

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

KAYICI TEKNELERDE DENİZCİLİĞİN SAYISAL OLARAK
İNCELENMESİ

Emre KAHRAMANOĞLU

DOKTORA TEZİ

Gemi İnşaatı ve Gemi Makineleri Mühendisliği Anabilim Dalı
Gemi İnşaatı ve Gemi Makineleri Mühendisliği Programı

Danışman

Prof. Dr. Hüseyin YILMAZ

Ocak, 2021

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**KAYICI TEKNELERDE DENİZCİLİĞİN SAYISAL OLARAK
İNCELENMESİ**

Emre KAHRAMANOĞLU tarafından hazırlanan tez çalışması 04.01.2021 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Gemi İnşaatı ve Gemi Makineleri Mühendisliği Anabilim Dalı, Gemi İnşaatı ve Gemi Makineleri Mühendisliği Programı **DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Hüseyin YILMAZ
Yıldız Teknik Üniversitesi
Danışman

Jüri Üyeleri

Prof. Dr. Hüseyin YILMAZ, Danışman
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Fahri ÇELİK, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Muhsin AYDIN, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Şakir BAL, Üye
İstanbul Teknik Üniversitesi

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

Danışmanım Prof. Dr. Hüseyin YILMAZ sorumluluğunda tarafımca hazırlanan Kayıcı Teknelerde Denizciliğin Sayısal Olarak İncelenmesi 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.

Emre KAHRAMANOĞLU

İmza

Bu alışma, TÜBİTAK 2211A Yurtiçi Doktora Bursu ve 2214A Doktora Sırası Yurtdışı Araştırma Bursu ile desteklenmiştir.

Canım aileme

ve

biricik eşime

TEŞEKKÜR

Doktora tezimin hazırlanması süresince bilgi ve tecrübesiyle bana yol gösteren ve her daim yanımda olan tez danışmanım sayın Prof. Dr. Hüseyin YILMAZ'a, değerli hocalarım Prof. Dr. Fahri ÇELİK'e ve Prof. Dr. Şakir BAL'a teşekkürlerimi sunarım.

Akademik hayatta karşılaştığım her zorlukta yanımda olan, gerektiğinde abi gerektiğinde hoca olarak bana yol gösteren değerli meslektaşım Dr. Öğr. Üyesi Ali DOĞRUL'a, çalışma ve yol arkadaşlarım Savaş SEZEN ve Süleyman DUMAN'a canıyürekten teşekkür ederim. Doktora süresince yaptığım her çalışmamda her türlü desteğini hissettiğim, her daim vizyonu ile yolumu aydınlatan değerli oda arkadaşım ve hocam Dr. Öğr. Üyesi Ferdi ÇAKICI'ya sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Doktora sırasında beraber çalışma fırsatı bulduğum, yalnızca akademik anlamda değil aynı zamanda sosyal anlamda da bana çok yardımcı olan ve bana yepyeni ufuklar açan sayın Prof. Dr. Ermina Begovic'e teşekkürlerimi sunarım.

Akademik hayata geçişimde en önemli etken olan ve her daim desteğini hissettiğim Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK)'na teşekkür ederim.

Sadece tezimde değil, hayatımın her döneminde yanımda olan sevgili eşime, madden sürekli yan yana olamasak da manen her daim yanı başımda olduğunu hissettiğim, en büyük destekçim canım ablama ve son olarak beni büyüten, bana güvenen ve her türlü kahrımı çeken, haklarını asla ödeyemeyeceğim canım annem ve babama tüm kalbimle teşekkürlerimi sunarım.

Emre KAHRAMANOĞLU

İÇİNDEKİLER

ŞEKİL LİSTESİ	xiii
TABLO LİSTESİ	xvi
ÖZET	xvii
ABSTRACT	xix
1 GİRİŞ	1
1.1 Literatür Özeti.....	3
1.2 Tezin Amacı.....	16
1.3 Hipotez.....	17
2 SAKİN SUDA KAYICI TEKNE HİDRODİNAMİĞİNİN FARKLI SAYISAL YÖNTEMLERLE İNCELENMESİ	19
2.1 Kullanılan Sayısal Yöntemler	20
2.1.1 Ampirik Yöntem	20
2.1.2 Potansiyel Temelli Yaklaşım.....	26
2.1.3 Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği Yaklaşımı.....	36
2.2 Sonuçların Değerlendirilmesi.....	51
3 KAYICI TEKNELERDE DENİZCİLİĞİN HAD YÖNTEMİ İLE İNCELENMESİ	57
3.1 Fiziksel Model.....	58
3.2 Hesaplama Hacmi ve Sınır Koşulları	59
3.3 Ağ Yapısı ve Gerçekleme Çalışması	60
3.4 Baştan Gelen Düzenli Dalgalarda Denizcilik Analizi.....	61
3.5 Sayısal Sonuçlar.....	63
3.6 Sonuçların Değerlendirilmesi.....	75
4 KAYICI TEKNELERDE YALPA SÖNÜM KATSAYISININ FARKLI SAYISAL YÖNTEMLERLE ELDE EDİLMESİ	79
4.1 Kullanılan Sayısal Yöntemler	80
4.1.1 Ampirik Yöntem	80
4.1.2 Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği Yaklaşımı.....	83
4.2 Sonuçların Değerlendirilmesi.....	94
5 SONUÇ VE ÖNERİLER	97

KAYNAKÇA	101
A AMPİRİK YÖNTEM KODU	115
TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR	117

SİMGE LİSTESİ

$\bar{k}$	Açılar arasındaki oranı gösteren katsayı
ω	Açısal frekans
$\vec{\omega}$	Açısal hız vektörü
$\vec{a}_a$	Açısal ivme vektörü
I_G	Ağırlık atalet momenti
$a_{COG,5}$	Ağırlık merkezindeki baş-kıç vurma ivmesi
$a_{COG,3}$	Ağırlık merkezindeki dalıp-çıkma ivmesi
$\vec{M}_G$	Ağırlık merkezine göre moment
LCG	Ağırlık merkezinin boyuna konumu
VCG	Ağırlık merkezinin düşey konumu
U_i	Akışkanın toplam hız vektörü
C_{RED}	Azaltma fonksiyonu
B	Azami genişlik
V_{BD}	Bağıl Düşey Hız
U_{BY}	Bağıl yatay hız
P	Basınç
R_P	Basınç kaynaklı direnç bileşeni
l_P	Basınç merkezinin boyuna konumu
k_{yy}	Baş-kıç vurma hareketine ait jirasyon yarıçapı
$\dot{\eta}_5$	Baş-kıç vurma hızı
a_{bow}	Baş tarafta meydana gelen düşey ivmelenme
S_L	Bir skalere ait herhangi bir çözümde elde edilen en düşük değer
S_U	Bir skalere ait herhangi bir çözümde elde edilen en yüksek değer
u_i'	Çalkantı hız vektörü
C_{DC}	Çapraz akış sürtünme katsayısı
λ	Dalga boyu
k	Dalga sayısı

A	Dalga genliği
$\dot{\eta}_3$	Dalıp-çıkma hızı
$\eta_i(t)$	Dalıp-çıkma ya da baş-kıç vurma hareket sinyali
Δ	Deplasman kuvveti
μ	Dinamik viskozite
$\vec{a}$	Doğrusal ivme vektörü
α	Durma noktası ile orta simetri eksenini arasındaki açı
ε_{ij}	Farklı çözümler arasındaki fark
Fn	Froude sayısı
ω_z	Gelen dalğanın düşey yönde ürettiği bağıl hız
W	Gemi ağırlığı
x_{BOW}	Gemi başı ile ağırlık merkezi arasındaki yatay mesafe
Fn_B	Genişliğe bağıl Froude sayısı
$\bar{\lambda}$	Görünüm oranı
p	Görünür merteye
$\beta_{i,1}$	Hareketin ilk harmoniğine ilişkin faz açısı
$b_{i,1}$	Hareketin ilk harmoniğine ilişkin kosinüslü Euler katsayısı
$a_{i,1}$	Hareketin ilk harmoniğine ilişkin sinüslü Euler katsayısı
$\eta_{i,n}$	Hareket sinyalinin n. Harmoniği
ε_i	Her bir senaryo için yüzde bağıl hata miktarı
e_a^{ij}	Herhangi bir çözüme ait bağıl hata
φ_i	Herhangi bir çözüme ait skaler değer
φ_{ij}^{ext}	Herhangi bir çözüme göre ekstrapole edilmiş değer
ξ	Her zaman tekne dibine paralel hareketli koordinat sistemi eksenini
F_{LIFT}	Hidrokinamik kaldırma kuvveti
C_{BF}	Hidrostatik kuvvet düzeltme katsayısı
C_{BM}	Hidrostatik moment düzeltme katsayısı
L_K	Islak karina boyu

S_{WA}	Islak yüzey alanı
V	İlerleme hızı
$C_{L,\beta}$	Kalkıntı açılı teknenin hidrodinamik kaldırma kuvveti katsayısı
β	Kalkıntı açısı
$C_{L,0}$	Kalkıntı açısız hidrodinamik kaldırmak kuvveti katsayısı
ω_e	Karşılaşma frekansı
T_e	Karşılaşma periyodu
T_{AP}	Kıç dikmede ölçülen su çekimi
ν	Kinematik viskozite
m	Kütle
V_1	Ortalama tekne dibi hızı
τ_{ij}	Ortalama viskoz tensör bileşeni
T	Periyot
Rn	Reynolds sayısı
$k_L (\tau)$	Sabit trim açısındaki diferansiyel katsayı
C_f	Serpinti direnç katsayısı
R_{ws}	Serpinti kaynaklı direnç bileşeni
θ	Serpinti sınırı ile orta simetri eksenini arasındaki açı
Θ	Serpinti sınırı ile orta simetri eksenini arasındaki açı ile durma noktası ile orta simetri eksenini arasındaki açı
r	Sıklaştırma faktörü
ρ	Su yoğunluğu
C_F	Sürtünme katsayısı
τ	Statik ya da dinamik trim açısı
L_{OA}	Tam boy
k_{44}	Tek serbestlik dereceli yalpa hareketine ait jirasyon yarıçapı
U_K	Toplam belirsizlik değeri
R_T	Toplam direnç
$\vec{F}$	Toplam kuvvet vektörü
B_{44}	Toplam yalpa sönüm katsayısı
R_V	Viskozite kaynaklı direnç bileşeni

R	Yakınsama kriteri
$\Phi(t)$	Yalpa açısı
C_{44}	Yalpa doğrultma katsayısı
I_{44}	Yalpa hareketi ek kütle atalet momenti katsayısı
A_{44}	Yalpa hareketi kütle atalet momenti katsayısı
B_i	Yalpa sönüm katsayısının farklı bileşenleri
g	Yerçekimi ivmesi
t	Zaman
Δt	Zaman adımı
$M_H(t)$	Zamana bağlı ölçülen toplam hidrodinamik moment
$M_T(t)$	Zamana bağlı ölçülen toplam moment
$\overline{U_i}$	Zaman ortalama hız vektörü
φ_A	Zorlamalı yalpa hareketi genliği
f_{HD}	2 boyutlu kesite etki eden hidrodinamik kuvvet
f_{HS}	2 boyutlu kesite etki eden hidrostatik kuvvet
f_{2D}	2 boyutlu kesite etki eden toplam kuvvet
C_M	2 boyutlu kesitin boyutsuz ek kütle katsayısı
b_{eff}	2 boyutlu kesitin efektif genişliği
m_a	2 boyutlu kesitin ek kütlesi
b	2 boyutlu kesitin genişliği
A_{2D}	2 boyutlu kesitin su altında kalan alanı
C_{PU}	2 boyutlu kesitte meydana gelen birikme katsayısı
F_{HD}	3 boyutlu tekneye etki eden hidrodinamik kuvvet
F_{HS}	3 boyutlu tekneye etki eden hidrostatik kuvvet

KISALTMA LİSTESİ

CPU	Merkezi İşlem Birimi
DFBI	Dinamik Akışkan Cisim Arayüzü
GCI	Ağ Yakınsama İndeksi
HAD	Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği
HRIC	Yüksek Çözünürlüklü Arayüz Yakalama Şeması
HY	Hibrit Yöntem
ITTC	Uluslararası Çekme Tankı Konferansı
LES	Büyük Girdap Simülasyonu
NVP	Sayısal Ventilasyon Problemi
RANS	Reynolds Ortalamalı Navier Stokes
RAO	Genlik Cevap Fonksiyonu
RMS	Kareköklerin Ortalaması
SIMPLE	Yarı Örtülü Basınç İlişkili Eşitlikler Yöntemi
SPH	İnterpolasyonlu Partikül Hidrodinamiği
VOF	Akışkan Hacmi Yöntemi
VPH	Sanal Prizmatik Tekne Yöntemi

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1	Sakin su analizleri için kullanılan teknelerin 2 boyutlu görünüşleri.....	20
Şekil 2.2	Kayıcı tekne etrafındaki akış [41].....	24
Şekil 2.3	Savitsky yöntemi için geliştirilen koda ait iş akış şeması.....	24
Şekil 2.4	Monohedral teknesi için ampirik yöntemden elde edilen sonuçların deneysel veriler ile karşılaştırılması	25
Şekil 2.5	Fridsma teknesi için ampirik yöntemden elde edilen sonuçların deneysel veriler ile karşılaştırılması	25
Şekil 2.6	Kesitte meydana gelen birikme (<i>pile up</i>).....	27
Şekil 2.7	Zarnick'in oluşturduğu modeldeki eksen takımları [56].....	29
Şekil 2.8	Potansiyel yaklaşıma göre iş akış şeması.....	32
Şekil 2.9	Trim açısının kesit sayısına göre değişimi.....	33
Şekil 2.10	Potansiyel yaklaşımdan elde edilen sudan çıkma değerlerinin deneysel veriler ile karşılaştırılması	34
Şekil 2.11	Potansiyel yaklaşımdan elde edilen trim değerlerinin deneysel veriler ile karşılaştırılması.....	35
Şekil 2.12	Potansiyel yaklaşımdan elde edilen direnç değerlerinin deneysel veriler ile karşılaştırılması.....	35
Şekil 2.13	Sakin su için hesaplama hacmi.....	40
Şekil 2.14	Sakin su için sınır koşulları	40
Şekil 2.15	Sakin su için serbest su yüzeyindeki ağ yapısı	42
Şekil 2.16	Sakin su için tekne etrafındaki ağ yapısı	42
Şekil 2.17	Sakin su için bölgeler arasındaki ağ yapısı geçişi	42
Şekil 2.18	Düzenlenmiş (üst) ve düzenlenmemiş (alt) HRIC şemalarına ait VOF oranları (<i>yandan görünüş</i>).....	47
Şekil 2.19	Düzenlenmiş (üst) ve düzenlenmemiş (alt) HRIC şemalarına ait VOF oranları (<i>alttan görünüş</i>)	47
Şekil 2.20	Farklı ilerleme hızlarındaki serbest yüzey deformasyonları.....	48
Şekil 2.21	HAD yönteminden elde edilen trim değerleri ile deneysel verilerin karşılaştırılması.....	49
Şekil 2.22	HAD yönteminden elde edilen boyutsuz sudan çıkma değerleri ile deneysel verilerin karşılaştırılması	50
Şekil 2.23	HAD yönteminden elde edilen boyutsuz direnç değerleri ile deneysel verilerin karşılaştırılması	50

Şekil 2.24 Monohedral teknesi için trim sonuçları.....	51
Şekil 2.25 Fridsma teknesi için trim sonuçları	52
Şekil 2.26 Monohedral teknesi için sudan çıkma sonuçları	52
Şekil 2.27 Fridsma teknesi için sudan çıkma sonuçları.....	53
Şekil 2.28 Monohedral teknesi için toplam direnç sonuçları	53
Şekil 2.29 Fridsma teknesi için toplam direnç sonuçları.....	54
Şekil 3.1 Kullanılan tekne modellerinin 2 boyutlu görünüşü	57
Şekil 3.2 Baştan gelen düzenli dalgalar için hesaplama hacmi ve sınır koşulları	60
Şekil 3.3 Stokes dalgası ve sinüzoidal dalga örneği.....	64
Şekil 3.4 Baştan gelen dalga ile karşılaşan teknenin neden olduğu serbest yüzey deformasyonu.....	65
Şekil 3.5 Fourier serisi ile ifade edilmiş bir dalıp-çıkma sinyali örneği	65
Şekil 3.6 Monohedral teknesi $V=3.40$ m/s için RAO değerleri	66
Şekil 3.7 Monohedral teknesi $V=4.60$ m/s için RAO değerleri	66
Şekil 3.8 Monohedral teknesi $V=5.75$ m/s için RAO değerleri	67
Şekil 3.9 Warped teknesi $V=3.40$ m/s için RAO değerleri.....	68
Şekil 3.10 Warped teknesi $V=4.60$ m/s için RAO değerleri.....	68
Şekil 3.11 Warped teknesi $V=5.75$ m/s için RAO değerleri.....	69
Şekil 3.12 Dalıp-çıkma (a) ve baş-kıç vurma (b) hareket fazları ($V=3.40$ m/s)	69
Şekil 3.13 Dalıp-çıkma (a) ve baş-kıç vurma (b) hareket fazları ($V=4.60$ m/s)	70
Şekil 3.14 Dalıp-çıkma (a) ve baş-kıç vurma (b) hareket fazları ($V=5.75$ m/s)	70
Şekil 3.15 C8 Senaryosu dalıp-çıkma hareketi zaman ve frekans düzlem cevabı (<i>Warped</i> , $V=5.75$ m/s)	72
Şekil 3.16 C8 Senaryosu baş-kıç vurma hareketi zaman ve frekans düzlem cevabı (<i>Warped</i> , $V=5.75$ m/s)	72
Şekil 3.17 C8 Senaryosu dalıp-çıkma ivmesi zaman ve frekans düzlem cevabı (<i>Warped</i> , $V=5.75$ m/s)	73
Şekil 3.18 C8 Senaryosu baş-kıç vurma ivmesi zaman ve frekans düzlem cevabı (<i>Warped</i> , $V=5.75$ m/s)	73
Şekil 3.19 C8 Senaryosu baş ivmelenmesi zaman ve frekans düzlem cevabı (<i>Warped</i> , $V=5.75$ m/s)	73
Şekil 3.20 $V=3.40$ m/s için teknelerin baş ivme değerleri	74
Şekil 3.21 $V=4.60$ m/s için teknelerin baş ivme değerleri	74
Şekil 3.22 $V=5.75$ m/s için teknelerin baş ivme değerleri	75
Şekil 4.1 TB30 teknesinin 3 boyutlu görünüşü	79

Şekil 4.2 TB30 teknesinin en kesitleri ve önden görünüşü	80
Şekil 4.3 $T=1.0$ s için ampirik yöntemden elde edilen yalpa sönüm katsayıları.....	82
Şekil 4.4 $T=0.8$ s için ampirik yöntemden elde edilen yalpa sönüm katsayıları.....	82
Şekil 4.5 $T=0.6$ s için ampirik yöntemden elde edilen yalpa sönüm katsayıları.....	82
Şekil 4.6 Hesaplama hacminin boyutlarının yandan ve önden görünüşü	84
Şekil 4.7 Zorlamalı yalpa analizinde sınır koşulları	85
Şekil 4.8 Zorlamalı yalpa hareketi için oluşturulan ağ yapısı	85
Şekil 4.9 Fourier serisi ile temsil edilmiş yalpa momenti örneği.....	89
Şekil 4.10 $F_n=2.2$ (a) ve $F_n=2.6$ (b) için ölçülen moment değerleri ($T=1.0$ s)	90
Şekil 4.11 $T=1.0$ s için yalpa sönüm katsayıları	90
Şekil 4.12 $T=0.8$ s için yalpa sönüm katsayıları	91
Şekil 4.13 $T=0.6$ s için yalpa sönüm katsayıları	91
Şekil 4.14 HAD ile elde edilen toplam yalpa sönüm katsayıları	92
Şekil 4.15 3 derece (a) ve 12 derece (b) yalpa genliği için tekne arkasındaki girdap dağılımı ($F_n=2.6$, $T=1$ s)	92
Şekil 4.16 0.6 saniye (a) ve 1.0 saniye (b) zorlama periyodu için tekne arkasındaki girdap dağılımı ($F_n=2.6$, $\Phi=12$ derece)	93
Şekil 4.17 $F_n=2.2$ (a) ve $F_n=2.6$ (b) ilerleme hızları için tekne arkasındaki girdap dağılımı ($T=1$ s, $\Phi=12$ derece)	93
Şekil 4.18 $F_n=2.2$ (a) ve $F_n=2.6$ (b) ilerleme hızları için tekne altındaki basınç dağılımı ($T=1$ s, $\Phi=12$ derece)	94
Şekil 4.19 Farklı Froude sayılarındaki hidrodinamik kaldırma kuvveti değerleri..	95

TABLO LİSTESİ

Tablo 1.1 Yöntemlerin kullanım sıklığı	2
Tablo 2.1 Sakin su analizleri için kullanılan teknelerin temel özellikleri	20
Tablo 2.2 Farklı kesit sayılarının (100 & 200) hidrodinamik parametreler üzerindeki etkisi	33
Tablo 2.3 Sakin su için HAD fiziksel özellikleri	39
Tablo 2.4 Sakin su için oluşturulan ağ yapılarındaki eleman sayıları	43
Tablo 2.5 Sakin su için belirsizlik değerleri	45
Tablo 2.6 Kullanılan tekne modelleri için % RMS _{HATA} değerleri	55
Tablo 3.1 Kullanılan teknelerin temel özellikleri	58
Tablo 3.2 Baştan gelen düzenli dalgalar için fiziksel özellikler	59
Tablo 3.3 Monohedral teknesinin dalıp-çıkma hareketi için ağ yapısı ve zaman adımı belirsizliği	61
Tablo 3.4 Seçilen Senaryolara İlişkin Özellikler	62
Tablo 3.5 V=3.4 m/s için elde edilen % Hata miktarları	76
Tablo 3.6 V=4.6 m/s için elde edilen % Hata miktarları	76
Tablo 3.7 V=5.75 m/s için elde edilen % Hata miktarları	76
Tablo 3.8 Ortalama % Hata miktarları	77
Tablo 4.1 TB30 teknesinin temel özellikleri	79
Tablo 4.2 Zorlamalı yalpa analizi gerçekleştirilen senaryolar	80
Tablo 4.3 Zorlamalı yalpa analizi için oluşturulan fiziksel modelin özellikleri	83
Tablo 4.4 Oluşturulan ağ yapılarına ilişkin eleman sayıları ve zaman Adımı	86
Tablo 4.5 Zaman Adımı ve Ağ Yapısı Belirsizliği	87
Tablo 4.6 Kullanılan yöntemlerdeki ortalama %hata miktarları	95
Tablo 5.1 Kullanılan sayısal yöntemlerin doğruluk mertebeleri ve maliyetleri	99

Kayıcı Teknelerde Denizciliğin Sayısal Olarak İncelenmesi

Emre KAHRAMANOĞLU

Gemi İnşaatı ve Gemi Makineleri Mühendisliği Anabilim Dalı

Doktora Tezi

Danışman: Prof. Dr. Hüseyin YILMAZ

Dünyanın globalleşmesi ile birlikte yalnızca kara ve demiryolu değil aynı zamanda denizyolunda da zaman oldukça önemli bir olgu haline gelmiştir. Bu sebeple yüksek süratli gemiler tasarlamak hem ticari hem de askeri alanda gün geçtikçe önemli hale gelen bir konu olmaya başlamıştır. Bu bağlamda, bu doktora tezi kapsamında kayıcı bir teknenin genel denizcilik performansı farklı sayısal yöntemlerle incelenmiştir.

Giriş bölümünde problem tanıtılmış ve genel literatür araştırması sunulmuştur. Temel literatür araştırmasının ardından sunulan ikinci bölümde sakin suda ilerleyen kayıcı bir teknenin hidrodinamik performansı sıkça kullanılan ampirik bir yöntem, bu çalışmada ortaya konulan hibrit bir yöntem ve günümüzde sıkça kullanılan hesaplamalı akışkanlar dinamiği yöntemleri ile incelenmiştir. İncelenen hidrodinamik parametreler toplam direnç, dinamik trim ve sudan çıkmadır. Elde edilen sonuçlar hem birbiri ile hem de deneysel veriler ile karşılaştırılmıştır. Yapılan analizler neticesinde özellikle geliştirilmiş hibrit yöntemin ön dizayn aşamasında hassasiyet/maliyet oranı açısından oldukça kullanışlı bir yöntem olduğu anlaşılmıştır. Ayrıca, geliştirilen yöntemin kayıcı teknelerin hidrodinamik performansını tahmin etmede yaygın olarak kullanılan ampirik yöntemle iyi bir alternatif olabileceği düşünülmektedir. HAD sonuçlarının ise deney ile oldukça

uyumlu olduğu ve derinlemesine analizler için güvenli bir araç olduğu sonucuna varılmıştır.

Sakin su hidrodinamiğinin incelenmesinin ardından sabit ve değışken kalkıntı açısına sahip iki farklı kayıcı teknenin baştan gelen düzenli dalgalar altındaki dalıp-çıkma ve baş-kıç vurma hareketleri ve baş ivmelenme değıerleri geniş bir frekans aralığında elde edilmiş ve bu değıerler deneysel veriler ile kıyaslanmıştır. Yapılan analizler neticesinde hem hareketlerin hem de ivmelerin HAD yöntemi ile başarılı bir şekilde tahmin edilebildiğı görülmüştür. Bu noktada özellikle deneye göre çok daha geniş şekilde her nevi parametrenin incelenebildiğı bu yöntemlerin deneye iyi bir alternatif olabileceğı düşünölmektedir.

Bir sonraki bölümde ise sakin suda kayıcı rejimde ilerleyen bir kayıcı teknenin tek serbestlik dereceli zorlamalı yalpa analizleri gerçekleştirilmiş ve toplam yalpa sönüm katsayısı hem ampirik bir yöntemle hem de HAD yöntemi ile elde edilmiştir. Yapılan inceleme neticesinde HAD yönteminin bu hidrodinamik problemi de yüksek doğruluk ile temsil edebildiğı görülmüştür. Ayrıca kayıcı rejimde yalpa sönüm katsayısının yalpa genliğı ve yalpa periyodundan kısmen bağımsız hale geldiğı, fakat ileri hız katkısı ile önemli oranda değıştiğı gözlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Kayıcı tekne, hesaplamalı akışkanlar dinamiğı, Zarnick yöntemi, Savitsky yöntemi, hibrit yöntem

Numerical Investigation of the Seakeeping of the Planing Hulls

Emre KAHRAMANOĞLU

Department of Naval Architecture and Marine Engineering

Doctor of Philosophy Thesis

Advisor: Prof. Dr. Hüseyin YILMAZ

With the globalization of the world, time becomes important in terms of transportation not only in road and railway but also in a seaway. Due to this fact, the high-speed vessels' design is becoming an important topic both in commercial and military fields. Within this framework, in the scope of this Ph.D. thesis, the high-speed vessel's seakeeping performance is investigated using different numerical tools.

The problem is defined and the literature review is presented in the first part. Following the literature review part, the hydrodynamic performance of the planing hull is explored in calm water conditions using an empirical method, which is commonly used in the hydrodynamic field, developed hybrid method and computational fluid dynamics methods. The total resistance, dynamic trim and sinkage of the planing hull are examined in the numerical calculations. The results are compared with each other and available experimental data. The numerical results show that the developed hybrid method is found to be a cost-effective and useful tool, particularly for the preliminary design stage. Also, it is considered that the developed method can be an alternative tool for the commonly used empirical approach in the literature. Moreover, CFD results are found to be a good agreement with the experimental data and hence it can be used some confidence for the prediction of hydrodynamic performance of planing hulls.

After the investigation of hydrodynamic performance of planing hull in calm water condition, the pitch & heave motion and acceleration values of two different planing hull, which has constant and variable deadrise angles, are examined in regular head waves. The obtained results are also compared with the experimental data. The results indicate that the motions and accelerations are well predicted with the CFD approach. Therefore, the methods used in this thesis are considered to be alternative ones to the experiment in order to investigate different hydrodynamic characteristics of the planing hull forms.

In the following chapter, the 1 DOF forced roll motion of the planing hull is analyzed and the total roll damping coefficient is obtained by empirical calculation and CFD. It is found that the CFD method predicts those characteristics with good accuracy. In addition, the roll damping coefficient is found to be independent of roll amplitude and roll period in the planing regime. In contrast, it changes considerably with the variation of the advance velocity in the planing regime.

Keywords: Planing hull, computational fluid dynamics, Zarnick method, Savitsky method, hybrid method

1

GİRİŞ

Gemiler üzerlerine etkiyen kaldırma kuvvetine bağılı olarak klasik tipteki deplasman tekneleri, yarı kayıcı tipteki tekneler ve kayıcı tekneler şeklinde sınıflandırılabilir. Bunlar arasında kayıcı tekneler ticari, askeri vb. amaçlarla kullanılmakta ve kullanımları her geçen gün yaygınlaşmaktadır. Bu sebeple bu tarz teknelerin direnç, denizcilik, manevra gibi hidrodinamik problemlere ilişkin performanslarının belirlenmesi önem kazanmış ve bu yönde yapılan çalışmaların sayısı son yıllarda oldukça artmıştır.

Savitsky'nin [1] tanımına göre boyutsuz Froude sayısı 1.2' den büyük olan tekneler kayıcı tekne olarak isimlendirilirken, Faltinsen'e [2] göre ise bu sınır 1.0 olarak kabul edilebilir. Yani ister yuvarlak karinalı ister çeneli olsun, bir teknenin kayıcı tekne sınıfına dâhil olabilmesi için belirli bir limit hız değerinin üzerine çıkması ya da çıkabilmesi gerekmektedir. Bu tarz tekneler belirtilen yüksek hızlara çıktıklarında üzerlerine baskın şekilde etkiyen kaldırma kuvveti sebebiyle klasik tipteki teknelerden farklı bir davranış gösterir. Oluşan bu kaldırma kuvveti nedeniyle bir miktar sudan çıkmasının yanı sıra baş tarafa yakın bölgede tekne altında bir durma noktası oluşur. Bu noktada meydana gelen yüksek basınç bölgesi sebebiyle de tekne bir miktar kışa trim yapar. Yani bir başka deyişle sakin suda ilerlese dahi bu tarz tekneler kayıcı rejimde yüksek miktarda ötelenme ve dönme hareketine maruz kalır. Bütün bunlara ek olarak; ayna kışın kuru kalması, çene hattındaki akım ayrılmaları gibi kuvvetli doğrusal olmayan etkenlerin de birleşmesiyle, bu tip teknelerin hidrodinamik performanslarının belirlenmesi klasik tipteki teknelere göre bir nebze daha zordur yorumu rahatlıkla yapılabilir.

Kayıcı teknelere ilişkin güncel literatür detaylı olarak incelendiğinde çalışmaların hangi yöntemler ile gerçekleştirildiği ve/veya hangi hidrodinamik problemin üzerinde durulduğu incelenerek bir sınıflandırma yapılabilir. Bu çalışmada kayıcı tekneler ile ilgili genel literatür, uygulanan yöntem üzerinden gerçekleştirilen bir sınıflandırma ile özetlenecektir. Güncel literatür incelendiğinde kayıcı tipteki

teknelerin hidrodinamik performanslarının pek çok farklı yöntem ile incelendiği görölse de, kullanılan yöntemler şu şekilde temel sınıflara ayrılabilir:

- Deneysel çalışmalar
- Ampirik yöntemler
- Potansiyel temelli yaklaşımlar
- Hesaplamalı akışkanlar dinamiği uygulamaları

Tablo 1.1 Yöntemlerin kullanım sıklığı

Hidrodinamik Problem	Deneysel Çalışmalar	HAD Yöntemleri	2 Boyutlu Yaklaşımlar	Ampirik Yöntemler
Sakin Su (Direnc, trim, sudan çıkma)	<i>Sık</i>	<i>Sık</i>	<i>Sık</i>	<i>Sık</i>
Düşey Hareket (Denizcilik)	<i>Sık</i>	<i>Seyrek</i>	<i>Sık</i>	<i>Seyrek</i>
Yatay Hareket (Yalpa)	<i>Seyrek</i>	<i>Seyrek</i>	<i>Seyrek</i>	<i>Seyrek</i>

Tablo 1.1’de kayıcı teknelerin hidrodinamik problemlerinde kullanılan yöntemlerin kullanım sıklıkları güncel literatür dikkate alınarak özetlenmiştir. Tablo 1.1’den de anlaşılacağı üzere, sakın su için belirtilen 4 yöntem de sıklıkla kullanılmakta iken, yatay hareket problemi için literatürde belirgin bir açık bulunmaktadır. Düşey hareket problemine bakıldığında ise 2 boyutlu yaklaşımların deneysel çalışmalarla birlikte diğer yöntemlere göre daha sık kullanıldığı göze çarpmaktadır. Kayıcı teknelerde düşey hareket problemini doğrudan temsil edebilecek ampirik bir yöntem olmamasına karşın, yapay sinir ağları (*artificial neural network*) yöntemleri bu kategoriye dahil edilmiş ancak yine de mevcut çalışma sayısının 2 boyutlu yaklaşımlara göre çok daha seyrek olduğu gözlemlenmiştir.

Kayıcı teknelerin genel hidrodinamik performansının incelenebilmesi için yapılacak olan deney tankları kurulum ve işletme açısından oldukça pahalıdır. Ayrıca bu tesisler dünya üzerinde yalnızca belirli araştırma merkezlerinde ya da üniversitelerde mevcuttur. Bu sebeple araştırmacılar zaman içinde yapılan

sistematik deneylerden türetilmiş ampirik (*deneye dayalı*) yöntemler ile kayıcı tipteki teknelerin hidrodinamik performansını belirlemeye çalışmıştır. Oluşturulan bazı ampirik yöntemler oldukça makul sonuçlar verse de çözümün sadece sakin sudaki performansa ilişkin bilgiler içermesi araştırmacıları başka tür yöntemler geliştirmeye itmiştir. Bu noktada bilgisayarların kullanımının yaygınlaşması ile peş peşe yinelenen birçok işlemi içeren algoritmaları hızlı bir şekilde gerçekleştirebilen kodlar türetilmesi, araştırmacıları daha yeni ve makul bir çözüm sunan potansiyel temelli yaklaşımlara itmiştir. 2D+t teorisi de denilen bu yöntem, kayıcı teknelerin düşey hareketlerini düzenli ve düzensiz dalgalar altında yüksek doğrulukta hesaplama imkânı sunmaktadır. Ancak yatay hareketler için bu yöntemin geliştirilmesi ve iyileştirilmesi süreçleri halen devam etmektedir.

Gelişen teknoloji ile birlikte ortaya çıkan iş istasyonları araştırmacıların yeni bir yöntemle doğru yönlenmelerine neden olmuştur. Hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) yöntemleri adı verilen bu yöntemler ise genel olarak sonlu hacimler yöntemine dayanan çözücülerin (*ticari, özgün ya da açık kaynak*), yüksek kapasiteli bilgisayarlarda her nevi akışkan problemine uygulanması esasına dayanır. Yüksek doğrulukla her türden akışkan problemine uygulanabilen bu yöntemlerin kullanım sıklığı gün geçtikçe artmaktadır.

1.1 Literatür Özeti

Kayıcı teknelere ilişkin literatür detaylı olarak incelendiğinde önceki bölümde bahsedildiği gibi çalışmaların hangi yöntemler ile gerçekleştirildiği ve/veya hangi hidrodinamik problemin üzerinde durulduğu incelenerek bir sınıflandırma yapılabilir. Bu çalışmada kayıcı tekneler ile ilgili genel literatür, uygulanan yöntem üzerinden gerçekleştirilen bir sınıflandırma ile özetlenecektir.

İlk olarak yapılan bazı deneysel çalışmalar özetlenecek olup, akabinde ampirik yöntemlerden bahsedilecek ve kullanılan potansiyel ve viskoz çözümler sunan sayısal yöntemlere ilişkin literatür özetlenerek bu kısım son bulacaktır.

Sakin suda ilerlese dahi kayıcı teknelerin yüksek miktarda ötelenme ve dönme hareketlerine maruz kalması, ayna kıçın kuru kalması, çene hattında oluşan akım ayrılmaları gibi nedenlerle bu tip teknelerin hidrodinamik performansları klasik

tipteki teknelerden hayli farklılık gösterir. Bu sebeple araştırmacılar başlangıçta daha çok deneysel temelli çalışmalara ağırlık vermiştir. İlerleyen teknoloji sayesinde farklı teknikler ortaya çıksa da deneysel çalışmalar halen en güvenilir kaynak olarak gösterilebilir. Bu sebeple literatür incelendiğinde geçmişten bu yana yapılmış pek çok deneysel çalışmayla karşılaşmak mümkündür.

Kayıcı teknelerin sakin sudaki hareketlerini deneysel olarak inceleyen bilinen en önemli çalışmalardan biri Fridsma [3] tarafından ortaya konmuştur. Bu çalışmada Fridsma prizmatik tipteki kayıcı teknelerin yalnızca sakin sudaki sistematik deneylerini gerçekleştirmekle kalmamış, aynı zamanda geliştirdiği farklı varyantların da baştan gelen düzenli dalgalar altındaki performansını incelemiştir. Güncel çalışmalarda da halen ortaya konan yöntemlerin veya çalışmaların güvenilirliğini göstermek adına bu çalışma bir kıyas (*benchmark*) çalışması olarak kullanılmaktadır.

Fridsma'nın yaptığı kapsamlı deneylerin yanı sıra, Keuning ve Gerritsma [4] kayıcı teknelerin direnci üzerine bir dizi deney yapıp sonuçları bir rapor halinde yayınlamıştır. Begovic ve Bertorello [5] geliştirdikleri bir tekne ailesinin sakin sudaki negatif batma (*sudan çıkma*), trim ve direnç değerlerini literatüre sunmuştur. De Luca ve Pensa [6], Taunton vd. [7] ve Keuning ve Hillege [8] de birer kayıcı tekne serisi oluşturmuş ve bu tekne serilerinin hidrodinamik performanslarını deneysel yolla incelemiştir. Metcalf vd. [9] benzer bir çalışmayı bu kez yüksek hızlı bir sahil güvenlik tekne ailesi için gerçekleştirmiş ve bu tekne ailesinin sakin su performansını gözler önüne sermiştir. Lee vd. [10] ve Najafi vd. [11] basamak (*step*) konumunun kayıcı teknenin sakin su performansına olan etkisini deneysel yolla incelemiş ve optimal bir basamak yerleşimi ile direncin azaltılabileceğini göstermiştir. Avcı ve Barlas [12] kayıcı tipteki teknelerde interseptör kullanımının sakin su performansına olan etkisini deneysel yolla incelemiştir. Bu tip yapıların belirli Froude sayısı aralığında yararlı olduğunu belirleyen yazarlar, aksi halde olumsuz etkilerin ön plana çıkabileceğini belirtmiştir. Day ve Cooper [13] yine benzer bir çalışmada interseptörlerin tekne performansına olan etkisini detaylı bir şekilde incelemiş ve sonuçları aerodinamik bir mekanizmanın sonuçları ile mukayese etmiştir. Danışman ve Baştuğ [14] ağırlık merkezinin boyuna konumunun

kayıcı teknenin sakin sudaki performansına olan etkisini deneysel yolla incelemiştir. Kimoto vd. [15] kayıcı tipteki bir teknenin farklı ölçekli modellerinin yalnızca sakin sudaki hidrodinamik performansını değil, aynı zamanda statik sürüklenme testlerini de gerçekleştirmiş ve literatüre sunmuştur. Morabito [16] sığ suyun kayıcı teknenin sakin su performansına olan etkisini detaylı bir şekilde incelemiş ve sonuçları derin sudaki sonuçlar ile mukayese etmiştir. Cucinotta vd. [17] tekne altında oluşturdukları hava tabakası ile kayıcı teknenin direncini azaltmak adına parametrik bir çalışma gerçekleştirmiştir. Ghadimi vd. [18] teknenin kıç tarafına yerleştirilen farklı tipteki kamaların (*wedge*) kayıcı teknenin hidrodinamik performansına olan etkisini gözler önüne sermiştir. Gray Stephens vd. [19] kayıcı tipteki bir teknenin arkasında oluşturduğu dalga profilini deneysel yolla incelemiş ve elde ettikleri sonuçları doğrusal teori ve ampirik yöntemlerden elde edilen sonuçlarla mukayese etmiştir.

Sakin suda yapılan deneylerin yanı sıra baştan gelen düzenli ve düzensiz dalgalar altındaki kayıcı teknenin hareketi de deneysel çalışmalara pek çok kez konu olmuştur. Bu çalışmalar; kimi zaman araştırma merkezlerince yapılan bir dizi deneyin sonuçlarının literatüre sunulduğu teknik raporlar şeklinde özetlenirken, kimi zaman ise daha özelleşmiş problemlerin incelendiği bilimsel makaleler şeklinde karşımıza çıkmaktadır.

Molyneux ve Roddan [20] Fridsma'nın kullandığı modelin boy/genişlik oranını değiştirmek suretiyle yeni deneyler gerçekleştirmiştir. Kim vd. [21] belirledikleri 3 farklı tipteki kayıcı teknenin hem sakin su hem de düzenli dalgalar altındaki deneylerini gerçekleştirmiş ve hem direnç hem de denizcilik açısından en uygun modeli belirlemeye çalışmıştır. De Luca ve Pensa [22] ve Taunton vd. [23] önceki çalışmalarında oluşturdukları kayıcı tekne ailelerinin bu kez baştan gelen düzensiz dalgalar altındaki performanslarını incelerken, Begovic vd. [24] benzer bir çalışmayı düzenli dalgalar için gerçekleştirmiştir. Seo vd. [25] serpinti trizlerinin kayıcı teknenin hem sakin su hem de düzenli dalgalar altındaki performansına olan etkisini deneysel yolla incelemiştir. Park vd. [26] kayıcı bir teknenin düşey hareketlerinin kontrol edilebilir interseptörler yardımıyla hem düzenli hem de düzensiz dalgalar altında azaltılabileceğini göstermiştir. Kayıcı teknenin dibine etki eden basıncı

Santoro vd. [27] düzenli dalgalar altında incelerken, Camilleri vd. [28] ise benzer bir çalışmayı tam ölçekli bir kayıcı tekne için düzensiz dalgalar altında incelemiştir. Soletic [29] oluşturduğu farklı kayıcı tekne varyantlarının hem sakin su hem de karışık deniz performanslarını deneysel yolla belirlemiş ve sakin su performansını ampirik ifadeler ile karşılaştırmıştır. Judge [30] meyilli durumdaki bir kayıcı tekneye etki eden hidrodinamik kaldırma kuvvetini deneysel yolla elde etmiş ve yalpa hareketinin dalıp-çıkma hareketi üzerindeki etkisini gözlemlemiştir.

Kayıcı teknelerin denizciliği ile ilgili yapılan deneysel çalışmalar sakin su ve baştan gelen dalgalarındaki dalıp-çıkma ve baş-kıç vurma hareketlerinin incelendiği alana doğru yoğunluk göstermesine karşın, bu tip teknelerin yalpa hareketine ilişkin deneysel çalışmalar da literatürde kendine yer bulmaktadır. Savitsky vd. [31] kayıcı teknelerin yalpa hareketine ilişkin öncü çalışmalar gerçekleştirmiştir. Çeneli tipte kayıcı bir tekneye etki eden yalpa momentini ve basıncı ölçen yazarlar, hidrodinamik basıncın yalpa hareketi üzerinde oldukça etkili olduğunu belirtmiştir. Brown ve Klosinski [32]-[33] kayıcı teknelere etki eden yalpa, baş-kıç vurma ve savrulma momentlerini deneysel yolla elde etmiştir. Brown ve Klosinski [34] bir sonraki çalışmalarında deney sonuçlarından elde ettikleri veriler ile yalpa hareketine ilişkin sönüm ve ek kütle katsayılarını tahmin etmeye yönelik ampirik bir ifade ortaya koymuştur. Ikeda ve Katayama [35] kayıcı bir teknenin tek serbestlik dereceli zorlamalı yalpa hareketini deneysel yolla incelemiştir. Elde edilen sonuçları Ikeda'nın ampirik yöntemi ile kıyaslayan yazarlar, ölçülen değerlerin yöntemden elde edilen değerlerden daha yüksek olduğunu ve bunun temel nedeninin de Ikeda'nın yönteminin hidrodinamik kaldırma kuvvetini iyi tahmin edememesi olduğunu belirtmiştir. Bu sebeple; Savitsky yönteminden elde edilecek bir kaldırma kuvveti değeri ile yöntemin iyileştirilebileceğini belirten araştırmacılar, elde ettikleri mevcut deneysel veriler yardımıyla yarı ampirik bir yöntem ortaya koymuş ve sonuçların deney ile oldukça uyumlu olduğunu belirtmiştir. Katayama vd. [36] bu kez hidrodinamik kaldırma kuvvetinin Payne'nin yaklaşımı ile bulunduğu bir yöntem önermiş ve sonuçlarını deneysel veriler ile kıyaslamıştır. Begovic vd. [37] aynı hidrostatik özelliklere sahip biri çeneli bir diğeri yuvarlak karınalı iki kayıcı teknenin serbest yalpa hareketini (*roll decay*) deneysel yolla incelemiş ve her iki tekneye ait yalpa sönüm katsayılarını ileri hız katkısının

var olduğu ve olmadığı durumlarda inceleyerek birbiri ile karşılaştırmıştır. Judge ve Judge [38] kayıcı bir teknenin zorlamalı yalpa hareketine ilişkin deneyler gerçekleştirmiş ve frekans, yalpa genliği, deplasman gibi parametrelerin yalpa hareketine ilişkin katsayılara olan etkisini gözlemlemiştir.

Özetlenen deneysel çalışmalar göz önüne alındığında yatırım ve işletme maliyetinden kaynaklı olarak bu yöntem tasnif edilen yöntemler arasındaki en pahalı yöntemdir. Ayrıca bu tarz çalışmalarda elde edilmek istenen çıktıya göre yeni bir ölçüm sistemi tasarlamak, bu ölçüm sistemindeki belirsizlikler, kalibrasyon sıkıntıları gibi zorluklar bu yöntemlerin dezavantajları olarak gösterilebilir. Genel olarak deney çıktılarının kuvvet ve hareket olduğu düşünülürse, her nevi hidrodinamik probleme ilişkin genel bir bakış açısına güvenli bir şekilde erişilebilmeye imkan vermesi ise yöntemin en önemli avantajı olarak öne çıkmaktadır.

Kayıcı teknelere ilişkin güncel literatürde en çok karşılaşılan yöntemlerden biri de deney sonuçlarından türetilen ampirik yöntemlerdir. Bu yöntemlerin ortaya çıkış nedeni, geliştirilen her form için bir dizi deney yapmak yerine tüm kayıcı tekne formlarını genel bir bakış açısı ile değerlendirmeye imkan veren bir metodoloji oluşturma çabasıdır. Zira bu yöntemde elde edilen ifadeler, denklemler vs. deneysel çalışmalar ve/veya analitik ifadelerin birleştirilmesi yoluyla elde edilmektedir. Bu maksatla yapılan çalışmalardan en bilineni Savitsky [39] tarafından ortaya konmuştur. Günümüzde de halen ön tasarım aşamasında sıklıkla kullanılan bu yöntem, ana değerleri bilinen kayıcı bir teknenin sakin suda ilerlerken üzerine etkiyecek olan direnç kuvvetinin ve dinamik trim değerinin hesaplanabileceği, uygulaması kolay ampirik bir yöntemdir. Sonraki yıllarda Savitsky ve Brown var olan bu çalışmayı bir adım daha ileriye taşıyarak ek direnç için de yaklaşık bir yöntem öne sürmüştür [40]. 2007 yılında ise yine Savitsky vd. [41] var olan ampirik yöntem, eksik olduklarını düşündükleri ve zaman zaman toplam direncin %15'ine kadar çıkabildiğini belirttikleri serpinti (*whisker spray*) direnci bileşenini eklemiştir.

Shuford [42] kayıcı tekneler ile ilgili olarak yaptığı çalışmada, bu teknelerin hidrodinamik performansının belirlenmesi amacıyla yarı ampirik bir teori ortaya atmış ve teoriden elde edilen sonuçların deney ile uyumlu olduğunu gözlemlemiştir.

Savitsky ve Morabito [43] kayıcı rejimde oluşan serpintiyi açıklamak için ampirik ifadelerin kullanıldığı bir çalışma gerçekleştirmiş ve elde edilen sonuçlar mevcut deneysel veriler ile mukayese edilmiştir.

Savitsky yönteminin bilinen en temel eksikliklerinden biri yöntemin sabit kalkıntı açısına sahip tekneler için üretilmiş olmasıdır. Bu zaafı ortadan kaldırabilmek adına, Bertorello ve Oliviero [44] kalkıntı açısı boy doğrultusunca değişen tipteki (*warped*) kayıcı teknelerde de uygulanabilen temelde Savitsky yöntemine dayanan bir yöntem ortaya atmıştır. Schachter vd. [45] yine temelde Savitsky yöntemine dayanan ancak ismine VPH (*Virtual Prismatic Hulls*) yöntemi dedikleri yeni bir matematiksel model oluşturmuş ve sonuçları mevcut deneysel veriler ile karşılaştırmıştır. Ghassemi vd. [46] temeli Savitsky yöntemine dayanan bir matematiksel model ile trim-tab mekanizmasının kayıcı teknenin sakin su performansına olan etkisini incelemiştir. Dashtimanesh vd. [47] iki basamaklı kayıcı bir teknenin trim ve direnç değerlerini hesaplayabilmek adına Savitsky yöntemini ve lineer dalga teorisini birleştiren bir yöntem ortaya koymuştur. Tekne altındaki 3 boyutlu dinamik basınç dağılımını temsil edebilmek adına Morabito [48] ampirik bir yöntem önermiştir. Ghadimi vd. [49] Morabito'nun önerdiği bu yöntemi bir bilgisayar programı haline getirmiş, Pennino vd. [50] Morabito'nun yöntemini kullanarak elde ettikleri denge eşitlikleri ile kayıcı rejimde tekneye etki eden direnç, dinamik trim, hidrostatik ve hidrodinamik basınç bileşenlerini hesaplamıştır.

Bu çalışmaların yanında yapay sinir ağları yöntemi ile sakin sudaki kayıcı tekne performansını inceleyen çalışmalar da literatürde kendine yer bulmaktadır. Bu çalışmalarda literatürde mevcut deneysel sonuçları olan kıyas teknelerinin deneysel sonuçları üzerinden oluşturulan matematiksel modeller ile bir nevi yeni ampirik ifadeler türetilmiştir [51]–[54]. Rosen vd. [55] risk yönetimi yaklaşımının ana unsuru olarak düşey ivmelenmenin seçildiği ve ivmelerin yarı ampirik formüller kullanılarak elde edildiği bir çalışma gerçekleştirmiştir.

Ampirik yöntemler, uygulaması kolay olan ve cevap süresi açısından oldukça avantajlı yöntemler olmalarına karşın, genel olarak sakin suda geçerliliklerini koruyan yöntemlerdir. Bununla birlikte teknelerden elde edilen sonuçlar genel anlamda klasik tipteki bir bakış açısını yansıttığı için, daha özgün tasarımlı ya da

klasik tipteki kayıcı teknelerden farklı özellikler barındıran tekneler için geçerliliklerini yitirebilmektedir.

Kayıcı teknelerin yalnızca sakin suda değil dalgalar altındaki hidrodinamik performansı da, üzerlerine baskın bir şekilde etkiyen hidrodinamik kaldırma kuvveti ve daha önce belirtilen ayna kıçın kuru kalması, çenede mevcut akım ayrılmaları vb. nedenlerle klasik tipteki teknelerden farklılık gösterir. Dolayısıyla klasik tipteki teknelerin denizcilik performansı için kullanılan klasik doğrusal dilim teorisi gibi yöntemler, kayıcı tip tekneler için yetersiz kalmaktadır. Ayrıca yukarıdaki kısa özetten de anlaşılabilceği gibi ampirik ya da yarı ampirik ifadelerin genel olarak teknenin sakin su performansını tahmin etmede kullanılabilir olması da eklenince, araştırmacılar alternatif yollar aramaya başlamıştır. Bu yolların en temeli olarak 2 boyutlu yaklaşımlar gösterilebilir. Bu çalışmalarda 3 boyutlu tekne geometrisi 2 boyutlu kesitlere indirgenir ve her bir kesite etki eden kuvvetlerin bulunmasının ardından herhangi bir sayısal entegrasyon tekniği ile 3 boyutlu tekneye etki eden kuvvet ve momentler bulunur. Daha sonra oluşturulan doğrusal olmayan matematiksel modeldeki yönetici denklemlerde bu ifadelerin yerine konması ile problem çözülebilir hale gelir.

Kayıcı teknelerin hidrodinamiğini tahmin edebilmek için gerçekleştirilen 2 boyutlu çalışmaların mihenk taşı olarak Zarnick' in çalışmaları gösterilebilir. Bu çalışmalarda Zarnick baştan gelen düzenli ve düzensiz dalgalar altında kayıcı bir teknenin düşey hareketlerini (*baş-kıç vurma ve dalıp-çıkma*) doğru şekilde temsil edebilen bir matematiksel model ortaya koymuştur [56]-[57]. Bu yöntem ile birlikte 3 boyutlu problem 2 boyutlu suya giriş problemine dönüşür ve teknenin dalıp-çıkma ve baş-kıç vurma performansı birleşik hareket olarak hesaplanabilir. Zarnick'in yöntemi her ne kadar baştan gelen düzenli ve düzensiz dalgalar için ortaya atılsa da, bu yöntem uygun kabuller altında kayıcı teknenin sakin su performansı için de kullanılabilir. Daha önce de bahsedildiği gibi kayıcı teknelerde gözlemlenen çenede akım ayrılması ve ayna kıçın kuru kalması gibi olaylar sebebiyle, kayıcı rejimde hidrostatik kaldırma kuvveti tam olarak gözlenmez. Bu sebeple Zarnick kuvvet dengesi yazılırken bu etkileri dikkate alabilmek adına hidrostatik kuvvet ve moment değerlerinin 0.5 ile çarpılmasını önermiştir. Ancak bu katsayının bazı teknelerde

yeterli olmadığı sonraki çalışmalarda belirtilmiştir. Bu çalışmalardan ilerleyen kısımda bahsedilecektir.

Potansiyel temelli yaklaşımlarda en önemli noktalardan biri 2 boyutlu kesitin ek kütlelerinin doğru bir şekilde elde edilmesidir. Payne [58] yaptığı çalışma ile 2 boyutlu yaklaşımlarda kesite ait ek kütle hesabına ilişkin bir model ortaya koymuştur. Günümüzde halen pek çok 2 boyutlu matematiksel model ile gerçekleştirilen çalışmalarda kesit ek kütle hesabı bu yöntem ile elde edilmektedir. Martin [59] yaptığı çalışmada kayıcı rejimde trim açısının tahmin edilebildiği matematiksel bir model oluşturmuştur. Algarin ve Tacson [60]-[61] simetrik ve asimetrik suya giriş problemi için bir matematiksel model ortaya koymuştur. Ghadimi vd. [62]-[63] Algarin ve Tacson'ın yöntemine dayanan bir matematiksel model ortaya koymuş ve oluşturdukları modeli pek çok kıyas (*benchmark*) teknesi ile doğrulamıştır. Benzer bir matematiksel model ile Bilandi vd. tek ve iki basamaklı kayıcı bir teknenin sakin su performansını incelemiş ve sonuçları deneysel veriler ile mukayese etmiştir [64]-[65]. Tavakoli vd. [66] yine benzer bir model ile bu kez kayıcı bir teknenin statik sürüklenme analizini gerçekleştirmiştir. Kim vd. [67] oluşturdukları 2 boyutlu bir matematiksel model yardımı ile yarı deplasman tipindeki bir teknenin yüksek hızdaki performansını incelemiş, Garne'nin [68] önerdiği azaltma fonksiyonundaki ampirik katsayısının doğruluğu üzerine de parametrik bir çalışma gerçekleştirmiştir. Tavakoli vd. [69] durgun halden ivmeli bir hareketle kalkış yapan kayıcı teknenin hidrodinamik performansını 2D+t teorisine dayanan 3 serbestlik dereceli bir matematiksel model ile incelemiştir. Sun ve Faltinsen [70] sınır elemanları yöntemi ve 2D+t teorilerini birleştiren bir matematiksel model ile kayıcı teknelerin sakin su performansını incelemiş ve elde ettikleri sonuçları deneysel veriler ile mukayese etmiştir. Allaka ve Groper [71] 2 boyutlu bir yaklaşım ile tam ölçekli bir kayıcı teknenin sakin su performansını gözler önüne sermiştir.

Güncel literatürde, sakin suda gerçekleştirilen analizlerin yanında Zarnick gibi 2 boyutlu yöntemlerin baştan gelen düzenli ve düzensiz dalgalar altındaki tekne performansını belirlemek adına kullanıldığı pek çok çalışma kendisine yer bulmaktadır. Martin [72] baştan ve kıçtan gelen dalgalarda kayıcı bir teknenin düşey hareketlerinin hesaplanabildiği bir matematiksel model ortaya koymuş ve

modelden elde edilen sonuçları mevcut deneysel veriler ile mukayese etmiştir. Kanyoo vd. [73] Zarnick'in ortaya koyduğu matematiksel model ile kayıcı bir teknenin hem sakin su hem de baştan gelen düzenli dalgalar altındaki performansının incelenemediği bir matematiksel model oluşturmuştur. Ortaya koydukları matematiksel modelde hem Zarnick'in önerdiği katsayı düzeltmesini hem de Garne'nin önerdiği azaltma fonksiyonunu kullanan yazarlar, zaman adımı, kesit sayısı gibi pek çok parametrenin de olayın fizikine olan etkisini detaylı bir şekilde incelemiştir. Akers [74] temelde Zarnick'in yöntemine dayanan ve doğrusal olmayan bir matematiksel model ortaya koymuştur. Matematiksel modelinin doğrulama çalışmasını Fridsma [3] teknesinin sakin su deneyleri ile gerçekleştiren araştırmacı, yöntemde mevcut hidrostatik kuvvet ve moment katsayılarını ise sakin su deney sonuçlarını baz alarak belirlemiştir. van Deyzen [75] yine Zarnick'in metodunu temel alan ve Keuning'in [76] gerekli gördüğü düzeltmeleri de içeren bir model ortaya koymuştur. Hosseinzadeh vd. [77] yine aynı yöntemine dayanan bir matematiksel model oluşturmuş ve modelin doğrulama çalışması için kendi yaptıkları ve form olarak Fridsma teknesi ile neredeyse özdeş bir form kullanmıştır. Ayrıca bu çalışmada araştırmacılar 2 boyutlu kesitin ek kütle hesabında kullanılan ampirik katsayı için bir düzeltme önermiştir. Bu çalışmalara benzer olarak baştan gelen düzenli ve düzensiz dalgalar altındaki kayıcı teknenin hareketine ilişkin pek çok çalışma literatürde bulunabilir [78]–[82]. Haase vd. [83] ve Meng ve Qiu [84] sınır elemanları yöntemine dayanan 2 boyutlu bir matematiksel model ile dalgalar altında ilerleyen kayıcı teknenin düşey hareketlerini incelemiştir. Sun ve Faltinsen [85] sınır elemanları yöntemi ile temellendirdikleri 2 boyutlu yaklaşımlarında, rezonans frekansında meydana gelen kuvvetli doğrusal olmayan davranışları daha iyi gözlemleyebilmek için “3 boyut düzeltmesi” adını verdikleri bir düzeltme önermiştir. Faltinsen ve Zhao [86] ile Sun ve Faltinsen [87] 2 boyutlu yaklaşımla kayıcı bir teknenin ek kütle ve sönüm katsayılarını hesaplamıştır. Arribas ve Fernandez [88] yüksek hızlı teknelerde geçerliliğini yitiren Salvensen vd. [89] tarafından ortaya atılan klasik dilim teorisindeki terimleri geliştirerek, yüksek hızlı teknelerde de kullanılabilecek 2 boyutlu bir model ortaya koymuştur. Ghadimi vd. [90] Algarin ve Tacson'ın yöntemini temel alan bir matematiksel model ile belirli bir meyil açısında seyreden kayıcı teknelerin hidrodinamik performansını incelemiştir.

Tavakoli vd. [91] meyilli durumdaki kayıcı teknenin baştan gelen düzenli dalgalar altındaki hidrodinamik katsayılarını 2D+t teorisi ile belirlemiştir.

Potansiyel temelli yaklaşımların neredeyse tamamında 3 boyutlu teknenin, 2 boyutlu kesitlere indirgenmesi ve kesitlerin birbiri ile etkileşiminin göz ardı edilmesi durumu mevcuttur. Bu durum yöntem için başlı başına çok önemli bir zaaftır. Ayrıca Zarnick'in ortaya attığı yöntemdeki katsayı belirsizliği Garne'nin önerdiği azaltma fonksiyonu ile çözülebilir görünse de, 3 boyutlu etkileşimler olaydaki baskın doğrusal olmayan etkenlere katkı verebilmekte, bu da çözümün zaman zaman gerçek dışı bir noktaya gitmesine sebebiyet vermektedir. Yine de bahsedilen bu dezavantajlarına karşın, bu yöntemler hızlı ve genel bakış açısı olarak teknenin hem sakin su hem de dalgalı deniz durumundaki davranışı hakkında bir fikir sahibi olunmasını sağlamaktadır.

Son yıllarda gelişen bilgisayar teknolojisi ile birlikte gemi etrafındaki viskoz akışı sonlu hacimler yöntemi ile ayrıklaştırarak çözen hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) uygulamaları, her çeşit akışkanlar mekaniği probleminde olduğu gibi gemi hidromekaniği alanındaki problemlerde de sıklıkla kullanılmaya başlanmıştır. Kayıcı teknelerin hem sakin su hem de dalgalı durumdaki hareketlerini HAD yaklaşımları ile inceleyen pek çok çalışma literatürde kendine oldukça geniş bir alanda yer bulmakta ve bu çalışmaların sayısı gün geçtikçe artmaktadır.

De Luca vd. [92] ve Mancini vd. [93] kayıcı teknelerin sayısal analizinde uygulanan doğrulama ve belirsizlik çalışmalarını derlemiş ve örnek kayıcı teknelere uygulamıştır. Bu çalışmalarda ayrıca; HAD yaklaşımları ile kayıcı tekne performansı belirlenirken hangi tür ağ yapılarının kullanılmasının daha iyi olduğu, çözüm yöntemi olarak neyin seçilmesinin hatayı azalttığı gibi sorulara da karşılaştırmalı bir çalışma ile cevap aranmıştır. Sukas vd. [94] kayıcı bir tekne formunun sakin sudaki hidrodinamik performansını HAD ile incelemiştir. Hareketli ağ yapısı (*Overset*) ile oluşturulan çözüm tekniğinin yüksek Froude sayılarında, sabit ağ yapısının (*rigid body motion*) tekniğinin ise düşük Froude sayılarında daha iyi sonuç verdiğini belirten yazarlar, Savitsky metodunun da bazı durumlarda toplam direnci doğru tahmin etmesine karşın direnç bileşenlerini yeterince hassas hesaplayamadığını göstermiştir. Frisk ve Tegehall [95] kayıcı bir teknenin sakin sudaki hidrodinamik

performansını iki farklı ticari kod (*STAR-CCM+ & Ansys Fluent*) kullanarak incelemiş ve sonuçları deneysel veriler ile karşılaştırmıştır. Yapılan çalışmada STAR-CCM+ sonuçlarının deney ile oldukça uyumlu olduğu gözlenmiştir. Fluent ile sadece bir durum için inceleme yapılmış ve toplam direnç değerinin daha iyi tahmin edilmesine rağmen negatif batma (*sudan çıkma*) ve dinamik trim değerlerinin diğer ticari programa göre deneyden daha uzak sonuçlar verdiği gözlenmiştir. Pennino vd. [96] Morabito yönteminden elde ettikleri tekne altındaki basınç dağılımı ile HAD yaklaşımından elde ettikleri sonuçları karşılaştırmış, daha sonra ise elde edilen basıncın entegrasyonu ile kayıcı teknenin sakin su performansını elde ederek, bu değerleri HAD ile elde edilen sonuçlar ile mukayese etmiştir [97]. Wei vd. [98] 4 farklı dalga yarıcı (*wave piercing*) kayıcı tekne modelinin sakin su performanslarını bir kıyas teknesi için deneysel veriler ile doğruladıktan sonra HAD yöntemini kullanarak birbiri ile karşılaştırmıştır. Duman vd. [99] yuvarlak karinalı kayıcı bir formun HAD ile sakin su analizlerini hem sabit hem de hareketli ağ yapısı ile gerçekleştirmiş ve sonuçları deneysel veriler ile karşılaştırmıştır. De Marco vd. [100] basamaklı (*stepped*) bir kayıcı teknenin sakin sudaki direnç analizlerini deneysel ve sayısal yolla gerçekleştirmiştir. Sayısal çalışmada iki farklı yaklaşım olarak RANS (*Reynolds Averaged Navier-Stokes*) ve LES (*Large Eddy Simulation*) ile iki farklı ağ yapısı (*overset ve morphing*) tekniği kullanan yazarlar, elde ettikleri sonuçları direnç, negatif batma ve dinamik trim açısından deneysel sonuçlar ile mukayese etmiştir. Sonuç olarak hareketli ağ yapısının (*overset*) daha iyi sonuç verdiğini gözlemlemişlerdir. Ponzini vd. [101] web tabanlı bir yazılım ile HAD analizlerinin otonom hale getirilebildiğini göstermiştir. Bunların yanında yine basamaklı tipteki bir kayıcı teknenin sakin su performansının hesaplamalı akışkanlar dinamiği yardımı ile incelendiği ve elde edilen sonuçların deneysel ve/veya 2 boyutlu yaklaşımlar ile karşılaştırıldığı pek çok çalışma literatüre sunulmuştur [102]–[112]. Kazemi ve Salari [113] ve Duman vd. [114] farklı yükleme koşullarının kayıcı teknenin sakin su hidrodinamiğine olan etkisini incelemiştir. Villa vd. [115] ve Duan vd. [116] OpenFoam yardımı ile direnç analizleri gerçekleştirmiş ve sonuçlarının deney sonuçları ile uyumlu olduğunu göstermiştir. Bu çalışmaların dışında kayıcı teknelerin sakin sudaki hidrodinamik performansının

HAD ile incelendiği ve sonuçların deneysel veriler ve/veya ampirik yöntemler ile kıyaslandığı pek çok çalışma da literatürde bulunabilir [117]–[124].

Masumi ve Nikseresht [125] kayıcı bir teknenin sakın sudaki hidrodinamik performansının yanında yunuslama hareketini de HAD yardımı ile incelemiştir. Yine benzer bir çalışmada Duan vd. [126] bir uçağın sakın su üzerinde yapacağı yunuslama hareketini OpenFoam yardımı ile incelemiştir. Özüm [127] ve Mehdiyev [128] hesaplamalı akışkanlar dinamiği ve yardımı ile kayıcı bir teknenin formunu optimize etmeye çalışmıştır. Mansoori vd. [129]–[130] ve Suneela vd. [131] interseptör yardımı ile kayıcı teknenin sakın su performansının nasıl iyileşebileceğini hesaplamalı akışkanlar dinamiği yardımı ile göstermiştir. Yousefi vd. [132] kayıcı bir teknenin iki yanına tüneller açmak suretiyle mevcut tekneyi bir katamaran formuna evirmiştir. Elde ettikleri sayısal sonuçları Savitsky yöntemi ile karşılaştıran yazarlar, sakın suda orijinal forma göre daha düşük bir direnç değeri elde etmiştir. Jiang vd. [133] kayıcı formdaki bir katamaranın sakın su performansını hem deneysel hem de sayısal yolla; Roshan vd. [134] ise yalnızca sayısal yolla incelemiştir. Matveev ve Morabito [135] yaptıkları çalışmada negatif kalkıntı açısına sahip kayıcı teknelerin daha yüksek kaldırma kuvveti üretebildiğini sayısal yolla göstermiştir.

Görüldüğü üzere kayıcı teknelerin sakın su performansını tahmin etmede HAD yaklaşımları oldukça sık bir biçimde kullanılmaktadır. Yöntemin uygulanması için gerekli olan bilgisayar teknolojisinin yanı sıra başka problemler de araştırmacıların çalışmalarına konu olmaktadır. Kayıcı teknelerin çift fazlı hesaplamalı akışkanlar dinamiği yardımı ile gerçekleştirilen analizlerinde sayısal ventilasyon problemi (*numerical ventilation problem*) denilen bir problemle araştırmacılar sıklıkla karşılaşmaktadır. Bu problem, durma noktasından itibaren hava partiküllerinin serbest su yüzeyinin altına girmesi ile birlikte tekneyi sanki bir hava yağlamalı bir tekne haline getirir ve gerçekte var olmayan bu durum ile birlikte teknenin direnç değeri olması gerekenden oldukça az bir şekilde hesaplanır. Bu problem negatif batma ve dinamik trimde herhangi bir sorun teşkil etmezken yalnızca sınır tabaka içindeki kayma gerilmelerini azaltır ve gemi hareket doğrultusunda ölçülen sürtünme direnci, olması gerekenden çok daha az bulunur.

Avcı ve Barlas [136] akışkan hacmi metodunda (*VOF*) yaptıkları faz değişimi ile bu problemi ortadan kaldıran bir metodoloji ortaya koymuştur. Bu metodoloji ile birlikte HAD analizlerinde dirençte meydana gelen hata ortadan kalkarken, yöntemin dezavantajı olarak analiz birkaç zaman adımından öteye ilerletilemez ve bu eksiklik yöntemin sadece sakin suda geçerli olmasına neden olur. Cucinotta vd. [137]-[138] hava yağlamalı bir kayıcı teknenin hem deneysel hem de HAD yardımıyla, Du vd. [139] ise yalnızca HAD yardımıyla sakin su hidrodinamik performansını incelemiş ve sonuçların birbiri ile oldukça uyumlu olduğunu gözlemlemiştir. Doğru bir şekilde teknelerini modellemeyi başaran araştırmacılar sayısal ventilasyon problemi (*NVP*) ile karşılaşmamıştır. Mancini [140] doktora tezinde kayıcı bir teknenin sakin sudaki hidrodinamik performansının sayısal bir çözücü ile belirlenirken karşılaşılan tüm problemleri derlemiş ve her bir problemin çözümü için mevcut yöntemleri de içeren bir çalışma ortaya koymuştur. Bu çalışmada Böhm'ün [141] çalışmasına da atıfta bulunularak sayısal ventilasyon probleminin önüne geçebilecek pek çok metod irdelenmiş ve nihayetinde suni sindirme (*artificial suppression*) yönteminin diğer yöntemlere göre daha iyi sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir. Gray-Stephens vd. [142] literatürde mevcut sayısal ventilasyon problemi çözüm yöntemlerini derlemiş ve yeni bir yöntem daha önererek sayısal çözücüdeki farklı parametrelerin çözüme etkisini göstermiştir.

Tablo 1.1'de de belirtildiği üzere HAD yöntemini kullanan çalışmalar genel olarak kayıcı teknelerin sakin su karakteristiğini belirlemede kullanılmasına rağmen, dalıp-çıkma, baş-kıç vurma ve/veya yalpa hareketine ilişkin çalışmalara literatürde rast gelmek de mümkündür. Masumi ve Nikseresht [143] kayıcı bir teknenin baştan gelen düzenli dalgalar altındaki performansını hem sığ hem de derin suda direnç açısından incelemiştir. Fu vd. [144] benzer bir çalışmayı hem düzenli hem de düzensiz dalgalar için gerçekleştirmiştir. Mousaviraad vd. [145] kayıcı tekneler ile ilgili çok kapsamlı bir çalışma gerçekleştirmiştir. Bu çalışmada Fridsma teknesini sakin suda hem derin hem de sığ sudaki performansını inceleyen araştırmacılar ayrıca tekneyi trim ve negatif batma yönünde kısıtlayıp analizleri tekrarlamışlardır. Bununla yetinmeyen araştırmacılar, derin ve sığ suda kayıcı teknenin hem düzenli hem de düzensiz dalgalar altındaki hareketlerini yüksek doğrulukla temsil etmiştir. Kumar vd. [146] HAD yardımıyla sakin su analizlerini gerçekleştirdikleri ve

deneysel veriler ile sonuçlarını doğruladıkları kayıcı tekneye düzenli dalgalar altında etki eden basıncı hesaplamıştır. Judge vd. [147], [148] derin V tipindeki bir kayıcı teknenin hem sakin suda hem de dalgalı durumdaki hidrodinamik performansını HAD yardımı ile yüksek doğrulukla hesaplamış ve sonuçlarını kendi gerçekleştirdikleri deneyler ile karşılaştırmıştır. Esfandiari vd. [149] basamaksız ve iki basamaklı kayıcı bir formun düzenli dalgalar altındaki hareketlerini incelemiş ve sonuçları birbiri ile mukayese etmiştir. Aktas vd. [150] gerçek ölçekli yüksek hızlı bir teknenin baştan gelen düzenli dalgalar altındaki hareketlerini HAD yardımı ile incelemiştir. Ling ve Wang [151] ve Wang vd. [152] baştan gelen düzenli kayıcı bir teknenin baştan gelen dalgalar altındaki performansını sayısal yolla incelemiştir ve hem hareketleri hem de ivmeleri yüksek doğrulukla hesaplamıştır. Bi vd. [153], [154] baştan gelen düzenli dalgalar altındaki kayıcı teknenin denizcilik performansını sayısal yolla incelemekle kalmayıp, farklı tasarımlar ile denizcilik performansının iyileşebileceğini HAD yardımı ile göstermiştir. Yıldız vd. [155] kayıcı bir teknenin zorlamalı yalpa analizini hem deneysel yolla hem de HAD ile incelemiş ve yalpa sönümünde en baskın terimin hidrodinamik kaldırma kuvvetinden geldiğini göstermiştir.

Bu kısımda bahsedilen tekniklerin kullanıldığı çalışmaları Yousefi vd. [156] kapsayıcı bir şekilde derlemiştir. Bunların dışında literatürde SPH, istatistiki yöntemler, sınır elemanları metodu gibi farklı yöntemlerin kullanıldığı kayıcı tekne çalışmaları da mevcut olmasına karşın, bu tez çalışmasının literatür özetinde bu çalışmalara yer verilmemiştir.

1.2 Tezin Amacı

Bu doktora tez çalışmasının amacı kayıcı bir teknenin genel denizcilik performansını sayısal yolla incelemek ve problemlerin çözümünde kullanılabilir metodolojiler ortaya koymak ve bazı noktalarda özgün çözümler geliştirmektir. Bunun yanında uygulanan farklı sayısal yöntemleri birbiri ile mukayese ederek yöntemlerin birbirine göre avantaj ve dezavantajlarını göz önüne sermektir.

1.3 Hipotez

Gemi hidromekaniği alanında bir geminin performansını inceleyebilmek adına var olan en güvenilir yöntemlerin başında deneysel yöntemler gelmektedir. Ancak bu alanda yapılacak olan deneysel çalışmalar için gerekli tesis altyapısının oluşturulmasındaki yatırım maliyeti, ölçüm sistemlerinin hazırlanması, işletme maliyeti, uzman personel temini vb. nedenler bu yöntemleri zaman zaman ulaşılamaz bir konuma yerleştirmektedir. Bu sebeple bu alanda yapılan çalışmalarda deneysel yöntemlere alternatif olarak sayısal yöntemlerin kullanılması, deneysel yöntemlerdeki bu zorlukları ciddi oranda azaltmaktadır. Bu yöntemler; deneysel verilere bağlı oluşturulan ampirik yöntemler, potansiyel temelli yaklaşımlar ya da hesaplamalı akışkanlar dinamiği yaklaşımları olabilmektedir. Yöntemlerin tamamı doğru bir şekilde sonuç verdiğini ispatlayabilmek için deneysel veriye ihtiyaç duysa da, birkaç senaryo için yapılan ispatın ardından farklı senaryolar rahatlıkla yukarıda bahsedilen zorluklar olmadan incelenebilmektedir. Bu durum da sayısal yöntemleri deneysel çalışmalar için iyi bir alternatif haline getirmektedir.

Sakin suda ilerleyen bir kayıcı teknenin hidrodinamik performansı ampirik bir yöntem ile (*Savitsky yöntemi*) makul seviyede bir doğruluk mertebesinde incelenebilse de, zaman zaman trim hesabında ciddi oranda hatalar yapılabilmektedir. Bunun yerine trim ve sudan çıkma değerini daha doğru bir şekilde hesaplayabilen bir potansiyel temelli yaklaşım ile (*Zarnick yaklaşımı*) bu sorun ortadan kalkabilir. Akabinde bulunan değerleri kullanarak yapılan direnç hesabında yine makul bir doğruluk seviyesinde tahmin yapılabilir. Böylece yalnızca direnç değil aynı zamanda trim ve sudan çıkma değerleri de makul seviyelerde tahmin edilmiş olur.

Tek serbestlik dereceli yalpa hareketinde toplam yalpa sönüm katsayısı için de var olan ampirik bir yöntem (*Ikeda yöntemi*), kayıcı tekne için baskın kuvvetlerin bir başka ampirik yöntem ile (*Savitsky yöntemi*) hesaplanarak birleştirilmesi ile kolayca hesaplanabilir. Bu bütünleşik yöntem ile toplam yalpa sönüm katsayısı belirli bir doğruluk mertebesinde incelenebilir. Ampirik ve potansiyel temelli yaklaşımların yanı sıra doğadaki pek çok doğrusal olmayan etkiyi göz önüne alarak hesaplama

imkânı sunan HAD yaklaşımları ise sakin su ve toplam yalpa sönüm katsayısı hesabının yanında, baştan gelen düzenli dalgalar altındaki kayıcı teknenin hidrodinamik performansını da diğer yöntemlere göre daha yüksek bir doğrulukla hesaplayabilir.

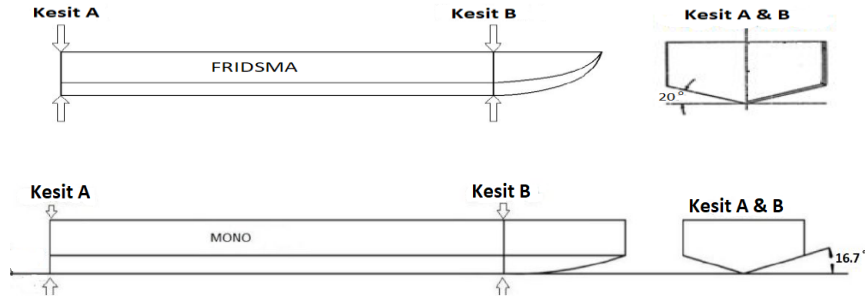
Bu amaçla oluşturulan bu doktora tezinde hesaplamalı akışkanlar dinamiği yaklaşımının her üç problem türünde de deneye en yakın sonuçları vermesi beklenmektedir. Bunun yanında sakin suda bütünleşik (*hibrit*) şekilde oluşturulmuş yöntemin ampirik yöntemden daha iyi, HAD yaklaşımından daha kötü sonuçlar vermesine rağmen, ön dizayn aşamasında kullanılabilir bir yöntem olarak ortaya çıkması beklenmektedir. Son olarak yine bütünleşik şekilde oluşturulmuş ampirik yöntemin toplam yalpa sönüm katsayısı için genel bir değerlendirme yapılabilmesine imkan sağlaması beklenmektedir.

SAKİN SUDA KAYICI TEKNE HİDRODİNAMİĞİNİN FARKLI SAYISAL YÖNTEMLERLE İNCELENMESİ

Bu bölümde kayıcı teknelerin sakin suda hidrodinamik performansı farklı sayısal yöntemlerle incelenecek ve elde edilen sonuçlar deneysel veriler ile karşılaştırılacaktır.

Kayıcı tekneler sakin suda ilerleseler dahi üzerlerine baskın şekilde etkiyen hidrodinamik kaldırma kuvveti sebebiyle, klasik tipteki teknelere oranla çok daha fazla doğrusal ve açısız yer değiştirmeye maruz kalırlar. Bu yer değiştirmeler sudan çıkma (*negatif batma*) ve dinamik trim açısı olarak isimlendirilir. Klasik tipteki teknelerde de ortaya çıkan bu yer değiştirmeler, tekne özellikle ön kayıcı ve kayıcı rejimde seyrederken hatırı sayılır bir hal almaktadır. Bu sebeple kayıcı teknelerin sakin su performanslarının doğru bir şekilde tahmin edilebilmesi oldukça önemli ve göreceli olarak daha zor bir problemdir. Zira klasik tipteki ve göreceli olarak düşük Froude sayılarında seyreden gemiler için bu yer değiştirmeler bağıl olarak düşük olup direnci kayda değer ölçüde etkilemezken, kayıcı tekneler için dinamik trim ve sudan çıkmanın teknenin ıslak yüzey alanını ciddi oranda değiştirmelerinden ötürü direnci etkiler ve birincil derecede önemli parametreler haline alırlar.

Kayıcı bir teknenin sakin sudaki hidrodinamik performansını incelemek adına bu bölümde iki farklı kayıcı tekne modeli kullanılmıştır. Bunlardan ilki literatürde pek çok sayısal çalışmanın doğrulama çalışmasında kullanılmış bir kıyas teknesi olan “*Fridsma*” [3] teknesidir. Kullanılan bir diğer tekne ise Begovic ve Bertorello [5] tarafından deneysel sonuçları literatüre sunulmuş “*Monohedral*” teknesidir. Her iki model de sabit bir kalkıntı açısına sahip, çeneli kayıcı tekne modelleridir. Şekil 2.1’de ilgili teknelerin 2 boyutlu görünüşleri gösterilirken, Tablo 2.1’de ise bu teknelerin temel özellikleri listelenmiştir.



Şekil 2.1 Sakin su analizleri için kullanılan teknelerin 2 boyutlu görünüşleri

Tablo 2.1 Sakin su analizleri için kullanılan teknelerin temel özellikleri

Parametre	Fridsma	Monohedral	Birim
L_{OA}	1.143	1.900	m
B	0.229	0.424	m
Δ	71.25	319.7	N
LCG	0.469	0.697	m
VCG	0.067	0.143	m
T_{AP}	0.058	0.096	m
β	20.0	16.7	derece
Statik Trim	0.693	1.660	derece

2.1 Kullanılan Sayısal Yöntemler

Bu tez çalışmasında kayıcı tipteki bir teknenin sakin su performans tahmini için 3 farklı yöntem kullanılmıştır. Bunlar; ampirik yöntem, 2 boyutlu potansiyel yaklaşım ve hesaplamalı akışkanlar dinamiği yaklaşımıdır. Bu bölümde, bahsedilen bu 3 yöntem detaylı bir şekilde anlatılmış ve temel özellikleri belirtilen kayıcı teknelerde uygulanmıştır. Her bir yöntemden elde edilen sonuçlar önce deneysel veriler ile mukayese edilmiş akabinde de birbiri ile mukayese edilerek birbirlerine göre avantajları/dezavantajları belirlenmeye çalışılmıştır.

2.1.1 Ampirik Yöntem

2.1.1.1 Matematiksel Model

Bu bölümde Savitsky yönteminin [39] uygulanabileceği bir metodoloji anlatılacaktır. Verilen tüm ifadeler ilgili kaynaktan model ölçeğinde çıkarılmış eşitliklerden alıntılanmıştır.

Daha önce de belirtildiği üzere Savitsky yöntemi; kayıcı teknelerin hidrodinamik performansını belirlemek adına kullanılan, güncelliğini halen koruyan, çok hızlı ve yüksek mertebede doğruluk payı ile sonuç veren iteratif bir yöntemdir. Bu yöntemle göre kayıcı bir tekneye etki eden hidrodinamik kaldırma kuvveti geminin toplam ağırlığına eşittir.

$$C_{L,\beta} = \frac{\Delta}{\frac{1}{2}\rho B^2 V^2} \quad (2.1)$$

Burada Δ geminin deplasman ağırlığını (N), ρ geminin içinde yüzdüğü akışkanın yoğunluğunu (kg/m^3), B geminin azami genişliğini (m) temsil ederken V ise geminin ilerleme hızını (m/s) temsil etmektedir. Eşitlik (2.1) yardımı ile β kalkıntı açısına sahip kayıcı bir tekneye kayıcı rejimde etki eden hidrodinamik kaldırma kuvveti katsayısı ($C_{L,\beta}$) elde edilmiş olur. Bu katsayı yardımı ile iteratif olarak kalkıntı açısı olmayan ya da başka bir deyişle kalkıntı açısı 0 derece olan bir tekneye etki eden hidrodinamik kaldırma kuvveti katsayısı ($C_{L,0}$) Eşitlik (2.2) yardımı ile bulunabilir.

$$C_{L,0} = C_{L,\beta} + 0.0065\beta(C_{L,0})^{0.6} \quad (2.2)$$

Bu eşitlikte kalkıntı açısı (β) derece olarak işleme dâhil olmaktadır. Görünüm oranı ($\bar{\lambda}$) ya da bir başka deyişle ortalama boyutsuz uzunluk değeri Eşitlik (2.3) yardımı ile bulunur.

$$\frac{l_p}{B\bar{\lambda}} = 0.75 - \frac{1}{\frac{5.21Fn_B^2}{\bar{\lambda}^2} + 2.39} \quad (2.3)$$

$$Fn_B = \frac{V}{\sqrt{gB}} \quad (2.4)$$

Burada l_p basınç merkezinin ilgili referans ekseninden (*genelde kıç kaime*) uzaklığını, Fn_B ise genişliğe bağlı Froude sayısını temsil etmektedir. Genişliğe bağlı

Froude sayısı için bazı kaynaklarda C_V ifadesi kullanılmakta olup, bu katsayı Eşitlik (2.4) ile elde edilebilir. Bu tez çalışmasında genişliğe bağlı Froude sayısı, notasyonda tutarlılığı sağlayabilmek adına Fn_B ile temsil edilecektir. Eşitlik (2.3)'te basınç merkezi ağırlık merkezi olarak kabul edilir. Bunun nedeni bu yöntemin teknenin dinamik olarak denge noktasına ulaştığı anı incelemesi ve bu anda kaldırma kuvvetinin etki ettiği basınç merkezi ile ağırlık merkezinin düşeyde aynı doğrultuya gelmesidir. Eşitlik (2.2) ve Eşitlik (2.3)'ten elde edilen değerler ile teknenin dinamik trim açısı Eşitlik (2.5) yardımı ile bulunur.

$$C_{L,0} = \tau^{1.1} \left[0.012 \bar{\lambda}^{-0.5} + 0.0055 \left(\frac{\bar{\lambda}^{-2.5}}{Fn_B^2} \right) \right] \quad (2.5)$$

Eşitlik (2.5)'ten dinamik trim açısı (τ) derece cinsinden elde edildikten sonra direnç bileşenleri şu şekilde hesaplanır:

$$R_p = \Delta \tan(\tau) \quad (2.6)$$

$$R_v = \frac{0.5 \rho V_1^2 C_F \bar{\lambda} B^2}{\cos(\tau) \cos(\beta)} \quad (2.7)$$

$$\frac{V_1}{V} = \sqrt{1 - \frac{0.012 \tau^{1.1}}{\bar{\lambda}^{-0.5} \cos(\tau)} + f(\beta)} \quad (2.8)$$

$$f(\beta) = \frac{0.0065 \beta \tau^{1.1}}{\bar{\lambda} \cos(\tau)} \left(0.012 \bar{\lambda}^{-0.5} \tau^{1.1} \right)^{0.6} \cos(\beta) \quad (2.9)$$

Eşitlik (2.6)'da basınç kaynaklı direnç bileşeni (R_p), Eşitlik (2.7)'den ise sürtünme kaynaklı direnç bileşeni (R_v) elde edilir. Burada C_F sürtünme katsayısını temsil ederken V_1 ortalama tekne dip hızını temsil etmektedir. Ortalama tekne dip hızı Eşitlik (2.8) ve Eşitlik (2.9) yardımı ile elde edilir.

Sürtünme kuvveti katsayısı (C_F) ITTC [157] önerilerine göre şu şekilde hesaplanabilir:

$$C_F = \frac{0.075}{(\log(Rn)-2)^2} \quad (2.10)$$

$$Rn = \frac{V\bar{\lambda}B}{\nu} \quad (2.11)$$

Burada ν teknenin içinde yüzdüğü sıvının kinematik viskozitesini (m^2/s) temsil etmektedir. Eşitlik (2.6) ve (2.7)'den elde edilen direnç bileşenlerinin yanında, serpinti bölgesi ile ilintili bir diğer direnç bileşeninin daha toplam dirence eklenmesi gerektiği 2007 yılında Savitsky vd. [41] tarafından yapılan bir çalışmayla gösterilmiştir. Bu bileşen de şu şekilde elde edilebilir:

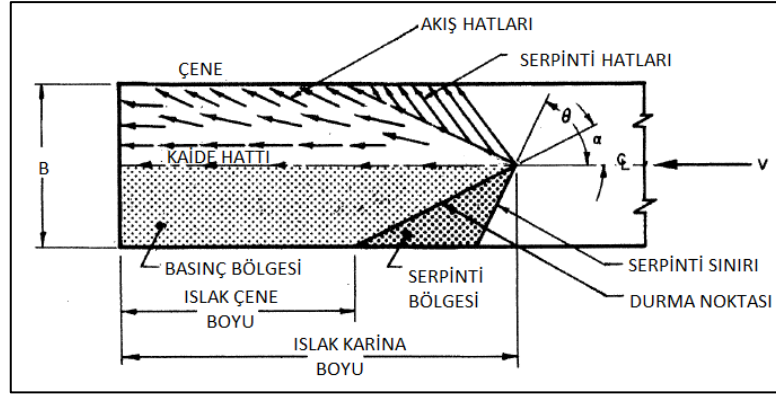
$$R_{ws} = 0.5\rho V^2 \frac{B^2 \cos(\Theta)}{4\sin(2\alpha)\cos(\beta)} C_f \quad (2.12)$$

$$\alpha = \arctan \frac{\pi \tan(\tau)}{2 \tan(\beta)} \quad (2.13)$$

$$\theta = \bar{k}\alpha \quad (2.14)$$

$$\Theta = \frac{\theta}{\cos(\beta)} \quad (2.15)$$

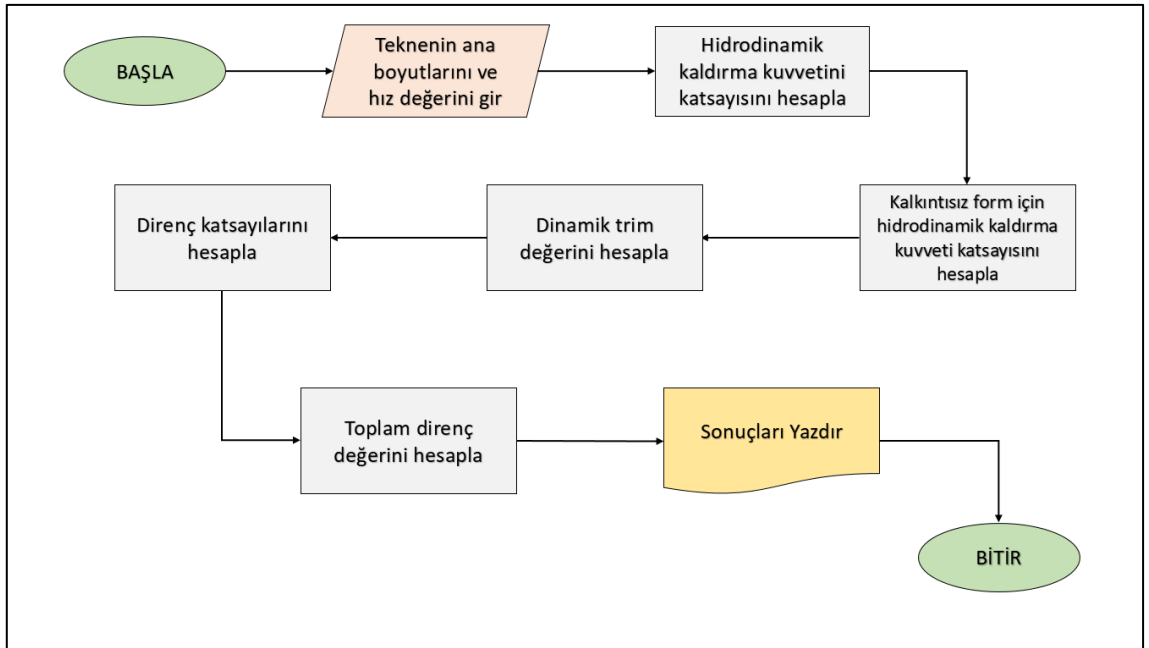
Eşitlik (2.12)'de α durma noktası ile orta simetri eksenindeki açıyı, Θ serpinti sınırı ile orta simetri eksenindeki açı ile durma noktası ile orta simetri eksenindeki açıyı ve C_f ise Savitsky vd. [41] tarafından açıklanan serpinti direnç katsayısını temsil etmektedir. Eşitlik (2.14)'te θ serpinti sınırı ile orta simetri eksenindeki açıyı, $\bar{k}$ ise bir katsayıyı temsil etmektedir. Bu katsayı deneysel yolla üretilmiş olup; Savitsky vd. [41] tarafından 2, Begovic ve Bertorello [5] tarafından ise 1.5 olarak önerilmiştir.



Şekil 2.2 Kayıcı tekne etrafındaki akış [41]

Toplam direnç değeri ise Eşitlik (2.6), (2.7) ve (2.12)'den elde edilen direnç bileşenlerinin toplamı olarak ifade edilir.

$$R_T = R_p + R_v + R_{ws} \quad (2.16)$$



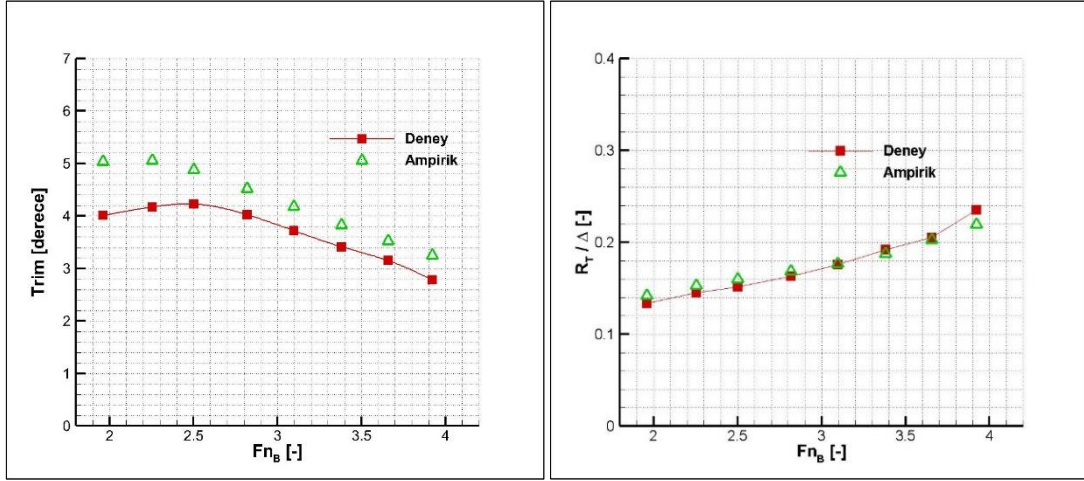
Şekil 2.3 Savitsky yöntemi için geliştirilen koda ait iş akış şeması

Bu kısımda anlatılan yöntem MATLAB M-File ortamında kodlanmıştır. Geliştirilen koda ilişkin akış şeması Şekil 2.3'te gösterilmiştir.

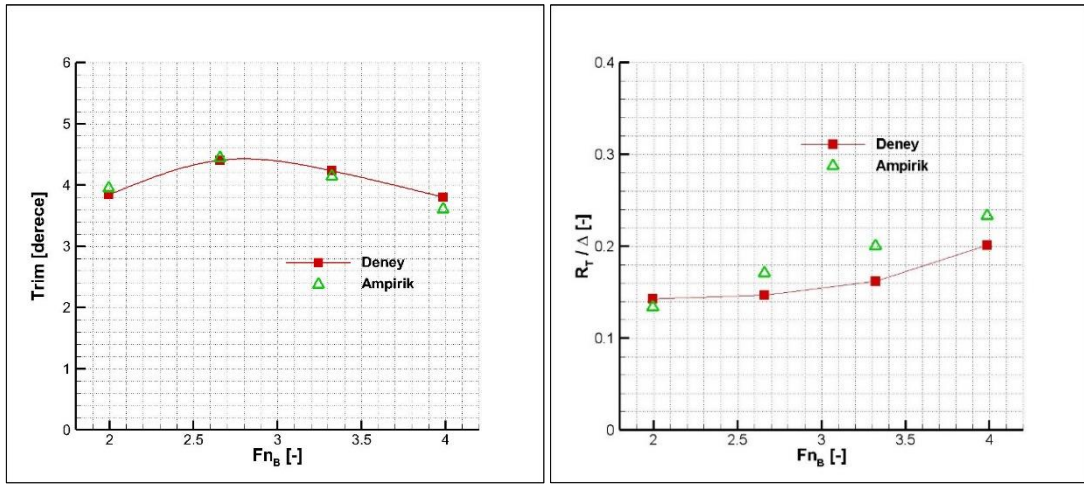
2.1.1.2 Ampirik Yöntemin Validasyonu

Bir önceki bölümde detaylı bir şekilde anlatılan ampirik yöntem, temel özellikleri belirtilen teknelere uygulanmış ve sonuçlar deneysel veriler ile mukayese

edilmiştir. Burada ampirik yöntemden trim ve direnç çıktısının alınabildiği ve yöntemin sudan çıkma değerine ilişkin herhangi bir bilgi vermediği özellikle belirtilmelidir. Bu sebeple elde edilen sonuçlar yalnızca bu iki parametre açısından deneysel veriler ile mukayese edilmiştir.



Şekil 2.4 Monohedral teknesi için ampirik yöntemden elde edilen sonuçların deneysel veriler ile karşılaştırılması



Şekil 2.5 Fridsma teknesi için ampirik yöntemden elde edilen sonuçların deneysel veriler ile karşılaştırılması

Şekil 2.4 ve Şekil 2.5'te Monohedral ve Fridsma tekneleri için ampirik yöntemden elde edilen dinamik trim ve toplam direnç değerleri deneysel sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Şekillerden elde edilen sonuçlara göre hem dinamik trim hem de toplam direnç açısından ampirik yöntemden elde edilen sonuçlar deneysel veriler ile mertebe olarak uyumlu olsalar da aralarında bir miktar farklılıklar bulunmaktadır. Monohedral teknesi için direnç değerlerinin trim değerlerine göre

deney ile daha uyumlu olduğu söylenebilirken, Fridsma teknesi için ise tam aksi bir durum söz konusudur. Savitsky yönteminde tekneye kayıcı rejimde etkiyen tek kuvvet hidrodinamik kaldırma kuvvetidir kabulü yapılır. Bu sebeple de denge durumu hidrodinamik kaldırma kuvveti ile ağırlık kuvvetinin düşeyde aynı düzleme geldiği anda gözlenir. Bu sebeple bu yöntemin hidrostatik kuvvetin nispeten daha yüksek olduğu bölgede (*ön kayıcı bölge gibi*) trim değerini olması gerekenden farklı bulması beklenmektedir. Bu mantıkla göreceli olarak düşük Froude sayılarında Savitsky yönteminin trim değerini olması gerekenden farklı bulması çok olasıdır. Bu sebeple Monohedral teknesi için elde edilen fark makul görünürken, Fridsma teknesi için deneye bu kadar yakın sonuçlar elde edilmesinin nedeninin deneydeki belirsizlik olabileceği düşünülmektedir. Trim değeri hesabındaki bu farklılığın direnç hesabında da bir miktar hataya neden olabileceği düşünülmekte ve aradaki farkın hem yöntemin ampirik olmasına hem de trimdeki bu farka bağlanması gerektiği düşünülmektedir.

2.1.2 Potansiyel Temelli Yaklaşım

2.1.2.1 Hibrit Yöntem

Bu yaklaşım Zarnick [56] tarafından ortaya atılan yöntemde dayanmaktadır. Bu yöntem, tekneyi 2 boyutlu kesitlere bölerek 3 boyutlu etkileri göz ardı eden potansiyel bir yöntemdir. Bu yaklaşım baştan gelen düzenli ve düzensiz dalgalar altındaki düşey gemi hareketlerini (*dalıp-çıkma ve baş kış vurma*) modellemek için oluşturulmasına karşın, bazı makul kabuller altında sakin sudaki kayıcı teknenin hidrodinamik performansını hesaplamak için de kullanılabilir. Ancak yöntemin doğası gereği çıktı olarak yalnızca sakin sudaki negatif batma ve dinamik trim sonuçları elde edilebilir. Bu sebeple direnç değerini elde edebilmek için bu yöntem Savitsky yöntemi ile birleştirilmiş ve yeni hibrit bir yöntem ortaya konmuştur.

Ortaya konulan yöntemde daha önce de belirtildiği üzere 3 boyutlu tekne 2 boyutlu kesitlere bölünür. 2 boyutlu kesitlere etki eden kuvvet ve momentler elde edildikten sonra herhangi bir sayısal integrasyon tekniği yardımı ile 3 boyutlu tekneye etki eden kuvvet ve momentler bulunur. Oluşturulan matematiksel modelde 2 boyutlu kesite etki eden toplam kuvvet şu şekilde hesaplanabilir:

$$f_{2D} = f_{HD} + f_{HS} \quad (2.17)$$

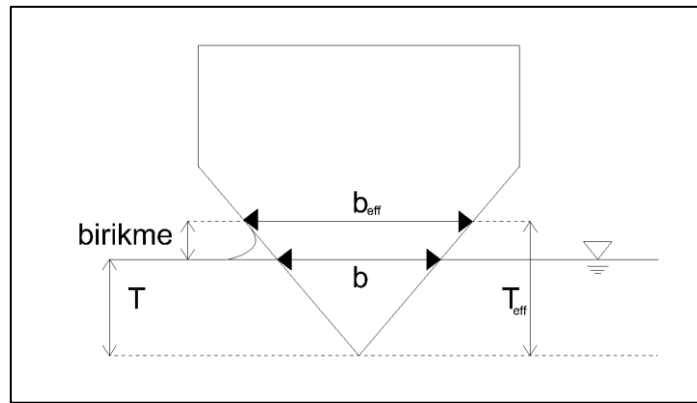
Burada f_{HD} ve f_{HS} sırasıyla 2 boyutlu kesite etki eden hidrodinamik ve hidrostatik kuvvetlerdir. Kesite etki eden hidrodinamik kuvvet Zarnick'in yaklaşımına göre kesitin momentumundaki değişim ve çapraz akış kuvvetinin (*cross flow force*) toplamına eşittir.

$$f_{HD} = \frac{D}{Dt} m_a V_{BD} + C_{DC} \rho b V_{BD}^2 \quad (2.18)$$

Burada m_a kesitin ek kütesini V_{BD} düşey yöndeki bağıl hızı, C_{DC} çapraz akış sürtünme katsayısını, ρ suyun yoğunluğunu, b ise kesitin genişliğini temsil etmektedir. Kesitin ek kütlesi m_a Payne'nin yaklaşımı [58] ile bulunabilir.

$$m_a = \frac{\pi}{2} C_M \rho b_{eff}^2 \quad (2.19)$$

Eşitlik (2.19)'da C_M kesite ait boyutsuz ek kütle katsayısını belirtirken b_{eff} ise kesitin efektif genişliğini göstermektedir. Kayıcı teknelerde kesitlerin daha V tipinde olması sebebiyle 2 boyutlu kesitin suya giriş probleminde sakin su seviyesi serbest su yüzeyinden bir miktar yükselir. Buna birikme (*pile up*) denir. Şekil 2.6'da temsili olarak birikme gösterilmektedir.



Şekil 2.6 Kesitte meydana gelen birikme (*pile up*)

Şekil 2.6'dan da anlaşılacağı üzere sakin su yüzeyinde meydana gelen birikme (*pile up*) kesit genişliğinde de bir miktar genişlemeye sebebiyet verir ve böylelikle kesitin

ek kütlesini bir miktar arttırır. Ancak şu husus özellikle belirtilmelidir ki, eğer teknenin ilgili kesitinin çene hattı serbest su yüzeyine değiyor ise ya da birikmeden sonra serbest su seviyesi bu seviyeye çıkıyor ise çenede meydana gelen akım ayrılmasından ötürü birikme olmaz ve kesitin genişliği çene hattındaki maksimum genişlik olur. Birikmenin neden olduğu efektif genişlik ve boyutsuz ek kütle katsayısı Eşitlik (2.20), (2.21) ve (2.22) yardımı ile bulunabilir.

$$C_M = \left[1 - \frac{\beta}{2\pi} \right]^2 \quad (2.20)$$

$$b_{eff} = C_{pu} b \quad (2.21)$$

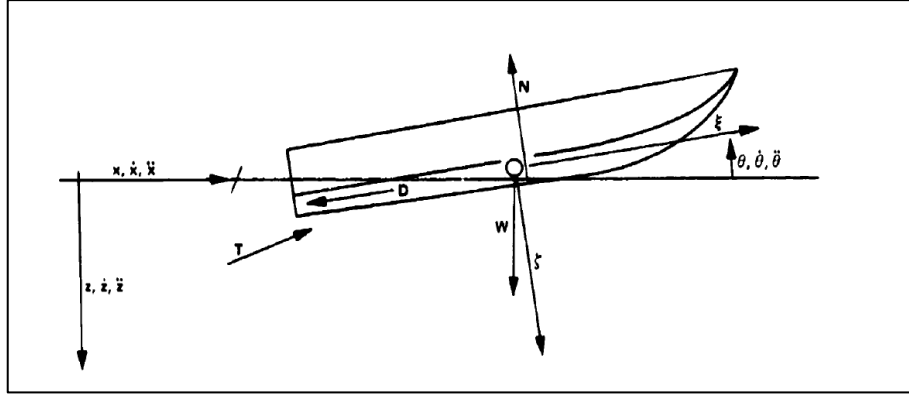
$$C_{pu} = \frac{\pi}{2} - \beta \left(1 - \frac{2}{\pi} \right) \quad (2.22)$$

Her bir kesite etki eden hidrodinamik kuvvetin bulunabilmesi için, her bir kesitteki düşey hız bileşeninin de bilinmesi gerekmektedir. Zarnick [56] baştan gelen dalgalarda kesitteki bağıl düşey (V_{BD}) ve yatay (U_{BY}) hızların şu şekilde hesaplanabileceğini belirtmiştir:

$$V_{BD}(\xi, t) = V \sin \tau + (\dot{\eta}_3 - \omega_z) \cos \tau - \dot{\eta}_5 \xi \quad (2.23)$$

$$U_{BY}(\xi, t) = V \cos \tau - (\dot{\eta}_3 - \omega_z) \sin \tau \quad (2.24)$$

Burada V ilerleme hızını, τ teknenin anlık trim açısını, $\dot{\eta}_3$ ve $\dot{\eta}_5$ dalıp-çıkma ve baş-kıç vurma hareketlerine ait hızları temsil ederken, ω_z ise gelen dalganın düşey yönde ürettiği bağıl hızı temsil etmektedir. ξ her zaman tekne dibine paralel olan ve Zarnick tarafından oluşturulmuş sabit olmayan koordinat sistemine ait bir eksenidir. Zarnick'in oluşturduğu diğer eksen takımları Şekil 2.7'de gösterilmektedir.



Şekil 2.7 Zarnick'in oluşturduğu modeldeki eksen takımları [56]

Eşitlik (2.23) ve (2.24) baştan gelen düzenli ve düzensiz dalgalar altındaki kayıcı bir teknenin yatay ve düşey hareketlerini temsil etmektedir. Buna göre teknenin sakin suda yüzdüğü ve denge noktasına ulaştığı düşünülürse dalıp-çıkma ve baş-kıç vurma gibi hareketler yapmayacağından bu hızlar 0 olacaktır. Aynı zamanda tekneye etki eden bir dalga sistemi de olmayacağından gelen dalganın düşey hız bileşeni de denklemlerden kalkacağına göre, denklemler yalnızca sabit ilerleme hızına (V) ve denge noktasındaki trim açısına (τ) bağlı olarak şu şekilde ifade edilebilir:

$$V_{BD} = V \sin \tau \quad (2.25)$$

$$U_{BY} = V \cos \tau \quad (2.26)$$

Düşey ve yatay hız bileşenlerinin de hesaplanmasıyla birlikte Eşitlik (2.18)'i çözebilmek için yalnızca çapraz akış sürtünmesinden kaynaklı katkının elde edilmesi gerekli hale gelir. Bunun için de çapraz akış sürtünme katsayısının (C_{DC}) hesaplanması gerekir.

$$C_{DC} = 1.33 \cos \beta \quad (2.27)$$

Zarnick [56] kesite bağlı bu katsayının hesaplanırken direkt olarak bir çarpan ile çarpılmamasını uygun görürken, Keuning [76] daha sonra yaptığı çalışmada 1.33 katsayısı ile olayın daha doğru temsil edilebildiğini göstermiştir. Bütün bu ifadeler

Eşitlik (2.18)'de yerine yazılırsa ve buradaki maddesel türev de açılırsa ifade şu hale gelir:

$$f_{HD} = \frac{\partial \xi}{\partial t} \frac{\partial(m_a V_{BD})}{\partial \xi} + C_{DC} \rho b_{eff} V_{BD}^2 \quad (2.28)$$

$$f_{HD} = -U_{BY} \frac{\partial(m_a V_{BD})}{\partial \xi} + C_{DC} \rho b_{eff} V_{BD}^2 \quad (2.29)$$

$$f_{HD} = -V^2 \sin \tau \cos \tau \frac{\partial m_a}{\partial \xi} + 1.33 \cos \beta \rho b_{eff} V^2 \sin^2 \tau \quad (2.30)$$

Böylece her bir 2 boyutlu kesite etki eden hidrodinamik kuvvet cebirsel olarak elde edilebilir hale gelir. Eşitlik (2.30)'daki tek kısmi türevli ifade ileri yönlü olarak birinci mertebeden Taylor serisi yardımı ile hesaplanmıştır.

Kesite etki eden toplam kuvveti hesaplayabilmek için, aynı kesite etki eden hidrostatik kuvvet de hesaplanmalıdır. Kesite etki eden hidrostatik kuvvet kesitin su altında kalan alanı (A_{2D}) ile doğrudan ilişkilidir ve şu şekilde ifade edilebilir:

$$f_{HS} = \rho g A_{2D} \quad (2.31)$$

Her bir kesite etki eden hidrostatik ve hidrodinamik kuvvetlerin elde edilmesinin ardından herhangi bir sayısal entegrasyon tekniği ile 3 boyutlu tekneye etki eden toplam kuvvetler elde edilebilir. Bununla birlikte sakin suda daimi rejim cevabına ulaşan kayıcı tekne için ise statik denge eşitlikleri şu şekilde ifade edilebilir:

$$F_{HD} = \int_{L_K} \left(-V^2 \sin \tau \cos \tau \frac{\partial m_a}{\partial \xi} + C_{DC} \rho b V^2 \sin^2 \tau \right) d\xi \quad (2.32)$$

$$M_{HD} = \int_{L_K} \left(-V^2 \sin \tau \cos \tau \frac{\partial m_a}{\partial \xi} + C_{DC} \rho b V^2 \sin^2 \tau \right) \xi d\xi \quad (2.33)$$

$$F_{HS} = \int_{L_K} \rho g C_{BF} A_{2D} d\xi \quad (2.34)$$

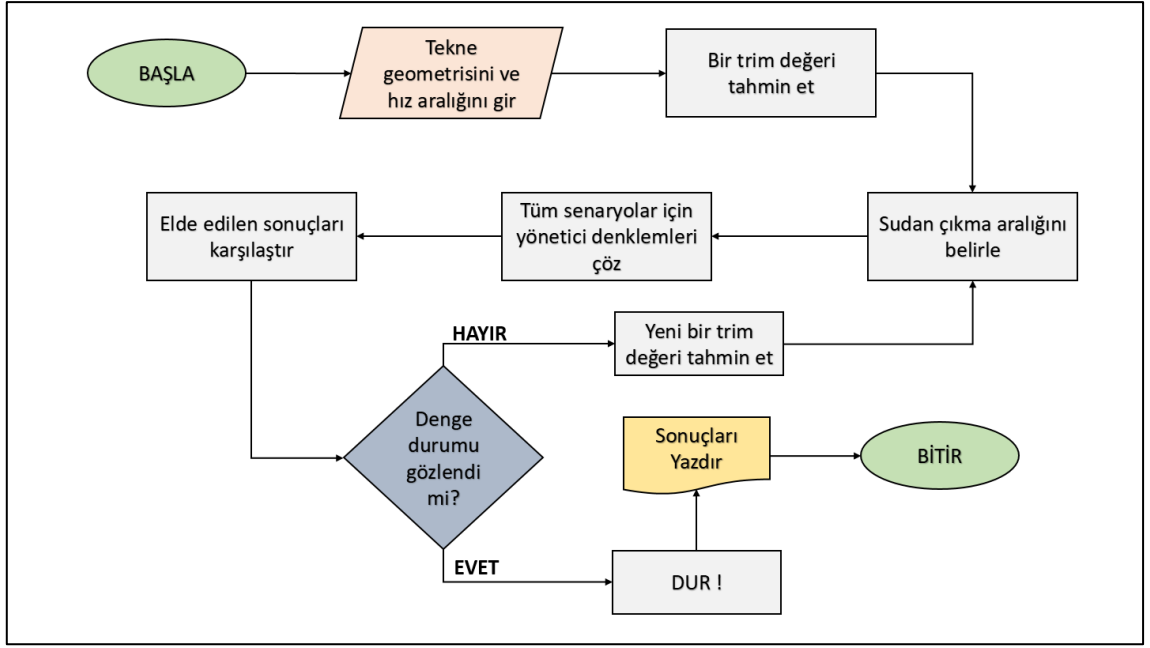
$$M_{HS} = \int_{L_K} \rho g C_{BM} A_{2D} \xi d\xi \quad (2.35)$$

$$\sum F_Z = F_{HD} \cos \tau + F_{HS} - W = 0 \quad (2.36)$$

$$\sum M_\theta = M_{HD} + M_{HS} \cos \tau = 0 \quad (2.37)$$

Burada F_{HD} ve F_{HS} 3 boyutlu tekneye etki eden toplam hidrodinamik ve hidrostatik kuvvetleri temsil ederken M_{HD} ve M_{HS} ise tekneye etki eden toplam hidrodinamik ve hidrostatik momentleri temsil etmektedir. L_K ıslak karina boyunu, C_{BM} ve C_{BF} ise hidrostatik kuvvet düzeltme katsayılarını simgelemektedir. Zarnick'in ifadesine göre bu katsayılar 0.5 seçilebilir. Ancak bu katsayıları bu şekilde seçmek yerine Garne'nin [68] önerdiği azaltma fonksiyonu da hem hidrostatik hem de hidrodinamik kuvvetin tayininde kullanılabilir. Bu çalışmada hem Zarnick'in önerdiği katsayılar kullanılmış hem de azaltma fonksiyonu hidrostatik ve hidrodinamik kuvvetin elde edilmesinde uygulanmıştır. Azaltma fonksiyonunun uygulandığı durumda hidrostatik kuvvet ve moment katsayıları 1 olarak seçilmiştir. Başka bir deyişle bu ifadeler modelden çıkarılmıştır. Bu çalışmada da kullanılan Garne'nin önerdiği azaltma fonksiyonu Eşitlik (2.38) yardımı ile bulunabilir:

$$C_{Red}(\xi) = \tanh \left(\frac{2.5}{0.34 B F n_B} (\xi - LCG) \right) \quad (2.38)$$



Şekil 2.8 Potansiyel yaklaşıma göre iş akış şeması

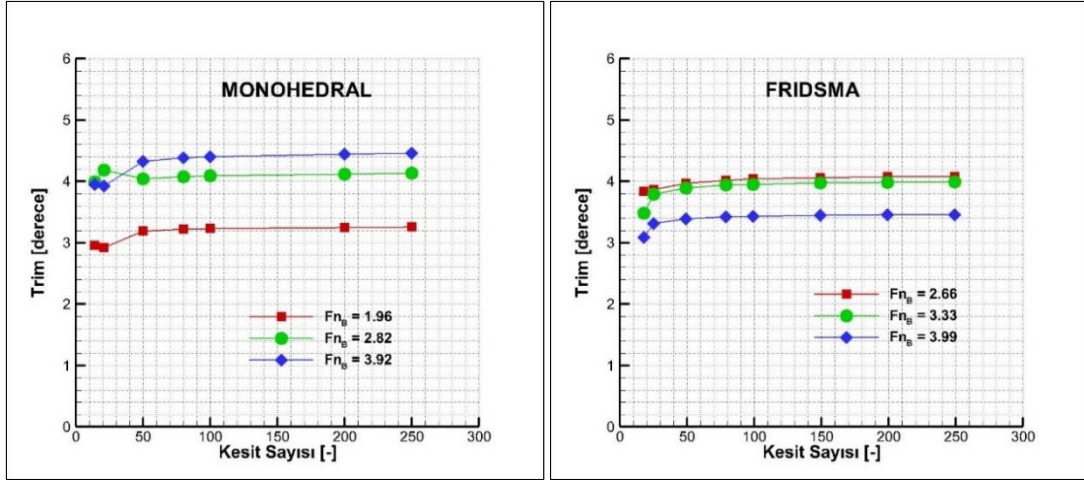
Şekil 2.8’de potansiyel temelli olarak geliştirilen hibrit yöntemin iş akış şeması gösterilmektedir. Bu bölümde detaylı olarak anlatılan ve yönetici denklemler olarak Eşitlik (2.36) ve Eşitlik (2.37) kullanılan bu yöntemle ilgili teknenin dinamik trim ve negatif batma değeri statik denge noktasında elde edildikten sonra ilgili çıktılar Savitsky yönteminde yerine konulmuş ve Eşitlik (2.16) yardımıyla toplam direnç değerleri elde edilmiştir.

2.1.2.2 Hibrit Yöntemin Validasyonu

Bir önceki kısımda detaylı bir şekilde anlatılan hibrit yöntem bu bölümde ana boyutları daha önce Tablo 2.1’de belirtilen teknelere uygulanmış ve sonuçlar sudan çıkma, dinamik trim ve toplam direnç açısından deneysel veriler ile mukayese edilmiştir. Bu bölümde sunulan şekillerde Garme’nin önerdiği azaltma fonksiyonunun uygulandığı geliştirilmiş hibrit yöntem “Geliştirilmiş HY” olarak adlandırılırken, Zarnick’in önerdiği katsayıların kullanıldığı yöntem ise “Hibrit Yöntem” olarak isimlendirilmiştir.

Sonuçların detaylı olarak elde edilmesinden önce, 2 boyutlu bu yaklaşımdaki kesit sayısının olayın çözümüne olan etkisi incelenmiş ve çözüm süresini asgaride tutacak şekilde kesit sayısı belirlenmiştir. Bu hususta her iki tekne için 3 farklı ilerleme hızında farklı kesit sayılarındaki trim, sudan çıkma ve direnç değerleri incelenmiş

ve sonuçlar Şekil 2.9 ve Tablo 2.2’de gösterilmiştir. Bu tablo ve şekilde geliştirilmiş hibrit yöntem sonuçları verilmiştir.



Şekil 2.9 Trim açısının kesit sayısına göre değişimi

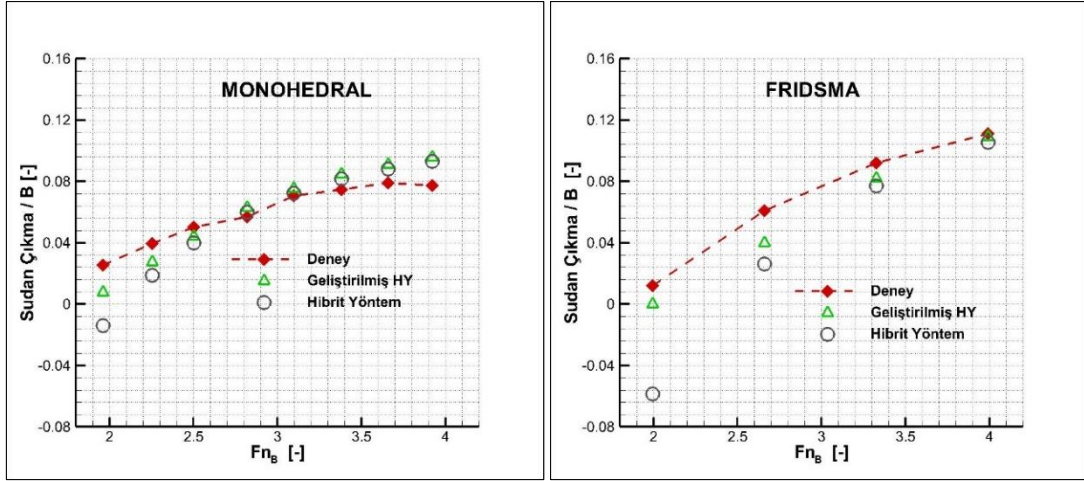
Tablo 2.2 Farklı kesit sayılarının (100 & 200) hidrodinamik parametreler üzerindeki etkisi

<i>Tekne Modeli</i>	<i>Trim</i>		<i>Sudan Çıkma</i>		<i>Direnç</i>	
	<i>Azami Fark</i>	<i>Ortalama Fark</i>	<i>Azami Fark</i>	<i>Ortalama Fark</i>	<i>Azami Fark</i>	<i>Ortalama Fark</i>
Monohedral	% 0.964	% 0.771	% 4.360	% 2.404	% 0.487	% 0.283
Fridsma	% 0.895	% 0.814	% 2.152	% 1.715	% 0.437	% 0.385

Şekil 2.9 incelendiğinde kesit sayısı 100 olduktan sonra seçilen tüm hızlar için her iki teknede de eğrilerin eğiminin oldukça azaldığı söylenebilir. Yani bir başka deyişle kesit sayısının 100 olması ile daha fazla olması arasında ciddi oranda bir fark olmadığı Şekil 2.9’dan rahatlıkla anlaşılmaktadır. Benzer durum sudan çıkma ve direnç değerleri için de elde edilmiştir. Ancak görselin basit ve anlaşılabilir olması açısından bu şekilde yalnızca trim sonuçları verilmiştir.

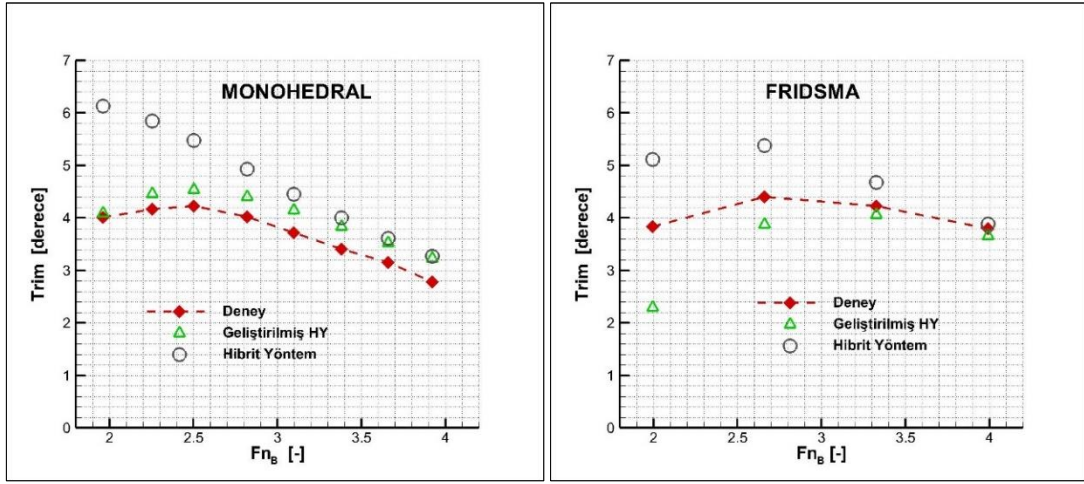
Bahsi geçen durumu matematiksel olarak gösterebilmek adına her bir hız için 100 kesitte ve 200 kesitte elde edilen sonuçlar bir araya getirilmiştir. Örneğin trim değerinde, seçilen 3 hız için 100 kesit ile 200 kesit arasında elde edilen trim değerlerindeki bağıl farklar belirlenmiştir. Böylece kesit sayısının 100’den 200’e çıkarılmasının trim tahminini nasıl değiştirdiği 3 farklı hız için elde edilmiştir. Daha sonra bu 3 bağıl fark değerinin ortalaması alınmış ve Tablo 2.2’de ortalama fark

olarak ifade edilmiştir. Yine aynı 3 değerin içinde azami olan değer de azami fark olarak Tablo 2.2’de belirtilmiştir. Benzer metodoloji sudan çıkma ve direnç değerleri için de tekrarlanmış ve her iki tekne için kesit sayısının değişiminin seçilen hızlardaki ortalama ve azami etkileri gösterilmiştir. Elde edilen sonuçlar göz önüne alınarak, bu tez çalışmasındaki tüm 2 boyutlu analizler 100 kesit kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

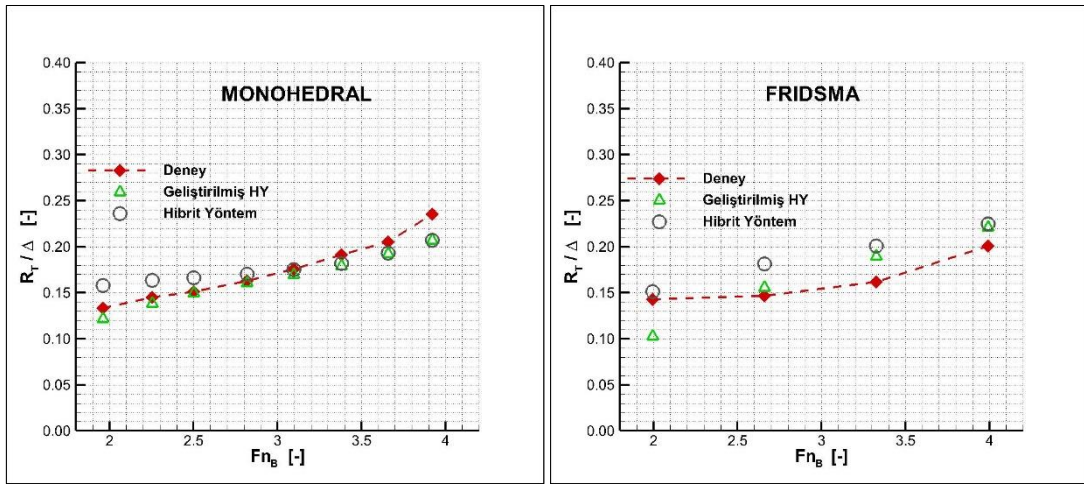


Şekil 2.10 Potansiyel yaklaşımdan elde edilen sudan çıkma değerlerinin deneysel veriler ile karşılaştırılması

Şekil 2.10’da her iki tekne için potansiyel yöntemden elde edilen boyutsuz sudan çıkma değerleri deneysel veriler ile mukayese edilmiştir. Bu şekle göre göreceli olarak düşük Froude sayılarında geliştirilmiş hibrit yöntem daha iyi sonuçlar verse de yüksek Froude sayılarında her iki yöntemden elde edilen sonuçlar arasındaki fark azalmaktadır. Genel eğilim olarak deneysel veriler ile uyum sağlandığı açıkça görülmeye karşın, deneysel veriler ile potansiyel yaklaşımdan elde edilmiş sonuçlar arasında özellikle düşük Froude sayılarında bir fark olduğu açıktır.



Şekil 2.11 Potansiyel yaklaşımdan elde edilen trim değerlerinin deneysel veriler ile karşılaştırılması



Şekil 2.12 Potansiyel yaklaşımdan elde edilen direnç değerlerinin deneysel veriler ile karşılaştırılması

Şekil 2.11’de potansiyel yaklaşımdan elde edilen trim değerleri deneysel veriler ile mukayese edilmiştir. Monohedral teknesi için hem hibrit yöntem hem de geliştirilmiş versiyonunun deneyden daha fazla bir trim değeri tahmin ettiği görülse de göreceli olarak düşük Froude sayılarında geliştirilmiş hibrit yöntemin deneyle daha uyumlu olduğu rahatlıkla söylenebilir. Fridsma teknesi içinse hibrit yöntemin trim değerini olması gerekenden bir miktar fazla tahmin ettiği, geliştirilmiş hibrit yöntemin ise aksine daha düşük bir trim açısı tahmininde bulunduğu gözlenmektedir. Monohedral teknesine benzer bir biçimde göreceli olarak yüksek Froude sayılarında aralarındaki fark kapansa da, genel itibariyle ilk hız değeri

haricinde geliştirilmiş hibrit yöntemin deneysel veriler ile bir uyum içerisinde olduğu söylenebilir.

Şekil 2.12’de ise benzer bir mukayese bu kez boyutsuz toplam direnç değerleri üzerinden yapılmaktadır. Önceki iki grafiğe benzer bir şekilde yine geliştirilmiş hibrit yöntem ile hibrit yöntemin göreceli olarak yüksek Froude sayılarında benzer davranış gösterirken, düşük Froude sayılarında ise aralarındaki farkın arttığı gözlenmektedir. Özellikle Fridsma teknesi için deneysel veriler ile geliştirilmiş hibrit yöntem arasındaki farkın Monohedral teknesine oranla daha fazla olduğu net bir şekilde anlaşılmasına karşın, geliştirilmiş hibrit yöntemden elde edilen sonuçların genel anlamda deneysel veriler ile bir uyum içerisinde olduğu söylenebilir. Şekil 2.11’e benzer bir şekilde yine Fridsma teknesi için en düşük Froude sayısında ciddi bir fark gözlenmiştir.

Monohedral teknesi için yüksek Froude sayılarında trim ve sudan çıkma değeri deneye göre daha fazla hesaplanmasına karşın direnç değerlerinin deneyden az hesaplandığı görülmektedir. Yöntemde elde edilen trim değeri Savitsky yönteminde doğrudan bir girdi olarak kullanıldığı için ampirik yöntemden elde edilen sonuca benzer bir biçimde trimin deneye göre fazla direncin deneye göre az çıkma sebebinin Savitsky yönteminden kaynaklandığı düşünülmektedir. Ayrıca hem trim hem de sudan çıkma değerinin yüksek olması teknenin ıslak alan değerinde bir azalmaya neden olacak, bu da direnci azaltacaktır. Bu metodoloji ile de yöntemin Monohedral teknesi için verdiği sonuçların tutarlı olduğu düşünülmektedir. Benzer bir şekilde geliştirilmiş hibrit yöntemin Fridsma teknesi için sonuçlarına bakılırsa özellikle yüksek Froude sayılarında trim ve sudan çıkma değerlerini deneyden daha az direnç değerini ise daha fazla hesapladığı görülebilir. Bu durum da Monohedral teknesine benzer bir metodoloji ile açıklanabilir. Hibrit yöntemin özellikle trim ve sudan çıkma değerlerini düşük Froude sayılarında deneyden oldukça uzak hesaplamasının nedeninin ise bu aralıkta Zarnick’in önerdiği katsayıların yetersiz olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

2.1.3 Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği Yaklaşımı

HAD yöntemleri özellikle son yıllarda gelişen teknoloji ile birlikte her çeşit problemin çözümü için kullanılabilir hale gelmiştir. Bu yöntemler derin suda tek

fazlı bir akış içinde ilerleyen bir denizaltının hareketinden, düzensiz dalgalar altında çift fazlı akışkan içerisinde ilerleyen bir teknenin hareketine kadar çok geniş bir perspektifte çözüm verebilmektedir. Bu tez çalışmasında bu yöntem farklı farklı problemlerin çözümünde kullanılmış olsa da bu kısımda sakin suda ilerlemekte olan kayıcı bir teknenin hidrodinamik karakteristiklerinin elde edilmiş şekline dair bir metodoloji sunulacaktır. Tüm hesaplamalı akışkanlar dinamiği analizleri STAR-CCM+ ticari paket programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

2.1.3.1 Fiziksel Model

HAD yöntemlerinde RANS (*Reynolds Averaged Navier-Stokes*) denklemleri sonlu hacimler yöntemi ile ayrıştırılarak iteratif olarak bir çözüme ulaşılır. Bu yöntem en basit haliyle; ilgili cisme etki eden kuvvet, moment, basınç vb. her nevi parametrenin hesabı için öncelikle bir hesaplama hacmi oluşturulması ve ardından bu hesaplama hacminin sonsuz küçük parçalara ayrıştırılarak her bir parçada yönetici denklemlerin iteratif olarak çözülmesi esasına dayanır. Yönetici denklemler kütle ve momentum korunum denklemleridir. Sıkıştırılamaz ve daimi bir akışkan için kartezyen koordinatta, tensör ve diferansiyel formda kütle korunum denklemi şu şekilde ifade edilebilir:

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0 \quad (2.39)$$

$$U_i = \overline{U_i} + u_i' \quad (2.40)$$

Burada U_i ve $\overline{U_i}$ akışkanın toplam ve zaman ortalamalı hız vektörünü temsil ederken u_i' çalkantı hız vektörünü temsil etmektedir. Benzer şekilde momentum korunum denklemi de şu şekilde ifade edilebilir:

$$\rho \left(\frac{\partial U_i}{\partial t} + U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \right) = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} - \frac{\partial (\overline{\rho u_i' u_j'})}{\partial x_j} \quad (2.41)$$

$$\tau_{ij} = \mu \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \quad (2.42)$$

Eşitlik (2.41)'de son terim Reynolds gerilme tensörü olarak ifade edilirken Eşitlik (2.42) ortalama viskoz tensör bileşeni olarak ifade edilebilir. Burada P basıncı, μ akışkanın dinamik viskozitesini ve t ise zamanı temsil etmektedir. Tensör formunda verilen denklemlerde bilinmeyenler; hızlar, Reynolds gerilme tensöründeki çarpım olarak verilen çalkantı bileşenleri ve basınçtır. Yani bir başka deyişle toplamda 10 adet bilinmeyen mevcut iken, eldeki toplam denklem sayısı 1 adet kütle korunum ve 3 adet momentum korunum olmak üzere 4'tür. Bu problemi ortadan kaldırmak için türbülanslı akışlarda türbülans modeli kullanılmalıdır. Bu çalışmada türbülans modeli olarak kayıcı teknelerde k-w modeline göre sakın suda daha başarılı olduğu ispatlanmış [140] ve görece yine k-w modeline göre daha az bilgisayar hafızasına ve CPU zamanına ihtiyaç duyması [158] sebebiyle k- ϵ türbülans modeli kullanılmıştır. Çok fazlı akış, ayrık akış (*segregated flow*) modeli kullanılarak modellenmiş, taşınım terimleri ikinci mertebeden ayrıklaştırılırken zaman ile ilgili terimler ise birinci mertebeden ayrıklaştırılmıştır. Basınç ile hız arasındaki ilişki için tahmin eden-düzeltten SIMPLE algoritması kullanılırken, serbest yüzeyin modellenmesi için ise Akışkan Hacmi Yöntemi (*Volume of Fluid, VOF*) ikinci dereceden ayrıklaştırma ile kullanılmıştır. Bu kısımda kayıcı tekne sakın suda ilerlediği için VOF yüzeyi düz yüzey olarak seçilmiştir. 2 serbestlik dereceli hareketi (*dalıp-çıkma ve baş-kıç vurma*) doğru bir şekilde temsil edebilmek için DFBI (*Dynamic Fluid Body Interaction*) yöntemi kullanılmıştır.

Zaman adımı ITTC [159] nin önerilerine göre belirlenmiştir ve her bir tekneye göre değişkenlik göstermektedir. ITTC tarafından belirtilen uygun zaman adımı aralığı L gemi boyu ve V ilerleme hızı olmak üzere şu şekilde belirtilebilir:

$$\Delta t = 0.005 \sim 0.01 \left(\frac{L}{V} \right) \quad (2.43)$$

Buna göre Monohedral ve Fridsma teknesinin sakın su analizlerinde seçilen sık zaman adımı değerleri sırasıyla, 0.002 s ve 0.001 s olarak belirlenmiştir.

Tablo 2.3'te sakın su için oluşturulan hesaplamalı akışkanlar dinamiği yöntemi yaklaşımının fiziksel özellikleri ve ayrıklaştırma mertebeleri özetlenmiştir.

Tablo 2.3 Sakın su için HAD fiziksel özellikleri

Türbülans Modeli	k- ϵ
VOF şeması	İkinci mertebe
VOF yüzeyi	Düz yüzey
Taşıyım terimleri	İkinci mertebe
Zaman terimleri	Birinci mertebe
İnterpolasyon	Doğrusal
Basınç - Hız ilişkisi	SIMPLE
İç iterasyon	10

2.1.3.2 Hesaplama Hacmi ve Sınır Koşulları

Bir HAD analizinde hesaplama hacmi ve sınır koşullarının doğru ve makul bir şekilde belirlenmesi problemin doğru bir şekilde temsil edilebilmesi için hayati önem taşımaktadır. Hesaplama hacminin olması gerekenden büyük seçilmesi çözüm süresini uzatacağından ekonomik değildir. Bunun yanı sıra olması gerekenden daha küçük seçilmesi ve/veya sınır koşullarının uygun olmayan şekilde tanımlanması ise problemin doğasında olmayan etkilere sebebiyet verebileceği için çözümü hatalı bir noktaya götürebilmektedir.

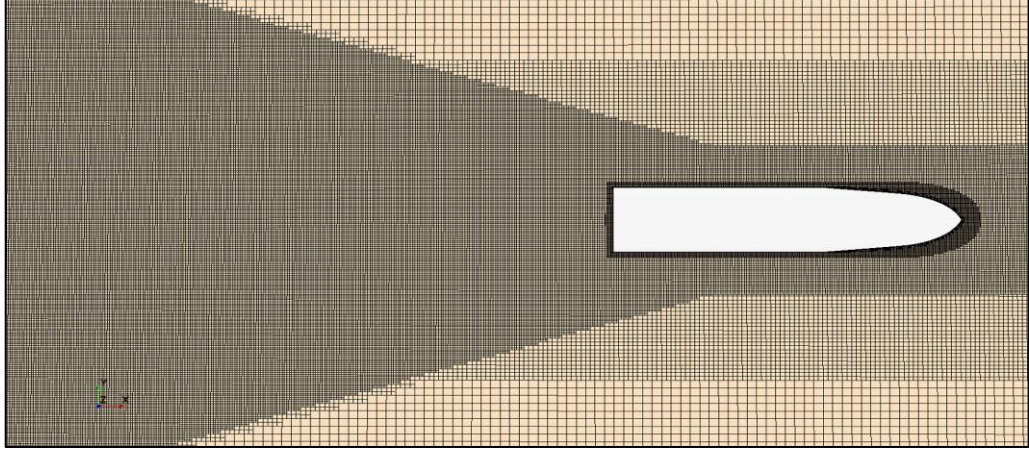
Bu çalışmada hem sakın suda hem de baştan gelen düzenli dalgalar altında ilerleyen kayıcı teknelerin hesaplama hacmi tekne boylarına bağlı olarak boyutsuz hale getirilmiştir. Dolayısıyla boyutsuz bir şekilde verilen uzunlukların oluşturacağı hesaplama hacimleri her bir teknenin boyuna göre değişkenlik gösterecektir. Şekil 2.13' de hesaplama hacminin boyutları gösterilmektedir.

geriye kalan tüm yüzeyler “hız girişı” olarak tanımlanmıştır. Şekil 2.14’te yukarıda belirtilen sınır koşulları gösterilmektedir. Teknenin kendi yüzeyi kaymama koşulunu sağlayacak şekilde “duvar” olarak tanımlanmış ve tekne ile birlikte hareket edecek olan “overset” bölgesinin içine yerleştirilmiştir. Overset bölgesi ile ilgili detaylı bilgi sonraki bölümde verilecektir.

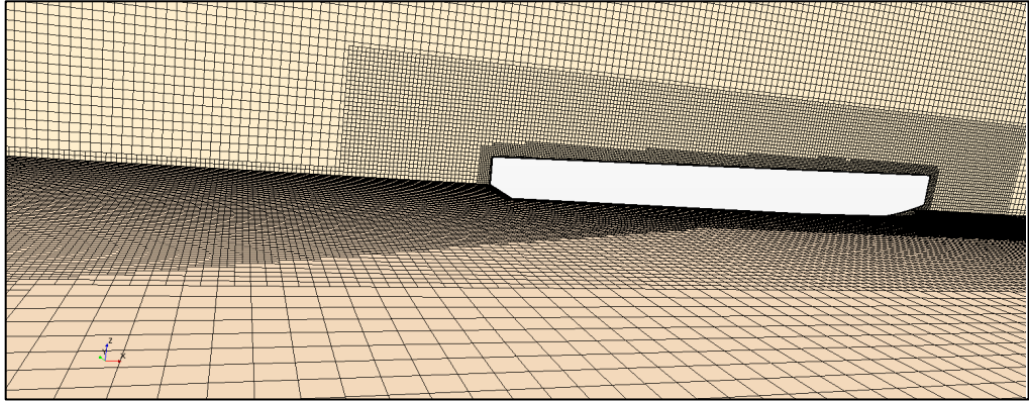
2.1.3.3 Ağ Yapısı

Bu çalışmada daha önce de belirtildiği gibi tüm HAD analizleri STAR-CCM+ ticari yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu ticari yazılımda hesaplama hacmini olabildiğince dikdörtgensel elemana bölmek amacıyla karmaşık geometrilerde bile yüksek kalitede eleman yapısı oluşturan kırılmış ağ yapısı (*trimmer*) kullanılmıştır. Bunun yanında, yüksek oranda öteleme dönme hareketini doğru bir şekilde modelleyebilen “overset” ağ yapısı yöntemi hesaplama hacmini küçük elemanlara bölmek için kullanılmıştır. Bu ağ yapısı ile ilgili detaylı bilgi Benck vd. [160] raporunda bulunabilir.

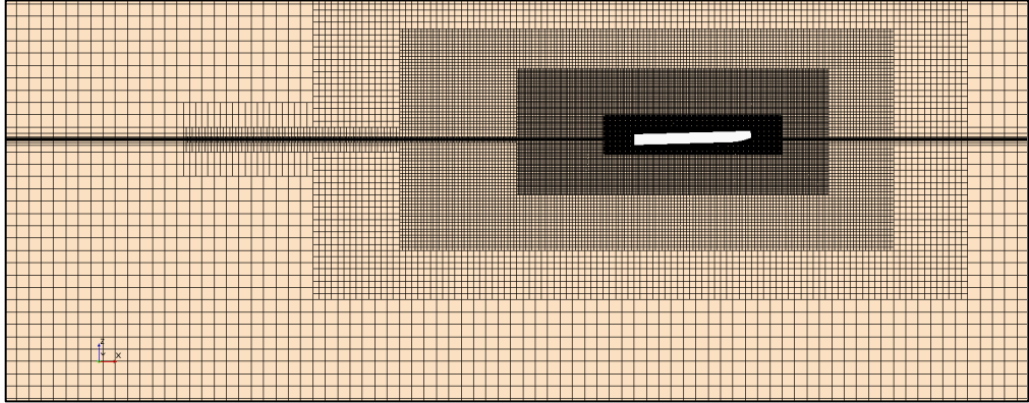
Overset ağ yapısı tekniğinde hesaplama hacmi toplamda iki temel bölgeye ayrılır. Bunlardan birincisi sabit olan arka-plan ağ yapısı iken diğeri ise hareketli olan overset ağ yapısıdır. Bu iki ağ yapısı arasında geçişin uygun ve yumuşak bir biçimde olmasını sağlayan ve adına overlap bölgesi denilen bir bölge daha mevcuttur. Overlap bölgesi bir veya birden çok olabilir ki bu çalışmada tekne etrafında sık ağ yapısına erişebilmek ve çözüm süresini çok artırmamak adına 3 adet overlap bölgesi kullanılmıştır. Ağ yapısı tekne etrafında ve sınır tabakada, serbest su yüzeyine yakın bölgede sıklaştırılmış, radyasyon koşulu sebebiyle de tekneden uzaklaştıkça seyreltilmiştir. Ayrıca Kelvin dalga sistemini doğru ve en az eleman ile temsil edebilmek adına normal serbest yüzeye dik olan alan doğrultusunda Kelvin dalgasına uygun şekilde sıklaştırma yapılmıştır. Oluşturulan ağ yapılarının mevcut fiziği doğru temsil etme ve çözüm açısından benzer özellikler göstermesine karşın, daha önce de belirtildiği gibi farklı boyutlardaki teknelerin içinde oldukları hesaplama hacimlerinde eleman sayısı değişkenlik gösterecektir. Şekil 2.15’te serbest su yüzeyinde oluşturulan ağ yapısı, Şekil 2.16’da tekne etrafındaki ağ yapısı gösterilirken Şekil 2.17’de ise ağ yapısının overset ve arka-plan bölgeleri arasındaki geçişi gösterilmektedir.



Şekil 2.15 Sakin su için serbest su yüzeyindeki ağ yapısı



Şekil 2.16 Sakin su için tekne etrafındaki ağ yapısı



Şekil 2.17 Sakin su için bölgeler arasındaki ağ yapısı geçişi

Sakin su için gerçekleştirilen analizlerde sistematik bir sıklaştırma ile 3 farklı ağ yapısı oluşturulmuş ve oluşturulan bu ağ yapılarından sık ağ yapısı kullanılmıştır. Bunun nedeni ile ilgili detaylı bilgi bir sonraki bölümde verilecektir. Sakin su

analizlerinde kullanılan iki farklı tekne için oluşturulan 3 farklı ağ yapısındaki eleman sayıları Tablo 2.4'te gösterilmiştir.

Tablo 2.4 Sakin su için oluşturulan ağ yapılarındaki eleman sayıları

Tekne Modeli	Ağ Yapısı Türü	Overset	Arka plan	Toplam
Monohedral	Seyrek	1.40×10^5	2.87×10^5	4.27×10^5
	Orta	3.27×10^5	6.55×10^5	9.82×10^5
	Sık	7.54×10^5	15.7×10^5	23.3×10^5
Fridsma	Seyrek	0.36×10^5	1.87×10^5	2.23×10^5
	Orta	0.96×10^5	4.80×10^5	5.76×10^5
	Sık	2.23×10^5	12.1×10^5	14.3×10^5

2.1.3.4 Gerçekleme Yöntemi

Bu çalışmada gerçekleştirilen tüm HAD analizlerinde gerçekleme çalışması için GCI (*Grid Convergence Index*) yöntemi kullanılmıştır. Temelde Richardson ekstrapolasyonuna [161] dayanan bu yöntem ilk olarak Roache [162] tarafından ortaya atılmıştır. Daha sonra pek çok iyileştirme ve geliştirmeye tabi tutulan bu yöntemin nasıl uygulanabileceği Çelik vd. [163] tarafından bir metodoloji ile özetlenmiştir. Bu metodolojiye göre 3 farklı ağ yapısı veya zaman adımı seçilir. Bunlardan 1 numaralı olan sık, 2 numaralı olan orta ve 3 numaralı olan seyrek ağ yapısı veya zaman adımına ilişkin sonucu temsil eder. Ağ yapısına ilişkin belirsizlik belirlenirken zaman adımı sık ve sabit tutulurken, zaman adımına ilişkin belirsizlik belirlenirken ağ yapısı sık ve sabit olarak tutulur. Literatürde bazı çalışmalarda hesaplama süresini azaltmak adına benzer metodoloji orta zaman adımı/ağ yapısı seçilerek de yapılmış olup, bu çalışmada başta belirtildiği gibi sıklaştırmaya uğramayan belirsizlik kaynağı sabit ve sık olarak seçilmiştir. Metodoloji şu şekilde özetlenebilir:

- i)* Herhangi skaler bir değer için çözümler arasındaki farklar şu şekilde hesaplanabilir:

$$\epsilon_{32} = \varphi_3 - \varphi_2 \quad \epsilon_{21} = \varphi_2 - \varphi_1 \quad (2.44)$$

- ii)* Yakınsama kriteri R, çözümler arasındaki farkın oranına göre belirlenir:

$$R = \frac{\varepsilon_{21}}{\varepsilon_{32}} \quad (2.45)$$

iii) Yakınsama kriteri için 4 olası durum ve bu durumların sonucu şu şekilde ifade edilebilir [164]:

- a) $-1 < R < 0$ -----> Salınlı yakınsama
- b) $0 < R < 1$ -----> Monotonik yakınsama
- c) $1 < R$ -----> Monotonik ıraksama
- d) $-1 > R$ -----> Salınlı ıraksama

iv) Eğer koşul b sağlanıyorsa işleme devam edilir. Görünen mertebe Eşitlik (2.46) yardımı ile belirlenirken, eğer sıklaştırma faktörü (r) sabit seçildi ise q değeri 0 çıkacaktır.

$$p = \frac{\ln \left| \frac{1}{R} + q \right|}{\ln(r_{21})} \quad (2.46)$$

v) Ekstrapole edilmiş skaler değer Eşitlik (2.47) yardımı ile belirlendikten sonra bağıl hata Eşitlik (2.48) ile elde edilir.

$$\varphi_{21}^{\text{ext}} = \frac{r^p \varphi_1 - \varphi_2}{(r_{21}^p - 1)} \quad (2.47)$$

$$e_a^{21} = \left| \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{\varphi_1} \right| \quad (2.48)$$

vi) Son adımda ise Eşitlik (2.49) yardımı ile çözümün zaman adımı ya da ağ yapısına ilişkin belirsizlik sonucuna ulaşılmış olur.

$$GCI_{\text{FINE}}^{21} = \frac{1.25 e_a^{21}}{r_{21}^p - 1} \quad (2.49)$$

vii) Eğer iii adımında elde edilen yakınsama kriteri a koşulunu sağlıyorsa, bir sıklaştırma daha yapılır çözümün yeni üçlü kombinasyonu için

yakınsama kriterine bakılır. Eğer bu adımla monotonik yakınsama sağlanırsa yukarıdaki adımlar izlenebilir. Ancak daha sık çözüme gidilse bile yakınsama kriteri halen salınımlı yakınsama bölgesinde ise çözüme ait toplam belirsizlik Eşitlik (2.50) yardımı ile bulunabilir [92], [165].

$$U_K = \frac{1}{2} |S_U - S_L| \quad (2.50)$$

viii) Bu noktadan sonra toplam yüzde belirsizlik ise U_K değerinin sık ağ yapısı veya zaman adımı çözümüne bölünmesi ile belirlenebilir [166].

Bu bölümde anlatılan metodoloji ile her iki tekne için belirli bir ileri hız değerindeki boyutsuz direnç değerinin ağ yapısı ve zaman adımı belirsizlikleri belirlenmiştir. Tablo 2.5’de elde edilen belirsizlik değerleri gösterilmektedir.

Tablo 2.5 Sakin su için belirsizlik değerleri

	Monohedral		Fridsma	
	Ağ Yapısı	Zaman Adımı	Ağ Yapısı	Zaman Adımı
V	7.459 m/s		4.980 m/s	
r	$\sqrt{2}$		$\sqrt{2}$	
ϕ_1	0.1930	0.1930	0.1625	0.1625
ϕ_2	0.1810	0.1927	0.1327	0.1626
ϕ_3	0.1465	0.1924	0.1680	0.1754
R	0.348	0.979	-0.846	0.003
GCI _{SIK}	% 4.137	% 8.727	% 2.803	% 0.001

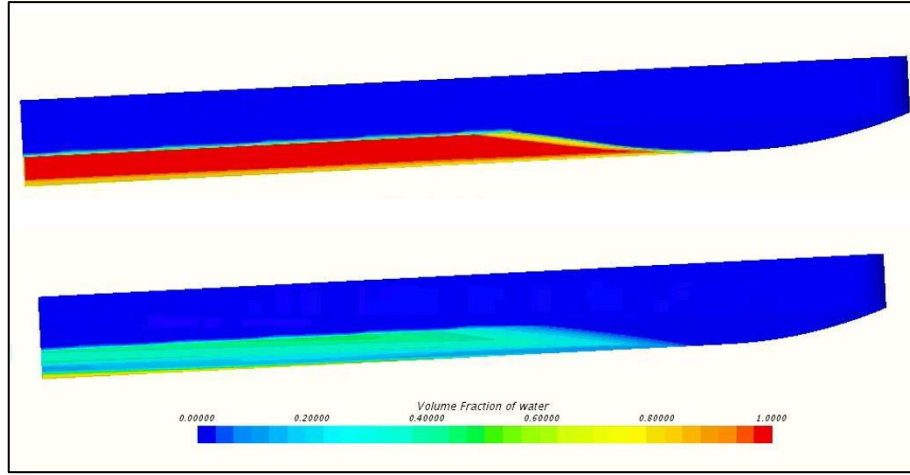
Monohedral teknesi için **iii** maddesinde belirtilen monotonik yakınsama kriterinin sağlandığı ancak Fridsma teknesinde ağ yapısı için salınımlı yakınsama koşulunun sağlandığı Tablo 2.5’ten anlaşılmaktadır. Bu sebeple **vii** maddesi gereği daha sık bir çözüm ağı oluşturulmuş ve bu kez monotonik yakınsama kriteri sağlanmıştır ($R=0.333$). Bu sebeple Fridsma teknesi için belirsizlik değeri Eşitlik (2.50) kullanılarak ya da yeni elde edilmiş üçlü çözüm için GCI yöntemi kullanılarak belirlenebilir. Burada % belirsizlik değeri yeni üçlü kombinasyona göre belirlenmiştir. Tablo 2.5’te zaman adımı belirsizliğinin Monohedral teknesi için bir miktar yüksek olduğu gözlemlense de, sık ve seyrek zaman adımı çözümlerinin bağlı

farkının % 0.3 mertebesinde olması sebebiyle bu değerdeki göreceli yüksekliğin göz ardı edilebileceği düşünölmüştür. Fridsma teknesi için ise elde edilen belirsizlik değerlerinin makul seviyelerde olduğu ilgili tablodan anlaşılmaktadır. Bu tablolara bakılarak sık zaman adımı ve ağ yapısı kullanmanın belirsizlik açısından ciddi bir sıkıntı yaratmayacağı düşünölmüş ve çalışmanın kalan kısmında bu kombinasyon kullanılmıştır.

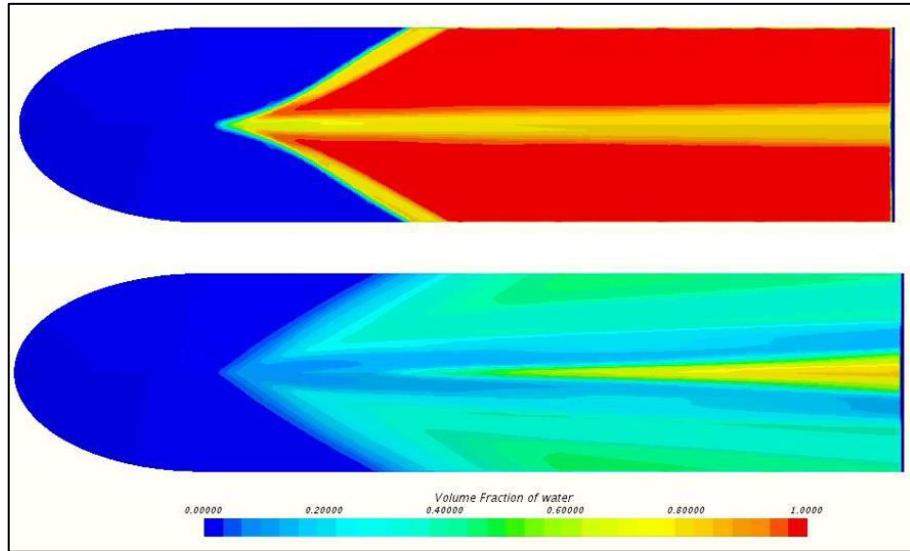
2.1.3.5 HAD Yaklaşımının Validasyonu

Bu bölümde önceki bölümlerde detaylı bir şekilde anlatılan hesaplamalı akışkanlar dinamiği yönteminden elde edilen sonuçlar trim, sudan çıkma ve direnç açısından deney ile mukayese edilmiştir.

Literatürdeki kayıcı tekne çalışmaları da sıklıkla karşılaşılan sayısal ventilasyon probleminin (*NVP*) önüne geçebilmek için HRIC şemasının yeniden düzenlenmesi yöntemi [140] uygulanmıştır. Şekil 2.18 ve 2.19’da Monohedral teknesi için yüksek Fn bölgesinde ($Fn_B=3.96$) hücrelerdeki su ve hava fazı yoğunlukları, düzenlenmiş HRIC şeması ile düzenlenmemiş hali mukayese edilerek gösterilmektedir. Bu şekillerde 1.0 (*kırmızı*) tamamen su dolu hücreyi temsil ederken 0.0 (*mavi*) ise tamamen hava ile dolu hücreyi temsil etmektedir. Normal şartlar altında, verilen başlangıç ve sınır koşullarında teknenin daimi rejim cevabında su altında kalan kısımda yalnızca su fazı bulunmalıdır. Yani bir başka deyişle su altında kalan kısım tamamen kırmızı renkte olmalıdır. Ancak normal HAD yöntemi ile gerçekleştirilen analizlerde, su fazının bulunması gereken bazı hücrelerde hava fazının nüfuzu gözle rahatlıkla görölebilmektedir ve bu durum kayma gerilmelerini azaltarak elde edilmesi gereken direnç değerinden çok daha düşük direnç değerinin elde edilmesine neden olmaktadır. Düzenlenmiş HRIC şemasında bu sıkıntının büyük oranda ortadan kaldırıldığı gözlenmektedir.

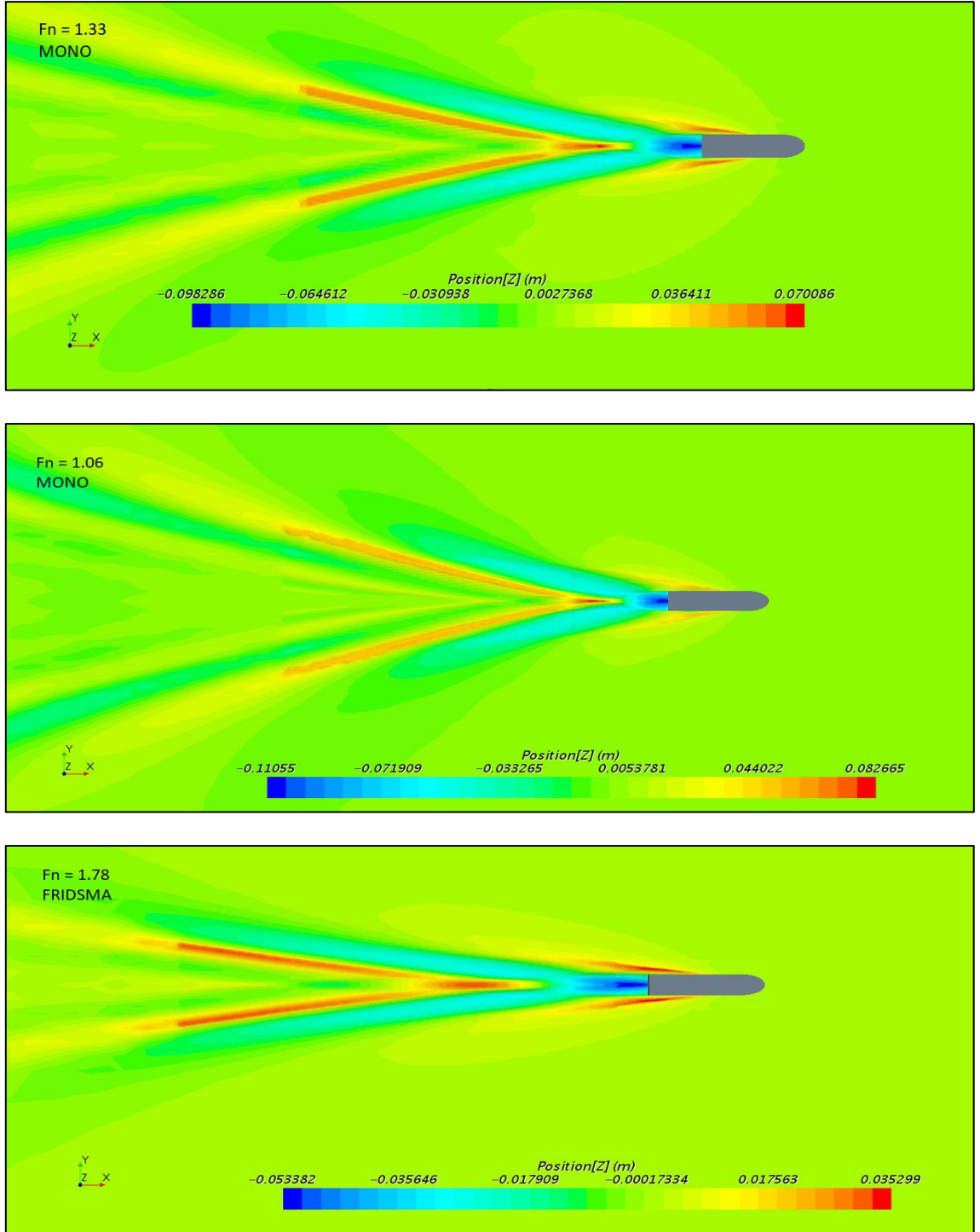


Şekil 2.18 Düzenlenmiş (üst) ve düzenlenmemiş (alt) HRIC şemalarına ait VOF oranları (*yandan görünüş*)



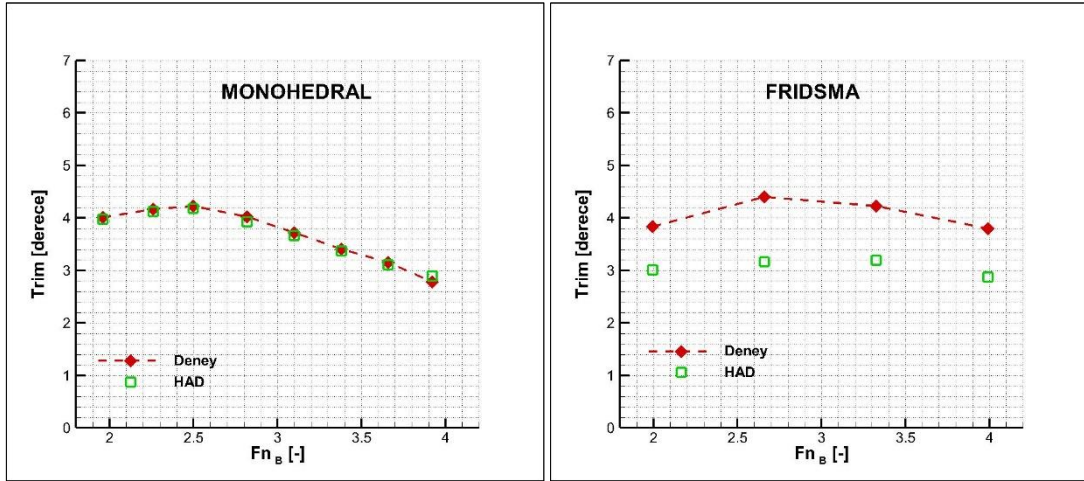
Şekil 2.19 Düzenlenmiş (üst) ve düzenlenmemiş (alt) HRIC şemalarına ait VOF oranları (*alttan görünüş*)

Şekil 2.20’de farklı ilerleme hızlarında serbest yüzey deformasyonları gösterilmektedir. Hem Fridsma hem de Monohedral teknesi için Kelvin dalga profilinin yakalandığı ve simülasyonun, olayın fizliğini doğru bir şekilde temsil edebildiği ilgili şekilden rahatlıkla anlaşılmaktadır.



Şekil 2.20 Farklı ilerleme hızlarındaki serbest yüzey deformasyonları

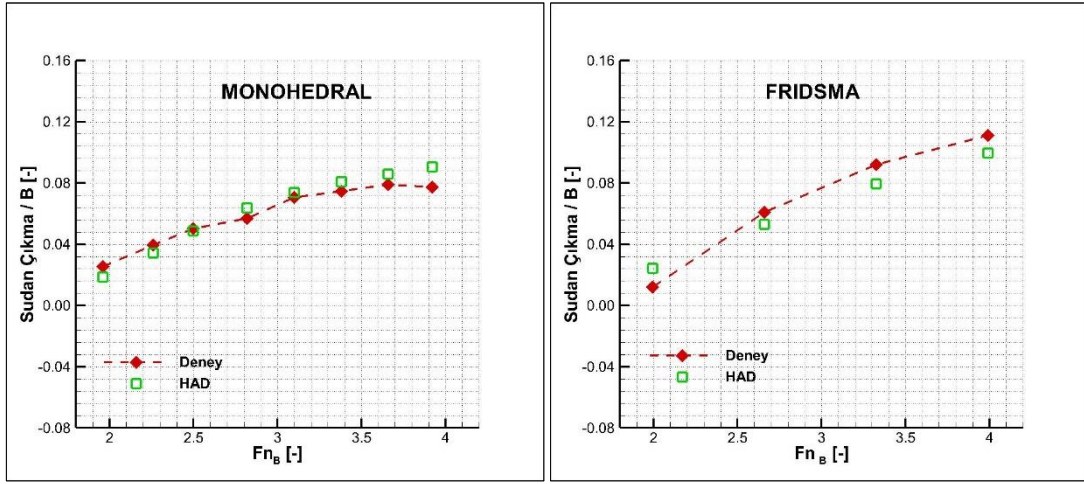
Bu bölümde incelenen her iki tekne için hesaplamalı akışkanlar dinamiği yönteminden elde edilen farklı Froude sayılarındaki trim değerleri Şekil 2.21’de, boyutsuz sudan çıkma değerleri Şekil 2.22’de ve boyutsuz direnç değerleri de Şekil 2.23’te deneysel verilerle karşılaştırılmıştır.



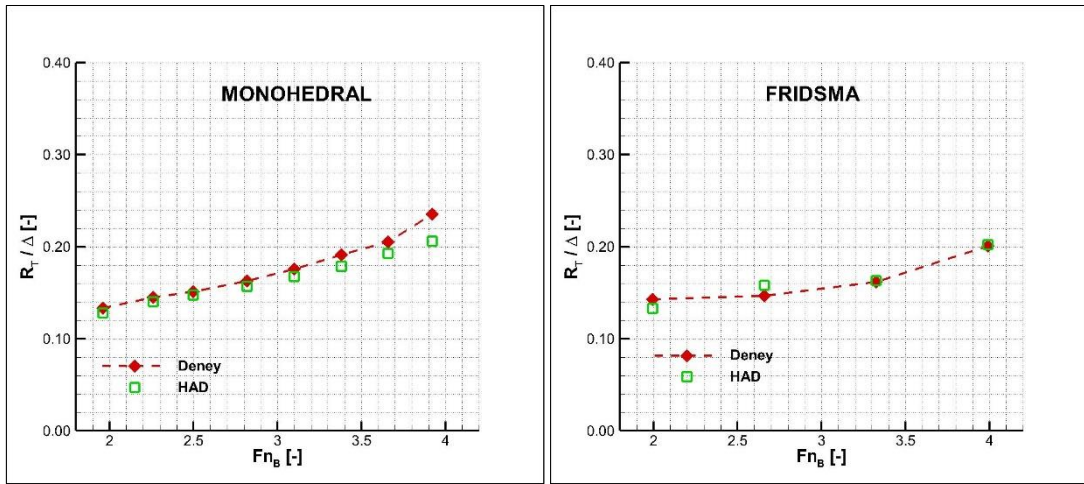
Şekil 2.21 HAD yönteminden elde edilen trim değerleri ile deneysel verilerin karşılaştırılması

Şekil 2.21'e göre deneysel veriler ile hesaplamalı akışkanlar dinamiğinden elde edilen sonuçlar Monoedral teknesi için oldukça iyi derecede bir uyum içerisindedir. Ancak Fridsma teknesi için genel eğilim aynı olsa da deneysel veriler ile hesaplamalı akışkanlar dinamiği sonuçları arasında önemli ölçüde bir fark olduğu açıktır. Bu konuda genel yapısı benzer olan iki teknede elde edilen bu denli farklı sonuçlar için literatürdeki çalışmalar incelenmiş ve birçok hesaplamalı akışkanlar dinamiği ile kayıcı tekne performansı inceleyen çalışmada, Fridsma teknesinin farklı varyantlarında da dinamik trim değerlerinin benzer bir biçimde deneyden oldukça düşük bulunduğu gözlenmiştir [94], [145]. Bu sebeple bulunan sonucun literatür ile uyumlu olduğu ve sonuçtaki farkların deneysel verilerde var olan belirsizlik olabileceği düşünülmektedir.

Şekil 2.22'de benzer bir mukayese bu kez sudan çıkma değerleri için yapılmıştır. Burada sudan çıkma değerlerinin oldukça küçük ve ölçümü zor değerler olması sebebiyle deney ile hesaplamalı akışkanlar dinamiği sonuçlarının genel olarak aynı rejimde olmasına rağmen aralarında bir miktar farklılık bulunması makul kabul edilebilir. Bu bağlamda sayısal yöntemden elde edilen sonucun genel anlamda deney ile uyumlu olduğu söylenebilir.



Şekil 2.22 HAD yönteminden elde edilen boyutsuz sudan çıkma değerleri ile deneysel verilerin karşılaştırılması



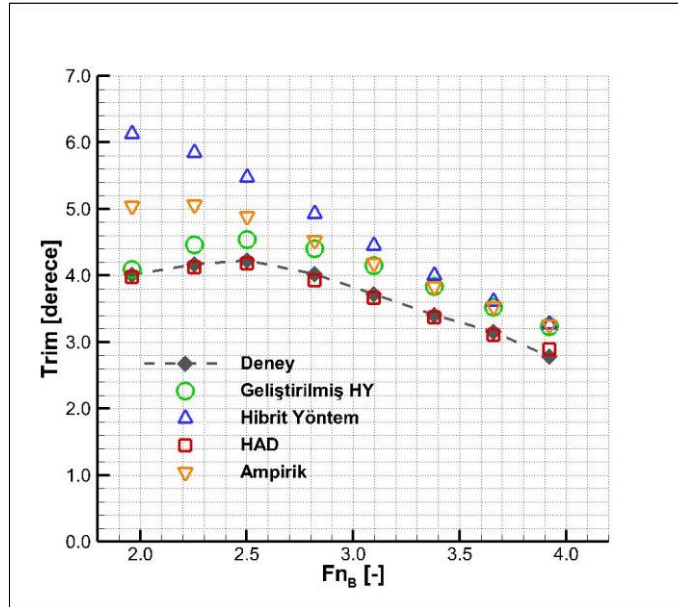
Şekil 2.23 HAD yönteminden elde edilen boyutsuz direnç değerleri ile deneysel verilerin karşılaştırılması

Şekil 2.23'te hesaplamalı akışkanlar dinamiği yönteminden elde edilen toplam boyutsuz direnç değerlerinin deneysel veriler ile mukayese edildiği ve sonuçların genel anlamda her iki tekne için de deney ile oldukça uyumlu olduğu söylenebilir. Monohedral teknesi için özellikle ilerleme hızının artması ya da başka bir deyişle Froude sayısının artması deney ile HAD sonuçları arasındaki farkı artırmış, ancak Fridsma teknesinde böyle bir durum gözlenmemiştir. Bunun temel nedeni olarak daha önce de detaylı bir şekilde anlatılan sayısal ventilasyon problemi (NVP) gösterilebilir. Bu sebeple Monohedral teknesinde elde edilen direnç değerleri, deneysel verilerin hep altında kalmıştır. Ancak, ilginç bir şekilde yüksek hızlara çıkılmasına karşın Fridsma teknesinde sayısal ventilasyon problemi ile

karşılaşılmamış ve bu sebeple sonuçlar her zaman deney ile benzer mertebelerde elde edilmiştir. Ayrıca HAD yönteminde elde edilen toplam direnç değerleri bileşenlerine ayrılarak incelenmemiş yalnızca toplam direnç değerleri üzerinden bir karşılaştırma yapılmıştır.

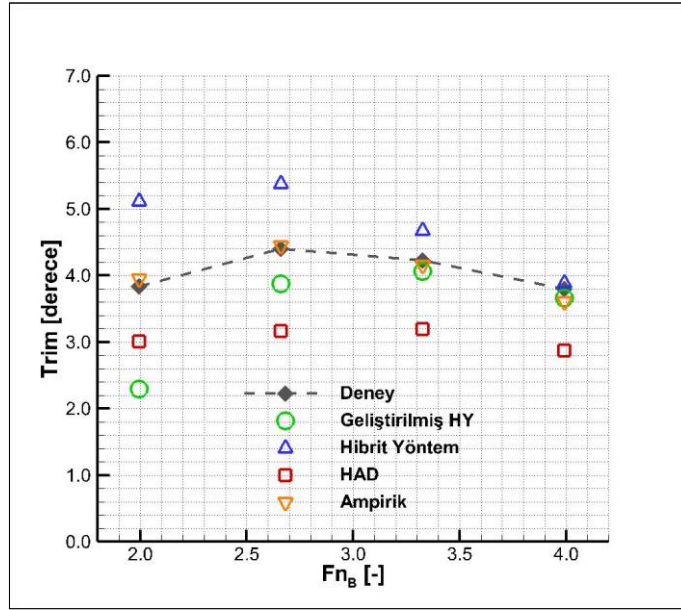
2.2 Sonuçların Değerlendirilmesi

Bu alt bölümde, bu tez çalışmasının 2. bölümünde anlatılan 3 sayısal yöntemden elde edilen sonuçlar hem deney sonuçları hem de birbiri ile mukayese edilecektir. Gerçekleştirilen analizler sırasında her iki teknede de yunuslama hareketi gözlenmemiştir. Şekil 2.24 ve Şekil 2.25'te yöntemlerden elde edilen trim değerlerinin mukayeseesi yapılmıştır.



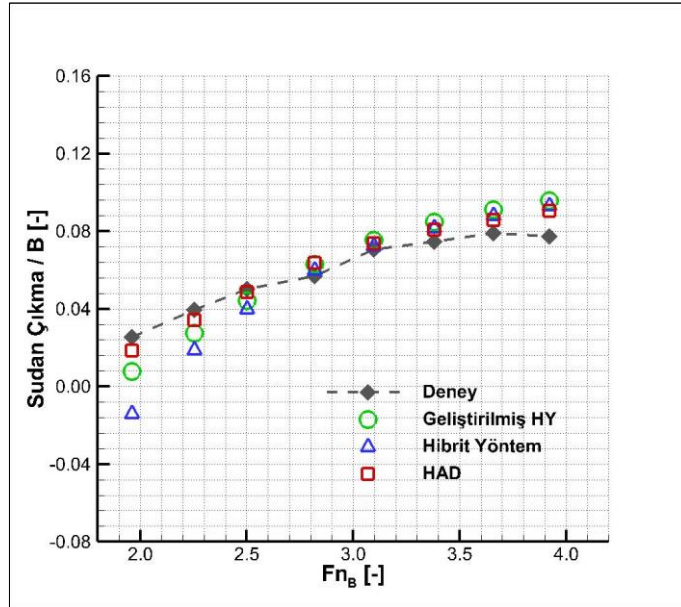
Şekil 2.24 Monohedral teknesi için trim sonuçları

Şekil 2.24'e bakıldığında yüksek Froude sayılarında tüm yöntemler genel olarak deneye yakın sonuçlar verse de göreceli olarak düşük Froude sayılarında hesaplamalı akışkanlar dinamiği yöntemi ve geliştirilmiş hibrit yöntem dışındakilerin deney ile ciddi oranda farklılık gösterdikleri anlaşılmaktadır. Şekil 2.25'te ise benzer mukayese bu kez Fridsma teknesi için yapılmıştır. Bu şekle göre ise hesaplamalı akışkanlar dinamiği yönteminden elde edilen sonuçlar Monohedral teknesinin aksine deneyden oldukça farklılık gösterirken, ampirik yöntem bu hususta en başarılı olarak göze çarpmaktadır.

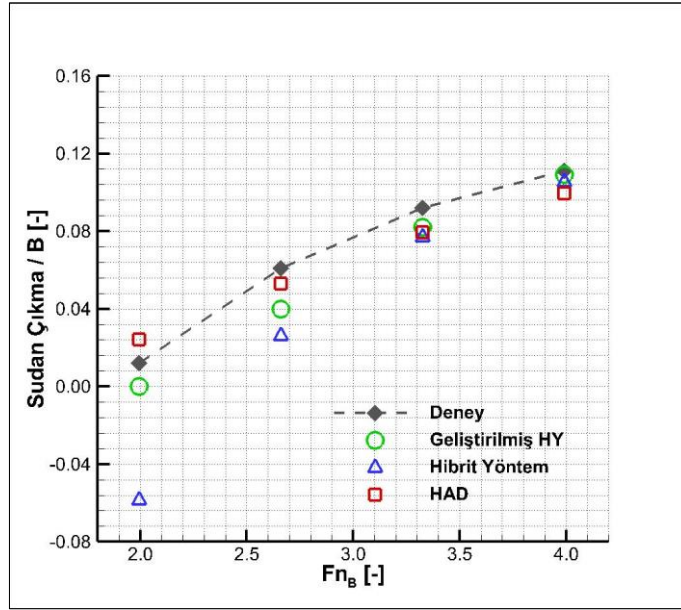


Şekil 2.25 Fridsma teknesi için trim sonuçları

Şekil 2.26 ve Şekil 2.27’de benzer bir mukayese bu kez sudan çıkma değerleri için yapılmıştır. Ampirik yöntemden sudan çıkma sonucu alınamadığı için, bu mukayesede ampirik yöntem dikkate alınmamıştır.

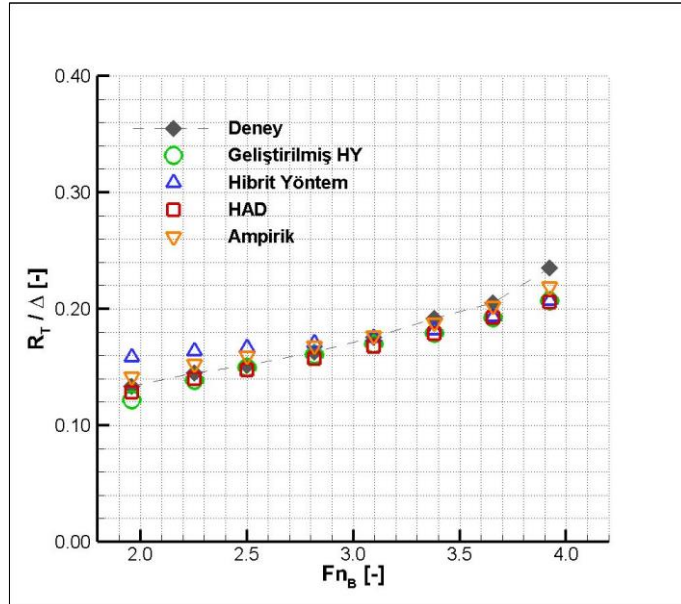


Şekil 2.26 Monohedral teknesi için sudan çıkma sonuçları



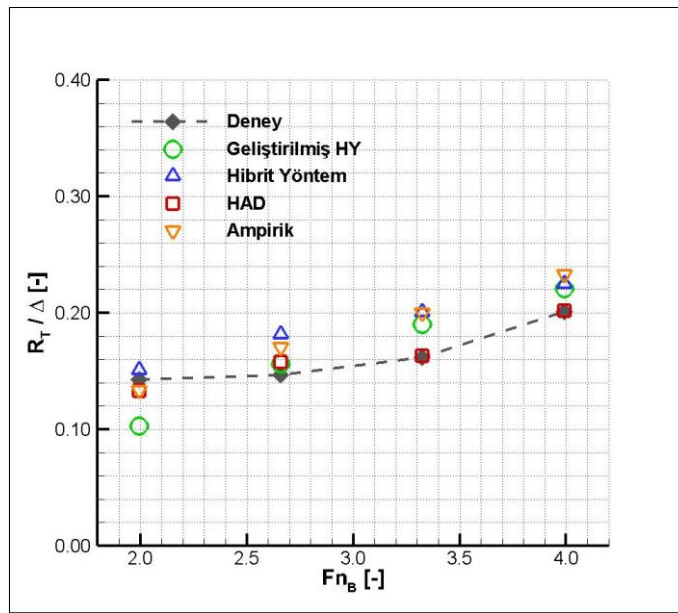
Şekil 2.27 Fridsma teknesi için sudan çıkma sonuçları

Şekil 2.26 ve Şekil 2.27’de daha önceki yorumlara benzer bir şekilde hesaplamalı akışkanlar dinamiğinden ve geliştirilmiş hibrit yöntemden elde edilen sonuçların göreceli olarak düşük Froude sayılarında da deneye yakın sonuçlar vermesine karşın, bu bölgede hibrit yöntemin bu iki yöntemden bir miktar geri planda kaldığı söylenebilir. Buna rağmen göreceli olarak yüksek Froude sayılarında bu yöntemin de deney ile uyumlu olduğu rahatlıkla söylenebilir.



Şekil 2.28 Monohedral teknesi için toplam direnç sonuçları

Şekil 2.28'e göre Monohedral teknesi için göreceli olarak düşük Froude sayılarında yöntemler genel olarak deney ile oldukça uyumlu görünse de (hibrit yöntem hariç), yüksek Froude sayılarında birbirlerine yakın ve deneyden bir miktar daha düşük sonuçlar vermektedirler. Şekil 2.29'da aynı mukayese Fridsma teknesi için yapılmıştır. Burada ise hesaplamalı akışkanlar dinamiği yaklaşımının yüksek Froude sayılarında deney ile oldukça uyumlu olmasına rağmen, diğer yöntemler Monohedral teknesinin aksine deneyden bir miktar daha yüksek sonuçlar vermektedir. Buna rağmen genel eğilim olarak tüm yöntemlerin deney ile uyumlu olduğu rahatlıkla söylenebilir.



Şekil 2.29 Fridsma teknesi için toplam direnç sonuçları

Her bir tekne için tüm yöntemlerden elde edilen sonuçlar trim, sudan çıkma ve direnç açısından deneyle karşılaştırılmış ve yüzde bağıl hataların karelerinin ortalamalarının karekökü (RMS), ϵ her bir senaryo için yüzde bağıl hata miktarını belirtmek üzere Eşitlik (2.51) ile elde edilmiştir.

$$RMS_{HATA} = \left(\sum_{n=1}^N \epsilon_i^2 \right)^{0.5} \quad (2.51)$$

Eşitlik (2.51) yardımı ile elde edilen ortalama bağıl hata değerleri Tablo 2.6'da hem Monohedral hem de Fridsma teknesi için verilmiştir. Ortalama hatalar belirlenirken genişliğe bağılı Froude sayının 2'den büyük olduğu ($Fn_B > 2$) senaryolar dikkate

alınmıştır. Bu tablo oluşturulurken sudan çıkma değerleri göz ardı edilmiştir. Bunun nedenlerinden biri ampirik yöntemin sudan çıkma değeri tahmin etmemesidir. Diğer neden ise şöyle açıklanabilir. Sudan çıkma değerlerinde eğrilerin genel eğilimleri aynı olsa dahi elde edilen değerler çok küçüktür. Bu sebeple deney ile arasındaki fark çok küçük olmasına rağmen (*örneğin 0.5 mm*), bağıl fark çok yüksek görünmektedir. Bu sebeplerle bu tabloda sudan çıkma değerlerine yer verilmemiştir.

Tablo 2.6 Kullanılan tekne modelleri için % RMS_{HATA} değerleri

Tekne Modeli	Sayısal Yöntem	Trim	Direnç
Monohedral	Geliştirilmiş HY	11.22	6.12
	Hibrit Yöntem	24.55	8.30
	HAD	2.05	6.53
	Ampirik	14.94	4.12
Fridsma	Geliştirilmiş HY	7.59	12.04
	Hibrit Yöntem	14.26	20.55
	HAD	25.75	4.34
	Ampirik	3.22	18.84

Tüm bu grafikler ve tablolar neticesinde sakın sudaki kayıcı teknenin hidrodinamik performansının incelenmesi için kullanılan sayısal yöntemlere ilişkin şu çıkarımlara ulaşılmıştır:

- Monohedral teknesi için HAD yaklaşımı diğer yöntemlere göre özellikle trim tahmininde çok daha iyi bir yöntemdir. Fridsma teknesi için ise ampirik yöntem trim tahmininde diğer yöntemlerden çok daha iyidir. Dahası bu tekne için HAD yöntemleri literatürdekilere benzer bir biçimde deneyden oldukça uzak sonuçlar vermiştir.
- Sudan çıkma hesabında her iki tekne için de HAD en az hata ile tahmin yapan yöntem olsa da, bu değerlerin küçük değerler olmasından kaynaklı olarak hata mertebelerinin büyük görüldüğü ancak değerlerin deneysel verileri genel olarak makul bir şekilde takip ettiği söylenebilir.
- Direnç değerleri göz önüne alındığında her iki tekne için de HAD yönteminden elde edilen sonuçların mertebe olarak aynı olduğu gözlenirken, diğer yöntemlerden elde edilen sonuçlarda bir dalgalanma söz konusudur. HAD yaklaşımının direnç değerinde daha stabil, trimde ise çok dalgalı

görünmesinin nedeninin Fridsma teknesinin trim değerlerinde meydana gelmiş olabilecek deneysel belirsizliğin olduğu düşünülmektedir.

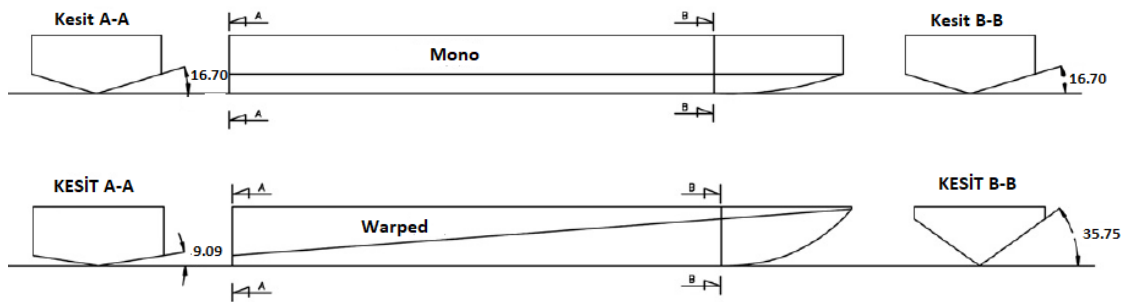
- Tüm bu sonuçlara bakıldığında ve gerek konfor gerekse işletme maliyeti açısından trim ve direnç değerlerinin daha makul tahminin daha önemli olabileceği düşünüldüğünde, geliştirilmiş hibrit yöntemin özellikle ön dizayn aşamasında oldukça hızlı ve güvenilir bir şekilde sonuç verebileceği gözlenmiştir.
- Dahası bu yöntem ampirik yöntemle göre daha güvenilir, HAD yöntemine göre ise çok daha hızlı sonuçlar vermekte ve ampirik yöntemin aksine ön kayıcı rejimde de makul sonuçlar verebilmektedir. Gerek belirtilen sebepler, gerekse ampirik yöntemle nazaran sudan çıkma değerine ilişkin de makul bir tahminde bulunabilmesi gibi nedenler göz önüne alındığında geliştirilmiş hibrit yöntem daha önce de belirtildiği gibi özellikle ön dizayn aşamasında oldukça cazip bir alternatif haline gelmektedir.
- Beklendiği üzere HAD yaklaşımları hesaplama maliyetlerine rağmen halen en güvenilir yöntem olarak görülmektedir. Bu sebeple geliştirilmiş hibrit yöntem ön araştırma, HAD yöntemlerinin ise daha derin analizlerde kullanılması tavsiye edilebilir.

3

KAYICI TEKNELERDE DENİZCİLİĞİN HAD YÖNTEMİ İLE İNCELENMESİ

Bu bölümde kayıcı bir teknenin baştan gelen düzenli dalgalar altındaki hidrodinamik performansı hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) yöntemi kullanılarak incelenecektir. Seçilen teknelerin düşey hareketleri ve baş ivmelenme genlik karşılık fonksiyonları geniş bir frekans aralığı için elde edilecek ve deneysel veriler ile karşılaştırılacaktır.

Kayıcı bir teknenin baştan gelen düzenli dalgalar altındaki hidrodinamik performansını HAD ile incelemek adına iki farklı kayıcı tekne modeli kullanılmıştır. Bir önceki bölümde deneysel verilerin daha güvenilir olduğu sonucuna varılan “*Monohedral*” teknesi bu amaçla seçilen ilk teknedir. Bu bölümde kullanılan diğer tekne modeli ise kalkıntı açısı gemi boyunca doğrusal bir şekilde değişen “*Warped*” modelidir [24]. Böylece kalkıntı açısının sabit ya da değişken olmasının problemin HAD ile çözülmesine bir etkisinin olup olmadığının da anlaşılabileceği düşünülmektedir. Kullanılan teknelerin 2 boyutlu görünüşleri Şekil 3.1’de gösterilirken, ilgili teknelerin bazı temel özellikleri Tablo 3.1’de listelenmiştir.



Şekil 3.1 Kullanılan tekne modellerinin 2 boyutlu görünüşü

Tablo 3.1 Kullanılan teknelerin temel özellikleri

Parametre	Monoedral	Warped	Birim
L_{OA}	1.900	1.900	m
B	0.424	0.424	m
Δ	319.7	318.5	N
LCG	0.697	0.586	m
VCG	0.143	0.156	m
k_{yy}	0.583	0.519	m
T_{AP}	0.096	0.108	m/s
β	16.70	9.09-35.75	derece
V	3.4, 4.6, 5,75		m/s

3.1 Fiziksel Model

Hesaplamalı akışkanlar dinamiği yöntemi ile kayıcı bir teknenin sakin su performansını incelemek için oluşturulan fiziksel model ile baştan gelen düzenli dalgalar altındaki hidrodinamik performansı incelemek için oluşturulan fiziksel model büyük oranda benzerlik göstermektedir. Bu sebeple bu kısımda özet olarak ifade edilecek olan model hakkında detaylı bilgi için Bölüm 2.1.3 incelenebilir.

Sayısal çözümlemede aynı ticari yazılım kullanılmış olup yönetici denklemler sakin sudakine benzer bir şekilde kütlenin ve momentumun korunum denklemleridir (*bkz. Eşitlik (2.39)-(2.42)*). RANS denklemleri yine sonlu hacimler yöntemi ile ayrıklaştırılmıştır. Akışkana ait özellikler, iç iterasyon sayıları, ayrıklaştırma mertebeleri vs. sakin sudaki fiziksel model ile tamamen özdeştir. Sakin sudaki modele göre oluşturulan en temel fark serbest su yüzeyidir. VOF yüzeyi baştan gelen düzenli dalgalar için 5. dereceden Stokes dalgaları ile tanımlanmıştır. Bunun nedeni doğada mevcut dalgaların lineer teorideki gibi tam bir sinüs dalgası gibi davranmaması, dahası bunun yerine daha yayvan dalga çukurlarına ve daha dik dalga tepelerine sahip olmasıdır. Sakin sudakine benzer bir şekilde deneysel senaryoyu özdeş şekilde temsil edebilmek için DFBI (*Dynamic Fluid Body Interaction*) modülü aktif hale getirilmiştir. En genel halde kayıcı teknenin 2 serbestlik dereceli hareketi, doğrusal ve açıl momentum denklemlerinin çözülmesi ile bulunabilir:

$$\sum \vec{F} = m\vec{a} \quad (3.1)$$

$$\sum \vec{M}_G = I_G \vec{a}_a + \vec{\omega} \times I_G \vec{\omega} \quad (3.2)$$

Burada $\vec{F}$ toplam kuvveti, m kütleyi, $\vec{a}$ ise doğrusal ivmeyi temsil ederken $\vec{M}_G$, I_G , $\vec{a}_a$ ve $\vec{\omega}$ ise sırasıyla ağırlık merkezine göre momenti, ağırlığın atalet momentini, açısal ivmeyi ve açısal hızı temsil etmektedir. Baştan gelen düzenli dalgalar için oluşturulan fiziksel modele ait özellikler Tablo 3.2’de verilmiştir.

Tablo 3.2 Baştan gelen düzenli dalgalar için fiziksel özellikler

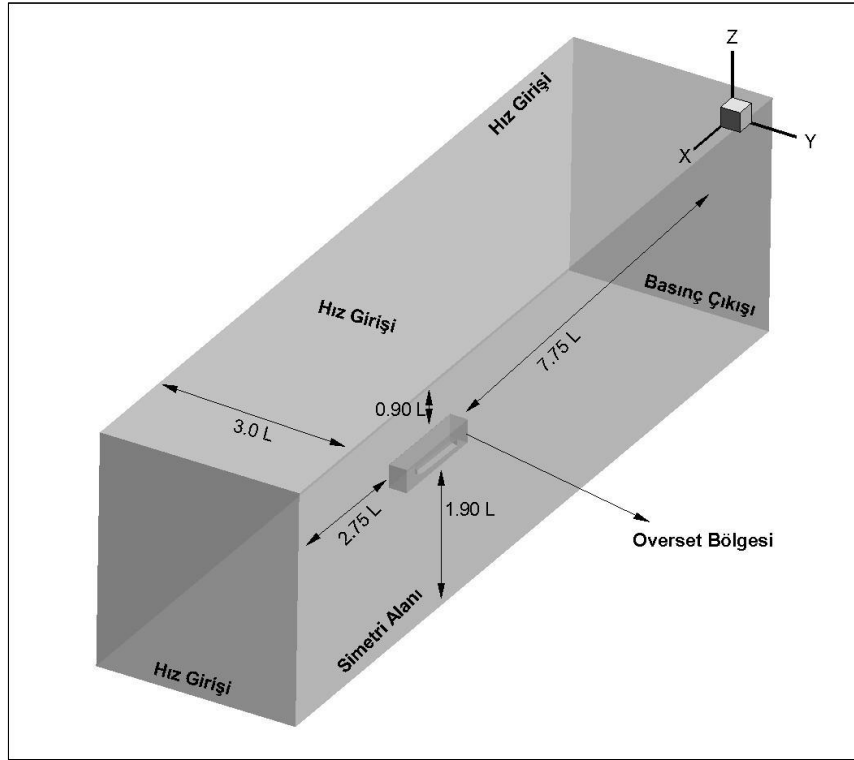
Türbülans Modeli	k-ε
VOF şeması	İkinci mertebe
VOF yüzeyi	5. dereceden Stokes dalgası
Taşıyım terimleri	İkinci mertebe
Zaman terimleri	Birinci mertebe
İnterpolasyon	Doğrusal
Basınç - Hız ilişkisi	SIMPLE
İç iterasyon	10

Zaman adımı ITTC [159]’nin önerilerine ve literatürdeki diğer çalışmalara benzer bir şekilde ([145], [167]) karşılaşma periyoduna (T_e) bağlı olarak Eşitlik (3.3)’teki gibi belirlenmiştir.

$$\Delta t = \frac{T_e}{2^8} \quad (3.3)$$

3.2 Hesaplama Hacmi ve Sınır Koşulları

Hesaplama hacmi ve sınır koşulları sakın sudaki problem ile bire bir özdeş şekilde belirlenmiştir. Önceki probleme benzer bir şekilde hacim çıkışı “basınç çıkışı”, tekne orta simetri eksenini “simetri yüzeyi” olarak tanımlanırken geriye kalan yüzeyler ise “hız girişi” olarak tanımlanmıştır. Yine bir önceki bölümde bahsedildiği gibi oluşturulan hesaplama hacmi gemi boyu ile boyutsuzlaştırılmıştır. Şekil 3.2’de hesaplama hacmi ve sınır koşulları gösterilmektedir.



Şekil 3.2 Baştan gelen düzenli dalgalar için hesaplama hacmi ve sınır koşulları

3.3 Ağ Yapısı ve Gerçekleme Çalışması

Daha önce de belirtildiği üzere kullanılan ticari çözücü olan STAR-CCM+ programının içerisinde yer alan ve olabildiğince dikdörtgen şekilde eleman atayabilen kırılmış ağ yapısı hesaplama hacmini küçük parçalara ayırmak için kullanılmıştır. Teknenin yüzeyi “kaymayan duvar” olarak tanımlanmış ve sınır tabaka yalnızca tekne yüzeyi etrafında oluşturulmuştur. Ağ yapısı sakın sudaki ağ yapısı ile birebir aynı özellikleri göstermektedir. Detaylı bilgi için Bölüm 2.1.3.3 incelenebilir (bkz. Şekil 2.15-2.17).

Gerçekleme çalışması için her bir tekneye ait 3 farklı ağ yapısı oluşturulmuştur (bkz. Tablo 2.4). Gerçekleme ya da başka bir deyişle belirsizlik çalışması için GCI (*Grid Convergence Index*) yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntemle ilişkin detaylı bilgi için Bölüm 2.1.3.4 incelenebilir. Her sayısal çalışmada olduğu gibi denizcilik çalışmalarında da sayısal belirsizlik makul bir parametre üzerinden belirlenmelidir. Bu çalışmada belirsizlik dalıp-çıkma hareketi üzerinden gerçekleştirilmiştir. Monohedral teknesinin 3.4 m/s ilerleme hızı ve 7.59 rad/s (C_6) karşılaşma frekansı için zaman adımı ve ağ yapısı belirsizlik değerleri Tablo 3.3’te gösterilmiştir.

Tablo 3.3 Monohedral teknesinin dalıp-çıkma hareketi için ağ yapısı ve zaman adımı belirsizliği

Parametre	Ağ Yapısı	Zaman Adımı
r	$\sqrt{2}$	$\sqrt{2}$
φ_1	1.080	1.109
φ_2	1.114	1.080
φ_3	1.184	1.022
R	0.49	0.51
GCI _{SİK}	% 3.90	% 3.42

Tablo 3.3' e göre zaman adımı ve ağ yapısı için yakınsama kriteri monotonik yakınsama rejimindedir ve Bölüm 2.1.3.4'te özetlenen metodoloji rahatlıkla uygulanabilir ve yüzde belirsizlik değerleri her iki belirsizlik kaynağı için de kabul edilebilir mertebelerdedir. Bu noktada gerçekleştirilen tüm analizlerde sık ağ yapısının kullanıldığı, zaman adımı için ise sık ve orta zaman adımı arasındaki bağıl farkın % 2.5 mertebelerinde olması, literatürdeki mevcut çalışmalara uygun olması ve hesaplama süresini kısaltabilmek adına orta zaman adımı ($T_e/2^8$) kullanılmıştır.

3.4 Baştan Gelen Düzenli Dalgalarda Denizcilik Analizi

Bu bölümün başında da belirtildiği üzere baştan gelen düzenli dalgalar altındaki kayıcı teknenin hidrodinamik cevabı iki farklı kayıcı tekne kullanılarak incelenmiştir. Tüm sayısal analizler 128 GB RAM ve 30 çekirdekli bir işlemciye sahip bir iş istasyonunda gerçekleştirilmiştir. Her bir analiz yaklaşık 8-10 saat kadar sürmüş ve dalıp-çıkma ve baş-kıç vurma hareketleri 5 periyot boyunca kendini yineledikten sonra analizler sonlandırılmıştır.

İki farklı model 3 farklı Froude sayısında ve 8 farklı doğrusal baştan gelen düzenli dalgaya maruz bırakılmıştır. Tekneler z yönünde harekete ve y yönünde dönmeye serbest bırakılmış ve modellerin hareketleri ve ivmeleri zamana bağlı olarak ölçülmüştür. Dalga genlikleri genlik cevap fonksiyonlarının değişkenlik göstermediği lineer bölge aralığında ve karşılaştırma yapılacak olan deneysel çalışmayla özdeş olacak şekilde seçilmiştir. Seçilen senaryolara ilişkin özellikler Tablo 3.4'te listelenmiştir.

Tablo 3.4 Seçilen Senaryolara İlişkin Özellikler

V (m/s)	Fn (-)	Senaryo Kodu	ω (rad/s)	k (rad/m)	λ (m)	A (m)	λ / L (-)
3.40 4.60 5.75	0.79 1.07 1.33	C1	5.65	3.260	1.928	0.020	1.014
		C2	5.03	2.576	2.440	0.020	1.284
		C3	4.40	1.972	3.186	0.020	1.677
		C4	4.08	1.700	3.695	0.032	1.945
		C5	3.77	1.449	4.337	0.032	2.283
		C6	3.46	1.217	5.161	0.035	2.717
		C7	3.14	1.006	6.245	0.035	3.287
		C8	2.83	0.815	7.710	0.045	4.058

Tablo 3.4'te belirtilen senaryolar her iki tekneye de ayrı ayrı uygulanmış ve zamana bağlı sonuçlar kaydedilmiştir. Doğrusal teoriye göre belirli bir ilerleme hızına sahip bir gemi baştan gelen düzenli bir dalgaya maruz kalırsa, düzenli dalga ile karşılaşma frekansı ölçüsünde bir salınım hareketi yapar. Baştan gelen dalgalar için karşılaşma frekansı (ω_e) şu şekilde ifade edilebilir:

$$\omega_e = \omega + \omega^2 \frac{V}{g} \quad (3.4)$$

Burada ω gelen dalga'nın açısal frekansını (rad/s), V gemi ilerleme hızını (m/s) temsil ederken g ise yer çekim ivmesini (m/s^2) temsil etmektedir. Karşılaşma periyodu (T_e) ise Eşitlik (3.5) yardımı ile bulunabilir.

$$T_e = \frac{2\pi}{\omega_e} \quad (3.5)$$

Daimi rejim cevabına erişmiş ve 5 karşılaşma periyodu kadar salınım hareketi yapmış bir teknenin genlik cevap fonksiyonu (RAO), Fourier seri açılımı yardımı ile belirlenebilir. Zamana bağlı hareket Fourier serisi yardımı ile şu şekilde ifade edilebilir:

$$\eta_i(t) = \eta_{i,0} + \sum_{n=1}^N \eta_{i,n} \cos(\omega t + \beta_{i,n}) \quad (3.6)$$

$n = 1, 2, 3, \dots \quad i = 3, 5$

$$a_{i,1} = \frac{2}{T} \int_0^T \eta_i(t) \sin(\omega t) dt \quad (3.7)$$

$$b_{i,1} = \frac{2}{T} \int_0^T \eta_i(t) \cos(\omega t) dt \quad (3.8)$$

$$\eta_{i,1} = \sqrt{a_{i,1}^2 + b_{i,1}^2} \quad (3.9)$$

$$\beta_{i,1} = \arctan\left(\frac{a_{i,1}}{b_{i,1}}\right) \quad (3.10)$$

Burada $\eta_{i,0}$ seçilen hareketin sıfırinci harmoniğini, $a_{i,1}$ ve $b_{i,1}$ Euler katsayılarını, $\eta_{i,1}$ seçilen hareketin birinci harmoniğini temsil ederken $\beta_{i,1}$ ise faz açısını temsil etmektedir. Seçilen senaryolarda teknenin cevabı yalnızca tek bir frekans ile ifade edilebildiğinden - ki burada bu değer karşılaşma frekansıdır - $\eta_{i,1}$ yerine, basitlik olması açısından hareketin genliği η_i ile temsil edilecektir. Ayrıca i indisi birleşik gemi hareketini temsil etmekte ve dalıp-çıkma hareketi için 3, baş-kıç vurma hareketi içinse 5 numaralı indis kullanılmaktadır.

Eşitlik (3.6)-(3.10) yardımı ile bulunan zamana bağlı hareketlerin genlikleri (*1. harmonikleri*) kullanılarak boyutsuz haldeki hareket genlik cevap fonksiyonları, A gelen dalga genliğini, k ise dalga sayısını temsil etmek koşulu ile şu şekilde elde edilebilir:

$$RAO_3 = \frac{\eta_3}{A} \quad (3.11)$$

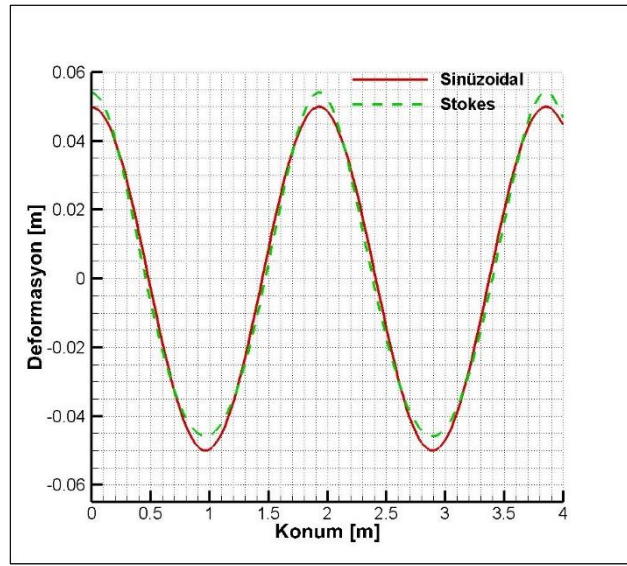
$$RAO_5 = \frac{\eta_5}{Ak} \quad (3.12)$$

3.5 Sayısal Sonuçlar

Genlik cevap fonksiyonları grafikleri 3 temel bölgeye ayrılabilir: atalet bölgesi, sönüm bölgesi ve hidrostatik baskın bölge. Bunlardan atalet bölgesi, atalet

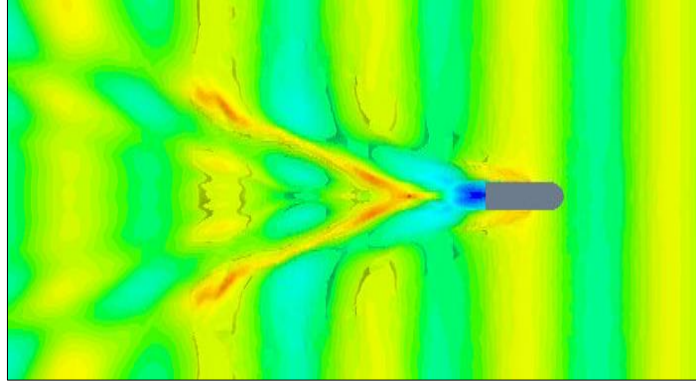
kuvvetlerinin baskın olduğu ve teknenin göreceli olarak küçük dalga boyları ile karşılaştığı bölgedir. Sönüm bölgesinde hareketi sönüm değeri domine ederken, hidrostatik bölgede ise tekne yüksek dalga boylarına sahip dalgalarla karşılaşır ve bu bölgede hidrostatik kuvvetler baskındır. Bu bölümde elde edilen sonuçlar burada kısaca tanımlanan bu 3 bölgeye istinaden değerlendirilecektir.

İlk olarak kayıcı teknenin belirli bir ileri hız etkisi altında ilerlerken baştan gelen düzenli Stokes dalgaları ile karşılaşması sağlanmıştır. Örnek bir Stokes dalgası Şekil 3.3'te gösterilmiştir.



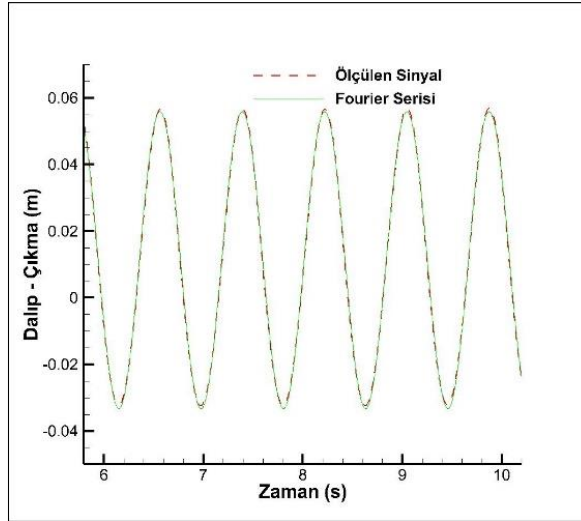
Şekil 3.3 Stokes dalgası ve sinüzoidal dalga örneği

Şekil 3.3'te $t=0$ saniyedeki konuma bağlı örnek bir Stokes dalgası ve sinüzoidal dalga gösterilmiştir. Bu şekilden de anlaşılacağı üzere Stokes dalgaları çukurları daha yayvan, tepeleri ise daha dik bir dalga türüdür ve doğadaki dalgaları temsil etmede daha başarılıdır [168]. Bu nedenle bu bölümdeki bütün dalga profilleri 5. dereceden Stokes dalgası ile temsil edilmiştir. Baştan gelen düzenli dalgalar ile karşılaşan kayıcı teknenin neden olduğu serbest yüzey profili Şekil 3.4'te gösterilmiştir.



Şekil 3.4 Baştan gelen dalga ile karşılaşan teknenin neden olduğu serbest yüzey deformasyonu

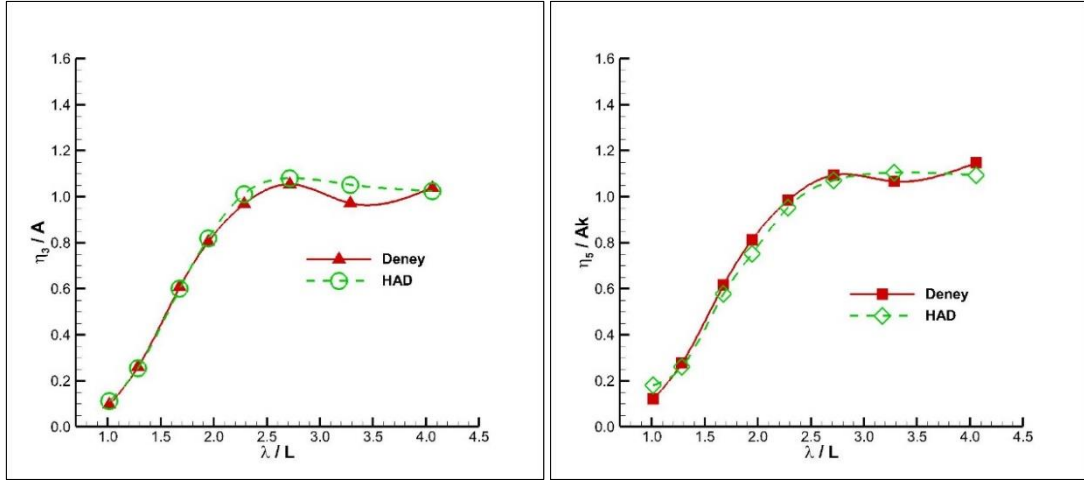
Bu noktadan sonra HAD analizlerinde kaydedilen dalıp-çıkma ve baş-kıç vurma hareket sinyalleri, Eşitlik (3.6)-(3.10) kullanılarak Fourier serisine açılmış ve sinüzoidal bir sinyal elde edilmiştir. Şekil 3.5'te Fourier serisine açılmış örnek bir sinyal gösterilmiştir.



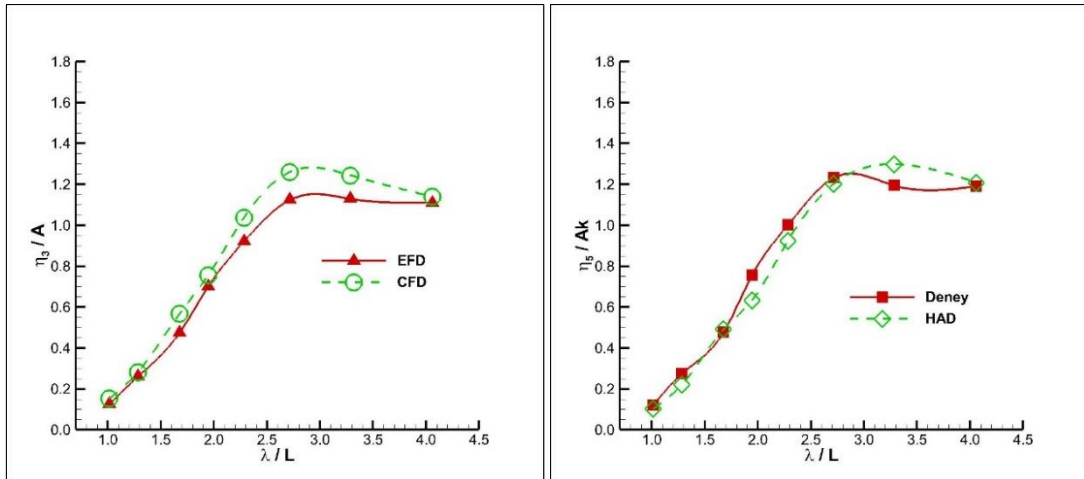
Şekil 3.5 Fourier serisi ile ifade edilmiş bir dalıp-çıkma sinyali örneği

Şekil 3.5'te bu çalışmada elde edilen hareket sinyallerinden bir örnek gösterilmiştir. Bu örnekteki gibi her bir tekne için her bir senaryodaki dalıp-çıkma ve baş-kıç vurma hareketlerinin zamana bağlı olarak sinyalleri kaydedilir ve bu sinyaller Fourier serisine açılarak hareketlerin ilk harmonikleri elde edilir. Bu ilk harmonik değerleri aynı zamanda hareketin genliği anlamına gelmektedir ve elde edilen bu genlikler Eşitlik (3.11) ve Eşitlik (3.12)'de yerlerine konularak her bir teknenin her bir hız için 8 senaryodaki dalıp-çıkma ve baş-kıç vurma genlik karşılık fonksiyonları

elde edilir. Geniş bir frekans aralığında elde edilmiş bu değerler deneysel veriler ile mukayese edilmiştir.

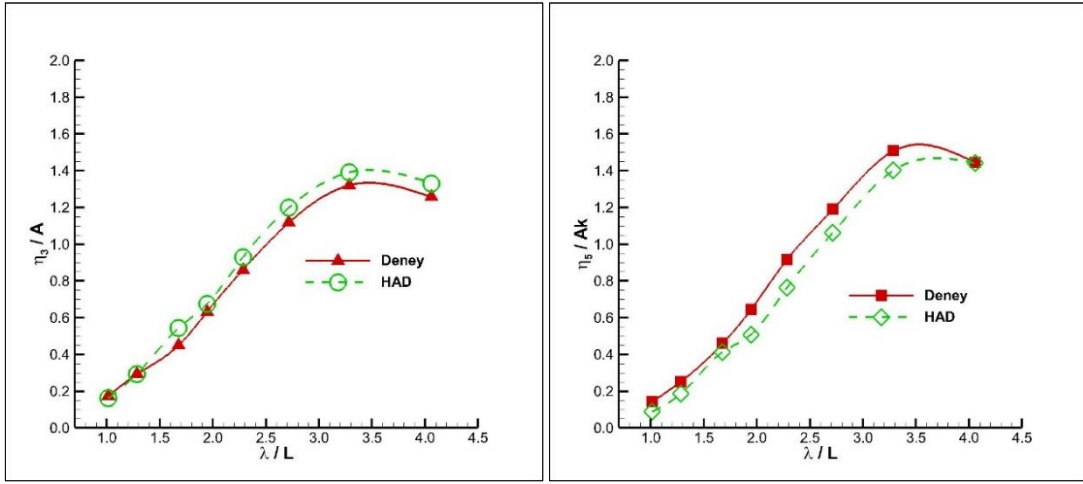


Şekil 3.6 Monohedral teknesi $V=3.40$ m/s için RAO değerleri



Şekil 3.7 Monohedral teknesi $V=4.60$ m/s için RAO değerleri

Şekil 3.6, Şekil 3.7 ve Şekil 3.8’de Monohedral teknesi için hesaplamalı akışkanlar dinamiği analizlerinden elde edilen farklı ilerleme hızlarındaki dalıp-çıkma ve baş-kıç vurma genlik karşılık fonksiyonları deneysel veriler ile mukayese edilmiştir. Daha önce de belirtildiği üzere deneysel veriler Begovic vd. [24] tarafından literatüre sunulmuştur.



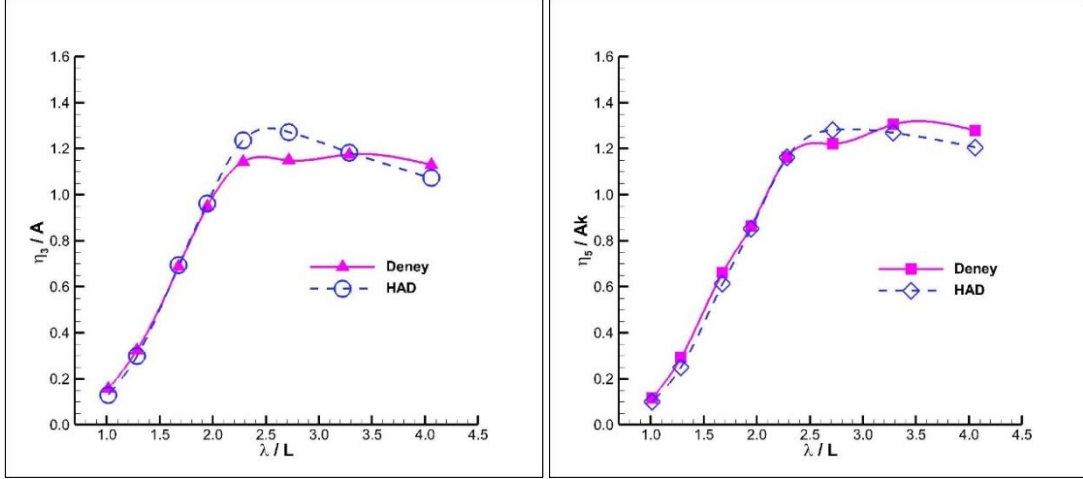
Şekil 3.8 Monohedral teknesi $V=5.75$ m/s için RAO değerleri

Şekil 3.6'da ilerleme hızı 3.4 m/s ($Fn=0.79$) iken Monohedral teknesinin dalıp-çıkma ve baş-kıç vurma genlik karşılık fonksiyonları deneysel veriler ile karşılaştırılmıştır. Dalıp-çıkma hareketi için sonuçların deney ile mükemmel yakın bir biçimde uyumlu olduğu gözlenirken, yalnızca hidrostatik kuvvetlerin baskın olduğu bölgede bir nokta için sayısal yöntemin deneysel sonuca göre hareketi bir miktar yüksek tahmin ettiği gözlenmektedir. Bu noktadaki farkın nedeni deneysel ölçüm ile ilgili olabilir. Zira eğri karakteristiklerine bakıldığında deneyde o bölgede bir miktar sapma gözlenirken, HAD sonuçları belirli sabit bir yol izlemektedir. Baş-kıç vurma hareketine ilişkin sonuçların ise genel anlamda deney ile makul derecede uyumlu olduğu söylenebilir.

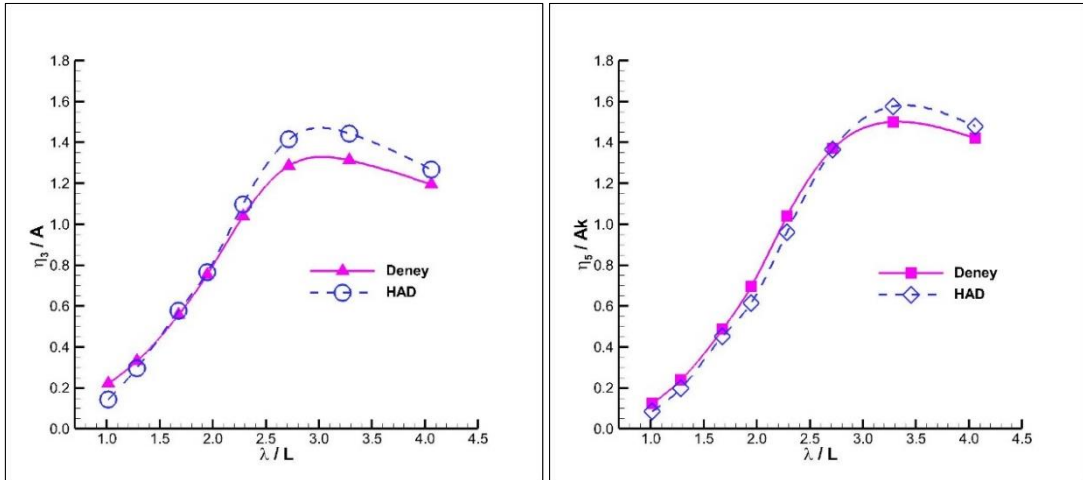
Şekil 3.7'de benzer bir mukayese yine Monohedral teknesi için 4.60 m/s ($Fn=1.07$) ilerleme hızında gerçekleştirilmiştir. Bu senaryoda hesaplamalı akışkanlar dinamiği yönteminin dalıp-çıkma hareketini deneysel sonuçlara göre bir miktar daha fazla tahmin ettiği rahatlıkla gözlemlenmektedir. Ayrıca hidrostatik bölgeye geçişin deneysel verilere göre daha erken olduğu, sayısal yöntemde ise bir nevi bir rezonans senaryosunun gözlemlendiği söylenebilir. Aynı şeklin baş-kıç vurma hareketine ilişkin grafiğine bakıldığında ise dalıp-çıkma hareketine benzer şekilde küçük dalga boylarında sonuçların birbirine daha yakın olduğu, dalga boyu arttıkça aradaki farkın da belirli oranda büyüdüğü gözlemlenebilir.

Şekil 3.8'de ise yine Monohedral teknesi için 5.75 m/s ($Fn=1.33$) ilerleme hızı için benzer bir mukayese yapılmıştır. Bu ilerleme hızı bu tekne modeli için artık

tamamen kayıcı rejimi temsil etmektedir. Bu grafiklerde yine dalıp-çıkma ve baş-kıç vurma hareketlerinin genel eğiliminin deneysel veriler ile uyumlu olduğu gözlemlenebilir. Ayrıca sayısal çalışmadan elde edilen sonuçlara göre bu rejimde hesaplamalı akışkanlar dinamiği yaklaşımı dalıp-çıkmaı bir miktar fazla tahmin ederken, baş-kıç vurma hareketini ise bir miktar az tahmin etmektedir.

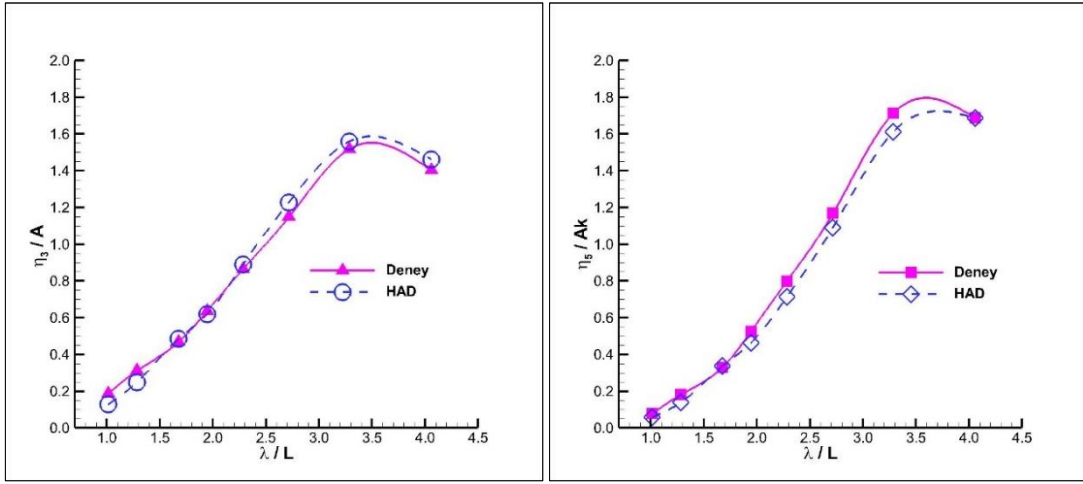


Şekil 3.9 Warped teknesi $V=3.40$ m/s için RAO değerleri



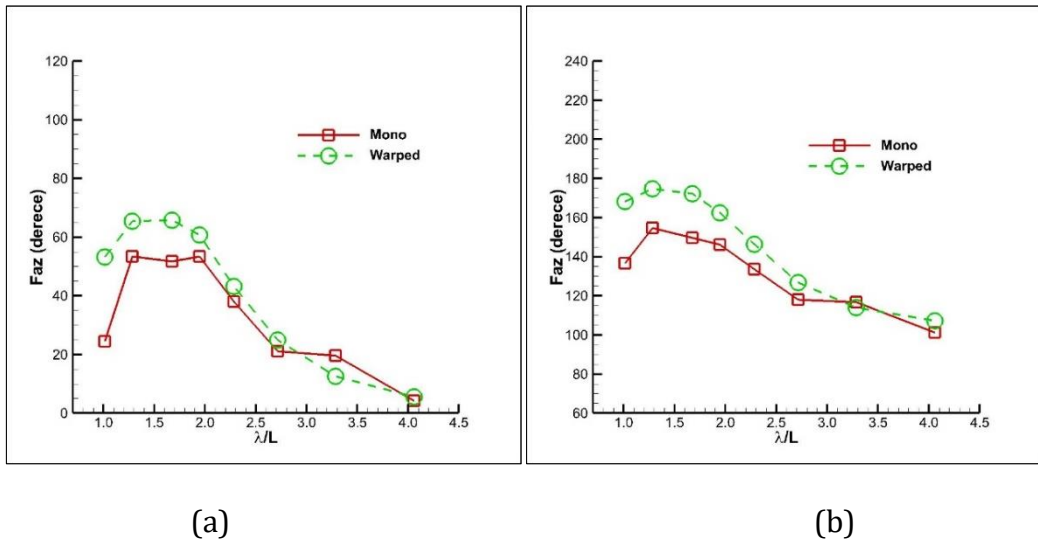
Şekil 3.10 Warped teknesi $V=4.60$ m/s için RAO değerleri

Şekil 3.9, Şekil 3.10 ve Şekil 3.11'de Monohedral teknesi ile aynı ilerleme hızına sahip Warped teknesinin düşey hareket genlik karşılık fonksiyonları deneysel veriler ile mukayese edilmiştir.

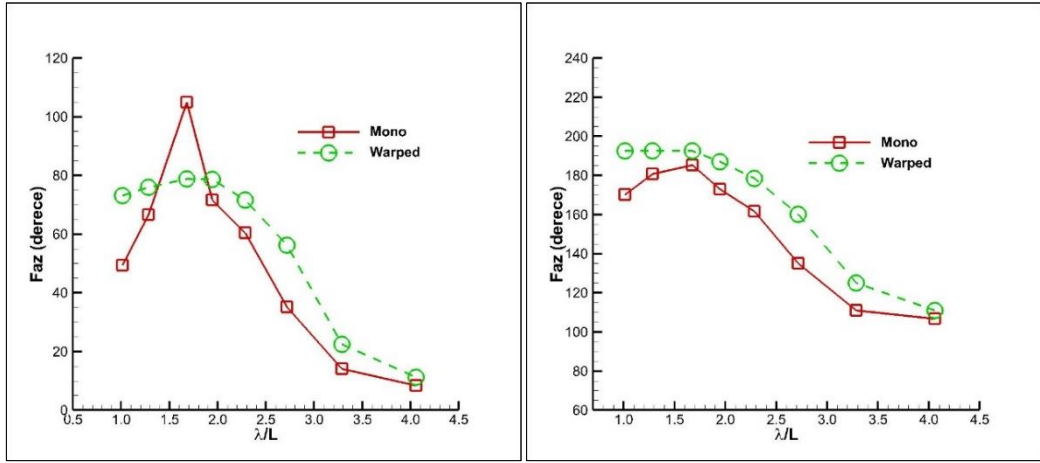


Şekil 3.11 Warped teknesi $V=5.75$ m/s için RAO değerleri

Şekil 3.9'da 3.4 m/s ilerleme hızındaki Warped teknesinin dalıp-çıkma hareketi incelendiğinde azami dalga boyu hariç, dalga boyu arttıkça hesaplamalı akışkanlar dinamiği yaklaşımının hareketi olması gerekenden daha fazla tahmin ettiği gözlenmektedir. Baş-kıç vurma hareketi içinse genel olarak deney ile uygun bir eğilim içinde olsa da olması gerekenden bir miktar daha az tahmin ettiği rahatlıkla söylenebilir. Şekil 3.10 ve Şekil 3.11 incelendiğinde ise yine Monohedral teknesine benzer bir şekilde dalıp-çıkma hareketinin olması gerekenden daha fazla, baş-kıç vurma hareketinin ise olması gerekenden daha az tahmin edildiği ve deneysel veriler ile sayısal sonuçların arasındaki farkın genel olarak dalga boyu arttıkça arttığı gözlemlenmektedir.



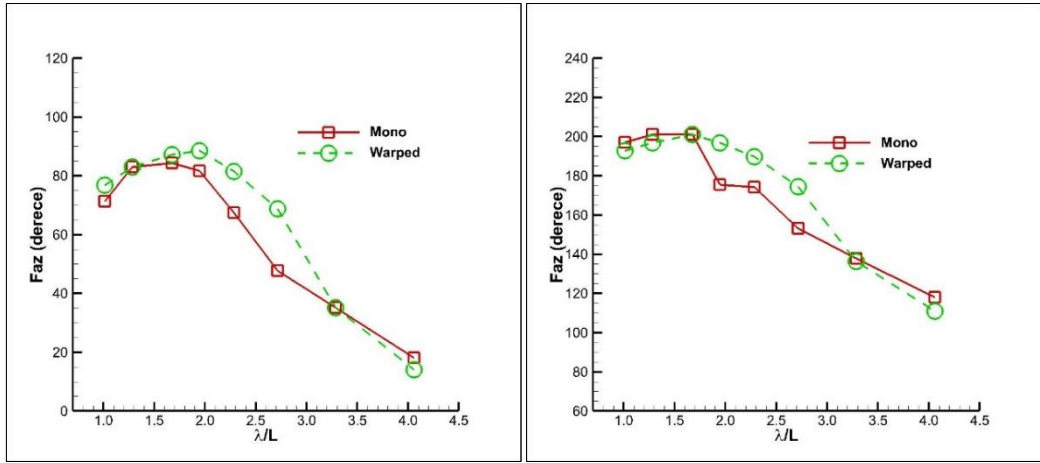
Şekil 3.12 Dalıp-çıkma (a) ve baş-kıç vurma (b) hareket fazları ($V=3.40$ m/s)



(a)

(b)

Şekil 3.13 Dalıp-çıkma (a) ve baş-kıç vurma (b) hareket fazları ($V=4.60$ m/s)



(a)

(b)

Şekil 3.14 Dalıp-çıkma (a) ve baş-kıç vurma (b) hareket fazları ($V=5.75$ m/s)

Şekil 3.12, Şekil 3.13 ve Şekil 3.14'de 3 farklı ilerleme hızındaki iki farklı teknenin dalıp-çıkma ve baş-kıç vurma hareketlerine ilişkin fazlar mukayese edilmiştir. Belirtilen faz farkları gelen dalga ile tekne hareketi arasındaki faz farkıdır.

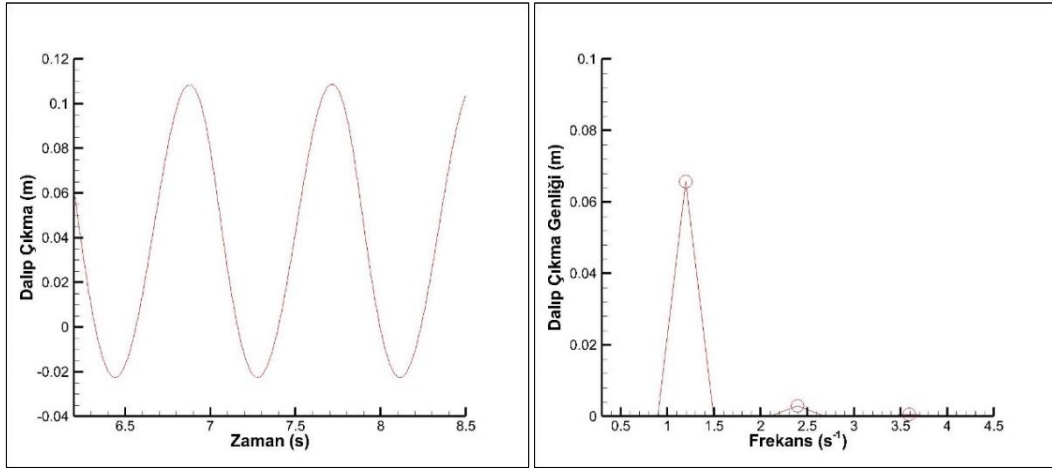
Şekil 3.12 incelendiğinde Monohedral teknesinin Warped teknesine göre hem dalıp-çıkma hem de baş-kıç vurma hareketlerinde C7 senaryosu hariç gelen dalgaya göre daha küçük bir faz farkına sahip olduğu rahatlıkla söylenebilir. İlerleme hızı arttıkça ($V=4.60$ m/s için) her iki harekette de Warped teknesinin daha yüksek faz farkına sahip olduğu açık bir şekilde görülebilir. Yalnızca C3 senaryosunda Monohedral teknesinin dalıp-çıkma hareketinin fazı bir sıçrama yapmış akabinde hemen genel eğilimine dönmüştür. Şekil 3.14'de ise tamamen kayıcı rejim göz önüne alınmış,

atalet bölgesinde faz farklarının birbirine yakın olduğu gözlemlense de sönüm bölgesinde Warped teknesinin hareketlerindeki faz farkının Monohedral teknesine göre yüksek olduğu rahatlıkla söylenebilir.

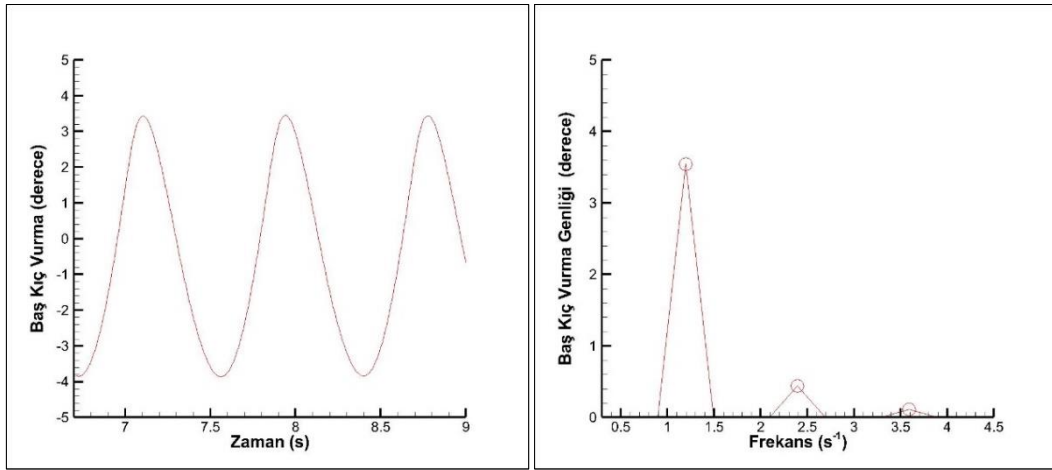
Bu çalışmada düşey hareketlerin yanı sıra denizcilikte önemli olan parametrelerin başında yer alan düşey ivmelenme hareketi de incelenmiş ve sayısal çözücünden elde edilen sonuçlar deneysel veriler ile mukayese edilmiştir. Baş ivmelenmesi (a_{bow}) ağırlık merkezindeki dalıp-çıkma ve baş-kıç vurma ivmelerinin bir bileşkesi olarak zaman düzleminde şu şekilde hesaplanabilir:

$$a_{bow}(t) = a_{CoG,3}(t) - x_{bow} a_{CoG,5}(t) \quad (3.13)$$

Burada $a_{CoG,3}(t)$ ve $a_{CoG,5}(t)$ zaman düzleminde ağırlık merkezindeki sırasıyla dalıp-çıkma ve baş-kıç vurma ivme değerlerini temsil ederken, x_{bow} ivmelenmesi ölçülmek istenen noktanın ağırlık merkezine olan uzaklığını yani bu çalışmada baş ivmeölçer ile ağırlık merkezi arasındaki yatay mesafeyi temsil etmektedir. Eşitlik (3.13) yardımı ile zaman düzleminde elde edilen sinyal, hareket genlik karşılık fonksiyonlarında olduğu gibi Fourier serisine açılmak yerine tepe-çukur analizi ile elde edilmiştir. Bu analiz yönteminde daimi rejim cevabına erişen bir sinyalin tepe ve çukur bileşenleri okunur ve ortalama bir genlik ifadesi bu bileşenlerden elde edilir. Hareket genlikleri Fourier serisi yardımı ile hesaplanırken ivme genliklerinin bu yöntem ile belirlenmesinin nedeni, ivme sinyalinde ortaya çıkan ve azımsanmayacak düzeyde olan ikincil ve üçüncül harmoniklerdir. Bu harmonikler sinyalin sinüzoidal yapısını bozmakta ve bununla birlikte daha dik ya da yayvan tepe ve çukur değerleri oluşturmaktadır. Şekil 3.15 ve Şekil 3.16'da örnek bir senaryo için dalıp-çıkma ve baş-kıç vurma hareketlerinin zaman ve frekans düzlemindeki cevapları gösterilmektedir. Bu şekiller incelendiğinde dalıp-çıkma hareketi cevap sinyalinin frekans düzleminde tek bir frekansta cevap verdiği ki onun da karşılaşma frekansı olduğu açıktır. Benzer bir yorum baş-kıç vurma hareketi için de yapılabilir. Göreceli olarak ikincil ve üçüncül frekanslar dalıp-çıkma göre daha yüksek olsa da yine de bu durum zaman düzlemindeki sinyalin ciddi doğrusal olmayan sonuçlar doğurmasına yetecek güçte olmadığı yorumu rahatlıkla yapılabilir.

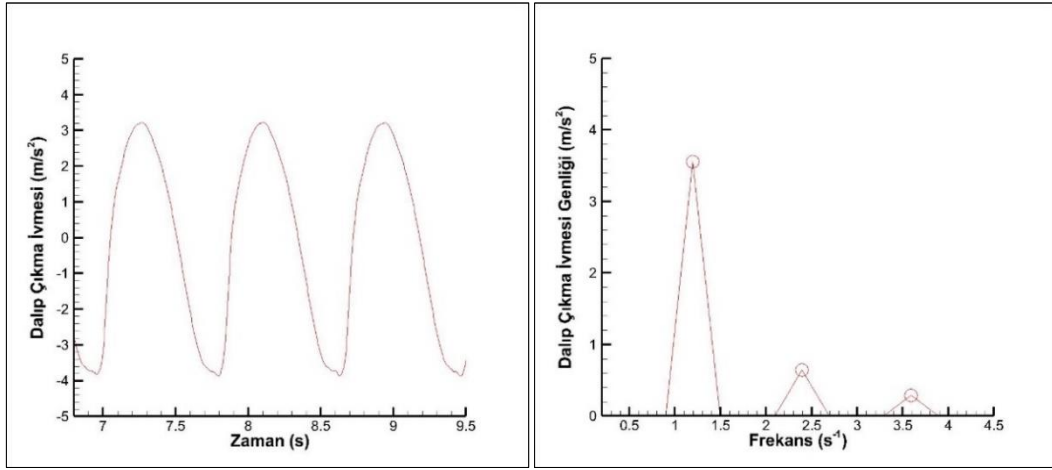


Şekil 3.15 C8 Senaryosu dalıp-çıkma hareketi zaman ve frekans düzlem cevabı
(*Warped*, $V=5.75$ m/s)

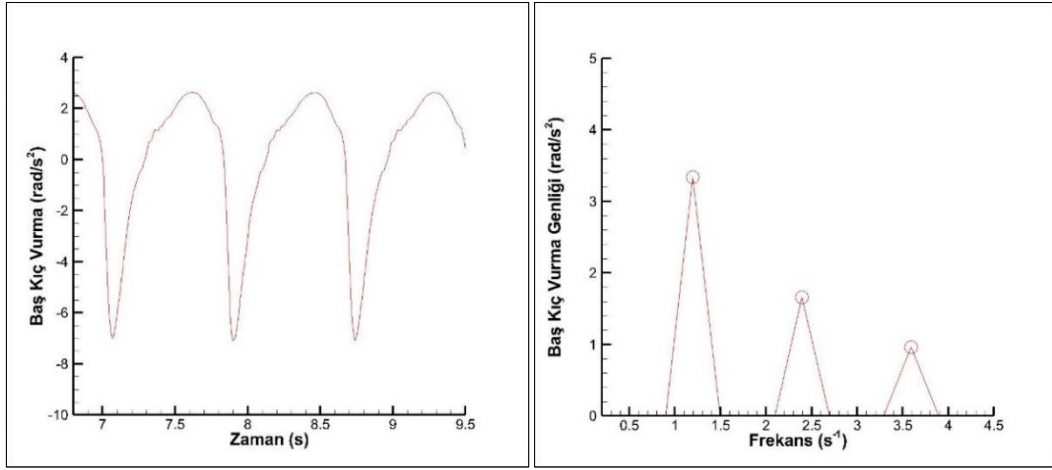


Şekil 3.16 C8 Senaryosu baş-kıç vurma hareketi zaman ve frekans düzlem cevabı
(*Warped*, $V=5.75$ m/s)

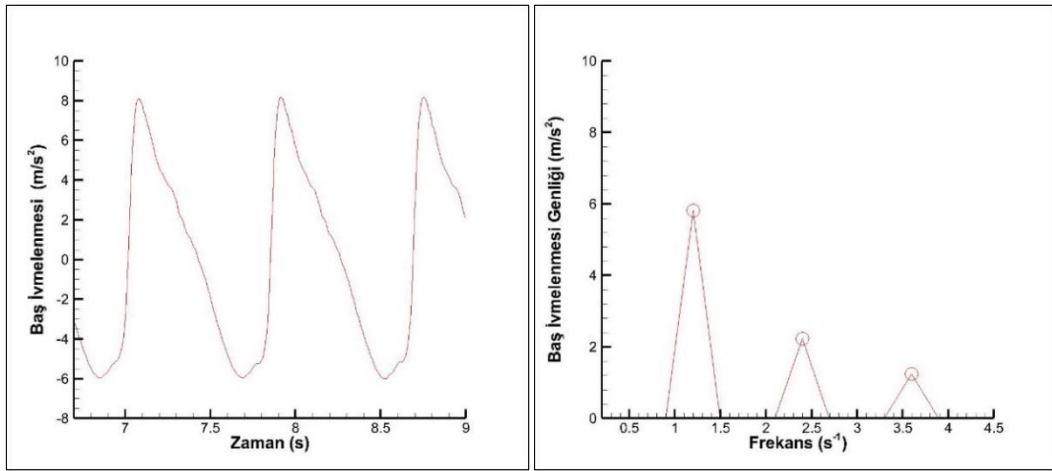
Şekil 3.17, Şekil 3.18 ve Şekil 3.19'da aynı senaryonun ivme için zaman ve frekans düzlemindeki cevapları gösterilmiştir. Dalıp-çıkma ivmesindeki ikincil ve üçüncül frekanslar, baş-kıç vurma hareketine daha küçük olsa da bu frekanslar en nihayetinde ölçülen baş ivmelenmesi cevabında da kendini göstermekte ve ciddi bir doğrusal olmayan etkiye sebebiyet vermektedir. Daha önce de belirtildiği gibi dik tepeler ve yayvan çukurlar özellikle Şekil 3.19'da rahatlıkla gözlemlenebilir.



Şekil 3.17 C8 Senaryosu dalıp-çıkma ivmesi zaman ve frekans düzlem cevabı
(Warped, $V=5.75$ m/s)

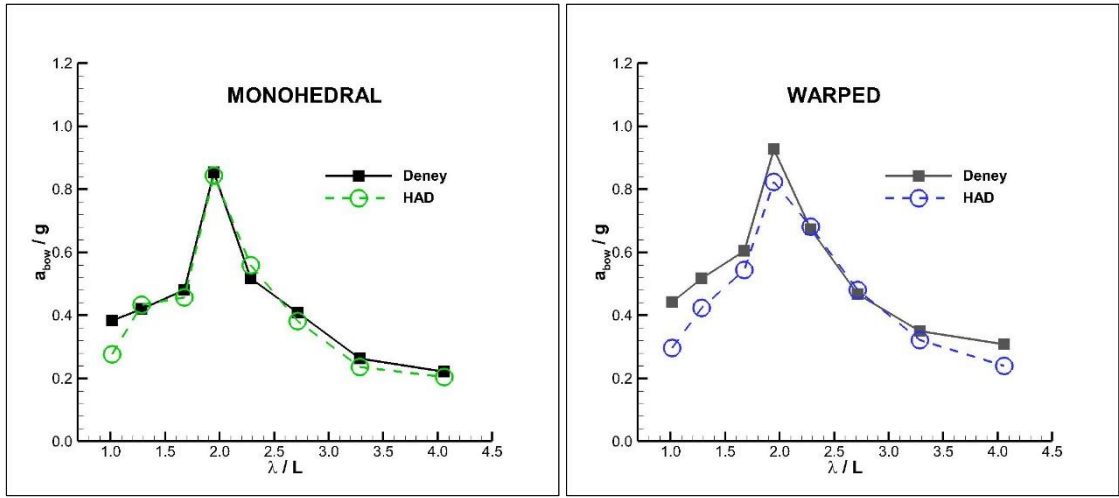


Şekil 3.18 C8 Senaryosu baş-kıp vurma ivmesi zaman ve frekans düzlem cevabı
(Warped, $V=5.75$ m/s)

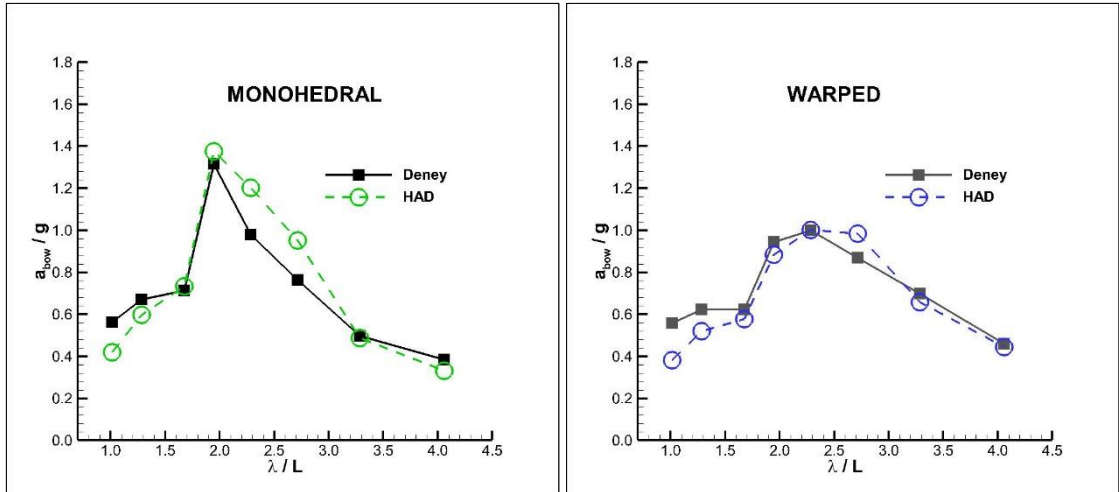


Şekil 3.19 C8 Senaryosu baş ivmelenmesi zaman ve frekans düzlem cevabı
(Warped, $V=5.75$ m/s)

Şekil 3.20, Şekil 3.21 ve Şekil 3.22’de 3 farklı ilerleme hızı için hesaplamalı akışkanlar dinamiği yönteminden elde edilen baş ivmelenme değerleri deneysel veriler ile karşılaştırılmıştır. Şekil 3.20 incelendiğinde ön kayıcı rejimde ($Fn=0.79$) Monohedral teknesindeki baş ivmelenme değerlerinin en küçük dalga boyu hariç deneyle çok iyi bir uyum içinde olduğu gözlenmiştir. Warped teknesinde ise ölçülen baş ivmelenme değerlerinin genel eğilim olarak deney ile uyumlu olmasına rağmen, sayısal çözücünden elde edilen değerlerin deneysel verilerden tüm dalga boylarında daha küçük olduğu rahatlıkla söylenebilir.



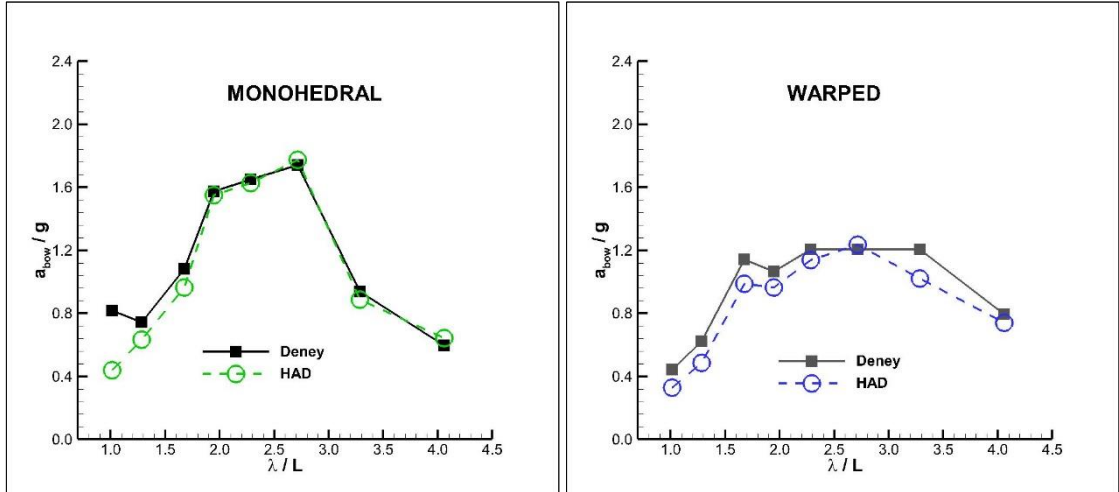
Şekil 3.20 $V=3.40$ m/s için teknelerin baş ivme değerleri



Şekil 3.21 $V=4.60$ m/s için teknelerin baş ivme değerleri

Şekil 3.21 ve Şekil 3.22’de daha yüksek ilerleme hızlarında benzer bir mukayese yapılmıştır. Monohedral teknesi için elde edilen sonuçların her iki hızda da yine

deney ile genel olarak uyumlu olduğu söylenebilir. Yalnızca en küçük dalga boyunda Şekil 3.20'ye benzer bir biçimde eğilimin dışında sonuçlar elde edilmiştir. Bununla birlikte yine Monohedral teknesi için 4.60 m/s ($Fn=1.07$) ilerleme hızında C5 ve C6 senaryolarında genel eğilimin aksine sayısal çözümünün olması gerekenden daha yüksek bir tahmin yaptığı gözlemlenmektedir. Warped teknesi içinse genel eğilimin deney ile çok da uyumlu gözükmemesine karşın, sonuçların deneysel verilere yakın olduğu söylenebilir.



Şekil 3.22 V=5.75 m/s için teknelerin baş ivme değerleri

3.6 Sonuçların Değerlendirilmesi

Bu tez çalışmasının bu bölümünde baştan gelen düzenli dalgalar altındaki kayıcı teknenin hidrodinamik performansının tahminine ilişkin gerçekleştirilen sayısal çalışmanın sonuçları değerlendirilecektir.

Önceki bölümde şekiller yardımıyla anlatılan ve deneysel veriler ile genel olarak uyum içerisinde olduğu gözlenen sayısal sonuçlardaki bağıl hata miktarı Eşitlik (3.14) yardımı ile belirlenmiştir:

$$\%HATA = \left| \frac{\text{Deneysel Sonuç} - \text{Sayısal Sonuç}}{\text{Deneysel Sonuç}} \right| \times 100 \quad (3.14)$$

Eşitlik (3.14) kullanılarak elde edilen bağıl hata ya da %HATA değerleri Tablo 3.5, Tablo 3.6 ve Tablo 3.7' de verilmiştir.

Tablo 3.5 V=3.4 m/s için elde edilen % Hata miktarları

Senaryo Kodu	Monohedral			Warped		
	Baş İvmelenme	Dalıp Çıkma	Baş-Kıç Vurma	Baş İvmelenme	Dalıp Çıkma	Baş-Kıç Vurma
C1	27.9	16.7	49.6	32.8	16.7	13.7
C2	3.3	1.5	6.1	18.0	8.0	14.0
C3	4.6	1.2	6.2	9.9	0.9	7.3
C4	1.1	2.0	7.5	11.2	1.6	1.4
C5	8.1	4.5	3.2	1.2	8.1	0.0
C6	6.4	2.5	2.0	2.6	10.7	4.9
C7	10.6	8.3	3.6	8.0	0.8	2.8
C8	8.1	1.4	4.7	22.7	5.0	5.7

Tablo 3.6 V=4.6 m/s için elde edilen % Hata miktarları

Senaryo Kodu	Monohedral			Warped		
	Baş İvmelenme	Dalıp Çıkma	Baş-Kıç Vurma	Baş İvmelenme	Dalıp Çıkma	Baş-Kıç Vurma
C1	25.5	22.4	14.9	31.7	34.8	30.9
C2	11.2	8.4	19.3	16.8	10.0	17.1
C3	2.7	19.8	2.9	7.2	3.4	7.0
C4	4.7	7.9	16.1	6.5	1.6	11.5
C5	22.9	12.7	7.6	0.2	5.7	7.5
C6	24.8	12.1	2.4	13.1	10.1	0.2
C7	2.2	10.2	8.8	6.0	10.1	5.1
C8	13.5	2.6	1.5	3.0	6.1	4.0

Tablo 3.7 V=5.75 m/s için elde edilen % Hata miktarları

Senaryo Kodu	Monohedral			Warped		
	Baş İvmelenme	Dalıp Çıkma	Baş-Kıç Vurma	Baş İvmelenme	Dalıp Çıkma	Baş-Kıç Vurma
C1	25.5	22.4	14.9	31.7	34.8	30.9
C2	11.2	8.4	19.3	16.8	10.0	17.1
C3	2.7	19.8	2.9	7.2	3.4	7.0
C4	4.7	7.9	16.1	6.5	1.6	11.5
C5	22.9	12.7	7.6	0.2	5.7	7.5
C6	24.8	12.1	2.4	13.1	10.1	0.2
C7	2.2	10.2	8.8	6.0	10.1	5.1
C8	13.5	2.6	1.5	3.0	6.1	4.0

Tablo 3.8’de ise önceki tablolarda verilen yüzdelik hataların ortalamaları tüm ilerleme hızlarında her iki tekne için verilmiştir.

Tablo 3.8 Ortalama % Hata miktarları

Hız (m/s)	Monohedral			Warped		
	Baş İvmelenme	Dalıp Çıkma	Baş – Kıç Vurma	Baş İvmelenme	Dalıp Çıkma	Baş – Kıç Vurma
3.40	8.76	4.77	10.4	13.3	6.47	6.22
4.60	13.4	12.0	9.19	10.6	10.2	10.4
5.75	11.2	7.83	16.1	12.5	9.36	10.6

Bu bölümde verilen tablolar ve önceki bölümde verilen grafikler göz önüne alınarak şu temel sonuçlara varılmıştır:

- Oluşturulan matematiksel model kayıcı teknelerin baştan gelen dalgalar altındaki hidrodinamik performansını tahmin etmede oldukça başarılı bir yöntemdir.
- Monohedral ve Warped tekne modellerinin performansını tahmin etmede herhangi bir tekne modelinde daha başarılı sonuçlar elde edildiğini söylemek güçtür. Bir başka deyişle teknenin kalkıntı açısının sabit olup olmamasının yöntemin doğruluğu üzerinde doğrudan bir etkisi olmadığı sonucuna varılmıştır.
- Oluşturulan matematiksel modelde dalıp-çıkma hareketi genel olarak olması gerekenden daha fazla tahmin edilirken, baş –kıç vurma hareketi ise olması gerekenden daha az tahmin edilmektedir. Buna rağmen sonuçların deney ile oldukça uyumlu olduğu aşîkârdır.
- Hareketlerin tahmininde atalet bölgesinde sayısal yöntemden elde edilen sonuçlar deney ile daha uyumlu sonuçlar verirken, genel olarak sönüm bölgesi ile hidrostatik kuvvetlerin baskın olduğu bölge arasındaki geçişte deneysel veriler ile sayısal sonuçlar arasındaki farklar artmaktadır.
- Üstteki yorumun istisnası olarak hemen hemen bütün denizcilik karakteristiklerinde en büyük farklar dalga boyunun en küçük olduğu senaryolarda ortaya çıkmaktadır. Bunun nedeninin hareketin bu senaryolarda çok küçük olması ve bu küçük hareketleri ölçerken deney sistemlerinde meydana gelebilecek belirsizlikler olduğu tahmin edilmektedir.
- Ağırlık merkezinde ve tekne başında oluşan düşey ivmeler hesaplanırken deneydekine benzer bir şekilde kuvvetli doğrusal olmayan etkiler

gözlemlenmiş ve bu durum boyutsuz ivmeler elde edilirken dikkate alınmıştır.

- Hareket tahminindekine benzer olarak ivmede de en yüksek bağıl farklar dalga boyunun en küçük olduğu senaryolarda ortaya çıkmıştır. Bunun nedeninin harekette belirtilen neden ile benzer olduğu düşünülmektedir.

4

KAYICI TEKNELERDE YALPA SÖNÜM KATSAYISININ FARKLI SAYISAL YÖNTEMLERLE ELDE EDİLMESİ

Bu bölümde tek serbestlik dereceli zorlamalı yalpa hareketine maruz bırakılan, sakin suda ilerleyen kayıcı bir teknenin hidrodinamik analizleri hem yarı ampirik bir yöntem hem de hesaplamalı akışkanlar dinamiği yaklaşımı ile incelenmiştir. Yapılan analizler sonucunda yalpa sönüm katsayısı farklı senaryolar için elde edilmiş ve sayısal sonuçlar deneysel veriler ile mukayese edilmiştir.

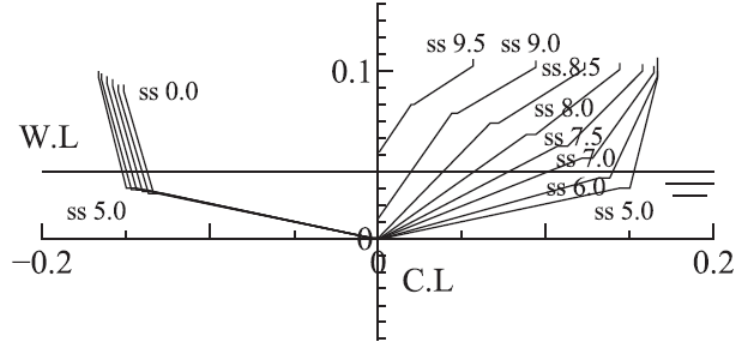
Bu tez çalışmasının bu kısmında gerçekleştirilecek olan zorlamalı yalpa analizlerinde kullanılacak olan tekne literatüre Katayama vd. [36] tarafından sunulan TB30 teknesidir. Bu hususta literatürdeki mevcut deneysel verilerin azlığı sebebiyle diğer kısımlardan farklı olarak yalnızca bir adet tekne modeli kullanılmıştır. TB30 teknesinin ana boyutları Tablo 4.1’de verilirken, ilgili teknenin 3 ve 2 boyutlu görünüşü Şekil 4.1 ve Şekil 4.2’de gösterilmektedir.

Tablo 4.1 TB30 teknesinin temel özellikleri

Parametre	Değer	Birim
L_{OA}	1.000	m
B	0.333	m
T_{AP}	0.040	m
Δ	53.46	N
KG	0.097	m
LCG	0.500	m
k_{44}	0.117	m



Şekil 4.1 TB30 teknesinin 3 boyutlu görünüşü



Şekil 4.2 TB30 teknesinin en kesitleri ve önden görünüşü

4.1 Kullanılan Sayısal Yöntemler

Bu kısımda daha önce de belirtildiği gibi kayıcı rejimde sakin suda ilerlemekte olan bir kayıcı teknenin tek serbestlik dereceli zorlamalı yalpa analizleri 2 farklı yöntem ile gerçekleştirilmiştir. Yapılan analizlerin doğrulama çalışması deneysel veriler ile olacağından oluşturulacak olan senaryolar da yine deneysel verilere göre belirlenmiştir. Tablo 4.2’de bu bölümde analizleri gerçekleştirilen senaryolar listelenmiştir. Tablo 4.2’ye göre 2 farklı ilerleme hızı, 3 farklı yalpa periyodu ve 5 farklı genlik ile her iki yöntemle 30 farklı yalpa sönüm katsayısı elde edilmiştir.

Tablo 4.2 Zorlamalı yalpa analizi gerçekleştirilen senaryolar

Fn (-)	Yalpa Genliği (derece)	Yalpa Periyodu (s)
2.2 2.6	3.0	
	6.0	0.6
	9.0	0.8
	12.0	1.0
	15.0	

4.1.1 Ampirik Yöntem

Bu kısımda anlatılacak olan ampirik yöntem genel olarak bakıldığında melez bir yöntemdir. Bu melez yöntemde Savitsky yöntemi kullanılarak elde edilen hidrodynamic kaldırma kuvveti, Ikeda ve Katayama [35] tarafından ortaya atılan ve her bir yalpa sönüm katsayısının tek tek hesaplandığı yöntemle birleştirilir ve kayıcı teknenin belirli bir ilerleme hızına sahipken yalpa sönüm katsayısı hesaplanır.

Ikeda ve Katayama [35] tarafından ortaya atılan toplam yalpa sönüm katsayısı şu şekilde hesaplanabilir:

$$B_{44} = B_F + B_W + B_L + B_E + B_{BK} \quad (4.1)$$

Burada B_{44} toplam yalpa sönüm katsayısını temsil ederken eşitliğin sağ tarafındaki terimler sırasıyla, B_F sürtünmeye bağlı bileşeni, B_W dalga kuvvetine bağlı bileşeni, B_L hidrodinamik kaldırma kuvvetine bağlı bileşeni, B_E girdap bileşenini, B_{BK} ise yalpa omurgası bileşenini temsil etmektedir. Bu bileşenlerden hidrodinamik kaldırma kuvvetine bağlı olan bileşen (B_L) dışındaki bileşenlerin nasıl hesaplanması gerektiği Yıldız [169] tarafından detaylı bir şekilde anlatılmıştır.

Ikeda ve Katayama [35] tarafından önerilen hidrodinamik kaldırma kuvvetine bağlı sönüm katsayısı Eşitlik (4.2) kullanılarak hesaplanabilir:

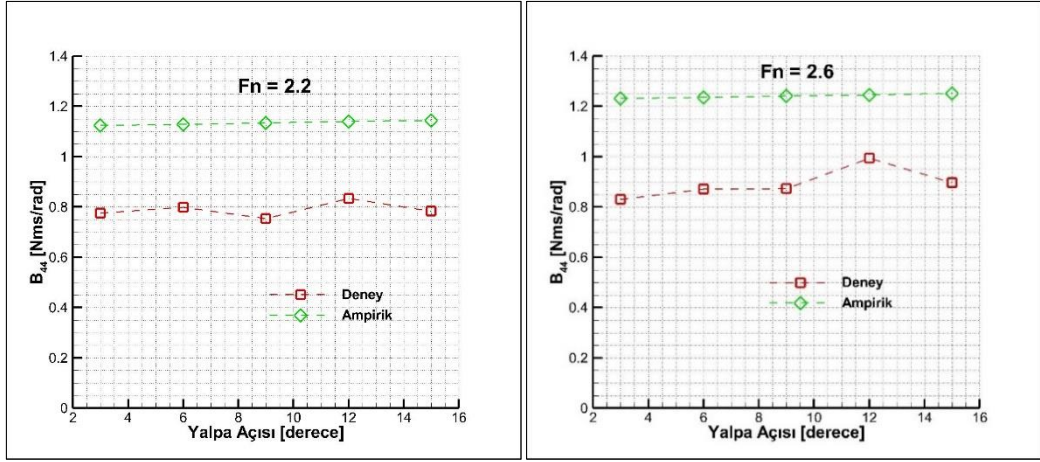
$$B_L = \frac{\rho B^4 U k_L(\tau)}{24} \quad (4.2)$$

$$k_L(\tau) = \frac{2F_{Lift}}{\tau \rho S_{WA} V^2} \quad (4.3)$$

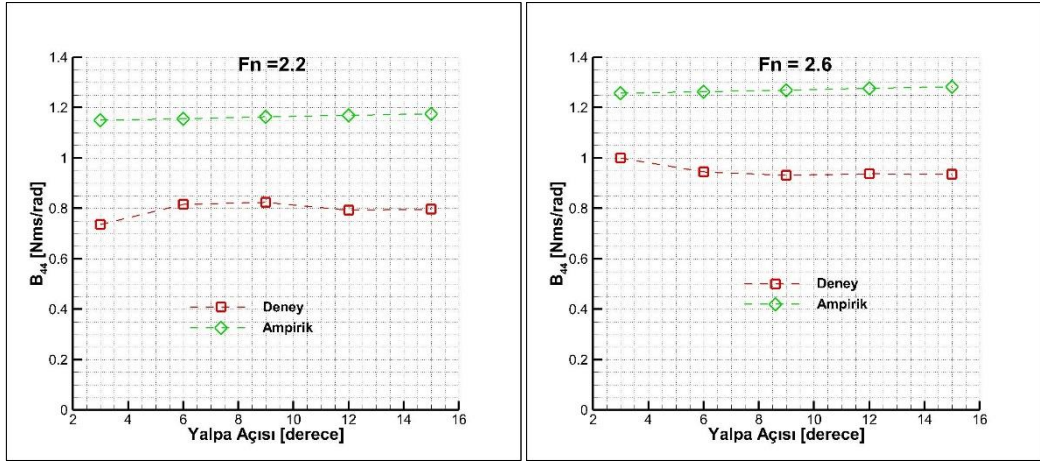
Bu eşitliklerde B su hattındaki genişliği (m), U ilerleme hızını (m/s), $k_L(\tau_1)$ sabit trim açısındaki (τ_1) diferansiyel katsayısı, F_{Lift} tekneye etki eden kaldırma kuvvetini (N), S_{WA} ıslak yüzey alanını (m²) temsil ederken ρ ise su yoğunluğunu (kg/m³) temsil etmektedir. Islak yüzey alanı sakin sudaki trimsiz durumdaki alan olarak alınmıştır.

Bu çalışmada oluşturulan ampirik yöntemde ilgili eşitliklerde ihtiyaç duyulan hidrodinamik kaldırma kuvveti Savitsky yöntemi kullanılarak elde edilmiştir. Savitsky yöntemi ile hidrodinamik kaldırma kuvvetinin nasıl hesaplanabileceği Bölüm 2.1.1.1'de detaylı olarak anlatılmıştır. İlgili eşitlikler yardımı ile elde edilen kalkıntı açısına sahip olmayan bir levha için elde edilen hidrodinamik kaldırma kuvveti, Eşitlik (2.2)'de yerine konulmak suretiyle ilgili teknenin hidrodinamik

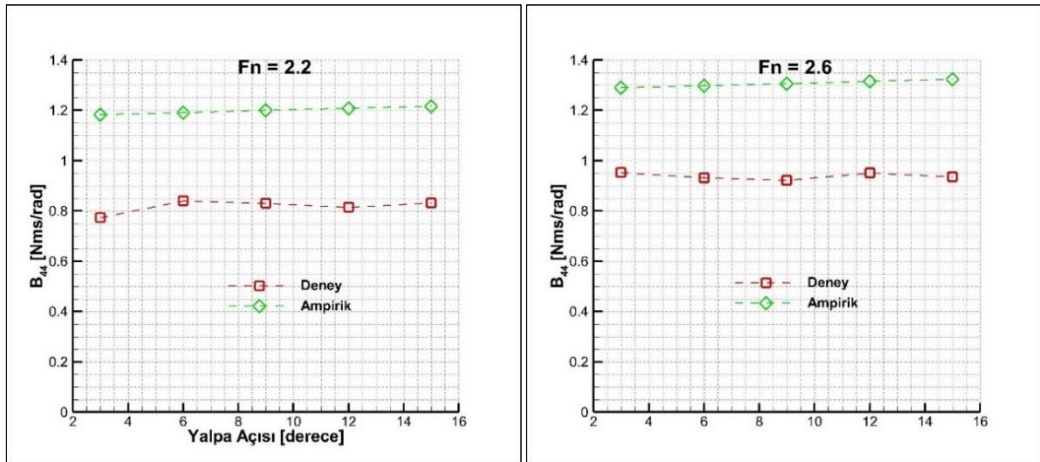
kaldırma kuvveti elde edilebilir. Oluşturulan ampirik yöntemden elde edilen sonuçlar Şekil 4.3, Şekil 4.4 ve Şekil 4.5'te gösterilmektedir.



Şekil 4.3 $T=1.0$ s için ampirik yöntemden elde edilen yalpa sönüm katsayıları



Şekil 4.4 $T=0.8$ s için ampirik yöntemden elde edilen yalpa sönüm katsayıları



Şekil 4.5 $T=0.6$ s için ampirik yöntemden elde edilen yalpa sönüm katsayıları

Şekil 4.3, Şekil 4.4 ve Şekil 4.5 incelendiğinde ampirik yöntemden elde edilen toplam sönüm katsayısının deneysel sonuçtan oldukça fazla olduğu rahatlıkla gözlemlenebilir. Yine ilgili grafiklerden ampirik yöntemden elde edilen sonuçların deneysel verilere benzer bir şekilde yalpa sönüm katsayısının yalpa genliğinden ve yalpa periyodundan bağımsız olduğu ya da bir başka deyişle bu iki parametre ile belirgin bir şekilde değişmediği gözlenebilir. Ayrıca yine ilgili grafiklerden ilerleme hızı ile yalpa sönüm katsayısı arasında doğrusal bir ilişki olduğu rahatlıkla gözlenebilir.

4.1.2 Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği Yaklaşımı

4.1.2.1 Fiziksel Model

Hesaplamalı akışkanlar dinamiği yardımı ile tek serbestlik dereceli yalpa hareketini modellemek önceki bölümlerde anlatılan sakin sudaki ve baştan gelen düzenli dalgalar altındaki 2 serbestlik dereceli kayıcı tekne hidrodinamiğini modellemek ile belirli ölçülerde farklılık göstermektedir. Fiziksel model özetlenirken bu farklılıklar üzerinde de durulacaktır.

Sayısal çözücü olarak yine aynı ticari program (*STAR-CCM+*) kullanılmıştır ve hesaplamalı akışkanlar dinamiği yaklaşımı gereği yine aynı yönetici denklemler benzer şekilde ayrıklaştırılmıştır. Detaylı bilgi için Bölüm 2.1.3.1 incelenebilir.

Akışkana ait özellikler ve ayrıklaştırma mertebeleri önceki bölümlerde oluşturulan fiziksel model ile tamamen özdeştir. Kapama problemini çözebilmek adına akım ayrılmalarını daha iyi modelleyebilen k-w modeli kullanılmış ve serbest su yüzeyi yine ikinci dereceden bir ayrıklaştırma ve VOF metodu kullanılarak temsil edilmiştir. Tablo 4.3'te oluşturulan fiziksel modelin özellikleri gösterilmektedir.

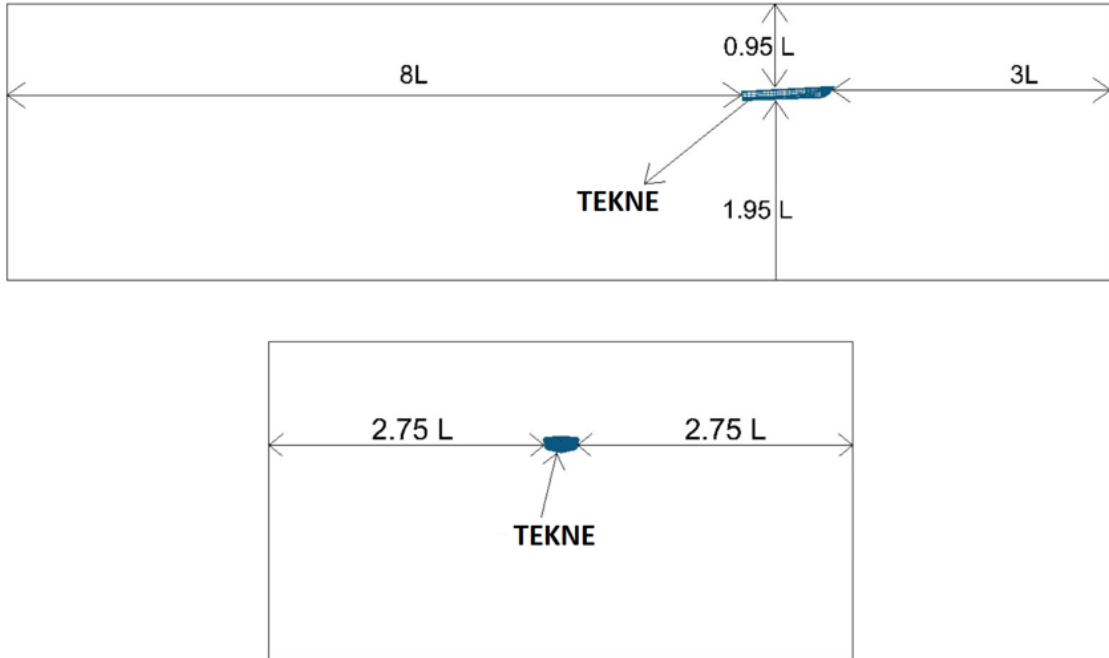
Tablo 4.3 Zorlamalı yalpa analizi için oluşturulan fiziksel modelin özellikleri

Taşıma Terimleri	İkinci mertebe
Zamansal Ayrıklaştırma	Birinci mertebe
Basınç - Hız ilişkisi	SIMPLE
Türbülans Modeli	k- ω SST
VOF Yüzeyi	Düz yüzey
İç İterasyon	7

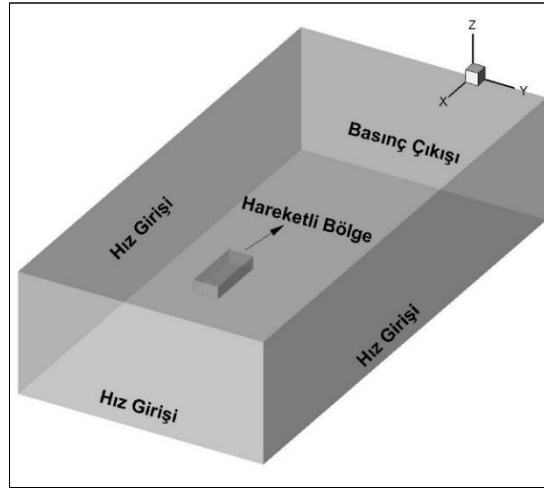
Zaman adımı ITTC [159] önerilerine göre en fazla karşılaşma periyodunun 1/100'ü kadar olmalıdır. Bu sebeple bu çalışmada bu kural göz önüne alınarak ve farklı yalpa periyotlarının tekneye uygulanacağı bilgisi ile sık zaman adımı 0.002 s olarak belirlenmiştir.

4.1.2.2 Hesaplama Hacmi ve Sınır Koşulları

Hesaplama hacmi ve sınır koşulları önceki çalışmalar [155] ve ITTC [159] önerileri göz önüne alınarak belirlenmiştir. Önceki kısımdaki hesaplamalı akışkanlar dinamiği simülasyonlarının aksine buradaki analizler teknenin orta simetri eksenine göre simetrik olmayacağından analizlerde hesaplama hacminin tamamı kullanılmıştır. Bununla birlikte tek serbestlik dereceli yalpa hareketinde harekete bağlı oluşacak yanal dalgaların sınırlardan yansıyıp geri dönmemesi için hesaplama hacminin yan tarafları yeteri kadar geniş tutulmuştur. Bu sebeple hesaplama hacmi çıkışı basınç çıkışı olarak seçilirken diğer tüm sınırlar hız girişi olarak tanımlanmıştır. Bu noktada özellikle yan yüzeyler simetri alanı olarak da tanımlanabilmekte, bu durum analizlerde ve olayın fiziğini doğru bir şekilde temsil etmede herhangi bir problem teşkil etmemektedir. Şekil 4.6 ve Şekil 4.7'de hesaplama hacmi ve sınır koşulları gösterilmektedir.



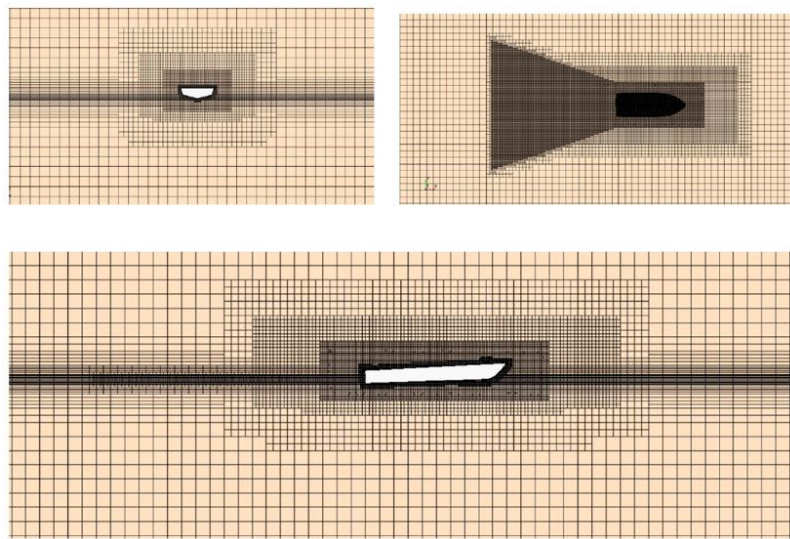
Şekil 4.6 Hesaplama hacminin boyutlarının yandan ve önden görünüşü



Şekil 4.7 Zorlamalı yalpa analizinde sınır koşulları

4.1.2.3 Ağ Yapısı ve Gerçekleme Çalışması

Ağ yapısını oluşturan elemanlar daha önce de belirtildiği üzere olabildiğince dikdörtgen şekilde eleman atayabilen kırpılmış ağ yapısı kullanılarak tanımlanmıştır. Tekne yüzeyi kaymayan duvar olarak tanımlanmış ve yine sınır tabaka sadece tekne yüzeyi etrafında oluşturulmuştur. Önceki kısımlara benzer bir şekilde tekne etrafında ve serbest su yüzeyi çevresinde elemanlar sıklaşırken bu bölgelerden sınırlara doğru gidildikçe seyrekleşen bir ağ yapısı ile eleman sayısının azaltılması ve çözüm süresinin de buna bağlı olarak makul seviyelerde kalması hedeflenmiştir. Zorlamalı yalpa analizleri için oluşturulan ağ yapısı Şekil 4.8’de gösterilmektedir.



Şekil 4.8 Zorlamalı yalpa hareketi için oluşturulan ağ yapısı

Bu bölümde gerçekleştirilen analizlerde tekne tek serbestlik dereceli zorlamalı bir harekete maruz kalacağı için DFBI modülünün açılması ekstradan başka denklemlerin de çözüme katılması sebebiyle çözüm süresini artıracaktır. Zira bu modül genel olarak teknenin doğası gereği öngörülemeyen hareketlerini modellemek için kullanılan bir modüldür. Bu sebeple bu kısımda tek serbestlik dereceli zorlamalı yalpa hareketini modelleyebilmek için MRF (*moving reference frame*) yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntemde tekneye bağlı bir koordinat sistemi belirlenir ve tekneyi döndürmek yerine bu koordinat sistemi döndürülür. Böylece yönetici denklemler bu lokal koordinat sisteminde çözüldükten sonra global sisteme dönüştürülerek kuvvet, moment gibi tekneye ait fiziksel parametrelere erişilir. Bu yöntem ile ilgili detaylı bilgi için ilgili referans incelenebilir [170].

Gerçekleme çalışması önceki bölümlerde olduğu gibi yine GCI (*Grid Convergence Index*) yöntemi ile gerçekleştirilmiştir. Bu sebeple 3 farklı ağ yapısı ve 3 farklı zaman adımı tanımlanmıştır. Tanımlanan sık, orta ve seyrek zaman adımı ve ağ yapısına ilişkin bilgiler Tablo 4.4'te verilmiştir.

Tablo 4.4 Oluşturulan ağ yapılarına ilişkin eleman sayıları ve zaman Adımı

Tür	Eleman Sayısı	Zaman Adımı
Seyrek	2.75×10^5	0.0040
Orta	6.07×10^5	0.0028
Sık	13.7×10^5	0.0020

Bu çalışmada gerçekleme çalışması için Froude sayısı 2.2 ilerleme hızına sahip teknenin 1 saniyelik periyotla 9 derecelik zorlamalı yalpa hareketine maruz bırakıldığı senaryo seçilmiştir. Seçilen senaryoya göre hesaplamalı akışkanlar dinamiği yönteminden elde edilen yalpa momentinin ilk harmoniği ve toplam yalpa sönüm katsayısına ilişkin belirsizlik değerleri Tablo 4.5'te listelenmektedir. Toplam hidrodinamik yalpa momentinin ilk harmoniği ve yalpa sönüm katsayısı elde edilirken takip edilen prosedür bir sonraki bölümde detaylı bir şekilde anlatılacaktır.

Tablo 4.5 Zaman Adımı ve Ağ Yapısı Belirsizliği

	Ağ Yapısı		Zaman Adımı (s)	
	B ₄₄ (Nms/rad)	1. Harmonik (-)	B ₄₄ (Nms/rad)	1. Harmonik (-)
Sık	0.716	0.7076	0.716	0.7076
Orta	0.724	0.7157	0.718	0.7102
Seyrek	0.775	0.7668	0.721	0.7136
R	0.161	0.159	0.828	0.753
GCI _{SİK}	% 0.27	% 0.27	% 1.66	% 1.49

4.1.2.4 Zorlamalı Yalpa Hareketinde Yalpa Sönümü Hesabı

Tek serbestlik dereceli zorlamalı yalpa hareketi analizinden toplam yalpa sönümü katsayısı hesabına geçebilmek için şu prosedür rahatlıkla uygulanabilir:

- İlgili senaryoda tekneye etki eden toplam hidrodinamik moment zamana bağlı olarak elde edilir.
- Zamana bağlı olarak elde edilen toplam moment Fourier serisine açılır ve Euler katsayıları elde edilir.
- Euler katsayılarından kosinüs ile ilintili olan katsayı belirlendikten sonra aşağıdaki işlemler sırasıyla takip edilerek toplam yalpa sönüm katsayısına ulaşılır.

Tek serbestlik dereceli teknenin yalpa hareketi şu şekilde ifade edilebilir:

$$\varphi(t) = \varphi_A \sin(\omega t) \quad (4.4)$$

Burada φ_A zorlamalı yalpa genliğini temsil ederken, ω zorlanma frekansını (rad/s) t ise zamanı (s) temsil etmektedir. Sakin suda sönümlü haldeki 1 serbestlik dereceli yalpa hareketi ise Eşitlik (4.5) yardımı ile modellenebilir:

$$-(I_{44} + A_{44})\ddot{\varphi}(t) - B_{44}\dot{\varphi}(t) - C_{44}\varphi(t) = M_T(t) \quad (4.5)$$

Burada I_{44} yalpa hareketine ilişkin ek kütle atalet momenti katsayısını (kg-m²), A_{44} kütle atalet momenti katsayısını (kg-m²) temsil ederken B_{44} ve C_{44} ise sırasıyla sönüm (Nms/rad) ve doğrultma (Nm/rad) katsayılarını temsil etmektedir. Zamana

bağlı toplam moment (Nm) $M_T(t)$ tek serbestlik dereceli zorlamalı yalpa analizlerinde, zamana bağlı okunan toplam hidrodinamik momente $M_H(t)$ eşit olmakta ve bu ifade Fourier serisine açıldığında sırasıyla Euler katsayıları (a_1 ve b_1) ve yalpa hareketinin sönüm katsayıları aşağıdaki şekilde elde edilebilir.

$$M_H(t) = M_{H0} + \sum_{n=1}^N M_{Hn} \cos(\omega t + \beta_n) \quad (4.6)$$

$n = 1, 2, 3, \dots$

$$a_1 = \frac{2}{T} \int_0^T M_H(t) \sin(\omega t) dt \quad (4.7)$$

$$b_1 = \frac{2}{T} \int_0^T M_H(t) \cos(\omega t) dt \quad (4.8)$$

$$M_{H1} = \sqrt{a_1^2 + b_1^2} \quad (4.9)$$

Euler katsayılarının hesabının ardından sönüm katsayısı ve ek kütle katsayısı aşağıdaki eşitlikler yardımı ile bulunabilir. Bu çalışmada yalnızca tek serbestlik yalpa hareketindeki yalpa sönüm katsayısı hesaplanmış, ek kütle katsayısı ile ilgili bir çalışma yapılmamıştır.

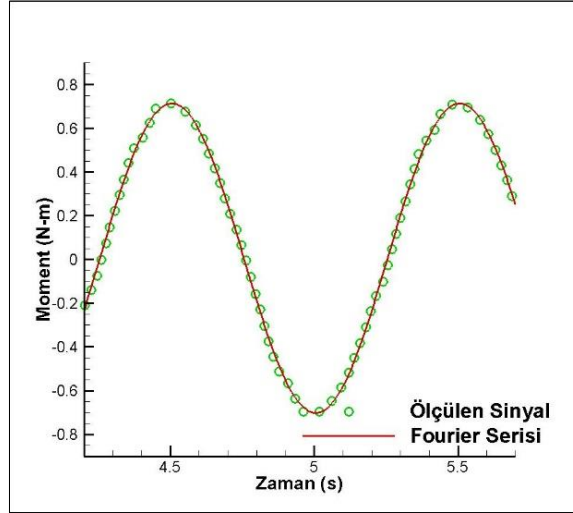
$$-B_{44} = \frac{b_1}{\omega \varphi_A} \quad (4.10)$$

$$-A_{44} - \frac{C_{44}}{\omega^2} = \frac{a_1}{\omega^2 \varphi_A} \quad (4.11)$$

4.1.2.5 HAD Sonuçlarının Deney ile Validasyonu

Bu tez çalışmasının bu bölümünde kayıcı bir teknenin 5 farklı yalpa genliği, 3 farklı yalpa periyodu ve 2 farklı ilerleme hızında sakin sudaki tek serbestlik dereceli yalpa hareketi hesaplamalı akışkanlar dinamiği yaklaşımı ile modellenmiştir. Bu hareket sırasında tekneye etki eden toplam sönüm kuvveti katsayısı değerleri önceki bölümde anlatılan metodoloji ile elde edilmiş ve sonuçlar grafik ve tablolar ile

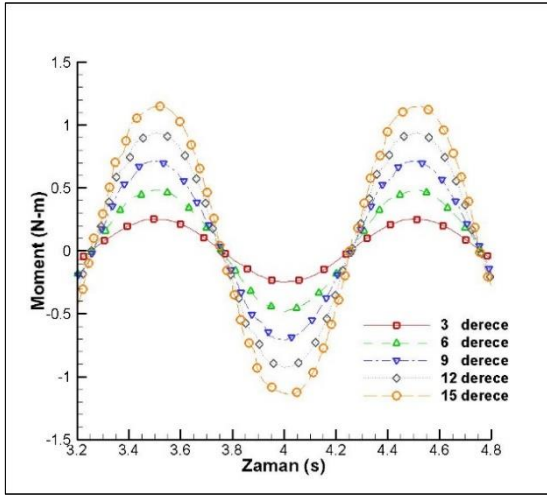
gösterilmiştir. Tüm sayısal analizler 128 GB RAM ve 30 çekirdekli bir işlemciye sahip bir iş istasyonunda gerçekleştirilmiştir. Her bir analiz yaklaşık 6-8 saat kadar sürmüş ve hareket daimi rejimde 5 periyot boyunca kendini yineledikten sonra analizler sonlandırılmıştır.



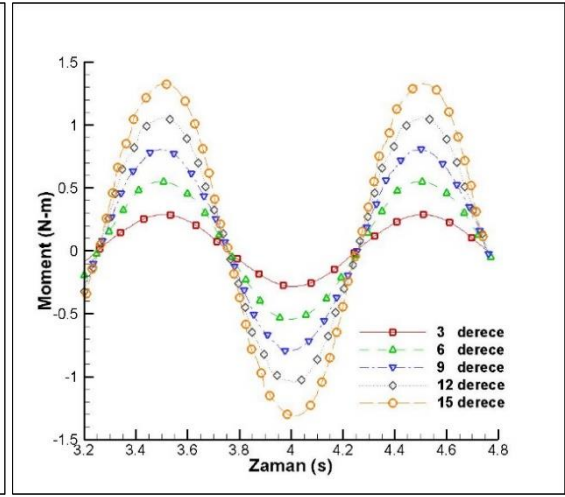
Şekil 4.9 Fourier serisi ile temsil edilmiş yalpa momenti örneği

İlk olarak önceki bölümde anlatıldığı üzere zaman düzleminde elde edilen moment değerleri Fourier serisine açılmış ve Euler katsayıları ilgili eşitlikler kullanılarak elde edilmiştir. Fourier serisine açılarak temsil edilmiş örnek bir senaryo Şekil 4.9'da gösterilmiştir.

Şekil 4.10'da ise iki farklı ilerleme hızındaki 5 farklı yalpa genliğinde zaman düzleminde elde edilen moment değerleri gösterilmektedir. Bu şekilde zorlamalı yalpa periyodu 1 saniye ($T=1.0$ s) olarak seçilmiştir. Beklendiği üzere teknenin zorlanmış yalpa hareketinde, genlik arttıkça tekneye etki eden hidrodinamik moment artmaktadır. Yine ilgili şekilden ileri hız katkısının artmasının tekneye etki eden moment değerini artırdığı da rahatlıkla gözlenebilir. Bu çalışmada analizleri gerçekleştirilen diğer zorlamalı yalpa periyotları olan 0.6 ve 0.8 saniye için de benzer bir durum ve çıkarım söz konusudur.



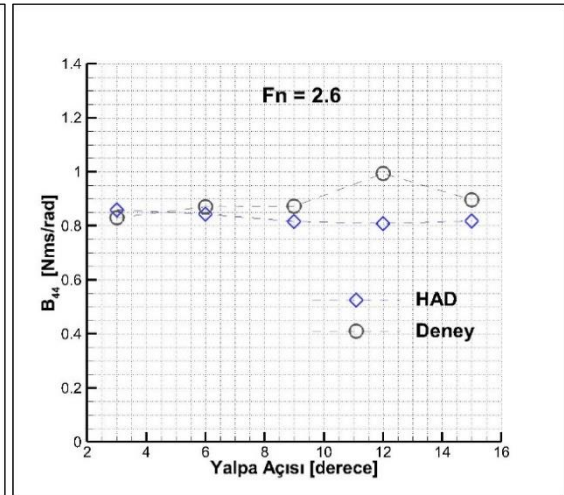
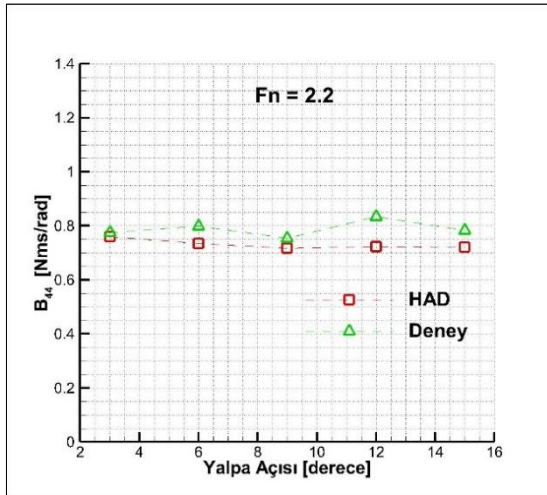
(a)



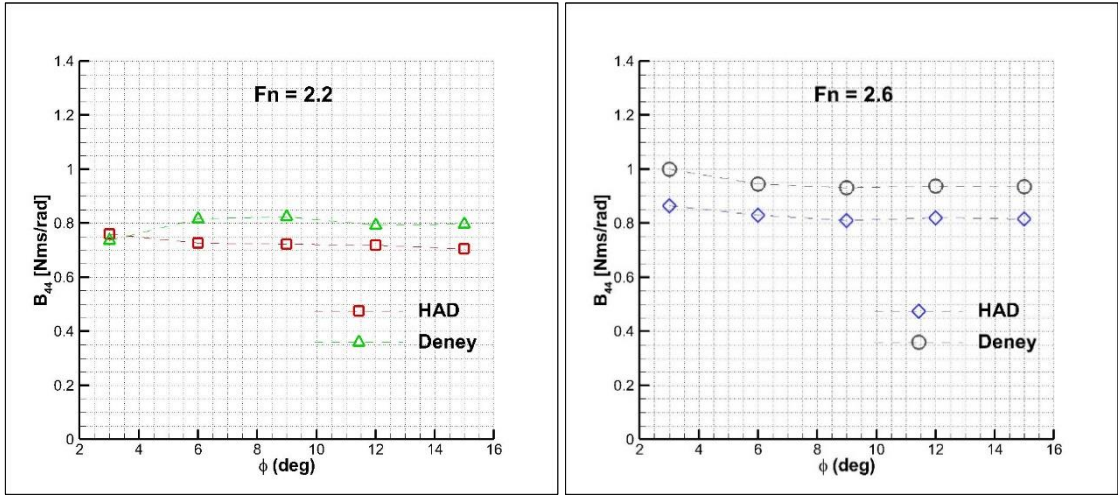
(b)

Şekil 4.10 $F_n=2.2$ (a) ve $F_n=2.6$ (b) için ölçülen moment değerleri ($T=1.0$ s)

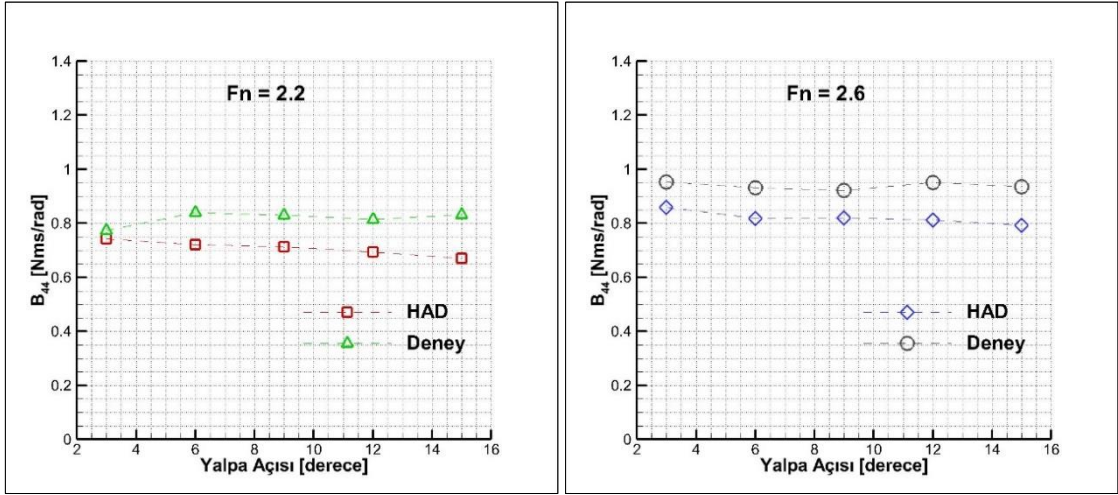
Şekil 4.10'da gösterildiği üzere, her bir analizde zamana bağlı toplam hidrodinamik moment değerleri kaydedilmiş ve akabinde Bölüm 4.1.2.4'te anlatılan metodoloji takip edilerek her bir senaryo için toplam yalpa sönüm katsayısı değerleri elde edilmiştir. Şekil 4.11, Şekil 4.12 ve Şekil 4.13'te hesaplamalı akışkanlar dinamiği yöntemi ile elde edilen yalpa sönüm katsayıları deneysel veriler ile karşılaştırılmıştır.



Şekil 4.11 $T=1.0$ s için yalpa sönüm katsayıları



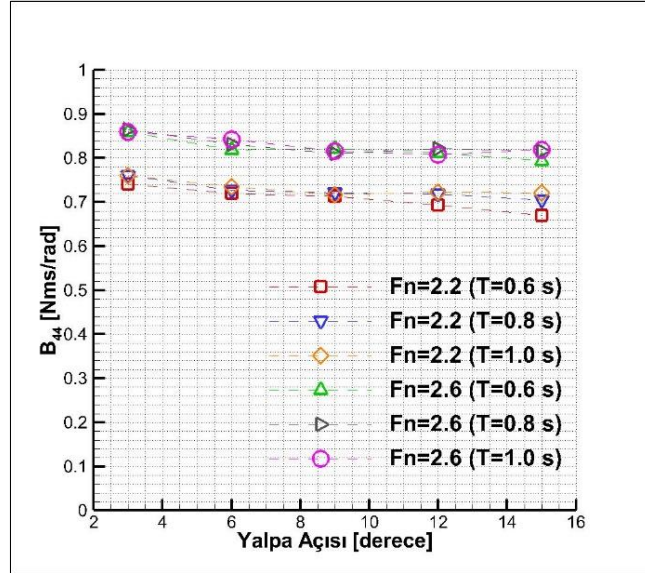
Şekil 4.12 $T=0.8$ s için yalpa sönüm katsayıları



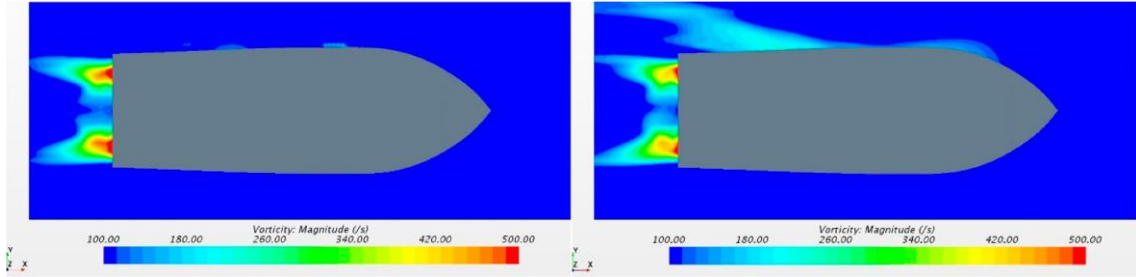
Şekil 4.13 $T=0.6$ s için yalpa sönüm katsayıları

Şekil 4.11 incelendiğinde 1 saniyelik zorlama periyoduna sahip analizlerden elde edilen sonuçların deneysel sonuçlar ile genel olarak uyumlu olduğu, yalnızca 12 derecelik yalpa genliğine sahip senaryolarda her iki ilerleme hızında da deneysel sonuç ile hesaplamalı akışkanlar dinamiğinden elde edilen sonuç arasında bir miktar fark olduğu rahatlıkla gözlemlenebilir. Şekil 4.12 ve Şekil 4.13'te öncekine benzer bir şekilde sonuçların genel olarak birbiri ile uyumlu olduğu rahatlıkla söylenebilir. Bunun dışında ilerleme hızının artmasının sonuçlar arasındaki farkı arttırdığı ve 3 derecelik genlikli harekette her periyot için en iyi sonuçların elde edildiği yine ilgili şekillerden rahatlıkla anlaşılabılır.

Şekil 4.14'te her iki ilerleme hızı ve 3 farklı zorlama periyodunda 5 farklı yalpa genliğine ilişkin toplam yalpa sönüm katsayıları gösterilmektedir. Buna göre yalpa periyodunda ve yalpa genliğindeki değişimin, toplam yalpa sönüm katsayısında ciddi anlamda bir değişikliğe sebebiyet vermediği, yalpa sönüm katsayısındaki ciddi değişimin ilerleme hızındaki değişim ile olduğu rahatlıkla anlaşılmaktadır.



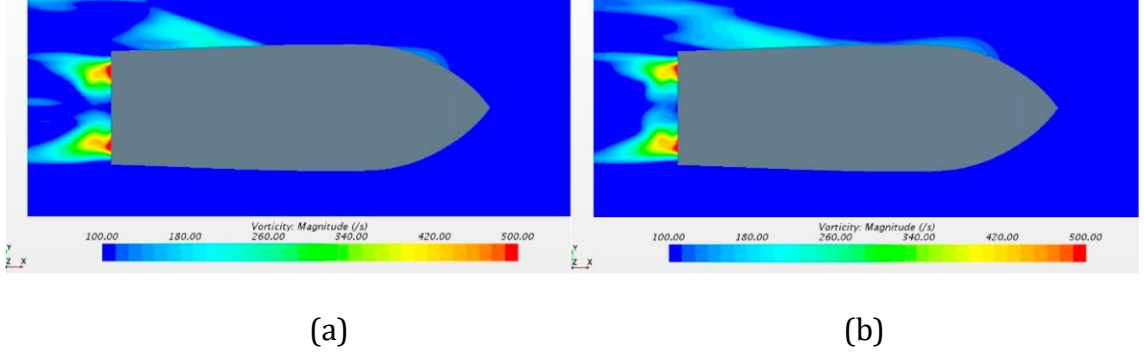
Şekil 4.14 HAD ile elde edilen toplam yalpa sönüm katsayıları



(a)

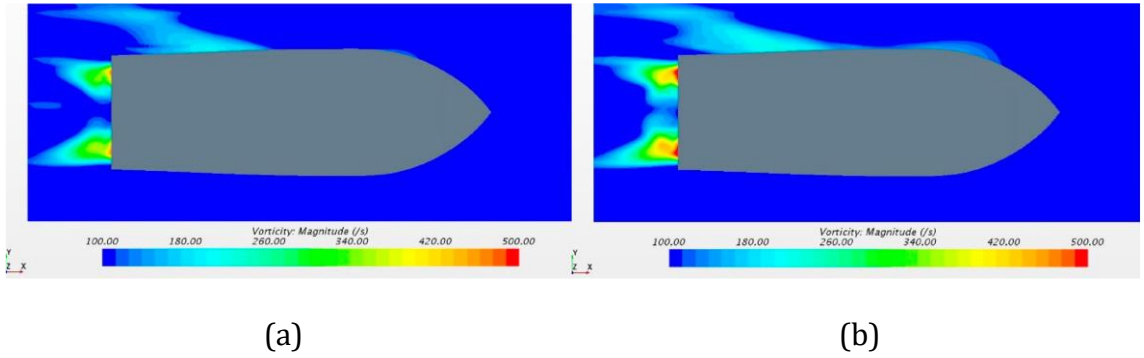
(b)

Şekil 4.15 3 derece (a) ve 12 derece (b) yalpa genliği için tekne arkasındaki girdap dağılımı ($Fn=2.6$, $T=1$ s)

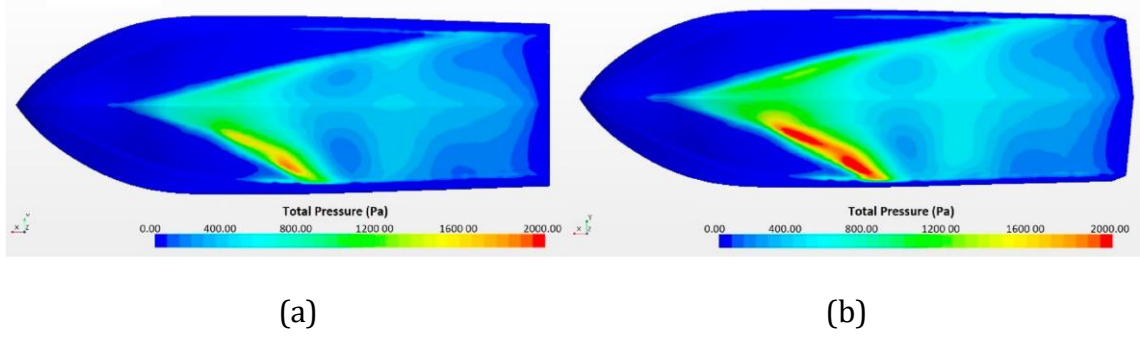


Şekil 4.16 0.6 saniye (a) ve 1.0 saniye (b) zorlama periyodu için tekne arkasındaki girdap dağılımı ($Fn=2.6$, $\Phi=12$ derece)

Şekil 4.15 ve Şekil 4.16 incelendiğinde tekne arkasındaki girdap dağılımında yalpa genliğinin veya yalpa periyodunun değişmesinin tekne arkasındaki girdap dağılımı üzerinde bir etkisinin olmadığı rahatlıkla söylenebilir. Şekil 4.17 incelendiğinde ise tekne arkasındaki girdap şiddetinin belirgin bir şekilde ilerleme hızı arttıkça yoğunlaştığı gözlemlenebilir. Önceki şekillerin aksine bu şekle bakılarak ilerleme hızının tekne arkasındaki girdap dağılımına önemli oranda bir etkisinin olduğu sonucuna kolayca varılabilir. Şekil 4.18’de ise iki farklı ilerleme hızında tekne altındaki basınç dağılımı gösterilmektedir. Buna göre ilerleme hızındaki artışın Şekil 4.17’ye benzer bir şekilde tekne altındaki basınç dağılımını yoğunlaştırdığı açıktır. Bu 4 şekil yalpa hızının maksimum olduğu ya da bir başka deyişle yalpa açısının 0° olduğu an elde edilmiştir.



Şekil 4.17 $Fn=2.2$ (a) ve $Fn=2.6$ (b) ilerleme hızları için tekne arkasındaki girdap dağılımı ($T=1$ s, $\Phi=12$ derece)



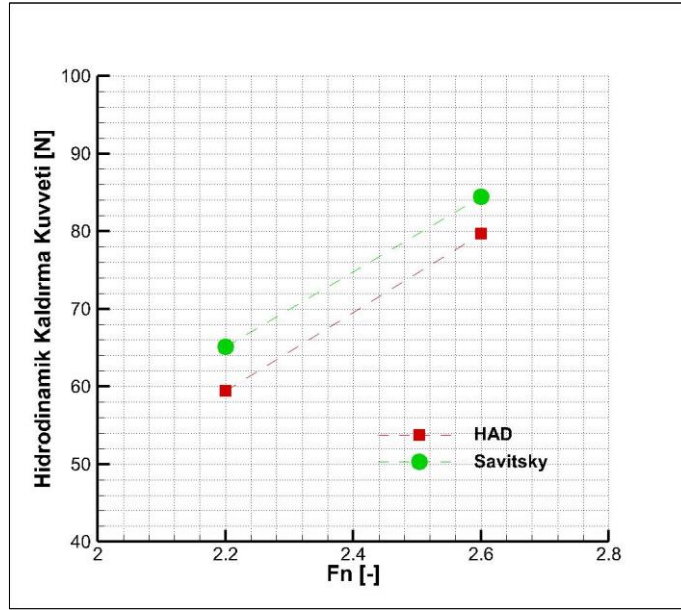
Şekil 4.18 $Fn=2.2$ (a) ve $Fn=2.6$ (b) ilerleme hızları için tekne altındaki basınç dağılımı ($T=1$ s, $\Phi=12$ derece)

Tekneler ilerleme hızına sahip olduklarında ve tek serbestlik dereceli zorlamalı yalpa hareketine maruz bırakıldıklarında, tekne etrafında oluşacak olan girdaplar tekne arkasına doğru yönelir ve tekne arkasından saçılmaya başlar [171]. Bu bilgi ve yukarıdaki şekillere bakılarak, ilerleme hızındaki artışın tekne arkasından saçılan girdap dağılımını ve tekne altındaki basınç dağılımını yoğunlaştırdığını söylemek mümkündür. Bununla birlikte benzer bir etki yalpa periyodunda ve/veya yalpa genliğinde gözlemlenmemektedir. Bu sebeptendir ki kayıcı rejimde yalpa sönüm katsayısı yalpa periyodu ve yalpa genliğinden bağımsız olup, yalnızca ilerleme hızının artması ile artmaktadır.

4.2 Sonuçların Değerlendirilmesi

Bu tez çalışmasının bu bölümünde kayıcı rejime ulaşmış bir kayıcı teknenin 1 serbestlik dereceli zorlamalı yalpa hareketi modellenmiş ve buna bağlı olarak farklı senaryolarda yalpa sönüm katsayıları elde edilmiştir. Yalpa sönüm katsayıları hem ampirik yöntem ile hem de hesaplamalı akışkanlar dinamiği yaklaşımı ile elde edilmiş ve sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Bu bölümde önceki kısımlarda ayrı ayrı verilen sonuçlar, hem birbiri ile hem de deneysel veriler ile mukayese edilecektir. Bu bağlamda sağlıklı bir mukayese için öncelikle ampirik yöntemden ve hesaplamalı akışkanlar dinamiği yönteminden elde edilen hidrodinamik kaldırma kuvveti değerleri değerlendirilecektir. Şekil 4.19’da ampirik yöntemden ve hesaplamalı akışkanlar dinamiği yönteminden elde edilen hidrodinamik kaldırma kuvveti değerleri gösterilmektedir.



Şekil 4.19 Farklı Froude sayılarındaki hidrodinamik kaldırma kuvveti değerleri

Şekil 4.19 incelendiğinde ampirik yöntemden elde edilen hidrodinamik kaldırma kuvveti değerinin hesaplamalı akışkanlar dinamiği yaklaşımından elde edilen değerlere göre daha fazla olduğu görülmektedir. Yalpa sönüm katsayısı hesabında en baskın katkının hidrodinamik kaldırma kuvvetinden kaynakladığı düşünülürse, aradaki bu farkın sonuçları ciddi anlamda etkileyebileceği rahatlıkla söylenebilir. Her iki yöntemden elde edilen bağıl hata miktarı Eşitlik (3.14) kullanılarak elde edilmiş ve bu değerlerin ortalamaları Tablo 4.6’da gösterilmiştir.

Tablo 4.6 Kullanılan yöntemlerdeki ortalama %hata miktarları

Yalpa Periyodu	Fn=2.2		Fn=2.6	
	Ampirik	HAD	Ampirik	HAD
T= 1.0 s	% 43.9	% 7.29	% 39.5	% 8.15
T= 0.8 s	% 46.8	% 9.56	% 33.9	% 12.7
T= 0.6 s	% 46.8	% 13.4	% 39.3	% 12.5

Bu bölümde verilen tablolar ve önceki bölümde verilen grafikler göz önüne alınarak şu temel sonuçlara varılmıştır:

- Oluşturulan yarı ampirik yöntem deneye göre oldukça yüksek sonuçlar vermektedir.
- Hesaplamalı akışkanlar dinamiği yöntemi, kayıcı teknenin tek serbestlik dereceli zorlamalı yalpa hareketini makul bir biçimde modelleyebilmektedir.

- Hesaplamalı akışkanlar dinamiği yönteminden elde edilen sonuçlar deneysel veriler ile oldukça uyumludur.
- Kayıcı rejimde yalpa sönüm katsayısı, yalpa genliği ve periyodundan bağımsız hale gelmektedir.
- Bunun temel nedeni, yalpa sönüm katsayısını domine eden hidrodinamik kaldırma kuvveti bileşenidir ve bu bileşen yalnızca ilerleme hızı değişirse değişmektedir.
- Kayıcı rejimde ilerleme hızı artarsa yalpa sönüm katsayısı da artmaktadır.

Bu tez çalışmasında kayıcı bir teknenin genel hidrodinamik performansı farklı sayısal yöntemler kullanılarak incelenmiştir. Bu amaçla sakin suda ilerleyen kayıcı bir teknenin sudan çıkma, trim ve direnç gibi hidrodinamik parametreleri farklı sayısal yöntemler kullanılarak tahmin edilmiştir. Daha sonra baştan gelen düzenli dalgalar altında ilerleyen kayıcı teknenin hidrodinamik performansına ilişkin analizler hesaplamalı akışkanlar dinamiği yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiş ve düşey hareket ve ivmelenme değerleri tahmin edilmiştir. Tüm bunlara ek olarak sakin suda kayıcı rejimde ilerleyen ve zorlamalı yalpa hareketine maruz bırakılan bir kayıcı tekneye etki eden yalpa sönüm katsayısı farklı sayısal yöntemlerle hesaplanmıştır. Gerçekleştirilen tüm analizlerden elde edilen sonuçlar hem birbiri ile hem de mevcut deneysel veriler ile mukayese edilmiştir.

Sakin su analizleri için sabit kalkıntı açısına sahip iki farklı kayıcı tekne seçilmiştir. Bu kayıcı teknelerin sakin sudaki hidrodinamik performansı ampirik yöntem (*Savitsky yöntemi*), potansiyel temelli 2 boyutlu yöntem (*Hibrit yöntem*) ve hesaplamalı akışkanlar dinamiği (*HAD*) yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Ampirik yöntem MATLAB ortamında geliştirilen ve akış şeması Bölüm 2.1.1'de detaylı olarak anlatılan bir kod yardımı ile uygulanmıştır. Akabinde potansiyel temelli bir yaklaşım olan Zarnick yaklaşımı ile Savitsky yönteminin birleştirilmesi ile oluşturulmuş matematiksel model MATLAB ortamında geliştirilen bir kod ile seçilen iki farklı kayıcı tekneye uygulanmıştır. Bu yöntem için geliştirilen koda ilişkin akış şeması ve detaylı bilgi Bölüm 2.1.2'de bulunabilir. Son olarak kayıcı teknelerin sakin sudaki hidrodinamik performansı HAD yöntemi ile incelenmiştir. Oluşturulan fiziksel model, matematiksel modele ait ayırıklaştırma şemaları vb. bilgiler detaylı bir şekilde Bölüm 2.1.3'te anlatılmıştır. Bu üç farklı sayısal yöntemden elde edilen sonuçlara göre hesaplamalı akışkanlar dinamiği yönteminden daha düşük doğrulukla tahmin yapmasına karşın oluşturulan hibrit yöntem özellikle ön dizayn aşamasında oldukça faydalı bir yöntem olarak karşımıza

çıkılmaktadır. Gerek ampirik yöntemin cevap vermediği sudan çıkma değerine ilişkin bir tahminde bulunabilmesi, gerek ampirik yönteme göre çok daha yüksek doğrulukla trim tahmini yapması gerekse hesaplamalı akışkanlar dinamiği yöntemine göre çok daha ucuz maliyetli olması hibrit yöntemi oldukça cazip hale getirmektedir.

Baştan gelen düzenli dalgalar altındaki kayıcı teknelerin denizcilik analizleri yalnızca hesaplamalı akışkanlar dinamiği yardımı ile gerçekleştirilmiş ve sonuçlar literatürde mevcut deneysel veriler ile mukayese edilmiştir. Bu analizlerde gerçekleştirme çalışması sakın sudakine benzer bir biçimde GCI (*Grid Convergence Index*) yöntemi kullanılarak hem zaman adımı hem de ağ yapısı içi gerçekleştirilmiş ve elde edilen sonuçlar deneysel veriler ile karşılaştırılmıştır. Yapılan mukayesede açık bir şekilde görülmüştür ki hesaplamalı akışkanlar dinamiği yaklaşımı gerek düşey hareket gerekse düşey ivmelenme tahmininde oldukça başarılı bir yöntemdir. Bunların yanında deneysel verilere paralel bir şekilde, düşey hareketlerin tek bir frekans ile temsil edilebileceği ancak düşey ivmelenme değerlerinde kuvvetli doğrusal olmayan etkiler ile birlikte birden fazla frekansın ivme değeri üzerinde etkin olduğu gözlemlenmiştir ve bu durum zaman ve frekans düzlemi cevaplarında ortaya konmuştur.

Sakin suda ilerlerken zorlamalı yalpa hareketine maruz bırakılan kayıcı teknenin yalpa sönüm katsayısı değerleri ise hem yarı ampirik bir yöntemle hem de hesaplamalı akışkanlar dinamiği yardımı ile elde edilmiştir. Yarı ampirik yöntemin gerçekleştirme çalışması yapılamazken, hesaplamalı akışkanlar dinamiği yönteminin gerçekleştirme çalışması önceki bölümlerdekine benzer bir şekilde GCI yöntemi kullanılarak yapılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre yarı ampirik yöntemden hesaplanan sonuçların deneysel verilere göre oldukça yüksek değerler vermesine karşın, hesaplamalı akışkanlar dinamiği yaklaşımından elde edilen sonuçların genel olarak deney ile oldukça uyumlu olduğu gözlemlenmiştir. Bununla birlikte kayıcı bir teknenin kayıcı rejimde yalpa sönüm katsayısında en baskın terimin hidrodinamik kaldırma kuvvetinden geldiği ve bu kuvvetin doğru tahmin edilmesinin sonucu ciddi anlamda etkilediği belirlenmiştir. Dahası, kayıcı rejimde yalpa sönüm katsayısının yalpa genliği ve yalpa periyodundan bağımsız olup, hidrodinamik kaldırma

kuvvetini değiştirmesi sebebiyle yalnızca ilerleme hızına bağlı olarak değiştiği gözlemlenmiştir.

Tüm bu sonuçlar göz önüne alındığında kayıcı bir teknenin genel hidrodinamik performansı tahmininde kullanılan sayısal yöntemlerin doğruluk mertebeleri ve analizlerde gerekli hesaplama maliyeti Tablo 5.1’de özetlenmiştir.

Tablo 5.1 Kullanılan sayısal yöntemlerin doğruluk mertebeleri ve maliyetleri

Kullanılan Sayısal Yöntem	Sakin Su Performansı		Baştan Gelen Düzenli Dalgalarda Denizcilik		Yalpa Sönüm Katsayısı Hesabı	
	Hassasiyet	Maliyet	Hassasiyet	Maliyet	Hassasiyet	Maliyet
Ampirik Yöntem	<i>Orta</i>	<i>Ucuz</i>	-	-	<i>Kötü</i>	<i>Ucuz</i>
Potansiyel Yöntem	<i>İyi</i>	<i>Ucuz</i>	-	-	-	-
HAD	<i>İyi</i>	<i>Pahalı</i>	<i>İyi</i>	<i>Pahalı</i>	<i>İyi</i>	<i>Pahalı</i>

Bu tez çalışmasında gerçekleştirilen tüm analizler genel anlamda Tablo 5.1’de özetlenmiştir. Buna göre hesaplamalı akışkanlar dinamiği yaklaşımının diğer sayısal yöntemlere kıyasla her nevi problemin çözümünde oldukça başarılı olduğu, ancak bu yöntemlerin göreceli olarak oldukça yüksek hesaplama maliyetine sebep oldukları açıktır. Bunların yanında bu kıyasın dışında tutulan analiz öncesi (*pre-processing*) ve analiz sonrası (*post-processing*) süreçler de analiz kadar maliyetli olabilmekte ve bu durum hesaplama maliyetini ciddi anlamda arttırabilmektedir. Hesaplama maliyetinin yanı sıra diğer iki yöntem herhangi bir bilgisayar ile gerçekleştirilebilirken, hesaplamalı akışkanlar dinamiği analizleri için gereken iş istasyonu ve paket program maliyetleri de yatırım maliyeti açısından bu yöntemi diğerlerinden çok daha pahalı hale getirmektedir.

Bu tez çalışmasının özellikle ikinci bölümünden çıkan sonuca göre potansiyel temelli yaklaşımlar gerçekleştirilebilecek gelişmelerle birlikte hesaplamalı akışkanlar dinamiği yöntemleri kadar iyi bir alternatif haline gelebilir. Ancak bunun gerçekleşebilmesi için, bu yöntemlerin yalnızca sakin su değil düşey ve yatay

hareketlerin modellenemediği denizcilik analizlerinde de kullanılabilir hale getirilmesi gerekmektedir.

Gelecek çalışmalarda,

- Ampirik yöntemin sabit olmayan kalkıntı açısına sahip teknelerde kullanılabilir hale getirilmesi
- Hibrit yöntemin sabit olmayan kalkıntı açısına sahip teknelerde de denenerek makul sonuçlar verebilecek hale getirilmesi
- Oluşturulan hibrit yöntemin baştan gelen düzenli dalgalar altında da çalışır hale getirilerek ek direnç hesabında kullanılabilir hale getirilmesi
- Denizcilik analizlerinde kullanılabilecek şekilde farklı deneysel verileri de içine alacak şekilde yarı ampirik yöntemler geliştirilmesi gibi konular üzerinde durulabilir.

KAYNAKÇA

-
- [1] D. Savitsky, "Overview of planing hull developments", içinde *Proceedings of High Performance Marine Vehicles*, ABD, ss. PC1-PC14, 1992.
 - [2] O. M. Faltinsen, *Hydrodynamics of High-Speed Marine Vehicles*. UK: Cambridge University Press, 2005.
 - [3] G. Fridsma, "A systematic study of the rough-water performance of planing boats", Defense Technical Information Center, New Jersey, USA, Kas. 1969. doi: 10.21236/AD0708694.
 - [4] J. A. Keuning ve J. Gerritsma, "Resistance Tests of a Series of Planing Hull Forms with 25 Degrees Deadrise Angle", *International Shipbuilding Progress*, sy 337, ss. 222-249, 1982.
 - [5] E. Begovic ve C. Bertorello, "Resistance assessment of warped hullform", *Ocean Engineering*, c. 56, ss. 28-42, Ara. 2012, doi: 10.1016/j.oceaneng.2012.08.004.
 - [6] F. De Luca ve C. Pensa, "The Naples warped hard chine hulls systematic series", *Ocean Engineering*, c. 139, ss. 205-236, Tem. 2017, doi: 10.1016/j.oceaneng.2017.04.038.
 - [7] D. J. Taunton, D. A. Hudson, ve R. A. Shenoi, "Characteristics of a series of high speed hard chine planing hulls – Part 1: Performance in calm water.", *International Journal of Small Craft Technology*, sy 152, ss. 55-75, 2010.
 - [8] J. A. Keuning ve L. Hillege, "The Results of the Delft Systematic Deadrise Series", içinde *FAST*, Nantes, France, ss. 87-96, 2017.
 - [9] B. Metcalf, L. Faul, E. Bumiller, ve J. Slutsky, "Resistance Tests of a Systematic Series of U.S. Coast Guard Planing Hulls", Maryland, USA, 2005.
 - [10] E. Lee, M. Pavkov, ve L. McCue-Weil, "The Systematic Variation of Step Configuration and Displacement for a Double-step Planing Craft", *j ship prod des*, c. 30, sy 2, ss. 89-97, May. 2014, doi: 10.5957/JSPD.30.2.130040.
 - [11] A. Najafi, H. Nowruzi, M. Karami, ve H. Javanmardi, "Experimental investigation of the wetted surfaces of stepped planing hulls", *Ocean Engineering*, c. 187, s. 106164, Eyl. 2019, doi: 10.1016/j.oceaneng.2019.106164.
 - [12] A. G. Avci ve B. Barlas, "An experimental investigation of interceptors for a high speed hull", *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, c. 11, sy 1, ss. 256-273, Oca. 2019, doi: 10.1016/j.ijnaoe.2018.05.001.
 - [13] A. H. Day ve C. Cooper, "An experimental study of interceptors for drag reduction on high-performance sailing yachts", *Ocean Engineering*, c. 38, sy 8-9, ss. 983-994, Haz. 2011, doi: 10.1016/j.oceaneng.2011.03.006.

- [14] D. B. Danisman ve T. B. Bastug, "An Experimental Study of the Effect of Change in LCG on Resistance and Planing Capability of a Fast Vessel", program adı: The 4th International Conference on Advanced Model Measurement Technology for the Maritime Industry, 2015.
- [15] R. Kimoto, Y. Ikeda, ve T. Katayama, "Effects of Running Attitude on Hydrodynamic Forces for Oblique Towed Planing Craft", *Proceedings of the 2nd Asia-Pacific Workshop on Hydrodynamics*, ss. 115-122, 2004.
- [16] M. G. Morabito, "Planing in Shallow Water at Critical Speed", *Journal of Ship Research*, c. 57, sy 2, ss. 98-111, Haz. 2013, doi: 10.5957/JOSR.57.2.120031.
- [17] F. Cucinotta, E. Guglielmino, ve F. Sfravara, "An experimental comparison between different artificial air cavity designs for a planing hull", *Ocean Engineering*, c. 140, ss. 233-243, Ağu. 2017, doi: 10.1016/j.oceaneng.2017.05.028.
- [18] P. Ghadimi, S. M. Sajedi, ve S. Tavakoli, "Experimental Study of the Wedge Effects on the Performance of a Hard-chine Planing Craft in Calm Water", *Scientia Iranica*, c. 26, sy 3, ss. 1316-1334, 2019, doi: 10.24200/sci.2018.20607.
- [19] A. Gray-Stephens, T. Tezdogan, ve S. Day, "Experimental measurement of the nearfield longitudinal wake profiles of a high-speed prismatic planing hull", *Ship Technology Research*, ss. 1-27, Eki. 2020, doi: 10.1080/09377255.2020.1836552.
- [20] W. D. Molyneux ve G. Roddan, "Model experiments on simplified planing hull in regular and irregular waves", program adı: Marine Dynamics Conference, May. 1991.
- [21] D. J. Kim, S. Y. Kim, Y. J. You, K. P. Rhee, S. H. Kim, ve Y. G. Kim, "Design of high-speed planing hulls for the improvement of resistance and seakeeping performance", *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, c. 5, sy 1, ss. 161-177, Mar. 2013, doi: 10.2478/IJNAOE-2013-0124.
- [22] F. De Luca ve C. Pensa, "The Naples Systematic Series – Second part: Irregular waves, seakeeping in head sea", *Ocean Engineering*, c. 194, s. 106620, Ara. 2019, doi: 10.1016/j.oceaneng.2019.106620.
- [23] D. J. Taunton, D. A. Hudson, ve R. A. Shenoi, "Characteristics of a Series of High Speed Hard Chine Planing Hulls - Part II: Performance in Waves", *Characteristics of a series of high speed hard chine planing hulls - part II: performance in waves. International Journal of Small Craft Technology*, sy 153, ss. B1-B22, 2011.
- [24] E. Begovic, C. Bertorello, ve S. Pennino, "Experimental seakeeping assessment of a warped planing hull model series", *Ocean Engineering*, c. 83, ss. 1-15, Haz. 2014, doi: 10.1016/j.oceaneng.2014.03.012.
- [25] J. Seo vd., "Model tests on resistance and seakeeping performance of wave-piercing high-speed vessel with spray rails", *International Journal of Naval*

- Architecture and Ocean Engineering*, c. 8, sy 5, ss. 442-455, Eyl. 2016, doi: 10.1016/j.ijnaoe.2016.05.010.
- [26] J.-Y. Park vd., “An experimental study on vertical motion control of a high-speed planing vessel using a controllable interceptor in waves”, *Ocean Engineering*, c. 173, ss. 841-850, Şub. 2019, doi: 10.1016/j.oceaneng.2019.01.019.
 - [27] N. Santoro, E. Begovic, C. Bertorello, A. Bove, S. De Rosa, ve F. Franco, “Experimental Study of the Hydrodynamic Loads on High Speed Planing Craft”, *Procedia Engineering*, c. 88, ss. 186-193, 2014, doi: 10.1016/j.proeng.2014.11.143.
 - [28] J. Camilleri, D. J. Taunton, ve P. Temarel, “Full-scale measurements of slamming loads and responses on high-speed planing craft in waves”, *Journal of Fluids and Structures*, c. 81, ss. 201-229, Ağu. 2018, doi: 10.1016/j.jfluidstructs.2018.05.006.
 - [29] L. Soletic, “Seakeeping of a Systematic Series of Planing Hulls”, Yüksek Lisans Tezi, Stevens Institute of Technology, 2009.
 - [30] C. Q. Judge, “Coupling of Heave and Roll for High-Speed Planing Hulls”, içinde *Volume 8A: Ocean Engineering*, San Francisco, California, USA, Haz. 2014, s. V08AT06A019, doi: 10.1115/OMAE2014-23261.
 - [31] D. Savitsky, R. E. Prowse, ve D. H. Lueders, “Flat Plate and 20° Deadrise Surface in Unsymmetrical Planing Conditions”, Stevens Institute of Technology, Washington, 4187, 1958.
 - [32] P. W. Brown ve W. E. Klosinski, “Directional Stability Tests of Two Prismatic Planing Hulls”, Stevens Institute of Technology, Washington, CG-D-11-94, 1994.
 - [33] P. W. Brown ve W. E. Klosinski, “Directional Stability Tests of a 30 Degree Deadrise Prismatic Planing Hull”, Stevens Institute of Technology, Washington, CG-D-11-94, 1994.
 - [34] P. W. Brown ve W. E. Klosinski, “Experimental determination of the added inertia and damping of planing boats in roll”, Stevens Institute of Technology, ABD, CG-D-03-95, 1995.
 - [35] Y. Ikeda ve T. Katayama, “Roll Damping Prediction Method for a High-Speed Planing Craft”, içinde *Proceedings of the 7th International Conference on Stability of Ship and Ocean Vehicles*, Avustralya, c. B, ss. 532-541, 2000.
 - [36] T. Katayama, A. Toshiya, ve S. Tomohisa, “Roll Damping Estimation for Small Planing Craft”, program adı: STAB 2018, Kobe, Japan, 2018.
 - [37] E. Begovic, C. Bertorello, ve J. Prpic Orsic, “Roll Damping Coefficients Assessment and Comparison for Round Bilge and Hard Chine Hullforms”, program adı: ASME 2013 32nd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, Nantes, France, Haz. 2013, doi: 10.1115/OMAE2013-10620.

- [38] C. Q. Judge ve J. A. Judge, "Measurement of Hydrodynamic Coefficients on a Planing Hull Using Forced Roll Oscillations", *Journal of Ship Research*, c. 57, sy 2, ss. 112-124, Haz. 2013, doi: 10.5957/JOSR.57.2.120020.
- [39] D. Savitsky, "Hydrodynamic Design of Planing Hulls", *Marine Technology*, c. 1, sy 1, ss. 71-95, 1964.
- [40] D. Savitsky ve W. P. Brown, "Procedures for Hydrodynamic Evaluation of Planning Hulls in Smooth and Rough Water", *Marine Technology*, c. 13, sy 4, ss. 381-400, Eki. 1976.
- [41] D. Savitsky, M. F. DeLorme, ve R. Datla, "Inclusion of Whisker Spray Drag in Performance Prediction Method for High- Speed Planing Hulls", *Marine Technology*, c. 44, sy 1, ss. 35-56, 2007.
- [42] C. L. Shuford, "A Theoretical and Experimental Study of Planing Surfaces Including Effects of Cross Section and Plan Form", Washington, Rapor No: 3939, 1957.
- [43] D. Savitsky ve M. Morabito, "Origin and Characteristics of the Spray Patterns Generated by Planing Hulls", Stevens Institute of Technology, New Jersey, USA, 2882, 2010.
- [44] C. Bertorello ve L. Oliviero, "Hydrodynamic resistance assessment of non-monohedral planing hull forms based on Savitsky's methodology", *Australian Journal of Mechanical Engineering*, c. 4, sy 2, ss. 209-223, Oca. 2007, doi: 10.1080/14484846.2007.11464527.
- [45] R. D. Schachter, H. J. C. Ribeiro, ve C. A. L. da Conceição, "Dynamic equilibrium evaluation for planing hulls with arbitrary geometry and variable deadrise angles – The Virtual Prismatic Hulls Method", *Ocean Engineering*, c. 115, ss. 67-92, Mar. 2016, doi: 10.1016/j.oceaneng.2015.12.053.
- [46] H. Ghassemi, H. Bahrami, A. Vaezi, ve M. A. Ghassemi, "Minimization of Resistance of the Planing Boat by Trim-tab", *International Journal of Physics*, c. 7, sy 1, ss. 21-26, 2019.
- [47] A. Dashtimanesh, S. Tavakoli, ve P. Sahoo, "A simplified method to calculate trim and resistance of a two-stepped planing hull", *Ships and Offshore Structures*, c. 12, sy sup1, ss. S317-S329, Mar. 2017, doi: 10.1080/17445302.2016.1262809.
- [48] M. G. Morabito, "Empirical Equations for Planing Hull Bottom Pressures", *Journal of Ship Research*, c. 58, sy 4, ss. 185-200, Ara. 2014, doi: 10.5957/JOSR.58.4.140006.
- [49] P. Ghadimi, S. Tavakoli, A. Dashtimanesh, ve A. Pirooz, "Developing a computer program for detailed study of planing hull's spray based on Morabito's approach", *Journal of Marine Science and Application*, c. 13, sy 4, ss. 402-415, Ara. 2014, doi: 10.1007/s11804-014-1280-8.
- [50] S. Pennino ve A. Scamardella, "Dynamic Equilibrium and Resistance Assessment for Warped Hulls by Means of Total Pressure Distrubiton", *Trans RINA Part B: Int J Small Craft Tech.*, c. 160, ss. B91-B100, 2018.

- [51] D. Radojčić, A. Zgradic, M. Kalajdzic, ve A. Simic, "Resistance Prediction for Hard Chine Hulls in the Pre-Planing Regime", *Polish Maritime Research*, c. 21, sy 2, ss. 9-26, Nis. 2014, doi: 10.2478/pomr-2014-0014.
- [52] D. Radojčić ve M. Kalajdžić, "Resistance and Trim Modeling of the Naples Hard Chine Systematic Series", *Int J Small Craft Tech: Part B1*, c. 160, 2018.
- [53] D. Radojčić, M. Princevac, ve T. Rodic, "Resistance and Trim Predictions for the SKLAD Semidisplacement Hull Series", *Oceanic Engineering International*, c. 3, sy 1, ss. 34-50, 1999.
- [54] P. K. Sahoo ve J. Won, "Improved Resistance Prediction for High-Speed Round Bilge Hull Forms", program adı: Eighth International Conference On High-Performance Marine Vehicles, Dusiburg,Almanya, 2012.
- [55] A. Rosén, E. Begovic, M. Razola, ve K. Garne, "High-speed craft dynamics in waves: challenges and opportunities related to the current safety philosophy", Belgrad, Srbistan, 2017.
- [56] E. Zarnick, "A Nonlinear Mathematical Model of Motions of a Planing Boat in Regular Waves", David Taylor Naval Ship Research and Development Center, 78/032, 1978.
- [57] E. Zarnick, "A Nonlinear Mathematical Model of Motions of a Planing Boat in Irregular Waves", David Taylor Naval Ship Research and Development Center, SPD-0867-01, 1979.
- [58] P. R. Payne, "Contributions to planing theory", *Ocean Engineering*, c. 22, sy 7, ss. 699-729, Eki. 1995, doi: 10.1016/0029-8018(94)00033-4.
- [59] M. Martin, "Theoretical Determination of Porpoising Instability of High-Speed Planing Boats"; Defense Technical Information Center, Fort Belvoir, VA, Nis. 1976. doi: 10.21236/ADA030218.
- [60] R. Algarín ve O. Tascón, "Hydrodynamic Modeling of Planing Boats with Asymmetry and Steady Condition.", program adı: HSMV 2011, Naples, Italy, 2011.
- [61] R. Algarín ve O. Tascón, "Analysis of Dynamic Stability of Planing Craft on the Vertical Plane", *Ship Science and Technology*, c. 8, 2014.
- [62] P. Ghadimi, S. Tavakoli, ve A. Dashtimanesh, "Calm Water Performance of Hard-Chine Vessels in Semi-Planing and Planing Regimes", *Polish Maritime Research*, c. 23, sy 4, ss. 23-45, Ara. 2016, doi: 10.1515/pomr-2016-0068.
- [63] P. Ghadimi, S. Tavakoli, A. Dashtimanesh, ve R. Zamanian, "Steady performance prediction of a heeled planing boat in calm water using asymmetric 2D+T model", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment*, c. 231, sy 1, ss. 234-257, Şub. 2017, doi: 10.1177/1475090216638680.
- [64] R. N. Bilandi, S. Mancini, L. Vitiello, S. Miranda, ve M. D. Carlini, "A Validation of Symmetric 2D + T Model Based on Single-Stepped Planing Hull Towing Tank Tests", *Journal of Marine Science and Engineering*, c. 6, sy 4, s. 136, Kas. 2018, doi: 10.3390/jmse6040136.

- [65] R. Niazmand Bilandi, A. Dashtimanesh, ve S. Tavakoli, "Development of a 2D+T theory for performance prediction of double-stepped planing hulls in calm water", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment*, s. 147509021879778, Eyl. 2018, doi: 10.1177/1475090218797784.
- [66] S. Tavakoli, A. Dashtimanesh, ve P. Sahoo, "An Oblique 2D+T Approach for Hydrodynamic Modeling of Yawed Planing Boats in Calm Water", *Journal of Ship Production and Design*, c. 34, sy 4, ss. 335-346, Kas. 2018, doi: 10.5957/JSPD.160032.
- [67] D. J. Kim, K. P. Rhee, ve Y. J. You, "Theoretical prediction of running attitude of a semi-displacement round bilge vessel at high speed", *Applied Ocean Research*, c. 41, ss. 41-47, Haz. 2013, doi: 10.1016/j.apor.2013.02.003.
- [68] K. Garne, "Improved time-domain simulation of planing hulls in waves by correction of the near-transom lift", *International Shipbuilding Progress*, c. 52, sy 3, ss. 201-230, Oca. 2005.
- [69] S. Tavakoli, S. Najafi, E. Amini, ve A. Dashtimanesh, "Performance of high-speed planing hulls accelerating from rest under the action of a surface piercing propeller and an outboard engine", *Applied Ocean Research*, c. 77, ss. 45-60, Ağu. 2018, doi: 10.1016/j.apor.2018.05.004.
- [70] H. Sun ve O. M. Faltinsen, "The influence of gravity on the performance of planing vessels in calm water", *Journal of Engineering Mathematics*, c. 58, sy 1-4, ss. 91-107, Haz. 2007, doi: 10.1007/s10665-006-9107-5.
- [71] H. Allaka ve M. Groper, "Validation and verification of a planing craft motion prediction model based on experiments conducted on full-size crafts operating in real sea", *J Mar Sci Technol*, Mar. 2020, doi: 10.1007/s00773-020-00709-6.
- [72] M. Martin, "Theoretical Prediction of Motions of High Speed Planing Boats in Waves", David Taylor Naval Ship Research and Development Center, 76-0069, Nis. 1976.
- [73] P. Kanyoo, D. J. Taunton, ve J. I. R. Blake, "Development and optimization of mathematical model of high speed planing dynamics", içinde *13th International Conference on Fast Sea Transportation*, Washington DC, ABD, Eyl. 2015.
- [74] R. H. Akers, "Dynamic Analysis of Planing Hulls in the Vertical Plane", program adı: Meeting of the New England Section of The Society of Naval Architects and Marine Engineers, 1999.
- [75] A. van Deyzen, "A nonlinear mathematical model of motions of a planing monohull in head seas", HIPER08, Naples, Italy, 2008.
- [76] J. A. Keuning, "Non-linear Behaviour of Fast Mono-Hulls in Head-Waves", Doktora Tezi, Delft University of Technology, Netherlands, 1994.
- [77] S. Hosseinzadeh, M. Khorasanchi, ve M. S. Seif, "Investigation of planing vessels motion using nonlinear strip theory – an experimental and numerical

- study", *Ships and Offshore Structures*, ss. 1-14, Kas. 2018, doi: 10.1080/17445302.2018.1552342.
- [78] L. Sebastiani, D. Bruzzone, P. Gualeni, G. Rambaldi, D. Ruscelli, ve M. Viviani, "A Practical Method for the Prediction of Planing Craft Motions in Regular and Irregular Waves", içinde *Volume 4: Ocean Engineering; Offshore Renewable Energy*, Portekiz, ss. 687-696, 2008, doi: 10.1115/OMAE2008-57946.
- [79] C. D. Barry, D. Ghosh, R. Akers, ve A. Ulak, "Implementation, Application and Validation of the Zarnick Strip Theory Analysis Technique for Planing Hulls", Auckland, 2002.
- [80] S. Pennino, "Vertical Motion Assessment for Planing Hulls", PhD Thesis, Napoli Federico II, Naples, Italy, 2014.
- [81] T. M. Sayeed, H. Peng, B. Veitch, ve R. Billard, "Numerical Simulation of Fast Rescue Crafts in Waves and Application in a Training Simulator", *Journal of Ocean Technology*, c. 8, sy 4, ss. 41-63, 2013.
- [82] J. D. Hicks, A. W. Troesch, ve C. Jiang, "Simulation and Nonlinear Dynamics Analysis of Planing Hulls", *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, c. 117, sy 1, s. 38, 1995, doi: 10.1115/1.2826989.
- [83] H. Haase, J. P. Soproni, ve M. Abdel-Maksoud, "Numerical analysis of a planing boat in head waves using a 2D+t method", *Ship Technology Research*, c. 62, sy 3, ss. 131-139, Eyl. 2015, doi: 10.1179/2056711115Y.0000000003.
- [84] W. Meng ve W. Qiu, "Nonlinear Computation of Ship Motions in the Time-Domain Using 2D+t Theory", içinde *Volume 11: Prof. Robert F. Beck Honoring Symposium on Marine Hydrodynamics*, St. John's, Newfoundland, Canada, May. 2015, s. V011T12A040, doi: 10.1115/OMAE2015-41314.
- [85] H. Sun ve O. M. Faltinsen, "Dynamic motions of planing vessels in head seas", *Journal of Marine Science and Technology*, c. 16, sy 2, ss. 168-180, Haz. 2011, doi: 10.1007/s00773-011-0123-4.
- [86] O. Faltinsen ve R. Zhao, "Numerical predictions of ship motions at high forward speed", *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A: Physical and Engineering Sciences*, c. 334, sy 1634, ss. 241-252, Şub. 1991, doi: 10.1098/rsta.1991.0011.
- [87] H. Sun ve O. M. Faltinsen, "Hydrodynamic forces on a semi-displacement ship at high speed", *Applied Ocean Research*, c. 34, ss. 68-77, Oca. 2012, doi: 10.1016/j.apor.2011.10.001.
- [88] F. P. Arribas ve J. A. C. Fernández, "Strip theories applied to the vertical motions of high speed crafts", *Ocean Engineering*, c. 33, sy 8-9, ss. 1214-1229, Haz. 2006, doi: 10.1016/j.oceaneng.2005.04.021.
- [89] N. Salvesen, E. O. Tuck, ve O. Faltinsen, "SHIP MOTIONS AND SEA LOADS", 1970, Erişim: Kas. 24, 2018. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <https://trid.trb.org/view.aspx?id=495>.

- [90] P. Ghadimi, S. Tavakoli, ve A. Dashtimanesh, "Coupled heave and pitch motions of planing hulls at non-zero heel angle", *Applied Ocean Research*, c. 59, ss. 286-303, Eyl. 2016, doi: 10.1016/j.apor.2016.05.009.
- [91] S. Tavakoli, A. Dashtimanesh, ve P. K. Sahoo, "Prediction of Hydrodynamic Coefficients of Coupled Heave and Pitch Motions of Heeled Planing Boats by Asymmetric 2D+T Theory", içinde *Volume 7A: Ocean Engineering*, Madrid, Spain, Haz. 2018, doi: 10.1115/OMAE2018-78327.
- [92] F. De Luca, S. Mancini, S. Miranda, ve C. Pensa, "An Extended Verification and Validation Study of CFD Simulations for Planing Hulls", *Journal of Ship Research*, c. 60, sy 2, ss. 101-118, Haz. 2016, doi: 10.5957/JOSR.60.2.160010.
- [93] S. Mancini, F. De Luca, ve A. Ramolini, "Towards CFD Guidelines for Planing Hull Simulations Based on the Naples Systematic Series", *VII International Conference on Computational Methods in Marine Engineering MARINE 2017*, 2017.
- [94] O. F. Sukas, O. K. Kinaci, F. Cakici, ve M. K. Gokce, "Hydrodynamic assessment of planing hulls using overset grids", *Applied Ocean Research*, c. 65, ss. 35-46, Nis. 2017, doi: 10.1016/j.apor.2017.03.015.
- [95] D. Frisk ve L. Tegehall, "Prediction of High-Speed Planing Hull Resistance and Running Attitude.pdf", Yüksek Lisans Tezi, Chalmers Universtiy of Technology, İsveç, 2015.
- [96] S. Pennino, H. Klymenko, A. Scamardella, E. Begovic, ve S. Mancini, *Three - Dimensional Pressure Distribution on Planing Hulls*. CRC Press, 2016.
- [97] S. Pennino, S. Mancini, ve A. Scamardella, "Dynamic equilibrium and resistance evaluation for warped planing hulls", program adı: FAST2017, Nantes, France, 2017.
- [98] C. Wei, Y. Li, X. Liang, ve H. Yi, "Hull forms of small high-speed wave-piercing monohull crafts and hydrodynamics study", *J Hydrodyn*, c. 31, sy 4, ss. 814-826, Ağu. 2019, doi: 10.1007/s42241-018-0173-8.
- [99] S. Duman, B. Sener, ve S. Bal, "Performance Prediction of a Planing Vessel Using Dynamic Overset Grid Method", program adı: High Speed Marine Vehicles, Italy, 2017.
- [100] A. De Marco, S. Mancini, S. Miranda, R. Scognamiglio, ve L. Vitiello, "Experimental and numerical hydrodynamic analysis of a stepped planing hull", *Applied Ocean Research*, c. 64, ss. 135-154, Mar. 2017, doi: 10.1016/j.apor.2017.02.004.
- [101] R. Ponzini, F. Salvatore, E. Begovic, ve C. Bertorello, "Automatic CFD analysis of planing hulls by means of a new web-based application: Usage, experimental data comparison and opportunities", *Ocean Engineering*, c. 210, s. 107387, Ağu. 2020, doi: 10.1016/j.oceaneng.2020.107387.
- [102] H. Ghassemi, M. Kamarlouei, ve S. T. G. Veysi, "A Hydrodynamic Methodology And CFD Analysis For Performance Prediction Of Stepped Planing Hulls",

Polish Maritime Research, c. 22, sy 2, ss. 23-31, Nis. 2015, doi: 10.1515/pomr-2015-0014.

- [103] D. C. Flavio, N. B. Rasul, M. Simone, D. Abbas, ve D. C. Maria, "A Numerical Way for a Stepped Planing Hull Design and Optimization", *Stand Alone*, ss. 220-229, 2018, doi: 10.3233/978-1-61499-870-9-220.
- [104] R. N. Bilandi, A. Dashtimanesh, ve S. Tavakoli, "Hydrodynamic study of heeled double-stepped planing hulls using CFD and 2D+T method", *Ocean Engineering*, c. 196, s. 106813, Oca. 2020, doi: 10.1016/j.oceaneng.2019.106813.
- [105] H. Nourghassemi, H. Ghassemi, ve H. Taghva, "Numerical Hydrodynamic Results of the Two Stepped Planing Hull", *American Journal of Mechanical Engineering*, c. 6, sy 3, ss. 93-97, 2018, doi: 10.12691/ajme-6-3-2.
- [106] P. Ghadimi ve S. Panahi, "Numerical investigation of hydrodynamic forces acting on the non-stepped and double-stepped planing hulls during yawed steady motion", *Proceedings of the IMechE*, c. 233, sy 2, ss. 428-442, May. 2019, doi: 10.1177/1475090217751549.
- [107] P. Lotfi, M. Ashrafizaadeh, ve R. Kowsari Esfahan, "Numerical investigation of a stepped planing hull in calm water", *Ocean Engineering*, c. 94, ss. 103-110, Oca. 2015, doi: 10.1016/j.oceaneng.2014.11.022.
- [108] P. Ghadimi, S. Panahi, ve S. Tavakoli, "Hydrodynamic study of a double-stepped planing craft through numerical simulations", *J Braz. Soc. Mech. Sci. Eng.*, c. 41, sy 1, s. 2, Oca. 2019, doi: 10.1007/s40430-018-1501-1.
- [109] S. T. G. Veysi, M. Bakhtiari, H. Ghassemi, ve M. Ghiasi, "Toward numerical modeling of the stepped and non-stepped planing hull", *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, c. 37, sy 6, ss. 1635-1645, Kas. 2015, doi: 10.1007/s40430-014-0266-4.
- [110] A. Dashtimanesh, A. Esfandiari, ve S. Mancini, "Performance Prediction of Two-Stepped Planing Hulls Using Morphing Mesh Approach", *Journal of Ship Production and Design*, 2017, doi: 10.5957/JSPD.160046.
- [111] R. N. Bilandi, A. Dashtimanesh, ve S. Tavakoli, "Hydrodynamic study of heeled double-stepped planing hulls using CFD and 2D+T method", *Ocean Engineering*, c. 196, s. 106813, Oca. 2020, doi: 10.1016/j.oceaneng.2019.106813.
- [112] A. Dashtimanesh, S. Tavakoli, A. Kohansal, R. Khosravani, ve A. Ghassemzadeh, "Numerical study on a heeled one-stepped boat moving forward in planing regime", *Applied Ocean Research*, c. 96, s. 102057, Mar. 2020, doi: 10.1016/j.apor.2020.102057.
- [113] H. Kazemi ve M. Salari, "Effects of Loading Conditions on Hydrodynamics of a Hard-Chine Planing Vessel Using CFD and a Dynamic Model", *ijmt*, c. 7, ss. 11-18, Mar. 2017, doi: 10.18869/acadpub.ijmt.7.11.

- [114] S. Duman, B. Sener, ve S. Bal, "LCG Effects on Resistance, Lift and Trim Characteristics of R/V Athena Hull", *Intl J Small Craft Tech.*, c. 160, ss. B43-B56, 2018.
- [115] D. Villa, S. Gaggero, ve M. Ferrando, "An OpenSource approach for the prediction of Planing Hull Resistance", program adı: 10th Symposium on High Speed Marine Vehicles, Italya, 2014.
- [116] X.-P. Duan, W.-P. Sun, C. Chen, M. Wei, ve Y. Yang, "Numerical Study of a Hydrodynamic Benchmark Model for Seaplanes Using OpenFOAM", içinde *The Proceedings of the 2018 Asia-Pacific International Symposium on Aerospace Technology (APISAT 2018)*, c. 459, X. Zhang, Ed. Singapore: Springer Singapore, ss. 361-375, 2019.
- [117] M. P. Wheeler, K. I. Matveev, ve T. Xing, "Validation Study of Compact Planing Hulls at Pre-Planing Speeds", program adı: ASME 2018 5th Joint US-European Fluids Engineering Division Summer Meeting, Montreal, Quebec, Canada, Tem. 2018, doi: 10.1115/FEDSM2018-83091.
- [118] E. Kahramanoglu, B. Yildiz, ve H. Yilmaz, "Numerical Calculations of Resistance and Running Attitude of a Planing Hull", *INT-NAM 2018*, ss. 583-594, 2018.
- [119] T. C. Fu vd., "A Comparison of Experimental Measurements and Computational Predictions of a Deep-V Planing Hull", California, 2010.
- [120] S. Brizzolara ve F. Serra, "Accuracy of CFD Codes in the Prediction of Planing Surfaces Hydrodynamic Characteristics", içinde *2nd international conference on marine research and transportation*, ss. 147-158, 2007.
- [121] M. Iacono, "Hydrodynamics of Planing Hull by CFD", Yüksek Lisans Tezi, Napoli Federico II, Italya, 2015.
- [122] R. Khazaei, M. A. Rahmansetayesh, ve S. Hajizadeh, "Hydrodynamic evaluation of a planing hull in calm water using RANS and Savitsky's method", *Ocean Engineering*, c. 187, s. 106221, Eyl. 2019, doi: 10.1016/j.oceaneng.2019.106221.
- [123] P. Casalone, O. Dell'Edera, B. Fenu, G. Giorgi, S. A. Sirigu, ve G. Mattiazzo, "Unsteady RANS CFD Simulations of Sailboat's Hull and Comparison with Full-Scale Test", *JMSE*, c. 8, sy 6, s. 394, May. 2020, doi: 10.3390/jmse8060394.
- [124] R. Azcueta, "Steady and Unsteady RANSE Simulations for Planing Craft", program adı: 7th Conference on Fast Sea Transportation FAST'03, Italy, 2003.
- [125] Y. Masumi ve A. H. Nikseresht, "Comparison of numerical solution and semi-empirical formulas to predict the effects of important design parameters on porpoising region of a planing vessel", *Applied Ocean Research*, c. 68, ss. 228-236, Eki. 2017, doi: 10.1016/j.apor.2017.09.002.
- [126] X. Duan, W. Sun, C. Chen, M. Wei, ve Y. Yang, "Numerical investigation of the porpoising motion of a seaplane planing on water with high speeds",

- Aerospace Science and Technology*, c. 84, ss. 980-994, Oca. 2019, doi: 10.1016/j.ast.2018.11.037.
- [127] S. Özüm, “Hızlı Tekne Form Serileri için Optimizasyona Dayalı Bir Metodoloji Geliştirilmesi”, Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, 2018.
- [128] N. Mehdiyev, “Yüksek Süratli Kayıcfı Bir Teknenin Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği Yöntemiyle Form Optimizasyonu”, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, 2009.
- [129] M. Mansoori ve A. C. Fernandes, “Hydrodynamics of the interceptor on a 2-D flat plate by CFD and experiments”, *J Hydrodyn*, c. 27, sy 6, ss. 919-933, Ara. 2015, doi: 10.1016/S1001-6058(15)60555-8.
- [130] M. Mansoori, A. C. Fernandes, ve H. Ghassemi, “Interceptor design for optimum trim control and minimum resistance of planing boats”, *Applied Ocean Research*, c. 69, ss. 100-115, Ara. 2017, doi: 10.1016/j.apor.2017.10.006.
- [131] J. Suneela, P. Krishnankutty, ve V. Anantha Subramanian, “Numerical investigation on the hydrodynamic performance of high-speed planing hull with transom interceptor”, *Ships and Offshore Structures*, ss. 1-9, Mar. 2020, doi: 10.1080/17445302.2020.1738134.
- [132] R. Yousefi, R. Shafaghat, ve M. Shakeri, “High-speed planing hull drag reduction using tunnels”, *Ocean Engineering*, c. 84, ss. 54-60, Tem. 2014, doi: 10.1016/j.oceaneng.2014.03.033.
- [133] Y. Jiang, H. Sun, J. Zou, A. Hu, ve J. Yang, “Experimental and numerical investigations on hydrodynamic and aerodynamic characteristics of the tunnel of planing trimaran”, *Applied Ocean Research*, c. 63, ss. 1-10, Şub. 2017, doi: 10.1016/j.apor.2016.12.009.
- [134] F. Roshan, A. Dashtimanesh, ve R. N. Bilandi, “Hydrodynamic Characteristics of Tunneled Planing Hulls in Calm Water”, *brod*, c. 71, sy 1, ss. 19-38, Mar. 2020, doi: 10.21278/brod71102.
- [135] K. I. Matveev ve M. Morabito, “Hydrodynamics of planing surfaces with negative deadrise angles”, *Ocean Engineering*, c. 212, s. 107601, Eyl. 2020, doi: 10.1016/j.oceaneng.2020.107601.
- [136] A. G. Avci ve B. Barlas, “An experimental and numerical study of a high speed planing craft with fullscale validation”, *Journal of Marine Science and Technology*, c. 26, sy 5, ss. 617-628, Eki. 2018, doi: 10.6119/JMST.201810_26(5).0001.
- [137] F. Cucinotta, E. Guglielmino, F. Sfravara, ve C. Strasser, “Numerical and experimental investigation of a planing Air Cavity Ship and its air layer evolution”, *Ocean Engineering*, c. 152, ss. 130-144, Mar. 2018, doi: 10.1016/j.oceaneng.2018.01.071.
- [138] F. Cucinotta, E. Guglielmino, ve F. Sfravara, “A critical CAE analysis of the bottom shape of a multi stepped air cavity planing hull”, *Applied Ocean Research*, c. 82, ss. 130-142, Oca. 2019, doi: 10.1016/j.apor.2018.11.003.

- [139] L. Du, Z. Lin, Y. Jiang, P. Li, ve Y. Dong, "Numerical Investigation on the Scale Effect of a Stepped Planing Hull", *JMSE*, c. 7, sy 11, s. 392, Kas. 2019, doi: 10.3390/jmse7110392.
- [140] S. Mancini, "The Problem of the Verification and Validation Processes of CFD Simulations of Planing Hulls", PhD Thesis, Università Degli Studi Di Napoli Federico II, İtalya, 2015.
- [141] C. Böhm, "A Velocity Prediction Procedure for Sailing Yachts with a hydrodynamic Model based on integrated fully coupled RANSE-Free-Surface Simulations", Doktora Tezi, Delft University of Technology, Hollanda, 2014.
- [142] A. Gray-Stephens, T. Tezdogan, ve S. Day, "Strategies to Minimise Numerical Ventilation in CFD Simulations of High-Speed Planing Hulls", içinde *Volume 2: CFD and FSI*, Glasgow, Scotland, UK, Haz. 2019, doi: 10.1115/OMAE2019-95784.
- [143] Y. Masumi ve A. H. Nikseresht, "2DOF numerical investigation of a planing vessel in head sea waves in deep and shallow water conditions", *Applied Ocean Research*, c. 82, ss. 41-51, Oca. 2019, doi: 10.1016/j.apor.2018.10.017.
- [144] T. C. Fu vd., "An Assessment of Computational Fluid Dynamics Predictions of the Hydrodynamics of High-Speed Planing Craft in Calm Water and Waves", Avustralya, 2014.
- [145] S. M. Mousaviraad, Z. Wang, ve F. Stern, "URANS studies of hydrodynamic performance and slamming loads on high-speed planing hulls in calm water and waves for deep and shallow conditions", *Applied Ocean Research*, c. 51, ss. 222-240, Haz. 2015, doi: 10.1016/j.apor.2015.04.007.
- [146] M. Kumar, S. P. Singh, ve V. A. Subramanian, "RANSE Computation of Slamming Loads on a Planing Craft", Lorient, Fransa, 2008.
- [147] C. Judge vd., "Experiments and CFD of a high-speed deep-V planing hull--Part I: Calm water", *Applied Ocean Research*, c. 96, s. 102060, Mar. 2020, doi: 10.1016/j.apor.2020.102060.
- [148] C. Judge vd., "Experiments and CFD of a high-speed deep-V planing hull - part II: Slamming in waves", *Applied Ocean Research*, c. 97, s. 102059, Nis. 2020, doi: 10.1016/j.apor.2020.102059.
- [149] A. Esfandiari, S. Tavakoli, ve A. Dashtimanesh, "Comparison between the Dynamic Behavior of the Non-stepped and Double-stepped Planing Hulls in Rough Water: A Numerical Study", *j ship prod des*, 2019, doi: 10.5957/JSPD.11170053.
- [150] B. Aktas, F. Prini, ve S. Benson, "Full-scale Unsteady RANSE CFD Seakeeping Simulations of a High-Speed Craft", 20th Numerical Towing Tank Symposium, 2017.
- [151] H. Ling ve Z. Wang, "Numerical prediction and analysis of motion response of high", *Journal of Jiangsu University of Science and Technology(Natural Science Edition)*, c. 33, sy 3, 2019.

- [152] S. Wang, Y. Su, X. Zhang, ve J. Yang, "RANSE simulation of high-speed planning craft in regular waves", *J. Marine. Sci. Appl.*, c. 11, sy 4, ss. 447-452, Ara. 2012, doi: 10.1007/s11804-012-1154-x.
- [153] X. Bi, J. Zhuang, ve Y. Su, "Seakeeping Analysis of Planing Craft under Large Wave Height", *Water*, c. 12, sy 4, s. 1020, Nis. 2020, doi: 10.3390/w12041020.
- [154] X. Bi, H. Shen, J. Zhou, ve Y. Su, "Numerical analysis of the influence of fixed hydrofoil installation position on seakeeping of the planing craft", *Applied Ocean Research*, c. 90, s. 101863, Eyl. 2019, doi: 10.1016/j.apor.2019.101863.
- [155] B. Yildiz, E. Kahramanoglu, F. Cakici, ve T. Katayama, "Numerical and Experimental Prediction of Roll Damping for a High-Speed Planing Hull", program adi: High Speed Marine Vehicles, HSMV 2017, Napoli, İtalya, 2017.
- [156] R. Yousefi, R. Shafaghat, ve M. Shakeri, "Hydrodynamic analysis techniques for high-speed planing hulls", *Applied Ocean Research*, c. 42, ss. 105-113, Ağu. 2013, doi: 10.1016/j.apor.2013.05.004.
- [157] ITTC, "Recommended Procedures: Resistance Uncertainty Analysis, Example for Resistance Test". 2002.
- [158] T. Tezdogan, Y. K. Demirel, P. Kellett, M. Khorasanchi, A. Incecik, ve O. Turan, "Full-scale unsteady RANS CFD simulations of ship behaviour and performance in head seas due to slow steaming", *Ocean Engineering*, c. 97, ss. 186-206, Mar. 2015, doi: 10.1016/j.oceaneng.2015.01.011.
- [159] ITTC, "Recommended Procedures and Guidelines - Practical guidelines for Ship CFD Applications", 2011.
- [160] J. A. Benck, J. L. Steger, F. C. Dougherty, ve P. G. Buning, "Chimera. A Grid-Embedding Technique", Arnold Engineering Development Center, AEDC-TR-85-64, 1986.
- [161] L. F. Richardson, "IX. The approximate arithmetical solution by finite differences of physical problems involving differential equations, with an application to the stresses in a masonry dam", *Phil. Trans. R. Soc. Lond. A*, c. 210, sy 459-470, ss. 307-357, Oca. 1911, doi: 10.1098/rsta.1911.0009.
- [162] P. J. Roache, "Verification of Codes and Calculations", *AIAA Journal*, c. 36, sy 5, ss. 696-702, 1998, doi: 10.2514/2.457.
- [163] I. Çelik, U. Ghia, P. Roache, C. J. Fretias, H. Coleman, ve P. E. Raad, "Procedure for Estimation and Reporting of Uncertainty Due to Discretization in CFD Applications", *J. Fluids Eng*, c. 130, sy 7, ss. 078001-078001-4, Tem. 2008, doi: 10.1115/1.2960953.
- [164] F. Stern, R. Wilson, ve J. Shao, "Quantitative V&V of CFD simulations and certification of CFD codes", *Int. J. Numer. Meth. Fluids*, c. 50, sy 11, ss. 1335-1355, Nis. 2006, doi: 10.1002/fld.1090.
- [165] F. Stern, R. V. Wilson, H. W. Coleman, ve E. G. Paterson, "Comprehensive Approach to Verification and Validation of CFD Simulations—Part 1: Methodology and Procedures", *J. Fluids Eng*, c. 123, sy 4, ss. 793-802, Tem. 2001, doi: 10.1115/1.1412235.

- [166] F. Cakici, E. Kahramanoglu, S. Duman, ve A. D. Alkan, "A new URANS based approach on the prediction of vertical motions of a surface combatant in head waves", *Ocean Engineering*, c. 162, ss. 21-33, Ağu. 2018, doi: 10.1016/j.oceaneng.2018.05.020.
- [167] F. Cakici, E. Kahramanoglu, ve A. D. Alkan, "Numerical Prediction of Vertical Ship Motions and Added Resistance", *International Journal of Maritime Engineering*, c. 159, sy A4, ss. 393-492, 2017, doi: 10.3940/rina.ijme.2017.a4.450.
- [168] J. D. Fenton, "A Fifth-Order Stokes Theory for Steady Waves", *Journal of Waterway, Port, Coastal, Ocean Engineering*, c. 111, sy 2, ss. 216-234, 1985.
- [169] B. Yildiz, "Yalpa Sönümünün Gemi Kesiti için Deneysel ve Sayısal Olarak İncelenmesi", Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, 2016.
- [170] CD Adapco, "User guide STAR-CCM Version 9.0.2". 2014.
- [171] Y. Jiang, "Computational Modeling in Three Dimensions of Multi-DOF Ship Motion in a Viscous Fluid", Doktora Tezi, University of California, ABD, 2014.

AMPIRİK YÖNTEM KODU

%% Inputs

```
B      = 0.424           ; % m
Dep    = 319.697         ; % N
Beta   = 16.7            ; % deg
LCG    = 0.697           ; % m
V      = 8               ; % m/s
ro     = 1000             ; % kg/m^3
g      = 9.81            ; % m/s^2
Kinvis = 1.356*10^-6     ; % m/s^2
```

%% iteratif CL_0

```
CL_beta = Dep/(0.5*ro*B^2*V^2) ;
CL_0(1) = 1                    ;
```

for i=1:1000

```
    CL_0(i+1)=CL_beta+0.0065*Beta*(CL_0(i)^0.6);
```

```
    if abs(CL_0(i+1)-CL_0(i)) < 1E-16
        break
    end
end
```

```
CL_0=CL_0(end);
```

%% iteratif lamda

```
Cv=V/((g*B)^0.5);
```

```
lamda(1)=3;
```

for j=1:100

```
    lamda(j+1)=(LCG/B)/(0.75-(1/(5.236*Cv^2/lamda(j)^2+2.4)));
```

```
    if abs(lamda(j+1)-lamda(j)) < 1E-16
```

```
        break
```

```

    end
end

lamda=lamda(end);

%% Tao Hesabı

tao = (CL_0 / (0.012*lamda^0.5+0.0055*(lamda^2.5/Cv^2)))^(1/1.1) ;

%% Direnç Hesabı

Vb=V*[1-0.012*tao^1.1*lamda^-0.5*cos(tao*pi/180)^-1*(1-0.0065*Beta*CL_0^-0.4)*cos(Beta*pi/180)]^0.5;

Rp=Dep*tan(tao*pi/180);

Rn=Vb*lamda*B*Kinvis^-1;

cf=0.075/((log10(Rn)-2)^2);

Rf=0.5*ro*Vb^2*lamda*B^2*(cos(Beta*pi/180)*cos(tao*pi/180))^-1*cf;

alfa=atan(pi/2*tan(tao*pi/180)/tan(Beta*pi/180));
Lws=0.5*0.5*B/(sin(1.5*alfa)*cos(Beta*pi/180));
Rnws=V*Lws/1.0035*(10^6);
if Rnws<1.5*10^6
    Cf=1.328/sqrt(Rnws);
else
    Cf=0.074/(Rnws^0.2)-4800/Rnws;
end
theta=1.5*alfa/cos(Beta*pi/180);

RS=0.5*1000*V^2*B^2*cos(theta)*Cf*cos(tao*pi/180)/(4*sin(1.5*alfa)*cos(Beta*pi/180));

RTOPLAM=(Rf+Rp+RS);
RT =RTOPLAM/Dep;

tao
RTOPLAM

%% SON

```

TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR

İletişim Bilgisi: emrekahramanoglu@gmail.com

Makaleler

1. E. Kahramanoğlu, B. Yıldız, F. Çakıcı, ve H. Yılmaz, “Numerical roll damping prediction of a planing hull”, *Ships and Offshore Structures*, 2020.