile ileri yöndeki harekete odaklanır. Bununla birlikte, bir geminin ileri öteleme hareketinin doğru bir şekilde tahmin edilmesi, gemi direncinin ve açık su pervane performansının tam olarak anlaşılmasına bağlıdır. Geminin kıç tarafa da hareket edebileceğini ve pervanenin ters yönde çalışabileceğini unutmamak önemlidir, bu da dört farklı manevra senaryosuna ortaya çıkmasına neden olur: tam ileri, ani kalkış, ani durma ve tam geri manevraları. Bu manevraların doğru tahmin edilebilmesi, ileri ve ters koşullar için gemiye etki eden toplam direnç kuvveti ve normal ve ters dönüşler için açık su pervane performansı verileri kullanılarak elde edilebilir.

1.2 Tezin amacı

Geleneksel gemi hareket simülasyonları genellikle geminin yalnızca ileri yöndeki hareketlerini kapsamaktadır. Bununla birlikte, pervane ters yönde çalıştığında veya gemi kıç tarafa doğru hareket ettiğinde yetersiz kalmaktadır. Manevra modelleri genellikle pervanenin sadece birinci kuadrantta çalıştığı durumları ele almaktadır ve bu da dinamik konumlandırma sistemlerinin matematiksel modellerini bütünsel simülasyonlar için yetersiz hale getirmektedir. Bu tez çalışması, ani kalkış, ani durma ve tam geri hareketlerini de içeren daha gelişmiş gemi hareket simülasyonları için hızlı bir şekilde sonuç elde edebileceğimiz bir temel geliştirmeyi amaçlamıştır. Kodun kapsamı sadece doğrusal öteleme (surge) hareketiyle sınırlıdır, bu da geminin yalnızca bir serbestlik derecesine sahip olduğu anlamına gelir. Gemi diğer yönlerdeki hareketlere sınırlandırılmıştır (hareket sırasında yanal öteleme (sway) ve savrulma (yaw) yoktur). Bu tez çalışması için geliştirilen gemi hareket kodunun, geminin doğrusal öteleme hareketinin tüm olasılıklarını kapsamayı beklenmektedir. Bu kod, dört kuadrantlı pervane hidrodinamik performansıyla gemi direnç testlerinden elde edilen verileri kullanarak ani kalkış, ani durma ve tam geri hareketlerini simüle etmek için geliştirilmiştir.

1.3 Literatür Özeti

Ön tasarım aşamasında, su üstü ve su altında görev yapan gemilerinin hidrodinamik performansını doğru bir şekilde değerlendirmek için göz önünde bulundurulmuş temel kriterlerden biri sevk ve hareket özellikleridir. Belirli bir hızda hareket eden bir geminin pervanesi tarafından üretilen itme kuvveti aracılığıyla etrafındaki akış alanının hesaplanması, geminin sevk performansını belirlemede önemli bir yöntem olarak bilinmekte ve “kendinden tahrik” veya “öz itme” olarak adlandırılmaktadır.

Gemilerin kendinden tahrik (self-propulsion) ve sevk karakteristiklerini tahmin ederken üç ana yaklaşım kullanılmaktadır: sistem tabanlı veya ampirik yöntemler, model testleri ve doğrudan viskoz Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) simülasyonları. Model testleri, sevk karakteristiklerini belirlemede en yaygın olarak kullanılan ve en güvenilir yöntemdir. Son yıllarda test ekipmanlarının ve yöntemlerinin gelişmesiyle, free-running model testleri mümkün hale gelmiştir (Yu vd., 2022). (Gothenburg, 2010) ve (Tokyo, 2015)’de, KVLCC2, KCS, DTMB 5415, JBC ve ONR Tumblehome gibi çeşitli gemi modeli, farklı araştırma enstitüleri tarafından kendi kendine tahrik testlerini gerçekleştirmek üzere seçilmiştir ve tüm model test verileri bulunmaktadır. Deneysel ölçümler hem akışın fiziğinin araştırılması hem de HAD doğrulaması için veri sağlamaktadır.

Temel ampirik ilişkiler ve deneysel ölçümlerle birlikte, sayısal hesaplama stratejilerinin pratik uygulaması, kendinden tahrikli deniz araçlarının hidrodinamik performansını kapsamlı bir şekilde değerlendirmenin önemli bir yolu haline gelmiştir. Gemilerin kendinden tahrik tahminlerinde güvenilir, maliyet ve hesaplama süresi açısından etkin ve kabul görmüş bir araç olarak Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) öncü bir rol oynamaktadır. HAD, fiziksel prensiplere dayanan yüksek doğruluklu bir yöntemdir ve ampirik girdilere neredeyse hiç ihtiyaç duymadan son derece doğru sonuçlar sağlar (L. Guo vd., 2018). Deneysel çalışmalarıyla karşılaştırıldığında, kendinden tahrikli free-running HAD simülasyonu sadece hesaplama süresi ve maliyetini azaltmakla kalmaz, aynı zamanda gemi etrafındaki akış, dalga deformasyonları ve gemi hidrodinamik performansı ile ilgili diğer detaylar hakkında daha fazla bilgi sağlamaktadır (Feng vd., 2020a). Bu nedenle, HAD kendi kendine tahrik performansını tahmin etmek ve değerlendirmek için etkili bir yaklaşımdır.

Özellikle son yıllarda HAD, gemi hidrodinamiği alanındaki birçok kendinden tahrikli problem türüne uygulanmaktadır. Yakın zamanda yapılan birkaç çalışma

arasında, (Carrica vd., 2010; Castro vd., 2011; Song vd., 2020) kendi kendine sevk performansını tahmin etmek için kullanılabilir PI (Proportional Integral) hız kontrolcüsü ve ayrıklaştırılmış pervane yaklaşımı (Discretized Propeller Method, DPM) kullanan bir yöntem önermiştir. Bu yöntem, KVLCC2, ONRT ve KCS gibi üç farklı gemi formu üzerinde uygulanmıştır. PI hız kontrolcüsü yöntemi, geminin hedef Froude sayısına ulaşmaya çalışırken kendi kendine sevk noktasını bulmak için pervane dönüş hızının kontrol edilmesine dayanmaktadır. Bu yaklaşım, kontrolcü kullanarak yalnızca bir analiz gerçekleştirerek gerekli hesaplama süresini önemli ölçüde azaltmaktadır. (Chase & Carrica, 2013) yaptıkları çalışmada, farklı türbülans modellerinin etkinliğini ve kendi kendine sevk noktasındaki itme performansını incelemişlerdir. Sonuçlar, sundukları türbülans yaklaşımının denizaltılarının sevk noktasının tahmininde uygulanabilir olduğunu göstermiştir. (Zhang & Zhang, 2014), bir denizaltının tamamen batmış durumda ve serbest su yüzeyine yakın koşullarda kendi kendine tahrik ve direnç özelliklerini araştırmıştır. Serbest su yüzeyinin toplam direnç üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu vurgulanmıştır. (L. Wang vd., 2019), model deneyleri ve HAD yaklaşımını kullanarak serbest su yüzeyi yakınında çalışan DARPA Suboff için denizaltı etrafındaki akışı ve pervane izini incelemiştir. (Gaggero vd., 2017), kendinden tahrikli simülasyonların hesaplama süresini azaltmak için birleşik bir RANS/BEM yaklaşımını önermiştir. (Jasak vd., 2019), tam ölçekli gemilerin kendi kendine tahrik performansını hesaplamak amacıyla açık kaynaklı bir HAD aracının genişletilmiş bir versiyonunu geliştirmiştir. Tahminleri iki farklı geminin açık deniz test denemeleri ile karşılaştırarak metodolojinin oldukça doğru sonuçlar ürettiğini göstermişlerdir. (J. Wang vd., 2017), ONR Tumblehome gemi modelinin kendinden tahrikli free-running simülasyonlarını OpenFOAM kullanarak gerçekleştirmiştir ve istenen gemi hızına ulaşmak için yukarıda da bahsedildiği gibi pervane dönüş hızını ayarlayan PID kontrolcüsü kullanmışlardır. Joubert BB2 denizaltı geometrisinin serbest su yüzeyine yakın noktada kendi kendine sevk tahmini, dinamik overset çözüm ağı yaklaşımı kullanılarak (Carrica vd., 2019) tarafından HAD yardımıyla tahmin edilmiştir. Denizaltı serbest su yüzeyine yaklaştığında pervane itme kuvveti ve torkundaki dalgalanmaları analiz etmişlerdir. Bir başka çalışmada, (Dogrul, 2022) Joubert BB2 denizaltısının sevk karakteristikleri üzerinde ölçek etkisini incelemiştir. Kendinden tahrikli simülasyonlarda pervane, gövde kuvveti yöntemi kullanılarak modellenmiştir.

Ekstarapole edilmiş tam ölçek sonuçları, tam ölçekte gerçekleştirilen RANS analizleriyle karşılaştırılmıştır. Ölçek etkisinin nominal iz katsayısı, itme azalması katsayısı, açık-su pervane verimi ve sevk verimi gibi sevk parametreleri üzerinde farklara yol açtığı gözlemlenmiştir. (Kinaci vd., 2018), bir denizaltı ve iki farklı gemi modelinin (DARPA Suboff, KCS ve DTC) kendi kendine sevk performansını HAD yardımıyla incelemişlerdir. Simülasyon sonuçlarının deneysel akışkanlar dinamiği (EFD) verileri ve diğer çalışmalardan elde edilen sayısal sonuçlarla uyumlu olduğunu bulmuşlardır. Aynı grup tarafından yapılan bir çalışmada, (Kinaci vd., 2020) geminin kendi kendine sevk parametrelerini tahmin etmek için pratik bir hesaplama metodolojisi geliştirmiştir. (Delen vd., 2021), Telfer GEOSIM yaklaşımına dayalı olarak tam ölçekli gemilerin sevk performansını tahmin etmek için hızlı ve güvenilir bir metodoloji sunmuştur.

Tekne-pervane-dümen sisteminde, pervanenin modellenmesi en kritik, karmaşık ve zaman alıcı olan bir durumdur. HAD simülasyonlarında uygun pervane modelinin seçilmesi, tekne-pervane etkileşimlerinin doğru tahmin edilmesinde kilit bir bileşendir (Broglia vd., 2013). Gemi hidrodinamiğinde, gövde kuvveti yöntemi (Body force method, BFM) ve ayrıklaştırılmış pervane modeli (Discretized propeller method, DPM), kendi kendine tahrik simülasyonlarında kullanılan en yaygın iki yaklaşımdır (Aram & Mucha, 2023).

Pervane geometrisinin doğrudan modellendiği ayrıklaştırılmış pervane modeli, kendi kendine tahrik özelliklerini tahmin etmek için en doğru ve gerçekçi yöntem olarak kabul edilmektedir. Bununla birlikte, güvenilir simülasyon sonuçları sağlamak için, daha yüksek sayıda çözüm ağı ve daha küçük zaman adımı gereklidir, bu da karmaşık çözüm ağı yapısına ve daha uzun simülasyon sürelerine yol açmaktadır (Yu vd., 2021). (Shen vd., 2015), OpenFOAM kullanarak dinamik overset çözüm ağları (dynamic overset grids) yaklaşımıyla KCS gemisinin kendi kendine sevk ve manevra hesaplamalarını ayrıklaştırılmış pervane modelini uygulayarak gerçekleştirmiştir. (J. Guo vd., 2020) su jeti tahrikli bir trimaranın kendi kendine sevk performansı üzerine sayısal analizler gerçekleştirmiştir. Su jetini doğrudan simüle etmek için Hareketli Referans Sistemi (Moving Reference Frame, MRF) yöntemini kullanmışlardır. Direnç ve kendinden tahrikli senaryoların sayısal sonuçlarını Deneysel Akışkanlar Dinamiği (EFD) verileriyle karşılaştırarak sayısal yöntemin geçerliliğini ve doğruluğunu teyit etmişlerdir. (L. Liu vd., 2021),

tam ölçekli DARPA Suboff denizaltısının kendinden tahrikli free-running testlerini gerçekleştirmek için geliştirdikleri HAD çözücüsü olan HUST-Ship kullanılmıştır. Pervane performansı, basınç dağılımı, sınır tabaka ve iz bölgesindeki akış alanı dahil olmak üzere model ve tam ölçekli kendi kendine tahrik sonuçları arasındaki farklar üzerine tartışmalar sunulmuştur.

Öte yandan, gövde kuvveti yöntemi, pervane tarafından üretilen itme kuvvetini ve pervane düzlemindeki akışı temsil etmek için alternatif basitleştirilmiş bir yöntemdir, bu da tekne-pervane-dümen etkileşiminin olduğu sevk simülasyonlarını daha kolay ve hızlı hale getirebilir (Jin vd., 2019). Gövde kuvveti modelleri, güvenilirlik ve hesaplama verimliliği avantajları nedeniyle kendinden tahrikli gemi simülasyonları için yaygın olarak kullanılmaktadır (Feng vd., 2020b, 2020a; Yu vd., 2021). (Bakica vd., 2019), KCS ve JBC gemilerinin kendinden tahrikli simülasyonlarında pervaneyi modellerken sanal bir disk kullanmışlardır ve çift fazlı akışı modellerken VOF ve GFM yaklaşımlarını uygulamışlardır. Pervanenin sanal disk yardımıyla modellenmesinin yüksek CPU verimi sağladığını belirtmişlerdir. Farklı bir çalışmada, (Delen vd., 2017) DARPA Suboff denizaltısının tekne ve pervanesi arasındaki etkileşimi gövde kuvveti yöntemini kullanarak incelemişlerdir. DARPA Suboff'un hidrodinamik performansını hem sayısal simülasyonlar hem de ampirik yöntemlerle tahmin etmişlerdir (Sezen vd., 2018) E1619 pervaneli takıntılı ve takıntısız formdaki DARPA Suboff denizaltısının toplam direncini ve kendi kendine tahrik davranışını tahmin etmek için RANS yöntemini kullanmıştır. Geniş bir ileri hız aralığında kendi kendine tahrik simülasyonları için hem sanal diski (gövde kuvveti yöntemi) hem de ayrılaştırılmış pervane yaklaşımlarını kullanmışlardır. Sonuçlar, doğrudan ayrılaştırılmış pervane kullanımına kıyasla sanal disk yaklaşımı kullanıldığında kendi kendine tahrik özelliklerinin daha yüksek tahmin edildiğini göstermiştir. (Bekhit, 2018) ve (Jin vd., 2019) kendi kendine tahrik ve manevra simülasyonlarını gerçekleştirmek için ayrılaştırılmış pervane ve gövde kuvveti yöntemini kullanmıştır. Gövde kuvvet yönteminin, doğruluk ve hızlı hesaplama süresi göz önünde bulundurulduğunda pervane-tekne-dümen etkileşimini araştırmak için geçerli bir seçenek olduğunu belirtmişlerdir.

Tüm bu çalışmalar, gemi ileri doğru hareket ettiği zaman pervanenin sadece tek bir yönde döndüğünü kabul etmiştir. Buna ek olarak, (Delen vd., 2021; Kinaci vd.,

2020) yaptıkları çalışmalarda, ileriye doğru giden geminin kendi kendine tahrik hesaplamalarını hızlandırmak için pratik yöntemler sunmuştur. Bununla birlikte, doğrusal öteleme hareketi aynı zamanda ani kalkış, ani durma ve tam geri hareketlerini de içermektedir. Bu hareketler, rutin gemi operasyonlarında standart manevralar olmanın yanı sıra hem insanlı hem de insansız gemiler için hassas hedef konumlarına ulaşmasında da gereklidir. Bu manevralar, geminin yönü kadar pervanenin dönüş yönüne de bağlıdır.

1.4 Hipotez

Geliştirilen gemi hareket kodu, geminin ileri öteleme hareketinin yanı sıra ani kalkış, ani durma ve tam geri hareketlerini içerecek şekilde genişletildiğinde, geleneksel gemi hareket simülasyonlarına kıyasla daha gerçekçi sonuçlar üretmesi beklenilmektedir. Bu kodun, ileri öteleme hareketi dışında geminin diğer yönlerdeki hareketlerini de içermesi, geminin manevra yeteneklerini daha doğru bir şekilde modelleyerek dinamik konumlandırma sistemlerinin matematiksel modellerine uygun bir temel sağlayacaktır.

MATEMATİKSEL MODELLEME

Problemin çözümünde kullanılan temel denklemler; kütle, momentum ve enerjinin korunumu, momentumun korunumu ve enerjinin korunumdur. Bu denklemler gerçek akışkanın hareketini ifade eder ve bütün akışkan problemlerine temel teşkil eden denklemlerdir. Bu denklemler diferansiyel formda ifade edilebilir ancak söz konusu diferansiyel denklemler, uygulanan geometri ve akış tipinde analitik çözüm mümkün olmadığı için kullanılan teori ve yöntemlere göre bazı basitleştirmeler yapılarak çözülebilir. Analitik olarak çözümü olmayan diferansiyel formdaki süreklilik ve momentum denklemleri sonlu hacimler yöntemi ile ayrıştırılarak cebirsel formdaki denklemlere dönüştürülerek sayısal olarak çözülür.

2.1 Yönetici Denklemler

Bu tez çalışmasında, yönetici denklemler RANS (Reynolds-Averaged Navier-Stokes) denklemleri kullanılarak çözülmüştür. Problemin doğası doğrultusunda, akışın sıkıştırılamaz olduğu kabul edilmiştir. Bunun yanı sıra problemlerin özelinde incelenen duruma göre çözümlerin bir bölümü zamandan bağımsız olarak gerçekleştirilirken diğer bir bölümü de zamana bağlı olacak şekilde kurgulanıp gerçekleştirilmiştir. Çözümün zamana bağlılığı, her bir senaryo için yöntem bölümünde ayrıntılı olarak belirtilmiştir.

Kararsız, sıkıştırılamaz ve türbülanslı akışlar için süreklilik ve momentum denklemleri tensör notasyonunda ve Kartezyen koordinatlarda aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0 \quad (2.1)$$

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\nu \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \right] - \frac{\partial \overline{u'_i u'_j}}{\partial x_j} \quad (2.2)$$

Burada U_i ve u'_i , Kartezyen koordinat x_i yönündeki zamana göre ortalama hız bileşeni ve çalkantı bileşeni göstermektedir. P ortalama basıncı, ρ yoğunluğu ve ν akışkanın kinematik viskozitesini temsil etmektedir. Son iki terim sırasıyla viskoz gerilme ve Reynolds gerilme tensörüne aittir. Reynolds gerilmeleri özellikle

türbülanslı akışta viskoz gerilmelerle kıyaslandığında daha büyük bir etkiye sahiptir. Reynolds gerilme tensörü (yani, $\overline{u'_i u'_j}$) denklem 2.3'e göre hesaplanabilir:

$$\overline{u'_i u'_j} = \nu_t \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) + \frac{2}{3} \delta_{ij} k \quad (2.3)$$

Burada, türbülanslı girdap viskozitesi ν_t , $\nu_t = C_\mu k^2 / \varepsilon$ olarak ifade edilir; burada C_μ ampirik bir sabittir ($C_\mu = 0,09$). k türbülans kinetik enerjisi ve ε türbülans yayılım (dissipasyon) oranıdır.

Bu tez çalışması kapsamında çözülen problem ısı transferi içermediğinden, ayrıca akışın sıkıştırılmaz olduğu ve dolayısıyla basınçla sıcaklığın değişmediği göz önünde bulundurularak enerjinin korunumu denklemi hesaplamalara katılmamıştır.

2.2 Türbülansın Modellenmesi

Türbülans modellenmesi, mühendislik problemlerinde rastgelelik ve belirsizliğin ana kaynağı olduğu için oldukça önemlidir. Türbülans modelleri, türbülanslı akışların davranışını tahmin etmek için matematiksel modellerin uygulanmasıyla birlikte, türbülanslı akışların fiziksel özelliklerini tanımlayan bir teknik sunmaktadır.

Bu tez çalışmasında, tekne etrafındaki türbülanslı akışı modellemek için gerçekleştirilebilir iki katmanlı $k - \varepsilon$ şeması kullanılmıştır. Bu model, gerçekleştirilebilir $k - \varepsilon$ modelini iki katmanlı yaklaşımla birleştirmektedir. Türbülans girdap (eddy) viskozitesi, türbülans kinetik enerjisi (k) ve türbülans yayılım oranına (ε) göre belirlenmektedir. İki katmanlı yaklaşım, düşük Reynolds sayısındaki türbülanslı akışlar için duvara yakın bölgenin (viskoz alt tabaka ($y^+ < 1$)) gelişmiş bir şekilde modellenmesini sağlamaktadır (Versteeg & Malalasekera, 2007). Bu model, türbülans kinetik enerjisi üretimi ve yayılımının daha doğru bir şekilde temsiline dayanmaktadır ve bu da belirli akış rejimlerinde modelin doğruluğunu artırmaktadır. Ayrıca, gerçekleştirilebilir iki katmanlı $k - \varepsilon$ türbülans modeli, sınır koşullarına standart $k - \varepsilon$ modelinden daha az ihtiyaç duymaktadır, bu da sınır koşullarının belirlenmesinin zor olduğu simülasyonlar için önemlidir. Bu nedenle, çift fazlı akışlar için uygundur (Ozturk, 2023).

Türbülans kinetik enerjisi ve türbülans yayılım oranı için transport denklemleri aşağıdaki gibidir:

Türbülans kinetik enerjisi,

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \nabla \cdot (\rho k \bar{u}) = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + P_k - \rho(\varepsilon - \varepsilon_0) + S_k \quad (2.4)$$

Türbülans yayılım oranı,

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \nabla \cdot (\rho \varepsilon \bar{u}) = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla \varepsilon \right] + \frac{1}{T_e} C_{\varepsilon 1} P_\varepsilon - C_{\varepsilon 2} f_2 \rho \left(\frac{\varepsilon}{T_\varepsilon} - \frac{\varepsilon_0}{T_0} \right) + S_\varepsilon \quad (2.5)$$

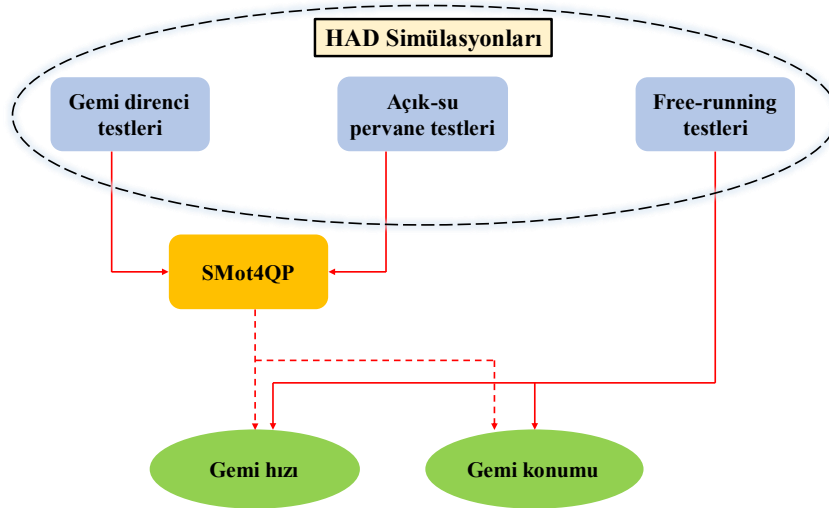
Burada \bar{u} ortalama hız, μ dinamik viskozite, $\sigma_k, \sigma_\varepsilon, C_{\varepsilon 1}$ ve $C_{\varepsilon 2}$ model katsayıları, P_k ve P_ε üretim terimleri, f_2 sönüm fonksiyonu, S_k ve S_ε kullanıcı tanımlı kaynak terimleridir. ε_0 kaynak terimi içerisindeki çevresel türbülans değeri ve T_0 belirli bir zaman ölçeğidir. $k - \varepsilon$ türbülans modeli için daha ayrıntılı bilgi (Wilcox, 2006) da bulunabilir.

2.3 Geliştirilen SMot4QP kodunun matematiksel arka planı

Pervane hidrodinamik performans karakteristikleri kullanılarak geminin ileri öteleme hareketi (surge motion), kısaca SMot4QP olarak adlandırılan kendi geliştirdiğimiz kod kullanılarak tahmin edilmiştir. Kodun dayandığı yöntem, dört kuadrant pervane verileri ve gemi direnç test sonuçlarını kullanmaktadır. Kullanılan yöntem (Gokce vd., 2019; Kinaci vd., 2018, 2020) tarafından yayınlanan kendinden tahrikli tahmin (self-propulsion estimation) yönteminin geliştirilmiş bir versiyonudur. Kod, geleneksel kendi kendine tahrik durumunun (straight-ahead durumu) yanı sıra, ani kalkış (crash-ahead), ani durma (crash-back) ve tam geri (astern) hareketlerini de simüle edebilmektedir. Gemi direnci ve açık su pervane testleri HAD ile simüle edilmiş ve sonuçlar SMot4QP'ye girdi olarak verilmiştir. Uygulanan prosedür Şekil 2.1'de gösterilmektedir.

Bu bölümde, geliştirilen SMot4QP kodunun teorik arka planı açıklanmaktadır. Toplam kütlesi m_T ve ileri hızı V olan hareket halindeki bir cisim için Newton'un ikinci hareket yasası şu şekilde verilir:

$$F = \frac{d(m_T V)}{dt} \quad (2.6)$$



Şekil 2. 1 Bu çalışmada kullanılan prosedür. Kurum içi kod, geminin hızını ve konumunu hesaplamak için girdi olarak HAD simülasyon sonuçlarını kullanır

Toplam kütle hareket sırasında değişmediğini varsayılmaktadır. Suda hareket eden bir gemi söz konusu olduğunda, toplam kütle, yer değiştirme (deplasman) tonajı m ve eklenen kütle m_x 'in toplanmasıyla ifade edilebilir. Bu durumda denklem (2.6) şu hale gelir:

$$F = (m + m_x) \frac{dV}{dt} \quad (2.7)$$

Bu denklemin nümerik formu şu şekilde yazılabilir:

$$F \cdot \Delta t = (m + m_x) \cdot \Delta V \quad (2.8)$$

Denklem (2.8)'i kullanarak geminin tam ileri (straight-ahead) seyir sırasında ileri ötelenme hızını hesaplayan bir kod geliştirilmiştir. Bu kodun amacı, tek bir serbestlik derecesi (1DOF) ile hareket eden gemiler ve denizaltılar için ileri ötelenme hızını ve konumunu hesaplamaktır. Bir ana bölüm ve iki tamamlayıcı fonksiyondan oluşan kod, geminin hidrostatik ve geometrik özelliklerinin, direnç eğrisinin ve dört-kuadrant pervane performansının girilmesini gerektirir. Simülasyon, kullanıcı tarafından sağlanan ilk hız ve konumdan başlar.

Gerekli verilerin girilmesinin ardından, birincil bölüm ilk olarak (Brix, 1993) ampirik formülasyonu kullanarak ek kütleleri belirler. Daha sonra simülasyon döngüsü başlar ve sonraki hesaplamalar belirlenen sırayla gerçekleştirilir:

- Zaman
- Pervane düzlemine gelen ortalama hız
- Pervane ilerleme katsayısı
- Pervane itme ve gemi direnci katsayıları (fonksiyon 1)
- İtme katsayısı
- İtme
- Gemi direnci
- Yüzey sürtünme düzeltmesi (fonksiyon 2)
- Gemi hızı
- Geminin konumu

Zaman, girdi olarak verilen zaman adımı boyutu Δt kullanılarak her iterasyonda hesaplanır. Pervane tarafından alınan hızı (V_A) belirlemek için kullanılan denklem:

$$V_A = V \cdot (1 - w) \quad (2.9)$$

Burada V geminin hızını ve w iz katsayısını göstermektedir. İlerleme katsayısı şu şekilde hesaplanır:

$$J = \frac{V_A}{nD} \quad (2.10)$$

Bu denklemde, n pervane dönüş hızını ve D pervane çapını temsil etmektedir. Bu adımın ardından, ana bölüm, gemi direnci ve pervane performans karakteristiklerini kapsayan fonksiyon 1'i çağırır. Bu fonksiyon dört farklı durumda çalışır.

- 1. kuadrant, gemi hızının ve pervane dönüş hızının pozitif olduğu (gemi belirlenen pervane dönüşü ile ileriye doğru hareket eder) ilerleme durumudur.
- 2. kuadrant, pervane dönüş hızının pozitif ancak gemi hızının negatif olduğu (gemi belirlenen pervane dönüşü ile geriye doğru hareket eder) crash-ahead durumudur.
- 3. kuadrant, gemi hızının pozitif ancak pervane dönüş hızının negatif olduğu (gemi ileri hareket eder ancak pervane tersine çalışır) crash-back durumudur.
- 4. kuadrant, gemi hızının ve pervane dönüş hızının her ikisinin de negatif olduğu (gemi ters pervane dönüşü ile geriye doğru hareket etmektedir) astern durumudur.

Fonksiyon 1'den gerekli parametreler çıkarıldıktan sonra, ana bölüm aşağıdaki denklemi kullanarak itme katsayısını,

$$K_T = k_0 + k_1 \cdot J + k_2 \cdot J^2 \quad (2.11)$$

ve denklem (2.12) ile itme hesaplanır:

$$T = K_T \rho n^2 D^4 \quad (2.12)$$

Fonksiyon 1'den elde edilen gemi direnci katsayıları, aşağıdaki denklemle toplam direnci hesaplamak için kullanılır:

$$R_T = r_1 \cdot V + r_2 \cdot V^2 \quad (2.13)$$

Gemi, pervane itme kuvveti ve gemi direncinin bir denge durumuna ulaştığı belirli bir hızda ilerler. Ancak bu denge durumu, Reynolds sayılarındaki önemli farklılıklardan kaynaklanan yüzey sürtünmesindeki değişimler nedeniyle ölçekli gemilerde farklılık gösterir. Bunu hesaba katmak için, ana bölüm fonksiyon 2'yi çağırır. Bu fonksiyon, geminin ölçeğine bağlı olarak gerekli olabilecek veya olmayabilecek yüzey sürtünmesi düzeltmesini hesaplar. Eğer kullanıcı tam ölçekli bir gemi ile çalışıyorsa, bu fonksiyon atlanır. Eğer kullanıcı model ölçekli bir gemi ile çalışmayı tercih ederse, bu fonksiyon kullanılır;

- ilk olarak hem modelin hem de tam ölçekli geminin Reynolds sayılarını (Re) hesaplar,
- daha sonra ITTC 1957 korelasyon hattı formülünü kullanarak hem modelin hem de tam ölçekli geminin sürtünme direnci katsayısını (C_F) hesaplar,
- ve son olarak yüzey sürtünmesi düzeltmesini (F_D) hesaplar.

Bu adımları gerçekleştirmek için fonksiyon 2 aşağıdaki formülü kullanır,

$$Re = \frac{\rho V L}{\mu} \quad (2.14)$$

$$C_F = \frac{0.075}{(\log Re - 2)^2} \quad (2.15)$$

$$F_D = \frac{1}{2} \rho S V^2 (C_{Fm} - C_{Fs}) \quad (2.16)$$

Bu denklemlerde; L gemi uzunluğunu, S ıslak yüzey alanını ve C_{Fm} ve C_{Fs} sırasıyla model ve tam ölçekli gemilerin sürtünme direnci katsayılarını ifade etmektedir. ρ su yoğunluğu ve μ dinamik viskozitedir.

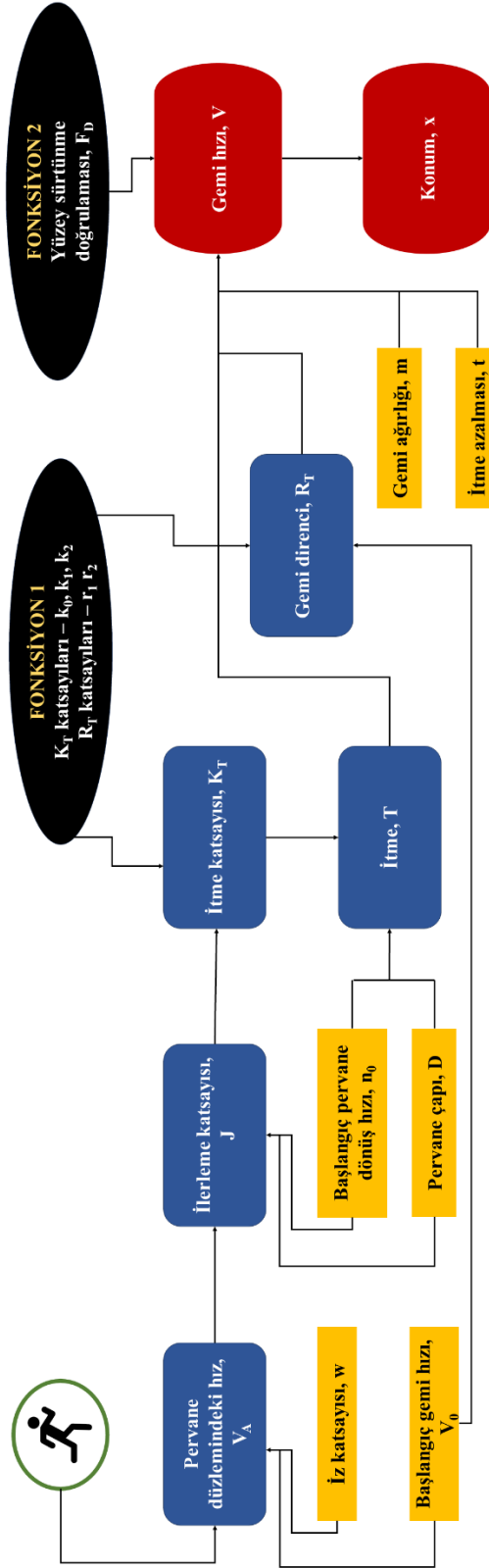
Yukarıdaki tüm işlemler tamamlandıktan sonra, gemi hızı denklem (2.8) yeniden düzenlenerek ve aşağıdaki formda ifade edilerek tanımlanabilir:

$$V_i = V_{i-1} + \frac{\Delta t}{m + m_x} \cdot \left(T + F_D - \frac{R_T}{1 - t} \right) \quad (2.17)$$

Burada, t itme azalmasıdır. Son olarak, geminin konumu x şu şekilde hesaplanır:

$$x_i = x_{i-1} + V_i \cdot \Delta t \quad (2.18)$$

Şekil 2.2’de kodun akış diyagramını göstermektedir. Girdiler sarı arka plana sahip dikdörtgenlerle temsil edilirken, geminin hızını ve konumunu içeren çıktılar kırmızı arka plana sahip dikdörtgenlerle gösterilmektedir. Blokların hesaplanmasından sorumlu olan kodun ana bölümü mavi bir arka planla ayırt edilir. Ana bölüm tarafından çağrılan iki fonksiyon siyah arka plana sahip elipslerle gösterilmiştir.



Şekil 2. 2 SMot4QP kodunun akış diyagramı

3

HESAPLAMA YÖNTEMİ: DARPA SUBOFF DENİZALTI

3.1 Denizaltı ve Pervane Modelinin Geometrik Özellikleri

3.1.1 DARPA Suboff AFF-8 Denizaltı

Defense Advanced Research Projects Agency (DARPA) tarafından geliştirilmiş DARPA Suboff denizaltı modeli, gemi hidrodinamiği alanında yaygın olarak kullanılan bir temel test (benchmark) geometrisidir. Bu tez çalışmasının ilk bölümünde, HAD direnç ve free-running simülasyon sonuçlarını elde etmek için DARPA denizaltı modeli kullanılmıştır. Bu denizaltı modeli, iki farklı konfigürasyona sahiptir: birincisi, takıntısız model olarak da bilinen AFF-1, ve ikincisi, bir yelken ve kış bölgesinde dört dümen fini içeren AFF-8 modelidir. Bu tez kapsamında takıntılı form olan AFF-8 modeli tercih edilmiştir. Şekil 3.1'de, üç boyutlu olarak $\lambda = 24$ ölçeğindeki denizaltı modelinin geometrisi sunulmuştur. Ayrıca, modelin ana boyutları Tablo 3.1'de verilmiştir. (N.C. Groves vd., 1989)

Tablo 3. 1 DARPA AFF-8 denizaltı modelinin ana boyutları

Parametre	Boyutlar
Tam boy, L_{OA} (m)	4.356
Dikmeler arası boy, L_{BP} (m)	4.261
Maksimum gövde çapı, D_{max} (m)	0.508
Islak yüzey alanı, S (m^2)	6.348
Deplasman hacmi, ∇ (m^3)	0.706



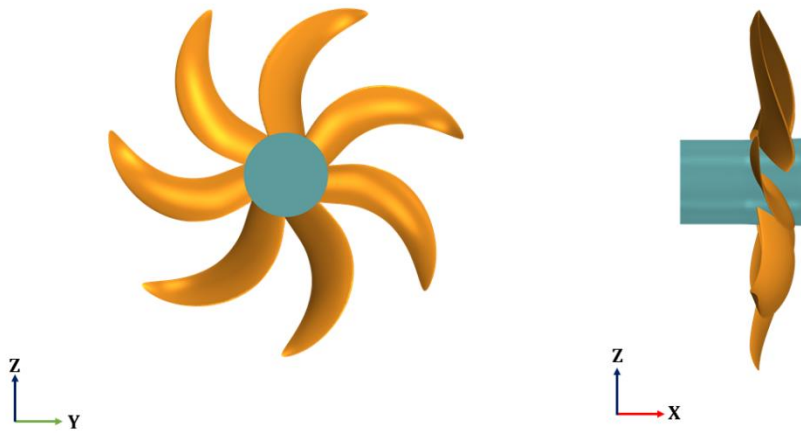
Şekil 3. 1 DARPA AFF-8 denizaltı modelinin genel görünümü

3.1.2 INSEAN E1619 Pervane

Açık-su pervane testleri ve kendinden tahrikli free-running simülasyonları sırasında denizaltı modelinin arkasında çalışırken yüksek eğimli ya da çarpıklığa sahip (high-skew) INSEAN E1619 pervanesi kullanılmıştır (Chase & Carrica, 2013). Yüksek çarpıklığa sahip pervaneler su altı araçları için kullanılan uygulamalarında avantajlarından dolayı önemli role sahiptir. Yüksek kanat eğimine sahip pervaneler, geleneksel pervanelere karşılaştırıldığında önemli ölçüde yüksek verimlilik (Zhu, 2015), düşük kavitasyon riski (Hu vd., 2021) ve düşük gürültü performansı (Asnaghi vd., 2018) sağlamaktadır. Bu avantajların yanı sıra, yüksek manevra kabiliyeti sunmaktadır. Şekil 3.2'de pervanenin üç boyutlu geometrisi ve Tablo 3.2'de açık-su testlerinde ve denizaltı arkasında çalışan pervanenin ana boyutları verilmiştir.

Tablo 3. 2 INSEAN E1619 pervanesinin temel özellikleri

Parametre	Açık-su	Free-running
Pervane çapı, D (m)	0.485	0.262
Kanat sayısı, Z	7	7
Göbek çap oranı, D_h/D	0.226	0.226
0.7R' de P/D	1.15	1.15
A_E/A_0	0.608	0.608
Dönüş yönü	Sağ	Sağ



Şekil 3. 2 INSEAN E1619 pervane modelinin üç boyutlu geometrisi

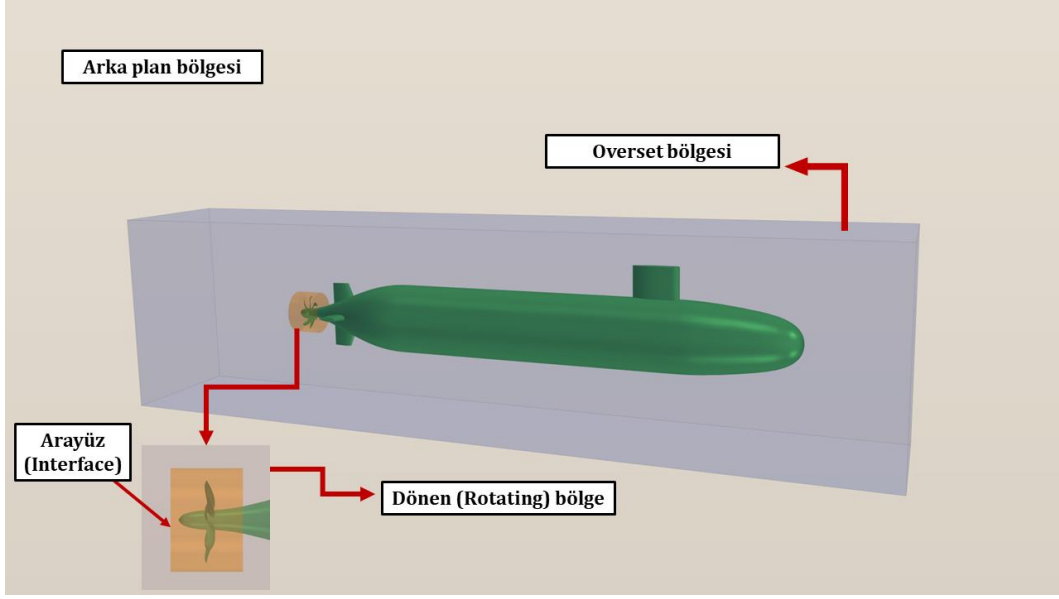
3.2 Hesaplama Alanı ve Sınır Koşulları

HAD hesaplamalarında, geometri etrafındaki akışın doğru bir şekilde çözümlenmesi için problemin çözümünün iyi bir yaklaşımı elde eden uygun başlangıç ve sınır koşullarının uygulanması büyük önem taşır (Date & Turnock, 1999). Bu bağlamda, tez çalışması kapsamında DARPA Suboff ve INSEAN E1619 geometrilerinin analizlerini gerçekleştirmek için iki farklı hesaplama alanı

oluşturulmuştur: biri açık-su pervane simülasyonları için, diğeri ise direnç ve kendinden tahrikli free-running simülasyonlar için. Hesaplamalar, kartezyen koordinat sisteminde gerçekleştirilmiş olup, orijin noktası denizaltının kıç dikme noktasına yerleştirilmiştir. Akışın geliş yönünü negatif x ekseni ve pozitif z ekseni yukarı yönü göstermektedir.

Direnç analizlerinde, denizaltı etrafındaki akışı simüle etmek için dikdörtgen bir çözüm alanı oluşturulmuştur. Bu çözüm alanının boyutları ITTC (ITTC, 2011b) (International Towing Tank Conference) prosedürüne uygun olarak belirlenmiştir. Çözüm alanı boyutlarının bu prosedüre uygun seçilmesi uygulanan sayısal yaklaşımın doğru sonuç elde etmesi için son derece önemlidir. Aynı çözüm alanı, kendinden tahrikli free-running simülasyonlarına da uygulanmıştır. Ancak direnç analizlerinden farklı olarak, çözüm alanı 3 alt bölgeye ayrılmıştır: tüm akış alanını içeren arka plan bölgesi (background region), denizaltı gövdesini kapsayan overset bölgesi ve pervane ile yakın çevresini içinde bulunduran dönen (rotating) bölge. Pervanenin bulunduğu silindir şeklindeki dönen bölge overset bölgesinden çıkartılmıştır. Sonrasında bu iki bölge arasında pervaneyi kapsayan silindirin yüzeyleri sayesinde arayüz (interface) oluşturulmuştur. Bu arayüz sayesinde oluşturulan bölgeler arasında akışa ait bilgilerin transferi sağlanır. Arka plan bölgesini çevreleyen 4 yüzey (üst, alt ve yan yüzler) ile çözüm alanının sağ tarafındaki yüzeye hız girişi sınır koşulu tanımlanırken, sol tarafına basınç çıkışı sınır koşulu tanımlanmıştır. Direnç analizlerinde denizaltı modeli sabit tutularak hız girişinden deney koşullarındaki hız aralığına göre akış gönderilerek direnç değerleri hesaplanmıştır. Free-running simülasyonlarında ise, herhangi bir yüzeyden hız girişi tanımlanmamıştır; denizaltı gerçek fiziksel durumda olduğu gibi pervanesinin ürettiği itme ile hareket etmektedir. Denizaltı yüzeyine kaymaz duvar (no-slip wall) sınır koşulu tanımlanmıştır. Denizaltı gövdesi üzerinde hız bileşenleri ve toplam hız sıfırdır.

Açık-su pervane testlerini gerçekleştirmek için silindir şeklinde çözüm alanı oluşturulmuştur. Çözüm alanının sol tarafı basınç çıkışı (pressure outlet) olarak tanımlanırken sağ tarafı hız girişi (velocity inlet) tanımlanmıştır. Pervane kanatları ve shaft yüzeyi aynı tekne yüzeyinde olduğu gibi kaymaz duvar (no-slip wall) olarak seçilirken çözüm alanı çevreleyen diğer yüzeyler simetri (symmetry plane) olarak



Şekil 3. 4 Overset çözüm ağı konfigürasyonu detayları

3.3 Çözüm Ağı Yapısı

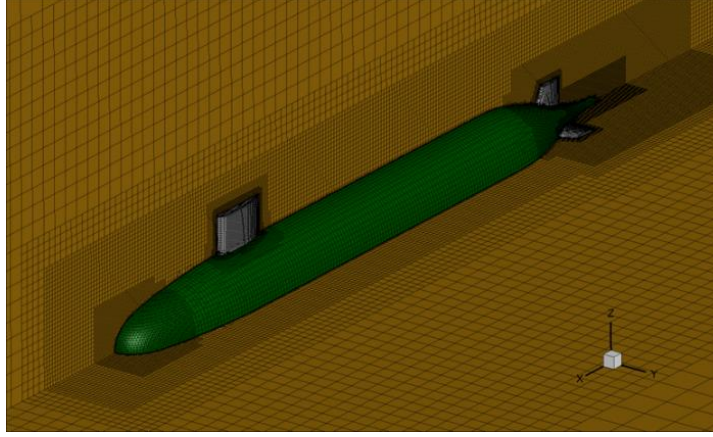
Uygun bir çözüm ağı yapısının uygulanması, HAD hidrodinamik problemlerinin yüksek doğrulukta çözümü için önem arz eden adımlardan biridir. Sonlu hacimler yöntemine uygun olarak, hesaplama alanı üç boyutlu çözüm elemanları kullanılarak ayrıklaştırılır. Direnç, açık-su pervane ve free-running simülasyonları için, tüm hesaplama alanı boyunca altı yüzlü elemanlara sahip trimmer mesh algoritması kullanılmıştır. Kritik bölgelerde, olası akım ayrılmalarını ve yüksek hız gradyanlarını doğru yakalamak için, denizaltının izinde ve takıntılarının (dümen finleri ve yelken) etrafında daha yoğun ağ sıklaştırmaları uygulanmıştır. Girdaplı akım alanını doğru bir şekilde tahmin etmek için, pervane kanatlarının uç (tip) kısımlarında, yüzeyleri üzerinde ve yakın bölgesinde daha sık ağ elemanları kullanılmıştır. Sınır tabakasının daha iyi temsil edilmesi için denizaltı gövdesi ve pervane kanatlarının yakınında prizma katmanları (prism layer) oluşturulmuştur. Duvar fonksiyonu (wall function) yaklaşımının gerekliliklerini karşılamak için, boyutsuz duvar mesafesi değerleri $30 < y^+ = \frac{u_{\tau}y}{\nu} < 300$ aralığında tutulmuştur. Burada u_{τ} sürtünme hızı, y^+ duvardaki ilk hücrenin yüksekliği ve ν akışkanın kinematik viskozitesidir. Denizaltı ve pervane kanatlarının yüzeyi üzerindeki ağ boyutu ve büyüme oranı wall y^+ değerlerini yukarıda bahsedilen aralıkta tutmak için ayarlanmış, denizaltı ve pervane kanatlarının yakınındaki viskoz etkilerin

doğru hesaplanmasına özen gösterilmiştir. Şekil 3.9’da DARPA Suboff denizaltısı ve INSEAN E1619 pervane kanatları üzerindeki wall y+ dağılımı gösterilmiştir.

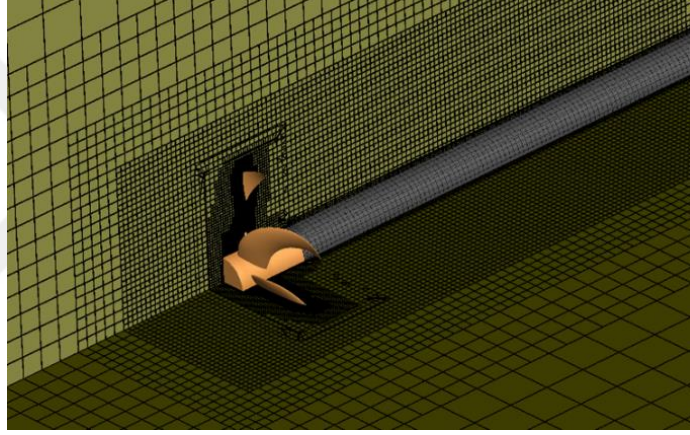
Bu tez çalışmasında direnç ve açık-su pervane analizlerinde olduğu gibi geleneksel HAD simülasyonları modellenirken tüm hesaplama alanını kapsayan sabit ağ yapısı kullanılmaktadır ancak hareketli geometrilerin ya da akışkan-katı etkileşiminin incelendiği durumlarda, geleneksel ağ yapısı yaklaşımı pratik ve uygulanabilir olmayabilir. Bu durum göz önünde bulundurulduğunda tez kapsamında incelenen serbest çalışan (free-running) bir denizaltının HAD simülasyonlarını gerçekleştirmek için dinamik overset çözüm ağı yaklaşımı kullanmak daha uygundur. Denizaltının fiziksel ötelemesi overset çözüm ağı aracılığıyla gerçekleştirilebilmektedir. (J. Wang vd., 2017), dümen ve pervane gibi hareketli bileşenlere sahip gemi hareketlerinin simülasyonları için dinamik overset çözüm ağının temel nokta olduğunu belirtmiştir. Bunun yanı sıra, hareket eden kompleks geometrilerin büyük genlikteki hareketlerini simüle etmek için kullanılmaktadır. Overset çözüm ağı yaklaşımının nihai hedefi tüm bölgelerin ağ yapıları arasındaki ilişkiyi kurmak ve her bölgenin hız alanının hesaplanması için bölgeler arasındaki sınırın akış alanı bilgisini her bölge arasında aktarmaktır. Overset yöntemi ile hesaplama alanı (domain) bağlanabilirliği işleminin “hole cutting” yaklaşımına dayalı olarak gerçekleştirilmesi gerektiği belirtilmelidir. Hole cutting işlemi, bağımlı değişkenlerin interpolasyonunun donör ve alıcı hücreler arasında uygulanabildiği bir overset arayüzü (interface) aracılığıyla overset bölgesinin arka plan (background) bölgesine bağlanmasıdır. Overset arayüzleri, hole-cutting işlemi için bölge önceliğini kontrol eden Overset Hiyerarşisi özelliği kullanılarak oluşturulmuştur (Kim vd., 2021).

Şekil 3.5 ve 3.6’da direnç ve açık-su pervane simülasyonlarında kullanılan ağ yapısı sunulmuştur. Şekil 3.7 ‘de ise DARPA Suboff denizaltı modelinin fiziksel hareketi için kullanılan overset mesh yaklaşımının genel görünümü verilmiştir. Pervane yakınındaki çözüm ağı yapısı ve iyileştirmeleri de gösterilmiştir. Direnç ve açık-su pervane simülasyonlarındaki kullanılan ağ yapıları kendinden tahrikli free-running simülasyonundaki denizaltı ve pervane modeline uyarlanmıştır. Ek olarak, denizaltının fiziksel bir hareketinden dolayı overset mesh konfigürasyonu uygulanmıştır. Şekil 3.8’da kendinden tahrikli free-running simülasyonlarında kullanılan iki farklı sevk modeli: gövde kuvveti yöntemi (body force method) ve

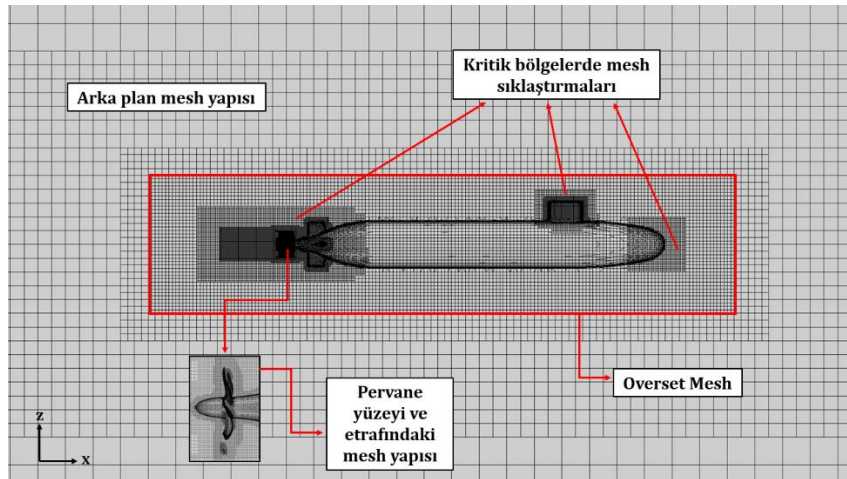
ayrıklaştırılmış pervane modeli (discretized propeller model), için k1ç bölgesindeki ađ yapısının daha yakın görünüşü sunulmuştur.



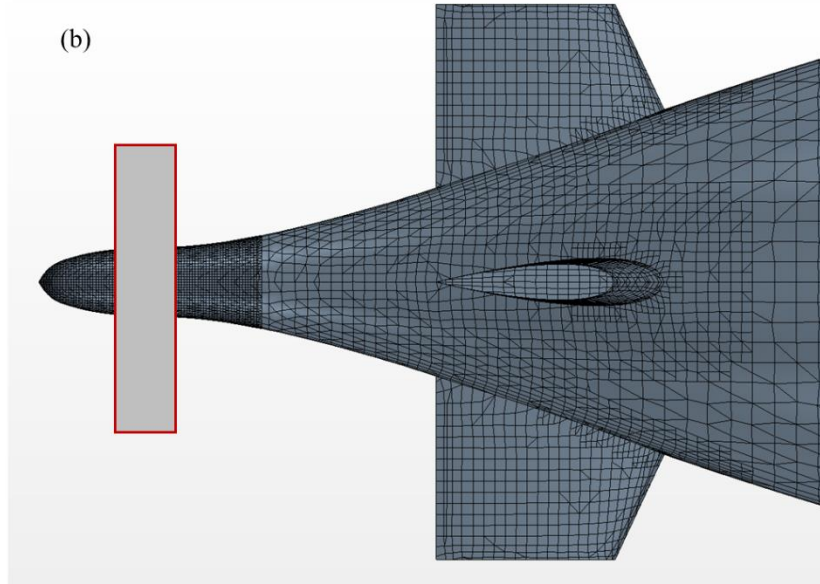
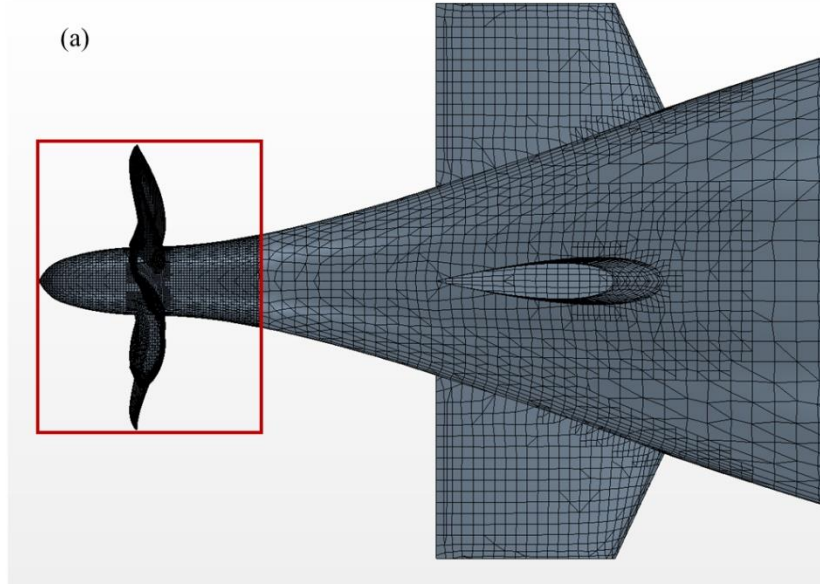
Şekil 3. 5 Direnç analizlerinde uygulanan denizaltı etrafındaki çözüm ağı yapısı



Şekil 3. 6 Açık-su durumunda pervane etrafındaki çözüm ağı yapısı

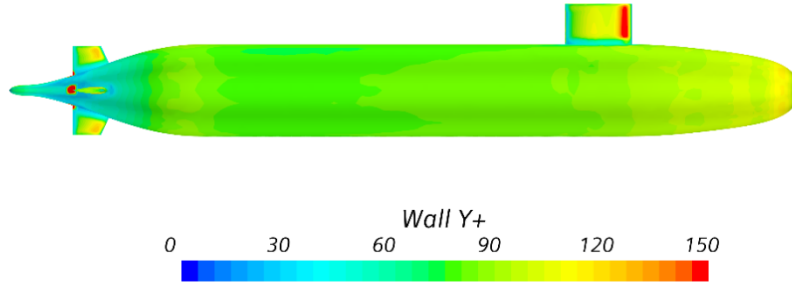


Şekil 3. 7 Free-running simülasyonlarında kullanılan overset çözüm ağı konfigürasyonu



Şekil 3. 8 K1ç bölgesindeki çözüm ağı yapısı: a-) Ayrıklaştırılmış pervane modeli (discretized propeller model), b-) gövde kuvveti yöntemi (body force method)

Şekil 3.8 (b) de görüldüğü gibi gövde kuvveti yönteminde pervaneyi temsil etmek üzere silindir şeklinde bir sanal disk (virtual disk) kullanılmıştır. Bir sonraki bölümde sanal diskin çalışma prensibi detaylı olarak verilmiştir.



Şekil 3. 9 $V = 5.144$ m/s ve $J = 0.55$ için DARPA Suboff denizaltısı ve INSEAN E1619 pervanesi kanatları üzerindeki wall y^+ dağılımı

3.4 Çözüm Stratejisi

Bu tez çalışmasında yönetici denklemler, URANS denklemleri, ticari HAD yazılımı aracı Sim-center Star CCM+ yardımıyla sonlu hacimler yöntemi kullanılarak ayrıklaştırılmıştır. DARPA Suboff denizaltı ve INSEAN E1619 pervane modeli etrafındaki türbülanslı akış, gemi hidrodinamiği uygulamalarında yaygın olarak kullanılan iki katmanlı tüm y^+ duvar işlemine (two-layer all y^+ treatment) sahip gerçekleştirilebilir (realizable) $k-\epsilon$ türbülans modeli kullanılarak çözülmüştür. Hem konumsal hem de zamansal ayrıklaştırma için ikinci dereceden bir şema kullanılmıştır. Basınç alanını çözmek için basınç-hız eşleşmesine dayanan SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations) çözüm algoritması kullanılmıştır. Denizaltının tamamen batık olduğu varsayıldığından analizler gerçekleştirilirken tez fazlı yaklaşım kullanılmış ve serbest yüzey etkileri dikkate alınmamıştır.

Açık-su pervane simülasyonları gerçekleştirilirken pervane etrafındaki akış hareketli referans sistemi (Moving Reference Frame, MRF) yöntemi kullanılarak modellenirken, kendinden tahrikli free-running simülasyonlarında pervane rijit gövde hareketi (Rigid Body Motion, RBM) ve sanal disk (Virtual Disk) yöntemleri kullanılarak modellenmiştir.

Hareketli referans sistemi yaklaşımında, pervane geometrisi sabit kalırken, etrafında oluşturulan silindirik bölgeye dönme hareketi tanımlanmaktadır. Ancak bu dönme hareketi fiziksel olarak gerçek bir hareket olmayıp dönel bölge içerisindeki çözüm ağı elemanları sabit kalmaktadır. Bununla birlikte, bu yöntem, kararlı (steady) bir yaklaşım sunmaktadır ve bu yöntemin RBM yöntemine göre en büyük avantajı zamandan bağımsız analizler gerçekleştirilebilmesidir. Özellikle rotasyonel hareketlerde hareketin fiziğini doğru yakalamak adına küçük zaman adımlarında çalışılması gerektiği bilinirken (aksi taktirde hesaplanmak istenen parametrelerin doğruluğundan uzaklaşılır), bu yöntemin sunduğu yaklaşımla hesaplama maliyeti yükünü azaltarak daha kısa sürelerde analiz sonuçları elde edilmektedir.

RBM yönteminde ise pervanenin fiziksel olarak gerçekten döndüğü durum modellenmektedir. Dönel (rotating) bölge içerisindeki çözüm ağı yapıları her zaman adımında pervane devir sayısına ve dönüş yönüne göre dönme hareketi yapar ve konumunu yenilemektedir. Bu yöntemde analizlerin zamana bağlı olarak gerçekleştirilmesi zorunludur. Bu yüzden de hesaplama süresi açısından negatif bir etki yaratmaktadır. Çünkü HAD analizlerinde pervanenin her bir zaman adımında 0.5-2 derece arasında dönmesi istenmektedir (ITTC, 2014a). Bunun için de pervane devrine göre zaman adımı belirlenmelidir. Bu da çok küçük zaman adımlarında çözümlerin gerçekleştirilmesine neden olarak hesaplama süresini oldukça arttırmaktadır. Ancak bu yöntemi kullanarak pervane etrafında ve izinde akışın detaylı olarak görselleştirilmesi ve tekne-pervane-dümen etkileşimini daha doğru tahmin ederek ilgili parametrelerin (itme azalması ve iz katsayısı) elde edilmesinde daha uygun bir yöntem olacaktır.

Denizaltının bir serbestlik dereceli (1DOF) hareketi (ileri öteleme hareketi), akış ile hareketli rijit gövde arasındaki etkileşimi hassas bir şekilde simüle etmeyi sağlayan DFBI (Dynamic Fluid Body Interaction) modeli tarafından ele alınmıştır. Geminin

yeni konumunu belirlemek için bu yaklaşım, gemiye etki eden kuvvet ve momentlerin yanı sıra geminin hareket denklemlerini de hesaplamaktadır.

Pervane tarafından üretilen itme kuvveti, gövde kuvveti yöntemi (sanal disk) ve ayrıklaştırılmış pervane yöntemi olmak üzere iki farklı sevk modeli kullanılarak hesaplanmıştır. Gövde kuvveti yöntemi, tekne-pervane kombinasyon modelini basitleştirmek için pervanenin özelliklerini bir gövde kuvveti olarak temsil eder (Kim vd., 2021). Bu yöntem, pervane performans eğrilerini, pervane konumunda bulunan sanal bir ince silindirik diske uygular (bkz. Şekil 3.8 (b)). Bu basitleştirilmiş disk modeli, simülasyonları gerçekleştirmek için sayısal karmaşıklığı ve hesaplama kaynaklarını azaltmaya yardımcı olur (Feng vd., 2020b). Çünkü bu yöntemde, herhangi bir geometriye ihtiyaç duyulmadan sadece pervane çapı boyutlarında silindir şeklinde bir disk oluşturulmaktadır. Bu disk için, pervaneli koşullarda olduğu gibi ek bir çözüm ağı elemanları oluşturulmaz ve böylece daha düşük ağ elemanı ile daha kısa sürede problemin çözümü elde edilmektedir. Ancak sanal diskin kullanıldığı durumda, detaylı bir hız ve basınç alanı, pervane uçlarında ve göbek kısmında oluşacak girdapları gözlemlemek mümkün olmayacaktır. Bir sanal diski (virtual disk) modellemek için pervane boyutları, pervane dönüş hızı ve pervane karakteristik eğrilerinin sonuçları gibi birçok girdi faktörü gerekmektedir. Bu tez çalışmasında, girdi değişkenlerinden karakteristik eğrileri hesaplamak için sonuçları açık-su pervane deney verileri ile doğrulanmış HAD simülasyonları ile hesaplanan itme ve tork katsayısı ile açık-su pervane verimi ikinci dereceden bir polinom şeklinde sanal diske tanımlanmıştır. Bu parametrelere bağlı olarak hesaplanan kuvvetler, pervane etkisini simüle etmek için DFBI modülü ile dış kuvvet olarak tanımlanmaktadır. Böylece sanal diskin ürettiği itme kuvveti, denizaltı modeline bu modül ile aktarılarak bir sonraki zaman adımındaki hızı ve konumunu hesaplanmıştır.

Diğer bir yöntem olan ayrıklaştırılmış pervane modellemesinde, pervane geometrisi doğrudan modellenmiştir. Bu yaklaşımda, DFBI Superposed rotasyon modeli, DFBI hareketine ek bir sabit gövde rotasyonu ekleyerek pervane rotasyonunu dahil eder ve denizaltı pervanesinin temsil edilmesine imkân tanımaktadır (STAR-CCM+ User Guide). Tek serbestlik derecesine (1DOF) sahip ileri öteleme hareketi yapan denizaltı modelinde, pervane geometrisi ileri öteleme hareketine ek olarak eş zamanlı olarak rotasyonel hareket de gerçekleştirmektedir.

Tez çalışması kapsamında denizaltı direnç ve açık-su pervane simülasyonları zamandan bağımsız (steady) olarak çözümlerken, free-running simülasyonları zamana bağlı (unsteady) olarak gerçekleştirilmiştir. Makul bir çalışma süresi içinde uygun bir doğruluk seviyesi elde etmek için, ITTC'nin (2011,2014) ilgili prosedür ve kılavuzlarına göre farklı zaman adımı çözümleri seçilmiştir. DPM yaklaşımı için pervane her zaman adımı başına 0.5 ile 2 derece arasında dönmektedir. BFM yaklaşımında ise belirtilen derece aralığında dönen pervane için bir zaman adımı belirlemeyi göz önünde bulundurmaya gerek yoktur. Çünkü herhangi bir fiziksel olarak pervane hareketi yoktur onun yerine pervaneyi yukarıda bahsedildiği gibi sanal disk temsil etmektedir. Bu göz önünde bulundurulduğunda, zaman adımı direnç simülasyonları için önerilen $\Delta t = 0.005 \sim 0.01L/U$ formülasyonuna göre hesaplanmıştır. Bu iki zaman adımı belirleme yönteminin dışında üçüncü olarak CFL (Courant sayısı) için uygun koşulun sağlanıp sağlanmadığına bakılabilir. Courant sayısı her çözüm ağı için hesaplanmaktadır ve sayısal stabilite için 1' e eşit ya da daha küçük olması gerekmektedir. $CFL = \frac{U\Delta t}{\Delta x}$, burada Δt zaman adımı, Δx ise hesaplama alanındaki en küçük çözüm ağının ölçüsüdür. Sonuç olarak, free-running simülasyonlarında, farklı sevk modelleri için yukarıda bahsedilen zaman adımı belirleme yolu seçilmiştir:

- DPM yaklaşımında, $\Delta t = 2^\circ / 360^\circ n$
- BFM yaklaşımında ise, $\Delta t = 0.005L/U$

referans zaman adımı ile belirlenmiştir. Burada n pervane dönüş hızı (rps), L gemi karakteristik boyu ve U gemi hızını belirtmektedir.

Free-running simülasyonları iki farklı hesaplama alanı kullanılarak gerçekleştirilmiştir: hareketli arka plan (moving background) ve sabit arka plan (fixed background). Hareketli arka plan yaklaşımında, arka plan bölgesi (background region) denizaltıyla birlikte ilerler böylece overset ve arka plan bölgelerinin eşzamanlı hareketi sağlanır. Denizaltının ileri öteleme hızının arka plan alanının x yönündeki hız bileşeni olarak kullanılmıştır. Aksi takdirde, çözüm alanının denizaltının hareket mesafesini yeterince kapsadığından emin olmak için, beklenen hareket yolu boyunca genişletilmesi gerekir (Kim vd., 2021). Denizaltı ileri öteleme hareketine ek olarak yanal öteleme (sway) ve savrulma (yaw) hareketlerine de serbest bırakılıysaydı, üç serbestlik derecesine (3DOF) sahip, bu

durumda y yönündeki yanal öteleme hızı (v) ile z yönündeki savrulma açısal hızı (w) arka plan bölgesinin y ve z yönündeki hız bileşenleri olarak kullanılacaktır. Böylece arka plan bölgesi ile overset bölgesi senkronize olarak hareket etmeye devam edecektir.



SONUÇLAR: DARPA SUBOFF DENİZALTI

Bu bölümde, Hesaplamalı Akışkanlar dinamiği (HAD) simülasyonlarından elde edilen sonuçlar ile geliştirdiğimiz SMot4QP kodunu kullanarak yapılan hesaplamaların sonuçları sunulmuştur. DARPA Suboff denizaltı modelinin direnci ve açık-su pervane testlerinin simülasyon sonuçları ayrıntılı olarak sunulmuş ve literatürdeki deneysel veriler ile karşılaştırılarak doğrulaması yapılmıştır. Ardından, SMot4QP tahminleri için temel oluşturan FQP (Four-quadrant Propeller) sonuçları, tam ileri, ani kalkış, ani durma ve tam geri manevralarını içeren dört farklı senaryoda gösterilmiştir. Son kısımda, iki farklı sevk modeli ve 4 kuadrantlı pervane performansına dayalı SMot4QP kodu kullanılarak, manevra senaryolarına uygun gemi başlangıç hızı ve pervane dönüş hızı belirlenmiş ve free-running simülasyonları gerçekleştirilmiştir. Bu simülasyonlar geminin çeşitli manevra durumlarında nasıl davranacağını belirlemek için yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar, kullanılan modellerin etkinliğini değerlendirmek amacıyla kapsamlı bir şekilde analiz edilmiştir.

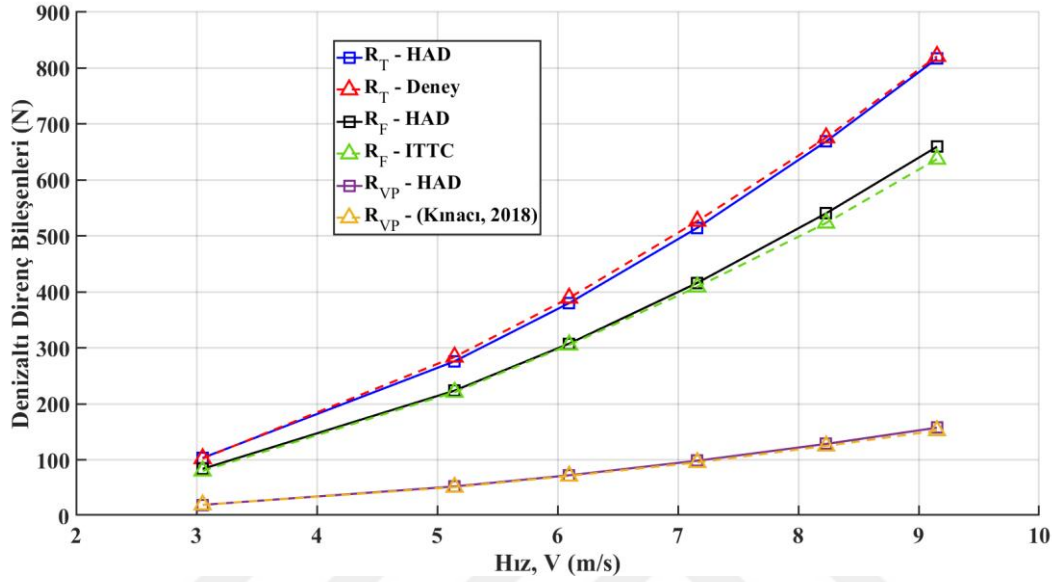
4.1 Denizaltı Direnç Testleri

4.1.1 Doğrulama çalışması

Gemi direncinin değerlendirilmesinde kullanılan hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) hesaplamalarının doğruluğu, DARPA AFF-8 denizaltı formu üzerinde gerçekleştirilen kapsamlı bir dizi testle incelenmiştir. Bu testler, kullanılan sayısal yaklaşımın doğruluğunu teyit etmeyi amaçlamıştır. Şekil 4.1’de, bu simülasyonların sonuçları sunulmuş ve tahmin edilen direnç bileşenleri gösterilmiştir. Toplam direnç değerleri (H.-L. Liu & Huang, 1998) tarafından gerçekleştirilen çekme tankı ölçümleri ile karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, tüm ileri hızlar için sayısal verilerin deneysel sonuçlarla yakın bir uyum gösterdiğini ve mükemmel bir eşleşme sergilediğini ortaya koymuştur.

Sayısal yaklaşımı daha da doğrulamak amacıyla gemi direnci bileşenleri de detaylı bir şekilde incelenmiştir. Şekil 4.1, hesaplanan sürtünme direnci değerlerinin ITTC-1957 sürtünme korelasyon hattı (ITTC, 2014b) kullanılarak elde edilen verilerle yakından uyumlu olduğunu göstermektedir. Özellikle, sürtünme direncinin tekne

direncinin temel bileşenini oluşturduğu beklenen bir durumdur. Ayrıca, viskoz basınç direnci sonuçları, (Kinacı vd., 2018) yayınladığı çalışmanın bulgularıyla karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma sonuçları, denizaltı modelinin öngörülen viskoz basınç direnci ile söz konusu çalışmanın sonuçları arasında oldukça iyi bir uyum olduğunu göstermiştir.



Şekil 4. 1 HAD ile hesaplanan DARPA Suboff denizaltısı direnç bileşenlerinin deneysel sonuçları ile karşılaştırılması

4.1.2 Belirsizlik Analizi

Richardson ekstrapolasyon yöntemine (Richardson, 1911) dayanan Grid Convergence Index (GCI) tekniği kullanılarak sayısal sonuçların belirsizliğini değerlendirmek için bir doğrulama çalışması yapılmıştır. Bu yöntem ilk olarak (Roache, 1998) tarafından önerilmiş ve literatürde (Celik vd., 2008) tarafından verilen prosedür kullanılarak yaygın bir şekilde uygulanmıştır.

N_1 , N_2 ve N_3 sayısal hesaplamalar için uygulanan toplam çözüm ağı sayısını h_1 , h_2 ve h_3 çözüm ağı boyutlarını göstermektedir. ΔV_i çözüm ağının hacmini temsil etmektedir ve r_{21} ile r_{32} sıklaştırma oranları (refinement ratio) aşağıdaki ifadelerle tanımlanmaktadır:

$$r_{21} = \frac{h_2}{h_1} \quad (4.1)$$

$$r_{32} = \frac{h_3}{h_2} \quad (4.2)$$

$$h_j = \left[\frac{1}{N_j} \sum_{i=1}^{N_j} (\Delta V_i) \right]^{1/3}, j = 1,2,3 \quad (4.3)$$

(Celik vd., 2008) tarafından yapılan çalışmaya göre sıklaştırma oranının 1.3'ten büyük olması gerektiği dikkate alınmalıdır. Bu çalışmada, HAD uygulamalarında genellikle uygulanan $\sqrt{2}$ sıklaştırma oranı seçilmiştir. Çözüm parametreleri arasındaki fark (ε) aşağıdaki denkleme göre hesaplanabilir,

$$\varepsilon_{21} = \varphi_2 - \varphi_1, \quad \varepsilon_{32} = \varphi_2 - \varphi_1 \quad (4.4)$$

Burada $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$ sırasıyla, kaba, orta ve sık çözüm ağı sayısındaki sayısal sonuçları göstermektedir. Çözüm parametresi, $V = 3.051$ m/s servis hızındaki denizaltı modelinin boyutsuz toplam direnç katsayısı olarak belirlenmiştir. Sayısal çözümün yakınsama koşulları aşağıdaki gibi hesaplanabilir,

$$R = \frac{\varepsilon_{21}}{\varepsilon_{32}} \quad (4.5)$$

Çözümün belirlenmesi R değerleri aralığına göre değerlendirilebilir (Stern vd., 2001)

- Salınımlı yakınsama (Oscillatory convergence): $-1 < R < 0$
- Monoton yakınsama (Monotonic convergence): $0 < R < 1$
- Salınımlı ıraksama (Oscillatory divergence): $R < -1$
- Monoton ıraksama (Monotonic divergence): $R > 1$

Ekstrapole edilmiş değer sıradaki denkleme kullanarak hesaplanabilir,

$$\varphi_{ext}^{21} = \frac{(r^p \varphi_1 - \varphi_2)}{(r^p - 1)} \quad (4.6)$$

Burada p görünür doğruluk sırasındır ve aşağıdaki eşitlik kullanılarak hesaplanır,

$$p = \frac{1}{\ln(r_{21})} |\ln|\varepsilon_{32}/\varepsilon_{21}| + q(p)| \quad (4.7)$$

Burada, $q(p)$ ve s aşağıdaki gibi tanımlanabilir,

$$q(p) = \ln \left(\frac{r_{21}^p - s}{r_{32}^p - s} \right) \quad (4.8)$$

$$s = \text{sgn}(\varepsilon_{32}/\varepsilon_{21}) \quad (4.9)$$

Yaklaşık ve ekstrapole edilmiş bağıl hatalar da aşağıdaki gibi tanımlanır,

$$e_a^{21} = \left| \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{\varphi_1} \right|, \quad e_{ext}^{21} = \frac{|\varphi_{ext}^{21} - \varphi_1|}{\varphi_{ext}^{21}} \quad (4.10)$$

Son olarak, sayısal çözümün belirsizlik indeksi şu şekilde hesaplanabilir,

$$GCI_{fine}^{21} = \frac{1.25e_a^{21}}{r_{21}^p - 1} \quad (4.11)$$

Sayısal çalışmanın DARPA Suboff denizaltı modeli için hesaplanan belirsizlik indeksi Tablo 4.1'de verilmiştir.

Tablo 4. 1 Denizaltı toplam direnci açısından belirsiz analizi sonuçları

Parametre	C _T
N ₁ , N ₂ , N ₃	2248701, 979909, 451840
r ₂₁ , r ₃₂	1.319, 1.294
φ ₁ , φ ₂ , φ ₃	0.00347, 0.00351, 0.00364
ε ₂₁ , ε ₃₂	3.83E-05, 1.28E-4
R	0.298
q	0.091
p	4.468
φ _{ext} ²¹ , φ _{ext} ³²	0.003458, 0.003459
e _a ²¹ , e _a ³²	0.011, 0.03658
e _{ext} ²¹ , e _{ext} ³²	0.004527, 0.01518
GCI _{MEDIUM} ³²	0.01869
GCI _{FINE} ²¹	0.005634
GCI _{MEDIUM} ³² (%)	1.869
GCI _{FINE} ²¹ (%)	0.563

Tablo 4.1'deki sonuçlara göre, R değeri yukarıda bahsedilen ikinci koşulu sağlamakta ve monoton olarak yakınsamaktadır. Ayrıca, belirsizlik yaklaşık %0.6 olarak hesaplanmıştır. Belirsizlik analizin yanı sıra, çözüm ağından bağımsızlık

çalışması da (mesh dependency study) gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar Tablo 4.2’de gösterilmiştir.

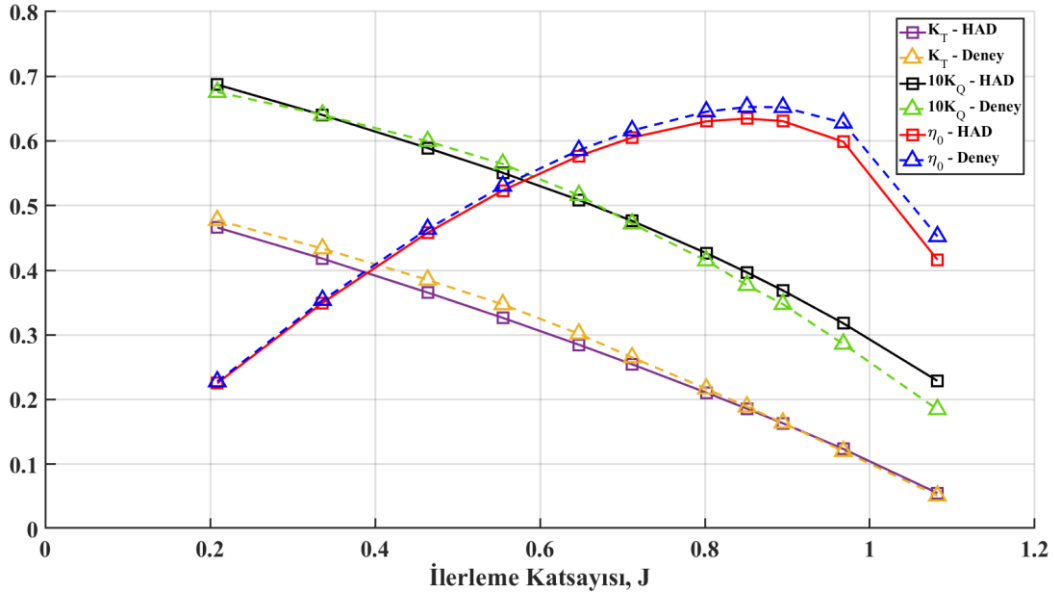
Tablo 4. 2 Çözüm ağından bağımsızlık çalışması sonuçları

	Deney	Çözüm ağı 1	Çözüm ağı 2	Çözüm ağı 3
Çözüm ağı sayısı	-	451840	979909	2248701
C_T ($\times 10^{-3}$)	3.467	3.640	3.505	3.473
Bağıl hata	-	%4.98	%1.09	%0.17

Tablo 4.1 ve 4.2’deki sonuçlar incelendiğinde, direnç ve free-running simülasyonlarında kullanılmak üzere orta sıklıktaki çözüm ağı yapısı seçilmiştir.

4.2 Açık-su Pervane Testleri

INSEAN E1619 pervanesinin açık su pervane testlerini gerçekleştirerek, nümerik sonuçlar deneysel verilerle karşılaştırılmıştır. Geleneksel açık su testleri, geminin ileri doğru hareket ettiği ve pervanenin düzenli olarak döndüğü pervanenin 1. kuadrantında gerçekleştirilir. (Chase & Carrica, 2013) tarafından gerçekleştirilen deneyden elde edilen veriler ile HAD simülasyonlarından elde ettiğimiz sonuçlar Şekil 4.2 de detaylı bir şekilde gösterilmiştir. İtme katsayıları, daha düşük ilerleme katsayılarında küçük farklılıklar olmasına rağmen, yüksek ilerleme katsayılarında deneysel verilerle mükemmel bir uyum içindedir. Tersine, tork katsayısı düşük ilerleme katsayılarında daha iyi bir uyum göstermektedir. Açık su pervane verimliliği açısından sonuçlar $J > 0.8$ ’den olduğu durumda az miktarda farklılık gözlemlenmiştir ancak genel olarak deney sonuçlarıyla yüksek uyum içerisindedir.



Şekil 4. 2 INSEAN E1619 pervanesi HAD simülasyon sonuçlarının deneysel verilerle karşılaştırılması

4.3 FQP (Four Quadrant Propeller) Performans Eğrileri

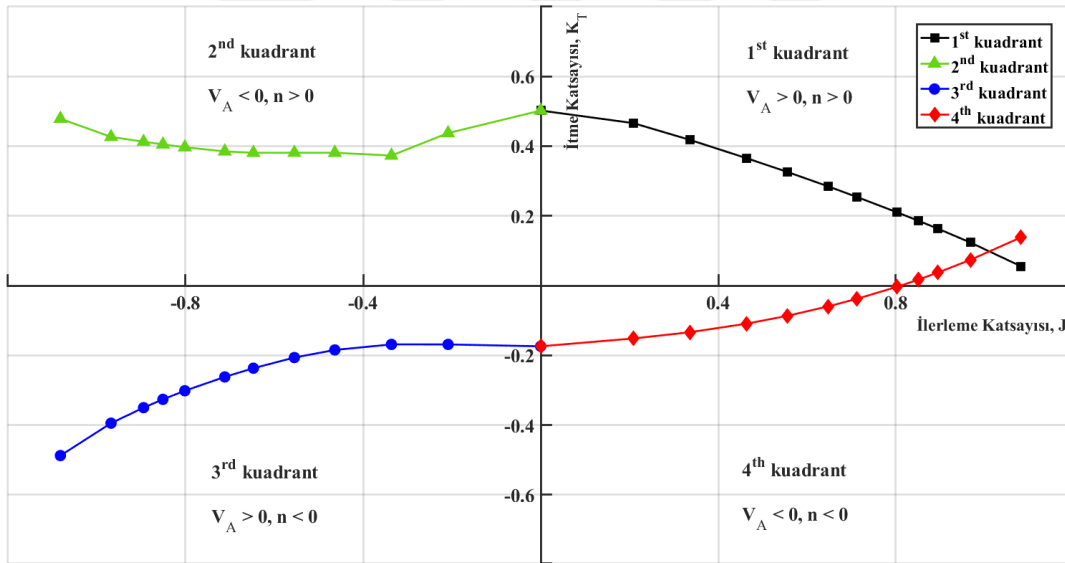
Bir önceki bölümde detaylı olarak açıklanan SMot4QP'un matematiksel altyapısı, gemi ileri öteleme hızını hesaplamak için dört çeyrek gemi pervanesi performans eğrilerini kullanmaktadır. Bu eğriler, pervane tarafından üretilen itme kuvvetini dört farklı manevra durumunda elde etmek için gerekli olan girdi parametrelerinden biridir. Bu kısımda, DARPA Suboff denizaltı modelinin muhtemel ileri öteleme hareketi ve pervanenin dönüş yönüne bağlı oluşan manevra durumu özetlenmiştir.

İleri giden bir gemi 1. kuadrantta çalışmaktadır. Bu durumda pervane geleneksel olarak çalışmaktadır, yani $n > 0$ ve gemi ileriye doğru hareket etmektedir ($V_A > 0$). Eğer bu gemi hızını azaltmak isterse, pervanenin ters yönde çalışması gerekir. Bu durumda gemi hala ileriye doğru hareket etmektedir ancak hızı azalmıştır, yani $V_A > 0$ ve pervane dönüşü tersine dönmüştür, yani $n < 0$, ani durma manevra durumudur. Bu, pervane performansının 3. kuadrantına karşılık gelir. Pervane ters yönde çalıştıkça, gemi sıfır hıza ulaşacak ve bir noktada kış tarafına hareket etmeye başlayacaktır. Bu durumda pervane dönüş yönü hala negatiftir, yani $n < 0$ ve gemi geriye doğru hareket etmektedir ($V_A < 0$). Bu 4. çeyrektir. Pervane bir kez daha ileriye doğru hareket etmesi gerektiğinde 2. kuadrantta çalışır. Bu sefer gemi hala geriye doğru hareket etmektedir ($V_A < 0$), ancak pervane pozitif yönde dönmektedir ($n > 0$). Tüm bu bilgiler, INSEAN E1619 pervanesi için Tablo 4.3' de özetlenmiştir.

Tablo 4. 3 INSEAN E1619 FQP performansı için eğriye uydurulmuş itme katsayıları

1 st kuadrant	Tam ileri	$V_A > 0$	$n > 0$	$K_{T_1} = -0.1833J^2 - 0.2235J + 0.5095$
2 nd kuadrant	Ani kalkış	$V_A < 0$	$n > 0$	$K_{T_2} = 0.3879J^2 + 0.4445J + 0.5019$
3 rd kuadrant	Ani durma	$V_A > 0$	$n < 0$	$K_{T_3} = -0.4332J^2 - 0.1943J - 0.1814$
4 th kuadrant	Tam geri	$V_A < 0$	$n < 0$	$K_{T_4} = 0.2494J^2 - 0.01J - 0.1694$

Dört kuadrantlı pervane performansı için itme katsayısı (K_T) ilişkin eğriye uydurulmuş denklemler Tablo 4.3'de verilmiştir. Bu denklemlerin görselleştirilmiş hali Şekil 4.3 de sunulmuştur.



Şekil 4. 3 INSEAN E1619 dört kuadrantlı pervane performans eğrileri

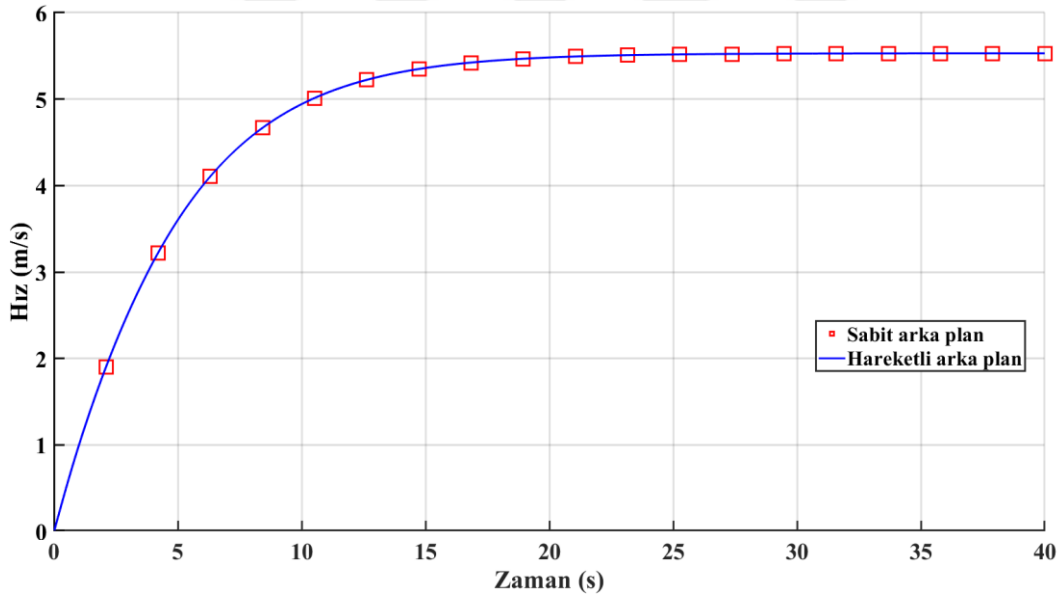
4.4 Free-running Testleri

Bu bölümde sonuçlar iki ana başlıkta derlenmiştir. İlk kısımda, denizaltı modelinin nümerik free-running testleri, simülasyonlar sırasında kullanılacak olan sevk modellerinden bir tanesi olan gövde kuvveti yöntemi (body force method) ile gerçekleştirilmiş ve sabit arka plan ile hareketli arka plan modelinin denizaltının nihai durumda ulaştığı hız üzerindeki etkisi incelenmiştir. Ek olarak, kullanılan arka

plan modelinin elverişliliği değerlendirilmiştir. Denizaltının başlangıç hızı sıfır olarak seçilmiş ve pervane 20 devir/saniye hızında dönmektedir. Sonuç olarak, denizaltı sanal disk (virtual disk) tarafından sağlanan itme kuvveti ile hızlanıp, 40 saniye sonunda sabit hıza ulaşmıştır. Simülasyon senaryoları Tablo 4.4'de sunulurken, zaman düzlemindeki hesaplama sonuçları Şekil 4.4 de gösterilmiştir.

Tablo 4. 4 İki farklı arka plan modeli için simülasyon senaryoları

Parametreler	Birim	Sabit Arka plan	Hareketli Arka plan
Başlangıç hızı	m/s	0	0
Pervane dönüş hızı	rps	20	20
Gemi manevra tipi		Tam ileri	Tam ileri



Şekil 4. 4 Denizaltı hızı üzerinde arka plan modelinin etkisinin karşılaştırılması

Bu şekilde açıkça görüldüğü üzere, her iki arka plan modeli de göz önünde bulundurularak gerçekleştirilen analizlerde denizaltı saniyede yaklaşık 5,53 metre hıza ulaşmış ve hesaplama alanında kullanılan modellerin farklılığının sonuç üzerinde kayda değer bir etkisi olmadığı gözlemlenmiştir. Öte yandan, sabit arka plan, daha fazla sayıda çözüm açısından oluşması nedeniyle hesaplama süresi maliyetini önemli ölçüde artırmıştır. Çünkü denizaltının fiziksel hareketi nedeniyle

sabit arka plan kullanılarak öngörülen seyahat rotası boyunca çözüm alanının genişletilmesi gerekli hale gelmiştir ve hesaplama alanının boyutu çözüm ağı sayısı ile doğrudan bir şekilde ilişkilidir. Çözüm ağı sayısı ve hesaplama süresi de Tablo 4.5'te verilmiştir.

Tablo 4. 5 Kullanılan arka plan modelinin hesaplama verimi karşılaştırılması

Parametreler	Sabit Arka plan	Hareketli Arka plan
Hesaplama süresi maliyeti (saat)	32.25	9.64
Çözüm ağı sayısı	2348217	1048149
İşlemci (2.9 GHZ)	18-çekirdek	18-çekirdek

Tablo 4.5'e göre hesaplama verimliliği açısından sonuçlar değerlendirildiğinde, sabit arka plan hareketli arka plana kıyasla aynı sonuçları elde etmek için yaklaşık 2,5 kat daha fazla hesaplama süresi gerektirmektedir. Analizler esnasında zaman açısından edilen tasarruf ve gerekli daha düşük çözüm ağı sayısı dikkate alındığında, sabit arka plan modeli yerine hareketli arka plan modeli, kendinden tahrikli denizaltı modelinin free-running simülasyonlarının ikinci kısmında uygulanmıştır.

Bölümün ikinci kısmında, her bir denizaltı hareket tipi için dört farklı durum belirlenmiştir: tam ileri, hızla ileri, ani durma ve tam geri. Bu durumların her biri için, dört kuadrant pervane performansına sahip gemi hareket kodumuzu (SMot4QP) kullanarak ve free-running HAD simülasyonları gerçekleştirerek zaman alanında denizaltı hızı ve konumu simüle edilmiştir. Free-running HAD simülasyonları için iki farklı sevk modeli kullanılmıştır: birincisi, bölümün başında da bahsedilen gövde kuvveti yöntemi (body force method) ve ikincisi ayrılaştırılmış pervane yöntemi (discretized propeller method). Başlangıç gemi hızı ve pervane dönüş hızı ile ilgili simülasyon senaryoları Tablo 4.6'da listelenmiştir.

Tablo 4. 6 Simülasyon senaryoları ve ilgili gemi manevra tipi

Parametreler	Birim	Durum #1	Durum #2	Durum #3	Durum #4
Başlangıç hızı	m/s	0	-3	5	0
Pervane dönüş hızı	rps	20	20	-5	-3
İlgili pervane kuadrantı		1	2	3	4
Gemi manevra tipi		Tam ileri	Ani kalkış	Ani durma	Tam geri

4.4.1 SMot4QP kodunun hesaplamalarında gerekli girdiler

Bölüm 2.2’de geliştirilen SMot4QP kodunun matematiksel arka planı detaylı bir şekilde anlatılmıştır ve kodun çalışma prensibine dayalı akış şeması gösterilmiştir (şekil 2.2). Akış şeması incelendiğinde “Fonksiyon 1” olarak belirtilen kısımda pervanenin ürettiği itme, bölüm 4.3’te verilen FQP eğrilerinin denklem 6’ya göre ikinci dereceden bir polinom olarak üretildikten sonra katsayılarını kullanarak hesaplamaktadır. “Fonksiyon 1” içerisindeki bir diğer değişkende ise denizaltının toplam direnci bölüm 4.1’de deney sonuçlarıyla valide edilmiştir ve sonrasında denklem 8’e göre hıza bağlı olarak değişen ikinci dereceden polinom uydurulmuştur. Ancak bu koşulda kod geminin sadece geleneksel koşullarda hesaplanan tam ileri durumundaki direnç değerini kapsamaktadır. Bu tez çalışmasında buna ek olarak üç farklı manevra durumunda (ani kalkış, ani durma ve tam geri) da denizaltının bir hareketi söz konusudur. Bu durum göz önünde bulundurulduğunda koda girdi olarak denizaltının negatif yönde çekildiği direnç değerlerinin eğrisinin de ikinci dereceden bir polinom olarak verilmesi gerekmektedir. Bu yüzden, deney sonuçlarıyla valide edilen direnç değerlerinde kullanılan aynı çözüm ağı yapısıyla negatif yöndeki direnç sonuçları da hesaplanmıştır ve Tablo 4.7’de verilmiştir.

Tablo 4. 7 Negatif yönde hesaplanan denizaltı direnç bileşenleri

Hız (m/s)	R _T (N)	R _F (N)	R _{VP} (N)
2.75	-92.45	-68.6146	-23.8438
3.051	-112.74	-83.3516	-29.395
5.144	-307.94	-222.356	-85.5836
6.096	-425.73	-305.9362	-119.8026
7.161	-578.93	-414.0334	-164.9014
8.231	-754.60	-537.8576	-216.7454
9.152	-923.82	-656.3524	-267.474

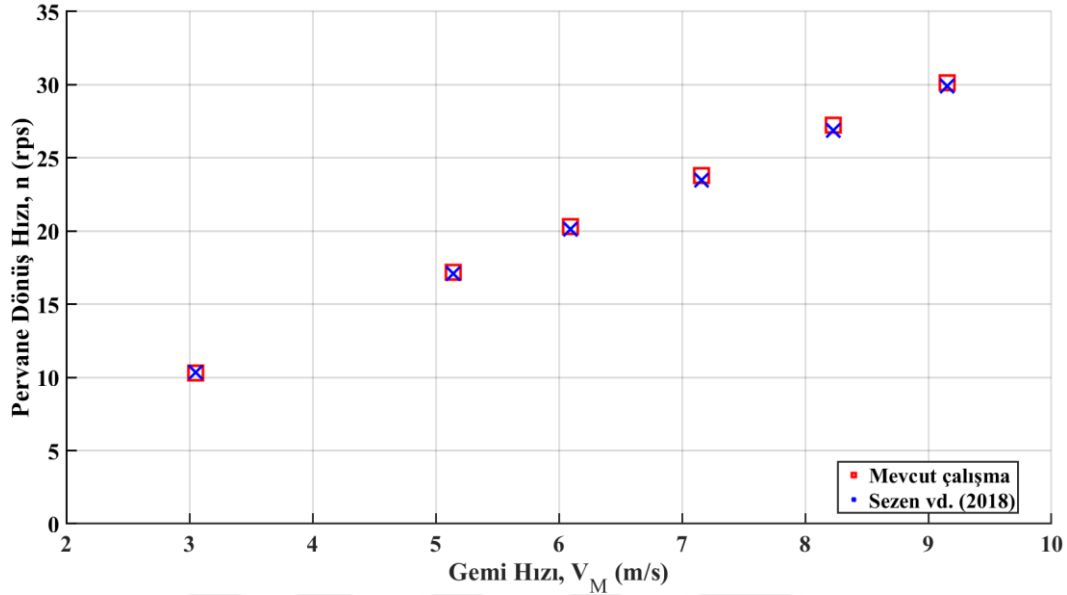
HAD ile hesaplanan pozitif (çekme tankı) ve negatif yöndeki denizaltı direncine ait üretilen ikinci dereceden eğrilerin katsayıları Tablo 4.8’de verilmiştir.

Tablo 4. 8 Farklı yönlerde hesaplanan direnç değerleri için uydurulan ikinci dereceden eğrinin katsayıları

Parametre	Pozitif yöndeki direnç		Negatif yöndeki direnç	
	r_1	r_2	r_1	r_2
Değer	7.1955	8.9932	-6.1685	-10.3847
Eğri denklemi	$8.9932V^2 + 7.1955V$		$(-10.3847)V^2 + (-6.1685)V$	

Kodda girdi olarak kullanılan ve denizaltı ile pervane etkileşiminden ortaya çıkan iz katsayısı (w) ve itme azalması (t) katsayıları belirlenirken kendinden-tahrikli (self-propulsion) analizlerinin gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Deplasman tipi tekneler için IMO (International Maritime Organization) tarafından üretilen değerler kullanılabilirken (IMO, 2017), denizaltılar için ise bu durumda itme azalması ve iz katsayısını hesaplamak için ampirik bağıntılar bulunmamaktadır. Bu parametrelerin belirlenmesi için DARPA Suboff denizaltı modelinin kendinden

tahrikli HAD analizleri gerçekleştirilmiştir. Farklı servis hızlarında hesaplanan sevk noktaları, (Sezen vd., 2018) tarafından yapılan çalışmayla karşılaştırılmış ve Şekil 4.5'te gösterilmiştir.



Şekil 4. 5 Farklı servis hızlarındaki sevk noktalarının karşılaştırılması

Şekil 5.5 incelendiğinde iki çalışma arasındaki sonuçların mükemmel bir uyum gösterdiği gözlemlenmiştir. Sevk analizlerindeki sonuçlara dayanarak itme azalması katsayısı denklem 4.12'ye göre hesaplanabilir;

$$R_T = T(1 - t) \quad (4.12)$$

Burada R_T pervanesiz durumda denizaltı toplam direnci, T kendinden-tahrikli HAD simülasyonlarında pervanenin ürettiği itme kuvvetidir. İtme azalması katsayısı koda girdi olarak kullanılırken 6 farklı servis hızında hesaplanan itme azalması katsayıları için ikinci dereceden üretilen bir eğri ile temsil edilmiştir.

Öte yandan iz katsayısı hesaplanırken direnç analizlerinde pervane düzlemine gelen aksenal akım hızının ortalaması alınmaktadır, bu nominal iz olarak adlandırılmaktadır ve bu işlem negatif yönde çekilen denizaltı direnç simülasyonlarında da gerçekleştirilmiştir. Elde edilen nominal iz katsayıları için itme azalmasında olduğu gibi ikinci dereceden bir eğri uydurularak koda girdi olarak verilmiştir. Nominal iz katsayısı denklem 2.25'e göre hesaplanmıştır. İtme azalması katsayısı için kullanılan eğriler Tablo 4.9'de nominal iz katsayısı için ise Tablo 4.10'de gösterilmiştir.

Tablo 4. 9 İtme azalması katsayısı için uydurulan eğri katsayıları ve denklemi

	İtme azalması		
Parametre	t_0	t_1	t_2
Değer	0.1353	-0.0021	0.0005
Eğri denklemi	$0.0005V^2 - 0.0021V + 0.1353$		

Tablo 4. 10 Nominal iz katsayısı için uydurulan eğri katsayıları ve denklemi

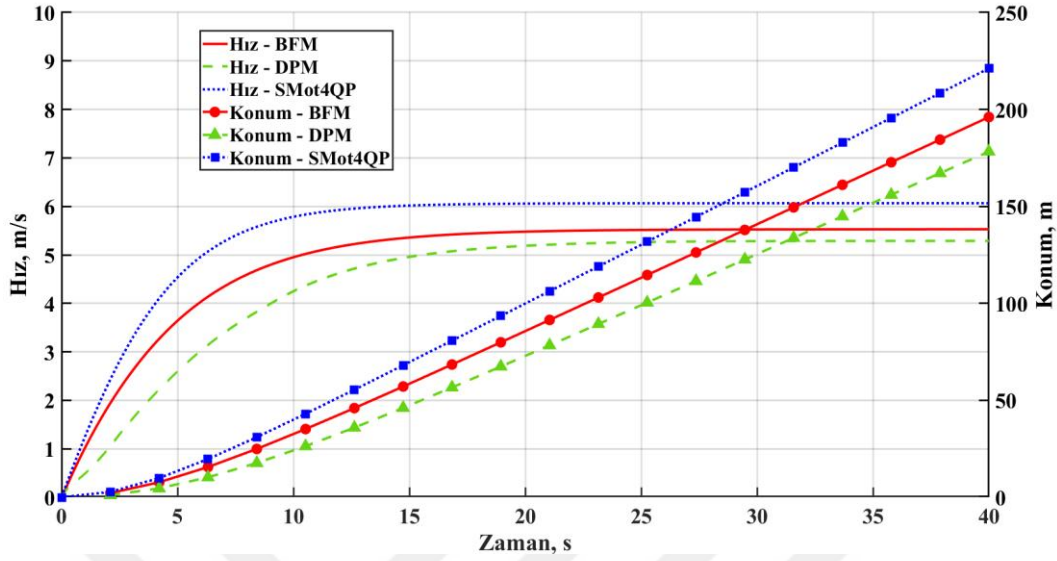
	Nominal İz katsayısı			Nominal iz katsayısı (Negatif direnç)		
Parametre	w_0	w_1	w_2	w_0	w_1	w_2
Değer	0.3931	-0.0137	0.0006	0.0784	-0.0002	1E-05
Eğri denklemi	$0.0006V^2 - 0.0137V + 0.3991$			$(1E - 05)V^2 - 0.0002V + 0.0784$		

Denizaltı başlangıç hızının sıfır olduğu ya da manevra esnasında durma noktasına yaklaşip sıfıra geldiği durumlarda kodda $V = 0$ m/s hızında iz katsayısı ve itme azalması katsayısının sıfır olması için koşul yazılmıştır. Aksi takdirde, kod denizaltı ilerleme hızının sıfır olduğu durumlarda eğri denklemlerinde sabit değer olan üçüncü katsayıyı alacak ve hız ile konum tahmininde yanlış değerlendirme yapacaktır. Bu problem ile karşılaşmamak için direnç eğrileri oluşturulurken Tablo 4.8’de görüldüğü gibi “ $a^2x + bx$ ” şeklinde kullanıcı tanımlı (user defined) bir polinom oluşturulmuştur. Denizaltı ilerleme hızının sıfır olduğu durumlarda direkt olarak toplam direnç değerini de sıfır hesaplamış olacaktır.

4.4.2 Durum #1 – Tam ileri manevrası

İlk manevra senaryosunda DARPA Suboff denizaltı modelinin kendi kendine sevk durumu incelenmektedir. Denizaltı başlangıç durumunda ileri hıza sahip değildir ve pervane saniyede 20 devirle dönmektedir. Bunun sonucunda, denizaltı pervanesinin ürettiği pozitif bir itme kuvveti ile hızlanmaktadır ve 40 saniyelik bir simülasyon süresi içerisinde sabit gemi hızına ulaşmıştır. Bu senaryoda pervane birinci

kuadrantta çalışmaktadır. Şekil 4.6'da zaman alanındaki simülasyon sonuçları gösterilmektedir.



Şekil 4. 6 Tam ileri manevrası için simülasyon sonuçları

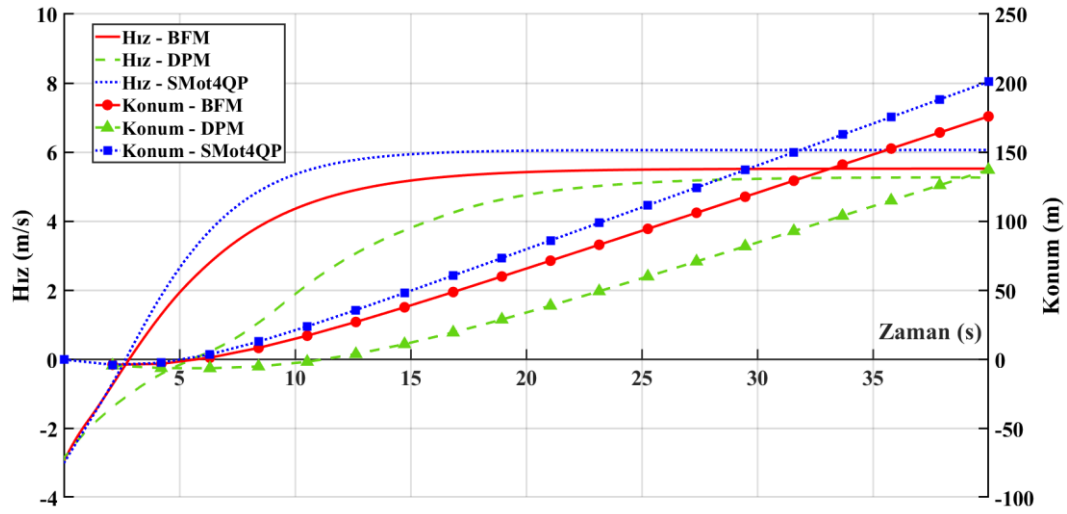
Şekilde açıkça gözlemlendiği gibi, SMot4QP ile elde edilen sonuçlar, BFM ve DPM ile karşılaştırıldığında 40 saniyelik simülasyon sonucunda 6.06 m/s denizaltı hızına ulaşmıştır. Buna karşılık, BFM ve DPM yaklaşımları sırasıyla saniyede 5.53 ve 5.27 metrelik denizaltı hızı tahmininde bulunmuştur. SMot4QP yaklaşımında denizaltı hızı daha yüksek tahmin edildiğinden, denizaltı diğer iki yöntemle kıyasla daha fazla mesafe kat etmiştir.

HAD analizlerinde kullanılan iki sevk modeli değerlendirildiğinde, BFM'in DPM'e kıyasla denizaltının daha yüksek hızda hareket ettiğini öngörmüştür. Benzer bir eğilim (Yu vd., 2022) ve (Aram & Mucha, 2023) tarafından yapılan çalışmada da gözlemlenmiştir. DPM yaklaşımında, gerçek pervane modelinin varlığı nedeniyle pervane kanatlarının uçlarında oluşan girdaplar, üretilen itme kuvvetini ve pervane verimini negatif yönde etkilemiştir. Bu nedenle, BFM yöntemiyle karşılaştırıldığında, DPM yaklaşımında daha az itme kuvveti üretilmiş ve denizaltı daha düşük bir ileri hıza ulaşmıştır.

4.4.3 Durum #2 – Ani kalkış manevrası

İkinci manevra senaryosunda, denizaltı başlangıçta saniyede -3 metre hızla geri yönde hareket etmektedir ve pervane ilk senaryoda olduğu gibi saniyede 20 devirle dönmektedir. Negatif gemi hızı nedeniyle geminin başlangıçta bir miktar geri yönde

hareket etmekte sonrasında pervanenin pozitif itme kuvvetiyle beraber hız arttıkça sıfır hıza ulaşmakta ve ardından pozitif gemi hızına çıkmaktadır. Bu durum ilk senaryodakine benzer, ancak farklı bir başlangıç gemi hızına sahiptir.



Şekil 4.7 Ani kalkış manevrası için simülasyon sonuçları

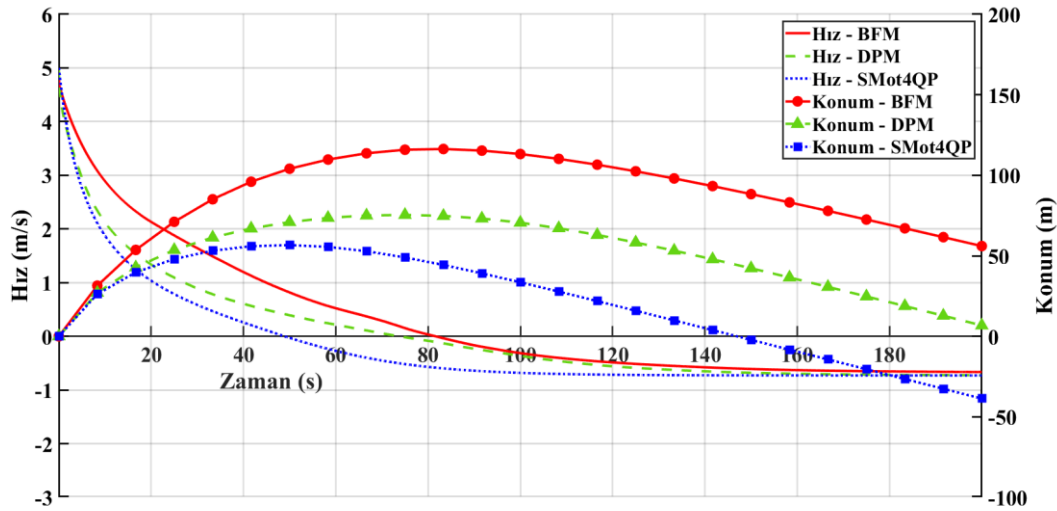
Tam ileri manevra senaryosuna benzer şekilde, simülasyon 40 saniyede sonlanmaktadır. Simülasyon sonuçları Şekil 4.7'de verilmiştir. SMot4QP, BFM ve DPM tarafından tahmin edilen nihai durum hızları ilk senaryoda olduğu gibi sırasıyla saniyede 6.06, 5.53 ve 5.27 metre olarak ölçülmüştür. Pervanenin dönüş hızı her iki durumda da aynı olduğu için, denizaltı her ne kadar negatif bir başlangıç hızına sahip olsa da üretilen itme kuvvetleri aynı olacağından nihai durumda aynı hıza ulaşacaktır.

İki manevra senaryosu arasındaki temel fark, denizaltının hızla ileri manevrası sırasında, SMot4QP ve BFM yaklaşımlarında 5 saniye, DPM yaklaşımında ise 11 saniye boyunca geriye doğru hareket etmesi ve bu süre içinde sırasıyla yaklaşık 4 ve 6 metrelik bir mesafe kat etmesidir. Denizaltın pozitif bir hızı ulaşmadan önce SMot4QP ve BFM simülasyonlarında sıfır hıza ulaşması yaklaşık 3 saniye sürerken, DPM analizlerinde 5.5 saniye kadar sürmektedir.

4.4.4 Durum #3 – Ani durma manevrası

Üçüncü senaryoda, denizaltı başlangıçta 5 metre hızla ileriye doğru hareket etmektedir ancak pervane saniyede 5 devirle ters yönde dönmektedir. Bu senaryoda denizaltı başlangıç hızına sahip olması nedeniyle ileri doğru hareket edecektir;

ancak pervanenin ters dönmesi (tornistan) nedeniyle hızını kaybedecek ve bir süre sonra geri gitmeye başlayacaktır. Sonuçlar Şekil 4.8'de gösterilmiştir.

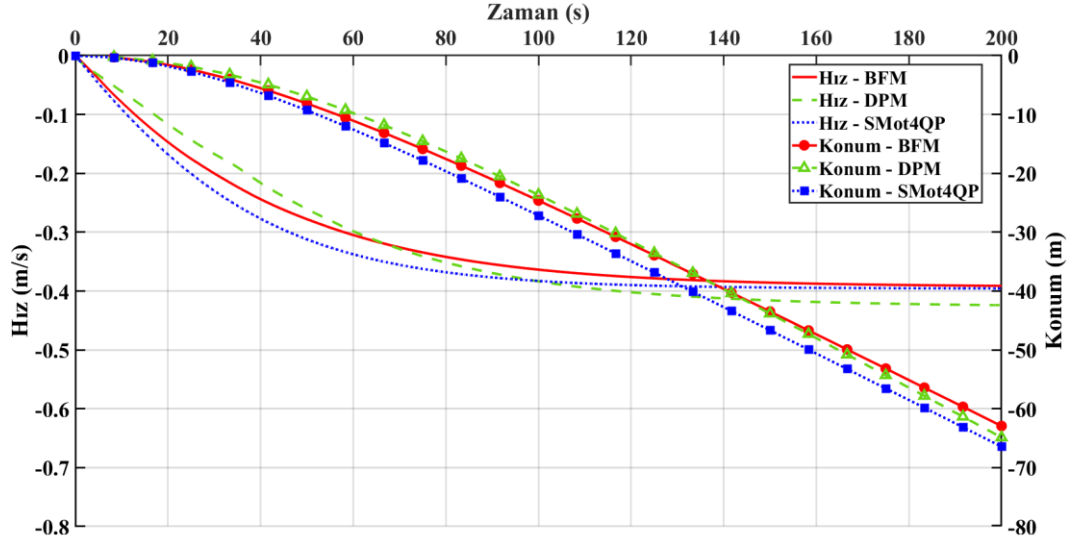


Şekil 4.8 Ani durma manevrası için simülasyon sonuçları

Bu senaryoda pervane sadece üçüncü çeyrekte çalışmamakta, aynı zamanda üçüncü kuadranttan dördüncü kuadranta da geçiş yapmaktadır. Denizaltının hızı kullanılan üç farklı modelle de negatife yöne doğru hareket etmektedir. Birinci ve ikinci senaryolardaki manevraların aksine, denizaltının hızının sabit rejime oturması daha uzun sürmüş ve 200 saniye sonunda yakınsamıştır. SMot4QP ve DPM ile denizaltı saniyede yaklaşık-0,72 metre hıza ulaşırken, BFM ile denizaltı hızı-0,66 m/s olarak tahmin edilmiştir. Geliştirilen kod ile gerçek pervaneli simülasyon sonuçları yüksek uyum göstermiştir. BFM ile arasındaki fark yaklaşık olarak %8 seviyesindedir. Hız tahminleri arasındaki fark makul seviyededir, ancak denizaltı hızı son durumda birbirine yakın olsa da ivmelenme süreçlerinde gözlenen fark nedeniyle son durumda ulaşılan konumlardaki değişimin dikkat çekici seviyede olmaktadır.

4.4.5 Durum #4 – Tam geri manevrası

Dördüncü senaryo, denizaltının başlangıç hızına sahip olmadığı ve hareketsiz olduğu, bununla beraber pervanenin saniyede 3 devir hızıyla ters yönde çalıştığı tam geri manevrası durumunu içermektedir. Başlangıçta durağan olan denizaltı, pervanenin ters dönmesi nedeniyle geriye doğru hareket etmeye başlayacaktır. Simülasyon sonuçları Şekil 4.9'da gösterilmiştir.



Şekil 4. 9 Tam geri manevrası için simülasyon sonuçları

Ani durma manevrasına benzer şekilde, denizaltının sabit hız rejimine oturması 200 saniye sonunda gerçekleşmiştir. Üç farklı yöntemle hesaplanan sonuçlara bakıldığında, SMot4QP kodu ile BFM arasında mükemmel bir uyum göstermiştir ve her iki yöntem de denizaltının saniyede -0.35 metre hızla geri yönde hareketini öngörmüştür. Bununla birlikte, DPM nihai durumdaki denizaltı hızını -0.42 m/s olarak hesaplamıştır. Aradaki fark, %7 civarındadır ve makul bir seviyededir. Son durumdaki konumlar incelendiğinde, üç farklı modelin de öngördüğü nihai konum arasında 2 metrelik bir fark oluşmuştur.

5

HESAPLAMA YÖNTEMİ: DTC KONTEYNER GEMİSİ

5.1 Geometri ve Ana Boyutlar

5.1.1 DTC Konteyner Gemisinin Hidrostatik ve Geometrik Özellikleri

Tez çalışması kapsamında, 1/80 model ölçeğine sahip DTC (Duisburg Test Case) Post-Panamax konteyner gemisi ele alınmıştır. Literatürde DTC gemisinin farklı ölçeklerde gerçekleştirilen deneysel verilerine ulaşılabilmektedir. (1/59.407 model ölçeği için (El Moctar vd., 2012) tarafından SVA Potsdam’da gerçekleştirilen ve 1/100 model ölçeği için (Kinaci vd., 2020) tarafından İTÜ Ata Nutku Gemi Model Deney Laboratuvarı’nda gerçekleştirilen). DTC konteyner gemisinin takıntısız ve takıntılı (dümen ve pervane) içeren iki farklı modeli bulunmaktadır. HAD direnç simülasyonları gerçekleştirilirken takıntısız form kullanılmıştır. Kendinden tahrikli free-running simülasyonlarında ise takıntılı form ele alınmıştır. Şekil 5.1’de takıntılı formdaki DTC model gemisinin üç boyutlu geometrisi gösterilmiştir. Tablo 5.1’de tam ve 1/80 model ölçeğindeki DTC konteyner gemisinin geometrik ve hidrostatik özellikleri verilmiştir.



Şekil 5. 1 DTC konteyner gemisinin genel görünümü

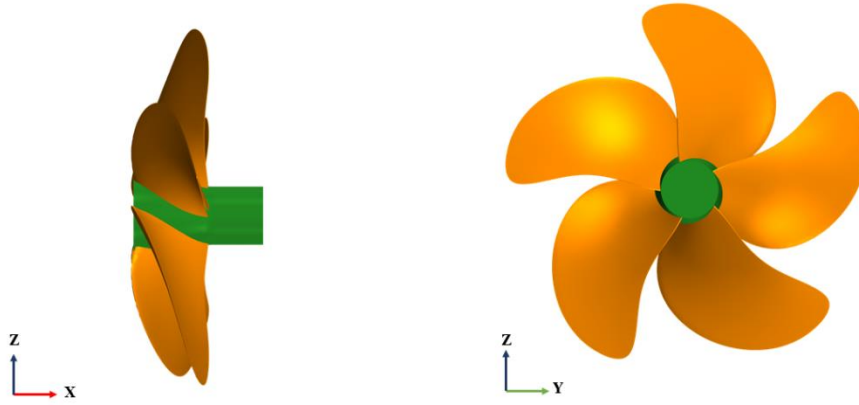
Tablo 5. 1 DTC konteyner gemisinin tam ve model ölçekteki hidrostatik ve geometrik özellikleri

Parametre	Tam Ölçek (1:1)	Model (1:80)
Dikmeler arası boy, L_{BP} (m)	355	4.4375
Genişlik, B (m)	51	0.6375
Su çekimi, T (m)	14.5	0.1813
Deplasman hacmi, ∇ (m ³)	173467	0.3388
Blok katsayısı, C_B	0.661	
Islak yüzey alanı, S (m ²)	22032	3.4425
LCG (m)	174.059	2.1757
k_{xx} , (m)	20.25	0.253
k_{yy} , (m)	88.19	1.102
k_{zz} , (m)	88.49	1.106
Froude sayısı (F_n)	0.218	

5.1.2 DTC Model Pervanesinin Temel Geometrik Özellikleri

Açık-su pervane simülasyonlarında sabit hatveli 5 kanata sahip ve sağa dönüşlü pervane tercih edilmiştir. Ancak 1/80 model ölçeğindeki pervane modelinin açık-su pervane deney sonuçları hakkında yeterli veri bulunmadığı için (El Moctar vd., 2012) tarafından yapılan çalışmada kullanılan ve deney sonuçları bulunan 1/59.407 ölçeğindeki pervane modeli HAD simülasyonlarında kullanılmıştır. Free-running simülasyonlarında ise pervaneli geometri tercih edilmemiştir. Onun yerine sanal (virtual) disk kullanılmıştır. Açık-su HAD simülasyonlarında elde edilen karakteristik eğriler uygun biçimde ölçeklendirilerek oluşturulan bu diske girdi olarak tanımlanmıştır. Şekil 5.2’de profil ve arka görünümünden olmak üzere 1/80

ölçeğindeki model pervanesinin genel görünümü sunulmuştur. Tablo 5.2’de pervaneye ait ana boyutlar ve geometrik özellikler verilmiştir.



Şekil 5. 2 DTC model pervanesinin üç boyutlu genel görünümü

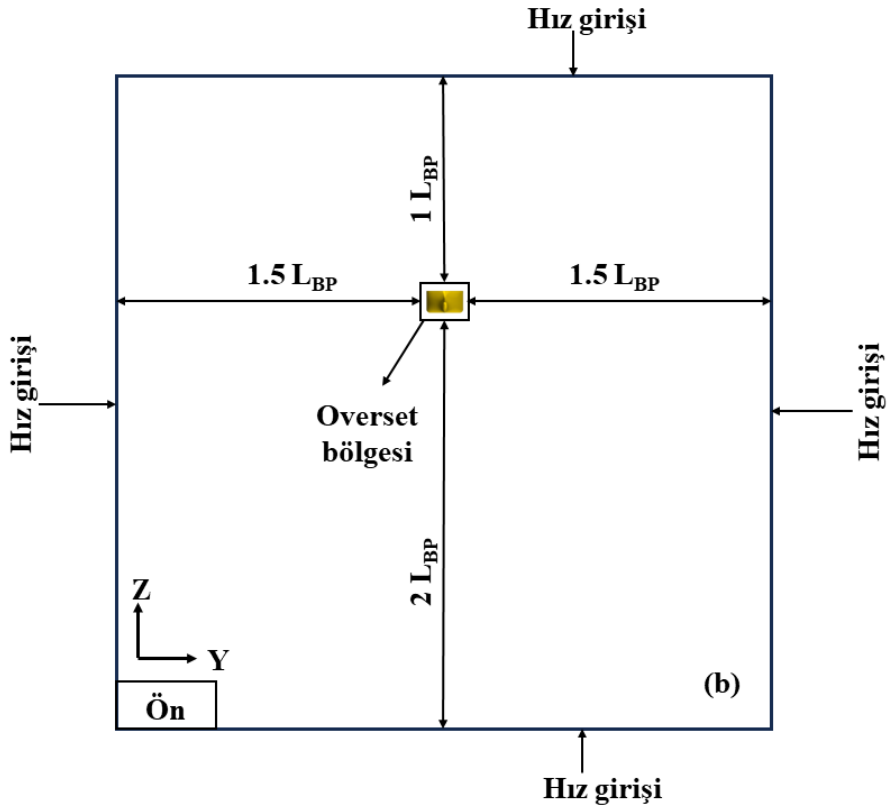
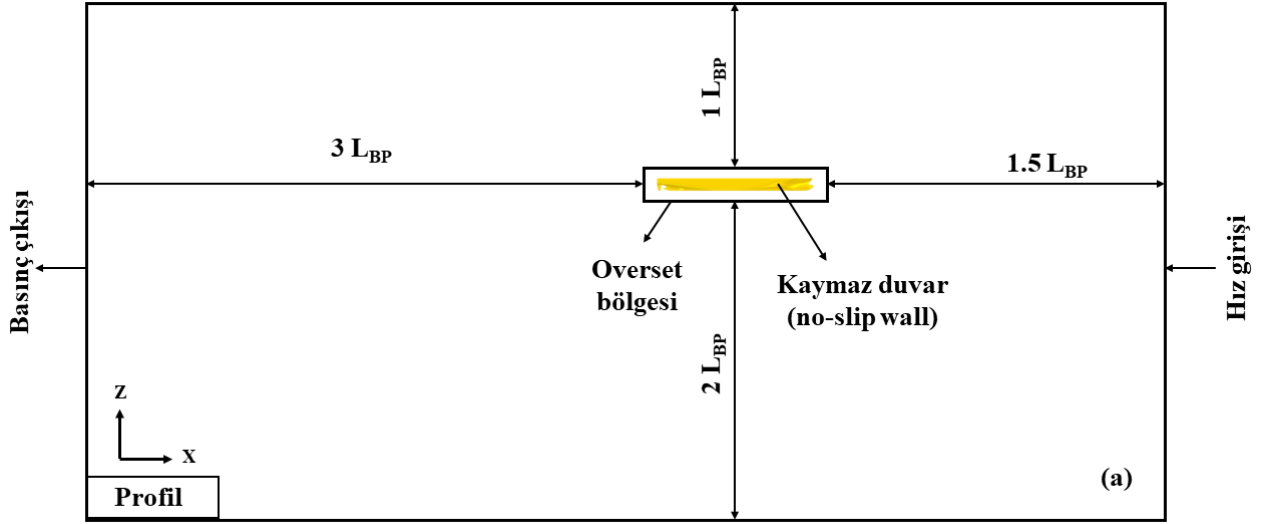
Tablo 5. 2 DTC model pervanesinin geometrik özellikleri

Parametre	Model (1:80)
Pervane çapı, D_P (m)	0.1113
$P_{0.7}/D_P$	0.959
A_E/A_0	0.8
Kord boyu, $c_{0.7}$ (mm)	0.04
D_H/D_P	0.176

5.2 Hesaplama Alanı ve Sınır Koşulları

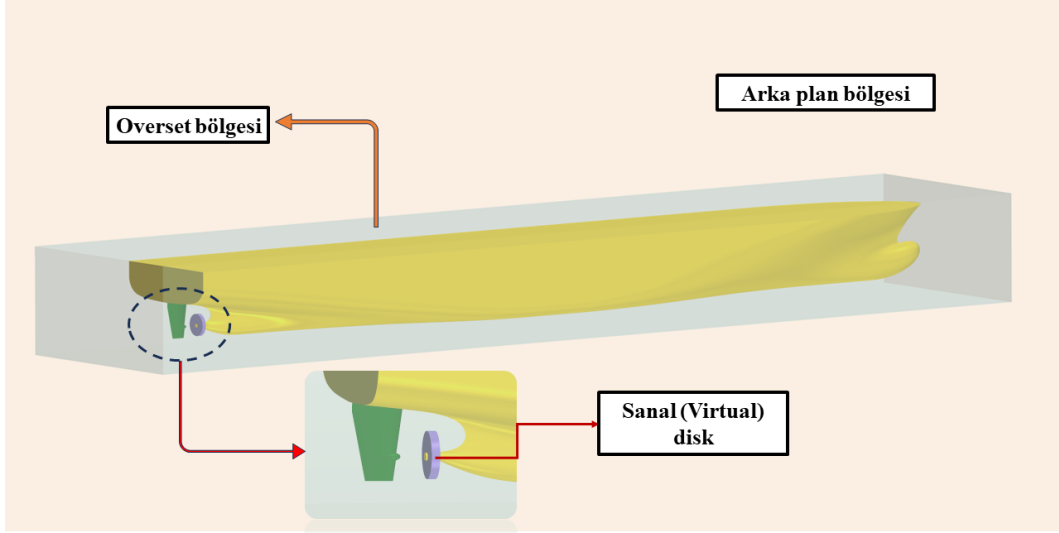
Çözüm alanı özellikleriyle başlanılacak olunursa, DARPA Suboff denizaltı modelinin nümerik kurgusuna benzer olacak şekilde, direnç ile free-running simülasyonlarının gerçekleştirildiği ve açık-su pervane simülasyonlarının analiz edildiği iki farklı hesaplama alanı oluşturulmuştur. (ITTC, 2011), oluşturulan hesaplama alanı sınırlarının gemi yüzeyinden yeterli bir uzaklıkta konumlandırılmasını, sonuçlar üzerindeki etkileri minimize etmek için önemle vurgulamıştır. Bu prosedür göz önünde bulundurularak hesaplama alanı oluşturulmuştur.

Şekil 5.3’de free-running simülasyonlarında kullanılan çözüm alanının şematik gösteriminin profil ve önden olmak üzere genel görünümü verilmiştir. Direnç ve free-running simülasyonlarında aynı ölçülere ve sınır koşullarına sahip hesaplama alanı oluşturulmuştur. Buna ek olarak, free-running simülasyonlarında, DTC konteyner gemisinin, fiziksel hareketini temsil etmek için gemi geometrisinin etrafında overset bölgesi oluşturulmuştur. Gerçek pervane yerine sanal (virtual) disk kullanıldığından pervane için ekstra bir rotating (dönel) bölge oluşturulmamıştır. Sınır koşulları hareketli yüzeyler için, DTC gövdesi ve dümen, kaymaz duvar (no-slip wall) olarak ayarlanmıştır. Hesaplama alanının çıkış ucu basınç çıkışı (pressure outlet) olarak modellenmiştir. Hız girişi (velocity inlet) sınır koşulu; giriş ucu ve hesaplama alanını çevreleyen diğer dört yüzeye (yanlar, üst ve alt) fiziksel etkilerden kaçınmak için uygulanmıştır. Direnç simülasyonlarında, deney koşullarındaki Froude sayısı aralığına göre hız girişi tanımlanmıştır. Ancak free-running simülasyonlarında gemi, sanal (virtual) disk tarafından üretilen itme kuvvetiyle hareket ettiği için, bu yüzeylerden herhangi bir hız girişi tanımlanmamıştır. Yüzeylerden oluşabilecek olası dalga yansımalarını önlemek için hesaplama alanının çıkış ucuna, çift fazlı akış modellemesinde sıklıkla kullanılan VOF (Volume of Fluid) modelinin, akışkan hacmi yöntemi, bir modülü olarak yer alan “wave damping (dalga sönümleyici)” özelliği aktive edilmiştir. Yan yüzeyler için yeterli uzaklık bırakıldığından bu özellik aktif hale getirilmemiştir. Üçüncü bölümde detaylı olarak anlatılan ve DARPA Suboff denizaltı modelinin free-running simülasyonlarında kullanılan hareketli hesaplama alanı yaklaşımı, DTC konteyner gemisi için gerçekleştirilen free-running simülasyonlarında da kullanılmıştır.



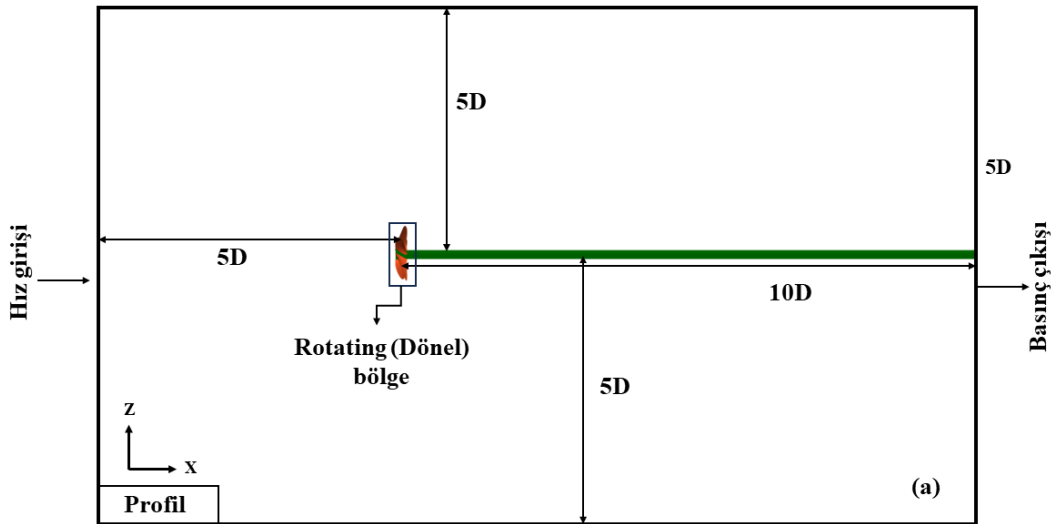
Şekil 5.3 Free-running simülasyonlarında uygulanan hesaplama alanı boyutları ve sınır koşulları: (a) profil görünümü, (b) önden görünümü

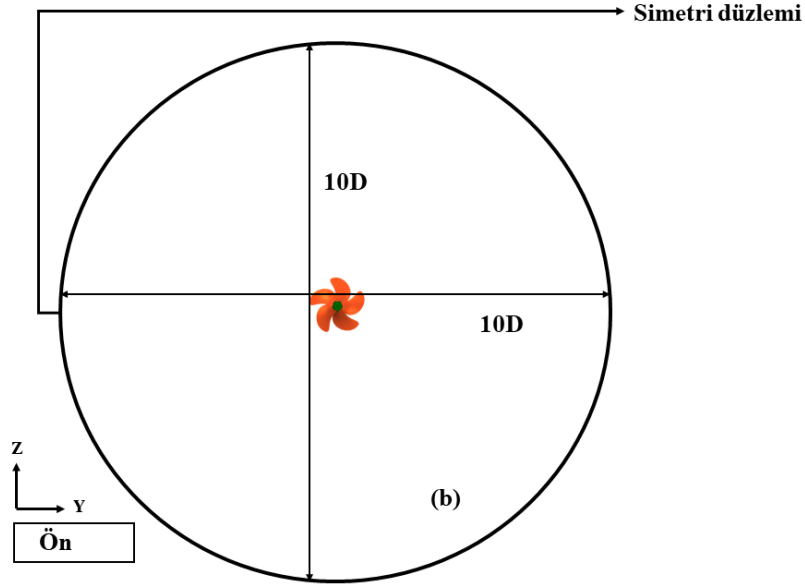
Şekil 5.4'te ise uygulanan overset konfigürasyonunun detaylı görünümü sunulmuştur. Aynı zamanda pervaneyi modellemek için kullanılan sanal (virtual) disk modeli dümen ile birlikte yakın perncereden ayrıntılı olarak gösterilmiştir..



Şekil 5. 4 Free-running simülasyonlarında uygulanan overset konfigürasyonu ve sanal (virtual) disk modelinin detaylı görünümü

Açık-su pervane simülasyonlarda ise Bölüm 3’te INSEAN E1619 pervanesinde uygulanan hesaplama alanı ve sınır koşullarına benzer şekilde çözüm alanı oluşturulmuştur. Şekil 5.5’te oluşturulan hesaplama alanı boutları ve sınır koşulları, profil ve önden görünümünden olacak şekilde şematik görüntüsü verilmiştir. Pervane kanatları ve şaft yüzeyi kaymaz duvar (non-slip wall) olarak modellenirken, hesaplama alanının sağ tarafına hız girişi, sol tarafına basınç çıkışı ve çevreleyen diğer yüzeye de simetri sınır koşulu uygulanmıştır.



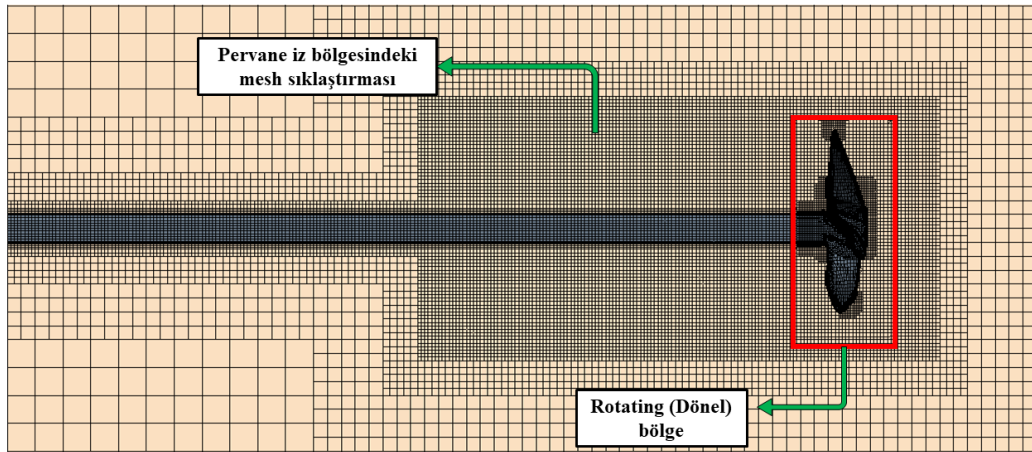


Şekil 5.5 Açık-su pervane simülasyonlarında uygulanan hesaplama alanı boyutları ve sınır koşulları: (a) profil görünümü, (b) önden görünümü

5.3 Çözüm ağı yapısı

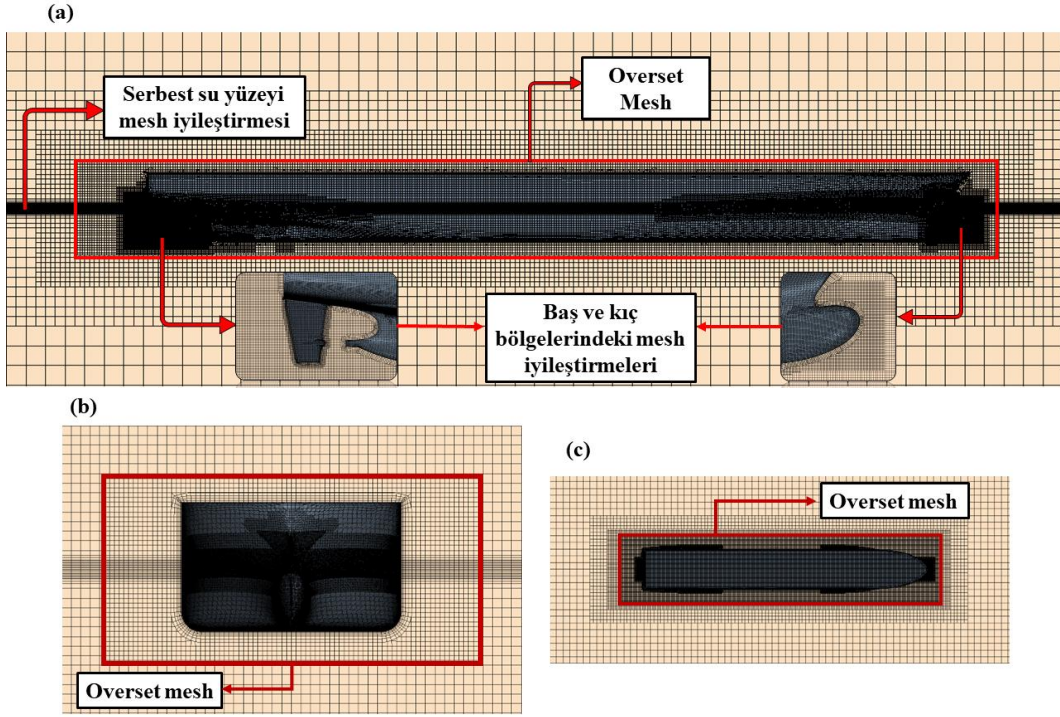
Bölüm 3.3'te DARPA Suboff denizaltı modeli için uygulanan çözüm ağı yapısındaki benzer metodoloji, DTC konteyner gemisi için benzer şekilde uygulanmıştır. Ancak, önemli bir fark vurgulanmalıdır: DARPA Suboff denizaltısı tamamen batmış olarak ele alınmış ve tek fazlı bir model üzerinde yoğunlaşmıştır. Dolayısıyla, çözüm ağında serbest su yüzeyi için ek bir iyileştirme yapılmamıştır. Diğer yandan, DTC konteyner gemisinin doğası gereği çift fazlı bir akışı (hava ve su) modellemek zorunludur. Bu da serbest su yüzeyi için daha sık bir ağ yapısının kullanılmasını gerektirmektedir. Çünkü serbest su yüzeyi, iki farklı akışkan arasındaki geçiş bölgesidir ve bu bölgede yoğunluk farkı oldukça yüksektir (yaklaşık 1000 kat). Bununla birlikte, serbest su yüzeyinin varlığıyla beraber sürtünme ve viskoz basınç direnci bileşenine ek olarak dalga direnci de oluşacaktır. Bu bileşenin doğru hesaplanabilmesi için serbest su yüzeyinin düzgün modellenmesi büyük önem arz etmektedir. Bu sebepler dikkate alındığında, iki faz arasındaki geçişin doğru yakalanması ve çözüm ağı hücreleri arasındaki akış alanı bilgilerinin transferinin doğru modellenmesi için bu bölgeye tüm hesaplama alanını kapsayacak şekilde geminin yüzme su hattının bir miktar üstüne ve altına çıkacak dikdörtgenler prizması şeklinde bir iyileştirme alanı oluşturulmuştur. Bu alan için daha sık bir çözüm ağı tercih edilmiştir.

Açık-su pervane simülasyonlarında kullanılan ağ yapısı Şekil 5.6’de gösterilmiştir. Pervane kanatları etrafında ve pervanenin iz bölgesinde daha yoğun ağ yapısı kullanılmıştır. Arka plan ile dönme hareketinin sağlandığı bölge arasındaki "interface" olarak tanımlanan geçiş noktası kırmızı renkle belirtilmiştir. Bu geçiş noktasındaki ağ yapısı boyutu, her iki bölgede de aynı şekilde tanımlanmıştır. Böylece, iki bölge arasındaki akış alanına ait veri aktarımı daha doğru bir şekilde gerçekleşecektir. Aksi takdirde, bu geçişin düzgün modellenmemesi analiz sonuçlarını negatif olarak etkileyecektir.



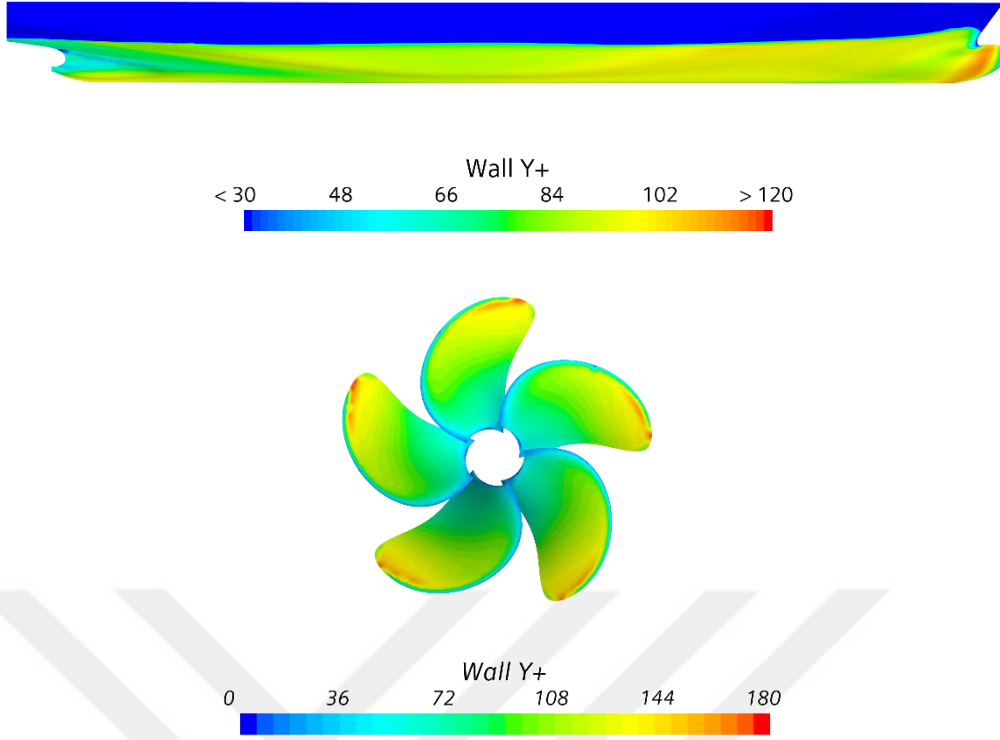
Şekil 5. 6 Açık-su pervane simülasyonlarında kullanılan çözüm ağı yapısı

Şekil 5.7’de free-running simülasyonlarında kullanılan çözüm ağı yapısı ayrıntılı olarak gösterilmiştir. Hız ve basınç gradyanlarının yüksek olduğu baş ve kık bölgelerinde daha iyi çözüm elde etmek için yoğun ağ yapısı kullanılmıştır ve detaylı olarak sunulmuştur. Free-running simülasyonları sanal (virtual) disk kullanılarak gerçekleştirildiğinden gerçek pervane modeli kullanılmamıştır. Bu sebeple pervane düzleminde ekstra sık ağ yapısı kullanılmamış ve toplam çözüm ağı sayısındaki düşüşle beraber hesaplama yükü azalmıştır. Overset çözüm ağı yapısı ve sınır tabakanın modellenmesinde izlenen yol, Bölüm 3.3’te uygulandığı gibi gerçekleştirilmiştir. DTC konteyner gemisi ve model pervanesi kanatları üzerindeki wall y+ dağılımı Şekil 5.8’de gösterilmiştir.



Şekil 5. 7 Free-running simülasyonlarında kullanılan overset çözüm ağı yapısı: a) profil görünümü, b) önden görünüm, c) üstten görünüm

Şekilde görülen ağ yapısı, direnç simülasyonlarında kullanılan ağ yapısı ile aynıdır. Ek olarak, sadece overset mesh bölgesi modellenmiştir ve dümen etrafına bir kademe daha sık çözüm ağı eklenmiştir.



Şekil 5. 8 $F_n = 0.238$ ve $J = 0.3$ için DTC konteyner gemisi ve model pervanesi üzerindeki wall y^+ dağılımı

5.4 Çözüm Stratejisi

DTC konteyner gemisinin HAD simülasyonlarında kullanılan URANS denklemleri, Bölüm 3.4'te DARPA Suboff denizaltı modelinin analizlerinde olduğu gibi ticari bir HAD yazılımı olan Siemens STAR-CCM+ ile sonlu hacimler yöntemini kullanarak ayrıklaştırılmış ve çözülmüştür. Gerçeklenebilir (Realizable) $k - \varepsilon$ türbülans modeli, gemi etrafındaki viskoz akışı modellemek için seçilmiştir.

VOF (Volume of Fluid) yöntemi, DTC konteyner gemisinin direnç ve free-running simülasyonlarındaki çift fazlı akışı modellerken serbest su yüzeyindeki deformasyonları takip etmek için uygulanmıştır. Serbest su yüzeyinin doğru temsil edilmesi ve geminin hareketiyle beraber baş ve kış omuzluk bölgelerinde oluşan Kelvin dalgalarının (19.47° ile) hesaplama alanının sınırlarından yansımalarının engellenmesi önemlidir. Bu nedenle, Bölüm 5.2'de anlatılan VOF yönteminin "wave damping" modülü, çözüm alanı sınırlarında meydana gelecek dalga yansımalarının sönmülmesi için aktif edilmiştir. Akışkanlar arasında keskin bir arayüz (interface) oluşturmak için HRIC (High Resolution Interface Capturing)

şeması kullanılmıştır. Ayrıca zaman adımı seçimine ve bölüm 5.3'te de bahsedildiği gibi serbest su yüzeyi etrafındaki ağ yapısına dikkat edilmiştir.

Direnç simülasyonlarında DTC konteyner gemisinin hareketlerini modellemek için Bölüm 5.4'te detaylı olarak anlatılan DFBI modülü, geminin 2 serbestlik dereceli (dalıp-çıkma ve baş-kıç vurma) hareketi için aktive edilmiştir. Böylece analiz esnasında oluşan trim ve paralel batma (sinkage) değerleri de elde edilmiştir.

Öte yandan, free-running simülasyonlarında DTC konteyner gemisi, yanal öteleme (sway) ile savrulma (yaw) hareketlerine sınırlandırılmış ve dört serbestlik dereceli (ileri öteleme, dalıp-çıkma, baş-kıç vurma ve yalpa) hareketi DFBI modülünde aktif hale getirilmiştir. Bunun nedeni, DTC konteyner gemisinin dümen ve pervanesinden dolayı meydana gelen asimetric yanal kuvvetlerin, doğrusal rota kabiliyetini (course-keeping ability) olumsuz etkileyerek düz bir rotada seyretmesini engellemesidir (Kinaci & Ozturk, 2022). Geminin doğrusal rotada seyretmesini sağlamak için iki farklı yol izlenebilir: birincisi, dümen etrafına overset bölgesi oluşturulup bir kontrolcü tanımlanarak düz bir rotada seyretmesini sağlayacak uygun dümen açıları verilebilir. İkinci yol ise, yanal öteleme ve savrulma hareketi DFBI modülünde sınırlandırılır. Simülasyonlar yukarıda da bahsedildiği gibi ikinci yol izlenerek, y eksenindeki yanal öteleme hareketi ve z eksenini etrafındaki savrulma hareketi aktif hale getirilmemiştir. Böylece, gemi doğrusal bir rotada seyrini sürdürmüştür.

Açık-su pervane simülasyonları, INSEAN E1619 pervanesinde olduğu gibi Hareketli Referans Sistemi (Moving Reference Frame, MRF) yaklaşımı kullanılarak pervane için dönme hareketi sağlanmıştır. Free-running simülasyonlarında pervane modelini temsil etmek için BFM (Body Force Method) yöntemi uyarlanmıştır. Pervane geometrisi, sanal (virtual) disk ile modellenerek, geminin hareketi için gerekli olan itme kuvveti üretilmiştir.

Direnç ve free-running simülasyonları zamana bağlı olarak gerçekleştirilmiştir. Zaman adımı belirlenirken, (ITTC, 2011) prosedürleri göz önünde bulundurularak, $0.005 \sim 0.01 L/U$ formülasyonuna göre belirlenmiştir. Burada, L gemi karakteristik boyu, U ise gemi servis hızıdır. Açık-su pervane simülasyonları ise, hareketli referans sistemi yaklaşımının sunduğu zamandan bağımsız çözüm ile gerçekleştirilmiştir ve böylece hesaplama süresi büyük ölçüde azalmıştır.

Bölüm 3.4'te detaylı olarak açıklanan hareketli arka plan yaklaşımı, hesaplama süresi ve çözüm ağı sayısı bakımından sağladığı avantajlar göz önünde bulundurularak, DTC konteyner gemisinin free-running simülasyonlarına da entegre edilmiştir.



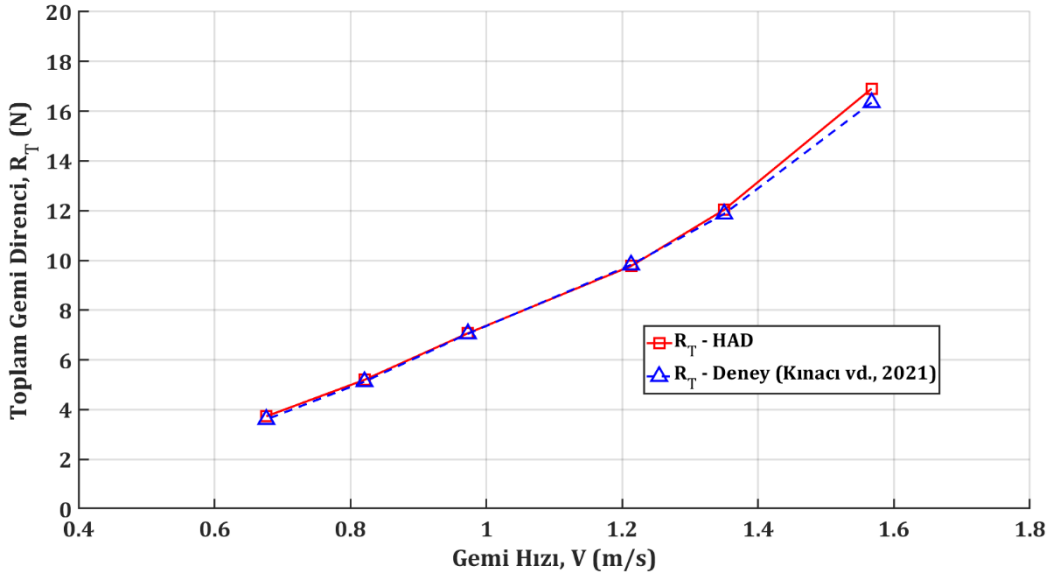
SONUÇLAR: DTC KONTEYNER GEMİSİ

Bu bölüm, ilk olarak DTC konteyner gemisinin gemi direnci ve açık-su pervane simülasyonları için kullanılan sayısal yaklaşımın, deneysel verilerle doğrulanmasını sunarak başlamaktadır. Ardından, geliştirilen SMot4QP kodu için temel oluşturan FQP (Four Quadrant Propeller) sonuçları, tam ileri, ani kalkış, ani durma ve tam geri manevralarını içeren dört farklı senaryoda gösterilmiştir. Son kısımda, DTC konteyner gemisinin free-running HAD simülasyonları üç farklı pervane dönüş hızında deney sonuçları ile karşılaştırılmış ve doğrulanmıştır. Ardından, BFM yaklaşımı ve dört kuadrantlı pervane performansına dayalı SMot4QP kodu kullanılarak, manevra senaryolarına uygun gemi başlangıç hızı ve pervane dönüş hızı belirlenmiş ve free-running simülasyonları gerçekleştirilmiştir.

6.1 DTC Konteyner Gemisi Direnç Testleri

6.1.1 Doğrulama çalışması

Direnç simülasyonlarında kullanılan sayısal yaklaşımı doğrulamak için 1/80 model ölçeğindeki DTC konteyner gemisinin, (Kinaci vd., 2021) tarafından İTÜ Ata Nutku Gemi Model Test Laboratuvarı'nda gerçekleştirilen çekme tankı deneylerinde ölçülen verilerle, hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) simülasyonlarında elde ettiğimiz sonuçlar karşılaştırılmıştır. Deney esnasında gemi iki serbestlik derecesine (2DOF) sahip olup, model gemi baş-kıç vurma ve dalıp-çıkma hareketleri için serbest bırakılmıştır ve bu durum simülasyon kurgulanırken göz önünde bulundurulmuştur. Altı farklı servis hızında HAD simülasyonları gerçekleştirilmiş ve toplam gemi direnci değerleri elde edilmiştir. Şekil 6.1'de HAD simülasyonları ve çekme tankı deneyleri sonucunda elde edilen toplam gemi direnci değerleri gösterilmiştir.



Şekil 6. 1 HAD ile hesaplanan DTC konteyner gemisi toplam direncinin deney sonuçları ile karşılaştırılması

Şekil 6.1 incelendiğinde, en yüksek servis hızı için deney verisi ile sayısal sonucun arasında küçük farklılık gözlemlense de, tüm servis hızları göz önünde bulundurulduğunda sonuçların yüksek uyum gösterdiğini gözlemlenmiştir.

6.1.2 Belirsizlik analizi

Bölüm 4.1.2’de literatürde (Celik vd., 2008) tarafından verilen prosedür detaylı olarak anlatılmıştır. Bu göz önünde bulundurularak, bu bölümde belirsizlik analizi yapılırken, çözüm parametresi $V = 1.35$ m/s hızındaki toplam gemi direnci olarak belirlenmiştir. Sayısal çalışmanın DTC konteyner gemisi modeli için hesaplanan belirsizlik indeksi Tablo 6.1’de verilmiştir.

Tablo 6. 1 DTC konteyner gemisi toplam direnci açısından belirsizlik analizi sonuçları

Parametre	Toplam Gemi Direnci
N_1, N_2, N_3	4640706, 2132282, 1103877
r_{21}, r_{32}	1.296, 1.245
$\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$	12.038, 12.132, 12.288
$\varepsilon_{21}, \varepsilon_{32}$	0.0934, 0.156
R	0.6
q	0.2094
p	2.4324

Tablo 6. 1 DTC konteyner gemisi toplam direnci açısından belirsizlik analizi sonuçları (devamı)

φ_{ext}^{21}	11.932
e_a^{21}	0.007758
e_{ext}^{21}	0.008909
GCI_{FINE}^{21}	0.011037
GCI_{FINE}^{21} (%)	1.1037

Tablo 6.1'deki sonuçlara göre, R değeri Bölüm 4.1.2'de bahsedilen ikinci koşulu sağlamakta ve monoton olarak yakınsamaktadır. Ayrıca, belirsizlik yaklaşık %1.1 olarak hesaplanmıştır. Belirsizlik analizin yanı sıra, çözüm ağından bağımsızlık çalışması da (mesh dependency study) gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar Tablo 6.2'de gösterilmiştir.

Tablo 6. 2 Çözüm ağından bağımsızlık çalışması sonuçları

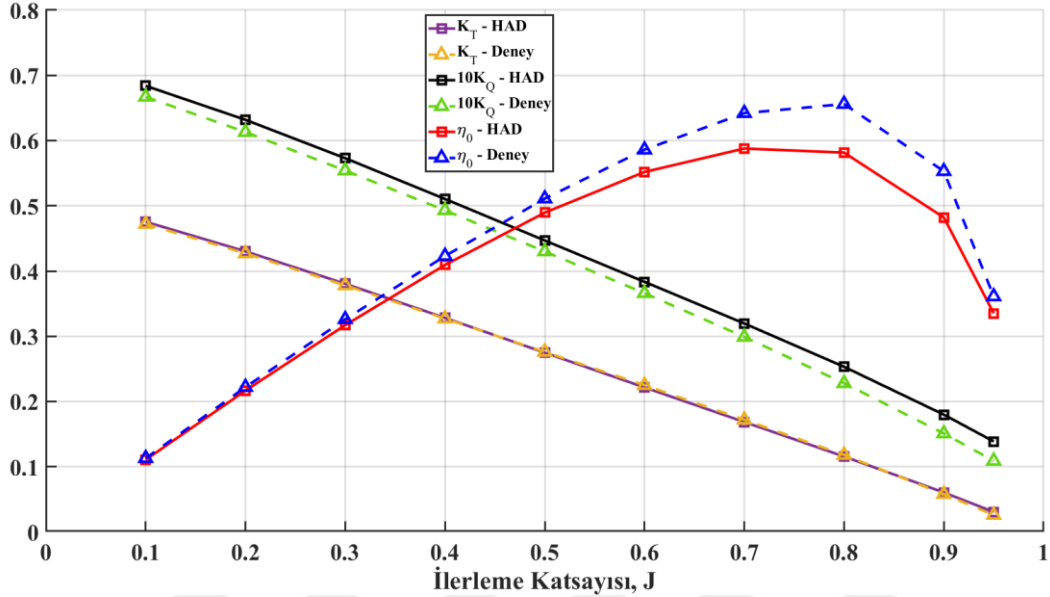
	Deney	Çözüm ağı 1	Çözüm ağı 2	Çözüm ağı 3
Çözüm ağı sayısı	-	1103877	2132282	4640706
C_T ($\times 10^{-3}$)	3.787	3.921	3.871	3.841
Bağıl hata	-	%3.52	%2.21	%1.42

Tablo 6.1 ve 6.2'deki sonuçlar incelendiğinde, direnç ve free-running simülasyonlarında kullanılmak üzere en sık çözüm ağı yapısı seçilmiştir.

6.2 Açık-su Pervane Testleri

DTC konteyner gemisi pervanesinin 1/80 model ölçeğinde gerçekleştirilen açık-su pervane deney sonuçları için yeterli veri bulunmaması nedeniyle, literatürde 1/59.407 ölçeğindeki model pervanesi için (El Moctar vd., 2012) tarafından gerçekleştirilen açık-su pervane deneylerinden elde edilen K_T , $10K_Q$ ve η_0 verileri, HAD simülasyonları sonucu elde edilen değerlerle karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma sonuçları, Şekil 6.2'de detaylı bir şekilde gösterilmiştir. İtme katsayısı, tüm ilerleme katsayılarında deneysel verilerle mükemmel bir uyum içindedir. Öte yandan, tork katsayısı tüm ilerleme katsayılarında yaklaşık %2

seviyesinde küçük bir farklılık göstermekte ancak bu göz ardı edilebilecek derecededir. Dolayısıyla, sonuçlar genel olarak iyi bir uyum göstermektedir. Açık su pervane verimliliği açısından, sonuçlar $J > 0.6$ olduğunda dikkate değer bir farklılık gözlemlenmiştir, ancak genel trende bakıldığında deney sonuçlarıyla uyum içerisinde olduğu gözlemlenmektedir.



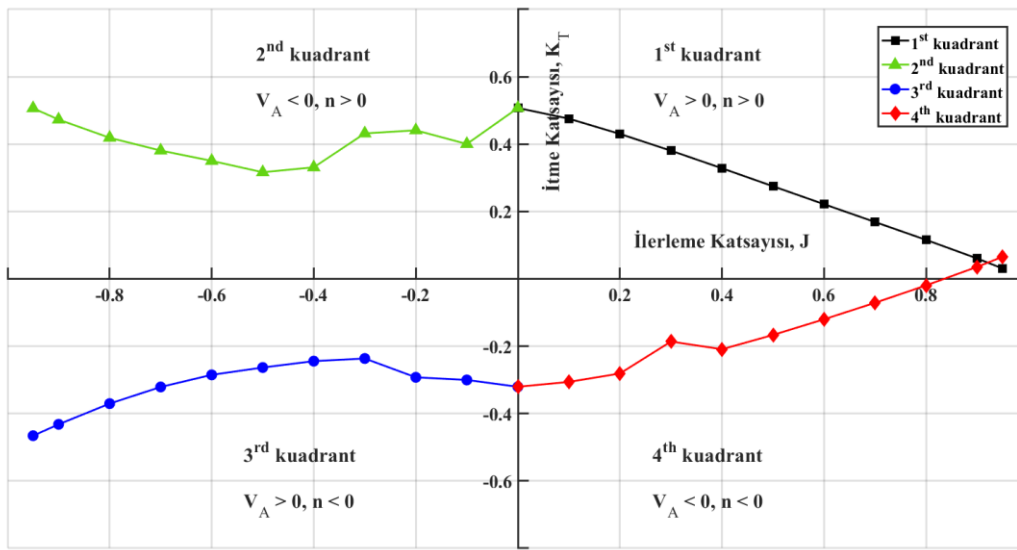
Şekil 6. 2 DTC konteyner gemisi model pervanesi HAD simülasyon sonuçlarının deneysel verilerle karşılaştırılması

6.3 FQP (Four Quadrant Propeller) Performans Eğrileri

Bu bölümde, DTC konteyner gemisine ait FQP performans eğrileri, Bölüm 4.3'te DARPA Suboff denizaltı modelinin free-running simülasyonlarında kullanılan INSEAN E1619 model pervanesinde izlenen yola benzer şekilde elde edilmiştir. Bölüm 4.3'te, pervanenin farklı kuadrantlarda çalışırken, gemi ileri hızı ve pervane dönüş yönü için hangi durumların sağlanması gerektiği detaylı olarak anlatılmıştır ve bu bölümde tekrar üzerinden geçilmemiştir. DTC konteyner gemisinde kullanılan model pervanesinin FQP performans eğrileri çıkartılmış, Tablo 6.3' de bu bilgiler özetlenmiştir ve Şekil 6.3'te grafik üzerinde görselleştirilmiştir.

Tablo 6. 3 DTC model pervanesi FQP performansı için eğriye uydurulmuş itme katsayıları

1 st kuadrant	Tam ileri	$V_A > 0$	$n > 0$	$K_{T_1} = -0.082J^2 - 0.433J + 0.5146$
2 nd kuadrant	Ani kalkış	$V_A < 0$	$n > 0$	$K_{T_2} = 0.6868J^2 + 0.6591J + 0.5065$
3 rd kuadrant	Ani durma	$V_A > 0$	$n < 0$	$K_{T_3} = -0.624J^2 - 0.4523J - 0.3322$
4 th kuadrant	Tam geri	$V_A < 0$	$n < 0$	$K_{T_4} = 0.1676J^2 - 0.2452J - 0.3322$

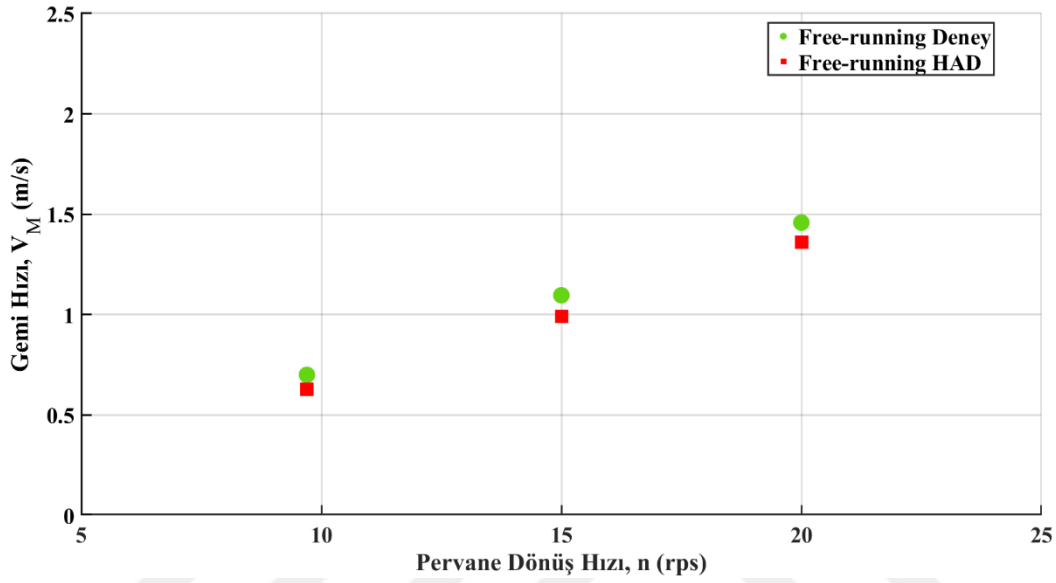


Şekil 6. 3 DTC konteyner gemisi model pervanesinin FQP performans eğrileri

6.4 Free-running Testleri

Bu bölüm, ilk olarak 1/80 model ölçeğindeki DTC konteyner gemisinin free-running simülasyonlarında kullanılan sayısal yaklaşımın doğrulanmasıyla başlamaktadır. Tam ileri hareket durumunda kendinden tahrikli (straight-ahead self propulsion) gemi modeli için kullanılan sayısal yaklaşım, (Kinaci vd., 2021) tarafından gerçekleştirilen free-running model deneylerinde elde edilen verilerle doğrulanmıştır. HAD simülasyonlarında gemi modeli dört serbestlik derecesine (4DOF) sahiptir. Yanal öteleme ve savrulma hareketleri simülasyonlar sırasında aktif hale getirilmemiştir. Böylece, gemi doğrusal rotasından sapmadan ileri öteleme hareketini yapabilecektir. Free-running HAD simülasyonlarının sonuçları, üç farklı pervane dönüş hızında elde edilen gemi hızının deney sonuçları ile doğrulanmıştır. Free-running HAD simülasyonlarında sevk modeli olarak BFM

(Body Force Method) tercih edilmiştir. BFM, pervanenin direkt modellendiği DPM ile karşılaştırıldığında yakın sonuçlar vermesi (bkz. DARPA Suboff denizaltı free-running simülasyonları, Bölüm 4.4) ve daha kısa hesaplama süresi de göz önünde bulundurulduğunda, DTC konteyner gemisinin free-running simülasyonlarında kullanılmıştır. Şekil 6.4'te pervane dönüş hızına göre ulaşılan model gemi hızı verilmiştir.



Şekil 6. 4 Pervane dönüş hızına karşılık gelen model gemi hızlarının karşılaştırılması

Şekil 6.4'teki sonuçlar incelendiğinde, free-running HAD simülasyonları ile tahmin edilen nihai gemi hızlarının deneysel veriler ile oldukça yakın olduğu görülmektedir.

Free-running simülasyonlarında kullanılan sayısal yaklaşımın deneysel verilerle doğrulanmasının ardından, Bölüm 4.4'te olduğu gibi, DTC konteyner gemisi için dört farklı manevra durumu belirlenmiştir. Bu durumların her biri için, dört çeyrek pervane performansına sahip gemi hareket kodumuzu (SMot4QP) kullanarak ve free-running HAD simülasyonları gerçekleştirerek zaman alanında geminin hızı ve konumu simüle edilmiştir. Başlangıç gemi hızı ve pervane dönüş hızı ile ilgili simülasyon senaryoları Tablo 6.4'de listelenmiştir.

Tablo 6. 4 Simülasyon senaryoları ve ilgili manevra tipi

Parametreler	Birim	Durum #1	Durum #2	Durum #3	Durum #4
Başlangıç hızı	m/s	0	-0.6	0.5	0
Pervane dönüş hızı	rps	20	20	-8	-6
İlgili pervane kuadrantı		1	2	3	4
Gemi manevra tipi		Tam ileri	Ani kalkış	Ani durma	Tam geri

6.4.1 SMot4QP kodu hesaplamaları için gerekli girdi parametreleri

Tam ileri manevra durumunda hareket eden bir gemide SMot4QP kodu için gerekli olan ana girdi parametrelerinden biri toplam direnç değeridir. Bunun yanı sıra, ani kalkış, ani durma ve tam geri manevra durumlarında negatif yönde çekilen bir geminin toplam direnç değerlerine ihtiyaç duyulduğu göz önünde bulundurulmalıdır. Bu durum, Bölüm 4.4.1’de detaylı olarak anlatılmıştır. Negatif yönde çekilen DTC konteyner gemisinin HAD simülasyonları sonucu elde edilen toplam direnç değerleri Tablo 6.5’te verilmiştir.

Tablo 6. 5 Negatif yönde hesaplanan toplam gemi direnci

Hız (m/s)	R_T (N)
0.57	-2.8719
0.7632	-5.0308
0.9193	-6.4275
1.061	-8.2875
1.35	-13.2564
1.567	-18.0442

HAD simülasyonları sonucu elde edilen pozitif (çekme tankı) ve negatif yöndeki gemi toplam direnç değerlerinin SMot4QP koduna girdi parametresi olarak

verilmesi için DARPA Suboff denizaltı modelinin hesaplamalarında kullanıldığı gibi ikinci dereceden bir eğri üretilmiştir. Bu eğriye ait katsayılar Tablo 6.6’te verilmiştir.

Tablo 6. 6 Farklı yönlerde hesaplanan direnç değerleri için uydurulan ikinci dereceden eğrinin katsayıları

	Pozitif yöndeki direnç		Negatif yöndeki direnç	
Parametre	r_1	r_2	r_1	r_2
Değer	1.6888	5.4866	-1.1208	-6.547
Eğri denklemi	$5.4866V^2 + 1.6888V$		$(-6.547)V^2 + (-1.1208)V$	

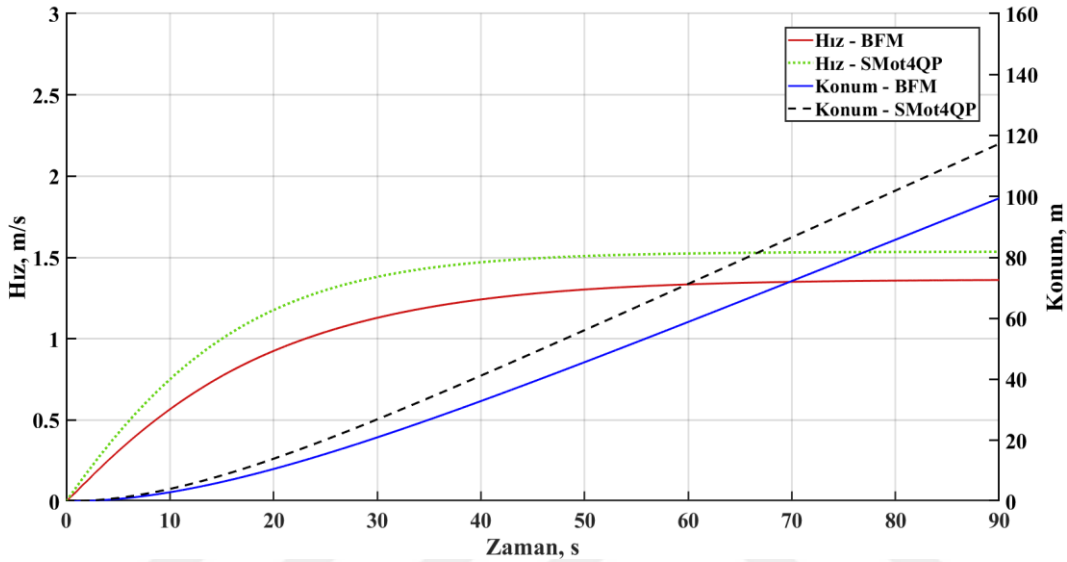
SMot4QP kodu için gereken diğer önemli parametrelerden ikisi, itme azalması katsayısı ve iz katsayısıdır. Bu katsayılar, Bölüm 4.4.1’de detaylandırılırken gemi servis hızının bir fonksiyonu olarak koda tanımlanmıştır. Bununla birlikte, literatürde 1/59.407 model ölçeğindeki DTC konteyner gemisi için gerçekleştirilen direnç ve sevk deneylerinde elde edilen iz katsayısı ve itme azalması katsayısı kodun girdi parametreleri olarak verilmiştir (El Moctar vd., 2012). Smot4QP kodunun dayandığı matematik gereği girdi parametresi olarak nominal iz katsayısı ya da efektif (Taylor) iz katsayısı kullanılabilir. Efektif (Taylor) iz katsayısı kullanılması, gemi-pervane etkileşiminin göz önünde bulundurulmasını sağlar ve tahmin sonuçlarını daha gerçekçi bir temele oturtur. Bu çalışmada, referans deneysel çalışma sonuçları arasında sunulmuş olan efektif iz katsayısı kullanılmıştır. Kullanılan bu parametreler Tablo 6.7’de verilmiştir.

Tablo 6. 7 SMot4QP için sevk parametreleri

	Efektif (Taylor) iz katsayısı	İtme azalması katsayısı
Parametre	w	t
Değer	0.275	0.09

6.4.2 Durum #1 – Tam ileri manevrası

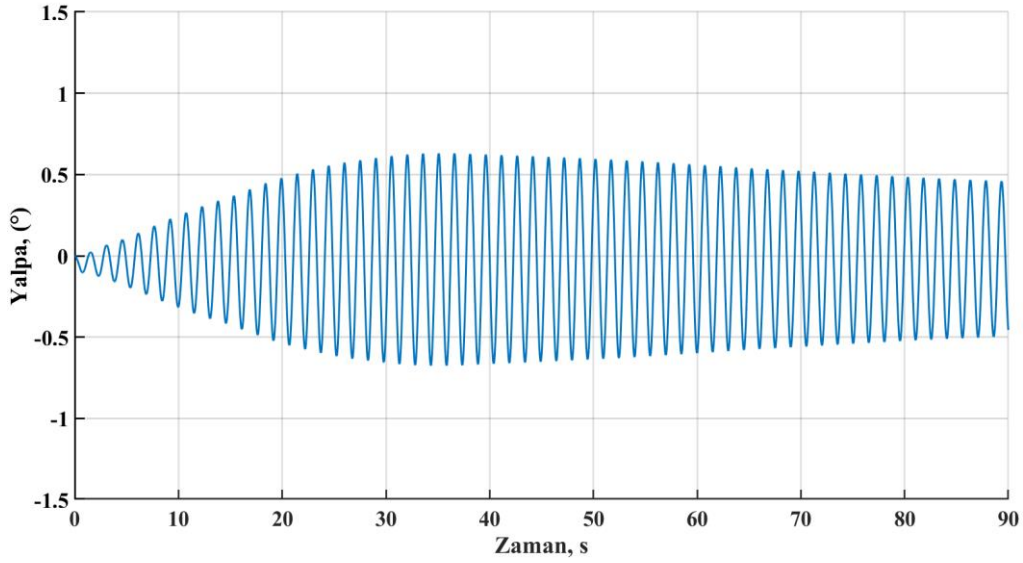
İlk durumda, pervanenin birinci kuadranttaki hareketi incelenmiştir. DTC konteyner gemisi başlangıçta hareketsiz durumda iken, pervane saniyede 20 devir ile dönmektedir. Pervanenin sağladığı pozitif itme kuvvetiyle beraber, 90 saniyelik bir simülasyon sonucunda gemi sabit bir hız rejimine oturmuştur. Şekil 6.5'de, zaman alanındaki simülasyon sonuçları gösterilmektedir.



Şekil 6. 5 Tam ileri manevrası için simülasyon sonuçları

Şekil 6.5 incelendiğinde, BFM yöntemiyle tahmin edilen gemi hızı 1.36 m/s iken, SMot4QP yaklaşımıyla bu hızın 1.53 m/s olduğu öngörülmüştür. İki yöntem arasındaki fark yaklaşık %11 düzeyindedir. Bununla beraber, SMot4QP yaklaşımında gemi hızı daha yüksek hesaplandığından, DTC konteyner gemisi BFM yöntemine kıyasla yaklaşık olarak 18 metre daha fazla yol almıştır.

İki yöntem arasındaki fark incelendiğinde, en belirgin nedenlerden biri SMot4QP kodundaki girdi parametrelerinden biri olan gemi direncidir. Bu değer, iki serbestlik derecesine (2-DOF) sahip (baş-kıç vurma ve dalıp-çıkma) DTC konteyner gemisi için gerçekleştirilen HAD simülasyonlarından elde edilmiş ve koda girdi olarak tanımlanmıştır. Ancak, free-running simülasyonları düşünüldüğünde, DTC konteyner gemisi dört serbestlik derecesine (4-DOF) sahiptir. Yani yalpa hareketinin simülasyon sonuçları üzerindeki etkisi HAD analizlerinde dikkate alınırken, SMot4QP kodunda bu durum ihmal edilmiştir. Şekil 6.6'da, free-running HAD simülasyonları süresi boyunca meydana gelen yalpa hareketinin zaman düzlemindeki sonuçları gösterilmiştir.



Şekil 6. 6 Tam ileri manevra senaryosunda geminin yaptığı yalpa hareketinin zaman düzlemindeki sonuçları

Şekilde açıkça görüldüğü gibi, 90 saniyelik bir simülasyon sonucunda yaklaşık 0.5 derecelik bir yalpa hareketi oluşmuştur. Bu, büyük derecelerde yapılan bir hareket olmasa da, geminin stabilitesinde bozucu bir etki oluşturarak nihai durumdaki hız üzerinde etkisi olduğu düşünülmektedir. Ayrıca, SMot4QP kodunda iz katsayısı ve itme azalması katsayısı olarak Tablo 6.7'deki değerler alınmıştır ve simülasyon boyunca sabit olduğu kabul edilmiştir.

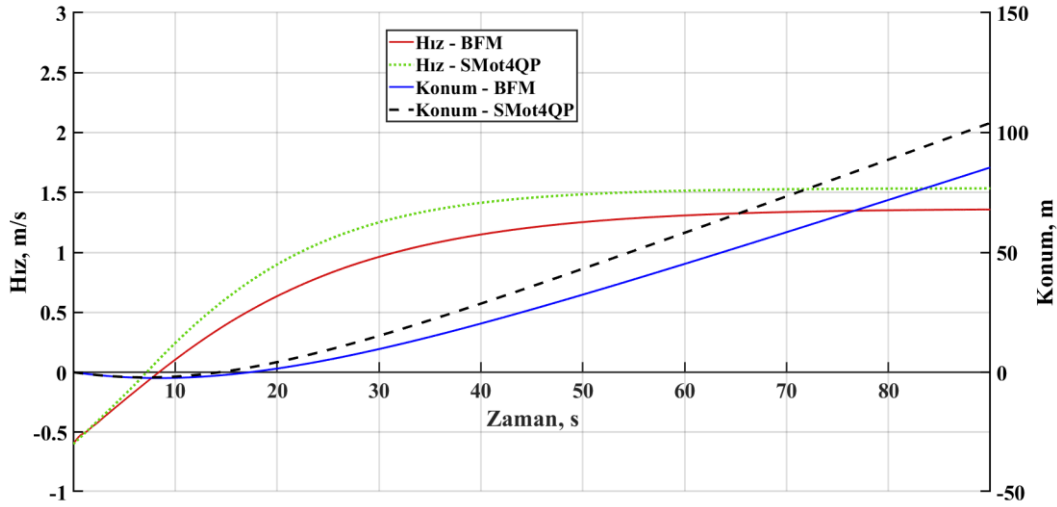
Sonuç olarak, SMot4QP yaklaşımında yalpa hareketinin ihmal edilmesi, itme azalması katsayısı ve iz katsayısının simülasyonlar boyunca sabit kabul edilmesi, iki farklı yöntem arasında öngörülen sonuçlarda farklılık yaratmıştır.

6.4.3 Durum #2 – Ani kalkış manevrası

İkinci durumda, DTC konteyner gemisi başlangıçta saniyede -0.6 metre hızla geri yönde hareket ederken ve pervane tam ileri manevra senaryosunda olduğu gibi saniyede 20 devirle dönmektedir. Bu durumda, DTC konteyner gemisi başlangıçta sahip olduğu negatif hızıyla beraber bir süre geri yönde hareket edecektir. Ancak pervanenin sağladığı pozitif itme kuvvetiyle birlikte hız kazandıkça gemi sıfır hızına ulaşacak ve ardından pozitif bir gemi hızına sahip olacaktır.

Bu senaryoda, pervane sadece ikinci kuadrantta çalışmamakta, aynı zamanda ikinci kuadranttan birinci kuadranta da geçiş yapmaktadır. Birinci kuadranta geçtikten sonra pervane, tam ileri manevra senaryosu ile aynı şekilde çalışmaya devam edecektir. Tek fark, başlangıç durumundaki negatif hızdan dolayı sıfır hızına

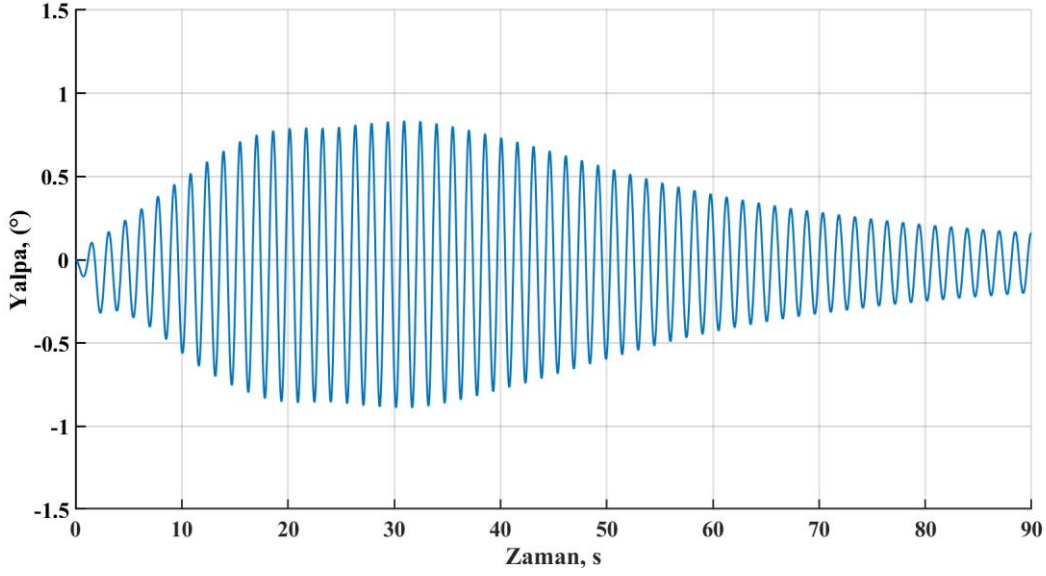
ulaşana kadar ikinci kuadrantta çalışacak olmasıdır. Şekil 6.7’de, ani kalkış manevra durumu için zaman düzlemindeki simülasyon sonuçları verilmiştir.



Şekil 6. 7 Ani kalkış manevrası için simülasyon sonuçları

Yukarıdaki şekil incelendiğinde, pervanenin dönüş hızının tam ileri manevra senaryosuyla aynı olduğu için, DTC konteyner gemisi 90 saniyelik bir simülasyon sonucunda negatif bir başlangıç hızına sahip olsa da üretilen itme kuvvetleri aynı olacağından nihai durumda aynı hıza ulaşmıştır.

DTC konteyner gemisinin sıfır hızına ulaşana kadar geçen süredeki kısım incelendiğinde, SMot4QP ile 14.3 saniye, BFM ile 17.36 saniye boyunca geriye hareket etmektedir. Bu süreler içinde sırasıyla 2.16 ve 2.44 metrelik bir geri mesafe kat etmektedir. DTC konteyner gemisinin, sıfır hızına ulaşması SMot4QP ile 7.3 saniye sürerken, BFM ile bu sürenin 8.4 saniye olduğu gözlemlenmiştir. Şekil 6.8’de, ani durma manevrası sırasında oluşan yalpa hareketinin zaman düzlemindeki sonuçları gösterilmiştir. Simülasyon sonucunda yaklaşık 0.2 derecelik bir yalpa hareketi meydana gelmiştir.

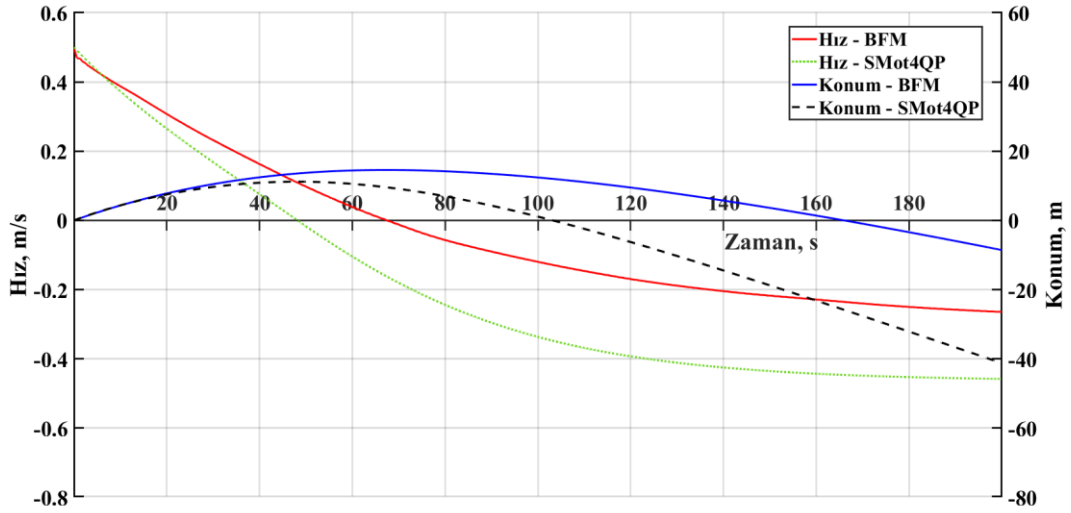


Şekil 6. 8 Ani kalkış manevra senaryosunda geminin yaptığı yalpa hareketinin zaman düzlemindeki sonuçları

Tam ileri manevra durumunda (Şekil 6.5) da değinildiği gibi, SMot4QP yaklaşımında yalpanın ihmal edilmesi ile birlikte, itme azalması katsayısı ve iz katsayısının sabit kabul edilmesi, iki yöntem arasındaki farkı doğuran nedenlerdendir.

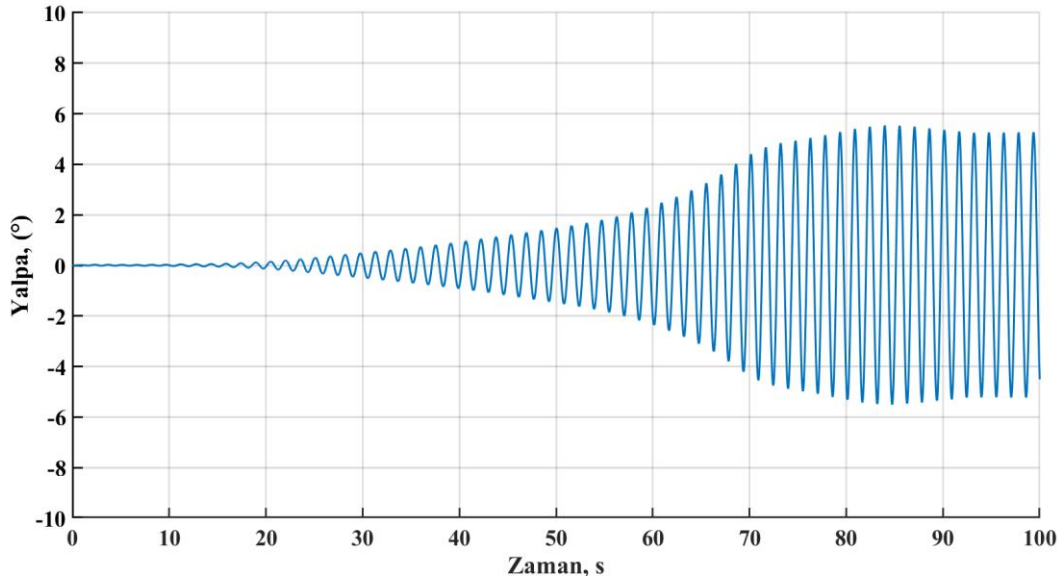
6.4.4 Durum #3 – Ani durma manevrası

Üçüncü senaryoda, gemi başlangıçta 0.5 metre hızla ileriye doğru hareket ederken pervane saniyede 8 devirle ters yönde dönmektedir. Bu senaryoda gemi başlangıç hızına sahip olması nedeniyle ileri doğru hareket edecektir; ancak pervanenin ters dönmesi (tornistan) nedeniyle hızını kaybedecek ve bir süre sonra geri gitmeye başlayacaktır. Bu senaryoda pervane sadece üçüncü kuadrantta çalışmamakta, aynı zamanda üçüncü kuadranttan dördüncü kuadranta da geçiş yapmaktadır. Ani durma manevrası senaryosu için simülasyon sonuçları Şekil 6.9'da gösterilmiştir



Şekil 6. 9 Ani durma manevrası için simülasyon sonuçları

Şekilde açıkça görüldüğü gibi, kullanılan iki yöntemle de gemi hızı 200 saniyelik bir simülasyon sonucunda negatif yönde bir trend izlemiştir. Ancak öngörülen gemi hızları karşılaştırıldığında, iki yöntem arasında dikkate değer bir fark gözlemlenmiştir. SMot4QP ile gemi saniyede yaklaşık -0.45 metre hıza ulaşırken, BFM ile gemi hızı -0.26 m/s olarak tahmin edilmiştir. DTC konteyner gemisi, sıfır hızına ulaşip geri yöndeki hareketine başladığı an SMot4QP ile 48. saniyede gerçekleşirken, BFM ile yaklaşık 20 saniye gecikmeyle 67. saniyede gerçekleşmiştir. Bununla birlikte, beklenildiği üzere SMot4QP simülasyon sonucunda gemi yaklaşık 41 metre geri yönde hareket etmişken, BFM yönteminde yaklaşık 8.5 metrelik bir geri hareket söz konusudur. İki yöntem arasındaki farkı değerlendirmek için Şekil 6.10'da free-running HAD simülasyonları sırasında oluşan yalpa hareketinin zaman düzlemindeki sonuçları incelenmiştir.



Şekil 6. 10 Ani durma manevra senaryosunda geminin yaptığı yalpa hareketinin zaman düzlemindeki sonuçları

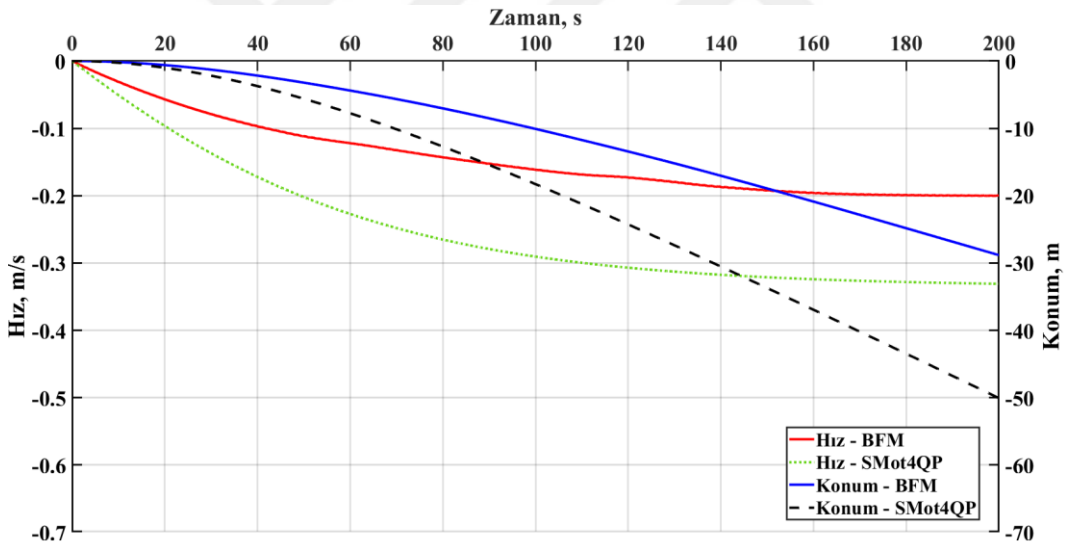
Simülasyon sonuçları ilk 100 saniye için verilmiştir. 100. saniyeden sonra yalpa hareketinin miktarı aynı rejimde devam etmektedir. Şekilde açıkça görüldüğü gibi, yaklaşık 5 derecelik bir yalpa hareketi oluşmuştur. Tam ileri ve ani kalkış manevralarıyla karşılaştırıldığında oluşan yalpanın miktarı oldukça yüksektir. Bu nedenle, SMot4QP ve BFM yaklaşımlarının öngördüğü sonuçlar arasındaki fark artmaktadır. Yalpanın bozucu etkisiyle beraber, BFM ile itme kuvveti $-1.62N$ iken, yalpanın ihmal edildiği SMot4QP ile pervanenin ürettiği itme kuvveti $-2.14N$ olarak bulunmuştur. BFM'in daha az itme kuvveti üretmesi ile birlikte, BFM ile gemi hızı daha düşük bir değerde yakınsamıştır.

Öte yandan, BFM ile kendi kendine sevk noktası $J = 0.474$ olarak bulunurken, SMot4QP'un sonucu $J = 0.372$ olarak hesaplanmıştır. Bu farktan yola çıkarak iz katsayısındaki değişimin etkisi incelenebilir. İlerleme katsayısının bağlı olduğu üç parametre düşünülürse (bkz. denklem 2.24) bunlardan ikisi pervane çapı ve pervane dönüş hızıdır ve bu parametreler sabittir. Üçüncü değişken ise pervane düzlemine gelen ortalama akım hızıdır. Bu değer zamana bağlı olarak değişecektir. Tam ileri ve ani kalkış manevralarına kıyasla iz katsayısındaki değişimin hıza bağlı daha yüksek olması beklenmektedir. Çünkü, geminin geri hareketi esnasında pervane düzlemine gelen akımdaki değişim, ileri yöndeki harekettekinden daha düşük olacaktır. Ani durma manevrasında dümen geometrisinden kaynaklı gelen akım uniform olmayan bir hale gelse de çok yüksek bir değişim göstermeyecektir.

Böylece iz katsayısının değeri ileri hareket yönünde hesaplanana göre daha küçük olacaktır. Ancak SMot4QP’de bu değer sabit olarak alınmakta ve olması gereken değerden daha yüksektir. Bu nedenle, iki yöntem ile hesaplanan hız ve konum değerleri arasındaki fark büyümektedir. İtme azalması katsayısı için de bu değişim söz konusudur. SMot4QP’de itme azalması katsayısı, geminin tam ileri hareket durumunda yapılan sevk deneylerinden alınan bir değer olduğu ve sabit kabul edildiği için BFM ile öngörülen sonuçlar arasındaki farka neden olan parametrelerden biridir.

6.4.5 Durum #4 – Tam geri manevrası

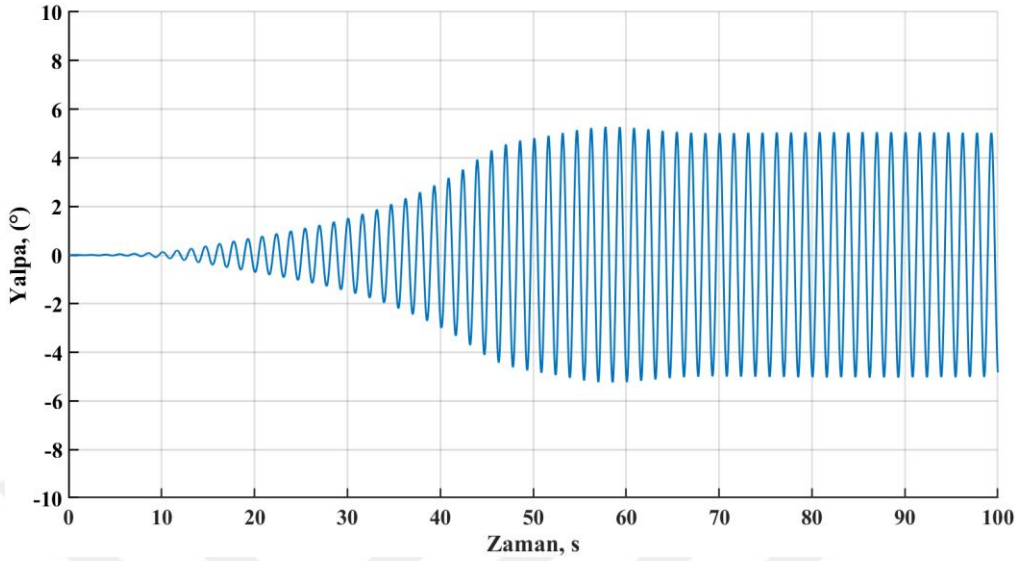
Son manevra senaryosunda, DTC konteyner gemisi başlangıçta hareketsizdir ve pervane saniyede 6 devir hızıyla ters yönde dönmektedir. Bu durumda, pervane dördüncü kuadrantta çalışmaktadır. Pervanenin ters yönde dönmesiyle birlikte negatif yönde oluşacak itme kuvvetiyle başlangıçta hareketsiz olan gemi geri yönde hareket etmeye başlayacaktır. Simülasyon sonuçları Şekil 6.11’de gösterilmiştir.



Şekil 6.11 Tam geri manevrası için simülasyon sonuçları

Şekil 6.10 incelendiğinde, 200 saniyelik simülasyon sonucunda iki yöntem ile hesaplanan gemi hızı ve konumu göz önünde bulundurulduğunda aradaki farkın kayda değer bir derecede olduğu gözlemlenmiştir. SMot4QP, geminin saniyede 0,33 metre hızla geri yönde hareketine öngörürken, BFM yönteminde bu değer -0,2 m/s olarak hesaplanmıştır. Bununla birlikte, beklenildiği üzere SMot4QP simülasyon sonucunda gemi yaklaşık 50 metre geri yönde hareket etmişken, BFM yönteminde yaklaşık 29 metrelik bir geri hareket söz konusudur. Aradaki farkın

temel nedenlerinden biri olan yalpa hareketinin free-running HAD simülasyonları sırasında zaman düzlemindeki sonuçları Şekil 6.12’de incelenmiştir.



Şekil 6.12 Tam geri manevra senaryosunda geminin yaptığı yalpa hareketinin zaman düzlemindeki sonuçları

Bölüm 6.4.4’te ani durma manevra senaryosuna benzer olacak şekilde yaklaşık 5 derecelik bir yalpa meydana gelmiştir. Yalpa hareketinin sonuçlar üzerindeki etkisi ani durma senaryosuna oldukça benzerdir. Çünkü ani durma senaryosunda gemi, sıfır hızına ulaştıktan sonraki (üçüncü kuadranttan dördüncü kuadranta geçtiği nokta) hareketini tam geri manevra durumunda olduğu gibi devam ettirmektedir. Bunu göz önünde bulundurduğumuzda, yalpa hareketinin ihmal edildiği SMot4QP’de pervanenin ürettiği itme kuvveti -1.23N olarak hesaplanırken, BFM ile -0.9N bulunmuştur. Bu nedenle, Şekil 6.11’de açıkça görüldüğü gibi SMot4QP ile gemi daha yüksek bir hıza ulaşmıştır.

İki yöntem arasındaki farkın temel nedenlerden bir diğeri diğer üç manevra senaryosunda de bahsedildiği gibi iz katsayısı ve itme azalması katsayısının koda girdi olarak verilirken sabit alınmasıdır. SMot4QP ile kendi kendine sevk noktası $J = 0.358$ olarak bulunurken, BFM’in sonucu $J = 0.476$ olarak hesaplanmıştır. İlerleme katsayılarından yola çıkarak iz katsayısındaki değişimin etkisi ani durma manevrasında (Şekil 6.9) detaylı olarak bahsedilmiştir. Öte yandan, itme azalması katsayısı için de benzer açıklama aynı bölümde yapılmıştır.

Sonuç olarak, ani durma ve tam geri manevra durumlarında SMot4QP ile BFM arasında oluşan kayda değer farkın, tam ileri ve ani kalkış manevra durumlarında o derecede yüksek gözlemlenmemesinin sebepleri şu şekilde verilebilir;

- Geri hareket esnasında gerçekleşen yalpa hareketinin ileri yöndeki manevralarla kıyaslandığında oldukça büyük olması ve yalpa hareketinin geminin üzerindeki bozucu etkisinin artması
- İz katsayısı ve itme azalması katsayılarının tam ileri manevra durumundaki geminin kendi kendine sevk testlerinden elde edilen değerler olarak kodda girdi parametresi olarak kullanılması ve sabit alınması
- Kullanılan iz katsayısı ve itme azalması katsayılarının 1/59.407 ölçeğindeki sevk testlerinden alınmıştır ancak çalışmada kullanılan DTC konteyner gemisi 1/80 ölçeğindedir. Böylece bu katsayıları üzerindeki ölçek etkisi, sabit olarak kabul edilmelerinin dışında etkili bir parametredir.

7

SONUÇ

Gemilerin hidrodinamik performansını tahmin etmek için genellikle önemli miktarda zaman alan doğrudan HAD simülasyonları veya maliyetli free-running model testleri gerekmektedir. Ancak endüstri, özellikle ön tasarım aşamasında daha efektif sevk sistemi tasarımları için hızlı değerlendirme yöntemlerine ihtiyaç duymaktadır. Hesaplamaları hızlandırmak için çeşitli yöntemler bulunmaktadır; ancak, geleneksel olarak gemi sevk sisteminin hidrodinamik performansını değerlendirmek, sadece pervane dönüş yönünün düzenli olduğu sabit ileri hareket durumuna odaklanmıştır. Bu tez çalışması, ani kalkış, ani durma ve tam geri hareketleri gibi çeşitli doğrusal öteleme (surge motion) hareketlerini içerecek şekilde kapsamı genişletmeyi amaçlamaktadır. Bu bağlamda, çalışmamız, dört kuadrantlı pervane performans modeli (FQP) ve gemi direnç test sonuçlarını kullanarak farklı koşullar altında gemi hidrodinamik performansını tahmin eden bir simülasyon kodu (SMot4QP) sunarak pratik bir yaklaşım önermektedir.

Bu tez çalışması kapsamında, geliştirilen SMot4QP kodunun matematiksel arka planı ve çalışma şeması ayrıntılı olarak açıklanmıştır. Kodun doğruluğunu ve farklı deniz taşıtları üzerindeki uygulanabilirliğini test etmek için DARPA Suboff denizaltı ve DTC Post-Panamax konteyner gemisi modeli kullanılmıştır. Dört farklı manevra durumunu (tam ileri, ani kalkış, ani durma ve tam geri) içeren free-running simülasyonları gerçek pervane modelinin kullanıldığı DPM, pervane modelinin sanal disk ile temsil edildiği BFM ve SMot4QP kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

DARPA Suboff denizaltı modelinin free-running simülasyonları iki alt başlıkta incelenmiştir. İlk olarak, free-running simülasyonlarında kullanılan sabit ve hareketli arka plan yaklaşımlarının uygulanabilirlikleri test edilmiştir. Tam ileri manevra durumunda BFM yöntemi kullanılarak seçilen iki arka plan yaklaşımının nihai durumdaki denizaltı hızı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Hesaplama alanındaki farklılık sonuçlar üzerinde bir değişiklik yaratmamıştır. Bununla birlikte, sabit arka plan yaklaşımında gerekli çözüm ağı sayısı ve hesaplama süresi yaklaşık 2.5 kat artmıştır; bu nedenle, hesaplama verimliliği göz önünde bulundurularak tez çalışmasının geri kalan kısmındaki free-running simülasyonlarında hareketli arka plan yaklaşımı tercih edilmiştir.

SMot4QP, DPM ve BFM yaklaşımlarının kullanıldığı dört manevra durumunu içeren free-running simülasyonları incelendiğinde, sonuçların birbiriyle uyumlu olduğu gözlemlenmiştir. Simülasyonların hesaplama süreleri dikkate alındığında, geliştirilen kodun diğer iki yöntemle göre çok daha hızlı sonuçlar verdiği belirlenmiştir. Ancak detaylı akış alanının incelenmesi veya pervane-tekne-dümen arasındaki etkileşimleri gözlemlemek için, DPM yaklaşımın daha uygun olduğu sonuca varılmıştır.

Tez çalışmasında kullanılan diğer bir model olan DTC konteyner gemisinin free-running HAD simülasyonlarında, DARPA Suboff denizaltı modelinden farklı olarak gemi dört serbestlik derecesine (4-DOF) sahip olarak hareket etmektedir. DPM'in hesaplama süresi açısından getirdiği dezavantajlar göz önünde bulundurularak yalnızca BFM yöntemi kullanılmıştır.

DTC konteyner gemisinin dört manevra durumundaki free-running simülasyon sonuçları karşılaştırıldığında, SMot4QP kodunda gemi yalpa hareketinin ihmal edilmesi ve sabit iz katsayısı ile itme azalması katsayısının kullanılması sonuçlar arasında belirgin bir farka yol açmıştır. Özellikle ani durma ve tam geri manevra senaryolarında bu farkın daha da belirgin olduğu gözlemlenmiştir. Çünkü bu durumlarda meydana gelen yalpa hareketinin büyüklüğü, tam ileri ve ani kalkış senaryolarına kıyasla oldukça büyüktür ve gemi üzerindeki bozucu etkisi daha yüksektir.

Bu tez çalışmasında önerilen yöntemin, gemi hareket tahminlerinin doğruluğunu artırmada önemli bir rol oynaması beklenmektedir. Bazı manevra durumlarında, geliştirilen yöntem ile elde edilen tahminlerin HAD sonuçları ile arasındaki fark artsa da, önerilen yöntem ile çok hızlı sonuç alınabilmesi Smot4QP kodunu kullanım açısından cazip hale getirmektedir. Geleneksel manevra modelleri, pervane itişini sadece birinci kuadrant için dikkate almaktadır. Bu nedenle, dinamik konumlandırma sistemlerinin matematiksel modelleri, kapsamlı simülasyonlar için yetersiz kalmaktadır.

Bu çalışmada geliştirilen kod, altı serbestlik derecesine sahip gemi hareket kodları ile entegre olabilir ve deniz araçlarının navigasyon ve kontrolünün hassasiyetini artırabilir. Gelecekteki çalışmalar ile, bu yöntemin daha geniş bir uygulama alanına

nasıl genişletilebileceğinin, gemi tasarımı ve otonomlaştırılması alanında nasıl kullanılabileceğinin daha ayrıntılı olarak incelenmesi planlanmaktadır.



- Aram, S., & Mucha, P. (2023). Computational fluid dynamics analysis of different propeller models for a ship maneuvering in calm water. *Ocean Engineering*, 276. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.114226>
- Asnaghi, A., Svennberg, U., & Bensow, R. E. (2018). Numerical and experimental analysis of cavitation inception behaviour for high-skewed low-noise propellers. *Applied Ocean Research*, 79, 197-214. <https://doi.org/10.1016/j.apor.2018.07.010>
- Bakica, A., Gatin, I., Vukčević, V., Jasak, H., & Vladimir, N. (2019). Accurate assessment of ship-propulsion characteristics using CFD. *Ocean Engineering*, 175, 149-162. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2018.12.043>
- Bekhit, A. S. (2018). Numerical simulation of the ship self-propulsion prediction using body force method and fully discretized propeller model. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 400(4). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/400/4/042004>
- Brix, J. E. (1993). *Brix, J.E., 1993. Manoeuvring Technical Manual. Seehafen-Verl., Hamburg.*
- Brogli, R., Dubbioso, G., Durante, D., & Mascio, A. Di. (2013). Simulation of turning circle by CFD: Analysis of different propeller models and their effect on manoeuvring prediction. *Applied Ocean Research*, 39, 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.apor.2012.09.001>
- Carrica, P. M., Castro, A. M., & Stern, F. (2010). Self-propulsion computations using a speed controller and a discretized propeller with dynamic overset grids. *Journal of Marine Science and Technology*, 15(4), 316-330. <https://doi.org/10.1007/s00773-010-0098-6>
- Carrica, P. M., Kim, Y., & Martin, J. E. (2019). Near-surface self propulsion of a generic submarine in calm water and waves. *Ocean Engineering*, 183, 87-105. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2019.04.082>
- Castro, A. M., Carrica, P. M., & Stern, F. (2011). Full scale self-propulsion computations using discretized propeller for the KRISO container ship KCS.

Computers and Fluids, 51(1), 35-47.
<https://doi.org/10.1016/j.compfluid.2011.07.005>

- Celik, I. B., Ghia, U., Roache, P. J., Freitas, C. J., Coleman, H., & Raad, P. E. (2008). Procedure for estimation and reporting of uncertainty due to discretization in CFD applications. *Journal of Fluids Engineering, Transactions of the ASME*, 130(7), 0780011-0780014.
<https://doi.org/10.1115/1.2960953>
- Chase, N., & Carrica, P. M. (2013). Submarine propeller computations and application to self-propulsion of DARPA Suboff. *Ocean Engineering*, 60, 68-80. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2012.12.029>
- Date, J. C., & Turnock, S. R. (1999). *A Study into the Techniques Needed to Accurately Predict Skin Friction Using RANS Solvers with Validation against Froude's Historical Flat Plate Experimental Data.*
- Delen, C., Can, U., & Bal, S. (2021). Prediction of resistance and self-propulsion characteristics of a full-scale naval ship by CFD-based GEOSIM method. *Journal of Ship Research*, 65(04), 346-361.
- Delen, C., Sezen, S., & Bal, S. (2017). Computational investigation of self propulsion performance of DARPA Suboff vehicle. İçinde *Tamap Journal of Engineering* (C. 2017).
- Dogrul, A. (2022). Numerical prediction of scale effects on the propulsion performance of Joubert BB2 Submarine. *Brodogradnja*, 73(2), 17-42.
<https://doi.org/10.21278/brod73202>
- El Moctar, O., Shigunov, V., & Zorn, T. (2012). Duisburg test case: Post-panamax container ship for benchmarking. *Ship Technology Research*, 59(3), 50-64.
<https://doi.org/10.1179/str.2012.59.3.004>
- Feng, D., Yu, J., He, R., Zhang, Z., & Wang, X. (2020a). Free running computations of KCS with different propulsion models. *Ocean Engineering*, 214.
<https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.107563>
- Feng, D., Yu, J., He, R., Zhang, Z., & Wang, X. (2020b). Improved body force propulsion model for ship propeller simulation. *Applied Ocean Research*, 104.
<https://doi.org/10.1016/j.apor.2020.102328>

- Gaggero, S., Villa, D., & Viviani, M. (2017). An extensive analysis of numerical ship self-propulsion prediction via a coupled BEM/RANS approach. *Applied Ocean Research*, 66, 55-78. <https://doi.org/10.1016/j.apor.2017.05.005>
- Gokce, M. K., Kinaci, O. K., & Alkan, A. D. (2019). Self-propulsion estimations for a bulk carrier. *Ships and Offshore Structures*, 14(7), 656-663. <https://doi.org/10.1080/17445302.2018.1544108>
- Gothenburg. (2010). *Gothenburg, CFD Workshop Organizers, 2010. Gothenburg 2010 Cfd Workshop Website*. http://www.gothenburg2010.org/kcs_gc.html.
- Guo, J., Chen, Z., & Dai, Y. (2020). Numerical study on self-propulsion of a waterjet propelled trimaran. *Ocean Engineering*, 195. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2019.106655>
- Guo, L., Yu, J., Chen, J., Jiang, K., & Feng, D. (2018). *Unsteady viscous CFD simulations of KCS behaviour and performance in head seas*. <https://proceedings.asmedigitalcollection.asme.org>
- Hu, J., Zhang, W., Wang, C., Sun, S., & Guo, C. (2021). Impact of skew on propeller tip vortex cavitation. *Ocean Engineering*, 220. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.108479>
- IMO. (2017). *2013 Interim guidelines for determining minimum propulsion power to maintain the manoeuvrability of ships in adverse conditions, as amended (resolution mepc.232(65), as amended by resolutions mepc.255(67) and mepc.262(68))*.
- ITTC. (2011). *ITTC-Recommended Procedures and Guidelines Practical Guidelines for Ship CFD Applications*.
- ITTC. (2014a). *ITTC-Recommended Procedures and Guidelines Practical Guidelines for Ship Self-Propulsion CFD ITTC Quality System Manual Recommended Procedures and Guidelines Guideline Practical Guidelines for Ship Self-Propulsion CFD*.
- ITTC. (2014b). *Procedures and Guidelines Testing and Extrapolation Methods Resistance Uncertainty Analysis, Example for Resistance Test*.
- Jasak, H., Vukčević, V., Gatin, I., & Lalović, I. (2019). CFD validation and grid sensitivity studies of full scale ship self propulsion. *International Journal of*

- Naval Architecture and Ocean Engineering*, 11(1), 33-43.
<https://doi.org/10.1016/j.ijnaoe.2017.12.004>
- Jin, Y., Duffy, J., Chai, S., & Magee, A. R. (2019). DTMB 5415M dynamic manoeuvres with URANS computation using body-force and discretised propeller models. *Ocean Engineering*, 182, 305-317.
<https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2019.04.036>
- Kim, D., Song, S., & Tezdogan, T. (2021). Free running CFD simulations to investigate ship manoeuvrability in waves. *Ocean Engineering*, 236.
<https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2021.109567>
- Kinaci, O. K., Delen, C., Bitirgen, R., Bayezit, A., Bayezit, I., Ozturk, D., & Gunguder, B. (2021). Free-running tests for DTC self-propulsion – An investigation of lateral forces due to the rudder and the propeller. *Applied Ocean Research*, 116. <https://doi.org/10.1016/j.apor.2021.102877>
- Kinaci, O. K., Gokce, M. K., Alkan, A. D., & Kukner, A. (2018). On self-propulsion assessment of marine vehicles. *Brodogradnja*, 69(4), 29-51.
<https://doi.org/10.21278/brod69403>
- Kinaci, O. K., Gokce, M. K., & Delen, C. (2020). Resistance experiments and self-propulsion estimations of Duisburg Test Case at 1/100 scale. *Ship Technology Research*, 67(2), 109-120. <https://doi.org/10.1080/09377255.2020.1729454>
- Kinaci, O. K., & Ozturk, D. (2022). Straight-ahead self-propulsion and turning maneuvers of DTC container ship with direct CFD simulations. *Ocean Engineering*, 244. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2021.110381>
- Liu, H.-L., & Huang, T. T. (1998). *Summary of DARPA Suboff Experimental Program Data Sponsor: DARPA Task Area: S1974-030 Program Element: 63569N*.
- Liu, L., Chen, M., Yu, J., Zhang, Z., & Wang, X. (2021). Full-scale simulation of self-propulsion for a free-running submarine. *Physics of Fluids*, 33(4).
<https://doi.org/10.1063/5.0041334>
- N.C. Groves, T.T. Huang, & M.S Chang. (1989). *Geometric characteristics of DARPA Suboff models (DTRC model NOS. 5470 and 5471)*.

- Ozturk, D. (2023). *October 2023 Maneuvering of high speed displacement vessels in regular waves* Deniz Öztürk Sarıgül Department of Shipbuilding and Ocean Engineering Shipbuilding and Ocean Engineering Programme.
- Richardson. (1911). *The approximate arithmetical solution by finite differences of physical problems involving differential equations, with an application to the stresses in a Masonry Dam. Philos. Trans. R. Soc. Lond. Ser. Contain. Pap. Math. Phys. Character. 210, 307–357.*
- Roache. (1998). *Verification of codes and calculations. AIAA J. 36, 696–702.* <https://doi.org/10.2514/2.457>.
- Sezen, S., Dogrul, A., Delen, C., & Bal, S. (2018). Investigation of self-propulsion of DARPA Suboff by RANS method. *Ocean Engineering, 150, 258-271.* <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2017.12.051>
- Shen, Z., Wan, D., & Carrica, P. M. (2015). Dynamic overset grids in OpenFOAM with application to KCS self-propulsion and maneuvering. *Ocean Engineering, 108, 287-306.* <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2015.07.035>
- STAR-CCM+ User Guide. (t.y.). Siemens, “*Star-CCM+ User Guide version 14.02.*” 2019.
- Stern, F., Wilson, R. V., Coleman, H. W., & Paterson, E. G. (2001). Comprehensive approach to verification and validation of CFD simulations—Part 1: Methodology and procedures. *Journal of Fluids Engineering, Transactions of the ASME, 123(4), 793-802.* <https://doi.org/10.1115/1.1412235>
- Tokyo. (2015). *Tokyo, 2015. CFD Workshop Organizers. Tokyo 2015 CFD Workshop website.* https://t2015.nmri.go.jp/Instructions_KCS/Case_2.7/Case_2-7.html.
- Versteeg, H., & Malalasekera, W. (2007). *An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method.*
- Wang, J., Zou, L., & Wan, D. (2017). CFD simulations of free running ship under course keeping control. *Ocean Engineering, 141, 450-464.* <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2017.06.052>

- Wang, L., Martin, J. E., Carrica, P. M., Felli, M., & Falchi, M. (2019). *Experiments and CFD for DARPA Suboff Appended with Propeller E1658 Operating Near the Surface*.
- Wilcox, D. C. (2006). *Modeling for CFD. La Cãnada, Calif.: D C W Industries*.
- Yu, J., Feng, D., Liu, L., Yao, C., & Wang, X. (2022). Assessments of propulsion models for free running surface ship turning circle simulations. *Ocean Engineering*, 250. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.110967>
- Yu, J., Yao, C., Liu, L., Zhang, Z., & Feng, D. (2021). Assessment of full-scale KCS free running simulation with body-force models. *Ocean Engineering*, 237. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2021.109570>
- Zhang, N., & Zhang, S. L. (2014). Numerical simulation of hull/propeller interaction of submarine in submergence and near surface conditions. *Journal of Hydrodynamics*, 26(1), 50-56. [https://doi.org/10.1016/S1001-6058\(14\)60006-8](https://doi.org/10.1016/S1001-6058(14)60006-8)
- Zhu, Z. (2015). Numerical study on characteristic correlation between cavitating flow and skew of ship propellers. *Ocean Engineering*, 99, 63-71. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2014.12.023>

TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR

Konferans Bildirileri

1. Esenkalan, M., Coşgun, T., Kinaci, O.K. (2024). Effect of propulsion model on the free-running simulations of a self-propelled submarine. 5th Global Maritime Congress, Istanbul.

Makaleler

1. Coşgun, T., Esenkalan, M., Kinaci, O.K. (2024). Four-quadrant propeller hydrodynamic performance mapping for improving ship motion predictions. Brodogradnja, 75(3), <http://dx.doi.org/10.21278/brod75306>

