T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

GEMİ HAREKETLERİNİN FARKLI SAYISAL YÖNTEMLERLE İNCELENMESİ VE OPTİMAL KONTROL TASARIMI İLE SÖNÜMLENMESİ

FERDİ ÇAKICI

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

DANIŞMAN
PROF. DR. AHMET DURSUN ALKAN

İSTANBUL, 2019

T.C.

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

GEMİ HAREKETLERİNİN FARKLI SAYISAL YÖNTEMLERLE İNCELENMESİ VE OPTİMAL KONTROL TASARIMI İLE SÖNÜMLENMESİ

Ferdi ÇAKICI tarafından hazırlanan tez çalışması 20.02.2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Gemi İnşaatı ve Gemi Makineleri Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı

Prof. Dr. Ahmet Dursun ALKAN

Yıldız Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri

Prof. Dr. Ahmet Dursun ALKAN

Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Prof. Dr. Kadir SARIÖZ

İstanbul Teknik Üniversitesi _____

Prof. Dr. Fahri ÇELİK

Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Prof. Dr. Fuat ALARÇİN

Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Doç. Dr. Ömer Kemal KINACI

İstanbul Teknik Üniversitesi _____

Bu çalışma, Yıldız Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü'nün 2015-10-01-KAP01 numaralı projesi, ASELSAN A.Ş yurt içi doktora bursu ve TÜBİTAK yurtdışı doktora sırası araştırma bursu ile desteklenmiştir.

ÖNSÖZ

Bu doktora tez çalışmasında değerli bilgi, tecrübe ve yardımlarını paylaşan tez danışmanım Prof. Dr. Ahmet Dursun ALKAN ve sürecin başından beri tez izleme komitelerinde fikir alışverişinde bulunduğumuz hocalarım Prof. Dr. Kadir SARIÖZ ve Prof. Dr. Fahri ÇELİK, oda arkadaşım Ar. Gör. Savaş SEZEN ve Ar. Gör. Süleyman DUMAN'a çok teşekkür ederim.

Bu zorlu süreçte her zaman yardım aldığım ve doktora tezimin kalitesinin artmasında büyük faydaları olan arkadaşım Ar. Gör. Emre KAHRAMANOĞLU'na teşekkürlerimi sunarım. Doktora tez sürecimin ortalarında tanıştığım ve bana sağladığı vizyon ile kendisine şükran borcu duyduğum değerli hocam Doç. Dr. Hakan YAZICI'ya sonsuz teşekkür ederim. Akademik hayatım boyunca bana hem ağabeylik hem de arkadaşlık yapan Doç. Dr. Ömer Kemal KINACI, Dr. Öğr. Üyesi Ali DOĞRUL ve Dr. Öğr. Üyesi Yavuz Hakan ÖZDEMİR'e teşekkür ederim.
Konuk araştırmacı olarak görev aldığım Napoli Federico Secondo Üniversitesi'nde beraber çalışma fırsatı bulduğum Prof. Ermina BEGOVIC, Dr. Maria ACANFORA ve Barbara RINAURO'ya teşekkürlerimi sunarım.
Yapmış oldukları her türlü destekten dolayı ASELSAN A.Ş, TÜBİTAK ve Türk Loydu Vakfına teşekkür ederim.

Son olarak, tez çalışmam boyunca yanımda olan aileme ve özellikle eşim Hilal ve kızım Ravza'ya sevgilerimi sunarım.

Şubat, 2019

Ferdi ÇAKICI

İÇİNDEKİLER

Sayfa

SİMGE LİSTESİ vii

KISALTMA LİSTESİ ix

ŞEKİL LİSTESİ x

ÇİZELGE LİSTESİ xii

ÖZET xiii

ABSTRACT xv

BÖLÜM 1

GİRİŞ 1

1.1 Literatür Özeti 4
1.2 Tezin Amacı 10
1.3 Hipotez 10

BÖLÜM 2

GEMİ DÜŞEY HAREKETLERİNİN FARKLI MATEMATİKSEL YÖNTEMLERLE İNCELENMESİ 12

2.1 Potansiyel Teori (Dilim Teorisi) 14
2.2 Tamamen Doğrusal Olmayan URANS Modellemesi (URANS Yöntemi) 19
2.2.1 URANS Denklemleri ve Modelleme 19
2.2.2 Hesaplama Hacmi ve Sınır Koşulları 21
2.2.3 Ağ Yapısı 23
2.2.4 Zaman Adımı Seçimi 26
2.2.5 Fourier Serisi Formülasyonu 27
2.2.6 HAD Gerçekleme Çalışmaları 29
2.3 Kısmen Doğrusal Olmayan URANS Modellemesi (URANS-Katsayı) 31
2.3.1 URANS Denklemleri ve Modelleme 31
2.3.2 Hesaplama Hacmi ve Sınır Koşulları 31
2.3.3 Ağ Yapısı 34
2.3.4 Zaman Adımı Seçimi 36

2.3.5 Radyasyon ve Bozucu Terimlerin Hesaplanması 36
2.3.6 Fourier Serisi Formülasyonu 37
2.3.7 HAD Gerçekleme Çalışmaları 38
2.4 Yorumlar ve Tartışma 39

BÖLÜM 3

GEMİ DÜŞEY HAREKETLERİNİN OPTİMAL KONTROLÖR İLE AZALTILMASI 48

3.1 Matematiksel Model 50
3.1.1 Gemi Modeli 50
3.1.2 Karışık Denizde Düşey Gemi Hareketleri 51
3.1.3 Deniz Tutması Modeli 59
3.1.4 Kontrol Tabanlı Matematiksel Model 60
3.2 Statik Çıkış Geri Beslemeli Kontrolör Tasarımı 63
3.3 Durum Geri Beslemeli Kontrolör Tasarımı 67
3.4 Sayısal Benzetim Çalışmaları 68

BÖLÜM 4

SONUÇ VE ÖNERİLER 76

KAYNAKLAR 83

EK-A

WIGLEY TEKNESİNE UYGULANAN DOĞRULAMA VE DOĞRULAMA ÇALIŞMASININ ÖZETİ 89

EK-B

CUMMINS DENKLEMLERİ İLE 1 DOF DALIP-ÇIKMA HAREKETİ BENZETİM ÇALIŞMASI 90

B-1 Düzenli Dalgalarda Benzetim Çalışması 90
B-2 Karışık Dalgalarda Benzetim Çalışması 92

ÖZGEÇMİŞ 95

SİMGE LİSTESİ

A	Dalga genliği
A_{ij}^{∞}	Sonsuz frekansa ait ek kütle
a_v	Düşey mutlak ivme ortalama değeri
$B_{ij}(V)$	İleri hız sönüm katsayısı
B_{WL}	Su hattı genişliği
C_F	Sürtünme direnci katsayısı
C_{ij}	Doğrultma katsayısı
$C_{Lbaş}$	Baş foil kaldırma katsayısı
$C_{Lkıç}$	Kıç foil kaldırma katsayısı
C_R	Artık direnç katsayısı
C_T	Toplam direnç katsayısı
F_3	Dalıp-çıkma kuvveti
F_5	Baş-kıç vurma momenti
Fn	Froude sayısı
g	Yerçekimi ivmesi
I_5	Baş-kıç vurma atalet momenti
Hs	Karakteristik dalga yüksekliği
k	Dalga sayısı
K_{ij}	Anlık darbe veya gecikme fonksiyonu
L_{CB}	Hacim merkezinin boyuna yeri
L_{CG}	Ağırlık merkezinin boyuna yeri
L_{WL}	Su hattı boyu
M	Kütle
ma_b	Baş foil moment kolu
ma_k	Kıç foil moment kolu
N	Segment sayısı; Eleman sayısı; Zaman adımı sayısı
P	Toplam basınç
r	İyileştirme faktörü
R	Yakınsama katsayısı
Re	Reynolds sayısı
R_F	Sürtünme direnci
R_T	Toplam direnç
R_R	Artık direnç
$S_{baş}$	Baş foil planform alanı

$S_{kıç}$	Kıç foil planform alanı
$S(\omega_e)$	Cevap spektrumu
$S_\zeta(\omega)$	Dalga enerji spektrumu
$S_\zeta(\omega_e)$	Karşılaşma frekansı enerji spektrumu
t	zaman
T	Su çekimi
T_E	Karşılaşma periyodu
T_m	Modal periyot
u'	Sürtünme hızı
$U_{baş}$	Baş foil kontrol kuvveti
$U_{kıç}$	Kıç foil kontrol kuvveti
V	Gemi hızı
V_{CG}	Ağırlık merkezinin yüksekliği
y^+	Duvar civarındaki ağ sıklığını belirten boyutsuz parametre
ω	Dalga frekansı; Açısal hız; Çevrinti vektörü
ω_e	Dalgalarla karşılaşma frekansı
μ	Dalgalarla karşılaşma açısı; Dinamik viskozite
ν	Kinematik viskozite
λ	Dalga boyu
λ_M	Model ölçeği
$\bar{M}$	Atalet matrisi
ϕ	Hız potansiyeli
ϕ_d	Gelen dalganın hız potansiyeli
φ	Akım fonksiyonu
ψ	Kompleks hız potansiyeli
ε	İki skaler arasındaki fark
ρ	Akışkan yoğunluğu
Δω	Karşılaşma frekansı aralığı
Δt	Zaman adımı
Δx	Duvara en yakın hücrenin boyutu
x_3	Dalıp-çıkma hareketi
x_5	Baş-kıç vurma hareketi
$\alpha_{baş}$	Baş foil gerçek hücum açısı
$\alpha_{kıç}$	Kıç foil gerçek hücum açısı
$\beta_{baş}$	Baş foil açısı
$\beta_{kıç}$	Kıç foil açısı
ζ(x,t)	Anlık serbest su yüzeyi yükselmesi
ω_z	İvme spektrumu sıfır geçme frekansı

KISALTMA LİSTESİ

AR	Görünüm Oranı
CFL	Courant-Friedrichs-Lewy
CoG	Ağırlık Merkezi Konumu
CPU	Merkezi İşlem Ünitesi
DD	Deniz Durumu
DFBI	Dinamik Sıvı Cisim Etkileşimi
DME	Doğrusal Matris Eşitsizliği
DTMB	David Taylor Model Basin
Erf	Hata Fonksiyonu
FS	Fourier Serisi
GCI	Ağ yakınsama İndeksi
HAD	Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği
IIHR	Hydroscience & Engineering the University of IOWA
ISO	Uluslararası Standartlar Örgütü
ITTC	Uluslararası Çekme Tankı Konferansı
MSI	Deniz Tutması Olayı
ODE45	Adi Diferansiyel Denklem Çözümleyici
PD	Oransal Türevsel Kontrol
PID	Oransal İntegral Türevsel Kontrol
RANS	Reynolds Ortalamalı Navier- Stokes
RMS	Kareköklerinin Ortalaması
SHY	Sonlu Hacimler Yöntemi
TF	Transfer Fonksiyonu
URANS	Zamana Bağlı Reynolds Ortalamalı Navier- Stokes
VOF	Volume of Fluid

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2. 1 DTMB 5512 modelinin gösterimi 13
Şekil 2. 2 Fiziksel şema 14
Şekil 2. 3 Senaryo 6 için üretilen düzenli dalga gösterimi 21
Şekil 2. 4 Sınır koşulları 22
Şekil 2. 5 Hesaplamalı akışkan hacminin boyutları 23
Şekil 2. 6 Overset ve arka plan blokları 24
Şekil 2. 7 Serbest su yüzeyi ağ yapısı 25
Şekil 2. 8 Profil görünüş ağ yapısı 25
Şekil 2. 9 Orta kesit ağ yapısı 26
Şekil 2. 10 CFL sayısının hesaplandığı akış bölgesi 27
Şekil 2. 11 Kare hesaplama hacmi için sınır koşulları 32
Şekil 2. 12 Dikdörtgen hesaplama hacmi için sınır koşulları 33
Şekil 2. 13 Tekne etrafındaki ağ yapısı 35
Şekil 2. 14 x/L=0.60 En kesitindeki ağ yapısı 35
Şekil 2. 15 Kelvin dalga sistemi ile uyumlu ağ yapısı 35
Şekil 2. 16 Kelvin dalga sistemi (Fn=0.41) 41
Şekil 2. 17 Kelvin dalga sistemi Fn=0.41 (sol, t=8.3601 s, $9T_E$) ve zorlanmış dalıp-çıkma hareketi Fn= 0 (sağ, t=8.3601 s, $9T_E$) 42
Şekil 2. 18 Zorlanmış dalıp-çıkma hareketi Fn=0.41 (t=8.3601 s, $9T_E$) 42
Şekil 2. 19 Ek kütle karşılaştırması (A_{33}, A_{55}) 43
Şekil 2. 20 Sönüm karşılaştırması (B_{33}, B_{55}) 44
Şekil 2. 21 Ek kütle karşılaştırması (A_{35}, A_{53}). 44
Şekil 2. 22 Sönüm karşılaştırması (B_{35}, B_{53}) 45
Şekil 2. 23 Zaman düzleminde 6. Senaryo için URANS-Katsayı (sol) ve Dilim teorisi (sağ) Sonuçları 46
Şekil 2. 24 Faz açıları ile birlikte bozucu terimlerin karşılaştırılması 46
Şekil 3. 1 Fiziksel modelin tanıtılması 50
Şekil 3. 2 Yolcu ve eyleyici lokasyon bilgileri 51
Şekil 3. 3 Ek kütle- ω_e grafikleri. 53
Şekil 3. 4 Sönüm- ω_e grafikleri 53
Şekil 3. 5 Elde edilen anlık darbe fonksiyonları 54
Şekil 3. 6 Karşılaşma dalga spektrumu ve dalıp-çıkma kuvveti/baş-kıç vurma momenti TF 57
Şekil 3. 7 Dalıp-çıkma kuvveti ve baş-kıç vurma momenti cevap fonksiyonları 57

Şekil 3. 8 Dalıp-çıkma kuvveti ve baş-kıç vurma momenti zaman düzlemi cevapları .. 58
Şekil 3. 9 Dalıp-çıkma ve baş-kıç vurma karışık deniz cevapları(HS=1m.) 59
Şekil 3. 10 Farklı maruz kalınan süreler için MSI %10 limit eğrisi 60
Şekil 3. 11 Foillerin yerleşimi 62
Şekil 3. 12 Gemi baş-kıç vurma hareketi kontrollü ve kontrolsüz cevapları 70
Şekil 3. 13 Gemi baş düşey ivme kontrollü ve kontrolsüz cevapları 71
Şekil 3. 14 Gemi kıç düşey ivme kontrollü ve kontrolsüz cevapları 71
Şekil 3. 15 Gemi orta düşey ivme kontrollü ve kontrolsüz cevapları 72
Şekil 3. 16 Gemi baş ve kıç eyleyici kuvvetleri 72
Şekil 3. 17 Baş ve kıç foil hücum açıları 74
Şekil 3. 18 Baş ve kıç foil dönme hızları 75
Şekil 4. 1 Dalıp-çıkma TF 77
Şekil 4. 2 Baş-kıç vurma TF 78
Şekil 4. 3 6.Senaryo için baş-kıç vurma hareketi (URANS) ve baş-kıç vurma radyasyon momenti (URANS-Katsayı) zaman cevabı 79
Şekil B. 1 Silindir geometrisi 90
Şekil B. 2 ω=0.4 rad/s için dalıp-çıkma hareketi zaman cevabı 92
Şekil B. 3 ω=0.454 rad/s için dalıp-çıkma hareketi zaman cevabı 92
Şekil B. 4 ω=0.557 rad/s için dalıp-çıkma hareketi zaman cevabı 92
Şekil B. 5 Dalıp-çıkma kuvveti zaman düzlemi cevabı (Hs=5 m, RMS: 6442 kN) 93
Şekil B. 6 Dalıp-çıkma hareketi zaman düzlemi cevabı (Hs=5 m) 93
Şekil B. 7 K33-zaman grafiği 93
Şekil B. 8 B33- frekans grafiği 94
Şekil B. 9 A33- frekans grafiği 94

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2. 1 DTMB 5512 temel özellikleri 13
Çizelge 2. 2 DTMB 5512 için tanımlanan senaryolar 14
Çizelge 2. 3 Sayısal modelleme özellikleri 21
Çizelge 2. 4 Ağ sayıları 25
Çizelge 2. 5 Dalıp-çıkma hareketi için belirsizlik analizi sonuçları 30
Çizelge 2. 6 Hesaplama hacmi (Kare) 33
Çizelge 2. 7 Hesaplama hacmi (Dikdörtgen) 34
Çizelge 2. 8 Çalışmada kullanılan ağ sayıları 34
Çizelge 2. 9 Geri getirici terimler 37
Çizelge 2. 10 Toplam radyasyon kuvveti için sayısal belirsizlik (Senaryo 6) 39
Çizelge 2. 11 Deneysel ve Sayısal Hesaplanan C_T değerleri 40
Çizelge 2. 12 Pozitif ve negatif dalga tepeleri (Fn=0 ve Fn=0.41 için) 43
Çizelge 2. 13 URANS Katsayı yöntemi ile elde edilen katsayılar 47
Çizelge 3. 1 Dalga spektrumu karakteristikleri 56
Çizelge 3. 2 Hesaplanan Rms kontrolsüz cevaplar 59
Çizelge 3. 3 Foil parametreleri 63
Çizelge 3. 4 Statik çıkış geri beslemeli ve durum geri beslemeli kontroller için baş-kıç vurma ve dalıp-çıkma hareketi rms cevapları 73
Çizelge 3. 5 Statik çıkış geri beslemeli ve durum geri beslemeli kontroller için düşey ivme rms cevapları 73
Çizelge 3. 6 Statik çıkış geri beslemeli ve durum geri beslemeli kontroller için kontrol kuvveti rms cevapları 74
Çizelge 4. 1 Farklı metotlar için TF karşılaştırması 77
Çizelge 4. 2 CPU süreleri karşılaştırmaları 79
Çizelge 4. 3 Dalıp-çıkma, baş-kıç vurma ve gemi düşey ivme hareketlerindeki azalma oranları 80
Çizelge 4. 4 MSI değerleri 81
Çizelge B. 1 Benzetim çalışması parametreleri 91

ÖZET

GEMİ HAREKETLERİNİN FARKLI SAYISAL YÖNTEMLERLE İNCELENMESİ VE OPTİMAL KONTROL TASARIMI İLE SÖNÜMLENMESİ

Ferdi ÇAKICI

Gemi İnşaatı ve Gemi Makineleri Mühendisliği Anabilim Dalı

Doktora Tezi

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Ahmet Dursun ALKAN

Bu doktora tez çalışması temel olarak iki kısımdan oluşmaktadır. Tezin ilk kısmı DTMB 5512 modelinin baştan gelen düzenli dalgalarda düşey hareketlerinin (dalıp-çıkma ve baş-kıç vurma hareketi) üç farklı matematiksel yöntem ile hesaplanmasını ve deneysel veri ile karşılaştırılmasını içermektedir. Bu kapsamda ele alınan yöntemlerin ilki potansiyel teori tabanlı dilim teorisidir ve yönetici denklemler Laplace ve Bernoulli denklemleridir. Bu teoride her bir gemi enine kesitine etki eden radyasyon, Froude Krylov ve difraksiyon kuvvetleri akışın potansiyel olduğu kabulü ile hesaplanır. Ek kütle, sönüm ve difraksiyon terimleri serbest su yüzeyinde değişik frekanslarda zorlamalı harmonik salınım yapan bir gemi enine kesitine ait hız potansiyellerinin kullanılması ile hesaplanır. Bu çalışmada ilgili katsayılar Frank Close Fit yöntemi kullanılarak hesaplanmıştır. Froude Krylov terimleri ise kullanılan hız potansiyelinin analitik çözümü mevcut olduğundan doğrudan elde edilmiştir. Dilim teorisi ile DTMB 5512 geometrisi için katsayılar hesaplanmış ve iki serbestlik dereceli doğrusal birleşik düşey hareket denklemlerinin çözümü ile frekans düzleminde düşey hareket transfer fonksiyonları elde edilmiştir. Bu çalışmada ele alınan ikinci yöntem viskoz temelli çözücü olup bu yöntemde URANS yönetici denklemlerinin integral formlarının sonlu hacimler sayısal yöntemiyle ayrıklaştırılarak çözülmesi ile gemi etrafındaki hız-basınç alanları anlık olarak hesaplanır. Ele alınan gemi düşey hareketi problemine viskozite, rotasyonellik ve diğer üç boyutlu etkiler dâhil edilmektedir ve bu sebeple bu teori tamamıyla doğrusal olmayan bir temele sahiptir. Bu yöntemde belirlenen düzenli dalgalar sayısal bir dalga üreteci ile gemiye belirli bir karşılaşma açısında gönderilmiştir. Gemi yüzeyinde anlık

hesaplanan kuvvet/momentler yardımı ve DFBI hareket denklemlerinin çözümü ile yer değiştirmeler hesaplanmıştır. Zamana bağlı olarak elde edilen yer değiştirmeler Fourier katsayılarını kullanarak birinci harmoniğinin hesaplanması ile frekans düzleminde ifade edilerek transfer fonksiyonları bulunmuştur. Bu tez çalışmasında ele alınan son yöntem ise, URANS-Katsayı adı verilen hibrit çözüm yöntemidir. Bu yöntemde ise, iki serbestlik dereceli doğrusal düşey hareket denklemlerindeki dalga bozucu ve radyasyon terimleri, ikinci yöntemde olduğu gibi URANS çözücüsü kullanılarak elde edilir. Bu yöntemin, ikinci yöntemden farkı, birinci yöntemde olduğu gibi gemiye etkiyen kuvvetlerin süperpoze edilerek doğrusallaştırılmasıdır. Öncelikle, düzenli dalgalarda, gemi dalıp-çıkma ve baş-kıç vurma hareketlerine sabitlenirken, zorlayıcı kuvvet/moment ve ilgili faz açısı hesaplanmıştır. Daha sonra gemi, belirli bir frekansta dalıp-çıkma ve baş-kıç vurma yönlerinde salınım yapmaya zorlanmış ve radyasyon katsayıları elde edilmiştir. Her bir frekans için bozucu ve radyasyon terimleri hesaplandıktan sonra, düşey hareket denklemleri zaman düzleminde çözülmüş ve sürekli rejim hali kullanılarak hareket transfer fonksiyonları elde edilmiştir.

Çalışmanın ikinci kısmında ise bir motoryat formunun düşey hareketlerini azaltmak amacı ile optimal kontrol tasarımına yer verilmiştir. Mevcut doktora tez çalışmasında, seçilen motoryat formunun H_S=1 metre karakteristik dalga yüksekliğine sahip deniz şartlarında, geminin baş, orta ve kıç bölgelerindeki yolcular dikkate alınarak bir benzetim çalışması yapılmıştır. Fn=0.25'te baştan gelen karışık denizde gemi hareketleri incelenmiş ve hesaplanan deniz tutması indeks değerlerinin düşürülmesini sağlayacak aktif bir kontrolör tasarımı gerçekleştirilmiştir. İlk olarak, dilim teorisi, doğrusal süperpoziyon tekniği ve çokça kullanılan bir gerçekleştirme tekniği ile gemiyi dalıp-çıkma ve baş-kıç vurma hareketlerine zorlayacak dalga kuvveti ve dalga momenti zaman düzleminde elde edilmiştir. Dalıp-çıkma ve baş-kıç vurma hareketlerinin birleşik olarak düşünüldüğü ve konvolusyon integrallerinin direkt çözümü ile iki serbestlik dereceli doğrusal bir matematiksel model kullanılarak, geminin kontrolsüz durumdaki hareketleri ve ivmeleri elde edilmiştir. Daha sonra, geminin tüm durum değişkenlerinin operasyon anında ölçülmesi pratikte uygun olmadığından, kolayca ölçüm alınabilen durum değişkenlerinin kullanıldığı doğrusal matris eşitsizlikleri (DME) tabanlı statik çıkış geri beslemeli kontrolör, bozucu dalga etkisinde modellenen motoryat formunun düşey ivmelerinin azaltılması için tasarlanmıştır. Çalışmanın sonunda ise, önerilen kontrol yaklaşımının etkinliğinin gösterilmesi için durum geri beslemeli kontrolör ve statik çıkış geri beslemeli kontrolör tasarımları ile elde edilen sonuçlar nümerik benzetim çalışmaları ile sunulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Gemi düşey hareketleri, URANS, dilim teorisi, statik çıkış geri beslemesi, optimal kontrol

ABSTRACT

INVESTIGATION OF SHIP MOTIONS BY DIFFERENT NUMERICAL METHODS AND REDUCING BY OPTIMAL CONTROL DESIGN

Ferdi ÇAKICI

Department of Naval Architecture and Marine Engineering

PhD Thesis

Adviser: Prof. Dr. Ahmet Dursun ALKAN

This thesis consists of two parts. The first part of the thesis includes calculation of the vertical ship motions by three different employed mathematical methods and comparing them with experimental data. The first method discussed in this thesis is the potential theory-based strip theory and the governing equations are Laplace and Bernoulli equations. In this theory, radiation, Froude Krylov, and diffraction forces acting on the ship wetted surface are calculated by assuming that the flow is potential. Added mass, damping and diffraction terms are calculated by using the velocity potentials of an oscillated ship transverse section on the free surface. In this study, related coefficients were calculated by using the Frank Close Fit method. For Froude Krylov terms, the analytical solution of the velocity potential is used directly. The coefficients are calculated for the 3D ship geometry by using strip theory and then vertical motion transfer functions are obtained in the frequency domain. In the second method, the velocity-pressure fields around the ship are calculated by solving the integral forms of the URANS governing equations by the finite volume method. The viscosity, rotationality, and other 3-D effects are included in the problem of vertical ship motion and hence this method has a completely nonlinear basis. In this method, so-called URANS, the regular incoming waves are generated and sent to the ship with a certain angle of encounter and then the displacements are calculated by the help of instantaneous calculated force/moments acting on the ship surface. Each time step size, the new position of the ship is determined with the solution of dynamic fluid body interaction (DFBI) equations. The displacements in the time domain are converted in

the frequency domain using Fourier Coefficients. The last method discussed in this study is the hybrid method so-called URANS Coeff. (in this thesis). In this method, the excitation and radiation terms in the 2DOF linear motion equations of the vertical motions are obtained by using URANS solver. The difference from the second method is the consideration of the superposition principle of the forces acting on the ship as in the first method. Firstly, in regular waves, the ship is fixed to the pitch and heave motions, while the force/moment and the related phase angle are calculated. Then, the ship is forced to oscillate at a certain frequency, then radiation coefficients of pitch and heave motions are obtained. After calculating excitation and radiation terms, 2DOF linear motion of equations are solved in the time domain and motion transfer functions are deduced.

In the second part of the thesis, the optimal control design is designed to reduce the vertical accelerations of the motor yacht form. Reducing the vertical acceleration of ships by using the control algorithm is a top topic issue in the maritime agenda. In this thesis, a simulation study is carried out by taking into consideration the passengers in several locations of the selected motor yacht in an intermediate sea state with Hs=1 meter. Irregular head wave scenario at Fn = 0.25 is investigated and controller design is implemented to ensure that the calculated RMS vertical acceleration values are decreased to tolerated levels in terms of motion sickness index. First, wave loads are obtained in the time domain by using strip theory, linear superposition technique, and the most common realization technique. Then, using a linear two-degree-of-freedom mathematical model, in which pitch and heave motions are considered together with the direct solution of convolution integrals, the uncontrolled motions and accelerations are obtained. Then, the linear matrix inequalities based on a static output feedback controller are designed to mitigate the vertical acceleration of the ship. Finally, the results obtained with the static output feedback control design are presented in numerical simulation studies to demonstrate the effectiveness of the proposed control approach.

Keywords: Vertical ship motions, URANS, strip theory, static output feedback, optimal control

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Mevcut doktora tezi çalışması iki temel problemin çözümüne odaklanmıştır. İlki, farklı matematiksel alt yapıya sahip yaklaşımlar ile gemi düşey hareketlerinin frekans düzleminde hesaplanması, ikincisi ise karışık deniz ortamında gemi düşey ivmelerinin azaltılması için kontrolör tasarlanmasıdır. Farklı matematiksel yaklaşımlarla bir savaş gemisi formunun düşey hareketleri transfer fonksiyonları yardımı ile elde edilmiştir. Bir motoryat formu kullanılarak gerçekleştirilen kontrolör tasarımı ve gerçekleştirmesi ise Cummins denklemlerinin çözümlenmesi ve zaman düzleminde kontrolör tasarlanması ile gerçekleştirilmiştir.

Bir geminin dalgalar içerisindeki hareketlerinin hesaplanması gemi hidrodinamiği alanının en ilgi çekici ve zorlayıcı konularından biridir. Bunun temel sebebi genellikle sakin suda icra edilen direnç ve manevra hesaplamalarının aksine denizcilik hesaplamalarının dalgalı denizde yapılmasıdır. Hesaplamaların yüksek oranda doğrusal olmayan etkiler barındırması denizcilik çalışma alanını daha da zorlu kılmaktadır. Doğrusal olmayan etkilerin temel sebebi viskozite, gemiye etki eden basıncın hesaplanmasında ortaya çıkan ikinci mertebe hız türevleri ve geminin doğrusal olmayan geometrisidir. Buna ek olarak, gemiye gelen dalgaların yerçekimi sebebi ile yayvan olması, dalgaları modellerken sinüzoidal dalga formunun kullanılmasının bazı durumlarda yetersiz olabileceğini gösterir. Gemi sabit hızda ilerlerken oluşturacağı dalga sisteminin, dalgalar içerisindeki geminin hareketlerine olan etkisi yine hesaplamaları zorlaştırır. Bu doğrusal olmayan hadiseleri ihmal ederek gemi düşey hareketleri problemine çözüm arayan doğrusal teori (bu çalışmada dilim teorisi) narin gemi formları için orta hızlara kadar kavram dizayn aşamasında kullanılabilir. Bir başka

husus ise deplasman tipi bir geminin denizcilik hesaplamalarının deneysel yolla elde edilmesi yine aynı geminin direnç deneylerine kıyasla oldukça zordur. Bunun başlıca sebebi ölçülen kuvvet/momentlerin zamana bağlı değişmesi ve gemi hareketli olduğu için bu ölçümlerin gemi üzerinden alınmasının zor olmasıdır. Diğer temel zorluklar ise aşağıda sıralanmıştır:

- Dalga üreticisinden gönderilen dalganın genliği gemiye ulaşana kadar değişebilir ve gemiye ulaşan dalganın genliğini ölçmek zordur.
- Model gemide jirasyon yarıçapının doğru elde edilmesi genellikle zordur.

Yukarıda belirtilen sebeplerden dolayı hareket deneylerine yardımcı veya alternatif olarak sayısal analiz yöntemleri geliştirilmiştir. Bir başka ifade ile model hareket deneyleri doğrulama amaçlı kullanılmaktadır [1].

1970'li yılların sonuna kadar gemi hareketlerinin incelenmesi doğrusal teorilerle kısıtlı kalmıştır (En çok bilineni ve kullanılanı dilim teorisidir). Bunun temel sebebi o yıllarda bilgisayar teknolojilerinin yeterince gelişmemiş olmamasıdır. Buna rağmen, gemi hareketlerinin hesaplanmasında dilim teorisi yaklaşımı hala geçerliliğini yitirmemiş olup; gemi düşey hareketlerinin hesaplanmasında özellikle kavram dizayn aşamasında çok makul sonuçlar vermektedir. Ancak; bu bilginin belirli kısıtlar altında doğru olduğu söylenebilir. Bunun nedeni dilim teorisinin doğrusal bir yöntem olması ve belirli bir hız limitinde ve gemi narinliğinde geçerliliğini korumasıdır. Dilim teorisi ile narin bir gemi formunun düşük hızlardaki düşey hareketlerinin hesaplanması deneylerle uyumlu sonuçlar vermesine rağmen küt bir geminin yüksek hızlardaki denizcilik hesaplamaları hem geometrik hem de dinamik doğrusal olmayan etkiler sebebi ile deneylerden sapmalar göstermektedir. Ayrıca gemi tipi ne olursa olsun özellikle yüksek ilerleme hızlarında meydana gelen rezonans hadisesi dalgalarla karşılaşma frekansına duyarlı olduğu için; rezonans bölgesinin doğrusal teorilerle hesaplanması gerçekçi olmamaktadır. Buna ek olarak, dilim teorisinin en önemli dezavantajı ise yüksek genlikli dalgalarda veya dalga dikliğinin arttığı senaryolarda gerçekçi sonuçlar vermemesidir. Ayrıca akış potansiyel olduğundan viskoz etkiler tamamen ihmal edilmiştir. Bütün bu olumsuz etkenlerin birleşmesi araştırmacıları doğrusal olmayan yöntemleri araştırmaya sevk etmiştir. Bu sebeple araştırmacılar tarafından üç boyutlu panel yöntemleri, doğrusal olmayan dilim teorileri, zamana bağlı Green Fonksiyonu yaklaşımları, gecikme

fonksiyonlarını kullanan frekans/zaman düzlemi yöntemleri gibi potansiyel tabanlı birçok yöntem geliştirilmiş ve hızlı çözüm avantajı sebebi ile hala da kullanılmaya ve geliştirilmeye devam edilmektedirler. Günümüzde ise yüksek kapasiteli bilgisayarlar sayesinde potansiyel akış kabulü yerine akış dinamiğine türbülans, rotasyonellik ve doğrusal olmayan taşınım terimlerinin katılması ile elde edilen RANS (Reynolds Ortalamalı Navier-Stokes) denklemleri ile karmaşık gemi hareketleri problemlerinin çözümü mümkün olmaktadır. Sadece gemi etrafındaki akışın modellenebilmesi için RANS denklemlerinin çözümüne dayanan yazılımlar 1980'li yıllardan itibaren geliştirilmeye başlanmış fakat bilgisayar teknolojisinin yetersiz olması sebebi ile Navier-Stokes denklemlerinin gemi problemlerindeki çözümü mümkün olmamıştır. Bu yıllarda üç boyutlu RANS denklemlerinin çözümündeki zorluklar sebebi ile yapılan ilk çalışmalar gemi etrafındaki iki boyutlu sınır tabakanın modellenmesi üzerine olmuştur [2, 3]. 2000'li yılların ortasından itibaren gemi hareketleri probleminde URANS (Zamana Bağlı Reynolds Ortalamalı Navier-Stokes) denklemleri sonlu hacimler sayısal yöntemi ile ayrıklaştırılıp çözen bir HAD (Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği) yöntemi kullanılması yoluna gidilmiştir. Bu yöntem ile ilk etapta gemi hareketlerinin bütün dalga karşılaşma frekanslarında ve gemi ilerleme hızlarında hareketlerinin doğru hesaplanmasının yolu aranmıştır.

Doktora tezinin ikinci kısmı gemi düşey hareketlerini azaltmaya yönelik kontrolör tasarlanmasıdır. Bir geminin denizcilik performansı doğrudan tipine ve görev tanımına bağlıdır. Bir yolcu gemisi için sahip olduğu yolcu kapasitesinin yanında, sahip olduğu hız da çok önemli bir parametredir. Fakat dalga temelli hareketler yüksek gemi hızlarında rahatsız edici boyuta ulaştığı için denizde konfor parametresinin de mutlaka incelenmesi gerekmektedir. Bir geminin şiddetli bir deniz durumunda hareketlerinin azaltılması için yapılan eylem, genellikle gemi operatörünün tecrübeye dayalı geminin ilerleme hızını azaltmasıdır. Gemi hareketlerin belirli bir üst değerin altına indirilememesi, yolcularda yorgunluğa ve deniz tutması olarak adlandırılan hadiseye sebep vermektedir. Deniz tutması, deniz ortamındaki sürekli değişen hareketlerin, çeşitli sensör reseptörler ile beyine değişken sinyallerinin iletmesi ile yorgunluk, bulantı, soğuk terleme, mide kasılmaları ve son olarak kusma semptomları olarak baş gösteren bir olaydır. Uzaysal yer değiştirme hissi beyine sinyal olarak göz, iç kulak, cilt

basınç algılayıcıları, kaslar ve duyumsal sinirlerle iletilir. Bu ileticilerin herhangi birinden üretilen sinyal bir diğeri ile zıtlık barındırıyorsa deniz tutması olayı başlamış demektir. Riola vd., [4] makalelerinde bu hadiseyi güzel bir örnek ile açıklamışlardır. "Basit bir beyin zıtlığına örnek verilecek olursa; bir gemide kitap okurken, gözler beyine 'Hareket gözlemlemiyoruz' sinyalini gönderir fakat iç kulak beyine 'Dalga kaynaklı gemi hareketlerini hissediyoruz' sinyalini gönderir." Bu zıtlık deniz tutması olayına neden olmaktadır. Bu sebeple, yolcuları olumsuz etkileyecek hareket ve ivmelenmelerin bilimsel olarak belirlenmiş bir üst limite kadar azaltılması için kontrol tabanlı bir model sunularak probleme çözüm bulunmalıdır.

Gemi düşey ivmelerinin insan vücudu üzerindeki etkilerini keşfetmek amacı ile yapılan ilk bilimsel çalışmalar O'Hanlon ve McCauley tarafından yönetilen deneysel çalışmalardır [5]. Bu çalışma kalabalık bir grup gönüllü erkek öğrencinin katılımı ile gerçekleştirilmiştir. Deneklerin kabin içerisinde penceresiz bir ortamda olduğu deneyler, maruz kalınan hareketin frekansları, şiddetleri göz önünde bulundurularak iki saat süre ile denekler kusana kadar sürmüştür. Bu çalışma sonunda deniz tutması bölgesi için bir takım grafikler elde edilmiştir. Düşey ivme kriter değerinin yolculuk süresi ile ters orantılı olarak değişirken rahatsız edici frekansın 1 rad/s civarında olduğu gözlemlenmiştir. Çalışmadan çıkarılan diğer bir sonuç ise yarım saatlik maruz kalınan hareket süresinin, zaman-deniz tutması grafiğinde en yüksek eğime sahip olmasıdır. Bir başka deyişle deniz tutması açısından en kritik süre ilk yarım saatlik süredir. Ayrıca, maruz kalınan sürelerin 3-5 saati aşması ile deneklerin ortama uyum sağlaması ve deniz tutması indeks değerinin yavaşça düştüğü sonucuna varılmıştır. Bu çalışmadan elde edilen grafikler, ISO (Uluslararası Standartlar Teşkilatı) tarafından doğrusal hale getirilerek yolculuk sürelerine karşılık gelen düşey ivmelenme üst limit değerlerini elde etmiştir [6, 7].

1.1 Literatür Özeti

Mevcut doktora tezi çalışmasının ikinci bölümü olan gemi düşey hareketlerinin hesaplanması ile ilgili çalışmalar 1940'lı yıllardan günümüze kadar süregelmiştir. İlk olarak gemi hareketleri ile ilintili olan mevcut literatür özetlemiştir. Gemi hareketlerinin anlaşılması için ilk olarak incelenmesi gereken çalışmalar Ursell

tarafından yapılan çalışmalardır. Ursell, 1949 yılında yayınladığı iki çalışma ile serbest su yüzeyinde salınan iki boyutlu dairesel kesit için doğrusal sınır değer problemini çözmüştür. Hız potansiyeli, kütlenin korunumunu, doğrusal serbest su yüzeyi şartını, cisim sınır şartını ve su tabanı şartını sağlayan sonsuz sayıda çoklu kutupların toplamı ile ifade edilmiştir. Bu çalışmalar gemi hareket teorisinin temelini oluşturmuştur [8, 9]. Gemi hidrodinamik katsayılarının ve hareketlerinin birbirleri üzerine olan etkilerinin tespiti zor olduğundan yapılan ilk çalışmalar bir serbestlik dereceli doğrusal teoriye dayanmıştır. Bu teoriye göre gemi hareketleri doğrusallaştırılır ve geminin, gemiye gönderilen dalga ile aynı frekansta salındığı varsayılır. Tasai, 1959 ve 1961 yılında yaptığı çalışmalarda, Lewis tarafından geliştirilen uyumlu dönüşüm yöntemini gemi enine kesitlerine uygulayarak gemi kesitlerini dairesel kesitlerin denklemleri ile ifade etmeyi başarmıştır [10, 11, 12]. Geliştirilen bu yöntem dairesel kesitlere benzeyen gemi kesitleri için iyi sonuçlar verse de; yuvarlak karinalı olmayan gemileri, ayna kıç ve yumru baş gibi doğrusal olmayan geometrileri, SWATH (Küçük Su Hattı Alanlı İkiz Tekneler) tipi teknelerin su altı formunu tam olarak temsil edememektedir. Frank, 1967 yılında yayınlamış olduğu çalışma ile bu probleme değinmiş ve Close - Fit yöntemini geliştirmiştir. Geliştirilen bu yönteme göre gemi kesitlerini tam olarak temsil etmek mümkün olmuştur. Hız potansiyeli geminin su altında kalan kısmına dağıtılan kaynak dağılımı ile temsil edilmiştir. Daha sonra doğrusal serbest su yüzeyi şartını sağlayan Green fonksiyonu, birim şiddetteki kaynağın hız potansiyelini temsil etmek için kullanılmıştır. Bilinmeyen kaynak yoğunlukları cisim sınır koşulları kullanılarak elde edilen integral denklemleri yardımı ile elde edilerek incelenen kesitin hidrodinamik basıncından hesaplanan kuvvet vasıtasıyla ek kütle ve sönüm değerleri elde edilmiştir [13].

Salvesen vd., Frank'ın yöntemi ile elde ettiği iki boyuttaki hidrodinamik katsayıları kullanarak, geliştirdikleri dilim teorisi yardımı ile düzenli dalgalar içinde sabit bir hızla ilerleyen üç boyutlu gemi formu için dalıp-çıkma, baş-kıç vurma, yanal öteleme, yalpa ve savrulma hareketlerini incelemişlerdir [14]. Düşey ve yatay dalga kuvvet/momentlerini de hesapladıkları bu çalışma denizcilik hesaplamaları açısından en önemli gelişmelerden biridir. Bu yöntem ile öncelikle gemi kesitlerine etkiyen hidrodinamik katsayılar, Froude-Krylov (Düşey Yönde İndüklenen Kuvvet) ve

difraksiyon kuvvet/momentleri hesaplanmakta ve dilim teorisi denklemleri ile üç boyutlu form gemi formu için bütün katsayılar elde edilmektedir. Birim genlikli dalga için istenilen karşılaşma frekansında hareket transfer fonksiyonu (TF) elde edilmektedir. Bu yöntemin yüksek doğruluk ile kullanılabilmesi için geminin düzenli bir dalga zorlayıcısı tarafından uyarılması sonucunda oluşan radyasyon dalgalarının boyunun geminin genişliği ile aynı mertebede olması gerekmektedir [14]. Gemi hareketlerinin maksimum cevabı göreceli uzun dalga bölgesinde (düşük dalga frekansları) olduğu için bu çok kritik bir kabuldür. Bunun sebebi, dalgalarla karşılaşma frekansı sıfıra giderken potansiyel teori ile hesaplanan ek kütle değerinin sonsuza yaklaşacağıdır. Uzun boylu dalgalarda hidrostatik kuvvet/momentlerinin baskın olması; bu bölgede hidrodinamik katsayıların belirsizliği açısından çok büyük sorunlar teşkil etmemektedir. Bir diğer husus ise, Salvesen vd. yayınlamış oldukları bu çalışma potansiyel tabanlı olduğu için, viskozitenin ihmal edilmesi sebebi ile teğet gerilmelerin büyük rol oynadığı yalpa hareketi dinamiği doğru modellenememiştir.

Denizcilik hesaplamalarında mihenk taşı olarak kabul edilen bir diğer gelişme ise Manley St. Denis ve Pierson önderliğinde sunulan yeni bir yöntem ile düzenli dalgalardaki gemi hareketleri çözümlerinden karışık denize geçiş olmuştur [15]. Bu iki araştırmacının sunduğu istatistiğe dayalı enerji dağılımı yöntemi devrim niteliğinde olup karışık denizin doğrusallaştırılmasını sağlamıştır. Rasgele proses teorisi olarak bilinen bu teorinin iki adet temel varsayımı bulunmaktadır:

- Deniz yüzeyi ölçümsel olarak normal dağılıma (Gaussian) sahiptir.
- Dalga genliği ile gemi hareketleri arasında doğrusal bir ilişki vardır.

İlk varsayım gemi hareketlerinin olasılık dağılım fonksiyonu olarak ifade edilmesine izin vermektedir. Bu yolla varyans ve RMS (Kareköklerinin Ortalaması) değerleri Rayleigh dağılımı kabulü ile basit ifadeler ile elde edilmiştir. İkinci varsayım ise geminin düzenli dalgalar içerindeki cevaplarının verilen dalga spektrumu ile süperpoze edilmesini sağlamıştır.

Daha önceden de belirtildiği gibi potansiyel teorinin yetersizliğinden dolayı gemi hareketlerinin URANS denklemleri ile modellenmesi ile birlikte üç boyutlu gemi geometrisi için gemi hareketleri sonuçlarının daha doğru tahmin edilmesi mümkün olmuştur. URANS yaklaşımı ile yapılan çalışmalar bu kısımda verilmiştir. Sato vd. Wigley

ve Seri 60 tekne formları için baştan gelen düzenli dalgalar için birleşik düşey hareketleri incelemişlerdir. Sonuçlarını deneylerle karşılaştıran araştırmacılar, URANS çözüm yaklaşımının Wigley gibi doğrusal geometriler için iyi sonuçlar verdiği ancak Seri 60 tekne formu için iyi sonuçlar vermediğini raporlamışlardır [16]. Beck ve Reed çalışmalarında, denizcilik problemlerinin çözümünde en iyi seçeneğin üç boyutlu URANS yöntemleri olduğunun altını çizmişlerdir [17]. Carrica vd., DTMB 5512 modeli için iki farklı hız ve dalga boyunda ileri hız difraksiyon problemine çalışmıştır. Göreceli olarak kısa boylu dalgaların dalıp-çıkma kuvveti ve baş-kıç vurma momentleri üzerinde gösterdiği doğrusal olmayan etkileri raporlayan araştırmacılar, zamana bağlı ölçülen bu sinyallerin önemli ölçüde ikincil harmonik bileşeni olduğunu göstermişlerdir [18]. Bir sonraki çalışmalarında Carrica vd., yine aynı gemi modeli için URANS analizleri gerçekleştirerek, rezonansa yakın frekans bölgesinde küçük ve büyük dalga dikliğinin gemi düşey hareketlerine etkilerini araştırmışlardır. Büyük dalga dikliğindeki analizlerinde ayna kıçtaki dalga kırılmalarını ve geminin aşırı hareketlerini raporlamışlardır [19]. Irvine vd., DTMB 5512 gemisi için çekme tankı deneylerini gerçekleştirmiş ve bu geminin düşey hareketleri için oldukça geniş bir veri tabanı hazırlamışlardır [20]. Weymouth vd., yine aynı şekilde gemi düşey hareketleri için URANS analizleri gerçekleştirmişlerdir. Araştırmacıların sonuçları deneylerle uyumlu olup, URANS yaklaşımının geniş bir Froude sayısı aralığında geçerli olacağını savunmuşlardır. Ancak çalışmalarındaki dalga dikliğinin düşük olduğu not edilmelidir [21]. Deng vd., dalga dikliğinin yüksek olduğu senaryoyu bir konteyner gemi formuna uygulamışlardır. Gemi düşey hareketleri için tatmin edici sonuçlar alınsa da dalgalardaki ek direncin tahmini deneylerle uyumlu olmamıştır [22]. Wilson vd., S-175 konteyner formu için baştan gelen düzenli dalgalarda URANS analizi gerçekleştirerek TF grafiğini elde etmişlerdir [23]. Son yıllarda gemi enine kesitlerinin düzenli frekanslarda salınımı problemi URANS yaklaşımı ile ele alınmış; ek kütle ve sönüm katsayısı hesaplamaları için çalışmalar yapılmaya başlanmıştır. Bu çalışmalardan biri Querard vd. tarafından iki boyutlu bir tekne kesiti için URANS denklemleri kullanarak geniş frekans aralığında gerçekleşmiştir [24]. Fakat bu çalışmada, potansiyel yöntemle karşılaştırma yapabilmek için tekne kesitlerinin salınım genliği düşük seçilmiştir. Bu nedenle bu yöntem potansiyel teoriye göre daha doğru fakat tekne kesitlerinin hareket frekansının dalga frekansıyla aynı olması kabulünü barındırdığı için eksik bir yöntemdir. Bhushan

vd., Athena gemisi için hem model hem de tam ölçekli gemi düşey hareketlerini tahmin etmişlerdir [25]. Simonsen vd., 2010 ve 2013 yıllarında yayınlamış oldukları kapsamlı çalışmalarda bir çok gemi tipi için denizcilik hesaplamaları yapmışlardır [26, 27]. Guo vd., KVLCC2 modeli için baştan gelen düzenli dalgalarda düşey hareket ve ek direnç hesaplamaları yapmışlardır [28]. Sonuçların deneylerle uyumlu olduğunu raporlayan araştırmacılar URANS yaklaşımının hem düşey gemi hareketlerinde hem de dalgalarda ek direnç hesabında kullanılabileceğini savunmuşlardır. Tezdoğan vd., KRISO konteyner modeli için düşük ilerleme hızlarında dalıp-çıkma, baş-kıç vurma ve dalgalarda ek direnç TF grafiklerini elde etmişlerdir [29]. Özdemir ve Barlas, KVLCC2 modeli için yaptıkları sayısal çalışmada sakin su direnci, gemi hareketleri ve ek direnç problemlerine odaklanmışlardır. Elde ettikleri sonuçlar direnç, dalıp-çıkma ve baş-kıç vurma hareketleri için uyumludur fakat dalga kaynaklı ek direnç tahmini iyi olmamıştır [30].

Bu yapılan çalışmalara ek olarak ilk defa Bonfiglio vd. hibrit bir yöntem ile TF grafiği çizdirmeyi amaçlamıştır. Kullandıkları yöntem bu doktora tezinde kullanılan URANS-Katsayı yöntemi ile kısmen özdeştir çünkü bu çalışmada radyasyon terimleri URANS ile hesaplanırken dalga bozucu terimleri potansiyel teori ile elde edilmiştir. Bu çalışmanın en büyük eksikliği URANS ile hesaplanan radyasyon katsayılarının iki boyutlu gemi kesitleri için kullanılmasıdır. Hesaplamalar her bir kesit için ayrı ayrı gerçekleştiğinden çözüm CPU zamanı oldukça uzamıştır. Yazarlar üç boyutlu gemi formuna ait radyasyon katsayılarını hesaplarken ise dilim teorisini kullanmışlardır [31]. Bu doktora tezi çalışmasının yenilikçi tarafı olarak ikinci bölümde yer alan URANS-Katsayı yönteminde bu problemin üstüne gidilmiş ve HAD çalışmaları üç boyutlu gemi geometrisi için gerçekleştirilmiştir.

Mevcut doktora tezi çalışmasının üçüncü bölümü olan gemi düşey ivmelerinin azaltılmasına yönelik ilk çalışmalar 1950’ li yıllarda pasif takıntılar ile başlamıştır [32, 33, 34]. Fakat bu uygulama gemilerin direncinde ciddi bir artışa sebep olduğu için çok fazla tercih edilen bir yöntem değildir. Bu sebeple gemi hızı 10-15 knot civarında ise aktif eyleyiciler kullanmanın daha efektif sonuçlar vereceği bilinmektedir [35]. Bilindiği üzere, kontrolör tasarımının gemi hareket kontrolünde önemli bir rol oynamaktadır ve literatürde gemilerin düşey hareketlerini azaltmak için çok çeşitli kontrol yaklaşımları

sunulmuştur. Esteban vd. yapmış oldukları çalışmada yüksek hızlı bir feribot formu için dalıp-çıkma ve baş-kıç vurma ivmelenmelerinin azaltılması amacı ile PID tabanlı kontrolör tasarlamışlardır. Çalışmalarında geliştirdikleri eyleyicilerle (Aktif kanat ve T-foil) ivmelenmeleri ortalama % 26.5 oranında iyileştirmişlerdir [36]. Lopez vd., yaptıkları çalışmada hızlı bir gemi formunun bulanık modeline dayanarak tasarladıkları bulanık kontrol sistemi ile deniz tutmasının ana sebebi olan düşey ivmeleri başarılı bir şekilde azaltmışlardır [37]. Riola vd., çalışmalarında hızlı savaş gemileri için gemi hareketleri ve deniz tutması olayını incelemişlerdir. Bu çalışmanın sonunda literatürde var olan temel modellere göre gemi kaptanlarına, gemi tasarlayıcılarına ve eyleyici mühendislerine bazı kriter değerler sunmuşlardır [4]. Bir başka çalışmalarında Esteban vd., geminin dalga-kuvvet/moment ve dalga-hareket transfer fonksiyonlarını kullanarak geminin baş ve kıçına yerleştirdikleri eyleyicilerle baş-kıç vurma ivmelerini ciddi bir oranda sönümlemeyi başarmışlardır [38]. Esteban vd., çalışmalarında 120 metre boyunda derin V formunda ve üç su jeti ile sevk eden alüminyum bir teknenin farklı hızlarda farklı deniz durumlarında ve farklı karşılaşma rotalarında denizcilik deneylerini yapmışlardır. Altı serbestlik derecesinde nümerik olarak elde ettikleri hareketleri, deneysel verilerle birleştirerek yalpa ivmelenmesi ve düşey ivmelenmeler için PID ve PD kontrolör tasarlamışlardır. [39]. Esteban vd., çalışmalarında yeni bir frekans düzlem yöntemi geliştirerek deniz tutması olayının iyileştirilmesi üzerine çalışma yapmışlardır. Önerdikleri yöntemin geminin tasarımında ve en verimli operasyonlarının belirlenmesinde kullanılabileceğini göstermişlerdir [40]. Giron-Sierra vd., İspanyol armatörlerin de desteğiyle yedi yıl süren bir araştırma ile deniz tutması tahmini, navigasyon, deneysel modelleme kontrol tasarımı ve deneysel gerçekleme gibi kavramlar üzerinde bir makale yayınlamışlarıdır [41]. Sierra ve Esteban yapmış oldukları çalışmada yüksek hızlı bir tekne formu için frekans düzlemindeki düzenli dalgalar içindeki hareketlerinden yola çıkarak eyleyici doyumlu ve limitsiz durumdaki kontrol kuvvetlerini hesaplamışlardır [42]. Ticherfatine ve Qidan, yüksek hızlı bir feribot formu için rastgele dalgaların neden olduğu düşey hareketleri azaltmak için yeni bir yaklaşım sunmuştur. PD ile iPD (intelligent PD) olarak adlandırılan kontrolcüler ile bir karşılaştırma çalışması yapılmış ve sonuçlar iPD'nin değişen sistem parametrelerini ve çalışma hızının modellenmesinde daha iyi bir performans sergilediğini göstermişlerdir [43]. Zhang vd. düşey düzlem hareketlerini ve seçilen katamaran

teknenin deniz tutması indeks değerlerini azaltmak için H^{∞} çıkış geri besleme kontrol yönteminin uygulandığı bir makale yayınladı. Geri bildirim sinyalleri olarak, anlık dalıp-çıkma ve baş-kıç vurma hızlarını kullanmışlardır [44].

Yukarıda tartışılan tüm çalışmalar, kontrol yüzeyi olarak foil kullanılması ile literatüre çok önemli katkılar sağlamışlardır. Literatürden de anlaşılacağı gibi, düşey gemi hareketlerinin kontrolü için optimal kontrol kullanarak problemi ele alan makale sayısı çok azdır. [43] 'ün sonuçları oldukça ilginç ve ümit vericidir çünkü değişen sistem parametreleri için önemli gelişmeler elde edilmiştir. [44] Numaralı referansta yer alan çalışmanın sonuçları da çok önemlidir, çünkü dikkate değer H^{∞} kontrolör tasarımı uygulanmıştır. Bununla birlikte, yayınlanan çalışmalarda, düşey gemi hareketlerini azaltmak için DME tabanlı optimal kontrolör tasarımı hiç kullanılmamıştır. Ek olarak, bu tez çalışmasında, operasyon anında ölçülmesi daha kolay olduğu için sadece baş-kıç vurma hızı sönsörle ölçülmüştür. Bu tez çalışmasının diğer bir yeniliği ise, literatürde var olan çalışmaların aksine sönüm terimleri hesaplanırken akışkan hafıza etkilerini (fluid memory effects) de dikkate alınmış olmasıdır.

1.2 Tezin Amacı

Mevcut doktora tez çalışmasının iki amacı bulunmaktadır. Çalışmanın ilk amacı gemi düşey hareketlerinin farklı matematiksel yöntemler ile hesaplanmasıdır. Elde edilen sonuçlar öncelikle literatürde var olan deney sonuçları ile kıyaslanmıştır ve çözüm yöntemlerinin birbirleri ile kıyaslaması doğruluk ve hesaplama süresi açısından değerlendirilmiştir.

Çalışmanın ikinci amacı ise, dalga bozucusu gibi oldukça dinamik şartlarda operasyon yapan bir motoryat formunun düşey ivmelerinin, geliştirilen bir optimal kontrol tasarımı ile yatın baş ve kıçına konumlandırılan foillerin aktif kullanımı ile deniz tutması açısından güvenli olan bölgeye getirilmesidir.

1.3 Hipotez

Dilim teorisi ile yapılan hareket hesaplamalarında gemi etrafındaki akış potansiyel teori ile ifade edilir. Akışın sürtünmesiz ve çevrintisiz olması ile akış ile ilgili olan bütün büyüklükler yönetici denklem olan Laplace denklemi ve ilgili sınır koşullarını sağlayan

hız potansiyelinden türetilebilir. Dilim teorisinde gemi kesitlerinin birbirlerine olan etkisi ihmal edilir. Hareket denklemleri ise atalet, sönüm, doğrultma ve zorlayıcı terimlerin süperpozisyonu ile temsil edilir. Bütün bu yapılan kabuller deneysel veriden daha uzakta bir çözüm elde etmek anlamına gelmektedir. Tamamen doğrusal olmayan URANS yaklaşımında ise gemi etrafındaki akış viskoz olup yönetici denklemler zamana bağlı Reynolds Ortalamalı Navier Stokes denklemleridir. Bu denklemlerin uygun başlangıç ve sınır koşulları altında sonlu hacimler yöntemi ile çözülmesi ile gemi etrafındaki anlık hız ve basınç alanları hesaplanır. Daha sonra anlık basıncın gemi yüzeyinde toplanması ile her zaman adımında gemi etkiyen kuvvet hesaplanır. Bu kuvvet etkisi ile iki serbestlik derecesine sahip olan gemi için DFBI denklemleri çözülür ve her bir zaman adımında geminin yeni yeri hesaplanır. Bu yaklaşımda tamamı ile doğrusal olmayan bir altyapıya sahip olduğu için deneysel veriye en yakın sonuçlar vermesi beklenmektedir. Son hesaplama yöntemi olan kısmen doğrusal olmayan URANS yaklaşımında ise (URANS-Katsayı), doğrusal hareket denkleminde yer alan radyasyon ve zorlayıcı terimler URANS yaklaşımı ile hesaplanır. Katsayı hesabı doğrusal olmayan çözüm tekniği ile dikkate alındığından ve hareket denklemi doğrusal olduğundan bu yöntemin dilim teorisine göre daha iyi fakat tamamı ile doğrusal olmayan URANS yaklaşımına göre ise daha kötü sonuç vermesi beklenmektedir.

Karışık denizde gemi hareketlerinin azaltılarak makul bir değere indirilmesi probleminde ise optimal bir kontrolör tasarlanmıştır. Önerilen kontrolörün tasarımında, dışbükey optimizasyon temelinde DME (Doğrusal Matris Eşitsizlikleri) yaklaşımı kullanılmıştır. Tasarımda ilk olarak doğrusal zamanla değişmeyen sistemin kararlılığı uygun Lyapunov aday fonksiyonu seçimi ile DME formunda elde edilmiştir. Daha sonra kontrolörün performansı kapalı çevrim sistemin bozucu girişlerinden performans çıkışlarına olan transfer fonksiyonları matrisinin L_2 kazancını minimize edecek şekilde tasarıma eklenmesi ile statik çıkış geri-beslemeli kontrolörün sentez denklemleri elde edilmiştir. Geliştirilen statik çıkış geri-beslemeli kontrolör, bozucu bastırma problemine getirdiği ölçüm kolaylığı ile durum geri-beslemeli kontrolöre göre çok daha pratikte uygulanabilir ve performans bakımından durum geri beslemeli kontrolör ile eşdeğer bir kontrol metodu olması beklenmektedir.

BÖLÜM 2

GEMİ DÜŞEY HAREKETLERİNİN FARKLI MATEMATİKSEL YÖNTEMLERLE İNCELENMESİ

Doktora tezinin ikinci bölümünde farkı matematiksel temele sahip olan yöntemlerle bir su üstü savaş gemisinin yüksek hızda baştan gelen düzenli dalgalardaki düşey hareketleri incelenmiştir. Mevcut üç yöntemi kullanarak frekans düzleminde elde edilen TF (transfer fonksiyonu) grafikleri birbirleri ile ve literatürde var olan deneysel sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. TF, geminin düzenli dalga bozucusu ile zorlandığında ne kadar hareket edeceğini belirleyen boyutsuz bir katsayıdır. Dalıp-çıkma ve baş-kıç vurma hareketleri için Denklem 2.1 ve Denklem 2.2 kullanılarak bulunabilir:

$$TF_{Dalıp\text{-}Çıkma} = \frac{x_3}{A} \tag{2.1}$$

$$TF_{Baş\text{-}Kıç\ Vurma} = \frac{x_5}{Ak} \tag{2.2}$$

Burada, x_3 dalıp-çıkma hareketini x_5 ise baş-kıç vurma hareketini, A dalga genliğini k ise dalga sayısını ifade etmektedir ve $k=\frac{2\pi}{\lambda}$ ile hesaplanır. Burada λ her bir düzenli dalganın boyunu ifade etmektedir.

Analizler için DTMB 5512 modeli seçilmiştir. Sadece $Fn=0.41$ senaryosu incelenmiştir. Boyutsuz Fn sayısı aşağıdaki gibi tanımlanır:

$$Fn = \frac{V}{\sqrt{gL_{WL}}} \tag{2.3}$$

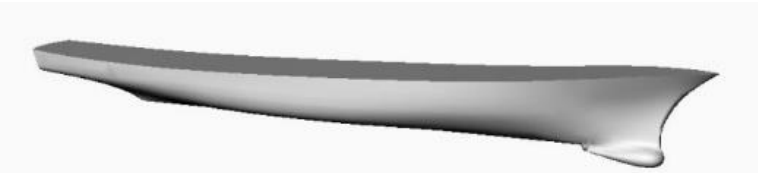
Burada V gemi servis hızını, g yerçekimi ivmesini ve L_{WL} geminin yüklü su hattı boyunu ifade eder. Derin suda serbest su yüzeyi dalgalarının frekans ve dalga sayısı (k) dispersiyonu Laplace denklemini sağlayan aşağıdaki denklem ile ifade edilir.

$$\omega^2 = gk \tag{2.4}$$

Burada ω dalga frekansını göstermektedir. Iowa Modeli, 1/46.588 ölçekli olup tekneye ait özellikler Şekil 2.1'de verilmiştir [20]. Model geminin ana boyutları ve bazı parametreleri Çizelge 2.1'de verilmiştir. Verilen değerler statik durum için verilmiştir ve gemi üzerinde herhangi bir takıntı bulunmamaktadır.

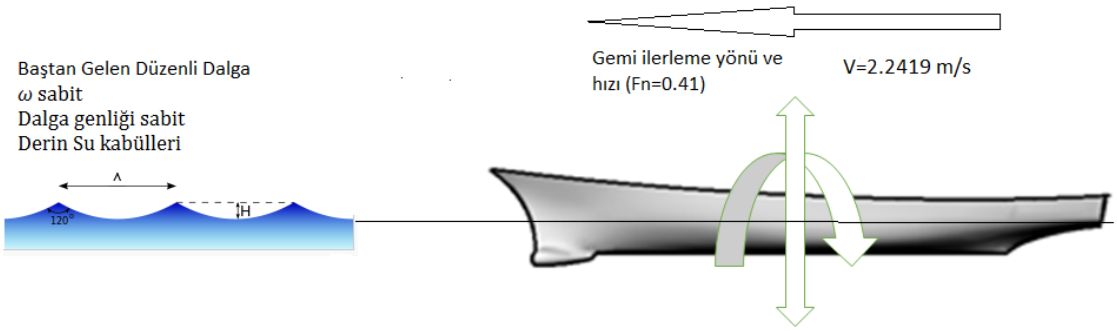
Çizelge 2. 1 DTMB 5512 temel özellikleri

Ana Parametreler	**Değerler**
λ_M	46.588
L_{WL}	3.052 m
B_{WL}	0.409 m
T	0.132 m
M	84.2 kg
LCG (kıç taraftan)	1.536 m
VCG (kaide hattından)	0.152 m
I_5	48.90 kgm^2
V	2.2419 m/s
Fn	0.41



Şekil 2. 1 DTMB 5512 modelinin gösterimi

Dilim teorisi, URANS ve URANS-Katsayı yöntemleri ile hesaplamalar Çizelge 2.2'de görüldüğü gibi 7 farklı karşılaşma frekansında, baştan gelen düzenli dalgalarda $Fn=0.41$ için gerçekleştirilmiştir. Şekil 2.2' de problemin fiziksel şeması gösterilmiştir.



Şekil 2. 2 Fiziksel şema

Karşılaşma frekansı, ω_e, baştan gelen düzenli dalgalar için Denklem 2.5'de belirtildiği gibi tanımlanmıştır:

$$\omega_e = \omega + \left(\frac{\omega^2 V}{g}\right) \tag{2.5}$$

Elde edilen çözümlemeleri literatürdeki deney tankı transfer fonksiyonu sonuçları ile karşılaştırmak amacı ile küçük genlikli dalgalar, $Ak=0.025$, senaryosu seçilmiştir [20].

Çizelge 2. 2 DTMB 5512 için tanımlanan senaryolar

Senaryo No	Yöntem	Ak (-)	ω_e (rad/s)	A (m)	λ/L_{WL} (-)
1	Dilim Teorisi, URANS ve URANS-Katsayı	0.025	12.51	0.0080	0.66
2			10.92	0.0096	0.79
3			9.15	0.0121	1.00
4			8.18	0.0141	1.16
5			7.19	0.0167	1.38
6			6.76	0.0182	1.50
7			5.00	0.0279	2.30

2.1 Potansiyel Teori (Dilim Teorisi)

Aşağıda sıralanan özellikleri taşıyan akış potansiyel olarak düşünülebilir:

•Sürtünmesiz (μ =0) (Inviscid)

•Çevrintisiz (ω=0) (Irrotational) Burada ω çevrinti vektörünü göstermektedir.

•Sıkıştırılamaz (Incompressible)

Akışın bu özellikleri sağlaması dışında yönetici denklem olan ve kütle korunumunu ifade eden eliptik Laplace kısmi diferansiyel denklemini de sağlaması gerekmektedir. İki boyutlu x-z uzayında Laplace denklemi aşağıdaki gibi verilir.

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} = 0 \qquad (2.6)$$

Burada ϕ hız potansiyelini ifade eder ve bu fonksiyon skaler bir fonksiyondur. Bilindiği üzere konum vektörünün $z_c = x + iz$ şeklinde kompleks olarak ifade edilmesi ile kompleks potansiyel $\psi = \phi + i\varphi$ olarak ifade edilebilir. Burada φ akım fonksiyonu olarak adlandırılır. Hız alanının konumsal türevleri ile akışa ait hız alanı hesaplanabilir:

$$u = \frac{\delta \phi}{\delta x} = \frac{\delta \varphi}{\delta z} \qquad v = \frac{\delta \phi}{\delta z} = -\frac{\delta \varphi}{\delta x} \qquad (2.7)$$

Problem dâhilinde amaç iki boyutlu gemi kesiti üzerindeki basıncı hesaplamaktır. Cisim üzerindeki hız potansiyeli bilinirse o noktadaki basınç da Bernoulli Denklemini kullanarak hesaplanabilir:

$$P = -\rho\left(\frac{\delta \phi}{\delta t} + \frac{1}{2}(\nabla \phi)^2 + gz\right) \qquad (2.8)$$

Burada P basıncı, ∇ operatörü konumsal türevi ($\nabla = \frac{\delta}{\delta x}\vec{i} + \frac{\delta}{\delta z}\vec{k}$), ρ akışkan yoğunluğunu, z ise derinliği ifade etmektedir. Doğrusal teori gereği, Bernoulli denkleminin doğrusal olmayan ikinci terimi ihmal edilir ve gemi kesitine ait olan radyasyon ve bozucu terimleri hesaplanırken $-\rho \frac{\delta \phi}{\delta t}$ terimi kullanılır.

Laplace denkleminin sağlanması dışında akışın problem sınırlarındaki şartları da sağlaması gerekmektedir. Bu şartlar:

- Doğrusallaştırılmış serbest su yüzeyi şartı $\frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} + g\frac{d\phi}{dz} = 0$
- Tabandaki sınır koşulu $\frac{d\phi}{dz} = 0 \quad z \to -\infty$
- Sonsuzdaki sınır koşulu $\lim_{R\to\infty} \sqrt{Rk}\left(\frac{d\phi}{dR} - ik\phi\right) \to 0$
- Cisim üzerinde sağlanması gereken kinematik sınır koşulu $(\nabla \psi . \vec{n}) = U_n$ (n yüzeyin normalini temsil etmektedir.)

Bu sınır koşulları ile ilgili detaylı bilgi ilgili çalışmada bulunabilir [45]. Bu tez çalışmasında hesaplama yöntemlerinden ilki potansiyel teori tabanlı dilim teorisidir. Bu teoriye göre öncelikle sonlu sayıdaki gemi enine kesitine etkiyen ek kütle sönüm Froude-Krylov ve difraksiyon terimleri frekans düzleminde tanımlanan karşılaşma frekansları için hesaplanmalıdır. Daha sonra Salvesen vd. geliştirmiş oldukları dilim teorisi ile üç boyutlu gemi formuna ait değerler hesaplanmalıdır. İki boyutlu gemi kesitine etkiyen ek kütle ve sönüm ve difraksiyon terimleri bir çeşit panel yöntemi kullanarak Frank-Close Fit yöntemi ile hesaplanmıştır. Not edilmelidir ki frekans düzleminde her bir frekans için ek kütle ve sönüm değerleri bilinirse Haskind ilişkisinden [46] difraksiyon terimleri de hesaplanabilir. Froude- Krylov terimi için ise hesaplamalı akışkanlar dinamağı kullanmaksızın derin suda gelen dalganın analitik hız potansiyeli ifadesinden faydalanılarak hesaplamalar yapılır:

$$\phi_d = \frac{iAg}{\omega} e^{kz} e^{-ik(x\cos\mu + y\cos\mu)} \tag{2.9}$$

Burada ϕ_d gemiye delen düzenli dalganın hız potansiyelini, μ ise geminin dalgalarla karşılaşma açısını ifade etmektedir (Bu çalışmada $\mu = 2\pi$). $-\rho \frac{\delta \phi_d}{\delta t}$ teriminin hesaplanması ile gelen dalganın sebep olduğu hidrodinamik basınç, gemi enine kesitinde toplanması ile ise Froude Krylov kuvveti hesaplanır.

Ek kütle sönüm ve dolayısıyla difraksiyon terimlerini hesaplamak için probleme sayısal olarak gemi enine kesiti N adet segmente bölünmesi suretiyle çözüm aranır. Her bir segmentin ortasına kaynak şiddeti bilinmeyen atımlı noktasal kaynak (pulsating point source) elemanı yerleştirilir. Atımlı noktasal kaynağa ait hız potansiyeli dört parçadan oluşup Wehausen ve Laitone tarafından aşağıdaki gibi verilmiştir [47]:

$$\psi(z_c, t) = [\tfrac{1}{2\pi}(\log(z_c - c) - \log(z_c - \overline{c})) - \tfrac{1}{\pi} PV \int_0^\infty \frac{e^{-i\nu(z_c - \overline{c})}}{\nu - k} d\nu]Q + j[e^{-ik(z_c - \overline{c})}]Q \tag{2.10}$$

Burada PV integralin Cauchy Prinsip değerini ifade etmektedir, $\nu = k$ olduğunda bu terim tanımsız olur. Çözüm için kompleks değişkenli fonksiyonların analizinden faydalanılır. z_c ve c sırası ile akışkan içerisindeki konumu ve atımlı kaynak elemanın konumunu ifade eder ve kompleks sayılardır. i uzay kompleks değişkeninin sanal kısmını j ise uzay kompleks değişkenin sanal kısmını ifade etmektedir. Q ise her bir

segmentte yer alan atımlı noktasal kaynağın şiddetidir. Açıktır ki yukarıda yer alan kompleks hız potansiyelinin hesaplanabilmesi için her bir segmentin ortasına yerleştirilen kaynak şiddeti Q hesaplanmalıdır. Cisim üzerindeki sınır koşulunu sağlatılması ile Q kaynak şiddetleri hesaplanır. Daha sonra her bir segmente ait hidrodinamik basınç hesaplanır. Hidrodinamik basıncın segment uzunlukları ile çarpılıp toplanması ile gemi enine kesitine etkiyen toplam radyasyon kuvveti hesaplanır. Hesaplanan frekansa bağlı kompleks radyasyon kuvvetin reel kısmı ek kütle ile sanal kısmı ise sönüm ile ilintilidir. Bu problemin genel çözümü ile ilgili detaylı bilgi ilgili çalışmadan elde edilebilir [45].

Düzenli dalgalar içinde altı serbestlik dereceli hareket yapan bir gemiye etkiyen kuvvet ve momentler doğrusal olarak Denklem 2.11'de verilmiştir. Gemi orta eksenine (merkezi hat) göre simetrik olduğu için denklemler iki adet birbirinden bağımsız denklem setine indirgenir.

$$\sum_{j=1}^{6}\left\{(M_{ij}+A_{ij})\ddot{x}_j(t)+B_{ij}\dot{x}_j(t)+C_{ij}x_j(t)\right\}=F_i\cos(\omega t+\beta_i) \qquad (2.11)$$

i=1,2…6 için

j=1,3,5: Birbirine bağlı öteleme, dalıp-çıkma ve baş-kıç vurma hareketleri (Düşey düzlem hareketleri)

j=2,4,6: Birbirine bağlı yanal öteleme, yalpa ve savrulma hareketleri (Yatay düzlem hareketleri) elde edilir. Burada,

$\ddot{x}_j$ j yönündeki harmonik hareketin ivmesi,

$\dot{x}_j$ j yönündeki harmonik hareketin hızı,

x_j j yönündeki harmonik hareketin konumu,

F_i i yönündeki harmonik kuvvetin büyüklüğü,

M_{ij} Kütle veya kütle atalet momenti,

A_{ij} Ek su kütlesi veya ek su kütle atalet momenti,

B_{ij} Sönüm katsayısı,

C_{ij} Doğrultma katsayısı

Olarak ifade edilir.

Bu tezde sadece düşey hareketler dikkate alındığı için ve ileri öteleme genliklerinin ihmal edilebilir küçüklükte olması sebebi ile Denklem 2.12 ve Denklem 2.13`de yer alan doğrusal düşey hareket denklemleri kullanılır.

$$(M+A_{33})\ddot{x}_3(t) + B_{33}\dot{x}_3(t) + C_{33}x_3(t) + A_{35}\ddot{x}_5(t) + B_{35}\dot{x}_5(t) + C_{35}x_5(t) = F_3\cos(\omega t + \beta_3) \quad (2.12)$$

$$(I_5+A_{55})\ddot{x}_5(t) + B_{55}\dot{x}_5(t) + C_{55}x_5(t) + A_{53}\ddot{x}_3(t) + B_{53}\dot{x}_3(t) + C_{53}x_3(t) = F_5\cos(\omega t + \beta_5) \quad (2.13)$$

Dalıp-çıkma ve baş-kıç hareketi denklemlerinde yer alan katsayılar Salvesen vd., geliştirdikleri dilim teorisi yardımı ile Denklem 2.14-2.28 kullanılarak hesaplanır [14].

$$A_{33} = \int_{-L/2}^{L/2} a_{33}\,dx - \frac{V}{\omega_e^2} b_{33}^A \quad (2.14)$$

$$B_{33} = \int_{-L/2}^{L/2} b_{33}\,dx + V a_{33}^A \quad (2.15)$$

$$C_{33} = \rho g \int_{-L/2}^{L/2} b\,dx = \rho g A_{WP} \quad (2.16)$$

$$A_{35} = -\int_{-L/2}^{L/2} x a_{33}\,dx - \frac{V}{\omega_e^2} B_{33}^0 + \frac{V}{\omega_e^2} x_A b_{33}^A - \frac{V^2}{\omega_e^2} a_{33}^A \quad (2.17)$$

$$B_{35} = -\int_{-L/2}^{L/2} x b_{33}\,dx + V A_{33}^0 - V x_A a_{33}^A - \frac{V^2}{\omega_e^2} b_{33}^A \quad (2.18)$$

$$C_{35} = C_{53} = -\rho g \int_{-L/2}^{L/2} x b\,dx = -\rho g M_{WP} \quad (2.19)$$

$$F_3 = \rho A \int_{-L/2}^{L/2} (f_3+h_3)\,dx + \rho A \frac{V}{i\omega_e} h_3^A \quad (2.20)$$

$$f_3(x) = g e^{-ikx\cos\mu} \int_{C_X} N_3 e^{iky\sin\mu} e^{kz}\,dl \quad (2.21)$$

$$h_3(x) = \omega_0 e^{-ikx\cos\mu} \int_{C_X} (iN_3 - N_2 X\sin\mu) e^{iky\sin\mu} e^{kz} \psi_3\,dl \quad (2.22)$$

$$A_{55} = \int_{-L/2}^{L/2} x^2 a_{33}\,dx + \frac{V^2}{\omega_e^2} A_{33}^0 - \frac{V}{\omega_e^2} x_A^2 b_{33}^A + \frac{V^2}{\omega_e^2} x_A a_{33}^A \quad (2.23)$$

$$B_{55} = \int_{-L/2}^{L/2} x^2 b_{33}\,dx + \frac{V^2}{\omega_e^2} B_{33}^0 + V x_A^2 a_{33}^A + \frac{V^2}{\omega_e^2} x_A b_{33}^A \quad (2.24)$$

$$C_{55} = \rho g \int_{-l/2}^{L/2} x^2 b \, dx = \rho g I_{WP} \tag{2.25}$$

$$A_{53} = _\int_{-L/2}^{L/2} x a_{33} \, dx + \frac{V}{\omega_e^2} B_{33}^0 + \frac{V}{\omega_e^2} x_A b_{33}^A \tag{2.26}$$

$$B_{53} = _\int_{-L/2}^{L/2} x b_{33} \, dx - V A_{33}^0 - V x_A a_{33}^A \tag{2.27}$$

$$F_5 = -\rho A \int_{-L/2}^{L/2} \left[x(f_3 + h_3) + \frac{V}{i\omega_e} h_3 \right] dx - \rho A \frac{V}{i\omega_e} x_A h_3^A \tag{2.28}$$

Denklemlerde yer alan a_{33} ve b_{33} ek kütle ve sönüm katsayıları tek bir gemi kesiti için değişik salınım frekanslarında Frank Close Fit Yöntemi ile hesaplanmıştır. Analiz frekans aralığı gemi boyutuna göre seçilir. Gemiye gönderilen düzenli dalganın boyu genellikle gemi su hattı boyunun dörtte birinden başlayarak, beş katına kadar çıkabilir. Hassas bir aralık seçimi ile düşey hareketler için TF grafiği frekans düzleminde kompleks analiz yöntemi elde edilmektedir. Bu çözümlemelerde zorlayıcı kuvvet/ momentler ve yer değiştirmeler kompleks olarak dayatılır ve kompleks çözüm bulunur. Dilim teorisi ile ilgili detaylı bilgi ilgili referansta bulunabilir [14].

2.2 Tamamen Doğrusal Olmayan URANS Modellemesi (URANS Yöntemi)

Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiğinde son zamanlarda yaşanan gelişmeler birçok farklı alandaki karmaşık problemleri çözümleyerek araştırmacılara kolaylıklar sağlamaktadır. Bu alanların en başında dalgalı deniz ortamında geminin altı serbestlik dereceli hareketini ifade eden denizcilik problemi yer almaktadır. URANS denklemlerini sonlu hacimler yöntemi ile ayrıklaştırarak çözülmesinde ticari bir HAD programı olan STAR-CCM+ kullanılmıştır. Gemi hareketleri çözümlemelerine başlamadan önce bu tekne formlarının URANS ile sakin su direnç çözümlemeleri literatürde kolaylıkla bulunabilen deney tankı sonuçları ile kıyaslanmıştır.

2.2.1 URANS Denklemleri ve Modelleme

Sıkıştırılamaz akış için ortalama süreklilik ve momentum denklemleri kartezyen koordinatlarda ve tensör formda Denklem 2.29 ve 2.30'da gösterildiği gibi yazılabilir:

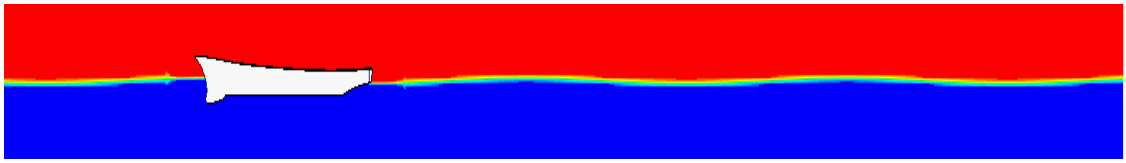
$$(\frac{\delta U_i}{\delta x_i}) = 0 \tag{2.29}$$

$$\rho(\frac{\delta U_i}{\delta t} + U_j \frac{\delta U_i}{\delta x_i}) = -\frac{\delta P}{\delta x_i} + \frac{\delta \tau}{\delta x_j} - \frac{\delta(\rho\overline{u_i' u_j'})}{\delta x_j} \tag{2.30}$$

Burada $\rho\overline{u_i' u_j'}$ Reynolds gerilme tensörünü, U ortalama akış hız vektörünü, u' ise çalkantı hız vektörünü temsil etmektedir. P ortalama basıncı ifade ederken, ρ akışkan yoğunluğunu ifade etmektedir.

$$\tau = \tau_{ij} = \mu(\frac{\delta U_i}{\delta x_j} + \frac{\delta U_i}{\delta x_i}) \tag{2.31}$$

burada τ_{ij} ortalama viskoz gerilme tensör bileşenidir ve Denklem 2.31'de ifadesi verilmiştir. Burada μ dinamik viskositeyi ifade etmektedir. Türbülans gerilmesinin ortalama akım hızı vektörü ile orantılı olduğu kabulü ile iki denklemli k-ε türbülans modeli kullanılarak kapalı problem elde edilir. Bu türbülans modelinin seçilmesinin nedeni ise endüstriyel uygulamalarda sıkça kullanımı olması ve k-ω SST türbülans modeline kıyasla daha az bilgisayar hafızası ve CPU zamanına ihtiyaç duymasıdır [29]. Kullanılan sayısal çözücü akışkanın hareketini ifade eden URANS denklemlerini ayrıklaştıran sonlu hacimler yöntemini kullanır. URANS çözücü için Segregated akış modeli kullanılmıştır ve URANS denkleminde yer alan taşınım terimleri ikinci mertebeden yaklaşımla ayrıklaştırılmıştır. Analizlerde URANS çözücü, basınç ve hız alanı arasındaki ilişkiyi kurmak için SIMPLE-tipi tahmin edici-düzeltici algoritmayı kullanır. URANS denklemlerinde yer alan zamana bağlı terimler birinci mertebeden şema ile ayrıklaştırılmıştır. Hesaplamalı ortamda gemiye sayısal dalga üretecinden gönderilen dalganın formu serbest su yüzeyini doğrudan etkilemektedir. Serbest su yüzeyindeki değişimi yakalamak için Volume of Fluid (VOF) modeli kullanılmıştır. Bu modelde hesaplamalar hem su hem de hava fazları için yapılır. Serbest su yüzeyi civarındaki ağ yapısı ve sayısı gerek geminin oluşturacağı dalga sistemini gerek te gemiye gönderilen düzenli dalga profilini doğru ifade etmesi açısından son derece önemlidir. Bununla birlikte, VOF profilinin hassasiyeti açısından ikinci mertebede şema ile ayrıklaştırılmıştır. Şekil 2.3 'de gemiye gönderilen düzenli bir dalganın profili verilmiştir.



Şekil 2. 3 Senaryo 6 için üretilen düzenli dalga gösterimi

Sayısal modelleme ile ilgili özellikler özet olarak Çizelge 2.3'de verilmiştir.

Çizelge 2. 3 Sayısal modelleme özellikleri

Zaman Ayrıklaştırması	Birinci Mertebe
Taşınım Terimi	İkinci Mertebe
Basınç Bağlantısı	SIMPLE
Türbülans Modeli	k- ε
VOF Modeli	İkinci Mertebe

Kullanılan ticari yazılımın modülünde ekli olan DFBI denklemlerinin çözümü ile geminin serbest dalıp-çıkma ve baş-kıç vurma birleşik hareketini hesaplanır. Gemiye gönderilen düzenli dalganın gemiyi z ekseninde ve y ekseni etrafında hangi derece doğrulukla salınım hareketi yaptıracağı ancak gemiye etkiyen hız ve basınç alanlarının doğru tahmin edilmesi ile mümkün olmaktadır. URANS denklemlerinin belirtilen başlangıç/sınır koşulları altında sayısal çözülmesi ile elde edilen kuvvet/momentler vasıtasıyla Denklem 2.32 ve Denklem 2.33'de yer alan doğrusal ve açısal momentum denklemleri çözülür; ivmelenmeler hesaplanır ve toplam yer değiştirmeler elde edilir.

$$\sum \vec{F} = M\vec{a} \tag{2.32}$$

$$\sum \vec{M}_G = I_G \vec{\alpha}_a + \vec{\omega} \times I_G \vec{\omega} \tag{2.33}$$

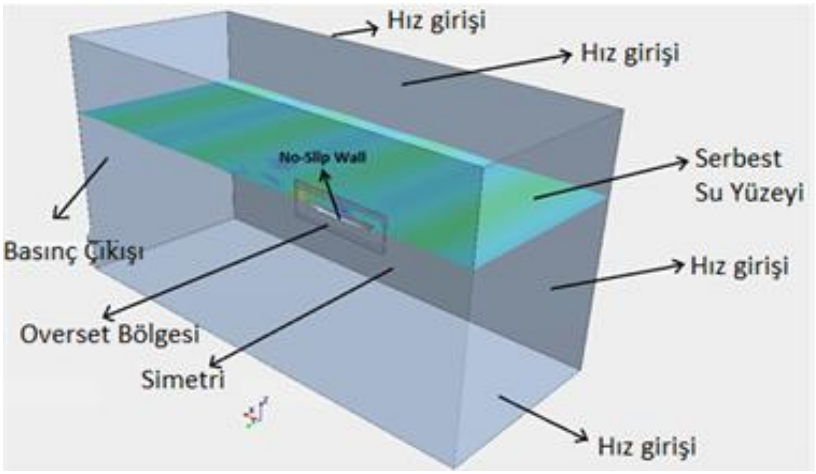
Burada F toplam kuvveti, M kütleyi, a ivmelenmeyi, M_G gemi ağırlık merkezine göre hesaplanan momenti, I_G gemi kütle atalet momentini, α_a açısal ivmelenmeyi ve son olarak ω açısal hızı ifade eder.

2.2.2 Hesaplama Hacmi ve Sınır Koşulları

Bir HAD probleminde veya analitik bir çözümlemede başlangıç ve sınır değerleri, problemin doğasına uygun olmalıdır. Bu tarz uygun tasarlanmış bir probleme iyi tanımlanmış problem *(well posed problem)* denir. Başlangıç ve sınır koşulları akışın karakteristiklerine göre belirlenmelidir. Tamamı ile doğrusal olmayan bir altyapıya

sahip URANS yönteminde DTMB 5512 modeli için tek bir hesaplamalı akış hacmi önerilmiştir. URANS yönteminin doğrulaması için gerçekleştirilen sabit hızda direnç problemi için serbest su yüzeyi başlangıç şartı olarak düz bir serbest su yüzeyi olarak seçilmiştir. Çalışmanın odak noktası olan denizcilik probleminde ise gemiyi zorlayacak dalganın frekansına ve genliğine göre belirlenmiş beşinci dereceden Stokes dalgası seçilmiştir.

Akışkan hacmini ve dolayısıyla çözümleme zamanını yarıya indirmek amacı ile Şekil 2.4'de gösterildiği gibi geminin *x* eksenine göre simetrisi olan diğer yarısı hesaplamada dikkate alınmamıştır. Gemi *x* eksenine göre simetrik olduğu için bu varsayım son derece kullanışlıdır. Problem tasarlanırken oluşturulan sınır koşulları Şekil 2.4'de şematize edilmiştir.

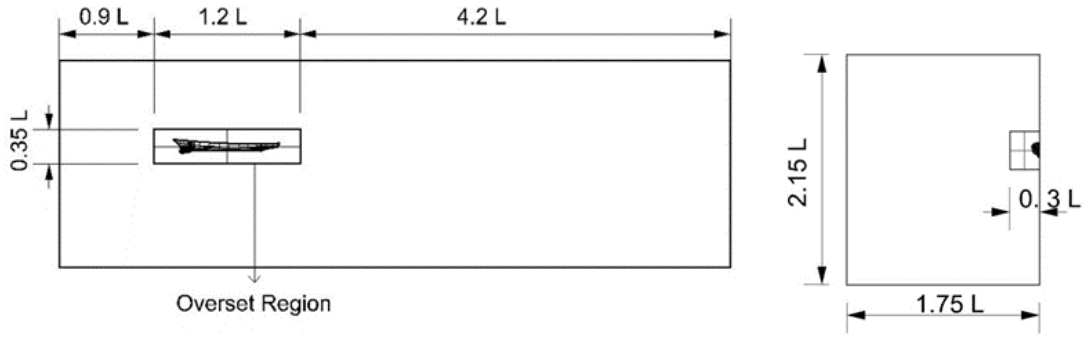


Şekil 2. 4 Sınır koşulları

Şekil 2.4'de gösterildiği gibi hesaplamalı akışkanlar hacminin üst, alt ve kenar sınırlarına sınır değeri olarak hız girişi verilmiştir. Bu bahsi geçen sınırlar *duvar* olarak da tanımlanabilir fakat bu seçim sınırlarda sınır tabakanın gelişmesine sebep olur ve çözümü zorlaştırır. Bu problemin çözümü için genellikle sınırlarda sayısal bir sönüm sağlayıcı ile (gerçek bir deney tankında sınırlara yerleştirilen dalga sönümleyici sistemler gibi) gerek geminin ileri hızından kaynaklı Kelvin dalga sistemi, gerek oluşan radyasyon dalgaları gerekte gemiden yansıyan difraksiyon dalgaları daha sınıra yaklaşmadan sönümlenebilmektedir. Hız girişi olarak adlandırılan ve x eksenine dik olan giriş ise hem gemi hızı olan Fn=0.41'e tekabül eden hız girişi ile gemiye gönderilen düzenli dalganın hızının toplamı ile temsil edilir. Fn=0.41 hıza sahip akış, hız girişi yüzeyi boyunca sabit iken, düzenli dalganın hızı suyun derinliği ile eksponansiyel olarak azalır.

Basınç çıkışı ise atmosfer hava basıncı ve tasarlanan su derinliğine ait statik ve dinamik basıncın toplamına eşit olacak şekilde sınırlandırılır. Gemi yüzeyi, normal ve teğet hızların sıfır olduğu kaymayan duvarlar (no slip wall) olarak tanımlanmaktadır.

Şekilde yer alan *overset bölgesi* ile ilgili detaylı bilgi bir sonraki bölümde verilmiştir. Gemiye gönderilen düzenli dalga sinüzoidal dalga yerine 5. mertebeden Stokes dalgası olarak seçilmiştir. Bu tercihin sebebi 5.mertebeden Stokes dalgasının gerçek deney ortamında üretilen dalgaya daha çok benzemesidir [48]. Gözlemlendiği gibi deney ortamında dalga üreteci ile üretilen dalga profili yerçekimi sebebi ile hiçbir zaman sinüzoidal olamaz; dalga çukuru daha yayvan dalga tepesi ise daha dik bir şekil almaktadır. Hesaplama akışkanlar hacminin boyutları ayrıntılı bir gösterimle Şekil 2.5'de verilmiştir.



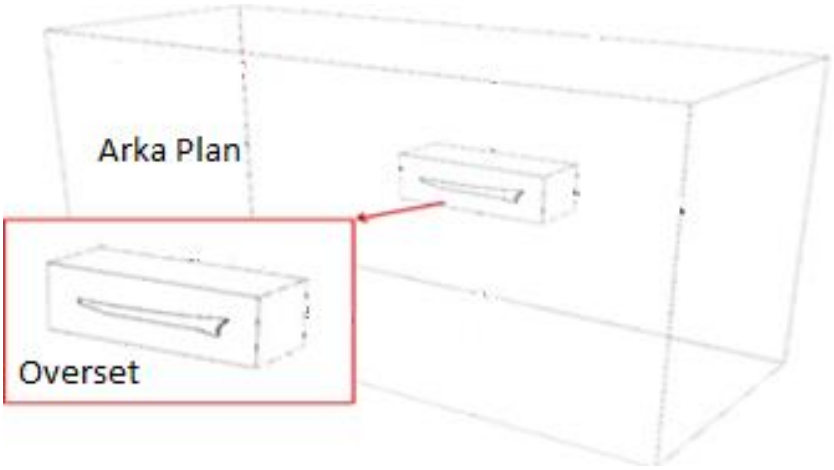
Şekil 2. 5 Hesaplamalı akışkan hacminin boyutları

2.2.3 Ağ Yapısı

STAR CCM+ ticari yazılımında yer alan kırpılmış (trimmed) ağ modülü karmaşık geometrilerde bile yüksek kaliteli ağ üreterek güvenli ve verimli bir metot sunmaktadır [49]. Kırpılmış ağ modülü ile oluşturulmuş ağ yapısı çoğunlukla minimum hücre eğikliği ile altı yüzlü ağlar üretir. Bu modül aşağıda sıralanan özelliklere sahiptir:

- Yüksek Reynolds sayılarında sınır tabaka ağı
- Ağ içerinde otomatik bölgesel iyileştirmeler
- İstenilen bölgeye özel olarak tanımlanan kontrol hacimleri

Şekil 2.6'da gösterildiği gibi HAD hesaplamalarında uygulanan ağ yapısı overset ve backround (arka plan) bloklarından oluşur.



Şekil 2. 6 Overset ve arka plan blokları

Arka planda yer alan ağ yapısı global koordinat sistemine sabitlenmiştir fakat overset bölgesi içinde yer alan ağ yapısı cisimle beraber hareket etmektedir. Overset ağ yapısı hareket eden cisimleri modellemede çok elverişli bir yöntemdir. Bu ağ yapısında arka plan ağı ile overset ağı arasında tanımlanmış ve geçiş bölgesini temsil eden overlap bölgesi mevcuttur. Akışa ait bilgiler overset ve arka plan ağ yapısı arasında overlap bölgesinden geçerler. Bu sistem ile hareket eden cisimlerde akışkan hacminde herhangi bir deformasyon söz konusu değildir ve diğer standart ağ oluşturma tekniklerine göre müthiş bir esneklik sağlar. Literatürde Chimera olarak ta geçen overset ağ tekniği ile daha detaylı bilgi ilgili çalışmada bulunabilir [50].

Şekil 2.5'de de görüldüğü gibi hesaplamalı akışkanlar hacmi overset bölgesinin bittiği baş taraftan 0.9L uzunluğa kıç taraftan ise 4.2L uzunluğa kadar sürmektedir. 1.75L kadar yan tarafa ve 1.075L kadar overset bölgesinin altında sonlanmaktadır. Son olarak 0.7L overset bölgesinin üzerindedir. Hesaplama hacmindeki ağ yapısı 5 farklı bölgeden oluşur.

Bunlar:

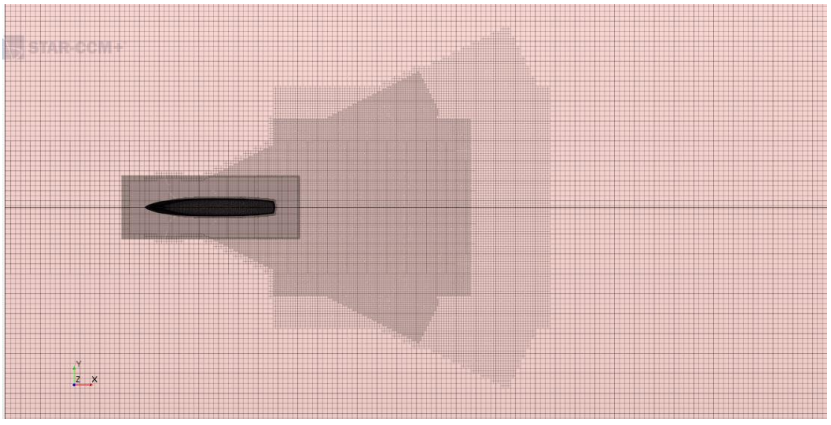
- Overset Bölgesi
- Overlap Bölgesi
- Tekne Civarı
- Serbest Su Yüzeyi
- Kelvin İz Bölgesi

bölgeleridir. DTMB 5512 modeli için oluşturulmuş üç farklı ağ sayısı Çizelge 2.4'te verilmiştir.

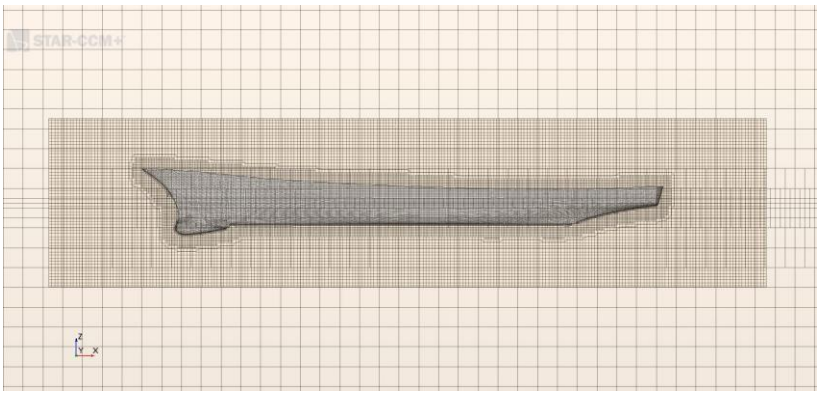
Çizelge 2. 4 Ağ sayıları

	Seyrek (Coarse) Ağ	Orta (Medium) Ağ	İyi (Fine) Ağ
Arka Plan	2.24×10^5	2.24×10^5	2.24×10^5
Overset	2.06×10^5	4.83×10^5	7.25×10^5
Toplam	4.30×10^5	7.07×10^5	9.49×10^5

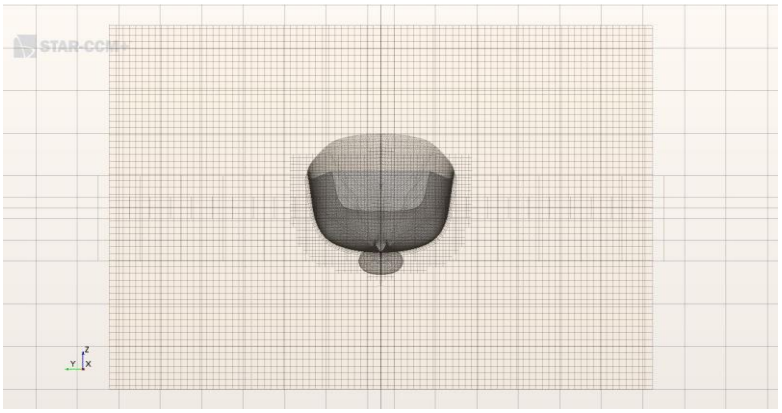
Şekil 2.7 serbest su yüzeyindeki ağ yapısını, Şekil 2.8 ve Şekil 2.9 ise overset bölgesi yakınlarındaki ağ yapısını göstermektedir.



Şekil 2. 7 Serbest su yüzeyi ağ yapısı



Şekil 2. 8 Profil görünüş ağ yapısı



Şekil 2. 9 Orta kesit ağ yapısı

Overset ağ yapısı uygulamalarında gemi hareketi ile bozulan akış bölgelerine tekrardan ağ kurma (re-meshing) işlemi yoktur, bu nedenle her hangi bir eleman deforme olmamaktadır. Gemi ile beraber overset bölgesi de senkronize hareket eder. Bu durum ağ kalitesinin bozulmayacağına işarettir. Akışkan hacminde yüksek kaliteli ağ yapısı kurulduğu zaman bu ağ yapısı analiz boyunca aynı kalmaktadır.

2.2.4 Zaman Adımı Seçimi

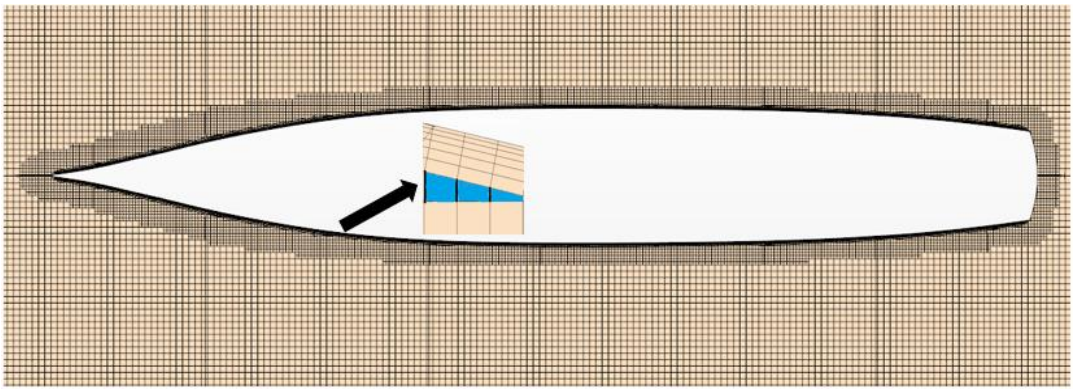
Bu çalışmada hesaplama hacmi ve süresi kısıtlamalarından dolayı açık yöntem (explicit method) yerine kapalı yöntem (implicit method) kullanılmıştır. Açık yöntem kullanımı gemi problemlerindeki akışkan bölgesinin diğer problemlerden göreceli olarak çok daha büyük olması sebebi ile çok yüksek bir bilgisayar hafızasını gerektirir. Analizin yapılacağı akışkan bölgesinin büyüklüğü ise tamamen akışın fiziğine bağlıdır. Açık yöntemlerde, sayısal yöntemin stabilitesi ve doğruluğu açısından Denklem 2.34'de yer alan CFL (Courant, Friedrichs, Lewy) şartı sağlanmalıdır.

$$CFL = u\frac{\Delta t}{\Delta x} \leq 1 \tag{2.34}$$

Burada u akışın hızını Δt seçilen zaman adımını Δx ise duvara en yakın hücrenin hücre boyutunu gösterir. CFL sayısı her bir ağ için hesaplanmalıdır.

Kapalı yöntemlerde coupled çözücülerde CFL şartının sağlanması çok sert bir kural değildir ve bu durum bilgisayar hafızasını ve çözüm CPU zamanını hafifletir. Bununla birlikte, CFL sayısı her bir ağda o ağa ait hıza ve boyuta bağlı olduğu için hesaplama hacminde ciddi bir şekilde değişebilen bir parametredir. Bu sebeple CFL sayısının

belirlenmesinde bu sayının en yüksek olabileceği bölge olan sınır tabaka üzerinde odaklanılmıştır (Şekil 2.10). Bilindiği gibi sınır tabaka civarında akış hızı, hız girişinde önceden tanımlanan hız mertebesindedir. Öte yandan sınır tabakanın içinde meydana gelen hız gradyanlarının modellenebilmesi için sınır tabaka civarındaki ağ boyutu çok küçüktür. Dolayısıyla sabit bir Δt seçiminde CFL parametresi en yüksek değerini sınır tabaka civarında almaktadır.



Şekil 2. 10 CFL sayısının hesaplandığı akış bölgesi

Bu çalışmada zaman adımı karşılaşma periyodunun $1/2^{8}$'u olarak alınmıştır. Seçilen zaman adımı ITTC [51] tarafından önerilen zaman adımından daha küçüktür ve bu çalışmadaki akışın fiziğini daha iyi ifade ederek daha doğru sonuç vereceği düşünülmüştür. Zaman adımının sistematik olarak değiştirilmesiyle elde edilen zaman adımı belirsizliği doğrulama ve gerçekleme bölümünde verilmiştir.

Doğrulama amaçlı gerçekleştirilen sakin sudaki direnç analizlerinde ise ITTC [52]'nin tavsiye ettiği formül kullanılmıştır:

$$\Delta t = 0.005 \frac{L_{WL}}{V} \tag{2.35}$$

2.2.5 Fourier Serisi Formülasyonu

URANS analizlerinden elde edilen sonuçlar zaman düzleminde elde edilir. Zaman düzlemindeki sinyaller frekans düzlemine transfer edebilmek için sinyale ait bütün harmoniklerin bilinmesi gerekir. Fakat TF grafiği doğrusal bir kavram olduğu için, elde edilirken bu sinyallerin birinci harmonik değerleri kullanılır.

Zamana bağlı elde edilen periyodik bir sinyal η(t), sonsuz terimli Fourier serisine açılarak yazılırsa Denklem 2.36 elde edilir.

$$\eta(t) = \eta_0 + \sum_{n=1}^{N} \eta_n \cos(\omega_e t + \beta_n)$$

$$n = 1,2,3\ldots \tag{2.36}$$

Burada, η(t), ölçülen sinyaldir ve Denklem 2.36'daki gibi ayrıklaştırılır. η_0 ise zamana bağlı sinyalin sıfırıncı harmoniğidir ve sinyalin ortalamasına karşılık gelir. ω_n, n. harmoniğe ait frekansı ifade eder. Transfer fonksiyonu doğrusal bir yaklaşım olduğu için her zaman birinci harmonikler göz önüne alınarak hesaplanır ve bu frekans geminin dalga ile karşılaştığı frekanstır: $\omega_1 = \omega_e$.

Geminin direnci ile ilgili hesaplamalar yapılırken ise (Toplam direnç, Dalgalarda ek direnç vb.), zamana bağlı toplam direnç sinyalinin sıfırıncı harmoniği Denklem 2.37 yardımı ile hesaplanmalıdır. Aslında Denklem 2.37 sinyalin ortalamasını ifade eder ve salınım frekansından bağımsızdır.

$$\eta_0 = \frac{1}{T_e}\int_0^{T_e} \eta(t)dt \tag{2.37}$$

Denklem 2.36'da yer alan η_n ve β_n ise sırasıyla n'inci harmoniğe ait genlikler ve faz açılarıdır. Bu değerler Denklem 2.40 ve Denklem 2.41'de yer alan a_1 ve b_1 değerlerinin hesaplanması ve Denklem 2.38 ve Denklem 2.39'da yerine konması ile bulunur. Transfer fonksiyonu elde edilirken n=1'dir.

$$\eta_1 = \sqrt{a_1^2 + b_1^2} \tag{2.38}$$

$$\beta_1 = \arctan\left(\frac{b_1}{a_1}\right) \tag{2.39}$$

$$a_1 = \frac{2}{T_e}\int_0^{T_e} \eta(t)\cos(\omega_e t)dt \tag{2.40}$$

$$b_1 = \frac{2}{T_e}\int_0^{T_e} \eta(t)\sin(\omega_e t)dt \tag{2.41}$$

Bu denklemlerde yer alan T_e örnekleme zamanı olup sinyalin periyoduna karşılık gelir; yani bu geminin dalgalarla karşılaşma periyodudur. Düşey gemi hareketleri dalıp-çıkma hareketi ve baş-kıç vurma hareketi boyutsuz TF değerleri aşağıda verilen Denklem 2.42 ve Denklem 2.43 ile ifade edilir.

$$TF_3 = \frac{\eta_{13}}{A} \tag{2.42}$$

$$TF_5 = \frac{\eta_{15}}{Ak} \tag{2.43}$$

Bu denklemlerde TF_3 dalıp-çıkma hareketinin transfer fonksiyonunu, TF_5 baş-kıç vurma hareketinin transfer fonksiyonunu, A dalga genliğini, k dalga sayısını, η_{13} dalıp-çıkma hareketi sinyalinin birinci harmoniğini ve son olarak η_{15} baş-kıç vurma hareketi sinyalinin birinci harmoniğin göstermektedir.

2.2.6 HAD Gerçekleme Çalışmaları

Sayısal belirsizlik çalışmaları ağ yakınsama metodu (Grid Convergence Method) ile gerçekleştirilmiştir. Bu yöntem ilk defa Roache [53] tarafından önerilmiş ve çeşitli çalışmalarda geliştirilerek uygulanmıştır. Bütün bu gelişmelerin arasından, mevcut çalışmada Çelik vd.,'nin [54] prosedürü kullanılmış ve bu bölümde anlatılmıştır.

İlk olarak, iyileştirme faktörleri r_{21} ve r_{32} Denklem 2.44'de belirtildiği gibi göre ağ sayılarını dikkate alarak hesaplanmıştır. Gerçekleme sayılarında 1 en iyi 3 ise en kötü ağı temsil etmektedir.

$$r_{21} = \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^{1/3} \qquad r_{32} = \left(\frac{N_2}{N_3} \right)^{1/3} \tag{2.44}$$

Sayısal belirsizlik çalışması dalıp-çıkma hareketi için rezonans frekansı olan senaryo 6 için gerçekleştirilmiştir. İki farklı ağ sayısından elde edilen çözümler arasındaki fark Denklem 2.45 kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\varepsilon_{21} = \phi_2 - \phi_1 \qquad \varepsilon_{32} = \phi_3 - \phi_2 \tag{2.45}$$

Yakınsama durumunun göstergesi olan R sayısı Denklem 2.46 kullanılarak hesaplanmıştır.

$$R = \frac{\varepsilon_{21}}{\varepsilon_{32}} \tag{2.46}$$

R sayısı için, 4 farklı senaryo olabilir. Monotonik yakınsama (koşul b) gerçekleme çalışması için en istenilen durum olup çözümün yakınsadığını garanti eder.

-1 < R < 0 Salınımlı yakınsama koşul a

0 < R < 1 Monotonik yakınsama koşul b

R < -1 Salınımlı ıraksama koşul c

R > 1 Monotonik ıraksama koşul d

Görünen mertebe olarak tanımlanan p sayısı Denklem 2.47 ile hesaplanır:

$$p = \frac{\ln\left|\left|\varepsilon_{32} / \varepsilon_{21}\right| + q\right|}{\ln(r_{21})} \tag{2.47}$$

Burada,

$$q = \ln\left(\frac{r_{21} - s}{r_{32} - s}\right) \tag{2.48}$$

$$s = sgn(\varepsilon_{32} / \varepsilon_{21}) \tag{2.49}$$

ile ifade edilir. Eğer iyileştirme faktörleri (r_{21} ve r_{32}) eşit ise q sıfıra eşit olur. Ekstrapole edilmiş değerler ise Denklem 2.50'deki gibi verilmiştir.

$$\phi_{ext}^{21} = (r^p \phi_1 - \phi_2) / (r^p - 1) \tag{2.50}$$

Yaklaşık bağıl hata ve ekstrapole edilmiş bağıl hata Denklem 2.51 ile elde edilir.

$$e_a^{21} = \left|\frac{\phi_1 - \phi_2}{\phi_1}\right| \qquad e_{ext}^{21} = \left|\frac{\phi_{ext}^{12} - \phi_1}{\phi_{ext}^{12}}\right| \tag{2.51}$$

Sonunda, ağ yakınsama indeksi (GCI) Denklem 2.52 ile hesaplanır.

$$GCI_{fine}^{21} = \frac{1.25 e_a^{21}}{r_{21}^p - 1} \tag{2.52}$$

Dalıp-çıkma hareketi için belirsizlik analizi sonuçları Çizelge 2.5 ile verilmiştir.

Çizelge 2. 5 Dalıp-çıkma hareketi için belirsizlik analizi sonuçları

	Ağ Yakınsaması	Zaman Adımı Yakınsaması
φ_1	1.304	1.360
φ_2	1.286	1.297
φ_3	1.311	1.158
R	-0.720	0.450
GCI (İyi ağ için)	4.89 %	4.72 %

2.3 Kısmen Doğrusal Olmayan URANS Modellemesi (URANS-Katsayı)

Bu yöntem, yeni bir URANS yaklaşımı kullanılarak baştan gelen düzenli dalgalar senaryosu için uyarlanmıştır. Çözümlemeler sonucunda dalıp-çıkma ve baş-kıç vurma TF değerleri elde edilmiştir ve dalga koşulları yine IIHR'de yapılan deneylerle aynı alınmış [20]. Mevcut çözüm yönteminde, gemi gövdesine etkiyen toplam kuvvet ve momentler, bozucu ve radyasyon terimlerinin süperpozisyonu olarak düşünülmüştür. Bu terimler URANS yaklaşımı kullanılarak ayrı ayrı hesaplanmıştır. İlk adım olarak, gemi baştan gelen düzenli dalgalara maruz bırakılmış ve harekete sabitlenmiştir. Dalıp-çıkma kuvveti ve baş-kıç vurma momentine ve faz açısına ait sinyaller ilk harmonikleri dikkate alınarak hesaplanmıştır. İkinci adım olarak, gemi geometrisi çeşitli frekanslarda dalıp-çıkma ve baş-kıç vurma yönlerinde harmonik hareket yapmaya zorlanmıştır ve radyasyon terimleri, sinyallerin ilk harmonikleri dikkate alınarak hesaplanmıştır. Son adım olarak, doğrusal iki serbestlik dereceli düşey gemi hareket denklemi kullanarak, dalıp-çıkma ve baş-kıç vurma TF elde edilmiştir. Bu yöntemle elde edilen düşey hareket TF grafikleri, dilim teorisi (Bölüm 2.1), tamamen doğrusal olmayan URANS yaklaşımı (Bölüm 2.2) ve deneysel veriler ile karşılaştırılmıştır.

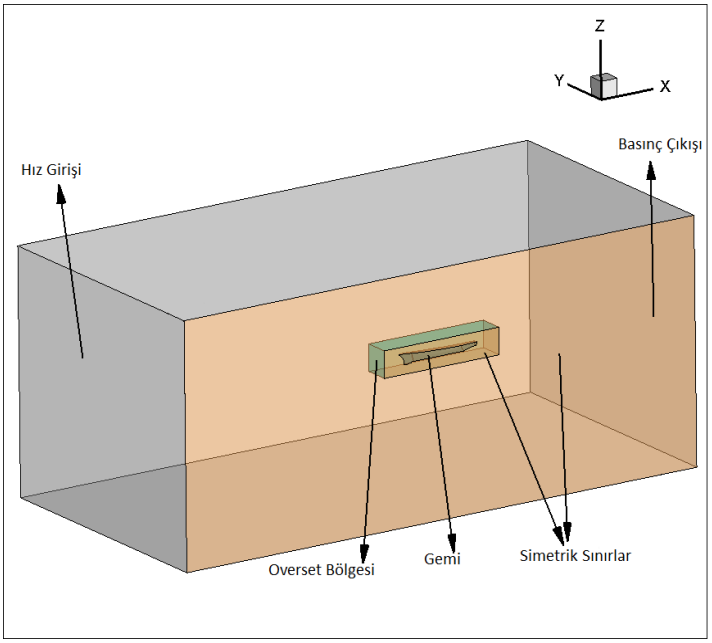
2.3.1 URANS Denklemleri ve Modelleme

Bu kısım Bölüm 2.2.1 ile özdeştir. Yani geminin düşey hareketlerine ait olan radyasyon ve bozucu terimler hesaplanırken URANS yönteminde kullanılan aynı algoritma kullanılmıştır. Fakat bu yöntemde hareket denklemleri DFBI denklemleri yerine Bölüm 2.1'de verilen doğrusal hareket denklemleridir. Hareket denklemlerinin doğrusal olması çözümlemelerdeki hesaplama zamanını Bölüm 2.2' de anlatılan URANS yaklaşımına kıyasla azaltmaktadır. Öte yandan bu yöntem ile elde edilen çözümlemeler Bölüm 2.1'de anlatılan dilim teorisinin TF grafikleri ile karşılaştırıldığında deneyler ile daha iyi bir uyum içinde olduğu belirtilmelidir. Detaylı bilgi Bölüm 2.4' te bulunabilir.

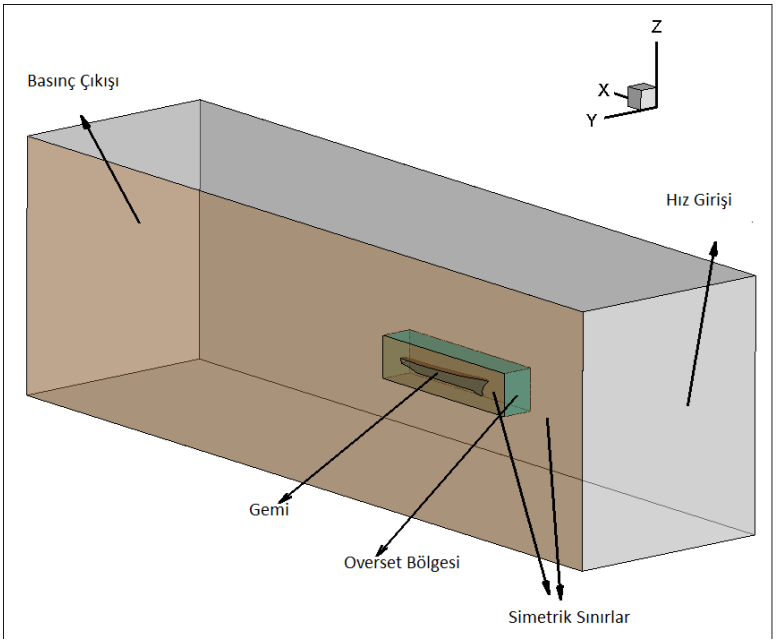
2.3.2 Hesaplama Hacmi ve Sınır Koşulları

Bu çalışmada farklı boyutlarda iki hesaplama alanı kullanılmıştır. Radyasyon kuvvetleri ve momentleri, kare şekilli bir hesaplama alanı kullanılarak hesaplanırken, gelen dalgalardan kaynaklanan kuvvetler ve momentler (bozucu terimler), dikdörtgen şekilli

bir hesaplama alanında hesaplanmıştır (Şekil 2.11 ve Şekil 2.12). Geminin harmonik hareketinin neden olduğu radyasyon dalgaları yatay düzlemde her yönde yayılır. Bu nedenle hesaplamalı hacminin ön ve arka tarafı eşit mesafede tutulmalıdır. Bu nedenle radyasyon kuvvetleri ve momentlerinin hesaplanmasında kare bir alan seçilmiştir. Öte yandan, gemiye gelen dalganın ilerlemesi sadece x yönünde olur. Bu nedenle, bozucu terimlerini hesaplamak için bir dikdörtgen alan tercih edilmiştir. Radyasyon ve difraksiyon problemlerinin her ikisi için bir kare alanın kullanılabilir ancak iki farklı hesaplama hacminin kullanılması CPU zamanı dikkate alındığında daha ekonomiktir. Gemi etrafındaki ağ yapısının her iki çözüm alanı için de aynı olduğu belirtilmelidir. Kare çözüm alanı için, sabit bir Kartezyen koordinat sistemi seçilir. x düzlemi, gemi modelinin draftında başlangıçta sakin su olduğu varsayılan serbest yüzeyi temsil eder. Öte yandan, dikdörtgen çözüm alanı için, x düzlemi, başlangıçta beşinci mertebeden Stokes dalgaları ile temsil edilir.



Şekil 2. 11 Kare hesaplama hacmi için sınır koşulları



Şekil 2. 12 Dikdörtgen hesaplama hacmi için sınır koşulları

Negatif x yüzeyi hız girişi olarak seçilirken, pozitif x yüzeyi basınç çıkışı olarak seçilmiştir. Sınır etkilerinden kaçınmak için negatif y yüzeyi, pozitif z (üst) ve negatif z (alt) yüzeyleri hız girişi olarak tanımlanmıştır. Gemi yüzeyi, normal ve teğet hızların sıfır olduğu kaymayan duvarlar olarak tanımlanmaktadır. Böylelikle, hem kinematik sınır koşulu hem de kaymama koşul, tekne yüzeylerinde karşılanmaktadır. Problem, y = 0'a göre simetrik bir davranışa sahip olduğu için, hesaplama maliyetlerini azaltmak için analizler için hesaplama hacimlerinin sadece yarısı kullanılmaktadır. Bu nedenle, xz düzleminde (y = 0) bulunan yan yüzey, simetrik bir sınır olarak atanmıştır (bkz. Şekil 2.11 ve Şekil 2.12). Hesaplama hacmi boyutları Çizelge 2.6 ve Çizelge 2.7'de verilmiştir.

Çizelge 2. 6 Hesaplama hacmi (Kare)

Sınırlar	Geminin önü	$3L_{WL}$	9.144m
	Geminin arkası	$3L_{WL}$	9.144m
	Tavan	$1L_{WL}$	3.048m
	Taban	$2L_{WL}$	6.098m
	Enine Mesafe	$3.5L_{WL}$	10.688m

Çizelge 2. 7 Hesaplama hacmi (Dikdörtgen)

Sınırlar	Geminin önü	$0.9L_{WL}$	2.743m
	Geminin arkası	$4.2L_{WL}$	12.80m
	Tavan	$0.875L_{WL}$	2.667m
	Taban	$1.25L_{WL}$	3.810m
	Enine Mesafe	$1.75L_{WL}$	5.334m

2.3.3 Ağ Yapısı

Hesaplama hacimleri tamamen hexahedral elemanları kullanılarak sonlu hacimler yöntemi ile ayrıklaştırılmıştır. Geminin etrafına ve serbest yüzeye yakın olarak yerel ağ iyileştirmeleri uygulanmıştır. Hareketli bir cismin etrafındaki akışı çözmek için kullanılan overset ağ tekniği, çalışmada belirtilen tüm analizler için kullanılmıştır. Çalışmada radyasyon kuvveti hesabı için ağ gerçekleme çalışmasında kullanılmak üzere farklı ağ sayıları Çizelge 2.8'de gösterilmiştir. Detaylı bilgi Bölüm 2.3.7 'de verilmiştir.

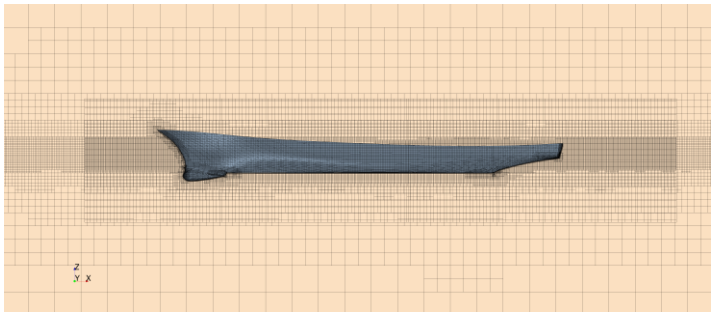
Çizelge 2. 8 Çalışmada kullanılan ağ sayıları

	Coarse Grid (Seyrek Ağ)	Medium Grid (Orta Ağ)	Fine Grid (İyi Ağ)
Ağ sayıları	3.58×10^5	5.54×10^5	9.52×10^5

Gemi etrafındaki ağ yapısı Şekil 2.13'de verilmiştir. Boyutsuz olan ve cismin duvar civarındaki ağ sıklığını belirten y^+ değeri Denklem 2.53 ile hesaplanabilir.

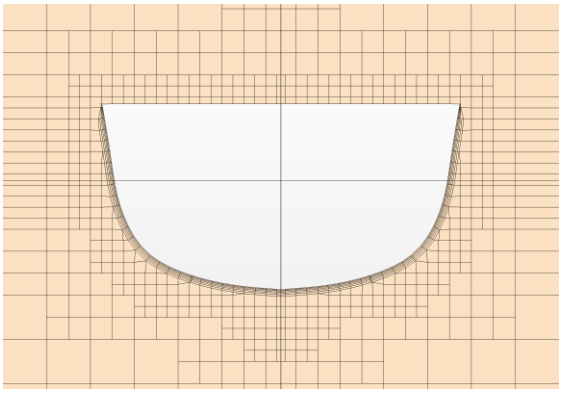
$$y^+ = \frac{u^* y}{\nu} \tag{2.53}$$

Burada u^* duvara en yakın ağdaki teğet hızı, y duvar ile en yakın ağın hacim merkezi arasındaki mesafeyi, ν ise kinematik viskoziteyi ifade etmektedir. Gemi sınır tabakası içinde logaritmik evrensel bir hız profili (all y^+ wall treatment) kullanıldığından, boyutsuz duvar y^+ değerinin ortalama 30-300 arasında kalması için sınır tabaka etrafında hekzahedral bir yapı (prism layer) oluşturulmuştur [49]. Sınır tabaka içerisindeki ağ sayısı sabit bir orandan başlayarak kademeli olarak dış sınırlara doğru arttırılmıştır.



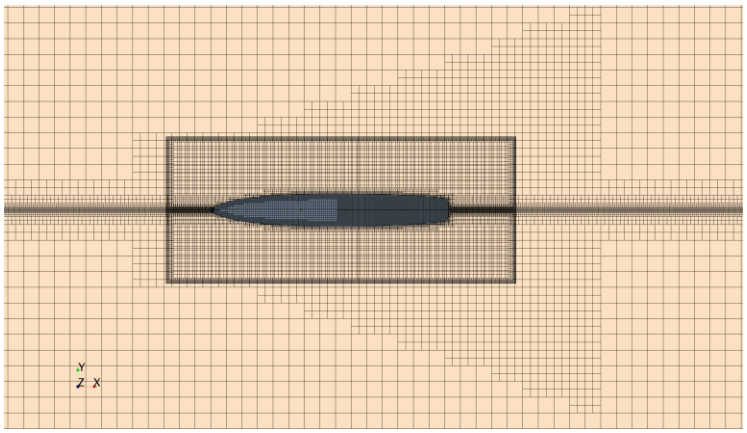
Şekil 2. 13 Tekne etrafındaki ağ yapısı

Gemi orta kesitindeki ağ yapısını göstermek amacı ile x/L=0.60'da enine bir düzlem alınmıştır (Şekil 2.14).



Şekil 2. 14 x/L=0.60 En kesitindeki ağ yapısı

Geminin ilerleme hızından dolayı oluşturacağı Kelvin dalgaları belirli bir açıya (19 ° 28 ') sahip olduğundan a serbest yüzey deformasyonlarını yakalamak için üçgen bir ağ iyileştirme yapısının kullanılması maliyet açısından daha uygundur. Bu nedenle, Şekil 2.15'de gösterildiği gibi dalga paternlerini yakalamak için bir Kelvin dalgası ağ yapısı uygulanmıştır.



Şekil 2. 15 Kelvin dalga sistemi ile uyumlu ağ yapısı

2.3.4 Zaman Adımı Seçimi

Bu kısım Bölüm 2.2.4 ile özdeştir. Yani geminin düşey hareketlerine ait olan radyasyon ve bozucu terimler hesaplanırken URANS yönteminde kullanılan aynı zaman adımı kullanılmıştır. Detaylı bilgi Bölüm 2.3.7 HAD gerçekleme ve valide etme çalışmalarında bulunabilir.

2.3.5 Radyasyon ve Bozucu Terimlerin Hesaplanması

Denklem 2.54'de verildiği gibi zaman alanında lineer düşey hareket denklemleri çözülerek nispeten küçük hareketler ve sinüzoidal girişler için dalıp-çıkma ve baş-kıç vurma hareketleri elde edilebilir:

$$\sum_{j=3,5} (M_{ij} + A_{ij})\ddot{x}_j(t) + B_{ij}\dot{x}_j(t) + C_{ij}x_j(t) = F_i \cos(\omega t + \beta_i) \qquad i = 3,5 \qquad (2.54)$$

Burada M_{ij} kütle veya ataleti, A_{ij} ek kütle katsayısını, B_{ij} sönüm katsayısını, C_{ij} doğrultma katsayısını, F_i bozucu terimleri ve β hareketler arası faz açısını temsil etmektedir. Ek olarak, x_j yer değiştirmeyi, $\dot{x}_j$ hızı ve $\ddot{x}_j$ ivmeyi temsil etmektedir. Denklemde 2.54'deki, geri getirici terimler hariç tüm katsayılar üç adımda URANS yaklaşımı kullanılarak hesaplanır:

(i) Gemi düşey hareketlere sabitlenmişken iken baştan gelen dalgaların dalıp-çıkma ve baş-kıç vurma yönünde oluşturacağı kuvvet ve momentler bütün dalga senaryoları için zaman düzleminde elde edilir. F_3, F_5 ve β faz farkı her bir senaryo için elde edilir.

(ii) Gemi modeli, A genliği ile çeşitli frekanslarda, dalıp-çıkma yönünde salınmaya zorlanır. A_{33}, B_{33}, A_{53} ve B_{53} her bir senaryo için hesaplanır.

(iii) Gemi modeli, $Ak = 0.025$ açısı ile ile çeşitli frekanslarda, baş-kıç vurma yönünde salınmaya zorlanır. A_{55}, B_{55}, A_{35} ve B_{35} her bir senaryo için hesaplanır.

Geri getirici katsayılar bir denizcilik yazılımı ile hesaplanmıştır (bkz. Çizelge 2. 9).

Çizelge 2. 9 Geri getirici terimler

C_{33} (N/m)	9600
C_{35} (N/rad)	963
C_{53}(Nm/m)	963
C_{55} (Nm/rad)	5246

2.3.6 Fourier Serisi Formülasyonu

URANS çözümlemelerinden elde edilen bozucu ve radyasyon terimlerinin frekans düzlemindeki cevaplarının elde edilmesi için Fourier serisi açılımı kullanılmıştır.

Fourier serisi açılımı prosesi bu çalışmanın en önemli parçalarından biridir. Bu yöntem sadece kuvvet ve moment sinyallerini birinci harmoniklerinin hesabında değil ayrıca bu sinyalleri bileşenlerine ayırırken de kullanılır. URANS yaklaşımı ile bu kez elde edilen hareket sinyallerinin cevabını kullanmak yerine elde edilen zamana bağlı kuvvet ve momentler Denklem 2.55 kullanılarak $\eta(t)$ ile ifade edilmektedir.

$$\eta(t) = \eta_0 + \sum_{n=1}^{N} [a_n \cos(\omega_e t) + b_n \sin(\omega_e t)] \quad n = 1,2,3... \tag{2.55}$$

TF konsepti için daha önceden de belirtildiği gibi sadece birinci harmonikler dikkate alınır. Bu yüzden, anlık sinyalin bileşenleri Denklem 2.56 ve Denklem 2.57 kullanılarak hesaplanır:

$$a_1 = \frac{2}{T_e} \int_0^{T_e} \eta(t) \cos(\omega_e t) dt \tag{2.56}$$

$$b_1 = \frac{2}{T_e} \int_0^{T_e} \eta(t) \sin(\omega_e t) dt \tag{2.57}$$

Elde edilen bir sinyalin birinci harmonikleri önceki bölümde belirtildiği gibi Denklem 2.58'ye göre hesaplanabilir.

$$\eta_1 = \sqrt{a_1^2 + b_1^2} \tag{2.58}$$

Öte yandan birim genlikli bir dalga için bozucu terimler Denklem 2.59 kullanılarak hesaplanabilir:

$$F_i = \frac{\eta_1}{A\xi} \tag{2.59}$$

Burada, i=3,5 dalıp-çıkma kuvveti veya baş-kıç vurma momentini göstermektedir. η_1 dalıp-çıkma kuvvetinin veya baş-kıç vurma momentinin birinci harmoniğidir. A dalganın genliğini ifade eder. Eğer dalıp-çıkma kuvveti hesaplanacak ise, ξ = 1, baş-kıç vurma momenti hesaplanacak ise , $\xi = k$ olarak alınır. β faz açısı ise dalıp-çıkma kuvveti ile baş-kıç vurma hareketlerinin ilk harmoniklerinden ölçüm alarak hesaplanır.

Diğer taraftan, zorlanmış dalıp-çıkma ve baş-kıç vurma hareketleri için, radyasyon katsayıları aşağıdaki denklemler yardımı ile hesaplanabilir:

$$A_{ij} = \frac{\frac{b_1}{A\xi} + C_{ij}}{\omega_e{}^2} \tag{2.60}$$

$$B_{ij} = \frac{-a_1}{\omega_e A\xi} \tag{2.61}$$

Burada i=3,5 ve j=3,5 birleşik dalıp-çıkma ve baş-kıç vurma hareketini temsil eder. Bu Denklemlerde , a_1 ve b_1 birinci harmoniklerin kosinüslü ve sinüslü terimlerine karşılık gelir. Burada A hareketin genliğini, A_{ij} , B_{ij} ve C_{ij} ise ek kütle, sönüm ve doğrultma ile ilintili olan hidrodinamik katsayıları ifade eder. Söz konusu zorlamalı hareket dalıp-çıkma ise, ξ = 1, söz konusu hareket baş-kıç vurma hareketi ise ξ =k olarak alınır. Denklem 2.54'ün çözümü ile transfer fonksiyonları TF_3 ve TF_5 Denklem 2.62 ve Denklem 2.63'deki ifadelerin yardımı ile elde edilir:

$$TF_3 = x_3 \tag{2.62}$$

$$TF_5 = \frac{x_5}{k} \tag{2.63}$$

2.3.7 HAD Gerçekleme Çalışmaları

Gerçekleme çalışması HAD çalışmalarının en önemli adımlarından birisidir. Bu bölümde mevcut gemi için sadece gerçekleme çalışması yapılabilmiştir. Çünkü DTMB 5512 modeli için radyasyon ve bozucu terimlerin ayrı ayrı hesaplandığı bir deneysel çalışma literatürde mevcut değildir. Ancak, literatürde deney sonuçları mevcut olduğu için

doğrulama çalışması Wigley gemisinin radyasyon terimleri için yapılmıştır. Bu çalışma bir sempozyumda sunulmuş olup özeti ek A ile verilmiştir.

Bölüm 2.2.7 de yer alan prosedür takip edilerek senaryo 6 için, zorlanmış dalıp-çıkma hareketi için toplam radyasyon kuvveti üzerinden belirsizlik çalışması gerçekleştirilmiştir. Ağ belirsizliği için, zaman adımı *iyi (fine)* olarak seçilmiştir: $T_e/2^8$. Öte yandan, zaman adımı belirsizliği için, ağ sayısı *fine* seçilmiştir (Çizelge 2.10). Gerçekleme çalışmasını sonuçları Çizelge 2.10 ile verilmiştir.

Çizelge 2. 10 Toplam radyasyon kuvveti için sayısal belirsizlik (Senaryo 6)

	Zaman Adımı Yakınsaması	Ağ Yakınsaması
φ_1	63.144	63.144
φ_2	63.592	62.864
φ_3	64.916	64.088
R	0.339	-0.229
%GCI (iyi ağ için)	0.46	0.97

Çizelge 2.10'de görüldüğü gibi zaman adımı için R değeri Bölüm 2.2.7 de anlatılan b koşulunu sağlar (0<R<1). Ancak, ağ belirsizliği için bu değer a koşulunu sağlar (-1<R<0). Bu sebeple, daha iyi ağda hesaplar yaparak salınımın eğilimini görmek amacı ile dördüncü bir çözüm oluşturulmuştur. Elde edilen sonuçlara göre, R değeri hala a koşulunu sağlamaktadır. Bu yüzden, ağ için belirsizlik doğrudan Denklem 2.64 ile hesaplanmıştır.

$$U_k = \frac{1}{2}\left|S_U - S_L\right| \tag{2.64}$$

Denklem (2.65)'te , S_U ve S_L salınımın maksimum ve minimum değerlerdir (64.088N ve 62.864N).

2.4 Yorumlar ve Tartışma

Gemi düşey hareketlerinin URANS yaklaşımı ile hesaplanması kısmından önce, doğrulama amaçlı modelin sakin su direnci hesaplanmıştır. Toplam direnç R_T Denklem 2.65'de gösterildiği gibi iki temel direnç bileşeni olan artık direnç R_R ve sürtünme direncinin R_F toplamı olarak ayrıklaştırılabilir.

$$R_T = R_R + R_F \tag{2.65}$$

Direnç bileşenleri genellikle Denklem 2.67'de yer alan ifade ile boyutsuzlaştırılır.

$$C_X = \frac{R_X}{\frac{1}{2}\rho S V^2} \tag{2.66}$$

Burada x alt indisi herhangi bir direnç bileşenini ifade eder, ρ akışkanın yoğunluğunu, S ıslak yüzey alanını V ise gemi hızını ifade eder. R_R ve R_F Froude (Fn) ve Reynolds (Re) sayısının fonksiyonudur o nedenle aşağıdaki denklem yazılabilir.

$$C_T = C_R(Fn) + C_F(Re) \tag{2.67}$$

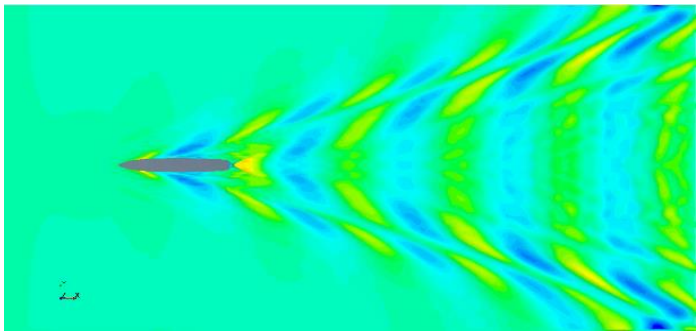
Burada ise C_T toplam direnç katsayısını, C_R artık direnç katsayısını ve C_F sürtünme direnç katsayısı ifade eder. Gemi sınır tabakası yüksek girdaplılık bölgesidir ve içindeki hız profilini doğru elde etmek için sınır tabaka içerisindeki akışı doğru modellemek C_F'i doğru elde etmek açısından çok önemlidir. Bu sebeple gemi duvarı yakınındaki y^+ değerleri seçilen iki denklemli k-ε türbülans modeli için uygun olmalıdır. Analiz boyunda gemi duvarı civarındaki ortalama y^+ değerleri 45 civarında kaydedilmiştir. Bu değer, seçilen türbülans modelinin duvar üzerindeki kayma gerilmelerini doğru hesaplayabilmesi için, 30 - 300 değerleri arasında olduğundan makul olarak değerlendirilmiştir [49]. Not edilmelidir ki sınır tabakasındaki hız profilini hesaplamak için bu çalışmada bütün analizlerde iki tabakalı y+ duvar fonksiyonu kullanılmıştır (Two layer all y+ wall treatment).

Çizelge 2.11'de görüldüğü gibi URANS yaklaşımı ile C_T yüksek bir doğrulukla tahmin edilmiştir. Gui vd., [55] deneysel verileri ile kıyaslandığında deney ile URANS çözümü arasında 0.5%' den daha az bir fark olduğu belirlenmiştir.

Çizelge 2. 11 Deneysel ve Sayısal Hesaplanan C_T değerleri

Sakin Su Direnci	URANS	Deney
	6.725 E-03	6.732 E-03

Fn=0.41' deki model arkasında oluşan Kelvin dalga sistemi Şekil 2.16'da verilmiştir.

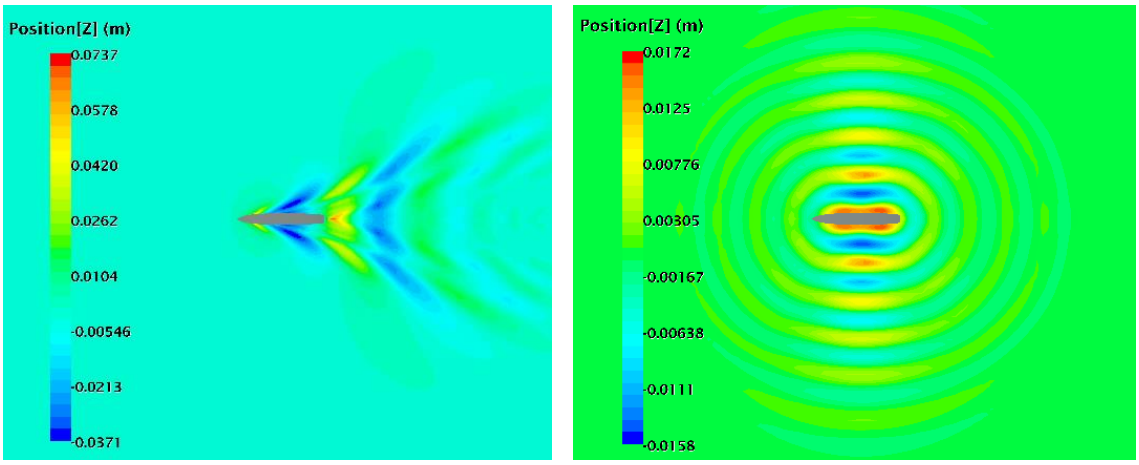


Şekil 2. 16 Kelvin dalga sistemi (Fn=0.41)

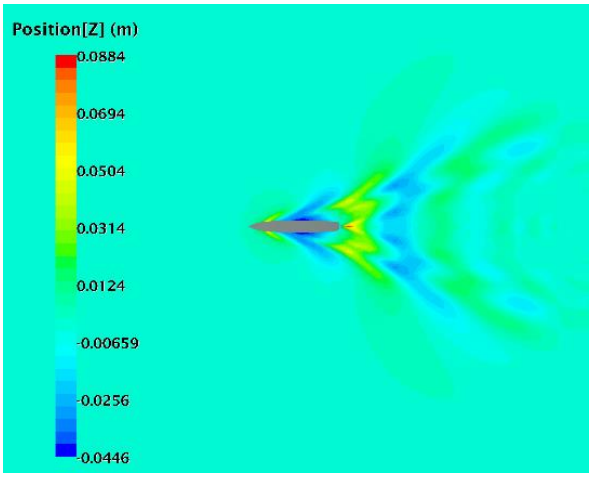
Bu bölümde DTMB 5512 modeli için baştan gelen düzenli dalgalarda üç farklı yöntem ile hesaplanan düşey hareket hesaplamaları tablo ve şekiller ile sunulmaktadır. Elde edilen TF sonuçları, aynı gemi modelinin deneysel verileri ile karşılaştırılmıştır. Dilim teorisi, tamamı ile doğrusal olmayan URANS yöntemi ve URANS Katsayı yöntemi dalıp-çıkma ve baş-kıç vurma TF ile birbirleri ile ve deneysel veri ile mukayese edilmiştir. URANS Katsayı yöntemine ait HAD analizleri, her bir senaryo için üç tam periyotluk bir analiz için 128 GB RAM'li 10 çekirdekli bir işlemcide yaklaşık 11.5 hesaplama saati süresi almıştır. URANS Katsayı yönteminde bozucu ve radyasyon terimleri URANS yaklaşımı ile ayrı ayrı hesaplanmıştır. Ardından, düşey hareketler için doğrusal iki serbestlik dereceli matematiksel model zaman düzleminde çözülmüş ve ilgili transfer fonksiyonları dalıp-çıkma ve baş-kıç vurma hareketleri için çizdirilmiştir. Bu doktora tezinin yenilikçi tarafı URANS Katsayı yönteminin literatüre sunulması olduğundan tartışma bölümü bu yöntem üzerine kurulmuştur. Tartışma bölümünden önce, çalışmadaki radyasyon problemi hakkında bilgi vermek yararlı olabilir. Bilindiği gibi, sonsuz derinlikteki su yüzeyinde sabit bir ilerleme hızı ile hareket eden bir cisim, Kelvin dalga sistemi olarak adlandırılan bir dalga sistemi oluşturur (Şekil 2.17, sol). Öte yandan, düşey düzlemde sıfır ilerleme hızıyla bir cismin harmonik hareketi, bir kaynak gibi davranır ve hareketin merkezinde başlayan ve yayılan dalgalar üretir (Şekil 2.17, sağ). Dikdörtgen alan yerine kare alanın seçilmesinin ana sebebi budur. Öte yandan, bozucu kuvvetlerin hesaplanmasında, dalganın belirli bir ilerleme yönü vardır. Bu nedenle, hesaplama maliyetini azaltmak için dikdörtgen bir alan kullanılmıştır.

Önceki bölümlerde açıklandığı gibi, URANS Katsayı yönteminde gemi modeli, radyasyon terimlerini hesaplamak için sakin suda Fn=0.41 ile ilerlerken 3 ve 5 yönlerinde salınıma zorlanmıştır. Radyasyon terimleri elde edilmeden önce, cisim sıfır ve sıfır olmayan

ilerleme hızlarına zorlanmış dalıp-çıkma hareketinde maruz bırakılarak pozitif ve negatif dalga tepe noktalarını kaydedilmiştir. Bu karşılaştırma için 6. Senaryo seçilmiştir.



Şekil 2. 17 Kelvin dalga sistemi Fn=0.41 (sol, t=8.3601 s, $9T_E$) ve zorlanmış dalıp-çıkma hareketi Fn= 0 (sağ, t=8.3601 s, $9T_E$)



Şekil 2. 18 Zorlanmış dalıp-çıkma hareketi Fn=0.41 (t=8.3601 s, $9T_E$)

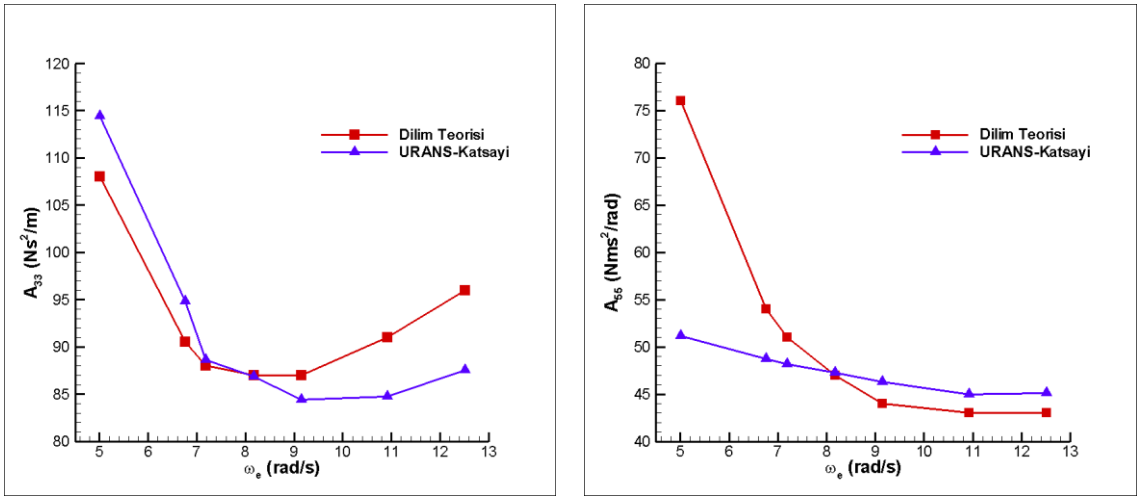
Öncelikle, analiz sakin suda Fn=0.41 için gerçekleştirilmiş ve dalga tepeleri kaydedilmiştir (Şekil 2.17, sol). Daha sonra, model Fn=0 sabit hızda dalıp-çıkma hareketine zorlanmıştır. (Şekil 2.17, sağ) ve yine dalga tepeleri kaydedilmiştir. Fn=0 için yapılan zorlamalı dalıp-çıkma hareketi sonucunda oluşan radyasyon dalgalarının genliği, Fn= 0.41 ilerleme hızındaki modelin oluşturduğu Kelvin Dalgalarının genliğine kıyasla oldukça düşüktür (Çizelge 2.12). Bu nedenle, hem Fn=0.41 ile ilerleyen model hem de Fn=0.41 ile ilerlerken zorlamalı dalıp-çıkma hareketine zorlanan model

senaryosunda Kelvin dalgaları dominanttır. Bu sebeptendir ki Şekil 2.18'de radyasyon dalgalarını gözlemlemek çok zordur.

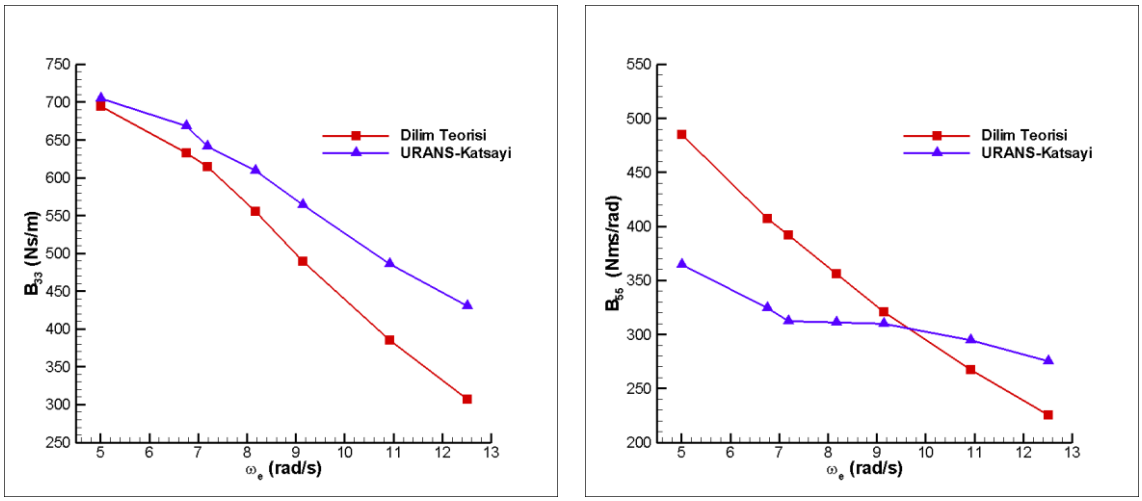
Çizelge 2. 12 Pozitif ve negatif dalga tepeleri (Fn=0 ve Fn=0.41 için)

	Fn=0		Fn=0.41	
	+ve tepe	-ve çukur	+ve tepe	-ve çukur
Çekme testi	-	-	0.0737m	-0.0371m
Zorlanmış dalıp-çıkma	0.0172m	-0.0158m	0.0884m	-0.0446m

Radyasyon ve bozucu terimleri açısından dilim teorisi ile mevcut yöntem (URANS-Katsayı) arasında bir karşılaştırma yapılmıştır. A_{33}'ün hesaplanmasında, mevcut çalışma ile dilim teorisi arasında dikkate değer farklılıklar gözlenmemiştir. Bununla birlikte, nispeten yüksek karşılaşma frekanslarındaki küçük sapmalar Şekil 2.19'dan fark edilebilir. Mevcut çalışma ile dilim teorisi arasındaki farklılıkların, A_{55} için nispeten düşük karşılaşma frekanslarında çok büyük olduğu ve Şekil 2.19'da görüldüğü üzere farklılıkların daha küçük frekanslar için giderek azaldığı gözlemlenmiştir. Dilim teorisi ve URANS-Katsayı arasındaki düşük karşılaşma frekanslarındaki sapmaların ana sebebi, Bölüm 2.1'te orijinal dilim teorisi formülasyonunda nispeten düşük frekanslar için A_{55}'in değerini aşırı derecede etkileyen hız düzeltme terimleridir.

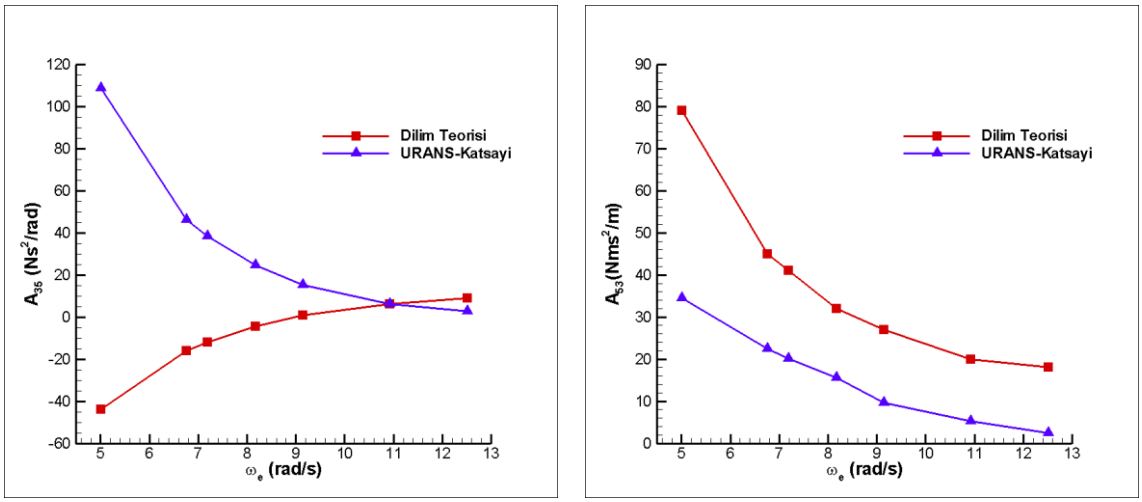


Şekil 2. 19 Ek kütle karşılaştırması (A_{33}, A_{55})

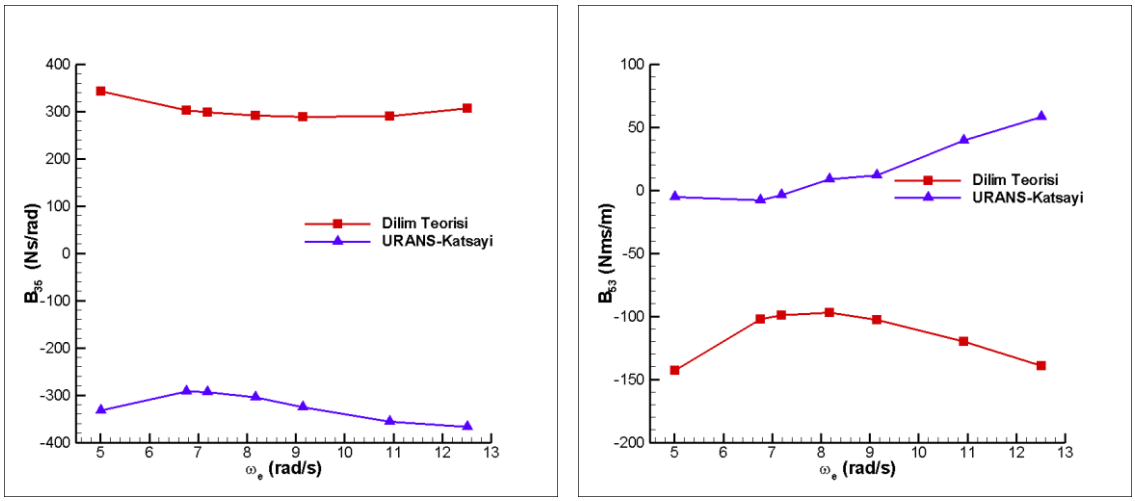


Şekil 2. 20 Sönüm karşılaştırması (B_{33}, B_{55})

Tüm karşılaşma frekans aralığı için B_{33} katsayısı dikkate alındığında, URANS çözümlerinin sönüm değerlerinin URANS yaklaşımının viskoz etkilerden dolayı dilim teorisi ile elde edilenlerden daha büyük olması beklenebilir (Şekil 2.20). Bununla birlikte, B_{55} katsayısının hesaplanmasında, mevcut çalışma ile dilim teorisi arasında nispeten düşük karşılaşma frekanslarında dikkate değer sapmalar görülebilir. Daha önce de belirtildiği gibi, dilim teorisi formülasyonundaki hız düzeltme terimi, düşük frekanslarda sönümleme momentinde bir artışa yol açar, ancak frekanslar yükseldikçe etkisi ortadan kalkar (Şekil 2.20). Dilim teorisi formülasyonlarındaki hız düzeltme terimleri hakkında detaylı bilgi Salvesen vd. [14]' nin çalışmasında bulunabilir.

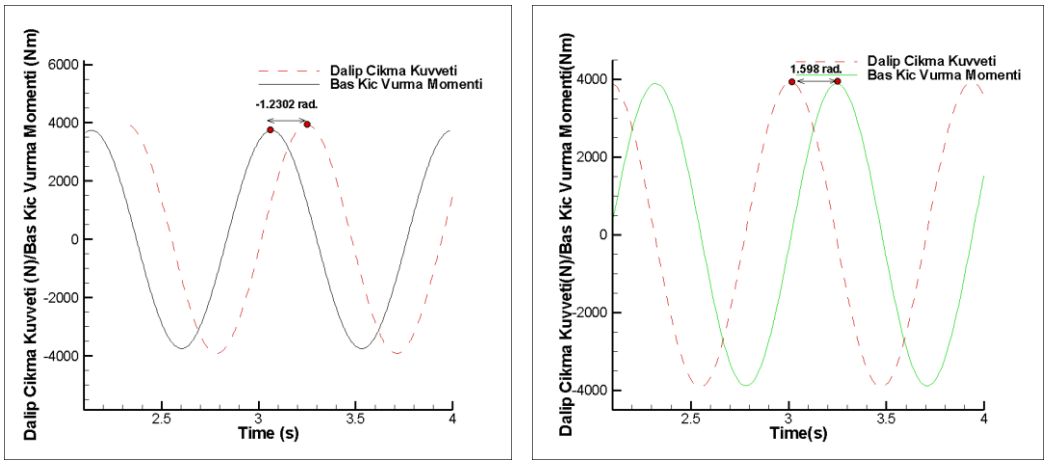


Şekil 2. 21 Ek kütle karşılaştırması (A_{35}, A_{53}).



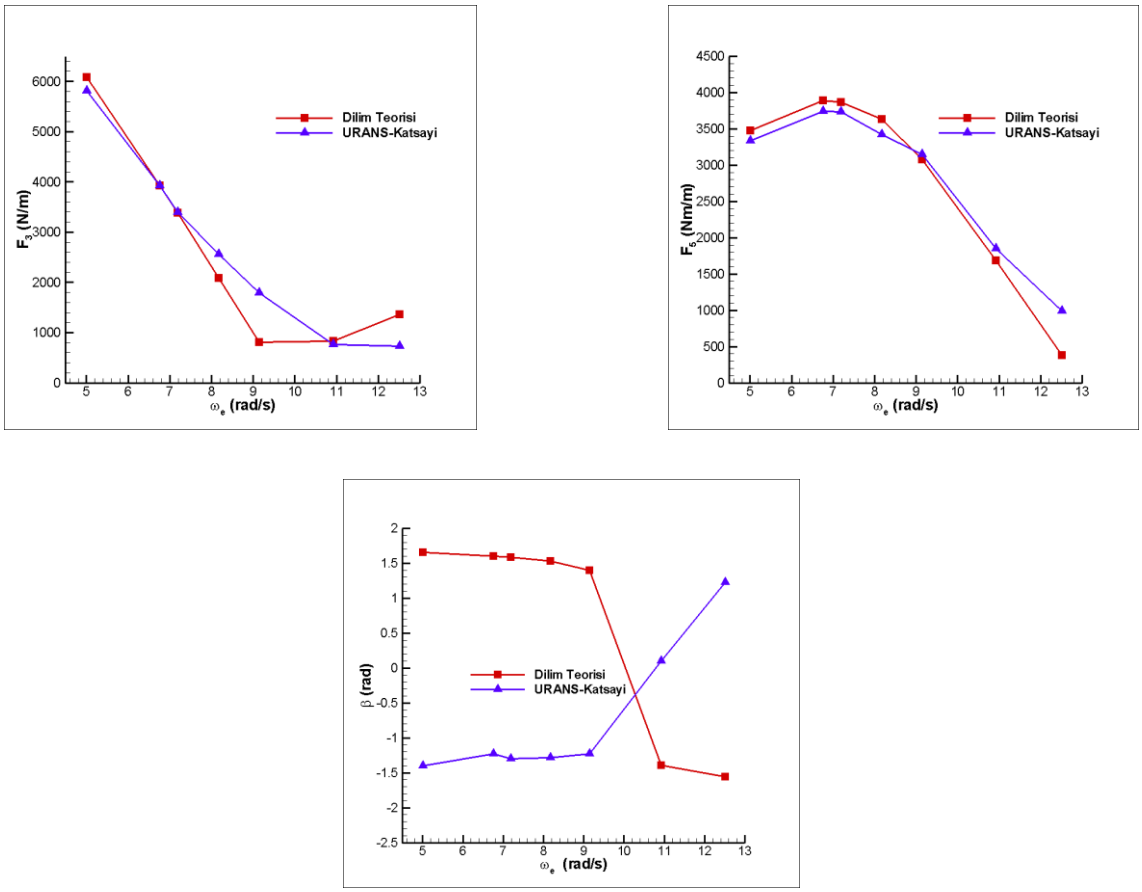
Şekil 2. 22 Sönüm karşılaştırması (B_{35}, B_{53}).

Mevcut çalışmada birleşik (Coupled) katsayıların ve bozucu terimlerin arasındaki faz farklarının hesaplanmasında, aşağıdaki bulgular gözlemlenmiştir. Dilim teorisi hesaplamaları için Salvesen vd. (1970), çalışmalarında koordinat sistemi x, ileri hız yönü ile aynı tanımlanmıştır. Bununla birlikte, bu çalışmada, x ve ileri hız yönleri, karşıt olarak tanımlanmaktadır (Şekil 2.11 ve Şekil 2.12). Koordinat sistemlerinin tanımındaki farklılıklar, Şekil 2.21 ve Şekil 2.22'de görüldüğü gibi birleşik katsayıları elde edilirken sapmalara neden olur. Dalıp-çıkma kuvveti ile baş-kıç vurma momenti arasındaki faz açısı da bu durumdan dikkate değer bir sapma ile etkilenir. Senaryo 6 için, URANS-Katsayı ve dilim teorisinin birinci harmoniği dikkate alınarak zaman serileri elde edilen dalıp-çıkma kuvveti ve baş-kıç vurma momenti birim genlikli dalga için Şekil 2.23'de gösterilmiştir. Görülebileceği gibi, dalıp-çıkma kuvveti ile baş-kıç vurma momenti arasındaki faz açısı URANS- Katsayı ve dilim teorisi için zıt işaretlere sahiptir. Sonuç olarak, hareket denklemlerinde yer alan birleşik katsayıların ve zorlayıcı terim faz farkının işaretlerini seçilen koordinat sistemi belirlemektedir. Bu işaret farklılıkları denklemin çözümünü etkilememektedir.



Şekil 2. 23 Zaman düzleminde 6. Senaryo için URANS-Katsayı (sol) ve Dilim teorisi (sağ) Sonuçları

Bozucu terimlerinin büyüklükleri için, sapmalar nispeten düşük karşılaşma frekanslarında çok küçüktür. Bununla birlikte, karşılaşma frekansları arttıkça, URANS-Katsayı ve dilim teorisi arasındaki farklılıklar, Şekil 2.24'de gösterildiği gibi, yüksek frekanslardaki doğrusal olmayan etkiler nedeniyle artmaktadır.



Şekil 2. 24 Faz açıları ile birlikte bozucu terimlerin karşılaştırılması

URANS-katsayı yaklaşımı ile elde edilen tüm katsayılar Çizelge 2.13'de verilmiştir.

Çizelge 2. 13 URANS Katsayı yöntemi ile elde edilen katsayılar

Senaryo No	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**
$\mathbf{A_{33}}$ (Ns^2/m)	87.54	84.76	84.44	86.86	88.65	94.79	114.44
$\mathbf{B_{33}}$(Ns/m)	430.69	485.67	563.73	609.93	641.81	668.55	705.17
$\mathbf{A_{53}}$(Nms^2/m)	2.46	5.23	9.58	15.52	20.17	17.93	34.46
$\mathbf{B_{53}}$(Nms/m)	58.34	39.29	11.68	8.57	-3.74	-18.73	-5.47
$\mathbf{A_{35}}$(Ns^2/rad)	2.58	6.22	15.32	24.06	38.19	46.49	108.62
$\mathbf{B_{35}}$(Ns/rad)	-367.62	-355.65	-325.87	-305.05	-293.2	-291.39	-331.19
$\mathbf{A_{55}}$(Nms^2/rad)	45.13	44.97	46.26	47.24	48.18	48.72	51.15
$\mathbf{B_{55}}$(Nms/rad)	275.32	294.82	309.17	311.12	312.71	324.93	364.08
$\mathbf{F_3}$ (N/m)	728.43	765.19	1797.84	2558.53	3397.45	3923.17	5814.98
$\mathbf{F_5}$(Nm/m)	986.32	1846.13	3145.64	3419.43	3730.34	3743.27	3336.10
β(rad.)	-1.22	-0.10	1.23	1.28	1.30	1.23	1.40

BÖLÜM 3

GEMİ DÜŞEY HAREKETLERİNİN OPTİMAL KONTROLÖR İLE AZALTILMASI

Bu doktora tez çalışmasının ikinci amacı şiddetli deniz durumunda kontrol algoritmasını kullanarak gemilerin düşey ivmelenmesini azaltmaktır. İncelenecek motoryat formunun baştan gelen karışık dalgalarda, H_S=1 metre DD (deniz durumu) için ve otuz dakikalık bir gemi yolculuğu için geminin baş, orta ve kıç lokasyonlarda elde edilen deniz tutması indeks değerlerinin tasarlanan kontrolör ile düşürülüp daha konforlu bir yolculuk elde etmesi hedeflenmektedir. Ek kütle ve sönüm değerlerini frekans düzleminde elde etmek için Frank-Close Fit yöntemini kullanan in-house bir kod kullanılmıştır [13, 56]. Hareket denklemindeki üç boyutlu gemi geometrisi için hidrodinamik katsayıları elde etmek için orijinal dilim teorisi kullanılmıştır [14]. Akışkan hafıza etkileri için konvolusyon integralleri doğrudan hesaplanmıştır. Geri getirme terimleri doğrusal olarak kabul edilmiş ve geometrik bilgilerle kolayca hesaplanmıştır. Dalga kaynaklı yükler, frekans düzleminde lineer süperpozisyon prensibi ile elde edilmiş, yaygın kullanılan bir gerçekleştirme tekniği ile zaman düzleminde ifade edilmiştir. Çalışmada dalga etkisinde modellenen geminin düşey ivmelerinin azaltılması için tüm durum değişkenlerinin ölçülmesi ile durum geri beslemeli kontrolör ve pratikte ölçülmesi daha kolay durum değişkenlerinin kullanıldığı statik durum geri beslemeli kontrolör tasarımı gerçekleştirilmiştir. Önerilen optimal kontrolör tasarlanırken, dışbükey optimizasyon temelinde DME yaklaşımı kullanılmıştır. Öncelikle lineer zamanla değişmeyen sistemin kararlılığı uygun bir enerji fonksiyonu seçimi ile DME formunda elde edilmiştir. Daha sonra ise kontrolörcünün performansı kapalı çevrim sistemin bozucu girişlerinden performans çıkışlarına olan transfer fonksiyonları

matrisinin L_2 kazancını minimize edecek şekilde tasarıma eklenmesi ile hem durum hem de statik çıkış geri-beslemeli kontrolörün sentez denklemleri elde edilmiştir. Geliştirilen statik çıkış geri beslemeli kontrolör, operasyon anında bozucu bastırma problemine getirdiği ölçüm kolaylığı ile durum geri beslemeli kontrolöre nazaran pratikte uygulanabilir bir kontrol metodudur. Motoryatın baş ve kıç tarafında yer alan foillerin aktif hareketleri ile gerçekleştirilen benzetim çalışmaları ile önerilen çıkış geri-beslemeli kontrolörün tatmin edici bir bozucu bastırma performansına sahip olduğu ve durum geri-beslemeli kontrolöre göre aynı kontrol performansını daha az ölçüm bilgisi ile sağladığı gösterilmiştir.

Yapılan kontrol çalışması temel olarak incelendiğinde bazı özellikleri bulunmaktadır. Bu çalışmada yapılan kabuller şöyle sıralanabilir:

- Düzenli dalgaların sonlu sayıda sinüzoidal dalganın toplamı olduğu kabulü ile transfer fonksiyonları yaklaşımı kullanılmıştır.
- Çalışmada gemi hızı sabitlenmiştir ($\mathrm{Fn} = \frac{\mathrm{V}}{\sqrt{\mathrm{gL_{WL}}}} = 0.25$). Burada V gemi hızını, g yerçekimi sabitini, L_{WL} ise yüklü su hattı boyunu temsil etmektedir.
- Çalışmada DD sabitlenmiştir (H_S=1 metre).

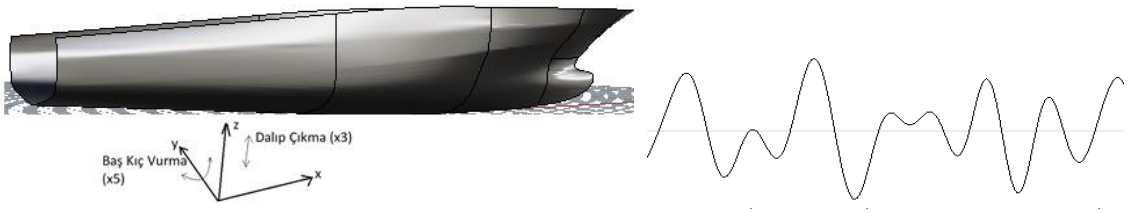
Bölüm 3'ün geri kalan bölümü, şu şekilde organize edilmiştir. 3.1'de, çalışmanın matematik modeli verilmiştir. Statik çıkış ve durum geri beslemeli kontrolörün sentez denklemleri Bölüm 3.2 ve Bölüm 3.3'te verilmiştir. Bölüm 3.4'te modellenen geminin dalga etkisi ile oluşan düşey ivmelerinin azaltılması için tasarlanan kontrolörün performansı yapılan nümerik benzetim çalışmalarıyla test edilmiştir.

Notasyon: Bu çalışma boyunca standart bir gösterim kullanılmıştır. $\Re$ reel sayılar kümesini, $\Re^{n\times n}$ ise $\mathrm{n}\times\mathrm{n}$ boyutlu reel matrislerin kümesini göstermektedir. diag, diyagonal matrisleri ifade etmektedir. Birim matris eye veya I, sıfır matris ise zeros veya 0 olarak gösterilmiştir. $\mathrm{X} > 0\ (\geq, <0)$ gösterimi X 'in pozitif tanımlı (pozitif yarı tanımlı, negatif tanımlı) matris oluğunu göstermektedir.

3.1 Matematiksel Model

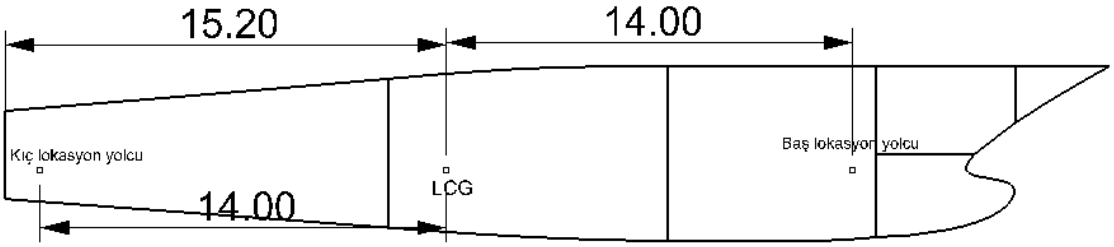
3.1.1 Gemi Modeli

Çalışmada kullanılan motoryat formu 38 metre tam boy, 8.70 metre genişlik ve 308.55 tonluk bir kütleye sahiptir. Geminin statik durumda su altı hacim merkezi (L_{CB}) ile ağırlık merkezi (L_{CG}) aynı yerde olup gemi kıçından başa doğru 15.208 metredir. Ayrıca, geminin baş-kıç vurma kütle atalet momenti, gemi baş-kıç vurma hareketi atalet yarıçapının gemi su hattı boyunun dörtte biri olduğu kabulü göz önüne alınarak 21771.28 $tonm^2$ olarak hesaplanmıştır. Geminin Fn=0.25 için ilerleme hızı (V) 8.823 knots'dır. Şekil 3.1'de baştan gelen dalgalar ($\mu = 2\pi$) ile zorlanan gemi global koordinat sisteminde gösterilmiştir. Çalışmada, x_3 notasyonu dalıp-çıkma hareketini, x_5 notasyonu ise baş-kıç vurma hareketini göstermektedir.



Şekil 3. 1 Fiziksel modelin tanıtılması

Şekil 3.2'de görüldüğü gibi, hareketi incelenen konum, gemi başı, ortası (LCG'nin pozisyonu) ve kıçı olarak belirlenmiştir. Baş ve kıç yolcu lokasyonları gemi ortasından sırası ile negatif ve pozitif x yönünde 14 metre mesafededir. Geminin düşey hareketlerini kontrol edecek eyleyicilerin konumu ise sırası ile gemi ortasından pozitif x yönünde 15.5 metre ve negatif x yönünde 13.5 metre mesafededir. Hesaplanacak kontrol kuvvetinin iki farklı lokasyondan düşey yönde tekil birer yük olarak üretileceği varsayılmıştır.



Şekil 3. 2 Yolcu ve eyleyici lokasyon bilgileri

3.1.2 Karışık Denizde Düşey Gemi Hareketleri

Bu çalışmada, Denklem 3.1 ve Denklem 3.2' de yer alan iki serbestlik dereceli Cummins denklemleri gemi düşey hareketlerini elde etmek için çözülmüştür. Geminin bir V ilerleme hızına sahip olduğu belirtilmelidir. Burada 3 ve 5 indisleri sırası ile dalıp-çıkma ve baş-kıç vurma hareketlerini temsil etmektedir.

$$\left(\mathrm{M}+\mathrm{A}_{33}^{\infty}\right)\ddot{\mathrm{x}}_3(t)+\mathrm{B}_{33}(\mathrm{V})\dot{\mathrm{x}}_3(t)+\int_0^t \mathrm{K}_{33}(t-\tau)\dot{\mathrm{x}}_3(\tau)d\tau+\mathrm{C}_{33}\mathrm{x}_3(t)+\mathrm{A}_{35}^{\infty}\ddot{\mathrm{x}}_5(t)+\mathrm{B}_{35}(\mathrm{V})\dot{\mathrm{x}}_5(t) \\ +\int_0^t \mathrm{K}_{35}(t-\tau)\dot{\mathrm{x}}_5(\tau)d\tau+\mathrm{C}_{35}\mathrm{x}_5(t)=\mathrm{F}_3(t) \tag{3.1}$$

$$\left(\mathrm{I}_5+\mathrm{A}_{55}^{\infty}\right)\ddot{\mathrm{x}}_5(t)+\mathrm{B}_{55}(\mathrm{V})\dot{\mathrm{x}}_5(t)\int_0^t \mathrm{K}_{55}(t-\tau)\dot{\mathrm{x}}_5(\tau)d\tau+\mathrm{C}_{55}\mathrm{x}_5(t)+\mathrm{A}_{53}^{\infty}\ddot{\mathrm{x}}_3(t)+\mathrm{B}_{53}(\mathrm{V})\dot{\mathrm{x}}_3(t) \\ \int_0^t \mathrm{K}_{53}(t-\tau)\dot{\mathrm{x}}_3(\tau)d\tau+\mathrm{C}_{53}\mathrm{x}_3(t)=\mathrm{F}_5(t) \tag{3.2}$$

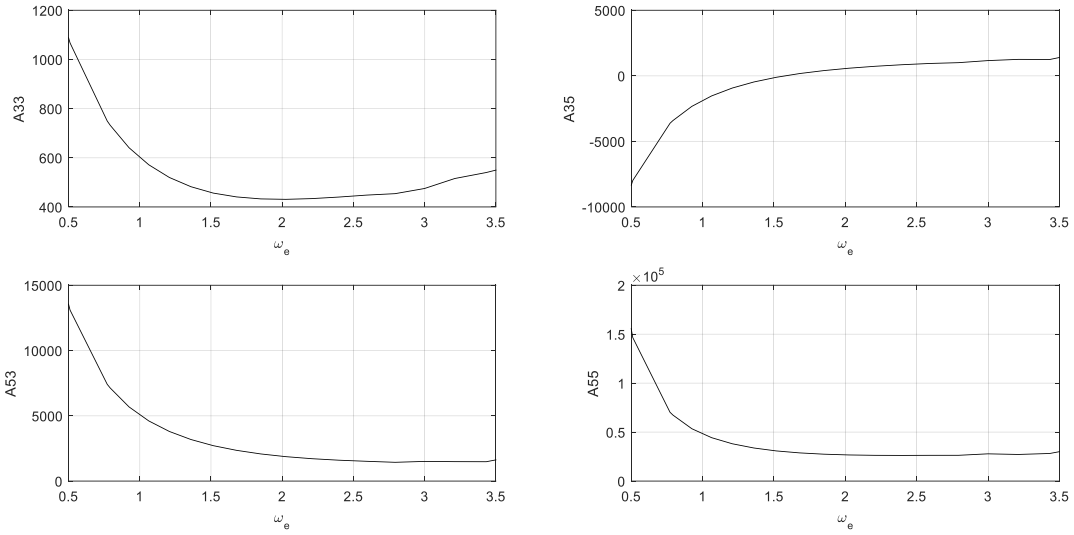
Burada,

$\ddot{\mathrm{x}}_3$: = Dalıp-çıkma ivmesi, $\dot{\mathrm{x}}_3$: = Dalıp-çıkma hızı, x_3 : = Dalıp-çıkma hareketi, $\ddot{\mathrm{x}}_5$: = Baş-kıç vurma ivmesi, $\dot{\mathrm{x}}_5$: = Baş-kıç vurma hızı, x_5 : = Baş-kıç vurma hareketi, F_3 : = Dalga kaynaklı dalıp-çıkma kuvveti, F_5 : = Dalga kaynaklı baş-kıç vurma momenti, M : = Gemi kütlesi, I_5 : = Baş-kıç vurma hareketi için kütle atalet momenti, A_{33}^{∞}: = Sonsuz frekansta dalıp-çıkma kaynaklı dalıp-çıkma ek kütlesi, K_{33}: = Dalıp-çıkma hareketi için dalıp-çıkma kaynaklı darbe cevap fonksiyonu veya geciktirme fonksiyonu, C_{33}: = Dalıp-çıkma kaynaklı dalıp-çıkma geri getirme katsayısı, A_{35}^{∞}: = Sonsuz frekansta baş-kıç vurma kaynaklı dalıp-çıkma ek kütlesi, K_{35}: = Dalıp-çıkma hareketi için baş-kıç vurma kaynaklı darbe cevap fonksiyonu veya geciktirme fonksiyonu, C_{35}: = Baş-kıç vurma

kaynaklı dalıp-çıkma geri getirme katsayısı, A_{55}^{∞}: = Sonsuz frekansta baş-kıç vurma kaynaklı baş-kıç vurma ek kütlesi, K_{55}: = Baş-kıç vurma hareketi için baş-kıç vurma kaynaklı darbe cevap fonksiyonu veya geciktirme fonksiyonu, C_{55}: = Baş-kıç vurma kaynaklı baş-kıç vurma geri getirme katsayısı. A_{53}^{∞}: = Sonsuz frekansta dalıp-çıkma kaynaklı baş-kıç vurma ek kütlesi, K_{53}: = Baş-kıç vurma hareketi için dalıp-çıkma kaynaklı darbe cevap fonksiyonu veya geciktirme fonksiyonu C_{53}: = Dalıp-çıkma kaynaklı baş-kıç vurma geri getirme katsayısını ifade etmektedir. $B_{33}(V)$, $B_{35}(V)$, $B_{55}(V)$ ve $B_{53}(V)$ terimleri gemi ilerleme hızına sahip olduğu için Cummins denklemlerinde yer alır ve Riemann- Lesbesque Lemma [57] kullanılarak sonsuz frekanstaki sönüm değerleri olarak ifade edilir. Bu nedenle, $B_{ij}(V)=B_{ij}(\infty)$ olarak elde edilir. Burada, i=3,5 ve j=3,5. $B_{33}(V)$, $B_{35}(V)$, $B_{55}(V)$ ve $B_{53}(V)$ terimleri dilim teorisi kullanılarak sırasıyla 0 kNs/m, 3200 kNs, -2000 kNs ve 0 kNsm olarak hesaplanmıştır. Ek kütlenin sonsuz frekanstaki değeri sadece geminin formuna bağlıdır ve Şekil 3.3' te verilen grafiklerden okunabilir. Veya, Ogilvie' nin ifadeleri baz alınarak [58], ek kütlenin sonsuz frekanstaki değeri Fourier dönüşümlerinin direkt uygulaması ile Denklem 3.3'deki gibi hesaplanabilir.

$$A_{ij}^{\infty} = \frac{1}{\omega_e}\int_0^{\infty}[K_{ij}(t) + \frac{2}{\pi}\int_0^{\infty} B_{ij}(\infty)\cos(\omega_e t)d\omega_e]\sin(\omega_e t)dt + A(\omega_e) \qquad (3.3)$$

Burada i=3,5 ve j=3,5. Eğer ω_e gemi doğal frekansına yakın bir değerde seçilirse A_{33}^{∞}, A_{35}^{∞}, A_{53}^{∞} ve A_{55}^{∞} terimleri sırasıyla: 625 kNs^2/m, 1500 kNs^2, 1600 kNs^2 ve 36000 kNms^2 olarak hesaplanır.

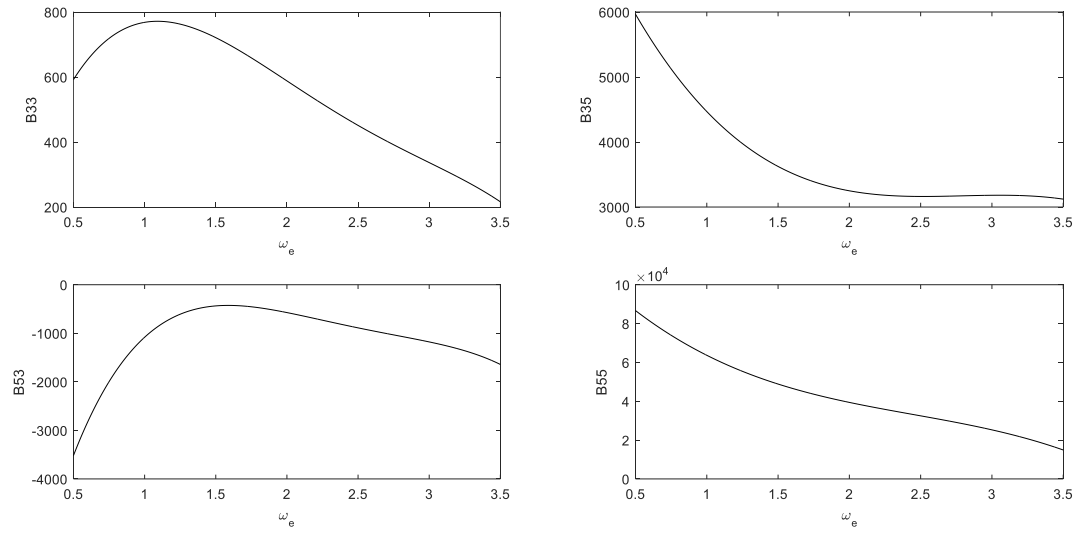


Şekil 3. 3 Ek kütle- ω_e grafikleri.

Burada $K_{ij}(t)$ anlık darbe cevap fonksiyonu veya geciktirme fonksiyonu olarak adlandırılır ve birleşik baş-kıç vurma- dalıp-çıkma hareketi için Denklem 3.4 ile hesaplanabilir:

$$K_{ij} = \frac{2}{\pi}\int_0^{\infty}[B_{ij}(\omega_e) - B_{ij}(\infty)]\cos(\omega_e t)d\omega_e \tag{3.4}$$

i=3, 5 and j=3, 5. Bu denklemde yer alan sönüm değerleri dilim teorisi yardımı ile Şekil 3.4' te gösterildiği gibi hesaplanmıştır.



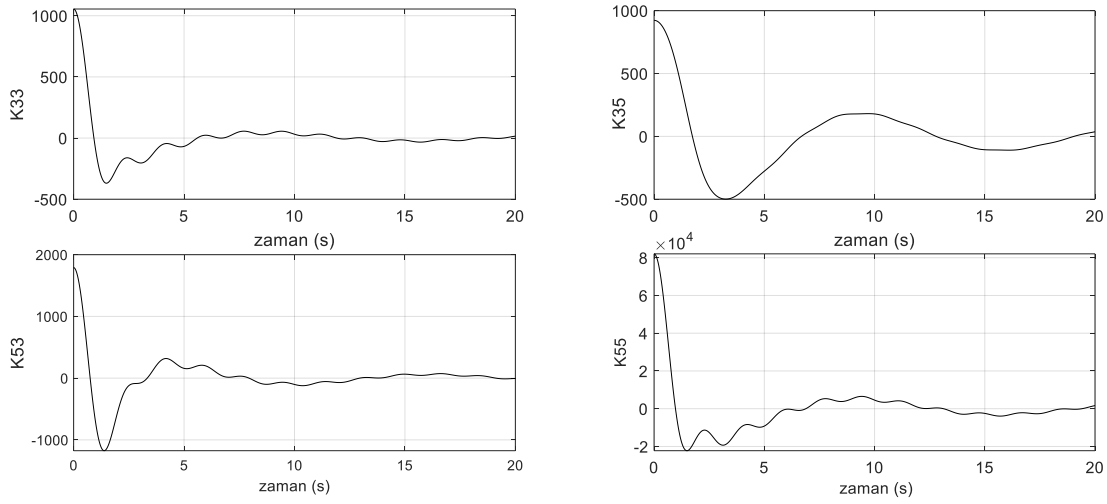
Şekil 3. 4 Sönüm- ω_e grafikleri

Mevcut çalışmada, anlık darbe fonksiyonlarını hesaplarken integraller belirli bir frekans aralığında hesaplanmıştır. 0.5 rad/s' nin altındaki frekanslar dilim teorisinin teorik

kısıtları sebebi ile hesaba dâhil edilmemiştir. 3.5 rad/s'nin üzerindeki frekanslar ise enerji barındırmadığı için dikkate alınmamıştır. Bir başka ifade ile geciktirme fonksiyonlarının hesabında 0.5-3.5 rad/s dışındaki frekanslar filtrelenmiştir. Bu sebeple,

$K_{ij}(t) = \frac{2}{\pi}\int_0^{\infty}[B_{ij}(\omega_e) - B_{ij}(\infty)]\cos(\omega_e t)d\omega_e \cong \frac{2}{\pi}\int_{0.5}^{3.5}[B_{ij}(\omega_e) - B_{ij}(\infty)]\cos(\omega_e t)d\omega_e$ ile ifade edilmiştir.

Cummins denklemlerinin çözümünde kullanılacak anlık darbe fonksiyonları Şekil 3.5'te verilmiştir.



Şekil 3. 5 Elde edilen anlık darbe fonksiyonları

Denklem 3.1 ve Denklem 3.2' de yer alan konvolusyon integrallerin hesaplanmasında Denklem 3.5 ve Denklem 3.6'da yer alan yaklaşım kullanılmıştır. Eğer konvolusyon integralleri iki ek parça ile ifade edilirse aşağıda yer alan ifadeler elde edilir:

$$\eta_1 = \int_0^t K_{33}(t-\tau)\dot{x}_3(\tau)d\tau + \int_0^t K_{35}(t-\tau)\dot{x}_5(\tau)d\tau \quad (3.5)$$

$$\eta_2 = \int_0^t K_{53}(t-\tau)\dot{x}_3(\tau)d\tau + \int_0^t K_{55}(t-\tau)\dot{x}_5(\tau)d\tau \quad (3.6)$$

Kurniawan vd. [59], Kashiwagi [60] ve Taghipour vd. [61] Denklem 3.5 ve Denklem 3.6'nın Denklem 3.7 ve Denklem 3.8'deki gibi hesaplanabileceğini göstermişlerdir:

$$\eta_1 = \sum_{n=0}^{N} K_{33}(n\Delta t)\dot{x}_3(t-n\Delta t)\Delta t + \sum_{n=0}^{N} K_{35}(n\Delta t)\dot{x}_5(t-n\Delta t)\Delta t \quad (3.7)$$

$$\eta_2 = \sum_{n=0}^{N} K_{53}(n\Delta t)\dot{x}_3(t - n\Delta t)\Delta t + \sum_{n=0}^{N} K_{55}(n\Delta t)\dot{x}_5(t - n\Delta t)\Delta t \tag{3.8}$$

Burada zaman adımı sayısı $N = \frac{t^1}{\Delta t}$ olarak belirlenir. Δt zaman adımı olup 0.01 olarak belirlenmiştir. t^1 ise konvolusyon integrallerinin etkisini gösterdiği süre olarak belirlenmiş olup akışkan hafıza etkilerini iyi temsil etmek amacı ile bu çalışmada 20s olarak alınmıştır.

Cummins denklemlerinde yer alan geri getirici terimler frekanstan bağımsız olup geometrik bilgiye dayalı aşağıda yer alan hesaplamalar ile elde edilmiştir.

$$C_{33} = \rho g \int_{-L/2}^{L/2} b \, dx = \rho g A_{WP} \tag{3.9}$$

$$C_{35} = C_{53} = -\rho g \int_{-L/2}^{L/2} xb \, dx = -\rho g M_{WP} \tag{3.10}$$

$$C_{55} = \rho g \int_{-l/2}^{L/2} x^2 b \, dx = \rho g I_{WP} \tag{3.11}$$

C_{33}, C_{35}, C_{53} ve C_{55} katsayıları sırasıyla 2201.8 kN/m, 3367.4 kN, 3367.4 kN ve 149803.7 kNm olarak elde edilmiştir. Zorlayıcı dalga terimlerinin hesaplanması için Denklem 3.12 ile verilen iki parametreli Bretschneider Spektrumu kullanılmıştır ve spektrum parametreleri Çizelge 3.1 ile verilmiştir [62]. A ve B parametreleri Denklem 3.13 ve Denklem 3.14 ile elde edilebilir.

$$S_\zeta(\omega) = A\omega^{-5}\exp\left(-\frac{B}{\omega^4}\right) \tag{3.12}$$

$$A = 487.75\frac{H_S^2}{T_m} \tag{3.13}$$

$$B = \frac{1948.18}{T_m^4} \tag{3.14}$$

Burada H_S karakteristik dalga yüksekliğini T_m ise modal periyodu ifade etmektedir. Gemi karışık deniz ile Denklem 3.15'de ifadesi verilen ω_e, karşılaşma frekansı ile karşılaşır.

$$\omega_e = \omega + (\frac{\omega^2 V}{g}) \tag{3.15}$$

$$\omega^2 = gk\tanh(kd) \tag{3.16}$$

$$k = (\frac{2\pi}{\lambda}) \tag{3.17}$$

Burada ω dalga frekansını ifade eder. Denklem 3.16 düzenli bir dalga için geçerli dispersiyon ilişkisini ortaya koyar. Bu çalışmada derin su kabulü yapıldığından, d su derinliğinin sonsuza gitmesi, tanh(kd) fonksiyonun 1'e yaklaşması ile $\omega^2 = gk$ elde edilir ve derin su için frekans-dalga boyu arasındaki ilşikiyi tanımlamak için kullanılır. Denklem 3.17'de yer alan, k dalga sayısını, λ dalga boyunu ifade eder. Eğer gemi bir ilerleme hızını sahip ise dopler etkisi ile dalga spektrumu enerjisi Denklem 3.18 ile ifade edilir.

$$S_\zeta(\omega_e) = \frac{S_\zeta(\omega)}{1 + \frac{2\omega V}{g}} \tag{3.18}$$

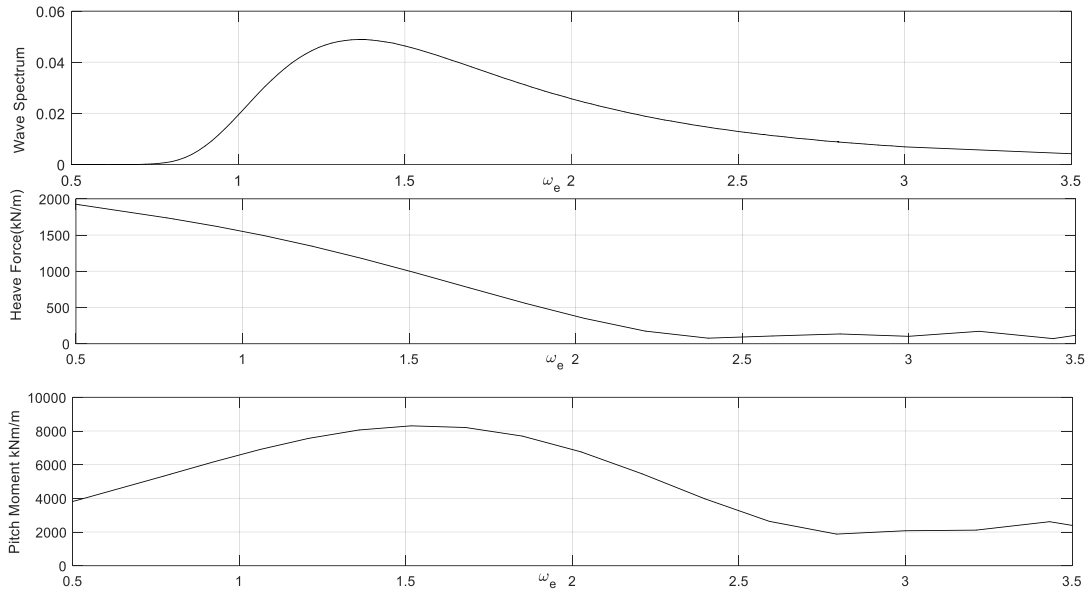
Çizelge 3. 1 Dalga spektrumu karakteristikleri

Gözlemlenen Dalga Yüksekliği H_s (m.)	**Modal Periyot(s.)**
1.00	6.478

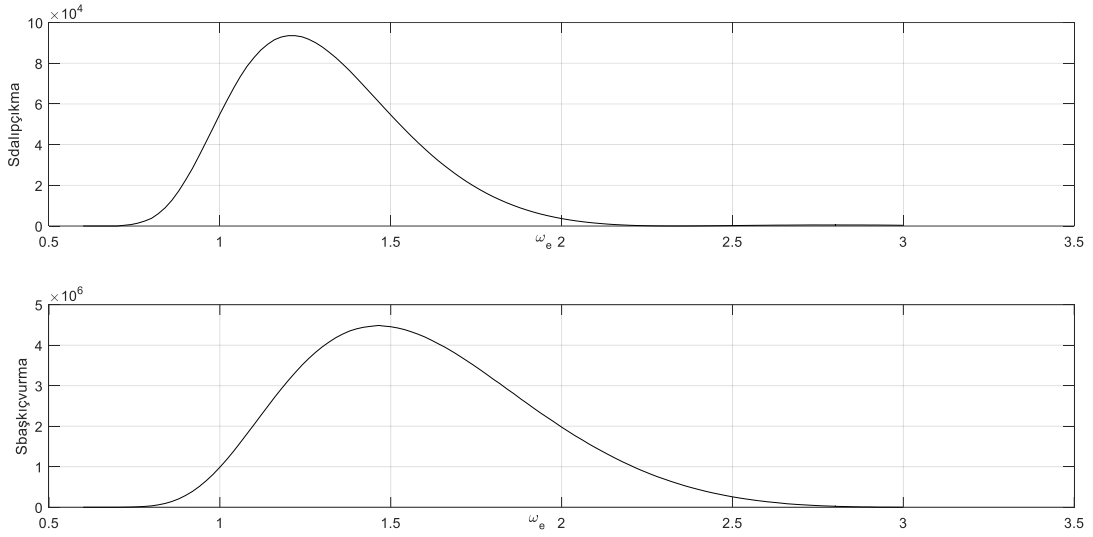
Zorlayıcı terimlerin kısa dönemli tahmininde Pierson ve St Dennis tarafından önerilen verilen lineer süperpoziyon prensibi kullanılmıştır.

$$S_{\text{HeaveForce/PitchMoment}}(\omega_e) = S_\zeta(\omega_e) \times \left|TF_{\text{HeaveForce/PitchMoment}}(\omega_e)\right|^2 \tag{3.19}$$

Burada, $S_\zeta(\omega_e)$ dalgalarla karşılaşma enerji spektrumunu ve $TF_{\text{HeaveForce/PitchMoment}}(\omega_e)$ düzenli dalgalar için hesaplanan dalıp-çıkma kuvveti veya baş-kıç vurma momenti transfer fonksiyonunu (Şekil 3. 6) ifade eder. Denklem 3.19 ile $S_{\text{HeaveForce/PitchMoment}}(\omega_e)$ dalıp-çıkma kuvveti veya baş-kıç vurma momenti cevap fonksiyonu frekans düzleminde elde edilmiştir (Şekil 3. 7).



Şekil 3. 6 Karşılaşma dalga spektrumu ve dalıp-çıkma kuvveti/baş-kıç vurma momenti TF

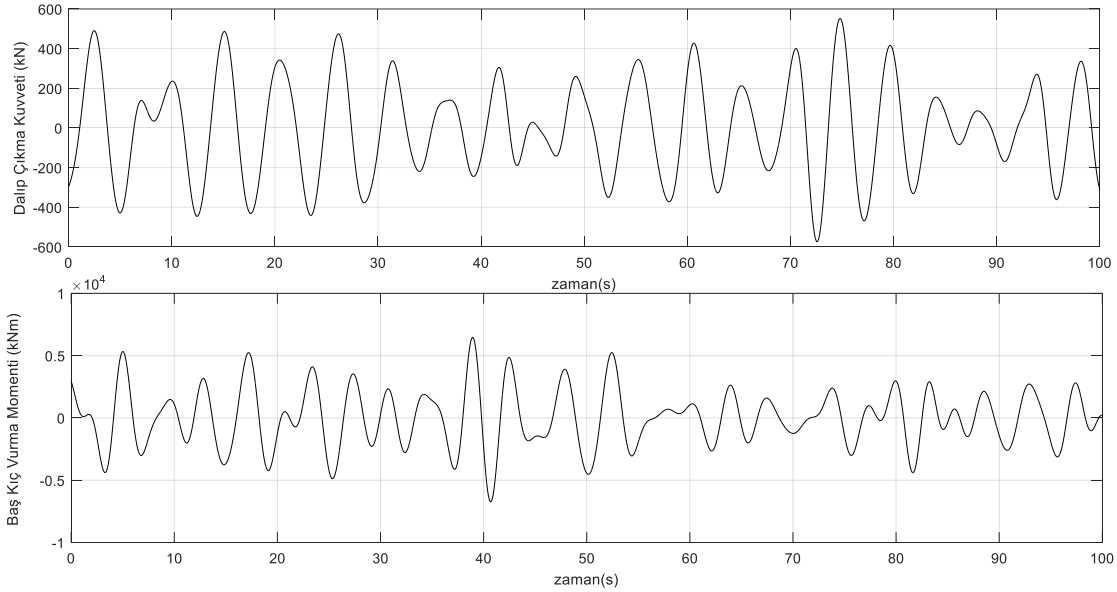


Şekil 3. 7 Dalıp-çıkma kuvveti ve baş-kıç vurma momenti cevap fonksiyonları

Lineer rasgele dalga teorisine göre, uzun dalga tepeli dalgalar sonsuz sayıdaki değişik frekanslardaki düzenli dalganın toplamı olarak ifade edilebilir. Bu sebeple anlık dalga yüksekliği aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$\zeta(\mathrm{x},t) = \sum_{\mathrm{i}}^{\mathrm{N}} \mathrm{A_i Sin}\theta_{\mathrm{i}} \tag{3.20}$$

Burada $\zeta(x,t)$ serbest su yüzeyinden ölçülen ortalama su yüksekliğini; $A_i = \sqrt{2S_\zeta(\omega_i)\Delta\omega_i}$ her bir dalga bileşenin genliğini gösterir. $\theta_i = k_i x + \omega_i t + \varepsilon_i$ olarak (x=0 alınarak ζ uzayda sabitlenmiştir, $\zeta(t)$.) ifade edilir ve burada t zamanı, ω_i, i. inci dalgaya ait frekansı, ε_i, i. inci dalgaya rasgele faz farkını ifade eder. ε_i faz açısı 0 ve 2π arasında rasgele dağıtılmıştır [63]. Aynı prosedürle, Şekil 3.7 ile H_S=1 metre DD için baştan gelen dalgalarda frekans düzleminde elde edilen dalıp-çıkma kuvveti ve baş-kıç vurma momenti Denklem 3.20 kullanılarak zaman düzleminde ifade edilebilir [64]. Örneğin, bu DD için gemiye etkiyen dalıp-çıkma kuvvetinin ve baş-kıç vurma momentinin 100 saniyelik bir benzetim çalışması yapılırsa Şekil 3.8'deki gibi $F_3(t)$ ve $F_5(t)$ dalıp-çıkma kuvveti ve baş-kıç vurma momenti elde edilebilir.

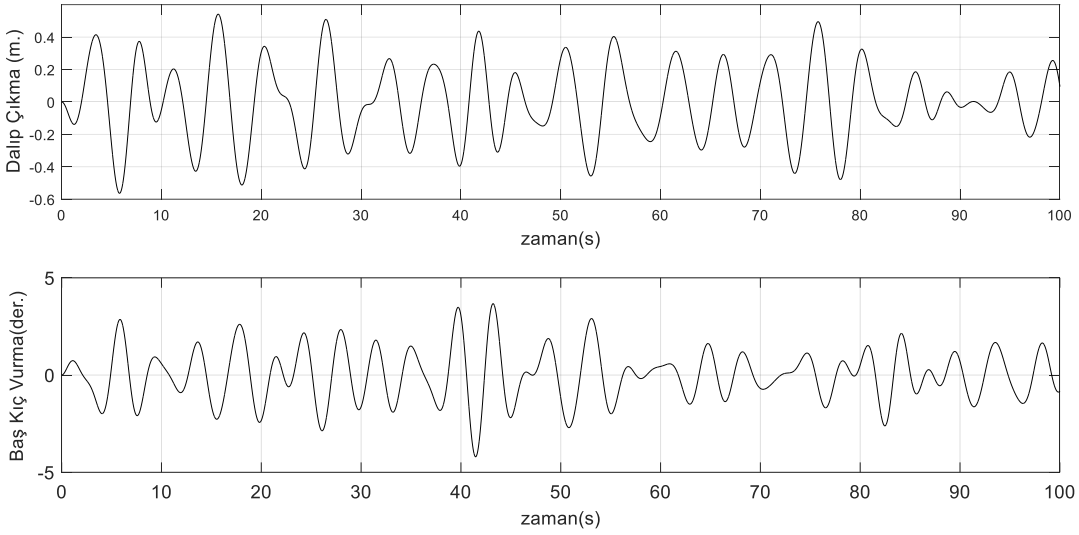


Şekil 3. 8 Dalıp-çıkma kuvveti ve baş-kıç vurma momenti zaman düzlemi cevapları

Denklem 3.1 ve Denklem 3.2'nin yukarıda hesaplanan bütün parametreler ile Matlab-Simulink ara yüzünde çözülmesi ile dalıp-çıkma hareketi, baş-kıç vurma hareketi, gemi başı düşey ivmelenmesi, gemi kıçı düşey ivmelenmesi ve gemi ortası düşey ivmelenmesi rms olarak Çizelge 3.2'deki gibi hesaplanmıştır. Çözümde 4.mertebeden Runge Kutta Çözücüsü kullanılmıştır ve zaman adımı 0.01 olarak alınmıştır. Şekil 3.9'da, kontrolsüz durumdaki dalıp-çıkma ve baş-kıç vurma hareketlerine ait zaman düzlemi cevapları verilmiştir.

Çizelge 3. 2 Hesaplanan Rms kontrolsüz cevaplar

	Rms
Dalıp-çıkma Hareketi (m.)	0.2147
Baş-kıç vurma Hareketi (der.)	1.1899
Baş Düşey İvme (m/s^2)	1.1835
Kıç Düşey İvme (m/s^2)	0.7048
CoG Düşey İvme (m/s^2)	0.4598



Şekil 3. 9 Dalıp-çıkma ve baş-kıç vurma karışık deniz cevapları(HS=1m.)

Ek B ile silindirik bir gemi formunun tek serbestlik dereceli dalıp çıkma hareketi için Cummins denklemleri çözümünün, klasik kütle sönüm yay sistemi çözümü ile doğrulaması verilmiştir.

3.1.3 Deniz Tutması Modeli

Bu çalışmada, H_S=1 metre karakteristik dalga yüksekliğine sahip deniz ortamında baştan gelen karışık dalgalar ile hareketleri modellenen motoryat formunun deniz tutması indeks değerleri kontrolsüz ve kontrollü gemi düşey ivmeleri için hesaplanmıştır. Deniz tutması olayı O'Hanlon ve McCauley tarafından deneysel yöntemlerle literatüre kazandırılan formülasyonlar ile ifade edilmektedir [5]. Verilen formülasyonlar ile genç erkek öğrencilerin iki saatlik düşey ivmelere farklı genlik ve frekanslarda maruz kaldığı durumlarda deneklerin yüzde kaçında deniz tutması olayının görüleceğini ifade etmektedir. Deniz tutması indeksi Denklem 3.21' deki gibi ifade edilir.

$$MSI[\%] = 100 \times \left[0.5 + \mathrm{erf}\left\{ \frac{\log\left(|a_v| / g\right) - \mu_{MSI}}{0.4} \right\} \right] \tag{3.21}$$

$$\mu_{MSI} = -0.819 + 2.32 \times \left(\log \omega_e\right)^2 \tag{3.22}$$

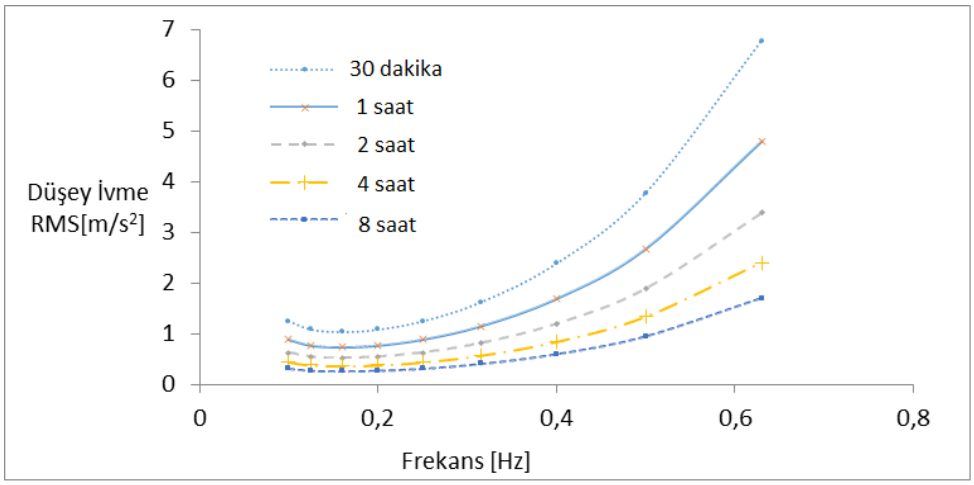
Denklem 3.21'de verilen erf, hata fonksiyonu Denklem 3.23'deki gibi ifade edilir.

$$\mathrm{erf}(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \times \int_0^x \exp\left(\frac{-z^2}{2}\right) dz \tag{3.23}$$

Burada $|a_v|$ düşey ivme ortalama mutlak değerini ω_e ise düşey ivme hareketine ait ortalama frekans değerini göstermektedir. Bu formülasyon iki saatlik maruz kalma süreleri için verilmiş olup, maruz kalma süresi ile ilgili ek bir prosedür araştırmacılar Soars ve Schmidt tarafından geliştirilmiştir [65]. Sözü edilen düzeltme Denklem 3.24 ile verilmiştir.

$$a_z(t) = a_z(t_1) \times \sqrt{\frac{t_1}{t}} \tag{3.24}$$

Burada, t süresince $a_z(t)$ şiddetindeki MSI yüzdesi ile t_1 süresince $a_z(t_1)$ şiddetindeki MSI yüzdesi eş değerdir. Denklem 3.21 ile Denklem 3.24 arasında yer alan bağıntıları kullanarak Şekil 3. 10'da ile ifade edilen limit düşey ivme değerleri farklı maruz kalma süreleri için verilmiştir.



Şekil 3. 10 Farklı maruz kalınan süreler için MSI %10 limit eğrisi

3.1.4 Kontrol Tabanlı Matematiksel Model

Mevcut çalışmadaki model çok girişli çok çıkışlı olduğu için Denklem 3.25' de verilen durum uzay gösterimi kullanılmıştır.

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\mathrm{x}(t) = \mathrm{A}\,\mathrm{x}(t) + \mathrm{B}_1[\mathrm{wave}(t) - \mathrm{convo}(t)] + \mathrm{B}_2\mathrm{u}(t) \tag{3.25}$$

Burada, $\mathrm{x}(t) \in \Re^{n}$ türevlenebilir durum vektörünü, $\mathrm{wave}(t) \in \Re^{m_w}$ dalga bozucu giriş vektörünü, $\mathrm{convo}(t)$ konvolusyon vektörünü $\mathrm{u}(t) \in \Re^{m_w}$ kontrol giriş vektörünü göstermektedir. A, B_1 ve B_2 matrisleri ise sistemin bilinen uygun boyutlu durum-uzay matrisleridir. Değişken dönüşümü yardımı ile

$\mathrm{x}_3 = \mathrm{z}_1$,

$\dot{\mathrm{x}}_3 = \dot{\mathrm{z}}_1 = \mathrm{z}_2$,

$\mathrm{x}_5 = \mathrm{z}_3$,

$\dot{\mathrm{x}}_5 = \dot{\mathrm{z}}_3 = \mathrm{z}_4$

Sistem durum-uzay formunda ifade edilirse:

$$\mathrm{A} = \begin{bmatrix} \mathrm{zeros}(2) & \mathrm{eye}(2) \\ -\bar{\mathrm{M}}^{-1}\mathrm{R} & -\bar{\mathrm{M}}^{-1}\mathrm{D} \end{bmatrix}, \qquad \mathrm{B}_1 = \begin{bmatrix} \mathrm{zeros}(2) \\ \bar{\mathrm{M}}^{-1}\mathrm{eye}(2) \end{bmatrix}, \qquad \mathrm{B}_2 = \begin{bmatrix} \mathrm{zeros}(2) \\ \bar{\mathrm{M}}^{-1}\begin{bmatrix} 1 & 1 \\ -\mathrm{ma}_b & \mathrm{ma}_k \end{bmatrix} \end{bmatrix},$$

$$\mathrm{wave}(t) = \begin{bmatrix} \mathrm{F}_3 \\ \mathrm{F}_5 \end{bmatrix}, \qquad \mathrm{u}(t) = \begin{bmatrix} \mathrm{U}_{\mathrm{baş}} \\ \mathrm{U}_{\mathrm{kıç}} \end{bmatrix}, \qquad \mathrm{convo}(t) = \begin{bmatrix} \eta_1 \\ \eta_2 \end{bmatrix}, \qquad \mathrm{x}(t) = \begin{bmatrix} \mathrm{z}_1 \\ \mathrm{z}_3 \\ \mathrm{z}_2 \\ \mathrm{z}_4 \end{bmatrix}$$

olarak elde edilir.

Burada, z_1 dalıp-çıkma hareketini, z_2 dalıp-çıkma hızını, z_3 baş-kıç vurma hareketini z_4 ise baş-kıç vurma hızını ifade eder. F_3 dalga kaynaklı dalıp-çıkma kuvvetini, F_5 dalga kaynaklı baş-kıç vurma momentini, $\mathrm{U}_{\mathrm{baş}}$ gemi başında yer alan eyleyicinin üreteceği kontrol kuvvetini $\mathrm{U}_{\mathrm{kıç}}$ ise gemi kıçında yer alan eyleyicinin üreteceği kontrol kuvvetini ifade etmektedir. Ayrıca, durum-uzay matrislerinin içerisinde yer alan ifadeler,

$$\bar{\mathrm{M}} = \begin{bmatrix} \mathrm{M} + \mathrm{A33}^{\infty} & \mathrm{A35}^{\infty} \\ \mathrm{A53}^{\infty} & \mathrm{I5} + \mathrm{A55}^{\infty} \end{bmatrix}, \mathrm{R} = \begin{bmatrix} \mathrm{C33} & \mathrm{C35} \\ \mathrm{C53} & \mathrm{C55} \end{bmatrix}, \mathrm{D} = \begin{bmatrix} \mathrm{B33}(\infty) & \mathrm{B35}(\infty) \\ \mathrm{B53}(\infty) & \mathrm{B55}(\infty) \end{bmatrix}$$

B_2 matrisi incelendiğinde, kontrolcü, geminin ağırlık merkezinden 13.5 metre kıç ve 15.5 metre baş tarafta olduğu için, baş-kıç vurma momentinin etkileneceği sinyal

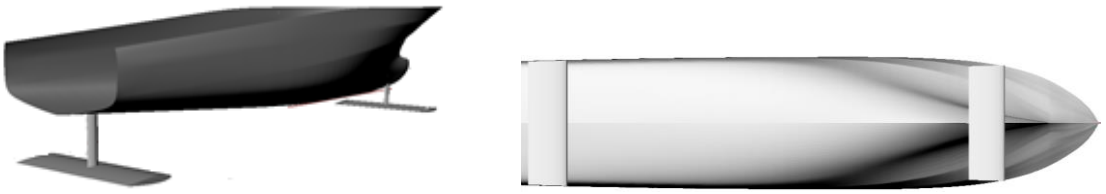
girişinin moment kolu ile çarpıldığı görülmektedir. Bir başka deyişle, mk=13.5 ve mb=15.5 metredir. Ayrıca, M matrisi kütle matrisini, D matrisi sönüm matrisini ve R matrisi ise doğrultma matrisini göstermektedir. Doğrusal veya doğrusallaştırılmış bir matematiksel modelin durum uzay formunda incelenmesi hem mertebenin düşürülmesi hem de kontrol edilebilirlik, gözlemlenebilirlik (çıkış denklemlerinin de eklenmesi ile) gibi kavramların incelenebilmesi açısından oldukça avantajlı olduğu belirtilmelidir.

Önceden de belirtildiği gibi motoryat gövdesi altına iki adet baş-kıç vurma stabilizasyonu sağlayan foiller yerleştirilmiştir. Bu foiller simetrik kesite sahip olup düşey düzlem hareektlerini azaltmak amacı ile gemi başına ve kıçına yerleştirilmiştir. Düşey hareketler baş ve kıç foillerin aktif kontrolü ile üretilen $\mathrm{U}_{\mathrm{baş}}(t)$ ve $\mathrm{U}_{\mathrm{kıç}}(t)$ düşey kuvvetleri ile azaltılmıştır. Bu foiller genellikle hidrolik motorlar ile döndürülmektedir. Şekil 3.11 motoryat gövdesi altında baş ve kıç kısımda konumlandırılan foilleri göstermektedir. Bilindiği gibi foiller, akış hızının (V), hücum açısının ($\alpha_{baş}(t)$ ve $\alpha_{kıç}(t)$), su yoğunluğunun (ρ) ve foil alanının ($S_{baş}$ ve $S_{kıç}$) ve kaldırma katsayısının ($C_{Lbaş}$ ve $C_{Lkıç}$) aşağıda yer alan fonksiyonu ile kuvvet üretmektedir.

$$\mathrm{U}_{\mathrm{baş}}(t) = 0.5 \times \rho \times S_{baş} \times C_{Lbaş} \times V^2 \times \alpha_{baş}(t) \tag{3.26}$$

$$\mathrm{U}_{kıç}(t) = 0.5 \times \rho \times S_{kıç} \times C_{Lkıç} \times V^2 \times \alpha_{kıç}(t) \tag{3.27}$$

Bir başka ifade ile, Eşitlik 3.26 ile Eşitlik 3.27 $\mathrm{U}_{\mathrm{bow}}(t)$ ve $\mathrm{U}_{\mathrm{stern}}(t)$ kontrol kuvvetlerini $\alpha_{bow}(t)$ ve $\alpha_{stern}(t)$ akış hücum açılarına dönüştürmektedir. Burada α açısı akışa paralel olan açı olmalıdır. Bu sebeple $\alpha_{baş}(t)$ ve $\alpha_{kıç}(t)$, $\beta_{baş}(t)$ ve $\beta_{kıç}(t)$ foil açıları ile anlık gemi baş-kıç vurma hareketinin toplamı ile elde edilir.



Şekil 3. 11 Foillerin yerleşimi

Foillere ait bütün özellikler Çizelge 3.3 ile verilmiştir. $[(-15^{\circ}, 15^{\circ})]$ açılarından sonra kaldırma katsayısı düştüğü için (stall) foil açıları bu belirtilen limitleri aşmamalıdır. Aksi

takdirde öngörülen kaldırma katsayısı anlamını yitirir. Literatürden kolayca elde edileceği gibi sıfır kalınlıklı ve sonsuz uzunluklu bir levha için eliptik yük dağılımı kabulü ile yalıpan analitik çözüm ile elde edilen kaldırma katsayısı $C_{L,2D}\ \pi^2 / 90 = 0.1096$'dır. Gerçek bir akış içinde vizkositeden dolayı bu değerin 0.1 olarak kabül edilmesi bütün simetrik kesitler için iyi bir yaklaşımdır [66]. Öte yandan üç boyutlu simetrik bir foil için C_L değerinin iki boyutlu kaldırma katsayısına göre üretilen uç girdaplar sebebi ile Eşitlik 3.28'deki gibi düştüğü bilinmektedir [66].

$$C_L = \frac{C_{L,2D}}{1 + \frac{2}{AR}} \tag{3.28}$$

Burada AR görünüm oranı ifade etmektedir.

Çizelge 3. 3 Foil parametreleri

Parametreler	Baş Foil	Kıç Foil
Span uzunluğu (m)	7.52	8.16
Chord uzunluğu (m)	2.37	2.57
S (m^2)	17.82	20.97
AR (Görünüm Oranı) (Span/Chord)(-)	3.17	3.17
Max. limit hücum açısı (deg.)	15	15
C_L(-)	0.061	0.061
Ağırlık merkezine uzaklık (ma_b ve ma_k) (m)	15.5	13.5

3.2 Statik Çıkış Geri Beslemeli Kontrolör Tasarımı

Bu bölümde, karışık deniz durumunda bir geminin baştan gelen düzenli dalga bozucusu etkisi ile oluşan düşey ivmelerinin azaltılması için statik çıkış geri-beslemeli optimal kontrolör tasarımı gerçekleştirilmiştir. Tasarımın en önemli aracı dışbükey optimizasyon temelindeki DME olmuştur. DME yaklaşımı son dönemlerde optimal kontrolörlerin tasarlanmasında sıklıkla kullanılmaktadır. Ancak ürettikleri çözümlerin tutucu olması beklenilen bir sonuçtur. Literatürde yapılan çalışmalar bu tip araçların gevşetmelerinin sıkı olduğunu göstermektedir. Bunun başlıca nedeni, DME ile formüle edilen kısıtların, genelde gerçek kısıtları da içine alan daha büyük dış bükey yapılar şeklinde olmasıdır. Buradaki gerçek en iyi değer ile hesaplanan en iyi değer arasındaki boşluk bu tutucu yaklaşımlardan kaynaklanmaktadır. Günümüzde bu tutuculuğun azaltılmasına yönelik yeni yöntem ve iterasyon tekniklerinin geliştirilmesine yönelik

çalışmalar devam etmektedir [67], [68]. Bununla birlikte, DME yaklaşımı, L2 kazançlı optimal kontrol, H optimal kontrol, kutup yerleştirme, dayanıklılık, eyleyici doyumu ve zaman gecikmesi gibi kontrol problemlerinin DME kısıtları üzerinden dış bükey optimizasyonu problemine genişletilerek yarı tanımlı programlama teknikleri ile çözülebilmesine imkan sağladığı için oldukça kullanışlı bir yöntemdir. Bu çalışmada L2 kazançlı optimal kontrolör problemin çözümünde, Cebirsel Ricatti Eşitliğine göre daha az tutucu sonuçlar verdiği bilinen DME yaklaşımı, tasarımın başlıca aracı olarak kullanılmıştır [69], [70].

Bilindiği gibi bozucu azaltma problemlerinde durum geri-beslemeli kontrolör tasarımları sıklıkla kullanılmaktadır. Bu tip kontrolörleri çalışması, sistemin tüm durumlarının ölçülebilmesine bağlıdır ve kontrol kanunu tüm durum değişkenlerinin geri beslenmesi ile hesaplanır. Bozucu azaltma problemlerinde geri besleme bilgisi için ivmeölçerlerin kullanılmasıyla hız sinyallerinin hesaplanması yaygın olsa da, yer değiştirme yanıtlarını aynı hassasiyetle elde edilemeyeceği bilinmektedir [71]. Bu nedenle tüm durum değişkenlerinin geri beslemeli kontrolör tasarımları pratikte uygulanabilirlik açısından yeterince elverişli değildir. Dinamik çıkış geri beslemeli kontrolörler kullanılarak tüm durum değişkenleri yerine sadece ölçülebilir sinyalleri geri besleyen kontrolör tasarımı ile probleme çözüm getirmek mümkündür. Fakat dinamik çıkış geri beslemeli kontrolörler ile yüksek bozucu bastırma performansı elde etmek için sistemin bozucu girişleri ile performansın çıkışları için filtre tasarımı işlemi gerçekleştirilir. Bu durum ise kapalı çevrim sistemin mertebesini arttırarak tasarlanan kontrolörün uygulanabilirliğini azaltır. Yine dinamik çıkış geri beslemeli kontrolörlerin yüksek maliyetleri tasarım açısından bir diğer problemdir. Bu çalışmada kullanılan statik çıkış geri beslemeli kontrolörlerin ise kolayca ölçülebilen sinyalleri geri besleyebilme özellikleri olduğundan pratikte uygulanabilirlikleri oldukça yüksektir. Bununla birlikte dinamik çıkış geri beslemeli kontrolörlere göre daha ucuz maliyetleri ile bozucu bastırama problemleri için büyük bir potansiyele sahiptirler [72], [73]. Bu nedenle, bu çalışmada, bozucu dalga bozucusu etkisindeki bir geminin düşey ivmelerinin azaltılması için DME tabanlı statik çıkış geri beslemeli kontrolör tasarımı gerçekleştirilmiştir.

Ele alınan kontrol probleminin açık çevrim durum-uzay formu,

$$\begin{aligned}\dot{x}(t) &= Ax(t) + B_1 w(t) + B_2 u(t)\\ z(t) &= C_1 x(t) + D_{11} w(t) + D_{12} u(t)\\ y(t) &= C_2 x(t)\end{aligned} \tag{3.29}$$

şeklinde ifade edilebilir. Burada, $x(t) \in \Re^n$ durum vektörünü, $z(t) \in \Re^m$ performans çıkış vektörünü, $y(t) \in \Re^p$ ölçüm vektörünü, $w(t)=[\text{wave}(t) - \text{convo}(t)] \in \Re^{m_w}$ bozucu giriş vektörünü, $u(t) \in \Re^{m_u}$ kontrol giriş vektörünü göstermektedir. $A, B_1, B_2, C_1, C_2, D_{11}, D_{12}$ matrisleri ise sistemin bilinen uygun boyutlu durum-uzay matrisleridir.

Sistemin kontrol girişinin $u(t) = Ky(t) = KC_2 x(t)$ gibi ölçülen çıkışların bir fonksiyonu olduğu kabulünden yola çıkarak kapalı-çevrim sistem, $u(t)$'nin Denklem 3.29'da yerine yazılması ile

$$\begin{aligned}\dot{x}(t) &= (A + B_2 K C_2) x(t) + B_1 w(t)\\ z(t) &= (C_1 + D_{12} K C_2) x(t) + D_{11} w(t)\end{aligned} \tag{3.30}$$

şeklinde elde edilir. Burada, K statik çıkış geri beslemeli kontrol kazancını, C_2 ise sistemin geri beslenen (ölçülen) durum değişkenlerini göstermektedir ve sadece baş-kıç vurma hızı geri besleneceği için $C_2 = [0 \quad 0 \quad 0 \quad 1]$ olarak alınmıştır. Önerilen kontrolörün sentez denklemlerinin elde edilebilmesi için ilk olarak, yeterli kararlılık kısıtlarının elde edilmesinde kullanılacak olan Lyapunov fonksiyonu $P = P^T > 0$ kısıtı altında,

$$V(x(t)) = x(t)^T P x(t) \tag{3.31}$$

olarak tanımlanır [70].

Bir kontrol sisteminin L_2 kazançlı performans problemi ise kapalı çevrim 3.30 sistemini kararlı kılacak ve sistemin girişlerinden çıkışlarına yazılan transfer fonksiyonu matrisinin, $\|T_{zw}\|_\infty$, normunu γ gibi bulunabilecek en küçük skaler pozitif bir değerden daha küçük kılacak bir kontrolör bulabilmektir [69]. $\gamma > 0$ olmak üzere sistemin performans ve kararlılık kısıtları için tanımlanan Eşitsizlik 3.32 tüm $x(t)$ ve $w(t)$'ler için negatif tanımlı olmalıdır.

$$\dot{V}(x(t)) + \gamma^{-1} z^T(t) z(t) - \gamma w^T(t) w(t) < 0 \tag{3.32}$$

Sistem 3.30 ile Eşitsizlik 3.32'nin birleştirilmesiyle,

$$
\begin{aligned}
&[(A + B_2KC_2)x(t) + B_1w(t)]^T Px(t) \\
&+x^T(t)P[(A + B_2KC_2)x(t) + B_1w(t)]+ \\
&\gamma^{-1}[(C_1 + D_{12}KC_2)x(t) + D_{11}w(t)]^T[(C_1 + D_{12}KC_2)x(t) + D_{11}w(t)] \\
&-\gamma w^T(t)w(t) < 0
\end{aligned}
\tag{3.33}
$$

eşitsizliği elde edilir. Bu eşitsizliğin genişletilmiş durum vektör çarpımı şeklinde ifade edilmesi ile,

$$
\begin{bmatrix}
\Phi + \gamma^{-1}(C_1+D_{12}KC_2)^T(C_1+D_{12}KC_2) & PB_1 + \gamma^{-1}(C_1 + D_{12}KC_2)^T D_{11} \\
B_1^TP + \gamma^{-1}(D_{11}^T)(C_1 + D_{12}KC_2) & \gamma^{-1}D_{11}^T D_{11} - \gamma I
\end{bmatrix} < 0 \tag{3.34}
$$

$\Phi = (A^TP+C_2{}^TK^TB_2{}^TP+PA+PB_2KC_2)$ matris eşitsizliği elde edilir. Eşitsizlik 3.34'ün düzenlenmesi ile,

$$
\begin{bmatrix} \Phi & PB_1 \\ B_1^TP & -\gamma I \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} (C_1+D_{12}KC_2)^T \\ D_{11}{}^T \end{bmatrix} \gamma^{-1} \begin{bmatrix} C_1 + D_{12}KC_2 & D_{11} \end{bmatrix} < 0 \tag{3.35}
$$

Elde edilir.

Schur tümleyeni kullanılarak [70] Eşitsizlik 3.35 Eşitsizlik 3.36'ya dönüştürülür.

$$
\begin{bmatrix}
\Phi & PB_1 & (C_1 + D_{12}KC_2)^T \\
B_1^TP & -\gamma I & D_{11}^T \\
C_1 + D_{12}KC_2 & D_{11} & -\gamma I
\end{bmatrix} < 0 \tag{3.36}
$$

$Z=Z^T=P^{-1}$ eşitliğini sağlayan simetrik bir Z matrisi alınarak, 3.36 Eşitsizliği sağından $\mathrm{diag}(Z, I, I)$ solundan $\mathrm{diag}(Z, I, I)^T$ ile çarpılmasıyla (Congruence Dönüşümü) ve $\Omega = ZA^T + ZC_2^TK^TB_2^T + AZ + B_2KC_2Z$ olmak üzere Eşitsizlik 3.37 elde edilir.

$$
\begin{bmatrix}
\Omega & B_1 & ZC_1^T + ZC_2^TK^TD_{12}{}^T \\
B_1^T & -\gamma I & D_{11}^T \\
C_1Z + D_{12}KC_2Z & D_{11} & -\gamma I
\end{bmatrix} < 0 \tag{3.37}
$$

Burada, önerilen kontrolörün nümerik çözümünde yaşanabilecek varlık probleminin giderilmesi için, $C_2Z = NC_2$ eşitliği kullanılarak ve oluşan yeni matriste $J = KN$ değişken dönüşümü ile Eşitsizlik 3.38 elde edilir. Burada $\sigma = ZA^T + C_2^TJ^TB_2^T + AZ + B_2JC_2$ ile ifade edilir.

$$\begin{bmatrix} \sigma & B_1 & ZC_1^T + C_2^T J^T D_{12}^T \\ B_1^T & -\gamma I & D_{11}^T \\ C_1 Z + D_{12} J C_2 & D_{11} & -\gamma I \end{bmatrix} < 0 \tag{3.38}$$

Tanımlanan koşulun $[(C_2 Z - NC_2)^T (C_2 Z - NC_y)] \le \mu I$ şeklinde düzenlenmesi [72, 74] ve burada $\mu > 0$ bir skaler olmak üzere Schur tümleyeni ile [70],

$$\begin{bmatrix} -\mu I & (C_2 Z - NC_2)^T \\ C_2 Z - NC_2 & -I \end{bmatrix} \le 0 \tag{3.39}$$

Elde edilen DME'ni , μ , 10^{-6} gibi çok küçük skaler bir pozitif sayı olduğu kabulü ile çözen uygun $Z > 0$, J ve N matrisleri bulunursa, statik çıkış geri beslemeli optimal kontrol kazancı,

$K = JN^{-1}$ şeklinde elde edilir.

3.3 Durum Geri Beslemeli Kontrolör Tasarımı

Bu bölümde çalışmada geliştirilen statik durum beslemeli kontrolör tasarımının hiçbir performans kaybı yaşamadan daha az ölçüm sinyali ile çalıştığının gösterilmesi amacıyla durum geri beslemeli optimal kontrol tasarlanarak benzetim çalışması sonuçları karşılaştırılmıştır. Bilindiği gibi durum geri beslemeli kontrolör tüm durumların ölçülmesi ve geri beslenmesi prensibi ile çalışır. Çalışmada, ele alınan problemin açık çevrim gösterimi,

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + B_1 w(t) + B_2 u(t) \\ z(t) &= C_1 x(t) + D_{11} w(t) + D_{12} u(t) \end{aligned} \tag{3.40}$$

şeklindedir. Kontrol girişinin $u(t) = Kx(t)$ gibi durumlarının doğrusal bir fonksiyonu olduğu kabulünden yola çıkılarak kapalı çevrim sistem

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= (A + B_1 K)x(t) + B_2 w(t) \\ z(t) &= (C_1 + D_{12} K)x(t) + D_{11} w(t) \end{aligned} \tag{3.41}$$

olarak elde edilir. Yine Bölüm 3.2'de çıkış geri beslemeli kontrolör tasarımında izlenen Lyapunov kararlılık ve performans koşulları kullanılarak sistemin kapalı çevrim kararlılığını garanti eden ve $\|T_{zw}\|_\infty < \gamma$ koşulunu sağlayan durum geri beslemeli optimal kontrolörün sentez denklemi, $\Psi = ZA^T + ZK^T B_2^T + AZ + B_2 KZ$ dönüşümü ile,

$$\begin{bmatrix} \Psi & B_1 & ZC_1^T + ZK^T D_{12}^T \\ B_1^T & -\gamma I & D_{11}^T \\ C_1 Z + D_{12} K Z & D_{11} & -\gamma I \end{bmatrix} < 0 \quad (3.42)$$

Şeklinde elde edilir. $R = KZ$ değişken dönüşümü ile,

$$\begin{bmatrix} \Delta & B_1 & ZC_1^T + RD_{12}^T \\ B_1^T & -\gamma I & D_{11}^T \\ C_1 Z + D_{12} R & D_{11} & -\gamma I \end{bmatrix} < 0 \quad (3.43)$$

Eşitsizlik 3.43 için $\Delta = ZA^T + R^T B_2^T + AZ + B_2 R$ olmak üzere durum geri beslemeli kontrolör kazancı, aşağıdaki optimizasyon probleminin çözümünden,

$$\min \gamma$$

Koşul (3.43)

uygun boyutlu R ve Z matrislerinin bulunması ile $K = RZ^{-1}$ şeklinde elde edilir.

3.4 Sayısal Benzetim Çalışmaları

Bu bölümde, mevcut motoryat formunun Fn=0.25'te baştan gelen karışık dalgalardaki düşey ivme cevaplarının azaltılması için yapılan benzetim çalışmalarının sonuçları grafikler yardımı ile ortaya konulmuştur. Matlab- Simulink ortamında, başlangıç konum ve hızlarının sıfır olarak alınması ile çözümleme gerçekleştirilmiştir. Çözücü olarak, 4. Mertebeden Runge Kutta, ODE 45 kullanılmış olup zaman adımı 0.01 saniye, toplam benzetim süresi ise 1800 saniye olarak seçilmiştir. Gerçek yarım saatlik yolculuğu temsil eden bu benzetim çalışmasının 50 saniyelik bir kesite ait olan görselleri bu bölümde sunulmuştur.

Çalışmada tasarlanan kontrolörün performans çıkış vektörü $z(t) = C_1 x(t) + D_{11} w(t) + D_{12} u(t)$ şeklindedir ve burada gemiye yerleştirilecek foilin hücum açılarının bir çalışma limit

noktası bulunacağından, C_1 matrisi $\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$ olarak, D_{12} matrisi ise

$\begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 1.5e-3 & 0 \\ 0 & 7.5e-4 \end{bmatrix}$ olarak belirlenmiştir.

Çalışmada tasarlanan statik çıkış geri-beslemeli kontrolör kazancı

$$\min \gamma$$

koşul (3.38), (3.39)

optimizasyon probleminin çözümünden

$$K = \begin{bmatrix} 3599.8 \\ -3518.0 \end{bmatrix}$$

olarak hesaplanmıştır. Söz konusu DME'nin çözümünde MATLAB paket programı altında YALMIP ayrıştırıcısı ve SEDUMI çözücüsü kullanılmıştır [75], [76].

Yapılan benzetim çalışmalarından, önerilen kontrolörün sistemin kapalı çevrim kararlılığını garanti ederek arzu edilen kontrol performansını sağladığı gözlemlenmektedir. Çalışmada Bölüm 3.2'de önerilen statik çıkış geri beslemeli optimal kontrolör tasarımının hiçbir performans kaybı yaşamadan daha az ölçüm sinyali ile çalıştığının gösterilmesi amacıyla, Bölüm 3.4'te sentez denklemleri verilen durum geri beslemeli optimal kontrolör tasarlanarak benzetim çalışması sonuçları

karşılaştırılmıştır. Durum geri beslemeli kontrolör çalışmasında ise C_1 matrisi

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$ olarak, D_{12} matrisi ise $$\begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 8e-3 & 0 \\ 0 & 5.5e-3 \end{bmatrix}$$ olarak belirlenmiştir.

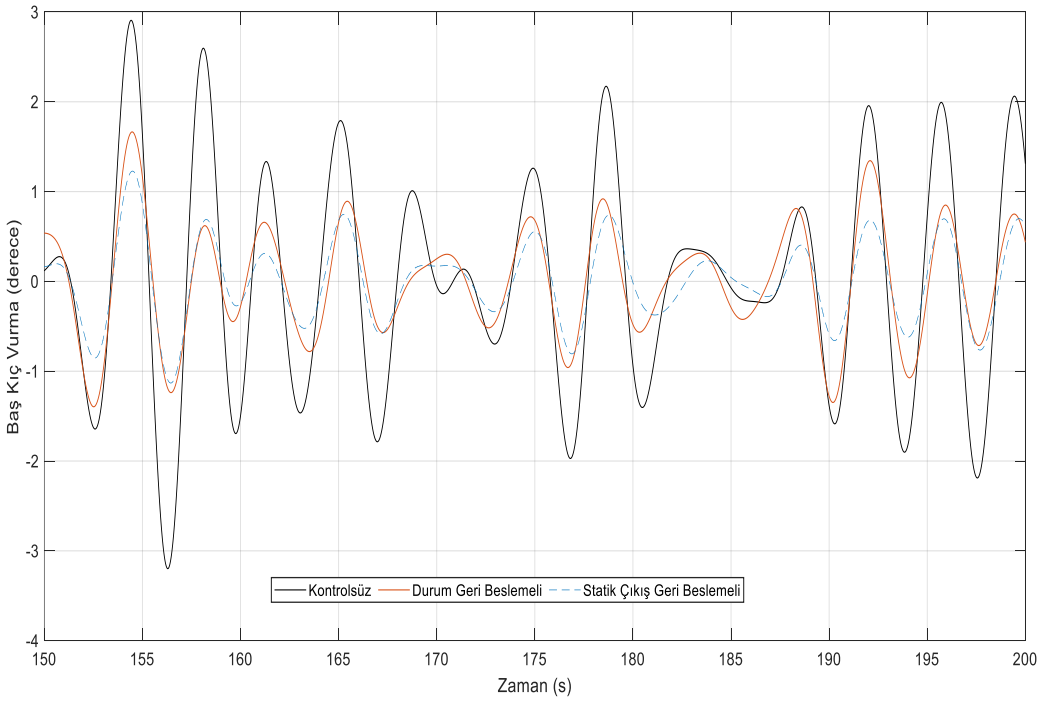
Buradan durum geri beslemeli optimal kontrolör kazancı, statik çıkış geri beslemeli kontrolörde kullanılan aynı performans çıkış vektörü kullanılarak, aşağıdaki optimizasyon probleminin çözümünden

$$\min \gamma$$

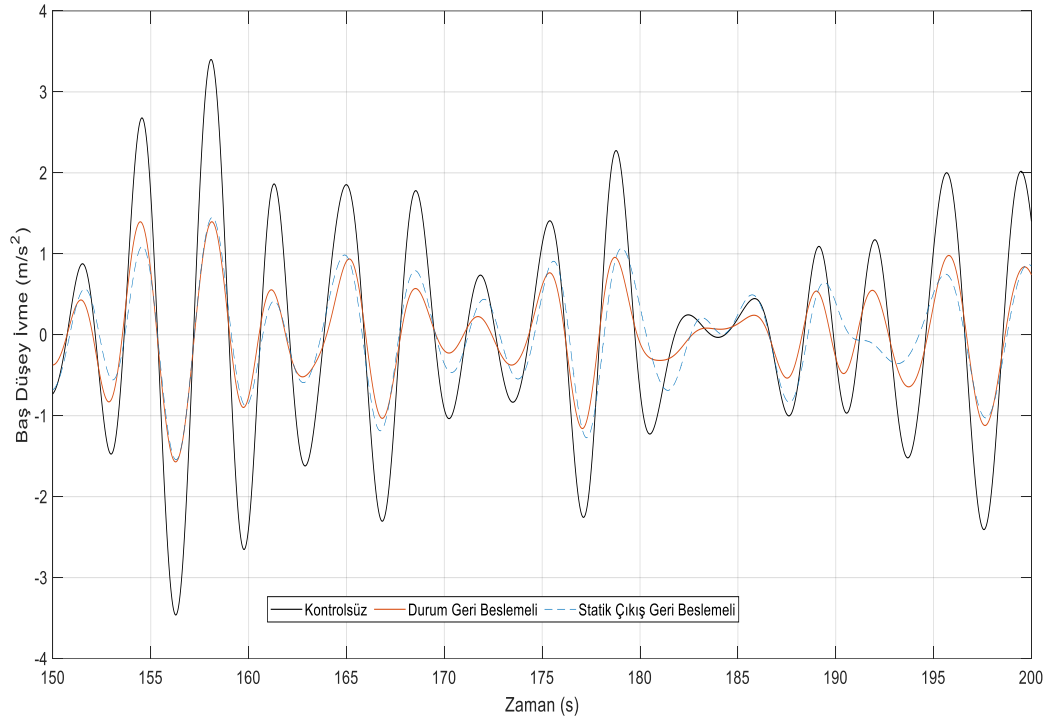
koşul (3.43)

$$K = \begin{bmatrix} -61.83 & -2.83 & -206.38 & 1604.72 \\ 46.44 & -341.04 & -27.66 & -1824.95 \end{bmatrix}$$

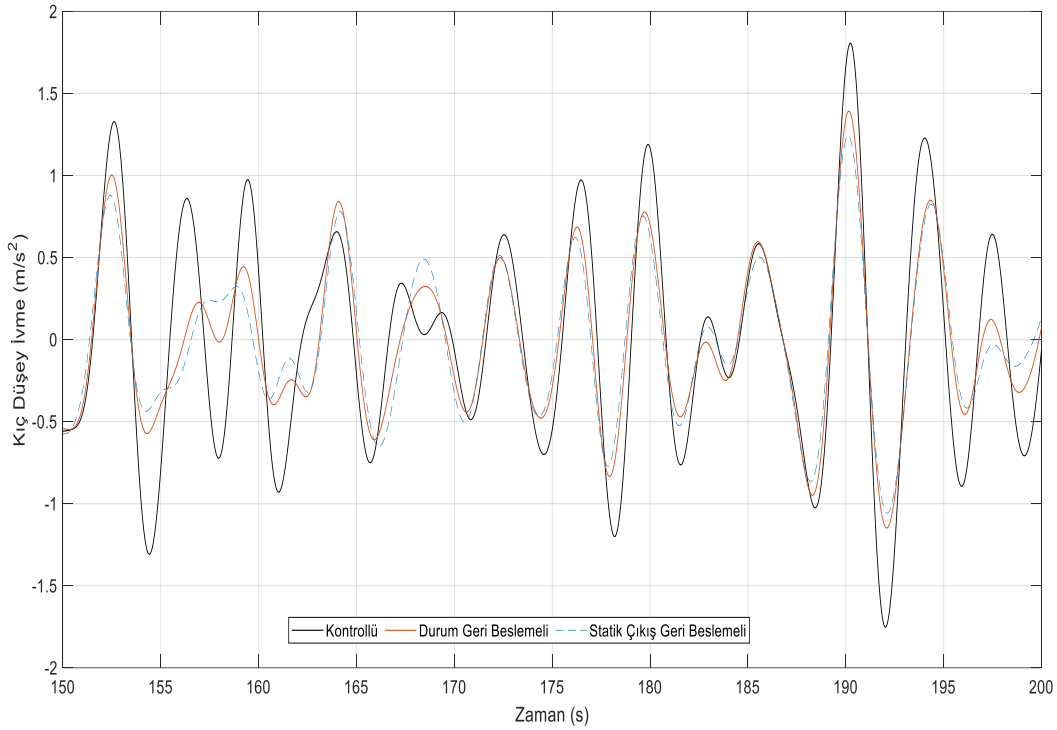
olarak elde edilmiştir.



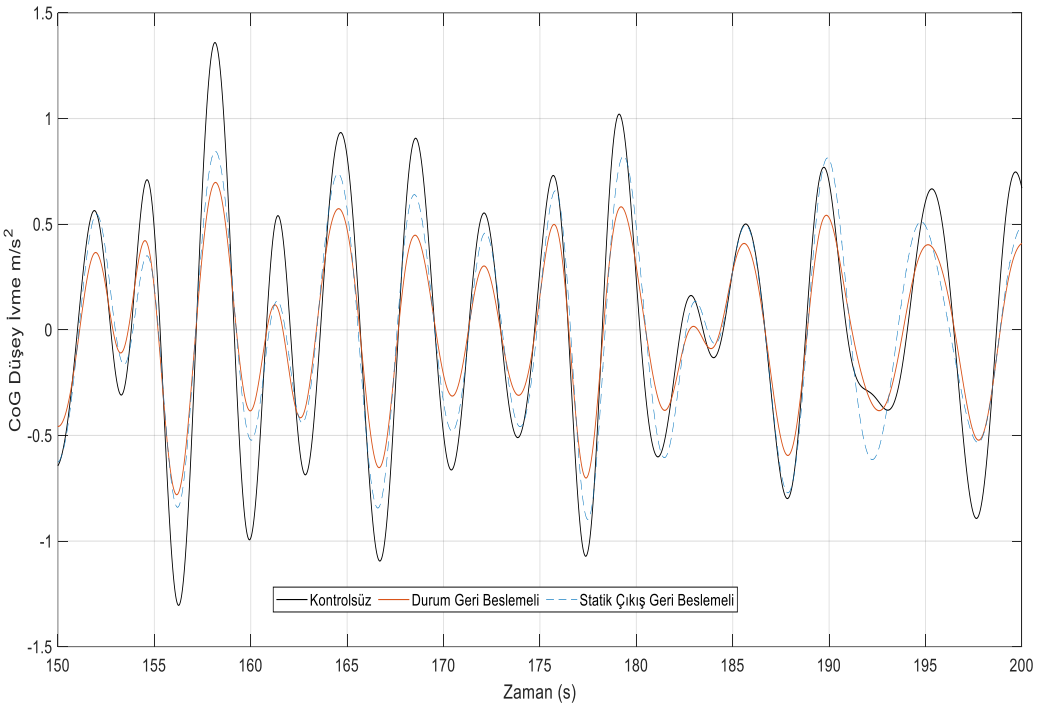
Şekil 3. 12 Gemi baş-kıç vurma hareketi kontrollü ve kontrolsüz cevapları



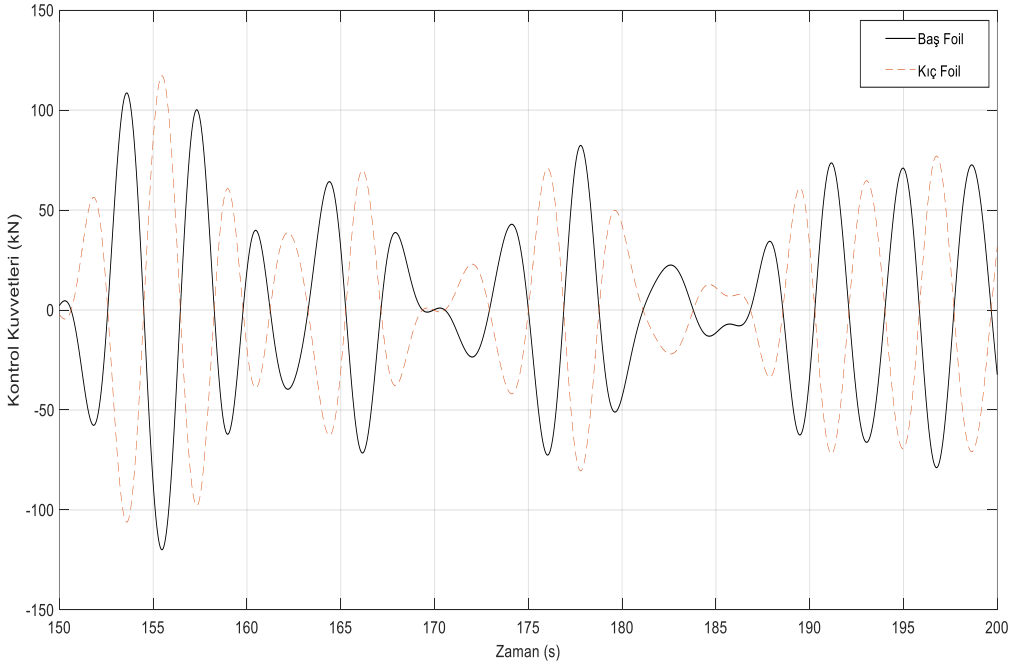
Şekil 3. 13 Gemi baş düşey ivme kontrollü ve kontrolsüz cevapları



Şekil 3. 14 Gemi kıç düşey ivme kontrollü ve kontrolsüz cevapları



Şekil 3. 15 Gemi orta düşey ivme kontrollü ve kontrolsüz cevapları



Şekil 3. 16 Gemi baş ve kıç eyleyici kuvvetleri

Şekil 3.12'de geminin baş-kıç vurma cevapları, Şekil 3.13'de geminin baş lokasyonundaki düşey ivme cevapları, Şekil 3.14'te geminin kıç lokasyonundaki düşey ivme cevapları, Şekil 3.15'te ise geminin ortasındaki düşey ivme cevapları kontrollü ve

kontrolsüz olarak 50 saniyelik benzetim çalışması ile verilmiştir. Verilen grafiklerden de anlaşılacağı gibi baş ve kıç lokasyon ivmelerindeki sönümlenme gemi ortasına göre daha fazla olmaktadır. Çalışmada önerilen statik durum geri beslemeli kontrolör sistemin tüm durumlarının geri beslenmesi yerine sadece baş-kıç vurma hızının ölçümü ve geri beslenmesi mantığı ile çalışmaktadır. Bu durumun, problemin çözümünde hiçbir performans kaybına neden olmadığının gösterilmesi amacıyla statik çıkış geri beslemeli optimal kontrolörün sonuçları, durum geri beslemeli optimal kontrolör sonuçları ile Çizelge 3.4 ve Çizelge 3.5'de karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Şekil 3.16'da ise statik çıkış geri beslemeli optimal kontrolörün gemi baş ve kıç kısmında bulunan eyleyicilerle ürettiği kontrol kuvveti grafik ile verilmiştir.

Çizelge 3. 4 Statik çıkış geri beslemeli ve durum geri beslemeli kontroller için baş-kıç vurma ve dalıp-çıkma hareketi rms cevapları

RMS	**Baş-kıç vurma Hareketi (derece)**		**Dalıp-çıkma Hareketi (metre)**	
Durum Geri Beslemeli Kontrolör	***Kontrolsüz***	***Kontrollü***	***Kontrolsüz***	***Kontrollü***
	1.1899	0.6388	0.2147	0.1506
Statik Çıkış Geri Beslemeli Kontrolör	***Kontrolsüz***	***Kontrollü***	***Kontrolsüz***	***Kontrollü***
	1.1899	0.4668	0.2147	0.1925

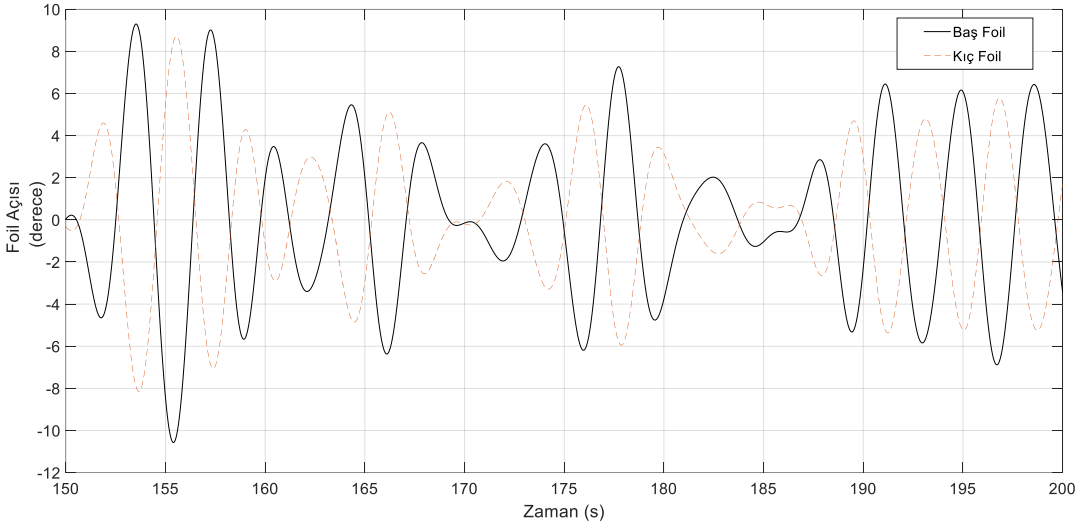
Çizelge 3. 5 Statik çıkış geri beslemeli ve durum geri beslemeli kontroller için düşey ivme rms cevapları

RMS	**Gemi Baş Düşey İvme (m/s^2)**		**Gemi Kıç Düşey İvme (m/s^2)**		**Gemi Orta Düşey İvme (m/s^2)**	
Durum Geri Beslemeli Kontrolör	***Kontrolsüz***	***Kontrollü***	***Kontrolsüz***	***Kontrollü***	***Kontrolsüz***	***Kontrollü***
	1.1835	0.5397	0.7048	0.4703	0.4598	0.2845
Statik Çıkış Geri Beslemeli Kontrolör	***Kontrolsüz***	***Kontrollü***	***Kontrolsüz***	***Kontrollü***	***Kontrolsüz***	***Kontrollü***
	1.1835	0.5217	0.7048	0.4242	0.4598	0.3738

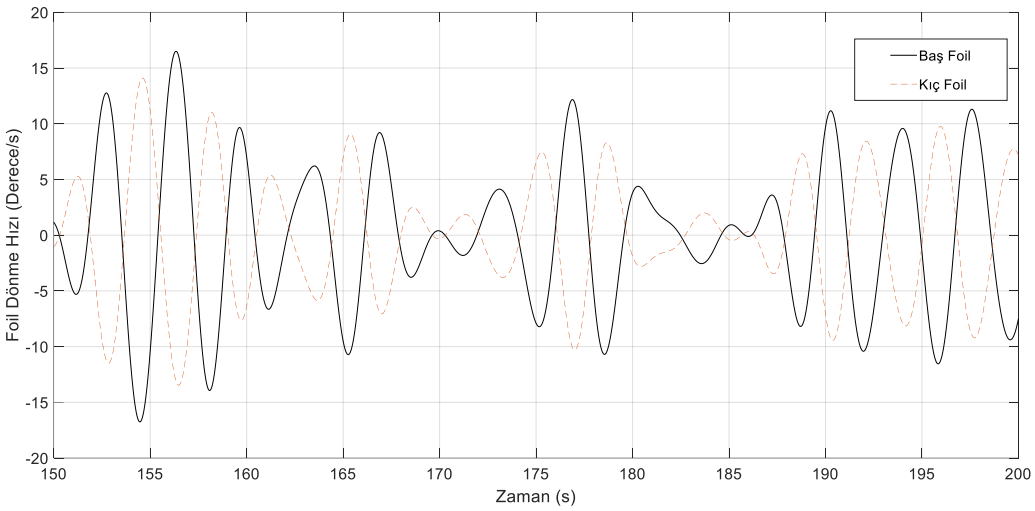
Çizelge 3. 6 Statik çıkış geri beslemeli ve durum geri beslemeli kontroller için kontrol kuvveti rms cevapları

RMS	Kontrol Kuvveti Baş Eyleyici (kN)	Kontrol Kuvveti Kıç Eyleyici (kN)
Durum Geri Beslemeli Kontrolör	52.61	33.84
Statik Çıkış Geri Beslemeli Kontrolör	45.00	43.98

Çizelge 3.5 ve Çizelge 3.6'dan da görüldüğü gibi çalışmada önerilen çıkış geri beslemeli kontrolör ile tüm durumların ölçülmesi zorunluluğu ortadan kaldırılarak, hiçbir performans kaybı olmadan etkin bir kontrol işlemi gerçekleştirilmiştir. Bu durum, çalışmada önerilen statik çıkış geri beslemeli kontrolörün, gemi gibi üzerinden ölçüm alınması oldukça zor olan sistemlerin bozucu dalga girişleri etkisindeki hareketlerinin aktif kontrolü bakımından büyük bir potansiyele sahip olduğunu göstermektedir. Statik çıkış geri beslemeli kontrolör ile elde edilen kontrol sinyalleri Şekil 3.17 ile baş ve kıç foil açıları olan β_{bow} (t) ve β_{stern} (t) için 50 saniyelik bir simulasyon ile gösterilmektedir. Şekil 3.17'den görüldüğü gibi, maksimum foil açısının $[(-15^{\circ},15^{\circ})]$ limit civarının altında olduğu görülmektedir. Foil açısı dönme hızları ise Şekil 3.18'de verilmiştir.



Şekil 3. 17 Baş ve kıç foil hücum açıları



Şekil 3. 18 Baş ve kıç foil dönme hızları

BÖLÜM 4

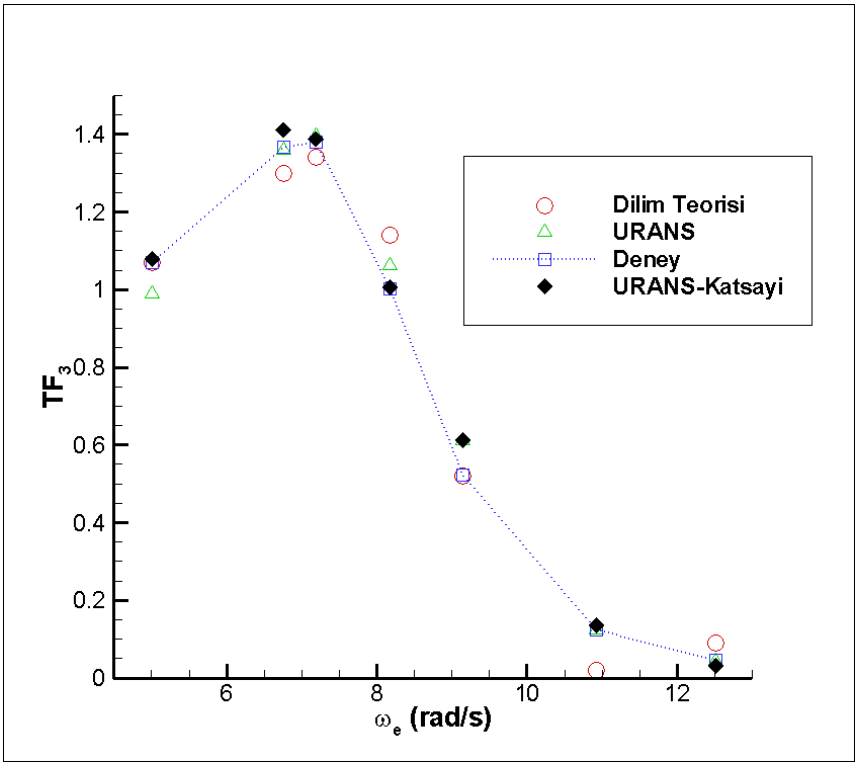
SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu doktora tez çalışmasının 2. Bölümünde üç farklı yöntem kullanılarak frekans düzleminde gemi düşey hareketleri elde edilmiştir. Dalıp-çıkma ve baş-kıç vurma TF'nin farklı yöntemler ile karşılaştırması Çizelge 4.1'de deneysel verilerle gösterdikleri ortalama farklılıklar ile verilmiştir. Dilim teorisi ile elde edilen TF deney verisine kıyasla yaklaşık % 25 ortalama farklılıkla yaklaşırken, URANS Katsayı yöntemi yaklaşık % 8 ortalama farklılıkla yaklaşmaktadır. URANS yöntemiyle ise deney ortamına en yakın model olması sebebi ile deneysel veriye %5 ortalama bir farkla yaklaşılmıştır. Şekil 4.1 ve Şekil 4.2, dalıp-çıkma ve baş-kıç vurma hareketleri için TF grafiklerini göstermektedir. Görüldüğü gibi, URANS-Katsayı yöntemi dilim teorisi çıktılarına kıyasla deneysel veriye daha yakın sonuçlar sunmaktadır. Yüksek Froude sayısında gemi etrafındaki akışın oldukça türbülanslı hale gelmesi ve doğrusal olmayan etkilerin önemli rol oynamaya başlaması dilim teorisi çıktılarının özellikle yüksek karşılaşma frekanslarında güvenilirliğinin azalmasına sebep olmaktadır. Bu tür gerçek akış problemlerinde, yumru baş ve ayna kıç etrafında meydana gelen akım ayrılmaları da, ancak viskoz etkiler göz önüne alınarak dikkate alınabilmektedir. Bu etkiler URANS çözümleyicisinde göz önüne alındığı için gerek Bölüm 2.2'de anlatılan URANS yönteminde gerek te Bölüm 2.3'de anlatılan ve radyasyon-bozucu terimlerin viskoz çözücü ile hesaplanmasına dayanan URANS Katsayı yönteminde deneysel veriye daha yakın sonuçlar vermesi beklenmektedir. Bir başka önemli konu, bozucu dalga profilinin dilim teorisinde sinüzoidal formda olduğu varsayılmaktadır. Aslında, yer çekimi nedeniyle sinüzoidal formda bir dalga doğada yoktur. Bu yüzden, modellenen beşinci mertebe Stokes dalgasının deney ortamında üretilen bir düzenli dalgayı daha yakın

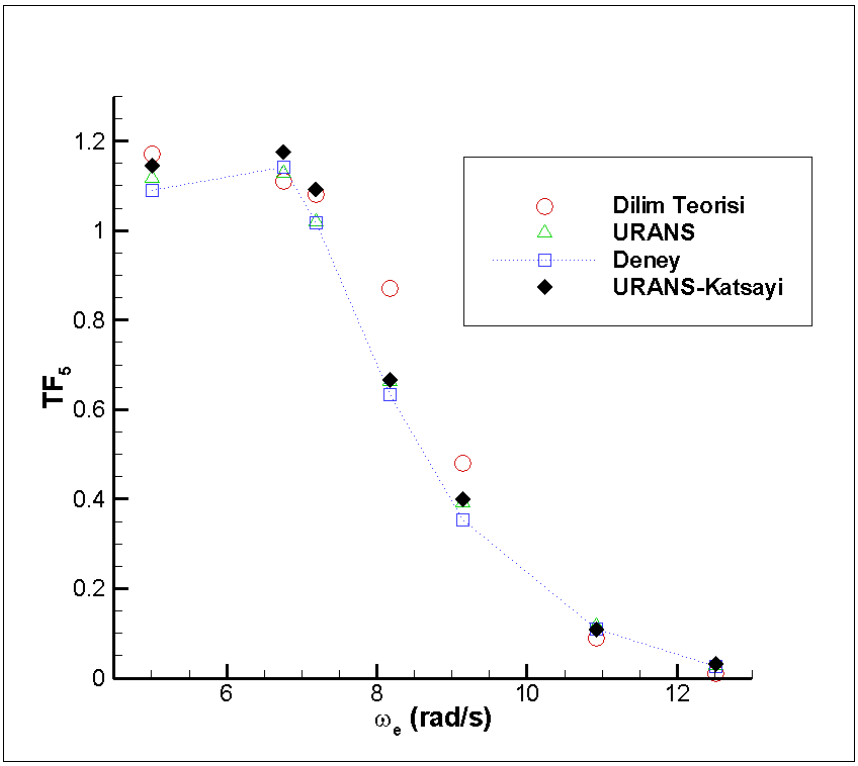
temsil etmesi sebebi ile özellikle yüksek frekans dalga kuvveti hesabında URANS yaklaşımının dilim teorisine göre daha doğru sonuçlar vermesi beklenmektedir.

Çizelge 4. 1 Farklı metotlar için TF karşılaştırması

Senaryo No	Dalıp-çıkma TF (TF_3)				Baş-kıç vurma TF (TF_5)			
	URANS fully	Dilim Teorisi	URANS Katsayı	Deney	URANS fully	Dilim Teorisi	URANS Katsayı	Deney
1	0.044	0.087	0.031	0.047	0.028	0.007	0.031	0.027
2	0.125	0.024	0.135	0.123	0.117	0.091	0.108	0.110
3	0.611	0.517	0.610	0.522	0.392	0.478	0.399	0.354
4	1.063	1.136	1.005	1.002	0.662	0.867	0.665	0.633
5	1.396	1.343	1.388	1.379	1.020	1.075	1.093	1.017
6	1.360	1.298	1.410	1.366	1.129	1.110	1.175	1.141
7	0.989	1.072	1.078	1.069	1.117	1.166	1.146	1.090
Ortalama Farklar	**5.94%**	**26.72%**	**9.54%**	-	**4.34%**	**25.51%**	**7.55%**	-

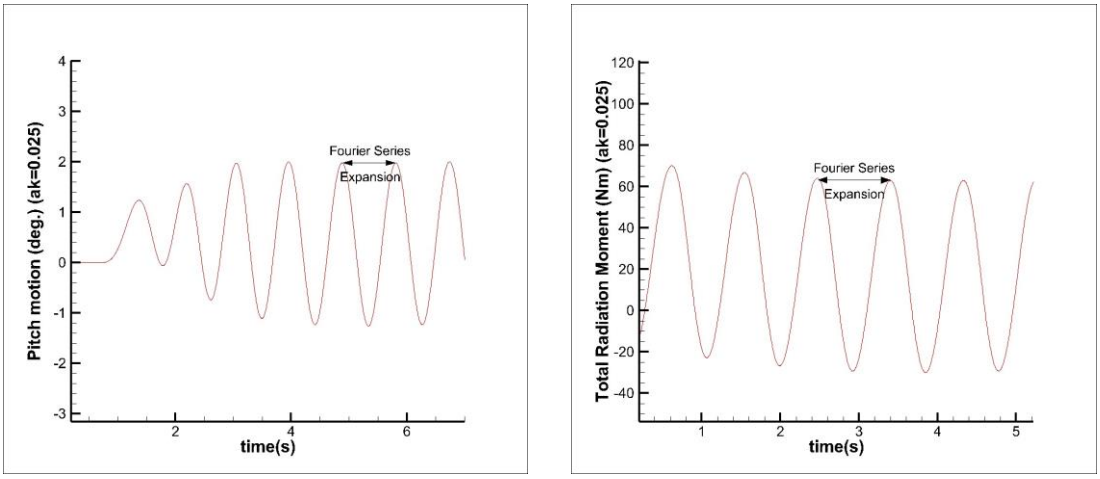


Şekil 4. 1 Dalıp-çıkma TF



Şekil 4. 2 Baş-kıç vurma TF

Bu tez çalışmasında ele alınan iki yöntemin (URANS ve URANS-Katsayı) tek bir frekansta çözüm yapmak için gerekli CPU zamanları da Çizelge 4.2 'de 6. senaryo için birbiriyle karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma çalışması, 128 GB RAM ve 10 çekirdek işlemciye sahip bir iş istasyonu tipi bilgisayar ile gerçekleştirilmiştir. URANS yaklaşımı kullanılarak elde edilen baş-kıç vurma hareketlerinin zaman düzleminde yakınsaması için en az beş periyotluk bir süreye ihtiyaç vardır. Bunun en önemli nedeni, hareket denklemlerinin, geminin ve hesaplama hacmindeki ağın yeni konumunu bulmak için yüksek mertebeden iterasyonlar kullanması, bu durumun da sinyallerin ilk harmoniklerinin yakınsamasını geciktirmesidir. Ayrıca, DFBI denklemleri için, serbest bırakma ve rampa süresi ayarları dikkatli bir şekilde tanımlanmalıdır. Öte yandan, URANS-Katsayı yönteminde, geminin konumu zorlanmış hareket fonksiyonu olarak dayatıldığı için, sinyallerin ilk harmoniğinin yakınsaması nispeten daha kısa bir sürede gerçekleşir. Şekil 4.3'de, 6. senaryo için baş-kıç vurma hareketi (URANS) ve zorlanmış baş-kıç vurma radyasyon momenti (URANS-Katsayı) zaman cevapları sırasıyla verilmiştir.



Şekil 4. 3 6.Senaryo için baş-kıç vurma hareketi (URANS) ve baş-kıç vurma radyasyon momenti (URANS-Katsayı) zaman cevabı

Çizelge 4. 2 CPU süreleri karşılaştırmaları

Uygulanan Yöntem	URANS (beş tam periyot)	URANS-Katsayı (üç tam periyot)			
CPU süresi	14.5 saat (ortalama)	Dalıp-çıkma Radyasyon	Baş-kıç vurma Radyasyon	Bozucu Terim	Toplam
		4.5 saat	4.5 saat	2.5 saat	11.5 saat (ortalama)

Görüldüğü gibi URANS- Katsayı yöntemi URANS yöntemine göre CPU zamanı açısından az da olsa bir avantaj sağlamaktadır. Fakat URANS-Katsayı yönteminin URANS yöntemine göre sağladığı daha önemli bir avantaj doğrusal bir matematiksel modeldeki katsayıları hesaplaması nedeni ile olayın fiziği hakkında daha fazla bilgi vermesidir. Örneğin, bu doktora tezinin 3. Bölümü olan gemi düşey hareketleri kontrol çalışmasındaki matematiksel modelde yer alan katsayıların dilim teorisi yerine URANS-Katsayı yöntemi ile hesaplanması matematiksel modelin daha doğru ifade edilmesi anlamına gelmektedir. Çünkü dilim teorisinde düşük frekanslarda B_{35}, B_{53} ve B_{55} katsayıları asimptotik olarak sonsuza yaklaşır. Bu problemin çözümü için dilim teorisi kullanımında düşük frekans filtrelemesi ile mühendislik açısından bir çözüm bulunur fakat konvolusyon integrallerinin değeri dilim teorisi ile tam olarak hesaplanamaz. Dolayısı ile düşük frekanstaki sönüm değerleri URANS-Katsayı yaklaşımı ile hesaplanabilir. Burada dikkat edilmesi gereken husus düşük frekanslı bir dalgayı modellemek için oldukça geniş bir hesaplama hacmi kullanma zorunluluğudur.

Bu doktora tez çalışmasının 3. Bölümünde ise karışık denizde gemi düşey hareketlerinin azaltılması amacıyla optimal bir kontrolör tasarlanmıştır. Seçilen motoryat formunun H_S=1 metre karakteristik dalga yüksekliğine sahip deniz durumu için Fn=0.25'te ve dalgaları baştan aldığı senaryoda denizcilik analizleri yapılmış ve dalıp-çıkma kuvvet/baş-kıç vurma momentleri zaman düzleminde elde edilmiştir. Daha sonra statik çıkış geri beslemeli kontrolör tasarımı ile karışık deniz durumunda mutlak düşey ivmelenmelerin azaltılması hedeflenmiştir. Tasarlanan kontrolcü sayesinde gemi baş ve kıç lokasyonlarında düşey ivme, baş-kıç vurma hareketinin ciddi bir oranında düşürülmüştür. Gemi dalıp-çıkma ve baş-kıç vurma hareketleri arasındaki faz farklarından dolayı aynı azalma dalıp-çıkma hareketi ve gemi ortası düşey ivme hareketleri için gözlemlenmemiştir.

Tasarlanan kontrolcü sayesinde yarım saatlik gemi yolculuğu için ISO'nun tavsiye ettiği üst limit olan 1 m/s^2 RMS ivme değeri aşılmayarak deniz tutması açısından güvenli bölgede kalınmıştır. Hareketlerin hesaplanan miktarlarda sönümlenebilmesi için Şekil 3.16 ve Çizelge 3.5 ile gösterildiği gibi yaklaşık 42 kN RMS değerindeki kuvveti değişen periyotlarda üretecek bir eyleyici tasarlanmalıdır. Bu eyleyici, düşey yönde kuvvet üretecek ve geminin kıç ve baş tarafına yerleştirilen foiller vasıtasıyla otomatik kontrol ile hücum açılarının kontrol edilmesi sureti ile sağlanmıştır. Çizelge 4.3 ile dalıp-çıkma, baş-kıç vurma, gemi baş düşey ivme, gemi kıç düşey ivme ve gemi orta düşey ivme hareketlerindeki azalma oranları ifade edilmiştir. Görüldüğü gibi baş-kıç vurma hareketindeki ciddi azalma hem gemi başında hem de gemi kıçında bulunan yolcular için düşey ivme değerlerini yüksek oranda azaltmıştır.

Çizelge 4. 3 Dalıp-çıkma, baş-kıç vurma ve gemi düşey ivme hareketlerindeki azalma oranları

İncelenen Cevap	**Azalma Oranı (%)**
Baş-kıç vurma Hareketi	60.76
Dalıp-çıkma Hareketi	10.34
Gemi Baş Düşey İvmesi	55.91
Gemi Kıç Düşey İvmesi	39.81
Gemi Orta Düşey İvmesi	18.70

Çizelge 4.4'de ise kontrollü ve kontrolsüz durumlardaki deniz tutması endeks değerleri yarım saatlik yolculuk için geminin başı, kıçı ve ortası için verilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde kontrollü durumda MSI değerlerinde ciddi bir düşüş gözlemlenmiştir.

Çizelge 4. 4 MSI değerleri

İncelenen Cevap	MSI (Kontrolsüz) (%)	MSI (Kontrollü) (%)
Gemi Baş Düşey İvmesi	10.18	1.55
Gemi Kıç Düşey İvmesi	3.33	0.86
Gemi Orta Düşey İvmesi	1.07	0.57

Bu sonuçlar önerilen statik çıkış geri beslemeli kontrolörün, gemi gibi operasyon anında üzerinden ölçüm alınması zor olan sistemlerin dalga bozucusu etkisindeki hareketlerinin kontrolünde önemli bir potansiyele sahip olduğunu göstermektedir. Çalışmada tasarlanan kontrolcü $\omega_{e_i} = 0.5 : 0.02 : 3.5$ bandında çalıştığı için DD3 (H_S=0.88 metre) ve DD4 (H_S=1.88 metre) için veya daha yüksek hızlarda da efektif olarak kullanılabilir. Not edilmelidir ki kaldırma kuvveti mertebe olarak akış hızının karesi ile orantılı olduğu için yüksek gemi hızları kaldırma kuvveti açısından daha avantajlı olmaktadır. Fakat yüksek gemi ilerleme hızlarında geminin hareketleri de artacağından u=Kx ile ifade edilen kontrol sinyalinin de artacağı not edilmelidir.

Bir diğer önemli husus, gerçekte geminin deniz içerisindeki davranışları doğrusal değildir. Daha önceden de belirtildiği gibi çalışmada kullanılan matematiksel model ve kontrolör kolaylık ve uygulanabilirlik açısından avantajlar barındırdığı için doğrusal olarak seçilmiştir. Kontrol çalışan araştırmacılar iyi bilirler ki önerilen matematiksel model neticede gerçek fiziksel olayı anlatan bir tahmindir. Bunun yanı sıra matematiksel modelde yer alan parametreler değişken deniz şartlarında ve gemi hızlarında değişebilir. Ayrıca, yolcuların değişken ağırlıkları, değişen rüzgâr hızı, karışık denizin doğrusallaştırılarak ifade edilmesi, foillerin ürettiği direnç kuvveti bileşenin kaldırma kuvvetindeki etkisi, anlık gemi düşey hızı ve dalga hızlarının gerçek hücum açısı değerinin değiştirmesi gibi varyasyonlar gemi matematiksel modelinde yer almamaktadır. Bu sebeple çalışmada ele alınan problem matematiksel modelde yer alan belirsizliklerin ve foil dinamiğinin kapalı çevrim sisteme eklenmesi ile dayanıklı kontrolör tasarımı çalışmaları ile genişletilebilir.

Bir diğer önemli husus ise düşey hareketleri aktif kontrol ile azaltabilen foillerin sahip olacağı yüzey alanlarıdır. Kontrol uygulanacak geminin tipine, görevine ve boyutlarına uygun olan foil daha kontrolcü tasarlanmaya başlamadan önce belirlenmelidir. Mevcut çalışmada baş ve kıç foil alanları 17.82 m^2 ve 20.97 m^2 olarak seçilmiştir. Bu seçilen foil alanları tamamen hareketleri istenilen düzeyde azaltabilmesi için yeterli olan foil alanlarıdır ve geminin tasarımında yer alan pervane, dümen, yerleşim alanı, makine gibi düzenlemeler düşünülüp, tasarım spirali mantığı ile değerlendirilmelidir. Öte yandan seçilen foillerin dönüş hızları ile ilgili bir limit literatürde bulunmadığı için bu çalışmada da öngörülmemiştir fakat hidrolik motorlar ile tahrik edilen foillerin dönüş hızı her zaman engelleyici ve aşılması gereken bir sorun olduğundan gerçek bir gemi uygulamasında mutlaka değerlendirilmelidir.

KAYNAKLAR

[1] Bertram V., (2000). Practical Ship Hydrodynamics, Butterworth-Heinemann.

[2] Ozdemir,Y.H, (2014). Gemi Direncinin ve Hareketlerinin Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği Yöntemi Kullanılarak İncelenmesi, Doktora Tezi, YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

[3] Barlas, B., (2000). "Gemi Ön Dizaynı ve Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği", Deniz Harp Okulu Bülteni, 227(36).

[4] Riola, J.M., Esteban, S., Giron-Sierra, J.M. ve Aranda, J., (2004). "Motion and seasickness of fast warships1", In: RTO AVT Symposium on Habitability of Combat and Transport Vehicles: Noise, Vibration and Motion, 4-7 October 2004, Prague.

[5] O'Hanlon J.F. ve McCauley M.E., (1974). "Motion Sickness Incidence as a function of acceleration of vertical sinusoidal motion", Aerospace Medicine, 45:366-369.

[6] ISO, (1985). "Evaluation of Human Exposure to Whole-body Vibration-Part 3: Evaluation of Whole-body z-axis. Vertical Vibration in the Frequency Range 0.1 to 0.63 Hz", ISO 2631-3.

[7] ISO, (1997). "Mechanical Vibration and Shock Evaluation of Human Exposure to Whole Body Vibration-Part 1: General Requirements", ISO 2631-1.

[8] Ursell, F., (1949). "On the heaving motion of a circular cylinder in the surface of a fluid", Quart. J. Mech. Appl. Math, 2: 218-231.

[9] Ursell, F., (1949). "On the rolling motion of a circular cylinder in the surface of a fluid", Quart. J. Mech. Appl. Math., 2: 335-353.

[10] Lewis, F.M., (1929). "The inertia of water surrounding a vibrating ship", Transactions, Society of Naval Architects and Marine Engineers, 27: 1-20.

[11] Tasai, F., (1959). "On the Damping Force and Added Mass of Ships Heaving and Pitching", Technical Report, Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University, Japan, 7(26):131-152.

[12] Tasai, F.,(1961). "Hydrodynamic Force and Moment Produced by Swaying and Rolling Oscillations of Cylinders on the Free Surface, Technical Report, Research Institute for Applied Mechanics", Kyushu University, Japan,9(35).

[13] Frank, W., (1967). “Oscillation of Cylinders in or Below the Free Surface of Deep Fluids”, DTNSRDC Report No. 2375.

[14] Salvesen, N. Tuck, O. ve Faltinsen,O., (1970). “Ship Motions and Sea Loads”, The Society of Naval Architects and Marine Engineers, 78:250-287.

[15] St Denis M. ve Pierson,W., (1953). “On the motions of ships in confused seas”, Trans .Soc. Nav. Archit.Mar.Eng., 61: 280-354.

[16] Sato, Y., Miyata, H. ve Sato, T., (1999). “CFD simulation of 3-dimensional motion of a ship in waves: application to an advancing ship in regular heading waves”, Journal of Marine Science and Technology, 4: 108-116.

[17] Beck, R.F. ve Reed, A.M., (2001). “Modern computational methods for ships in a seaway”, Transactions of the Society of Naval Architects and Marine Engineers, 109:1-51.

[18] Pablo M. Carrica, Robert V. Wilson ve Stern, F., (2006). “Unsteady RANS simulation of the ship forward speed diffraction problem”, Computers & Fluids 35:545-570.

[19] Pablo M. Carrica, Robert V. Wilson, Ralph W. Noack ve Stern, F., (2007). “Ship motions using single-phase level set with dynamic overset grids”, Computers & Fluids, 36:1415-1433.

[20] Irvine, M., Longo, J. ve Stern, F., (2008). “Pitch and Heave Tests and Uncertainty Assessment for a Surface Combatant in Regular Head Waves”, Journal Ship Research, 52(2): 146-163.

[21] Weymouth, G.D., Wilson, R.V. ve Stern, F., (2005). “RANS computational fluid dynamics predictions of pitch and heave motion in head seas”, Journal of Ship Research, 49(2): 80-97.

[22] Deng, G.B., Queutey, P. ve Visonneau, M., (2010). “RANS prediction of the KVLCC2 tanker in head waves”, Journal of Hydrodynamics, 22(5):476-481.

[23] Wilson, R.V., Ji., L., Karman, S.L., Hyams, D.G., Sreenivas, K., Taylor, L.K. ve Whitfield, D.L. (2008). “Simulation of large amplitude ship motions for prediction of fluid-structure interaction”, 27th Symposium on Naval Hydrodynamics, 5-10 October 2008, Seoul.

[24] Querard, A.B.G., Temarel, P. ve Turnock, S.R., (2010). “The hydrodynamics of ship-like sections in heave, sway and roll motions predicted using an unsteady Reynolds averaged Navier-Stokes method”, Engineering for the Maritime Environment, 233:1-12.

[25] Bhushan, S., Xing, T., Carrica, P. ve Stern, F., (2009). “Model- and full-scale URANS simulations of Athena resistance, powering, seakeeping, and 5415 maneuvering”, Journal of Ship Research, 53 (4):179-198.

[26] Simonsen, C.D., Otzen, J.F., Joncquez, S. ve Stern, F., (2013). “EFD and CFD for KCS heaving and pitching in regular head waves”, Journal of Marine Science and Technology, 18 (4):435-459.

[27] Simonsen, C.D. ve Stern, F., (2010). "CFD simulation of KCS sailing in regular head waves", Gothenburg 2010-A Workshop on Numerical Ship Hydrodynamics, Gothenburg.

[28] Guo, B.J., Steen, S. ve Deng, G.B., (2012). "Seakeeping prediction of KVLCC2 in head waves with RANS", Applied Ocean Research, 35(4):179-198.

[29] Tezdogan,T.,Demirel Y.K, Kellett P., Khorasanchi M., Incecik A. ve Turan O., (2015). "Full-Scale unsteady Rans CFD simulations of ship behaviour and performance in head seas due to slow steaming", Ocean Engineering, 97:186-206.

[30] Ozdemir, Y.H. ve Barlas, B., (2017). "Numerical study of ship motions and added resistance in regular incident waves of KVLCC2 model", International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering, 9(2):149-159.

[31] Bonfiglio, L., Vernengo, G., Brizzolara, S. ve Bruzzone, D., (2016). "A Hybrid RANSE – strip theory method for prediction of ship motions", Proceedings of the 3rd International Conference on Maritime Technology and Engineering, 4-6 July 2016, Lisbon.

[32] Lewis, E.V., (1955). Ship speeds in irregular seas, Trans. SNAME.

[33] Abkowitz, M.A., (1959). "The effect of anti-pitching fins on ship motions", Trans. SNAME 67(2): 210–252.

[34] Avis, J., (1991). "Use of Anti-pitch Hydrofoil to Reduce Added Resistance of a Yacht in Waves", Marine Technology and SNAME News 28(1).

[35] Perez, T., (2005). Ship Motion Control. Course Keeping and Roll Stabilisation Using Rudder and Fins, Springer.

[36] Esteban, S., De la Cruz, J. M., Giron-Sierra J. M., De Andres, J. M. Díaz ve J. Aranda, (2000). "Fast Ferry Vertical Accelerations Reduction With active Flaps and T-foil", IFAC Proceedings Volumes,33(21):227-232.

[37] Lopez,R., Santos M.,Polo,O. ve Esteban S., (2002). "Experimenting a fuzzy controller on a fast ferry", Proceedings of the International Conference on Control Applications,18-20 September 2002, Glaskow.

[38] Esteban S., Giron-Sierra, J. M., Toro, B.A. ve De la Cruz,J. M., (2004). "Development of a Control-Oriented Model of the Vertical Motions of a Fast Ferry", Journal of Ship Research, 48(3):218-230.

[39] Esteban S., Piorno J.R., Giron Sierra J.M ve De la Cruz J.M., (2005). "Improving fast-ship seakeeping using several moving actuators", Naval Architect, 10(167):6-7.

[40] Esteban S., Giron Sierra J.M, Piorno J.R. ve Cruz J.M, (2005). "Frequency-Domain Analysis for Prediction of Seasickness on Ships", Marine technology, 42(4):192-198.

[41] Giron Sierra J.M, Esteban S., Piorno J.R. ve F.Velasco, (2005). "Overview of a research on actuators control for better seakeeping in fast ships", Proceedings of the 16th Ifac World Congress, 2-5 July 2005.

[42] Giron Sierra J.M ve Esteban S., (2008). “Frequency Domain Study of Longitudinal Motion Attenuation of a Fast Ferry Using a T-Foil”, IFAC Proceedings Volumes, 42(2): 15004-15009.

[43] Ticherfatine M. ve Quidan Z., (2018). “Model Free Approach based on intelligent PD Controller for Vertical Motion Reduction in Fast Ferries”, Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences, 26:393-406.

[44] Zhang S., Sun M., Liang L. ve Li S., (2014). “H∞ Output Feedback Contol Method for the T-Foil of the Wave Piercing Catamaran”, Proceeding of the 11th World Congress on Intelligent Controller and Automation, June 29-July 4 2014, Shenyang.

[45] Erselcan, I.Ö., (2010). A Frequency Domain Strip Theory Applied to the Seakeeping of the Zumwalt-Class Destroyer, Yüksek Lisans Tezi, Massachusetts Üniversitesi, Massachusetts.

[46] Haskind, M., (1957). “The Exciting Forces and Wetting of Ships in Waves (in Russian)”, Izvestia Akademii Nauk SSSR, Otdelenie Tskhnicheshikh Nauk, 7:65-79.

[47] J. V. Wehausen ve E. V. Laitone, (1960)., Surface Waves, Springer, Berlin.

[48] Fenton, J. D, (1985). “A fifth-order Stokes theory for steady waves”, J. Waterw. Port. Coast. Ocean Engineering, 111 (2): 216-234.

[49] CD-Adapco., (2014). User guide STAR-CCM Version 9.0.2.

[50] Benek, J.A., Steger, J.L., Dougherty, F.C. ve Buning, P.G. (1986). Chimera: A Grid-Embedding Technique (No. AEDC-TR-85-64), Arnold Engineering Development Center, Arnold Air Force Station, Tennessee.

[51] International Towing Tank Conference, (2011). “Practical guidelines for ship CFD applications”, In:Proceedings of the 26th ITTC.

[52] International Towing Tank Conference, (2014). “Ocean Engineering Committee, Final report and recommendation to the 27th ITTC”, In: Proceedings of the 27th ITTC, Copenhagen.

[53] P. J. Roache., (1998). “Verification of Codes and Calculations”, AIAA Journal, 36(5):696-702.

[54] I. Celik, U. Ghia, P. Roache, C.J. Fretias, H. Coleman ve P.E Raad., (2008). “Procedure for estimation and reporting of uncertainty due to discretization in CFD applications”, J. Fluids Eng.-Trans. ASME, 130(7):1-4.

[55] Gui, L., Longo, J. ve Stern, F., (2001). “Towing Tank PIV Measurement System, Data and Uncertainty Assessment for DTMB Model 5512”, Experiments in Fluids, 31: 336-346.

[56] Sarıöz K., Kükner A. ve Narlı E., (2000). “Validation of a strip theory based ship motion prediction program”, Report No TR 01, Department of Ocean Engineering, Istanbul Technical University.

[57] Perez, T. ve Fossen, T.I, (2007). Parametric Time Domain models based on frequency domain data. One-day Tutorial, CAMS'07, 19-21 September 2007, Bol.

[58] Ogilvie, T. F., (1964). "Recent progress towards the understanding and prediction of ship motions", Proceedings of the 5th Sym-posium on Naval Hydrodynamics, 10-12 September 1694, Bergen.

[59] Kurniawan, A., Hals, J. ve Moan, T., (2011). "Assesments of time-domain models of wave energy conversion system", In: Proceedings of the Ninth European Wave and Tidal Energy Conference, University of Southampton, 2011, Southampton.

[60] Kashiwagi, M., (2004). "Transient responses of a VLFS during landing and take-off of an airplane", Journal of Marine Science and Technology 9(1):14–23.

[61] Taghipour, R., Perez, T. ve Moan, T., (2008). "Hybrid frequency-time domain models for dynamic response analysis of marine structures", Ocean Engineering 35:685–705.

[62] Bretschneider, C. L., (1957). "Review of Practical methods for observing and forecasting ocean waves by means of wave spectra and statistics", U. S. Navy Dept. Hydrogr. Off. Pub. 603:264–266.

[63] Fossen, T. I., (2013). Environmental Forces and Moments, Lecture Notes TTK 4190 Guidance and Control of Vehicles, Chapter 8.

[64] Perez, T., (2005). Ship Motion Control Course Keeping and Roll Stabilisation Using Rudder and Fins, Springer.

[65] Soars, A. ve Schmidt, J., (1992). "Motion sickness evaluation on ships", The Eighth International High Speed Conference, 1992, London.

[66] Larsson, L. ve Eliasson, E.R., (2000). Principles of Yacht Design, Second Edition published by Adlard Coles Nautical.

[67] Ghaoui L.E, Oustry F. ve Ait Rami, M., (1997). "A cone complementarity linearization algorithm for static output-feedback and related problems", IEEE transactions on automatic control, 42(8), 1171-1176.

[68] Moon, Y.S, Park P., Kwon W.H. ve Le,Y.S., (2001). "Delay dependent robust stabilization of uncertain state-delayed systems", International Journal of Control, 74 (14):1447-1455.

[69] Dullerud G-E. ve Paganini F., (2005). A course in robust control theory: a convex approach, Springer-Verlag, 1. Baskı.

[70] Boyd S., El Ghaoui L., Feron E. ve Balakrishan V., (1994). Linear matrix inequalities in system and control theory, Society for Industrial and applied mathematics, 1. Baskı.

[71] Abdelaziz T.H.S. ve Valasek M., (2005). "State Derivative Feedback by LQR for Linear Time Invariant Systems", IFAC Proceedings Volumes, 38 (1): 435-440.

[72] Du, H., Li, W. ve Zhang, N., (2012). “Integrated Seat and Suspension Control for a Quarter Car With Driver Model”, IEEE Trans. Veh. Technol., 61(9): 3893-3908.

[73] Yazici, H. ve Sever, M., (2016). “Observer Based Optimal Vibration Control of a Full Aircraft System Having Active Landing Gears and Biodynamic Pilot Model”, Shock and Vibration, 2016:1-20.

[74] Ho D. W. C. ve Niu Y., (2007). “Robust fuzzy design for nonlinear uncertain stochastic systems via sliding-mode control”, IEEE Trans. Fuzzy Syst., 15(3): 350-358.

[75] Löfberg J., (2004). “YALMIP: A toolbox for modelling and optimization in MATLAB”, IEEE International Symposium on Computer Aided Control System Design, Taipei-Taiwan, 2-4.

[76] Strum J-F., (1999). “Using SeDuMi 1.02, a MATLAB toolbox for optimization over symmetric cones”, Optimization Methods and Softwares, 11(4):625-653.

EK-A

WIGLEY TEKNESİNE UYGULANAN DOĞRULAMA VE DOĞRULAMA ÇALIŞMASININ ÖZETİ

Computational Prediction of Hydrodynamic Coefficients for Heave Motion

Ferdi Cakici*, Emre Kahramanoglu*, Suleyman Duman*, Ahmet Dursun Alkan*,**

****Yıldız Technical University, Istanbul, Türkiye**, fcakici@yildiz.edu.tr, emrek@yildiz.edu.tr, sduman@yildiz.edu.tr, alkanad@yildiz.edu.tr*

***** National Defense University, Naval Academy, Istanbul, Türkiye,** adalkan@dho.edu.tr*

Abstract

In this study, the hydrodynamic coefficients associated with heave motion are obtained by using unsteady Reynolds-averaged Navier-Stokes (URANS) approach. The well-known Wigley hull is selected for the calculations of uncoupled added mass and damping coefficients (A_{33}, B_{33}) in deep water. Numerical simulations are performed for six different oscillation frequencies at the Froude number 0.3. First, the 3D ship model is forced in the heave direction with certain frequencies and then the hydrodynamic coefficients are computed with the help of Fourier series expansion. Numerical results are compared with those obtained by the experiments and strip theory. The verification and validation study for the damping term is also performed by implementing the Grid Convergence Index (GCI) method.

Keywords: *Hydrodynamic coefficients, URANS, Wigley hull, Heave motion*

Bu çalışma INT-NAM (3rd International Symposium on Naval Architecture and Maritime) 2018 sempozyumunda Araştırma Görevlisi Ferdi ÇAKICI tarafından sunulmuştur.

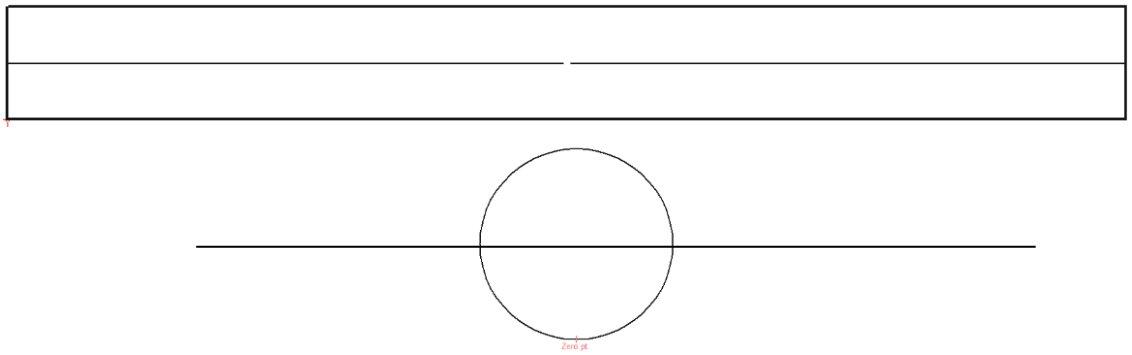
EK-B

CUMMINS DENKLEMLERİ İLE 1 DOF DALIP-ÇIKMA HAREKETİ BENZETİM ÇALIŞMASI

B-1 Düzenli Dalgalarda Benzetim Çalışması

Özelikleri aşağıdaki gibi verilen silindirik bir gemi formu düşünelim.

L=200 metre, T=10 metre, B=20 metre, Kütle= 32130 ton. Burada L gemi boyunu, B gemi genişliğini ve T geminin draftını ifade etmektedir.



Şekil B. 1 Silindir geometrisi

İlerleme hızı kolaylık açısından sıfır alınmıştır. Düzenli dalgalar içerisinde geminin dalıp-çıkma hareketi aşağıda yer alan denklemin çözümü ile bulunabilir:

$$(M + A_{33})\ddot{z} + B_{33}\dot{z} + C_{33}z = F_3\sin(\omega t) \qquad \text{(B.1)}$$

Burada A_{33} dalıp-çıkma hareketine ait ek kütleyi, B_{33} dalıp-çıkma hareketine ait sönümü C_{33} dalıp-çıkma hareketine ait doğrultmayı F_3 ise birim genlikli dalga için dalıp-çıkma kuvvetini ifade eder. M geminin kütlesini, z dalıp-çıkma hareketini, $\dot{z}$ dalıp-çıkma hızını

ve $\ddot{z}$ dalıp-çıkma ivmesini ifade eder. Benzetim çalışmaları Çizelge B.1' de yer alan frekansları kapsamaktadır. Dalga boyları $0.993L_{WL}$-$1.925L_{WL}$ arasında değişmektedir.

Çizelge B. 1 Benzetim çalışması parametreleri

	ω=0.400 rad/s	ω=0.454 rad/s	ω=0.557 rad/s
M (ton)	32130	32130	32130
A_{33} (ton)	37130	31969	24961
B_{33} (ton/s)	19186	19685	19757
C_{33} (ton/s^2)	40167	40167	40167
F_3 (kN)	18860	12210	139.5

Diğer bir taraftan tek serbestlik dereceli dalıp-çıkma hareketi aşağıda yer alan Cummins denkleminin çözümü ile de çözülebilir:

$$(M + A_{33}^{\infty})\ddot{z} + \int_0^t K_{33}(t-\tau)\dot{z}d\tau + C_{33}z = F_3\sin(\omega t) \tag{B.2}$$

Burada A_{33}^{∞} sonsuz frekanstaki ek kütleyi, (bu örnek için 31213 ton) ve K_{33} dalıp-çıkma hareketi için zamana bağlı anlık darbe veya geciktirme fonksiyonun ifade eder ve aşağıdaki gibi elde edilir.

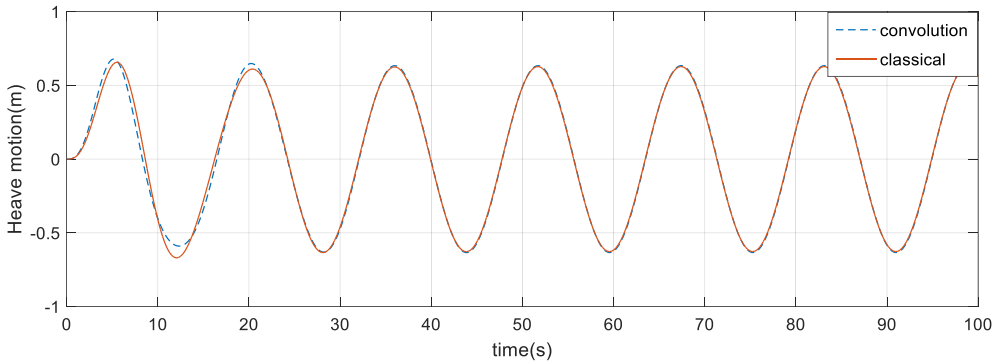
$$K_{33}(t) = \frac{2}{\pi}\int_0^{\infty} B_{33}(\omega)\cos(\omega t)\mathrm{d}\omega \tag{B.3}$$

Benzetim çalışmaları özellikleri aşağıda verilmiştir:

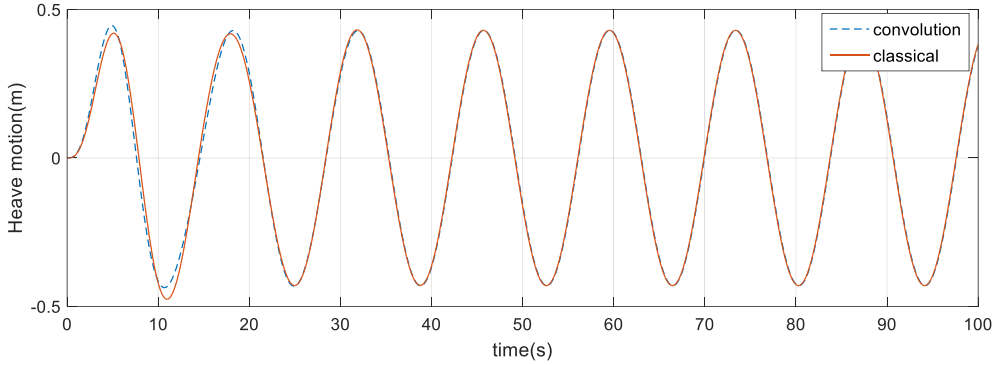
t^1=10s. (Konvolusyon integrallerinin hesabında dikkate alınan hafıza süresi)

Zaman adımı: 0.01 s.

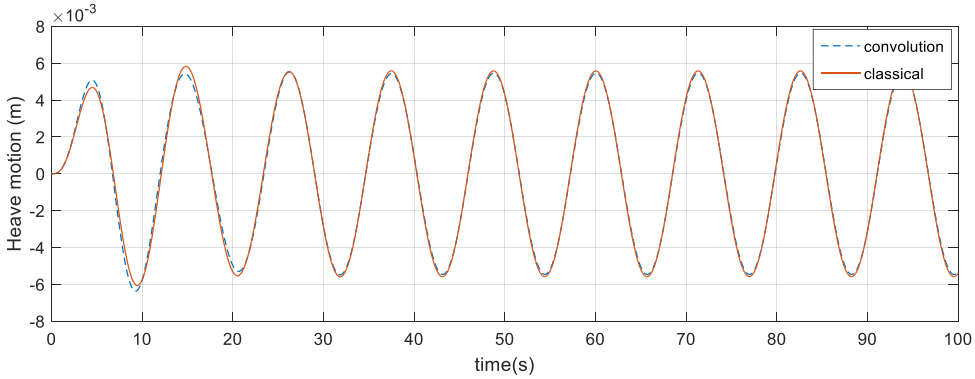
Benzetim süresi: Düzenli dalgalarda dalıp-çıkma hareketi için 100 saniye, Karışık deniz ortamında dalıp-çıkma hareketi için 200 saniye olarak alınmıştır. Başlangıç koşulları sıfır olarak alınmıştır. Düzenli dalgalar için elde edilen çözümlemeler aşağıda verilmiştir.



Şekil B. 2 ω=0.4 rad/s için dalıp-çıkma hareketi zaman cevabı



Şekil B. 3 ω=0.454 rad/s için dalıp-çıkma hareketi zaman cevabı

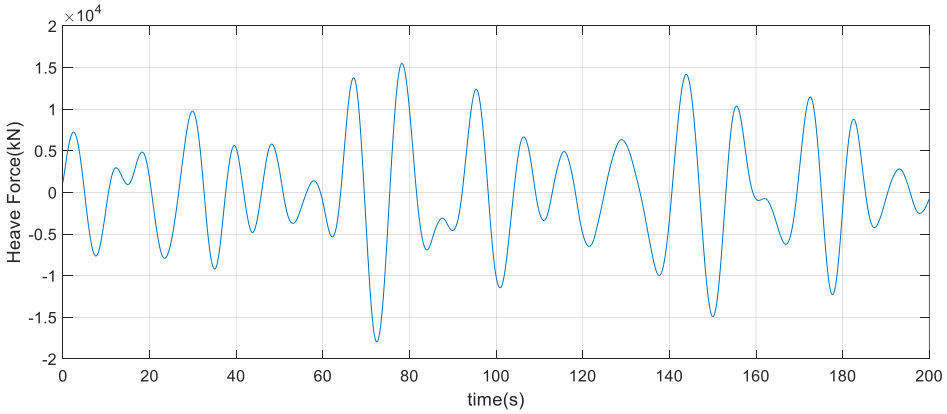


Şekil B. 4 ω=0.557 rad/s için dalıp-çıkma hareketi zaman cevabı

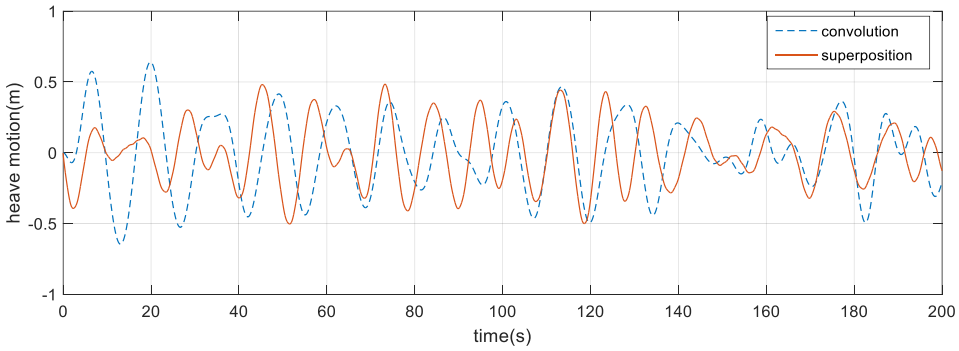
B-2 Karışık Dalgalarda Benzetim Çalışması

Hs=5 m karakteristik dalga yüksekliğine sahip 1 parametreli idealize edilmiş bir dalga spektrumu ele alalım. Lineer süperposizyon yardımı ile elde edilen dalıp-çıkma rms değerinin bu örnekte 0.261 metre olduğunu not edilmelidir. Denklem B.2'de yer alan Cummins denkleminin çözümü ile elde edilen dalıp-çıkma hareketi zaman düzlemi sinyalinden alınan rms cevabı ise 0.255 metre olarak elde edilmiştir. Denklem B.2'nin çözümünde kullanılan zorlayıcı terim F_3 Şekil B. 5' te verilmiş olup, uygun bir dalga

spektrumu gerçekleştirmesi kullanılarak elde edilmiştir. Denklem B.1 ve süperpozisyon prensibi ile elde edilen (superposition) ve Denklem B.2 (convolution) direk çözülmesi ile elde edilen çözümlemeler Şekil B. 6 elde edilmiştir.

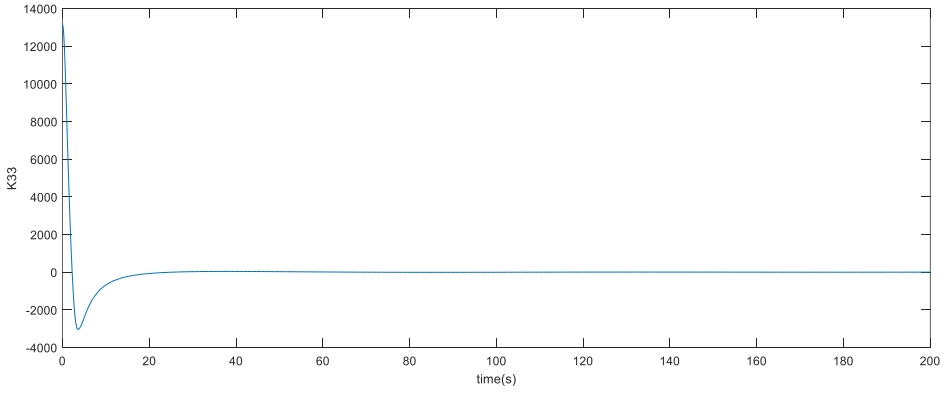


Şekil B. 5 Dalıp-çıkma kuvveti zaman düzlemi cevabı (Hs=5 m, RMS: 6442 kN)

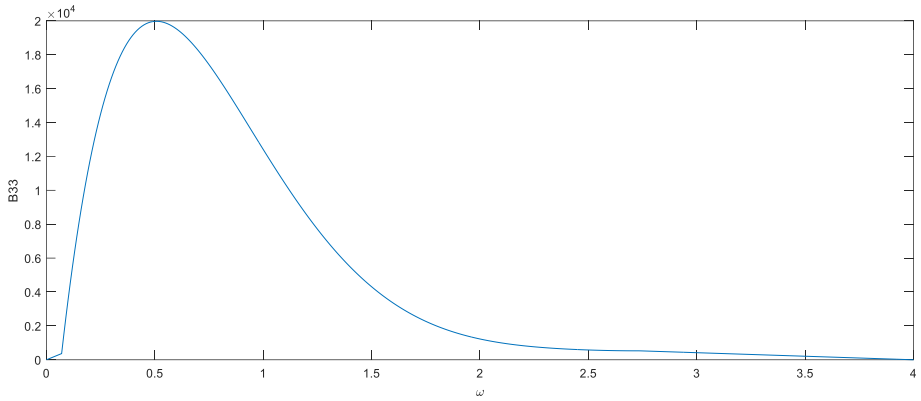


Şekil B. 6 Dalıp-çıkma hareketi zaman düzlemi cevabı (Hs=5 m)

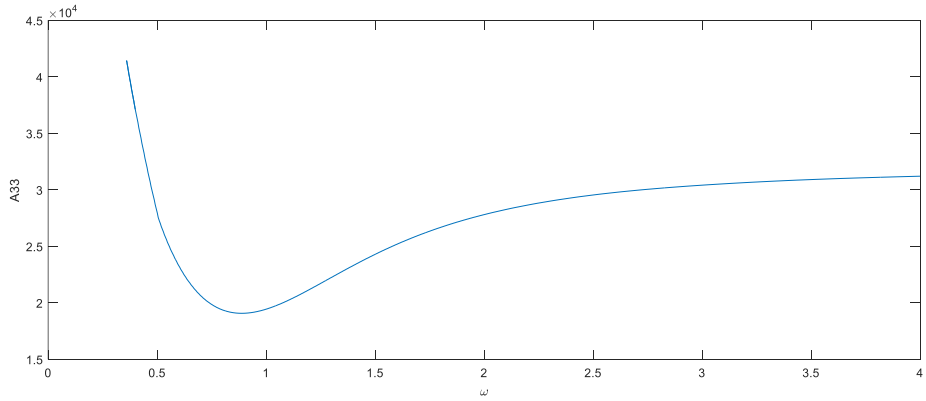
Aşağıda yer alan grafiklerde ise çözüm için kullanılan parametreler verilmiştir.



Şekil B. 7 K33-zaman grafiği



Şekil B. 8 B33- frekans grafiği



Şekil B. 9 A33- frekans grafiği

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Ferdi ÇAKICI

Doğum Tarihi ve Yeri : 29.02.1988, İSTANBUL

Yabancı Dili : İngilizce, İtalyanca

E-posta : ferdicakici88@gmail.com, fcakici@yildiz.edu.tr

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Y. Lisans	Gemi İnş. ve Gemi Mak. Müh.	Yıldız Teknik Üniversitesi	2013
Lisans	Gemi İnş. ve Gemi Mak. Müh.	Yıldız Teknik Üniversitesi	2010
Lise	Fen Bilimleri	Gebze Lisesi	2004

İŞ TECRÜBESİ

Yıl	Firma/Kurum	Görevi
2018-2018	Napoli Federico II Üniversitesi	Konuk Araştırmacı
2012-Halen	Yıldız Teknik Üniversitesi	Araştırma Görevlisi

YAYINLARI

Makale

1. Cakici F., Yazici H. ve Alkan A.D., (2018). “Optimal control design for reducing vertical acceleration of a motor yacht form”, Ocean Engineering, 169:636-650.
2. Cakici F., Kahramanoğlu E., Duman S. ve Alkan A.D., (2018). “A new URANS based approach onthe prediction of Vertical motions of a surface combatant in head waves”, Ocean Engineering, 162:21-33.
3. Cakici F., Kahramanoglu E. ve Alkan A.D, (2017). “Numerical Prediction of Vertical Ship Motions and Added Resistance”, International Journal Of Maritime Engineering, 159: 20-30.
4. Cakici F., Sukas O.F., Kinaci O.K. ve Alkan A.D, (2017). “Prediction of the Vertical Motions of DTMB 5415 Ship Using Different Numerical Approaches”, Brodogradnja,2: 29-44.
5. Sukas O.F., Kinaci O.K., Cakici F. ve Gokçe M.K., (2017). “Hydrodynamic assessment of planing hulls using overset grids”, Applied Ocean Research, 65:35-46.
6. Çakıcı F. ve Kahramanoğlu E., (2017). “Bir Balıkçı Gemisi Formu İçin Dönme Ve Zig-Zag Testi Simülasyonu”, Gemi ve Deniz Teknolojisi Dergisi, 208:62-70.
7. Yazici H. ve Cakici F., (2017). “Bir Yolcu Gemisinin Düşey İvmelerinin Azaltılması için Statik Çıkış Geri Beslemeli Kontrolör Tasarımı, Journal of Eta Maritime Science,5: 322-332.
8. Yildiz B., Cakici F., Katayama T. ve Yilmaz H., (2016). “URANS prediction of roll damping for a ship hull section at shallow draft”, Journal of Marine Science Technology, 21:48-56.
9. Cakici F. ve Aydın M., (2014). “Investigation Of Habitability Indices Of YTU Gulet Series In Various Sea States”, Brodogradnja, 3:89-98.
10. Cakici F. ve Aydin M., (2014). “Effects of hull form parameters on seakeeping for YTU gulet series with cruiser stern”, International Journal of Naval Architecture And Ocean Engineering,6:700-714.
11. Çakıcı F. ve Usta O., (2013). “Farklı Salma Geometrilerinin ve Tekne Karinasının Kaldırma Kuvvetine Etkileri”, Gemi ve Deniz Teknolojisi Dergisi, 196:32-37.

Bildiri

1. Cakici F., Kahramanoglu E., Duman S. ve Alkan A.D., (2018). "Computational Prediction of Hydrodynamic Coefficients for Heave Motion", International Symposium on Naval Architecture and Maritime, 24-25 April 2018, Istanbul.
2. Duman S., Cakici F. ve Bal S., (2018). "Numerical Simulation of Dynamic Maneuvering of a Surface Combatant Using Overset Grid Method", International Symposium on Naval Architecture and Maritime, 24-25 April 2018, Istanbul .

3. Yildiz B., Kahramanoglu E., Cakici F. ve Katayama T., (2017). "Numerical and Experimental Prediction of Roll Damping for A High-Speed Planing Hull ", Symposium on High Speed Marine Vehicles,25-26 October 2017, Napoli.
4. Çakıcı F. ve Yazıcı H., (2017). "Bir Yolcu Gemisinin Düşey Hareketlerinin Azaltılması İçin Optimal Kontrolör Tasarımı", 18. Ulusal Makine Teorisi Sempozyumu, 5-7 Temmuz 2017, Trabzon.
5. Çakıcı F. ve Alkan A.D., (2016). "Denizde Konfor Değerlendirme Metotlarına Genel Bir Bakış", GMO-SHIPMAR, 8-9 Aralık 2016, Istanbul.
6. Sukas O.F., Çakici F. ve Gokce M.K., (2016). "Numerical Simulation of Fridsma Hull Using Overset Grid System", Numerical Towing Tank. Symposium, 2-5 July 2017, Nantes.
7. Cakici F., Sukas O.F., Kinaci O.K. ve Alkan A.D., (2016). "Linear and Nonlinear Computations of Seakeeping Abilities of a Containership", International Conference On Computational Fluid Dynamics, 11-15 July 2016, Istanbul.
8. Cakici F., Sukas O.F., Usta O. ve Alkan A.D., (2015). "A Computational Investigation of a Planing Hull in Calm Water by U-RANSE Approach", International Conference on Advances in Applied and Computational Mechanics, 5-7 August 2015, Izmir.
9. Cakici F., Yildiz B. ve Alkan A.D., "Crew Comfort Investigation for Vertical and Lateral Responses of a Container Ship", International Conference on the Stability of Ships and Ocean Vehicles, 14-19 June 2015, Glaskow.
10. Cakici F., Sukas O.F. ve Alkan A.D., (2014). "An Investigation of Comfort on Board Calculations for a Passenger Catamaran and Mega Yacht Hulls", International Symposium on Naval Architecture and Maritime, 23-24 October 2014, Istanbul.
11. Çakıcı F. ve Kınacı Ö.K., (2012). "Yüksek Froude Sayılarında Çalışan Hidrofoiller Üzerinde Serbest Su Yüzeyi Etkisi", Gemi İnşaatı ve Deniz Teknolojisi Teknik Kongresi 2012, 13-14 Aralık 2012, Istanbul.
12. Çakıcı F., Yalçın H.Ç. ve Olcay A.B., (2012). "Aortik kapakçık yapraklarının boyunun ve Young modülünün regurjitasyona etkisinin iki boyutlu sayısal analizi", 17.Biyomedikal Mühendisliği Ulusal Toplantısı, 3-5 Ekim 2012, Istanbul.
13. Cakici F., Usta O., Dogrul A. ve Bayraktar S., "Investigation of the Effects of Different Keel Geometries on a Sailing Yacht", 19th International Conference on Hydrodynamics in Ship Desıgn, 19-21 September 2012, Gdansk.
14. Dogrul A., Cakici F., Kınacı O.K. ve Bayraktar S., "Investigation of the Effects of Gurney Flap on the Lift OF NACA 0012 Airfoil in Varying Lengths", 19th International Conference on Hydrodynamics in Ship Desıgn, 19-21 September 2012, Gdansk.

Proje

1. Bir gemi formunun düzenli dalgalardaki hareketlerinin farklı matematiksel yöntemlerle incelenmesi, BAP Arastırma Projesi, 2015-10-01-KAP01, Araştırmacı, 2017.