T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DOĞRUSAL MATRİS EŞİTSİZLİKLERİNE DAYALI OPTİMAL KONTROL YÖNTEMLERİYLE YALPA HAREKETİNİN DENETLENMESİ

HAKAN DEMİREL

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

DANIŞMAN
PROF. DR. FUAT ALARÇİN

İSTANBUL, 2017

T.C.

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DOĞRUSAL MATRİS EŞİTSİZLİKLERİNE DAYALI OPTİMAL KONTROL YÖNTEMLERİYLE YALPA HAREKETİNİN DENETLENMESİ

Hakan Demirel tarafından hazırlanan tez çalışması 22.08.2017 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. Fuat ALARÇİN

Yıldız Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri

Prof. Dr. Fuat ALARÇİN

Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Prof. Dr. Halil ÖZER

Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Yrd. Doç. Dr. Sebahattin EKER

İstanbul Teknik Üniversitesi _____

Prof. Dr. Oğuz Salim SÖĞÜT

İstanbul Teknik Üniversitesi _____

Doç. Dr. Serkan EKİNCİ

Yıldız Teknik Üniversitesi _____

ÖNSÖZ

Akademisyen olmak belli zorlukları beraberinde getirir, doktora çalışmasıda bu yolun uzun soluklu ve önemli bir parçasıdır. Bu süreçte insan her anlamda desteğe ihtiyaç duyar. Bu anlamda bu süre boyunca desteğini benden esirgemeyen birçok insan olması nedeniyle şükrediyorum.

Doktora eğitimine başladığım günden itibaren bana her türlü fedakârlığı ve manevi desteği gösteren, bilgi birikimi ve tecrübesini aktaran, beni her alanda ve anlamda destekleyen değerli hocam, büyüğüm Sayın Prof. Dr. Fuat ALARÇİN'e saygılarımı ve şükranlarımı sunarım. Aynı şekilde tez izleme jürimde değerli görüşleri ile bana hep destek olan değerli hocalarım Sayın Prof.Dr. Halil ÖZER ve Sayın Yrd. Doç. Dr. Sebahattin EKER'e teşekkürlerimi sunarım.

Doktora eğitimim sırasında değerleri fikirleri beni destekleyen hocam Sayın Yrd. Doç. Dr. Hakan YAZICI'ya gönülden teşekkür ederim. Ayrıca Yrd. Doç. Dr. Burak YILDIZ'a, Yrd. Doç. Dr. Ali Doğrul'a, Arş. Gör. Savaş Sezen'e, Arş. Gör. Ferdi Çakıcı'ya ilgi ve destekleri için sevgilerimi sunarım.

Bugünlere gelmemde emeği büyük olan sevgili anneme, babama ve moral desteği için çok değerli kardeşime sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Ağustos, 2017

Hakan DEMİREL

İÇİNDEKİLER

Sayfa

SİMGE LİSTESİ vi

KISALTMA LİSTESİ viii

ŞEKİL LİSTESİ ix

ÇİZELGE LİSTESİ xi

ÖZET xii

ABSTRACT xiv

BÖLÜM 1

GİRİŞ

1.1 Literatür Özeti 1

1.2 Tezin Amacı 13

1.3 Hipotez 14

BÖLÜM 2

GEMİ DİNAMİĞİ 15

2.1 Altı Serbestlik Dereceli Gemi Hareketleri 16

2.2 Dalga Modeli 19

2.3 Hidrodinamik Kuvvetler 21

2.4 Yalpa Hareketi Denklemi 24

BÖLÜM 3

UYGULAMALARDA KULLANILAN GEMİLER VE ÖZELLİKLERİ 28

3.1 Temel Akışkanlar Mekaniği Denklemleri 28

3.2 RANS Denklemleri 30

3.3 HAD Analizi Için Kullanilan 41 m Balikçi Teknesi 32
3.4 HAD Analizi için Kullanilan Balikçi Teknesi 38
3.5 HAD Analizi için Kullanilan Kayici Tekne 42

BÖLÜM 4

GEMİ YALPA HAREKETİNİN DENGELENMESİNDE GERİ ADIMLAMALI DENETLEYİCİ TASARIMI 47
4.1 Geri Adımlamalı Denetleyici Dizaynı 47
4.2 Geri Adımlamalı Denetleyici Tasarımı Uygulaması 50
4.3 Balıkçı Teknesi İçin Geri Adımlamalı Denetleyici Tasarımı 51

BÖLÜM 5

DOĞRUSAL MATRİS EŞİTSİZLİKLERİ VE TEMEL KAVRAMLAR 59
5.1 H_∞ ve H_2 Normları 59
5.2 DME Tabanlı Durum Geri-Beslemeli H_∞ ve H_2 Denetleyici Tasarımı 61
5.3 Benzetim Çalışmaları 65

BÖLÜM 6

KAYICI TEKNENİN YALPA HAREKETİNİN DENGELENMESİ İÇİN DME TABANLI DOYUMLU DAYANIKLI DENETLEYİCİ TASARIMI 81
6.1 Yalpa Sönümü İçin Öngörülen Metod 81
6.2 Yalpa Sönümünde Dikey Kaldırma Bileşenini Öngören Metot 82
6.3 Yalpa Hareketinin Dengelenmesi İçin Dme Tabanlı Dayanıklı Ve Doyumlu H_∞ Durum Geri Beslemeli Denetleyici Tasarımı 86
6.4 Benzetim Çalışmaları 89

BÖLÜM 7

SONUÇ VE ÖNERİLER 106
KAYNAKLAR 109

EK-A

MATLAB KODLARI 115
ÖZGEÇMİŞ 117

SİMGE LİSTESİ

A	Sistem Matrisi
ΔA	Parametre Belirsizliği Matrisi
A^T	A matrisinin Transpozesi
B_w	Bozucu Girişinin Matrisi
C	Ölçüm Matrisi
E_A	Sistemdeki Belirsizliklerin Yapısını İfade eden Bilinen Sabit Matris
G	Sistemdeki Belirsizliklerin Yapısını İfade eden Bilinen Sabit Matris
$F(t)$	Lebesque Sınırlı Ölçülebilir Bilinmeyen Matris Fonksiyonu
I	Uygun Boyutlu Birim Matris
K	Denetim Kazanç Matrisi
$u(t)$	Denetim Giriş vektörü
$w(t)$	Bozucu Giriş Vektörü
$x(t)$	Sistem Durum Vektörü
$z(t)$	Denetlenmek İstenen Çıkış Vektörü
$\|\cdot\|_\infty$	H_∞ normu
$\|\cdot\|_2$	H_2 normu
B	Genişlik
C_B	Blok Katsayısı
D	Derinlik
Fn	Froude Sayısı
g	Yerçekimi İvmesi
GM	Metasantr Yüksekliği
GZ	Doğrultucu Moment Kolu
KG	Ağırlık Merkezinin Dikey Mesafesi
U	İleri Hız

ϕ	Yalpa Açısı
$\dot{\phi}$	Yalpa Açısal Hızı
B_{44}	Eşdeğer Yalpa Sönüm Katsayısı
B_{VL}	Dikey Kaldırma Bileşeni

KISALTMA LİSTESİ

DME	Doğrusal Matris Eşitsizliği
HAD	Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği
PID	Oransal-İntegral-Türevsel
PD	Oransal-Türevsel
SUP	Bir Kümenin Supremumu
YSA	Yapay Sinir Ağı

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2. 1 Altı Serbestlik Dereceli Gemi Hareketleri görünüm 17
Şekil 2. 2 Dalgaların gemiye geliş yönleri 20
Şekil 2. 3 Pierson-Moskowitz Dalga Spektrumu [7] 21
Şekil 2. 4 Sinüzoidal dalga fonksiyonu 21
Şekil 2. 5 Sönüm etkilerinin gösterimi 23
Şekil 2. 6 Küçük Açılarda Stabilite İfadeleri 25
Şekil 3. 1 Balıkçı teknesi 1'in genel görünümü 33
Şekil 3. 2 Balıkçı teknesi 1'in $GZ-\phi_v(^\circ)$ Eğrisi 34
Şekil 3. 3 Hesaplama hacmine uygulanan sınır koşulları 36
Şekil 3. 4 Tekne etrafında oluşan basınç ve hız dağılımları 37
Şekil 3. 5 Balıkçı teknesi 1'e ait kaldırma katsayısı-hücum açısı değişimi 38
Şekil 3. 6 Balıkçı teknesi 2'nin genel görünümü [87] 39
Şekil 3. 7 Balıkçı teknesi 2'nin $GZ-\phi_v(^\circ)$ Eğrisi 40
Şekil 3. 8 Balıkçı teknesi 2'ye ait kanat üzerindeki boyutsuz basınç dağılımı 41
Şekil 3. 9 Balıkçı teknesi 2'ye ait kanat etrafındaki hız dağılımı 41
Şekil 3. 10 Balıkçı teknesi 2'ye ait kaldırma katsayısı-hücum açısı değişimi 42
Şekil 3. 11 Kayıcı teknenin genel görünümü 43
Şekil 3. 12 Kayıcı teknenin $GZ-\phi_v(^\circ)$ eğrisi 44
Şekil 3. 13 Kayıcı tekneye ait kanat etrafındaki hız dağılımı 44
Şekil 3. 14 Kayıcı tekneye ait kanat üzerindeki boyutsuz basınç dağılımı 45
Şekil 3. 15 Kayıcı teknenin kaldırma katsayısı-hücum açısı değişimi 45
Şekil 4. 1 Genel Geri Adımlamalı Denetleyici Dizaynı [81] 52
Şekil 4. 2 Aktüatörün giriş-çıkış değerlerinin ilişkisi 52
Şekil 4. 3 Modele ait Simulink Diagramı 55
Şekil 4. 4 Denetimli ve denetimsiz durumda yalpa genliği 56
Şekil 4. 5 Denetimli ve denetimsiz durumda yalpa açısal hızı 56
Şekil 4. 6 Denetimli ve denetimsiz durum için frekans cevabı 57
Şekil 4. 7 Doğrusal olmayan modelin faz diagramı 58
Şekil 5. 1 Yalpa hareketinin genliğinin *GM* = 0.8 için denetimli ve denetimsiz durum cevapları 65
Şekil 5. 2 Yalpa hareketinin açısal hızının GM = 0.8 için denetimli ve denetimsiz durum cevapları 66
Şekil 5. 3 Kanat açısının *GM* = 0.8 için denetimli ve denetimsiz durum cevapları 66

Şekil 5. 4 Kontrol sinyalinin *GM* = 0.8 için denetimli ve denetimsiz durum cevapları ... 67
Şekil 5. 5 Yalpa hareketinin *GM* = 0.8 için frekans cevabı ... 68
Şekil 5. 6 Yalpa hareketinin genliğinin GM = 0.5 için denetimli ve denetimsiz durum cevapları ... 69
Şekil 5. 7 Yalpa hareketinin açısal hızının GM = 0.5 için denetimli ve denetimsiz durum cevapları ... 69
Şekil 5. 8 Kanat açısının *GM* = 0.5 için denetimli ve denetimsiz durum cevapları ... 70
Şekil 5. 9 Kontrol sinyalinin *GM* = 0.5 için denetimli ve denetimsiz durum cevapları ... 70
Şekil 5. 10 Yalpa hareketinin *GM* = 0.5 için frekans cevabı ... 72
Şekil 5. 11 Yalpa hareketinin genliğinin GM = 0.3 için denetimli ve denetimsiz durum cevapları ... 73
Şekil 5. 12 Yalpa hareketinin açısal hızının GM = 0.3 için denetimli ve denetimsiz durum cevapları ... 73
Şekil 5. 13 Kanat açısının *GM* = 0.3 için denetimli ve denetimsiz durum cevapları ... 74
Şekil 5. 14 Kontrol sinyalinin *GM* = 0.3 için denetimli ve denetimsiz durum cevapları ... 74
Şekil 5. 15 Yalpa hareketinin *GM* = 0.3 için frekans cevabı ... 76
Şekil 5. 16 Üç farklı *GM* durumu için denetimsiz yalpa açısı cevapları ... 77
Şekil 5. 17 Üç farklı *GM* durumu için H_2 denetimli yalpa açısı cevapları ... 77
Şekil 5. 18 Üç farklı *GM* durumu için H_∞ denetimli yalpa açısı cevapları ... 78
Şekil 5. 19 Üç farklı *GM* durumu için denetimsiz yalpa hızı cevapları ... 78
Şekil 5. 20 Üç farklı *GM* durumu için H_∞ denetimli yalpa hızı cevapları ... 79
Şekil 5. 21 Üç farklı *GM* durumu için H_2 denetimli yalpa hızı cevapları ... 79
Şekil 6. 1 Teknenin en kesiti[86] ... 83
Şekil 6. 2 Teknenin kıç kesiti[86] ... 83
Şekil 6. 3 Yalpa genliğinin 5 knot için denetimli ve denetimsiz cevapları ... 90
Şekil 6. 4 Yalpa açısal hızının 5 knot için denetimli ve denetimsiz cevapları ... 90
Şekil 6. 5 Kanat açısının 5 knot için denetimli ve denetimsiz durum cevapları ... 91
Şekil 6. 6 Kontrol sinyalinin 5 knot için denetimli ve denetimsiz durum cevapları ... 92
Şekil 6. 7 Hız 5 knot için denetimli ve denetimsiz frekans cevabı ... 93
Şekil 6. 8 Yalpa genliğinin 8 knot için denetimli ve denetimsiz cevapları ... 94
Şekil 6. 9 Yalpa açısal hızının 8 knot için denetimli ve denetimsiz cevapları ... 94
Şekil 6. 10 Kanat açısının 8 knot için denetimli ve denetimsiz durum cevapları ... 95
Şekil 6. 11 Kontrol sinyalinin 8 knot için denetimli ve denetimsiz durum cevapları ... 96
Şekil 6. 12 Hız 8 knot için denetimli ve denetimsiz frekans cevabı ... 97
Şekil 6. 13 Yalpa genliğinin 12 knot için denetimli ve denetimsiz cevapları ... 98
Şekil 6. 14 Yalpa açısal hızının 12 knot için denetimli ve denetimsiz cevapları ... 98
Şekil 6. 15 Kanat açısının 12 knot için denetimli ve denetimsiz durum cevapları ... 99
Şekil 6. 16 Kontrol sinyalinin 12 knot için denetimli ve denetimsiz durum cevapları ... 99
Şekil 6. 17 Hız 12 knot için denetimli ve denetimsiz frekans cevabı ... 101
Şekil 6. 18 Yalpa genliğinin 16 knot için denetimli ve denetimsiz cevapları ... 102
Şekil 6. 19 Yalpa açısal hızının 16 knot için denetimli ve denetimsiz cevapları ... 102
Şekil 6. 20 Kanat açısının 16 knot için denetimli ve denetimsiz durum cevapları ... 103
Şekil 6. 21 Kontrol sinyalinin 16 knot için denetimli ve denetimsiz durum cevapları ... 103
Şekil 6. 22 Hız 16 knot için denetimli ve denetimsiz frekans cevabı ... 104

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2. 1 Altı serbestlik dereceli hareketlere ait notasyonlar..... 17
Çizelge 2. 2 Farklı Gemi Türleri İçin Sabit Katsayılar..... 26
Çizelge 3. 1 Balıkçı teknesi 1'e ait karakteristik değerler..... 33
Çizelge 3. 2 Balıkçı teknesi 2'ye ait karakteristik değerler..... 39
Çizelge 3. 3 Kayıcı tekneye ait karakteristik değerler..... 43
Çizelge 5. 1 *GM* = 0.8 için karşılaştırmalar..... 67
Çizelge 5. 2 *GM* = 0.5 için karşılaştırmalar..... 71
Çizelge 5. 3 *GM* = 0.3 için karşılaştırmalar..... 75
Çizelge 6. 1 Hıza karşılık sönüm katsayıları..... 85
Çizelge 6. 2 Hız 5 knot kabulü ile karşılaştırmalar..... 92
Çizelge 6. 3 Hız 8 knot kabulü ile karşılaştırmalar..... 96
Çizelge 6. 4 Hız 12 knot kabulü ile karşılaştırmalar..... 100
Çizelge 6. 5 Hız 16 knot kabulü ile karşılaştırmalar..... 104

ÖZET

DOĞRUSAL MATRİS EŞİTSİZLİKLERİNE DAYALI OPTİMAL KONTROL YÖNTEMLERİYLE YALPA HAREKETİNİN DENETLENMESİ

Hakan DEMİREL

Gemi İnşaatı ve Gemi Makineleri Mühendisliği Anabilim Dalı

Doktora Tezi

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Fuat ALARÇİN

Gemi hareketleri içerisinde yalpa hareketi önemli bir yere sahiptir. Özellikle yüksek genlikli yalpa hareketlerinin gemilerin kararlılık açısından güvenli bölgelerden çıkıp devrilmelerine neden olduğu bilinmektedir. Bu nedenle gemilerin yalpa hareketinin farklı seyir şartlarında kararlı noktalarda tutulması gerekmektedir. Yalpa hareketini değerlendirmek için öncelikli olarak harekete ait parametreler doğru analiz edilmelidir. Özellikle sönüm ve doğrultucu moment değerleri, gemi dinamiğini doğrudan etkilediğinden farklı seyir şartlarında yalpa kararlılığının sağlanması açısından kritik bir öneme sahiptir. Bu katsayılar ampirik ya da deneysel olarak belirlendikten sonra geminin karakteristik değerleri de hesaba katılarak hareketle olan etkileşim için gerekli şartlar hazırlanır.

Son dönemlerde yalpa hareketinin genliklerini azaltarak gemilerin güvenli seyir gerçekleştirmesini sağlama ve manevra kabiliyetini artırma amacıyla, dengeleyici kanat sistemleri birçok gemi türüne uygulanmaktadır. Yapılan uygulamalarla farklı denetleyici yapılarının da kullanımı hızla artmaktadır.

Bu çalışmada balıkçı ve kayıcı olmak üzere iki farklı gemi türü için yalpa hareketinin dinamikleri incelenmiştir. Yalpa hareketine ait sönüm değerleri ampirik ve İkeda'nın deneysel sonuçlara dayalı olarak önerdiği metot vasıtasıyla bulunmuştur. Bu parametreler gemilere ait karakteristik değerlerle bir araya getirilmiş, daha sonra denetleyici dizaynı için gerekli şartların oluşması sağlanmıştır. Yalpa hareketinin kararlı bölgelerde tutulmasını sağlamak için dengeleyici kanat sistemi kullanılmış ve kanat

sistemine ait kaldırma katsayıları Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) analizleri neticesinde bulunmuştur. Geri Adımlamalı, Doğrusal Matris Eşitsizlikleri (DME) tabanlı durum geri beslemeli H_2 ve H_∞ denetleyici tasarımları gerçekleştirilmiştir. Yapılan benzetim çalışmaları neticesinde diğer denetleyicilere kıyasla H_∞ denetleyicinin başarılı sonuçlar verdiği ifade edilmiş, özellikle kayıcı tekne için tasarlanan dayanıklı doyumlu H_∞ denetleyicinin doyum matrisindeki değerlerin %57 oranında değişmesine rağmen farklı hızlarda yalpa genliklerini azaltabildiği görülmüştür. Uygulanan denetleyici yapıları ile seyir esnasında değişen parametreler göz önüne alınarak, dinamik analiz yapılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Yalpa Dengeleyici Kanat, DME, H_2 ve H_∞ denetleyici

ABSTRACT

CONTROL OF ROLL MOTİON VIA OPTIMAL CONTROL METHODS BASED ON LINEAR MATRIX INEQUALITIES

Hakan DEMİREL

Department of Naval Architecture and Marine Engineering

Phd. Thesis

Adviser: Prof. Dr. Fuat ALARÇİN

The roll motion in ship motions is critically important. It is known that particularly high-amplitude roll motions cause the capsize of ships that remove from safe zones. For this reason, the roll motion of the ships must be kept at stable points in different sea states. In order to evaluate the roll motion, it is accurately necessary to analyze the parameters of the motion. Especially, the damping and restoring coefficients directly effect on the dynamic of ships. These coefficients can be found empirically or experimentally. After these parameters have been defined, the characteristic values of the ship are also assessed, with this way the necessary conditions for interaction with the motion are prepared.

In recent years, roll stabilizer systems have been applied to many ships in order to reduce the amplitude of the roll motion and improve the maneuverability of the ships. The use of different control methods is rapidly increasing with the applications.

In this study, the dynamics of roll motion for two different types of ship, fishing ship and planning hull were investigated. The damping values of the roll motion are found empirically and by means of the method proposed by Ikeda based on experimental results. These parameters are combined with the characteristic values of the ships, then it is ensured that the requirements for controller design. The fin roll stabilizing system is used to keep the roll motion in stable regions and lifting coefficients of fin

roll stabilizing system were found in the results of CFD analyzes. LMI based state feedback H_2 and H_∞ controller designs and Backstepping controller design are applied for different ship types. As a result of the simulations, it is stated that the H_∞ controller gives successful results compared to other controllers. Robust and saturated H_∞ controller especially designed for high speed ship, Although the values in the saturation matrix vary by %57, It has been shown that it can reduce the roll amplitudes at different speeds. Considering the changing parameters during the operation with the controller structures, It presented a dynamic and realistic results were obtained. This study takes into account the ship dynamics that change momentarily, It is provided to ease future studies.

Keywords: Fin roll stabilizer, LMI, H_2 and H_∞ controller

BÖLÜM 1

GİRİŞ

1.1 Literatür Özeti

Seyir esnasında dalga, akıntı ve rüzgâr etkisiyle zorlanan bir gemi, bozucu etkiler neticesinde üç tane öteleme, üç tane dönme hareketi olmak üzere altı farklı hareket yapmaktadır. Boyuna öteleme (ilerleme), yan-öteleme, dalıp-çıkma, yalpa, baş-kıç vurma ve savrulma olarak ifade edilen bu hareketlerin her birisi birbiriyle etkileşim halindedir ve bu nedenle hareketlerin doğru analizi gemi dinamiği açısından büyük önem taşımaktadır. Bu amaçla Faltinsen [1] düzenli dalgalarda altı serbestlik dereceli hareket yapan yüzer bir yapı için dalga kuvveti, dalga momenti ve basınç dağılımını hesaplamış, yapmış olduğu nümerik hesaplamalarla ölçüm sonuçlarını karşılaştırarak sonuçların birbirine yakın olduğunu ifade etmiştir. Miles [2] çalışmasında altı serbestlik dereceli gemi hareketleri için, yedi adet ivme ölçer kullanarak oluşturduğu model ile düzenli ve düzensiz dalgalarda, hareketlere ait ivme, hız ve genlik değerlerini düşük karşılaşma frekansları için grafiklerle göstermiştir. Mulk ve Falzarano [3] ise altı serbestlik dereceli gemi hareketlerini Euler denklemleri ile ifade etmiş, hareketleri doğrusal ve doğrusal olmayan şekilde incelemiş, nümerik integrasyon yöntemiyle hareketleri analiz ederek en kritik hareketin yalpa hareketi olduğunu vurgulamıştır. Carrica vd. [4] baştan gelen düzenli dalgalarda, düzensiz Reynold Ortalamalı Navier Stokes yaklaşımını kullanarak altı serbestlik dereceli gemi hareketlerini analiz etmişlerdir. Farklı Froude sayıları için hareketlere ait simülasyon sonuçlarını ölçüm verileriyle karşılaştırarak uyumlu sonuçlar elde ettiklerini ifade etmişlerdir. Xiu-Feng vd. [5] altı serbestlik dereceli gemi hareketlerini Froude-Krylov hipotezini kullanarak

modellemiş, seyir yapan bir geminin verilerinden faydalanarak beş farklı deniz durumu için modelin verimliliğini incelemiştir.

Araştırmacılar açısından altı serbestlik dereceli bir modeli analiz etmenin, hareketlere ait doğrusal olmayan hidrodinamik terimlerin çok ve tespitlerinin de bir hayli karmaşık olması sebebiyle, zor olduğu bilinmektedir. Bu amaçla Sabuncu [6] ve Fossen [7] çalışmasında seyir halindeki bir geminin davranışını inceleyebilmek için, doğrusal olmayan hareket denklemlerini basitleştirerek hesaplamalarda kolaylık sağlanacağını ifade etmişlerdir.

Pauling ve Rosenberg [8] hareketi üç serbestlik dereceli olarak kabul edip, dalıp çıkma, baş kıç vurma ve yalpa hareketlerini incelemiş ve doğrusal olmayan etkilerin kararlılık üzerindeki etkisini göstermiştir. Schmitke [9] çalışmasında geminin yanal hareketlerinin tahmini için teorik bir model geliştirmiştir. Dalgalar arasında, önerdiği modelin asimptotik davranışını farklı Froude sayılarında inceleyerek, deneysel olarak ölçülen yalpa cevabının teorik olarak elde edilenle yakın olduğunu grafiklerle göstermiş ve kanat sistemlerinin oluşturduğu dinamik kaldırma etkisinin önemini ifade etmiştir. Neves ve Rodriguez [10] ise baştan gelen dalgalarda bir balıkçı gemisinin hareketlerini doğrusal olmayan biçimde ifade ederek dalıp-çıkma, baş-kıç vurma ve yalpa hareketini içeren 3. dereceden bir matematik model önermiş, doğrusal olmayan hidrodinamik katsayıları geminin karakteristik değerlerini kullanarak analitik olarak elde etmiştir. Önerdiği model ile elde ettiği nümerik sonuçları, ölçüm sonuçlarıyla karşılaştırarak modelin gerçekçi sonuç verdiğini göstermiştir. Perez ve Blanke [11] geminin dalgayı alış yönünü dikkate alarak, hareketi dört serbestlik dereceli modele indirgemiş, konteyner ve savaş gemisi için doğrusal ve doğrusal olmayan modelleri kullanmıştır. Doğrusal modellerin düşük frekanslara kıyasla yüksek frekanslarda iyi performans gösterdiğini ifade ederek bu durumun savaş gemisi için ihmal edilebilir bir durum olduğunu ancak konteyner gemisi için önemli bir durum olduğunu vurgulamıştır. Bu nedenle bu iki gemi tipi için doğrusal olmayan modelleri, hareketlere ait parametrelerin daha hassas belirlenebilmesi ve farklı frekans aralıklarında performanslarının iyi olması sebebiyle önermiştir. Su vd. [12] çalışmalarında ilerleme, yan öteleme ve savrulma hareketlerinin denklemlerini nümerik integrasyon ile çözerek, nümerik analiz sonuçlarını gemiden alınan performans değerleriyle doğrulamayı

başarmıştır. Seo ve Kim [13] dört serbestlik dereceli gemi hareketlerini farklı hız ve baş açılarında nümerik olarak analiz edip, seri 60 ve konteyner tipinde iki farklı gemi modeli üzerinden alınan ölçümler vasıtasıyla karşılaştırmalar yapmıştır. Düzenli dalgalarda ve sakin suda yapmış oldukları zig-zag testlerle manevra açısından uyumlu sonuçlar aldıklarını belirtmiştir.

Araştırmacılar üç ve dört serbestlik dereceli modellerle yapılan çalışmalarda doğrusal olmayan terimlerin en fazla 3. ve 4. dereceden olması nedeniyle, kimi zaman serbestlik derecesini bire düşürerek, tek hareketin doğrusal olmayan terimlerinin derecesinin artırılmasının modellerin analizi ile ilgili birçok avantaj sağladığını vurgulamıştır. Feat vd. [14] bu amaçla çalışmalarında bir geminin hareketini doğrusal olmayan tek serbestlik dereceli olarak inceleyerek, doğrultucu momentin devrilme üzerindeki etkisini araştırmıştır. Taylan [15] bir konteyner gemisi için seyir esnasında tehlike oluşturabilecek parametrik rezonans durumunu incelemiş, bu durumun önemli parametrelerinin yalpa rezonansında etkili olduğunu ifade etmiş ve bir gemiyi parametrik rezonans bölgesinin dışında tutmak için gerekli hız limitlerini ve sönüm katsayısı değerlerini belirtmiştir. Bulian [16] boyuna düzenli dalgalarda, tek serbestlik dereceli doğrusal olmayan bir modeli incelemiş, yüksek dereceli polinomlar kullanarak frekans düzleminde sistemin cevabına ait kökleri veren analitik bir teknik kullanmış ve yaptığı analiz sonuçlarıyla sönüm etkisine ait gemi inşa alanında net belirlenemeyen bazı doğrusal olmayan parametreleri göstermiştir.

Taylan [17], Sun vd. [18] ve Surendran vd. [19] dahil olmak üzere birçok araştırmacı altı serbestlik dereceli gemi hareketleri içerisinde devrilmeye neden olacak en kritik hareketin yalpa olduğunu, gemi yalpa hareketlerinin analizinin zor, karmaşık ve birçok parametreyi içerdiğini ifade etmiştir. Büyük açılı yalpa hareketlerinin birçok durumda doğrusal olmadığını, yalpanın büyük açıları için doğrusal olmayan bu ifadelerin önemli olduğunu vurgulamıştır. Literatürde bulunan sönüm ve doğrultucu terimlerin farklı ifadelerini araştırmış ve çözümleri analiz etmiştir. Fossen [20] çalışmasında gemi hareketlerini hidrodinamik açıdan değerlendirerek katsayıların belirlenmesinin kritik öneme sahip olduğunu vurgulamış ve hareketlere ait parametrelerin hesaplamalarıyla ilgili olarak potansiyel teoriyi önermiştir. Gu [21] düzensiz denizlerde geminin yatırıcı ve doğrusal olmayan yalpa hareketini Melkinov fonksiyonu kullanarak analiz etmiştir. Akış

üzerindeki faktörlerin etkisini incelerken, dalga yüksekliği, dalga frekansı, doğrusal olmayan doğrultucu moment kolu ve sönüm karakteristikleri gibi parametreleri göz önüne almıştır ve özellikle dalga yüksekliğinin artışıyla geminin hızla güvenli bölgenin dışına çıktığını belirtmiştir. Bulian [22] boyuna düzenli dalgalarda yalpa hareketi için genel bir tanımlama sunmuştur. Bu yaklaşımın amacının doğrusal olmayan parametrik yalpa hareketinin zaman düzleminde analitik ve doğru çözümlerini elde etmek olduğunu ifade etmiştir. Yang vd. [23] viskoz etki nedeniyle oluşan doğrusal olmayan yalpa davranışını tanımlamak için hesaplamalı akışkanlar dinamiği metodunun, yalpa sönümünün tahmininde geleneksel yarı ampirik formüllü metotlara kıyasla daha verimli olduğunu ifade etmiştir. Farklı ilerleme hızlarında serbest ve zorlamalı yalpa hareketinin nümerik simülasyonlarını ve üç boyutlu teknenin genliklerini gemi yalpa sönümünü tahmin etmek için gerçekleştirmiş, Reynold Ortalamalı Navier Stokes denklemlerini çözücü olarak çalıştırmıştır. Doğrusal ve doğrusal olmayan katsayıları hızlar, frekanslar ve çeşitli yalpa genlikleri için üstel fonksiyonlarla kullanmıştır. Sönüm katsayılarını zorlamalı yalpa simülasyonlarında polinom olarak elde etmiştir. Yalpa açısının ve hızının artmasıyla sönüm katsayılarının arttığını gözlemlemiştir. Ayrıca ileri hızların etkisinin yalpa sönümü için önemli olduğunu vurgulamış, doğrusal olmayan sönümün hızın artmasıyla azaldığı sonucuna ulaşmıştır. Liu vd. [24] çalışmalarında doğrusal olmayan sönüm ve düzeltici momentleri göz önüne alarak, doğrusal olmayan gemi yalpa hareketinin dinamik sistemini oluşturmuştur. Bu sistemin yalnızca periyodik dalgayla uyarıldığında simetrik davranış gösterdiğini bu duruma rüzgarın katılmasıyla birlikte sistem dinamiğinin bozulduğunu ve asimetrik davranış gösterdiğini belirtmiştir.

Gemi hareketlerinin analiz aşamasında davranışlarının incelenerek kararlı olup olmadığını belirlemek de büyük önem taşımaktadır. Hareket üzerinde uygulama yapabilmek için bu şartın sağlanması gerekmektedir. Lyapunov [25] kararlılık üzerine doktora çalışması yaparak bu alanda temel bir yapı sunmuş, n. dereceden sistemler için denklem çözümlerinden yararlanan ve sistemi tanımlayan denklemleri irdeleyen iki farklı yöntem önermiştir. Birincisi doğrusallaştırılmış bir sistemin bütün karakteristik değerleri pozitif ise, hareketin kararlı olduğunu ifade ettiği yöntemdir. İkincisi ise diferansiyel denklemlerin çözümlerinin asimptotik davranışını inceleyerek kararlılık analizi yaptığı Lyapunov Direkt Yöntemidir. Price [26] çalışmasında düzensiz dalgalarda

geminin yalpa hareketinin kararlı olup olmadığını incelemiş ve doğrultucu moment katsayıları üzerinden değerlendirmeler yapmıştır. Değerlendirmeler neticesinde düzensiz denizlerde katsayıların zamana bağlı olarak değişebileceğini bu yüzden olasılıklı bir bakış açısıyla kararlılık analizi yapmanın gerekliliğini vurgulamıştır. Özkan, [27] zorlanmış yalpa hareketinin stabilitesini değerlendirmiş, bu amaçla Lyapunov Direkt Yöntemini kullanarak toplam (pratik) stabilite kavramını uluslararası stabilite kurallarına dahil ederek bu alanda kritik bir katkı sunmuştur. Nayfeh ve Sanchez [28] bir geminin düzenli dalgalarda stabilite analizi için analitik bir yöntem sunarak, bifurkasyon diagramlarıyla farklı deniz durumları için güvenli ve güvenli olmayan bölgeleri göstermiştir. Falzarano vd. [29] dalga etkisi altındaki küçük bir geminin doğrusal olmayan yalpa hareketinin dinamiklerini perturbasyon metoduyla değerlendirerek güvenli ve güvenli olmayan bölgelerin başlangıç koşullarını ifade etmiştir. Senjanovi [30] çalışmasında dinamik sistemlerin doğrusal olmayan salınımlarını analiz etmek için özel bir metot olan Harmonik Dengeleme metodunu kullanmış, farklı faz açıları için sistemin harmonik cevaplarını değerlendirmiştir. Surendran ve Reddy [31] ise dalga genliği, dalga frekansı ve metasantr yüksekliği gibi parametrelerin geminin stabilitesi üzerinde kritik etkilere sahip olduğunu belirterek, simülasyonlarla bir geminin kararlı olup olmama durumunu göstermiştir. Arnold vd. [32] çalışmasında gemi stabilitesinin doğrusal olmayan dinamiklerini ve stokastik metotları incelemiştir. Lyapunov eksponansiyelleri ve stokastik bifurkasyon teoriyi kullanarak gemilerin stabilitesini değerlendirmiştir.

Seyir halindeki gemilerin değişken dalga etkileri ve hava şartları nedeniyle yüksek genlikli yalpa hareketleri yaptıkları bilinmekte ve bu durumun kimi zaman gemilerin güvenli bölgelerden çıkıp devrilmelerine sebep olduğu görülmektedir. Bu nedenle düzensiz hareketlerin kararlı hale getirilip, emniyetli bir seyir sağlanması için, pasif ve aktif denetim sistemleri uygulanmaktadır. Chadwick [33] bu amaçla yapılan ilk pasif sistemin yalpa omurga, ilk aktif sistemin ise dinamik ağırlık hareketi uygulaması olduğunu ifade etmiştir. Bu çalışmalardan sonra araştırmacılar yalpa hareketini kararlı hale getiren sistemler olarak; yalpa omurgaları, aktif dengeleme tank sistemleri, dengeleyici kanat sistemleri, dümen sistemleri ve farklı kanat yapılarını birçok gemi türüne uygulamış ve bu dengeleyici sistemlerle hareketin kararsızlığını gidermek için

çeşitli denetim algoritmaları geliştirmişlerdir. Çalışmalarda en uygun denetim metotları ile kararsız hareketlerin güvenli bölgede kalmasını sağlayan algoritmalar incelenmiştir.

Yalpa denetim sistemleri ile ilgili çalışmalar, doğrusal tek giriş-tek çıkışlı sistemler için klasik denetleyici tasarımları ile başlamış, daha sonra doğrusal olmayan, özellikle kararsızlık durumlarıyla karşılaşılan çok giriş-çok çıkışlı sistemlere modern denetim metotlarının uygulanmasıyla devam etmiştir. PID (Proportional, Integral, Derivative) denetleyici olarak ifade edilen, tasarımı basit, temel hedefinin K_p, K_d ve K_i denetim katsayılarının hesaplanarak sistemin beklenen performans koşullarının sağlanması olduğu belirtilen klasik denetleyici, Kitagawa; Hickey vd. [34,35] dahil olmak üzere birçok araştırmacı tarafından kullanılmıştır. Surendran vd [36] farklı deniz durumları için bir geminin yalpa hareketinin dengelenmesinin gerekli olduğunu ifade ederek, bir savaş gemisinin yalpa hareketini, PID denetleyici kullanarak dengeleyici kanat sistemi ile sönümlemiştir. Yalpa genliklerinde yaklaşık % 80 oranında azalma sağlayarak hareketi güvenli bölgelere getirdiklerini göstermiştir. Kula [37] yalpa dengeleyici kanat sisteminin oluşturduğu hidrodinamik kaldırma kuvvetinin hedeflenen değeri ile ölçülen değeri arasındaki değişimi minimize etmek için, sürekli geri besleme yaparak amaç fonksiyonuna ulaşmaya çalışmıştır. İstenen kuvveti elde etmek için doğrusal sistem teorisine dayalı Oransal-Türevsel-İkinci Dereceden Türevsel (PDD2)denetim algoritması kullanmıştır. Ertogan vd. [38] gemi yalpa hareketinin sönümlenmesi için hidrolik sistemle sürülen bir kanat sistemi önermiştir. Çalışmasında, Parçacık Sürüsü Optimizasyonuna dayalı bir denetleyici yapısı kullanarak farklı deniz durumları için hareketin genliklerini azaltabildiğini göstermiştir.

Van Amerongen vd. [39] dümen ve kanat sistemi ile yalpa dengelenmesi hakkında çalışma yapmıştır. Denetleyici olarak LQG (Linear Quadratic Gaussian) denetim algoritmasını kullanmıştır. Önerdiği algoritmanın kabiliyetini dümen ve kanat sistemi için modellerden aldığı ölçüm ve analiz sonuçlarıyla karşılaştırmıştır. Elde ettiği sonuçlara göre dümen ile yalpa dengelenmesinin kanat sistemleri kadar etkili olduğunu ve maliyeti azalttığını ifade etmiştir. Fortuna ve Muscato [40] tek gövdeli bir geminin yalpasını azaltabilmek için otomatik kontrollü iki yardımcı kanat yapısı önermiştir. Denetleyici olarak performans kriteri bir amaç fonksiyonuna dayalı, uyarlanabilir LQ (Linear Quadratic) denetim algoritması kullanmıştır. Analiz ve ölçüm sonuçlarını

karşılaştırarak önerdikleri denetleyici yapısının yalpa genliklerini etkili bir şekilde azaltabildiğini göstermiştir.

Lauvdal ve Fossen [41] yalpa hareketinin denetimi ile ilgili olarak giriş hızı doyumunu temel alan yeni bir algoritma önermiş ve bu algoritmanın dümen denetim sistemleri için verimli olduğunu belirtmiştir. Yu vd. [42] düzenli baştan gelen dalgalarda geminin denizciliğini, manevra kabiliyetini ve kontrol durumlarını göz önüne alarak parametrik yalpanın dengelenmesi ve analizi için bir model sunmuştur. Dilim teorisiyle frekans alanında hesapladıkları potansiyel terimleri zaman düzlemine transfer etmiş, doğrultucu kuvvetleri anlık olarak, doğrusal olmayan basınç integrasyonu yoluyla hesaplamıştır. Buna ek olarak pervane ve dümeni, parametrik yalpada dümenin ve zamanla değişen gemi hızının etkisini araştırmak için modele dahil etmiştir. Bu model farklı üç konteyner gemisinin parametrik yalpa hareketini analiz etmek için kullanılmıştır. Önerdikleri PD denetleyicinin parametrik yalpanın başlangıç aşamalarında aktif edilmesiyle, dümenin oluşturduğu ters yalpa momentiyle parametrik yalpa hareketinin dengelenebildiğini göstermiştir.

Gawad vd. [43] yalpa hareketini dengeleyebilmek için pasif tank sistemlerinin kullanılabileceğini, hassas kontrol gereken durumlarda bu sistemlerin kanat sitemleriyle birlikte uygulanabileceğini vurgulamıştır. Marzouk vd. [44] ise bir kargo gemisinin yalpa genliklerini azaltmak için, aktif tank sistemlerinin pasif tank sistemlerine kıyasla, daha az miktarda akışkan ile çalışarak geometrik yerleşimlerinden sağladıkları avantajla, daha etkili sistemler olduğunu ifade etmiştir.

Alarcin [45] bir konteyner gemisinin yalpa hareketinin genliklerini azaltabilmek için, denetim parametrelerini Yapay Sinir Ağı (YSA) ile ağırlıklandırarak IMC (Internal Model Control) denetleyici kullanmış ve klasik PID denetleyici ile kıyaslamalar yaparak önerdiği denetim yapısının daha kısa sürede yalpa hareketini azalttığını ifade etmiştir. Guan ve Zhang [46] çalışmasında yalpa hareketinin dengelenmesi ile ilgili olarak Geri Adımlamalı denetim algoritmasını önermiş, yüksek dereceli doğrusal olmayan terimleri ihmal ederek denetleyici için pozitif dizayn parametreleri belirlemiştir. Analiz sonuçlarında yalpa genliklerinde yaklaşık olarak % 85 oranında azalma sağladığını vurgulamıştır. Chunmei vd. [47] çalışmasında bir geminin sıfır hızda yalpa hareketini

sönümleyici yeni bir teknik üzerinde durmuştur. Bu konseptin klasik dengeleyici kanat sistemlerinden farklı çalıştığını ifade ederek kaldırma etkisini oluşturan denetim sisteminin, bu etkinin limit değerlerini göz önüne alarak geri besleme yoluyla oluşturulduğunu vurgulamıştır. Ghassemi vd. [48] çalışmasında bir geminin yalpa hareketinin denetimi için PID ve Yapay Sinir Ağı kombinasyonunu kullanmıştır. Nümerik sonuçları denetimli çevrim için oluşturup, Yapay Sinir Ağıyla parametreleri ağırlıklandırarak, serbest yüzey etkisi düşüncesiyle dengeleyici kanat etrafındaki akış analizini vermiştir. Dengeleyici kanat sisteminin kısıtlarını modellemede ayrıca belirtmiştir. Elde edilen sonuçlarla düzensiz deniz durumlarında denetleyicinin hızlı bir şekilde yalpa genliğini azalttığını ve bu yaklaşımın her düzensiz deniz durumu için kullanılabileceğini göstermiştir. Lee vd. [49] dalgalar nedeniyle yalpa hareketi yapan gemileri dengelemenin önemini vurgulayarak, son zamanlarda podlu pervanelerin yalpa hareketini dengelemek için kanat sistemleriyle kullanılmakta olduğunu ifade etmiştir. Çok giriş-çok çıkışlı sistemi, dengeleyici kanat sistemi ve podlu pervane olmak üzere iki denetim girişine sahip olarak dizayn etmiştir. LQR (Linear Quadratic Regulator) denetim algoritmasını düzenli ve düzensiz dalgalarda yolcu gemilerinin yalpa hareketini azaltmak için uygulamış ve analiz sonuçlarıyla genlikleri azalttıklarını ifade etmiştir. Luo vd. [50] geminin yalpa hareketini azaltmak için, fonksiyonel bağlantılı Yapay Sinir Ağı tabanlı bir dayanıklı denetleyiciyi dengeleyici kanat sistemi için önermiştir. Önerilen yapının dengeleyici kanat sisteminin ve gemi yalpa hareketinin dinamiklerini içerdiğini belirterek, dalga kaynaklı ortam bozucusuyla modelleme hatalarını basamaklandırıp, Yapay Sinir Ağı tabanlı bir dizayn yapmıştır. Lyapunov fonksiyonunu denetleyici dizaynında işleyerek, dengeleyici kanat sisteminin kararlılığını garanti ettiklerini belirtmiştir. Nümerik analiz sonucunda önerilen denetleyicinin yalpa genliği ve hızını etkili bir şekilde azaltarak iyi performans gösterdiğini vurgulamıştır. Bai [51] gemi yalpa açısal hızının ölçülemediği durumlarda hareketi optimum seviyeye indirmek için adaptif bulanık çıkış geri beslemeli bir denetleyici kullanmıştır. Bu çalışmada harekete ait hidrodinamik sönüm katsayılarının test sonuçlarıyla elde edildiğini ifade etmiş, denetim girişini bir fonksiyona bağlayıp, pozitif dizayn parametreleri seçerek, yalpa dengeleyici kanat vasıtasıyla hareketin genliklerinde sağladığı iyileşmeyi göstermiştir. Li vd. [52] gemi yalpa hareketinin genliklerini azaltabilme amacıyla, Yapay Sinir Ağı ile uyarlamalı

geri adımlamalı tekniği birleştiren bir denetleyici yapısını kanat sistemine uygulamış ve analiz sonuçlarıyla önerdiği yaklaşımın performansını doğrulamıştır. Ghassemi vd. [53] bir balıkçı gemisinin yalpa hareketini azaltabilmek amacıyla dengeleyici kanat sistemi kullanmıştır. Hidrodinamik katsayıları ampirik olarak hesaplayıp, LQR ve klasik PID denetleyici arasında kıyaslamalar yaparak, yalpa genliklerini azaltma noktasında LQR denetleyici yapısının klasik PID denetleyiciden % 50 oranında daha başarılı olduğunu belirtmiştir.

Perez ve Blanke [54] çalışmalarında farklı matematik modellerin uygulanabilirliği ve performans değerlendirilmesini tartışarak, LQ denetim algoritması, H_∞ denetim algoritması ve Kayma Modlu doğrusal olmayan denetim algoritmasının kullanılarak yalpa hareketine yapılan uygulamaların temel matematiksel ifadelerini değerlendirmiştir. Guo vd. [55] katamaran teknelerin baş-kıç vurma ve dalıp-çıkma hareketlerinin sönümlenmesi için T-kanatların ve interseptörlerin efektif dengeleme sistemi olduğunu ifade etmiştir. Çalışmalarında 2 adet T-kanat ve interseptör kullanarak, bu sistemlerin hem boyuna hareketleri hem de yalpa hareketini azaltmak için etkili sistemler olduğunu, önerdikleri PD denetleyici yapısıyla boyuna hareketlerde % 65.2, yalpa hareketinin genliğinde ise % 80.2 oranında düşüş sağlayarak doğrulamıştır. Townsend ve Shenoi [56] denizde yalpayı azaltan bir jiroskop sistemi için pasif ve türevsel yapıları içeren iki yeni denetim stratejisi önermişlerdir. Nümerik bir model geliştirmiş ve 20 metre boyunda bir teknenin analizlerini düzensiz geniş dalgalarda gerçekleştirerek gemi üzerinde oluşan momentleri azaltmıştır. Denizde yalpayı azaltan jiroskop sistemi ile ilgili olarak literatürde yer alan bilginin sınırlı olduğunu ifade ederek çalışmada hareketin denklemleri hakkında verilen bilgi ve yeni denetim stratejileriyle ilgili yapılan sunumun bu konuyla ilgili ilerde yapılacak çalışmalara yön verecek nitelikte olduğunu belirtmiştir. Karimi vd. [57] kayıcı teknelerde kullanılan kanatların ve interseptörlerin etkisini düşey hareketler açısından değerlendirmiş, denetleyici olarak modern optimal denetim teorisini ve Savitsky yöntemini önermiştir. Alınan sonuçlarla interseptörlerin, özellikle rezonans frekansına yakın noktalarda düşey hareketleri azalttığını göstermiş, baştan alınan dalgalarda ve sakin suda kayıcı teknenin düşey hareketinin sönümü açısından verimli bir etkiye sahip olduğunu ifade etmiştir.

Son zamanlarda araştırmacılar tarafından dayanıklı denetim algoritmaları ile yapılan çalışmalar hız kazanmış, bununla beraber Doğrusal Matris Eşitsizliklerine (DME) dayalı sistem ve denetim teorisi ile ilgili çalışmalarda yaygın hale gelmiştir. Herhangi bir x değişkeni üzerinden dış bükey bir kıstas belirlemek için kullanılan DME'lerin sonlu sayıda DME'den oluştuğu bilindiğinden bu eşitsizlikleri tek bir DME şeklinde ifade etmek mümkündür. Bu durumun bir sonucu olarak DME, en iyileştirme ve denetim problemlerinin çözümünde etkin bir şekilde kullanılabilmektedir. Herhangi bir sistem üzerinde bozucuların etkilerinin azaltılmak için H uzayları teorisinden yararlanılmaktadır. Özellikle H_2 ve H_∞ en iyileştirme probleminin DME tabanlı çözümüne yönelik çalışmalar gemi hareketlerinin denetimiyle ile ilgili olarak araştırmacılar tarafından uygulanmaktadır.

Saari ve Khichane [58] savrulma hareketini kararlı hale getirmek ve yalpa etkisini azaltmak için, bir konteyner gemisinin dümen sistemine H_∞ denetleyici uygulamıştır. Bu çalışmada temel problemin doyum sınırına ulaşmadan eyleyici için kabul edilebilir denetim yapısı belirlemek olduğunu ifade etmiştir. Seyirdeki gerçek durumların dikkate alınmasıyla, H_∞ denetleyicinin kullanılabileceği basamaklı bir denetim yapısı önermiştir. Liu vd. [59] tahriksiz bir yüzey teknesi için dalıp-çıkma, baş-kıç vurma ve yalpa hareketlerini ihmal ederek bir model oluşturmuştur. İlerleme, yan-öteleme ve savrulma hareketlerine ait cevaplarda hızlı ve etkili bir iyileşme sağlayabilme amacıyla, sistemin performans kısıtlarını Doğrusal Matris Eşitsizliklerine bağlı olarak fonksiyonel bir biçimde ifade etmiş, doğrusal olmayan MPC (Model Predictive Control) denetim algoritması önermiştir. Hareketlerin güvenli bölgede kalmasını sağlamak için iki adet bağımsız itici kullanmış ve denetim algoritmasının başarısını asimptotik kararlılığın sağlanması ile göstermiştir. Wang vd. [60] dışardan gelen bozucu etkilerin gemi hareketinin matematik modelindeki hidrodinamik katsayıları değiştirdiğini vurgulamış ve bu nedenle parametreler açısından belli aralıklarda çalışabilen dayanıklı bir H_2/H_∞ denetleyici önermiştir. Çalışmalarında eş yalpa ve savrulma hareketinin matematik modeline ait parametrelerin değişmesine rağmen denetleyicinin etkili bir performans gösterdiğini analiz sonuçlarıyla ifade etmiştir. Xiuyan vd. [61] bir geminin savrulma ve yalpa hareketinin dümen sistemi ile dengelenmesi hakkında çalışmış ve bu amaçla doğrusal olmayan bir denetim algoritması önermiştir. Geminin ilerleme hızında kayıp

yaşamama amacıyla hareketlere ait parametreleri ağırlıklandırarak, kapalı çevrim kazancı algoritmasına ve geri beslemeli doğrusallaştırma metoduna dayalı doğrusal olmayan denetleyicinin hareketler üzerinde etkili olduğunu vurgulamıştır. Li vd [62] doğrusal olmayan sistemler göz önüne alındığında, parametrelerin belirsizliğinin ve düzensiz dalgaların, sığ denizlerde geminin seyri boyunca dengeleyici kanat sistemi için bozucu etkiler oluşturduğunu vurgulayarak, Kayma Modlu (Sliding Mode-SM) denetim metoduna dayalı dayanıklı bir denetleyici yapısı önermiştir. Bu denetim metodunu yalpa hareketi açısından gemiyi sıfır hızda zorlayan kuvvetler için kullanmıştır. Denetim girişindeki aksaklıkları gidermek için bulanık uyarlama tekniği tasarlayıp, sistemin kararlılığını Lyapunov teori kullanılarak analiz etmiştir. Bu metodun sığ deniz şartlarında gemi yalpa hareketini azaltmada verimli olduğunu göstererek, geminin hareketinden dolayı hız ve başlangıç metasantr noktası değiştiğinde de önerilen dayanıklı denetim stratejisinin etkili sonuçlar gösterdiğini ifade etmiştir. Hinostroza vd. [63] yüzey gemilerinin yalpa hareketini azaltabilmek amacıyla kapalı-çevrim sınırlı kazanç L_2 kararlılığını garanti edecek dayanıklı bir denetleyici yapısı önermişlerdir. Bu denetleyiciden, PD denetleyiciye kıyasla zorlayıcı etkiler karşısında daha iyi sonuçlar aldıklarını analiz sonuçlarıyla belirtmiştir. Malekizade vd. [64] bir konteyner gemisinin doğrusal olmayan yalpa hareketini dengeleyebilme amacıyla, dayanıklı MPC denetim algoritmasına dayalı dengeleyici kanat sistemi kullanmış ve klasik PID denetleyici ile analiz sonuçlarını karşılaştırarak, önerdikleri denetleyicinin verimliliğini göstermiştir. Yu vd. [65] yalpa dengeleyici kanat ve tank sistemleri için H_∞ dayanaklı denetim algoritmasını kullanmıştır. Denetleyiciye ait değerleri Riccati denklemleri kullanarak hesaplamıştır. Önerdikleri denetleyicinin PID denetleyiciye kıyasla yalpa açısını azaltma noktasında daha başarılı sonuçlar verdiğini ifade etmiştir. Demirel vd. [66] ; Demirel ve Alarçin. [67] çalışmalarında balıkçı gemisinin yalpa hareketini kararlı bölgede tutmak için uygulama yapmıştır. Geri Adımlamalı denetim algoritmasını, DME tabanlı H_2 ve H_∞ durum geri beslemeli denetim algoritmasını yalpa dengeleyici kanat vasıtasıyla uygulayarak yalpa genliklerinde ve frekans diyagramlarında önemli ölçüde iyileşme sağlamıştır. H_∞ durum geri beslemeli denetim algoritmasının sistem için daha etkili sonuçlar verdiğini benzetim çalışmaları neticesinde göstererek, farklı gemiler için kullanılabileceğini vurgulamıştır.

Bu tez çalışmasında altı serbestlik dereceli gemi hareketlerini analiz edip, hidrodinamik katsayıları belirleyebilmenin oldukça karmaşık olduğu ifade edilerek, hareketlerin basitleştirilip 3 ve 4 serbestlik dereceli modeller ile yapılan çalışmalardan farklı olarak, hareket tek serbestlik dereceli olarak düşünülmüş, tek serbestlik dereceli hareketin doğrusal olmayan terimleri artırılmış ve gerçekçi sonuçlar alınmaya çalışılmıştır. Birçok araştırmacı tarafından gemiyi yatırıcı etkisi olduğu vurgulanan ve gemi hareketleri içerisinde en kritik hareketlerden biri olarak ifade edilen yalpa hareketi incelenmiştir. Harekete ait hidrodinamik katsayılar ampirik formüller ve deneysel sonuçlara dayalı İkeda'nın önerdiği yarı-ampirik metotla bulunmuştur. Hareketin kararlı bölgede kalmasını sağlamak amacıyla denetlenebilen aktif dengeleyici kanat sistemleri tercih edilmiştir. Kanat sisteminin oluşturduğu kaldırma katsayıları Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) yöntemiyle bulunmuştur. Balıkçı teknesi ve kayıcı tekne olmak üzere iki farklı tekne türü üzerinde denetleyici tasarımları yapılmıştır. Balıkçı teknelerinde güvenli bir seyir ve avlanma sağlama ihtiyacı, kayıcı teknelerde ise özellikle yüksek hızlarda kararlı hareket gösterme gerekliliği bizi denetleyici tasarımı geliştirmek konusunda motive etmiştir. Bu amaçla bir balıkçı teknesinin yalpa hareketini dengeli hale getirmek için Geri Adımlamalı denetleyici ve DME tabanlı H_2 ve H_∞ durum geri beslemeli denetleyici tasarımı gerçekleştirilmiştir. Kayıcı Tekne için ise eyleyici doyumunun sistemin dinamiğine dahil edildiği dayanıklı H_∞ denetleyici uygulaması yapılmıştır. Bu çalışmanın en önemli amacı dış bükey en iyileştirme temelinde ifade ettiğimiz Doğrusal Matris Eşitsizlikleri (DME) olmuştur. Balıkçı teknesi için operasyon durumları ile ilgili olarak değişebilen *GM* değerleri göz önüne alınarak farklı *GM* durumlarında denetleyicinin başarısı doğrulanmıştır. Kayıcı tekne için ise hız parametresinin önemli olduğu düşünülerek, özellikle bu parametreye bağlı olarak belli hız aralıklarında değişen sönüm değerleri kullanılmış ve doyum matrisinde parametler %57 oranında değişse bile önerilen denetleyici kararlı bir davranış göstermiştir. Bu denetleyici tasarımları anlık değişen ek kütle, sönüm ve farklı hidrodinamik katsayıların sistem dinamiğine katılacağı uygulamalar için öncü çalışmalar olmuştur.

1.2 Tezin Amacı

Tez çalışması kapsamında gemi hareketleri içerisinde kritik derecede öneme sahip doğrusal olmayan yalpa hareketi tek serbestlik dereceli olarak modellenmiştir. Bir geminin yalpa hareketinin karakteristiklerini belirlemek için, modele ait hidrodinamik terimler oldukça önemlidir ve bunlar uyarıcı kuvvetler, sönüm kuvvetleri, doğrultucu kuvvetler ve diğer kuvvetler olarak ifade edilebilir. Bu nedenle her gemi tipi için hidrodinamik ve hidrostatik kuvvetlerle ilişkili her terimin karakteristiğini bilmek yalpa hareketini değerlendirmek için gereklidir. Çalışmamızda analizler ve benzetim çalışmaları için balıkçı ve kayıcı tekne olmak üzere iki farklı gemi tipi kullanılmıştır. Balıkçı teknesinin yalpa hareketine ait karakteristik değerler ampirik formüller yardımıyla hesaplanmıştır. Kayıcı tekne için ise yalpa hareketinde önemli rol oynayan sönüm katsayıları İkeda'nın deneysel sonuçlara dayanarak önerdiği metotla farklı hızlarda hesaplanmış, diğer parametreler ampirik olarak elde edilmiştir.

Farklı seyir şartlarında gemi yalpa hareketini kararlı bölgelerde tutabilmek amacıyla, iki farklı balıkçı teknesi ve bir kayıcı tekne için denetleyici tasarımları gerçekleştirilmiştir. Kullanılan denetleyicilerle ilişkili olarak, yalpa dengeleyici kanat sistemi kullanılarak yalpa genliklerinin sönümlenmesi amaçlanmıştır. Dengeleyici kanat sistemine ait hidrodinamik boyutsuz kaldırma katsayıları HAD analizleri neticesinde bulunmuştur. İki farklı balıkçı teknesi için geri adımlamalı ve DME tabanlı H_2 ve H_∞ durum geri beslemeli denetleyici yapısı kullanılmıştır. Özellikle seyir halinde değişen *GM* durumu göz önüne alınarak denetimli ve denetimsiz olarak zaman ve frekans düzleminde harekete ait cevaplar incelenmiştir. Çalışmanın sonucunda, elde edilen grafikler üzerinden denetleyiciler karşılaştırıldığında sistemin en kötü durumunu ölçü alan H_∞ durum geri beslemeli denetleyici yapısının yalpa genliklerini azaltma noktasında daha verimli olduğu görülmüştür.

Kayıcı tekne için denetleyici tasarımı yapılırken H_∞ durum geri beslemeli denetleyici yapısının önceki çalışmalarda verdiği başarılı sonuç referans olmuştur. Kayıcı tekne yapısı itibariyle hızlı hareket etmektedir. Bu nedenle denetleyicinin belli hız aralıklarında çalışabilmesi ve özellikle değişen sönüm değerlerine uyumlu olması gerekmektedir. Bu noktada dayanıklı denetleyici yapısı dizayn edilmiş, özellikle

dengeleyici kanat sisteminin dinamikleri de hesaba katılmıştır. Bu duruma ek olarak sadece sönüm katsayılarının değil doyum matrisindeki değerlerin de seyir esnasında belli oranda değiştiği kabul edilerek, optimum sonuçlara ulaşacak denetleyici dizayn edilmiştir.

1.3 Hipotez

Gemi yalpa hareketine ait karakteristik değerlerin hesaplanması için farklı metotlar kullanılarak, optimum sonuçlara ulaşılacağı bilinmektedir. Sayısal analiz sonuçlarının da farklı hız ve değişkenler kabul edilerek yapıldığında denetleyici için uygun olacağı düşünülmektedir. Denetleyiciler arasında sistemin her şartta en kötü durumuna göre cevap veren, H_∞ denetleyici yapısının başarılı sonuçlar vereceği öngörülmektdir. Özellikle seyir halinde parametrelerin değiştiği düşünülerek, eyleyici doyumunun sistem dinamiğine katıldığı, dayanıklı durum geri beslemeli H_∞ denetleyici yapısının, önemli bir oranda parametre değişimine imkan verebilecek şekilde dizayn edilebileceği ve uygun sonuçların alınabileceği beklenmektedir.

BÖLÜM 2

GEMİ DİNAMİĞİ

Gemi hareketlerinin dinamik analizi, çevreden gelen etkiler ve bu etkiler altında geminin yaptığı hareketler incelenerek yapılmaktadır. Bu noktada gemiler farklı sınıflandırmalara sahip olmakla beraber, ulaşabildikleri maksimum hızlara göre de değerlendirilir. Seyir halinde farklı deniz ve hava şartlarına maruz kalan bir gemide hızın artması veya azalması oluşabilecek hareketlerin şiddeti açısından önemlidir. Gemiler için sıklıkla kullanılan hız boyutsuzlaştırılması Froude Sayısı (Fn) üzerinden yapılır. Froude sayısı gemi atalet kuvvetlerinin yer çekimi kuvvetlerine oranını ifade eder ve aşağıdaki denklem ile ifade edilir.

$$Fn = \frac{U}{gL} \tag{2.1}$$

Bu denklemde U geminin hızını, g yerçekimi ivmesini, L ise geminin boyunu ifade etmektedir. Bu ifadelerle ile birlikte Froude sayısı esas alınarak gemiler;

Deplasman Gemileri $(Fn < 0.4)$

Yarı-Deplasman Gemileri $(0.4-0.5 < Fn < 1.0-1.2)$

Kayıcı Gemiler $(Fn > 1.0-1.2)$

olarak üç farklı şekilde ifade edilir[68]. Bununla birlikte gemiyi dengede tutan hidrostatik ve hidrodinamik kuvvet mevcuttur. Hidrostatik basınçlardan dolayı oluşan hidrostatik kaldırma kuvveti geminin deplasmanı ile orantılıdır. Hidrodinamik basınçlardan dolayı oluşan hidrodinamik kuvvet ise yaklaşık olarak gemi hızının karesiyle orantılıdır.

Gemilerin sakin sudaki ve dalgalar arasındaki hareketleri değerlendirilirken, manevra teorisi ve denizcilik teorisi olarak adlandırılan iki kavram öne çıkmaktadır. Manevra teorisi ile sakin suda, sabit bir U hızı ile hareket eden bir geminin, hidrodinamik katsayıları (manevra türevleri), dalga etkisi ihmal edilerek frekanstan bağımsız kabul edilir. Denizcilik teorisi ile dalgalar içerisinde sıfır hızda bulunan veya sabit bir hızda hareket eden bir geminin hareketleri analiz edilir. Genellikle, hidrodinamik katsayılar ve dalga kuvvetleri, serbest su yüzeyinde salınım yapan cisme etkiyen kuvvetlerin doğrusal teori ile hesaplanması sayesinde frekansa bağlı olarak ifade edilir. Deniz üzerinde seyir eden bir geminin hareketlerinin tahmini için, bu iki teori birleştirilerek daha gerçeğe yakın sonuçlar alınmaktadır.

2.1 Altı Serbestlik Dereceli Gemi Hareketleri

Deniz ve hava kaynaklı zorlayıcı etkiler nedeniyle gemilerde üçü öteleme, üçü dönme hareketi olmak üzere altı farklı hareket meydana gelmektedir. Bu hareketler Şekil 2.1'de gösterilerek aşağıdaki gibi ifade edilir,

•**İlerleme**: Geminin x ekseninde meydana gelen ileri ve geri doğrusal hareketidir.

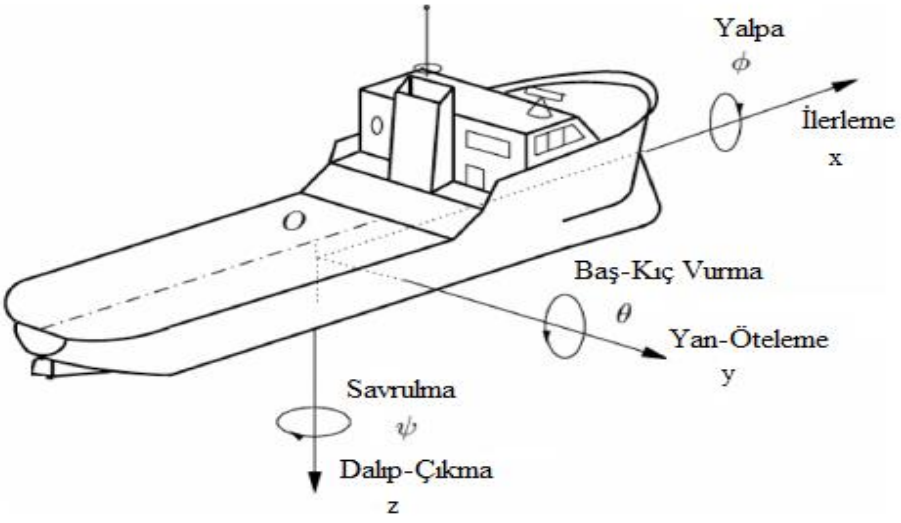
•**Yan-öteleme**: Geminin y ekseninde meydana gelen her iki yöndeki doğrusal hareketidir.

•**Dalıp-çıkma**: Geminin z ekseninde meydana gelen her iki yöndeki doğrusal hareketidir.

•**Yalpa**: Geminin x ekseni etrafında meydana gelen dönme hareketidir, ϕ ile gösterilir.

•**Baş-kıç vurma**: Geminin y ekseni etrafında meydana gelen dönme hareketidir, θ ile gösterilir.

•**Savrulma**: Geminin z ekseni etrafında meydana gelen dönme hareketidir, ψ ile gösterilir.



Şekil 2. 1 Altı Serbestlik Dereceli Gemi Hareketleri görünüm

Yukarıda ifade edilen hareketlere ait notasyonlar aşağıdaki tabloda gösterilmiştir [7].

Çizelge 2. 1 Altı serbestlik dereceli hareketlere ait notasyonlar

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

$[x \quad y \quad z]^T$ ve $[\phi \quad \theta \quad \psi]^T$ sırasıyla doğrusal ve açısal yer değiştirmeleri; $[u \quad v \quad w]^T$ doğrusal hızları; $[p \quad q \quad r]^T$ açısal hızları; $[X \quad Y \quad Z]^T$ kuvvetleri; $[K \quad M \quad N]^T$ ise momentleri ifade etmektedir. Gemilerde bu farklı hareketlere neden olan zorlayıcı kuvvetler sırasıyla dalga, rüzgâr, akıntı ve hidrodinamik kuvvetler olarak $\tau = \tau_{dalga} + \tau_{rüzgar} + \tau_{akıntı} + \tau_H$ şeklinde ifade edilir.

Zorlayıcı etkiler neticesinde Rijit Gövde için Newton'un 2. Yasası uygulanarak modellenen doğrusal olmayan altı serbestlik dereceli gemi hareketleri matris-vektör formunda aşağıdaki gibidir[7].

$$M_{RG}\dot{\nu} + C_{RG}(\nu)\nu = \tau \tag{2.2}$$

Burada M_{RG} rijit gövde atalet matrisini, $C_{RG}(\nu)$ ise dünyanın dönmesi neticesinde birim kütlede oluşan sapma etkisini oluşturan kuvvetleri diğer bir deyişle coriolis matrisini ifade etmektedir.

$$M_{RG} = \begin{bmatrix} m & 0 & 0 & 0 & mz_G & -my_G \\ 0 & m & 0 & -mz_G & 0 & mx_G \\ 0 & 0 & m & my_G & -mx_G & 0 \\ 0 & -mz_G & my_G & I_x & -I_{xy} & -I_{xz} \\ mz_G & 0 & -mx_G & -I_{yx} & I_y & -I_{yz} \\ -my_G & mx_G & 0 & -I_{zx} & -I_{zy} & I_z \end{bmatrix} \dot{\nu} = \begin{bmatrix} \dot{u} \\ \dot{v} \\ \dot{w} \\ \dot{p} \\ \dot{q} \\ \dot{r} \end{bmatrix} \quad \nu = \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \\ p \\ q \\ r \end{bmatrix} \tag{2.3}$$

$$C_{RG}(\nu) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & m(y_G q + z_G r) & -m(x_G q - w) & -m(x_G r + v) \\ 0 & 0 & 0 & -m(y_G p + w) & m(z_G r + x_G p) & -m(y_G r - u) \\ 0 & 0 & 0 & -m(z_G p - v) & -m(z_G q + u) & m(x_G p + y_G q) \\ -m(y_G q + z_G r) & m(y_G p + w) & m(z_G p - v) & 0 & -I_{yz}q - I_{xz}p + I_z r & I_{yz}r + I_{xy}p - I_y q \\ m(x_G q - w) & -m(z_G r + x_G p) & m(z_G p + u) & I_{yz}q + I_{xz}p - I_z r & 0 & -I_{xz}r - I_{xy}q + I_x p \\ m(x_G r + v) & m(y_G r - u) & -m(x_G p + y_G q) & -I_{yz}r - I_{xy}p + I_y q & I_{xz}r + I_{xy}q - I_x p & 0 \end{bmatrix} \tag{2.4}$$

Bu ifadelerde x_G, y_G ve z_G ilgili eksendeki geminin ağırlık merkezini ifade etmektedir. I_x, I_y ve I_z ile ise ilgili eksenlerdeki atalet momentleri belirtilmektedir. Altı serbestlik

dereceli gemi hareketleri içerisinde birbiriyle eş davranış gösteren hareketlerin doğrusal olmayan parametrelerini tespit etmek zordur. Bu nedenle doğrusal olmayan denklemler doğrusal hale getirilerek hesaplamalarda kolaylık sağlanır.

Bu amaçla doğrusal hale getirilen altı serbestlik dereceli gemi hareketleri en genel haliyle aşağıda ifade edilmiştir [69].

$$\sum_{j=1}^{6}\left\{(M_{kj}+A_{kj})\ddot{x}_j+B_{kj}\dot{x}_j+G_{kj}x_j\right\}=X_k \qquad (2.5)$$

Genelleştirilmiş denklemde 'M_{kj}' ile rijit kütle, 'A_{kj}' ile hidrodinamik kütle, 'B_{kj}' ile sönüm katsayısı, 'G_{kj}' ile doğrultma katsayısı, 'X_k' ile ise k yönündeki zorlayıcı dalga kuvvetini veya momenti ifade edilmiştir. Bu denklemde '*k*' değeri sabit tutulup, '*j*' değeri 1'den 6'ya kadar sırasıyla yerine konulup toplanırsa ilgili harekete ait doğrusal denklem elde edilir. Bu amaçla yukarıda ifade edilen denklemde; '*k*' yerine 1 konulduğunda ilerleme hareketinin, 3 konulduğunda dalıp-çıkma hareketinin, 5 konulduğunda baş-kıç vurma hareketinin doğrusal hareket denklemi elde edilir. Yine aynı denklemde 'k' yerine 2 konulduğunda yan-öteleme hareketinin, 4 konulduğunda yalpa hareketinin, 6 konulduğunda ise savrulma hareketinin doğrusal denklemi elde edilir.

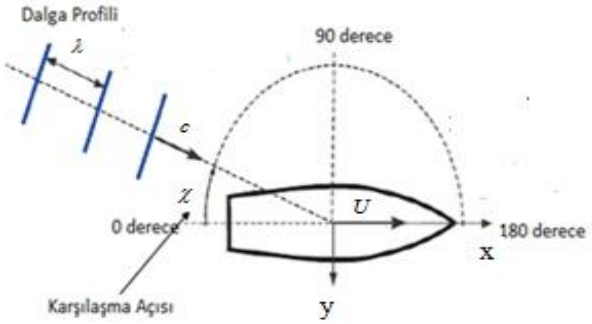
2.2 Dalga Modeli

Dış etkenlerle bozulan durgun su yüzeyi üzerinde oluşan hareketler dalgaları meydana getirir. Bu hareketler karmaşık bir yapıya sahiptir ve hareketleri matematiksel olarak ifade etmek hayli zordur. Deniz üzerinde x ve y yönünde ilerleyen dalga profili aşağıdaki gibi ifade edilir [70].

$$\zeta(x,y,t)=\bar{\zeta}\sin[\omega t+\varepsilon-kx\cos(\chi)-ky\sin(\chi)] \qquad (2.6)$$

Bu denklemde, χ karşılaşma açısını, $\omega=\frac{2\pi}{T}$ dalga frekansını (rad/s), $k=\frac{\omega^2}{g}$ dalga sayısını (rad/m), $\lambda=\frac{g}{2\pi}T^2$ dalga boyunu (m), ε faz açısını $c=\sqrt{\frac{g\lambda}{2\pi}}=\frac{\lambda}{T}$ ise dalga ilerleme hızını (m/sn) ifade eder.

Deniz üzerinde U hızı ilerleyen bir geminin dalga ile karşılaşma esnasındaki durumu aşağıdaki gibi gösterilebilir.



Şekil 2. 2 Dalgaların gemiye geliş yönleri

Belirli bir hızda ilerleyen gemi, kendine etkiyen dalgaların frekansından farklı olarak hareket eder. Bu esnada dalga ile karşılaştığı frekansa karşılaşma frekansı denir [70].

$$\omega_e = \omega - \frac{\omega^2 U}{g}\cos\chi \tag{2.7}$$

Seyir esnasında geminin verdiği cevapları tahmin edebilme amacıyla yaygın olarak kullanılan dalga modeli Pierson-Moskowitz spektrumu aşağıda belirtilmiştir[7].

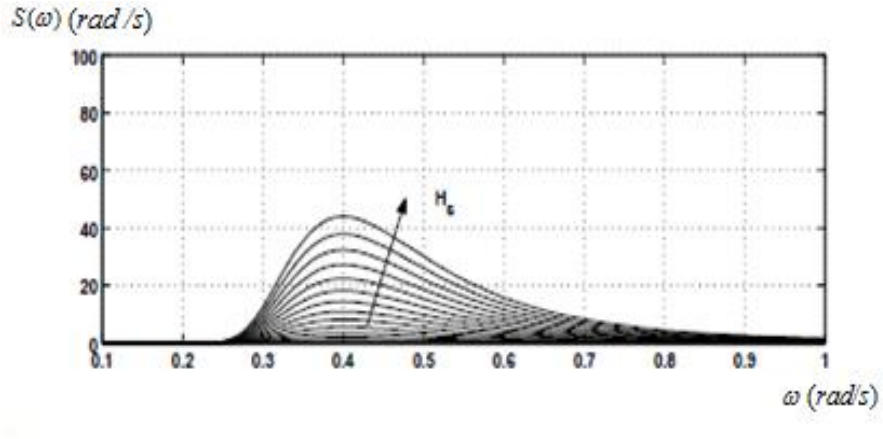
$$S(\omega) = D\omega^{-5}exp(-F\omega^{-4}) \tag{2.8}$$

$$D = 8.1x10^{-3}g^2 = \text{sabit} \tag{2.9}$$

$$F = 0.74(\frac{g}{V_{19.4}})^4 = \frac{3.11}{H_s^{\,2}} \tag{2.10}$$

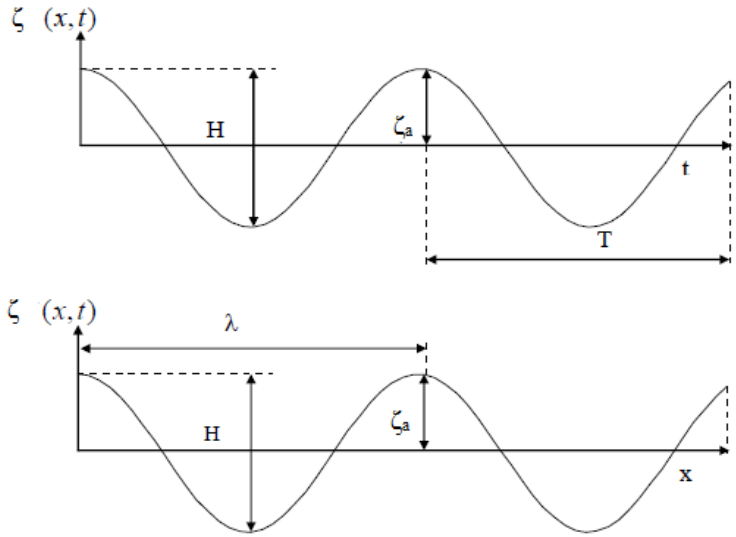
$$H_s = \frac{2.06}{g^2}V_{19.4}^{\,2} \tag{2.11}$$

Bu ifadelerde V 19.4 m yüksekliğindeki rüzgar hızını, *g* yer çekimi ivmesini ifade eder. Dalga yüksekliği ise H_s ile gösterilmiştir.



Şekil 2. 3 Pierson-Moskowitz dalga spektrumu [7]

Simülasyon çalışmalarında yaygın olarak sinüzoidal dalga fonksiyonu kullanılır ve aşağıda bir örneği gösterilmiştir.



Şekil 2. 4 Sinüzoidal dalga fonksiyonu

Burada ζ ile dalga yüzeyi (m), ζ_a ile dalga genliği (m), H ile de dalga yüksekliği ifade edilmiştir.

2.3 Hidrodinamik Kuvvetler

Gemiye etkileyen zorlayıcı kuvvet ve momentlerin hesaplanması gemi hareketlerinin doğru irdelenmesi açısından kritik öneme sahiptir. Hidrodinamik yayılım kuvvetleri ile viskoz sönümün toplanması ile oluşan hidrodinamik kuvvet τ_H aşağıdaki gibidir [7,71].

$$\tau_H = \tau_R + \tau_D \tag{2.12}$$

Burada hidrodinamik yayılım kuvvetleri τ_R ile ifade edilir. Bu kuvvet akışkan etrafındaki ataletten kaynaklı ek kütle, yüzey dalgaları tarafından taşınan enerjiden oluşan potansiyel sönüm ve Arşimet prensibinin etkisiyle ortaya çıkan doğrultucu kuvvetten oluşmaktadır ve aşağıdaki gibi gösterilmektedir [7,70,72].

$$\tau_R = -\underbrace{M_A\dot{\upsilon} - C_A(\upsilon)\upsilon}_{\text{Ek Kütle}} - \underbrace{B_P(\upsilon)\upsilon}_{\text{Potansiyel Sönüm}} - \underbrace{G(\eta)}_{\text{Doğrultucu Kuvvetler}} \tag{2.13}$$

Hidrodinamik yayılım kuvvetlerine ait bileşenler matris formunda aşağıdaki gibidir.

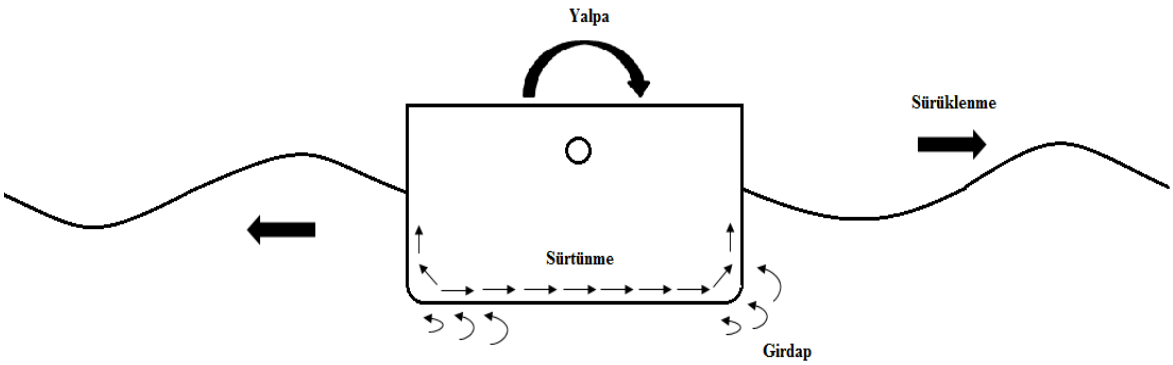
$$M_A = -\begin{bmatrix} X_{\dot u} & X_{\dot v} & X_{\dot w} & X_{\dot p} & X_{\dot q} & X_{\dot r} \\ Y_{\dot u} & Y_{\dot v} & Y_{\dot w} & Y_{\dot p} & Y_{\dot q} & Y_{\dot r} \\ Z_{\dot u} & Z_{\dot v} & Z_{\dot w} & Z_{\dot p} & Z_{\dot q} & Z_{\dot r} \\ K_{\dot u} & K_{\dot v} & K_{\dot w} & K_{\dot p} & K_{\dot q} & K_{\dot r} \\ M_{\dot u} & M_{\dot v} & M_{\dot w} & M_{\dot p} & M_{\dot q} & M_{\dot r} \\ N_{\dot u} & N_{\dot v} & N_{\dot w} & N_{\dot p} & N_{\dot q} & N_{\dot r} \end{bmatrix} \quad C_A(\upsilon) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & -a_3 & a_2 \\ 0 & 0 & 0 & a_3 & 0 & -a_1 \\ 0 & 0 & 0 & -a_2 & a_1 & 0 \\ 0 & -a_3 & a_2 & 0 & -b_3 & b_2 \\ a_3 & 0 & -a_1 & b_3 & 0 & -b_1 \\ -a_2 & a_1 & 0 & -b_2 & b_1 & 0 \end{bmatrix} \tag{2.14}$$

$$\begin{aligned} a_1 &= X_{\dot u}u + X_{\dot v}v + X_{\dot w}w + X_{\dot p}p + X_{\dot q}q + X_{\dot r}r \\ a_2 &= Y_{\dot u}u + Y_{\dot v}v + Y_{\dot w}w + Y_{\dot p}p + Y_{\dot q}q + Y_{\dot r}r \\ a_3 &= Z_{\dot u}u + Z_{\dot v}v + Z_{\dot w}w + Z_{\dot p}p + Z_{\dot q}q + Z_{\dot r}r \\ b_1 &= K_{\dot u}u + K_{\dot v}v + K_{\dot w}w + K_{\dot p}p + K_{\dot q}q + K_{\dot r}r \\ b_2 &= M_{\dot u}u + M_{\dot v}v + M_{\dot w}w + M_{\dot p}p + M_{\dot q}q + M_{\dot r}r \\ b_3 &= N_{\dot u}u + N_{\dot v}v + N_{\dot w}w + N_{\dot p}p + N_{\dot q}q + N_{\dot r}r \end{aligned} \qquad \upsilon = \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \\ p \\ q \\ r \end{bmatrix} \tag{2.15}$$

$$G = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & Y_\phi & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -Z_z & 0 & -Z_\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -K_\phi & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -M_z & 0 & -M_\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad \eta = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ \phi \\ \theta \\ \psi \end{bmatrix} \tag{2.16}$$

Bu ifadeye ilaveten viskoz sönüm ifadesi τ_D ise yüzeysel sürtünme, dalga sürükleme sönümü ve girdap kaynaklı sönümden oluşmaktadır ve aşağıdaki gibi ifade edilmektedir.

$$\tau_D = -\underbrace{B_y(\upsilon)\upsilon}_{\text{Yüzeysel Sürtünme}} - \underbrace{B_d(\upsilon)\upsilon}_{\text{Dalga Sürükleme Sönümü}} - \underbrace{B_g(\upsilon)\upsilon}_{\text{Girdap Sönümü}} \tag{2.17}$$



Şekil 2. 5 Sönüm etkilerinin gösterimi

Hidrodinamik sönüm matrisi toplam olarak aşağıdaki gibi ifade edilir,

$$B(\upsilon) = B_p(\upsilon) + B_y(\upsilon) + B_d(\upsilon) + B_g(\upsilon) \tag{2.18}$$

$$B = -\begin{bmatrix} X_u & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & Y_v & 0 & Y_p & 0 & Y_r \\ 0 & 0 & Z_w & 0 & Z_q & 0 \\ 0 & K_v & 0 & K_p & 0 & K_r \\ 0 & 0 & M_w & 0 & M_q & 0 \\ 0 & N_v & 0 & N_p & 0 & N_r \end{bmatrix} \tag{2.19}$$

Bu sönüm değerleri doğrusal ve doğrusal olmayan bileşenlere sahiptir, bu değerler hareketin genliğine, frekansına ve ileri hıza bağlı olarak değişir. Çalışmalarda çoğunlukla sönüm değerleriyle ilgili doğrusal olmayan terimleri hesaplamanın zor olması nedeniyle, bu terimlere karşılık gelen eşdeğer doğrusal sönüm katsayısı tanımlanır ve analizlerde kullanılır.

2.4 Yalpa Hareketi Denklemi

Denklem 2.1'de ifade edilen doğrusal altı serbestlik gemi hareket denklemlerinde, birbiriyle eş davranış gösteren hareketler ihmal edilerek, gemi hareketleri arasında kritik öneme sahip olan yalpa hareketi tek serbestlik dereceli olarak düşünülmüş ve en genel haliyle parametrik bir denklem olarak aşağıdaki gibi ifade edilmiştir [73].

$$(I_x + J_x)\,\ddot{\phi}(t) + B(\phi,\dot{\phi})(t) + G(\phi,t) = Z(t) \tag{2.20}$$

$\phi,\dot{\phi},\ddot{\phi}$: Yalpa açısı, yalpa açısal hızı ve yalpa açısal ivmesi olarak sırasıyla ifade edilmektedir.

$I_x + J_x$: Geminin x yönündeki kütle atalet momenti ve ek su kütlesi atalet momentini belirtmektedir.

$B(\phi,\dot{\phi})$: Yalpa sönüm momentini ifade etmektedir.

$G(\phi,t)$: Doğrultucu momenti belirtmektedir.

$Z(t)$: Dalga momentini göstermektedir.

Geminin ve içinde bulunduğu su kütlesinin yalpa hareketine karşı verdiği tepkiye yalpa atalet momenti denir. Hareketin ivmesiyle doğrudan ilgilidir. Çalışmada yalpa ataletinin dalgaya bağlı olarak değişimi ihmal edilerek, sabit bir değer olarak kabul edilmiştir. Sönüm momenti geminin yalpa hareketinin doğru tahmini ve karakteristiklerinin net belirlenebilmesi için önemlidir. Yalpa sönüm momentleri ile ilgili teorik ve deneysel hesaplamalar birçok araştırmacı tarafından yapılmakta ancak modelden kaynaklı olarak yüksek mertebeli doğrusal olmayan terimler yüzünden gerçeğe yakın olarak momenti belirleyebilmenin oldukça zor olduğu bilinmektedir. Sönüm momenti geminin yapısına, hızına, yalpa açısına, viskoziteye ve hareketin frekansı gibi birçok parametreye bağlıdır. Yalpa genliklerinin artmasıyla birlikte oluşan doğrusal olmayan fonksiyonlar nedeniyle hareket açısından gerçekçi bir tanımlama yapabilmek için hem doğrusal hem de doğrusal olmayan terimleri içinde barındıran bir fonksiyon gereklidir bu durumda aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır [74,75].

$$B_{44}(\dot{\phi}) = B_L\dot{\phi} + B_N\dot{\phi}\,|\dot{\phi}| \tag{2.21}$$

Literatürde sönüm momenti ile ilgili farklı kullanımlar mevcut olup aşağıda ifade edilmiştir.

$$B_{44}(\dot{\phi}) = B_L\dot{\phi} + B_N\dot{\phi}\left|\dot{\phi}\right| \tag{2.22}$$

$$B_{44}(\phi,\dot{\phi}) = B_L\dot{\phi} + B_N\phi^2\dot{\phi} \tag{2.23}$$

$$B_{44}(\dot{\phi}) = B_L\dot{\phi} + B_N\dot{\phi}^3 \tag{2.24}$$

$$B_{44}(\phi,\dot{\phi}) = B_L\dot{\phi} + B_N\left|\phi\right|\dot{\phi} \tag{2.25}$$

$$B_{44}(\dot{\phi}) = B_L\dot{\phi} + B_{N1}\dot{\phi}\left|\dot{\phi}\right| + B_{N2}\dot{\phi}^3 \tag{2.26}$$

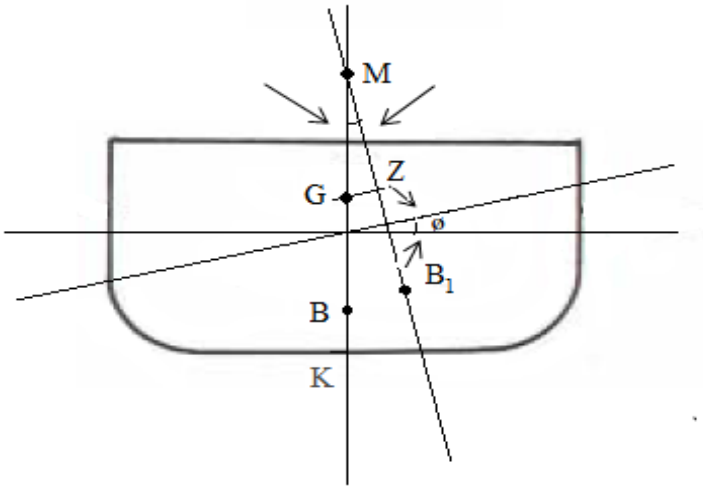
Çalışmalarda kullanılan yalpa denklemi genel haliyle aşağıdaki gibi ifade edilmiştir.

$$(I_x + J_x)\,\ddot{\phi} + B_L\dot{\phi} + B_{N1}\dot{\phi}|\dot{\phi}| + B_{N2}\dot{\phi}^3 + \Delta(G_1\phi + G_3\phi^3 + G_5\phi^5 + G_7\phi^7) = Z(t) \tag{2.27}$$

Yukarıda yalpa denkleminde $(I_x + J_x)$ ile ifade edilen kütle atalet momenti ve ek kütle atalet momentinin toplam değeri [46],

$$(I_x + J_x) = \frac{\Delta}{12g}(B^2 + 4KG^2) \tag{2.28}$$

ile elde edilir. Bu denklemde Δ ile geminin deplasmanı (ton), $\overline{KG}$ ağırlık merkezinin dikey koordinatını, *B* ile ise geminin genişliği (m) gösterilmektedir.



Şekil 2. 6 Küçük açılarda stabilite ifadeleri

Yukarıdaki şekilde *B* su altı hacim merkezini, $\overline{GZ}$ doğrultucu moment kolunu, *M* ise matasantr noktasını ifade etmektedir. Bunlara ilaveten $\overline{KB}$ yüzme merkezinin dikey koordinatını, $\overline{BM}$ enine metasantr yarıçapını, $\overline{GM}$ ise enine metasantr yüksekliğini belirtmektedir.

B_L ile doğrusal, B_{N1}, B_{N2} ile ise doğrusal olmayan boyutsuz yalpa sönüm katsayıları aşağıdaki formüller yardımıyla hesaplanabilmektedir [46].

$$B_L = \frac{2a\sqrt{(I_x + J_x)\Delta GM}}{\pi} \tag{2.29}$$

$$B_{N1} = \frac{3}{4} b(I_x + J_x) \tag{2.30}$$

$$B_{N2} = 0.7 B_{N1} \tag{2.31}$$

Burada kullanılan a ve b katsayıları farklı gemi tipleri için aşağıda Çizelge 2.2'de gösterilmiştir[76].

Çizelge 2. 2 Farklı gemi türleri için sabit katsayılar

Gemi Türü	a	b
Yolcu Gemisi	0.05	0.0125
Kargo Gemisi	0.03	0.0155
Balıkçı Gemisi	0.1	0.0140

Doğrultucu moment olarak ifade edilen $G(\phi,t)$ aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$G(\phi,t) = \Delta(G_1\phi + G_3\phi^3 + G_5\phi^5 + G_7\phi^7) \tag{2.32}$$

Yalpa doğrultucu moment katsayıları ise aşağıda ifade edilen formüller yardımıyla bulunabilmektedir[46].

$$G_1 = \frac{d(GZ)}{d\phi} = GM \tag{2.33}$$

$$G_3 = \frac{4}{\phi_v^4}(3A_{\phi v} - GM\phi_v^2) \tag{2.34}$$

$$G_5 = -\frac{3}{\phi_v^6}(4A_{\phi v} - GM\phi_v^2) \tag{2.35}$$

Hasarsız bir gemi için $G_7 = 0$ kabul edilebilmektedir.

Yalpa hareketi denklemi, yukarıda bahsedilen parametrelerin her birinin, farklı durumlar için farklı karşılıklarının olması sebebiyle çeşitlilik göstermekte ve birçok araştırmacı tarafından farklı yapılar kullanılarak çalışmalar yapılmaktadır. Harekete ait doğrultucu moment ve sönüm katsayıları yukarıda ifade edilen ampirik formüller dahil olmak üzere farklı ampirik formüller veya deneysel metotlarla bulunabilmektedir. Sönüm katsayılarının farklı froude sayıları için farklı karşılıklarının olması yalpa hareketinin dinamiği açısından ayrı bir önem arz etmektedir. Bu noktada farklı seyir hızları için yapılacak çalışmalarda değişen sönüm değerlerinin elde edilmesi ve benzetim çalışmalarında kullanılması gereklidir. Doğrultucu moment değerleri ise geminin kararlılık durumunun bir göstergesi olan $GZ - \phi_v(^\circ)$ eğrisinin değerleri kullanılarak belirlenmekte, dolayısıyla geminin devrilme açısı ve değişen *GZ* değerleri göz önüne alınarak hesaplanmaktadır. Bu noktada sönüm ve doğrultucu moment değerlerinin geminin karakteristiğini doğrudan etkilediği anlaşılmakta, optimum değerlere ulaşmanın ne denli önemli olduğu görülmektedir. Bu çalışmada kullanılacak olan yalpa hareketi denklemleri ve parametrelerin hesaplanma biçimleri her bölümde ayrı ayrı ifade edilmiş, bu yolla farklı durumlar incelenerek kullanılan denetleyiciler için kapsamlı bir yol izlenmiş ve optimum sonuçlara ulaşılmıştır.

BÖLÜM 3

UYGULAMALARDA KULLANILAN GEMİLERİN HİDRODİNAMİK ANALİZLERİ

Bu çalışmada, 2 adet balıkçı teknesi ve 1 adet kayıcı tekne olmak üzere 3 farklı gemi tipi kullanılmıştır. Bu gemiler farklı operasyon durumlarında belirli koşullarda incelenmiş ve analizler gerçekleştirimiştir. Simülasyonlarda kritik rol oynayan kısımlarından birisi gemi etrafındaki akışın modellenmesidir. Bu nedenle uygulamalar için Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) metodu kullanılmış ve yapılan akış analizi doğrultusunda farklı hücum açılarında oluşan kaldırma katsayıları tespit edilmiştir. Yapılan bu analiz belli denklem sistemlerini temel alarak sonuç vermektedir ve bu denklemler aşağıdaki gibi ifade edilmiştir.

3.1 Temel Akışkanlar Mekaniği Denklemleri

Bu çalışmada kullanılan HAD metodu belli temel akışkanlar mekaniği denklemlerini göz önüne alarak çözüm yapmaktadır. İncelenen akış modelinde akış sıkıştırılamaz kabul edilmiştir. Bu denklemleri transport denklemleri şeklinde; kütlenin korunumu, momentumun korunumu ve enerjinin korunumu olmak üzere üç denklem takımı olarak ifade etmek mümkündür. Aşağıda transport denklemleri genel olarak ifade edilmiştir [77,78,79].

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t}+\nabla.\left(\rho\phi\vec{V}\right)=\nabla.(\Gamma\nabla\phi)+S_{\phi} \tag{3.1}$$

Bu denklemde ϕ, akışkanın her hangi bir özelliğini ifade etmektedir. S_ϕ ile kaynak terimi gösterilmektedir. ϕ terimi yerine sıcaklık terimi yazıldığında enerjinin korunumu denklemi elde edilir.

Denklem 3.1'de ϕ terimi yerine 1 yazılırsa kütlenin korunumu denklemi aşağıdaki gibi elde edilebilir.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla . \left(\rho \vec{V} \right) = 0 \qquad (3.2)$$

Akışın sıkıştırılamaz olması halinde denklem aşağıdaki gibidir.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho \nabla . \vec{V} = 0 \qquad (3.3)$$

Akışın daimi olduğu durumda denklem,

$$\nabla . \left(\rho \vec{V} \right) = 0 \qquad (3.4)$$

olarak ifade edilir. Akışın hem sıkıştırılamaz hem de daimi olduğu zaman ise, kütlenin korunumu denklemi,

$$\nabla . \vec{V} = 0 \qquad (3.5)$$

halini alır. Bu çalışmadaki bütün HAD analizlerinde akış daimi yani zamandan bağımsız kabul edilmiştir.

Momentumun korunumu denklemleri, yukarıda ifade edilen transport denkleminde ϕ yerine hız terimi yazıldığı durumda elde edilmektedir. Dolayısıyla momentumun korunumu denklemleri üç farklı hız bileşeni için oluşturulabilmektedir. Örneğin ϕ yerine v (hızın y yönündeki bileşeni) yazıldığında y yönündeki momentum denklemi elde edilir.

$$\frac{\partial (\rho u)}{\partial t} + \nabla . \left(\rho u \vec{V} \right) = \nabla . (\mu \nabla u) - \frac{\partial p}{\partial x} + \rho g_x \qquad (3.6a)$$

$$\frac{\partial (\rho v)}{\partial t} + \nabla . \left(\rho v \vec{V} \right) = \nabla . (\mu \nabla v) - \frac{\partial p}{\partial y} + \rho g_y \qquad (3.6b)$$

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t}+\nabla.\left(\rho w\vec{V}\right)=\nabla.(\mu\nabla w)-\frac{\partial p}{\partial z}+\rho g_z \tag{3.6c}$$

Denklem 3.6'da verilen x, y ve z yönündeki hareket denklemleri Navier-Stokes denklemleri olarak ifade edilmektedir. Denklem 3.6, akış potansiyel kabul edilirse viskoz terimler ihmal olacağından Euler denklemleri halini almaktadır.

$$\nabla.\left(\rho u\vec{V}\right)=-\frac{\partial p}{\partial x}+\rho\vec{g_x} \tag{3.7a}$$

$$\nabla.\left(\rho v\vec{V}\right)=-\frac{\partial p}{\partial y}+\rho\vec{g_y} \tag{3.7b}$$

$$\nabla.\left(\rho w\vec{V}\right)=-\frac{\partial p}{\partial z}+\rho\vec{g_z} \tag{3.7c}$$

Akış viskoz ve daimi ise aynı denklem aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$\nabla.\left(\rho u\vec{V}\right)=\nabla.(\mu\nabla u)-\frac{\partial p}{\partial x}+\rho\vec{g_x} \tag{3.8a}$$

$$\nabla.\left(\rho v\vec{V}\right)=\nabla.(\mu\nabla v)-\frac{\partial p}{\partial y}+\rho\vec{g_y} \tag{3.8b}$$

$$\nabla.\left(\rho w\vec{V}\right)=\nabla.(\mu\nabla w)-\frac{\partial p}{\partial z}+\rho\vec{g_z} \tag{3.8c}$$

3.2 RANS Denklemleri

Yukarıda ifade edilen momentum denklemi tansörel notasyon kullanılarak viskoz gerilmelerle birlikte aşağıdaki gibi ifade edilebilir [77,78,79]:

$$\rho\frac{\partial u_i}{\partial t}+\rho u_j\frac{\partial u_i}{\partial x_j}=-\frac{\partial p}{\partial x_i}+\frac{\partial t_{ji}}{\partial x_j} \tag{3.9}$$

Denklemde ∂t_{ji} , viskoz gerilme tansörüdür.

$$t_{ji}=2\mu s_{ij} \tag{3.10}$$

μ moleküler viskozite, s_{ij} ise gerilme oranı tansörü olarak ifade edilir.

$$s_{ij} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \tag{3.11}$$

Denklem 3.9'da verilen ifade içerisindeki hız terimi bu çalışmada yapılan analizlerde türbülanslı akımı temsil etmektedir. Bu durumda hız terimi içine zamana göre ortalama hız bileşeni ve çalkantı bileşeni eklenmektedir.

$$u_i(x,t) = U_i + u_i'(x,t) \tag{3.12}$$

$$U_i(x,t) = \frac{1}{T}\int_t^T u_i(x,t)dt \tag{3.13}$$

Momentum denklemindeki hız terimi bu iki bileşeni içine alacak şekilde değiştirildiğinde elde edilen denklem Navier-Stokes denkleminin özelleşmiş hali olan zaman ortalamalı Navier-Stokes denklemi olarak ifade edilir. Bu denklemin kapalı formu aşağıdaki gibi gösterilir:

$$\rho\frac{\partial U_i}{\partial t} + \rho U_j\frac{\partial U_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}\left(2\mu S_{ji} - \overline{\rho u_j' u_i'}\right) \tag{3.14}$$

Bu denklemde $\overline{u_i' u_j'}$ terimi zaman içindeki ortalama değerdir. $-\overline{\rho u_j' u_i'}$ terimi ise Reynolds-gerilme tansörüdür.

Türbülans kinetik enerjisi denklemi aşağıdaki gibi ifade edilmiştir.

$$\frac{\partial k}{\partial t} + U_j\frac{\partial k}{\partial x_j} = \tau_{ij}\frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \varepsilon + \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\upsilon\frac{\partial k}{\partial x_j} + \frac{1}{2}\overline{u_i' u_i' u_j'} - \frac{1}{\rho}\overline{p' u_j'}\right) \tag{3.15}$$

Yukarıdaki denklem takımında eşitliğin sol tarafındaki ilk terim k'da meydana gelen değişim miktarını, ikinci terim ise k'nın konveksiyon ile taşınımını ifade etmektedir. Sağ taraftaki terimler ise sağdan sola basınç etkisiyle k'nın taşınımını, Reynolds gerilme etkisiyle k'nın taşınımını, viskoz gerilme etkisiyle k'nın taşınımını, k'da meydana gelen kayıp miktarını ve türbülans üretimini ifade etmektedir. Türbülans kinetik enerjisi denklemi kısaca yukarıdaki gibidir. Denklemde ε ile viskoz kayıp terimi gösterilmiştir. Denklemden anlaşıldığı üzere ε kinetik enerji denklemine negatif bir etki oluşturmaktadır.

$$\varepsilon = \upsilon \overline{\frac{\partial u_i'}{\partial x_k} \frac{\partial u_i'}{\partial x_k}} \tag{3.16}$$

Ticari hesaplamalı akışkanlar dinamiği yazılımlarında iki denklemli türbülans modelleri arasında yaygın olarak standart k-ε türbülans modeli kullanılır. Bu model iki adet taşınım denkleminden ibarettir.

Standart k-ε türbülans modeli için çeşitli ifadeler aşağıda verilmiştir.

Kinematik eddy viskozitesi:

$$\mu_T = \rho C_\mu k^2 / \varepsilon \tag{3.17}$$

Türbülans kinetik enerjisi:

$$\rho \frac{\partial k}{\partial t} + \rho U_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \tau_{ij} \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \rho \varepsilon + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \mu_T / \sigma_k \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \tag{3.18}$$

Türbülans yayılım oranı:

$$\rho \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \rho U_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} \tau_{ij} \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - C_{\varepsilon 2} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \mu_T / \sigma_\varepsilon \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] \tag{3.19}$$

Kapanma katsayıları:

$$C_{\varepsilon 1} = 1.44,\ C_{\varepsilon 2} = 1.92,\ C_\mu = 0.09,\ \sigma_k = 1.0,\ \sigma_\varepsilon = 1.3 \tag{3.20}$$

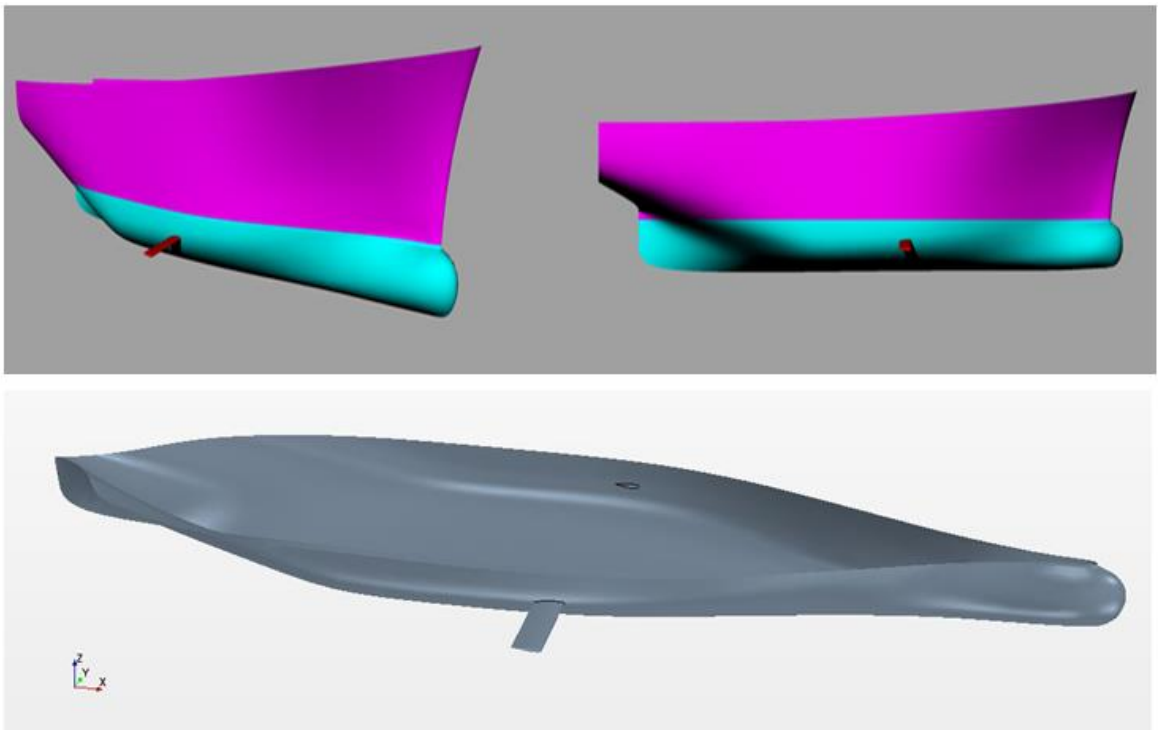
Diğer bağıntılar:

$$\omega = \varepsilon / \left(C_\mu k \right),\ l = C_\mu k^{3/2} / \varepsilon \tag{3.21}$$

Bu denklemleri temel alarak çalışan ticari Star CCM + programı vasıtası ile HAD analizleri yapılarak, farklı gemiler için dengeleyici kanat etrafındaki akış incelenmiş ve farklı hücum açıları için boyutsuz kaldırma katsayıları hesaplanmıştır. Uygulamalarda farklı denetleyici tasarımları için kullanılan gemi tipleri ile ilgili karakteristik değerler ve HAD analizi sonuçları aşağıda ifade edilmiştir.

3.3 HAD Analizi Için Kullanılan Balıkçı Teknesi 1

HAD analizi için kullanılan balıkçı teknesinin genel görünümü Şekil 3.1'de özellikleri Çizelge 3.1'de ifade edilmiştir.

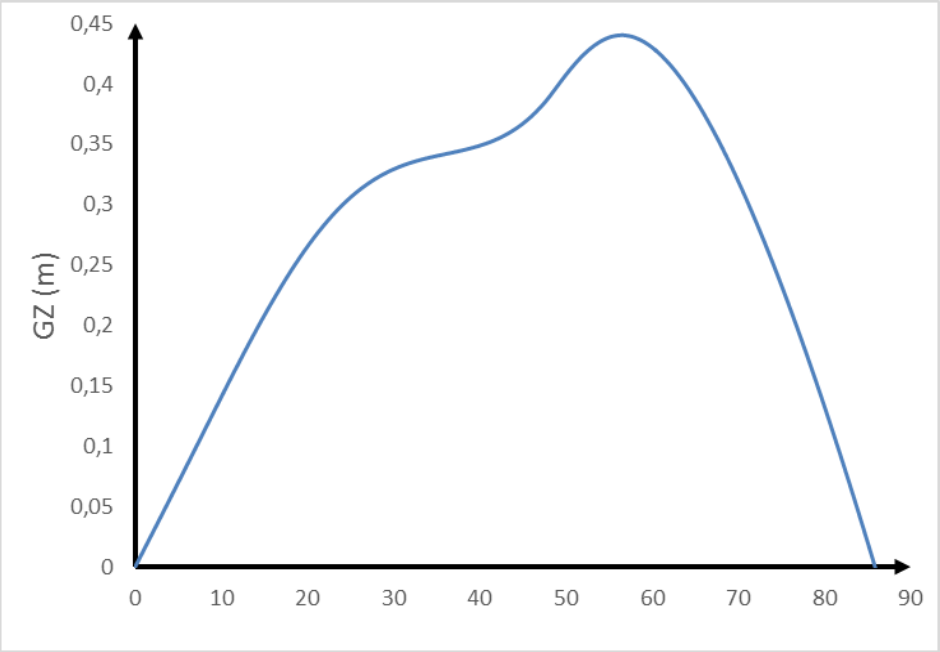


Şekil 3. 1 Balıkçı teknesi 1'in genel görünümü

Çizelge 3. 1 Balıkçı teknesi 1'e ait karakteristik değerler

	Model	**Gemi**
Ölçek	1/8	1
L_{BP} (m)	5.183	41.469
B_{WL} (m)	1.320	10.561
T_M (m)	0.311	2.495
S (m^2)	6.340	405.818
Δ (t)	1.078	552.3
C_B	0.514	0.514
GM (m)	0.080	0.645
KG (m)	0.562	4.5
V_S (knot)	3.535	10
A_F (m^2)	0.075	4.8

Gemilerin kararlılık durumlarını anlamak için $GZ-\phi_v(^\circ)$ eğrisi büyük bir öneme sahiptir. Bu eğri sayesinde geminin devrilme açısı tespit edilebilmekte ve hesaplamalarda kullanılmaktadır. Çalışmada kullanılan balıkçı teknesine ait $GZ-\phi_v(^\circ)$ eğrisi Şekil 3.2'deki grafikle gösterilmiştir.



Şekil 3. 2 Balıkçı teknesi 1'in $GZ-\phi_v(^\circ)$ Eğrisi

Yalpa dengeleyici kanat sistemine ait kaldırma katsayıları NACA 0015 kanat profili kullanılarak hesaplanmıştır. Kaldırma kuvvetinin ve katsayısının boyutsuz hali aşağıda ifade edilmektedir.

$$L=\frac{1}{2}\rho V^2 A_F C_L \tag{3.22}$$

$$C_L=\frac{L}{0.5\rho V^2 A_F} \tag{3.23}$$

Burada L kaldırma kuvvetini (N), ρ akışkanın yoğunluğunu (t/m^3), A_F yalpa dengeleyici kanat alanını (m^2), C_L yalpa dengeleyici kanat kaldırma katsayısını,

V geminin hızını ifade etmektedir. Yalpa dengeleyici kanat alanı ve oluşan yalpa momenti aşağıdaki formüllerle bulunabilmektedir [88].

$$A_F = \frac{\Delta GM \sin\theta_{wsc}}{\rho C_L V^2 L} \tag{3.24}$$

$$M_F = \rho V^2 A_F C_L I_F (\alpha_F + \frac{\dot{\phi}}{v} I_F) \tag{3.25}$$

$$fs_1 = \rho V^2 A_F C_L I_F,\ fs_2 = \frac{\rho V^2 A_F C_L I_F}{v} I_F \tag{3.26}$$

Burada M_F fin (dengeleyici kanat) yalpa momentini, I_F fin kuvvet kolunu, α_F ise hücum açısını ifade etmektedir. Yukarıda bahsedilen temel akışkan denklemlerini temel alarak çalışan Star CCM+ yazılımı ile HAD analizi için hesaplama hacmi oluşturulmuştur. Oluşturulan hesaplama hacminin her bir yüzeyine uygun sınır şartı tanımlanmıştır. Sınır şartlarının doğru tanımlanması, sayısal analizlerin yakınsaklığı ve doğruluğu açısından son derece önemlidir. Bu tez çalışmasında incelenen balıkçı teknesi etrafındaki akış probleminde hesaplama hacmine uygulanan sınır şartları Şekil 3.3'de verilmiştir. İncelenen problemde serbest yüzey etkileri ihmal edildiğinden teknenin sadece sualtı hacmi modellenmiş olup hesaplama zamanından tasarruf etmek amacıyla tekne modelinin boyuna simetri eksenine göre yarısı incelenmiştir. Tekne yüzeyi ve yalpa dengeleyici kanatlar kaymaz duvar olarak tanımlanarak, cisim üstündeki kaymama şartı kabul edilmiştir. Tekne su hattını kesen yüzey, serbest yüzey etkileri hesaba katılmadığından çift gövde tekniğine uygun olarak, simetri olarak tanımlanmıştır. Ayrıca tekneyi boyuna kesen yüzey de simetri olarak tanımlanarak teknenin bu yüzeye göre simetriğinin de hesaba katılması sağlanmıştır. Simetri sınır koşulunda ise hız koşulları kaygan duvar sınır şartındaki gibi olup skaler özelliklerin de normal yöndeki değişimleri sıfır olacaktır.

$$\frac{\partial \phi}{\partial n} = 0 \tag{3.27}$$

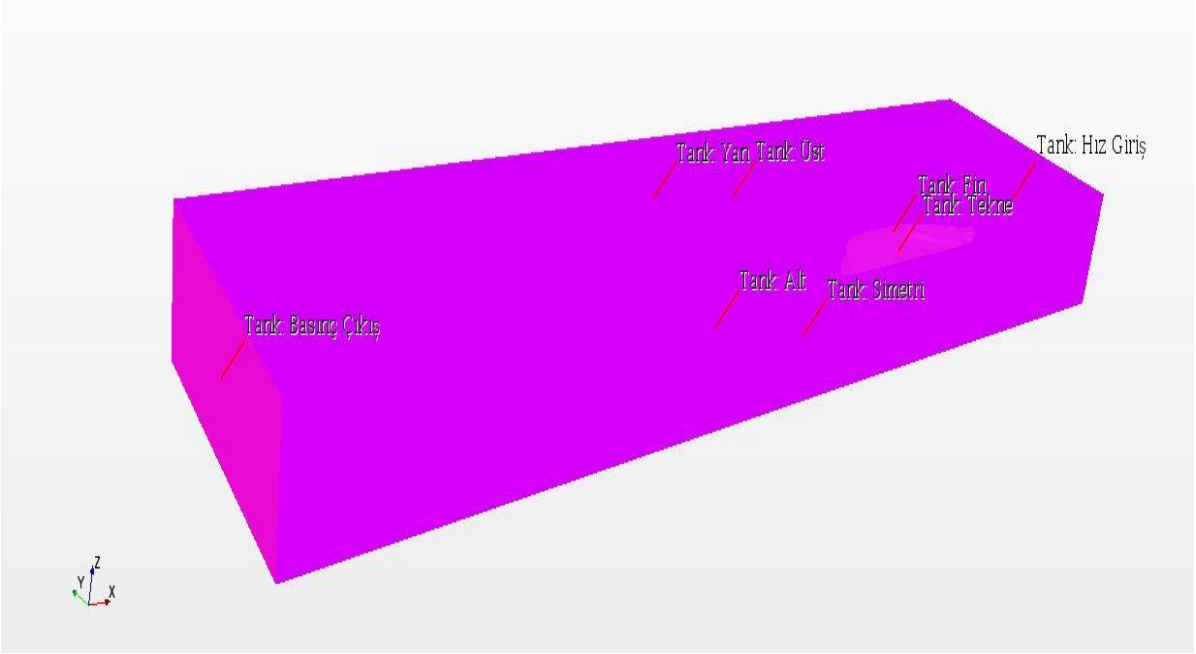
Hesaplama hacminin giriş kısmında yer alan yüzey tekne hızının girilmesi amacıyla hız giriş olarak tanımlanmış olup hesaplama hacminin çıkışında yer alan yüzey ise basınç çıkış olarak tanımlanmıştır. Bu sayede tekneye gelen akıma istenilen hız verilebilmiştir.

Hesaplama hacminde diğer tüm yüzeyler kaygan duvar olarak tanımlanmıştır. Kaygan duvar şartı gereği yüzeyde sürtünme olmadığı kabul edilmektedir. Dolayısıyla yüzey normali yönünde hız bileşeni sıfır olmakla beraber yatay yönde hız bileşeni mevcuttur.

$$u_i \cdot \vec{n} = 0 \tag{3.28}$$

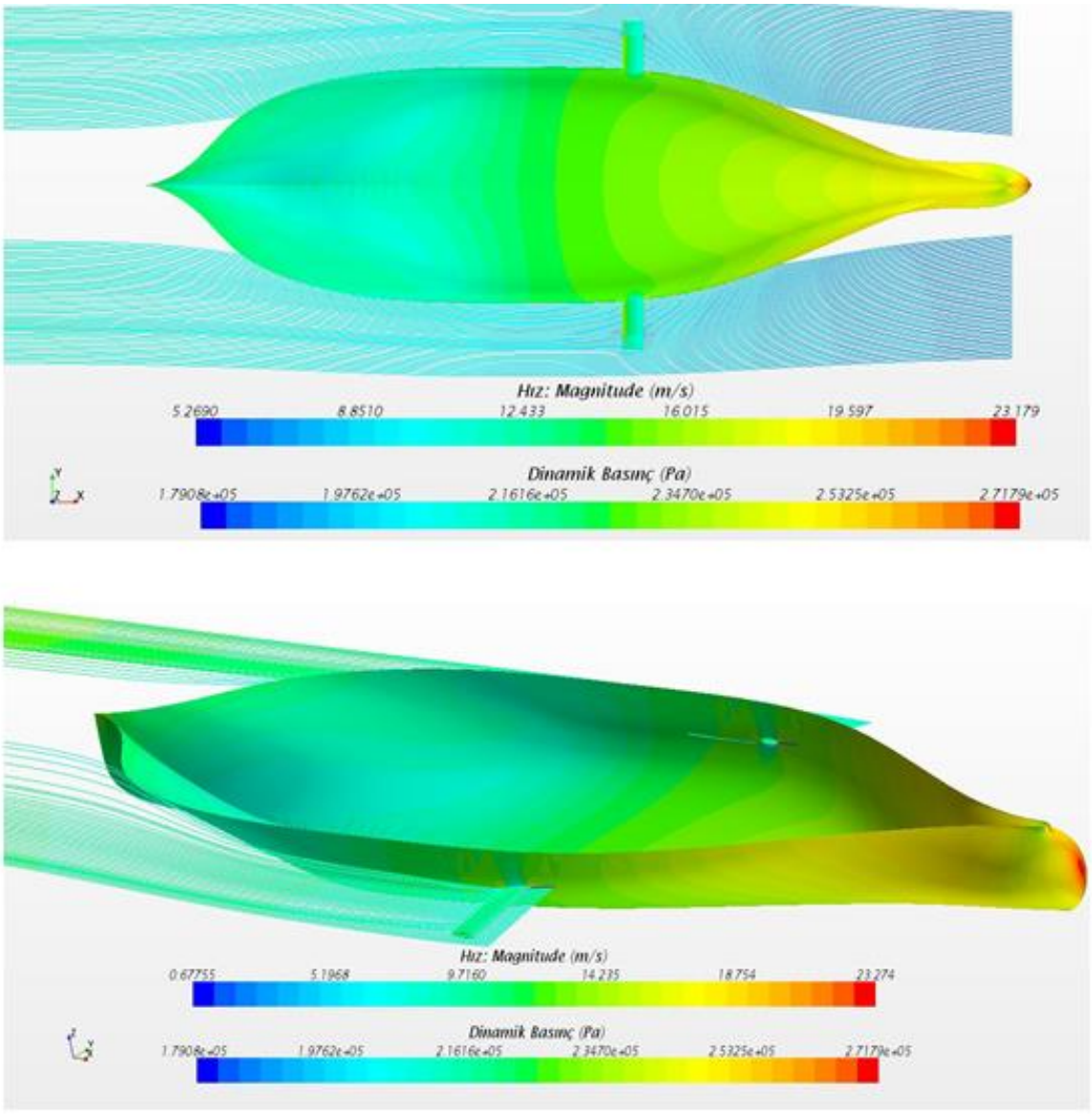
Gerilme tensörü ise şöyle olacaktır:

$$\tau_{ij} = 0 \tag{3.29}$$



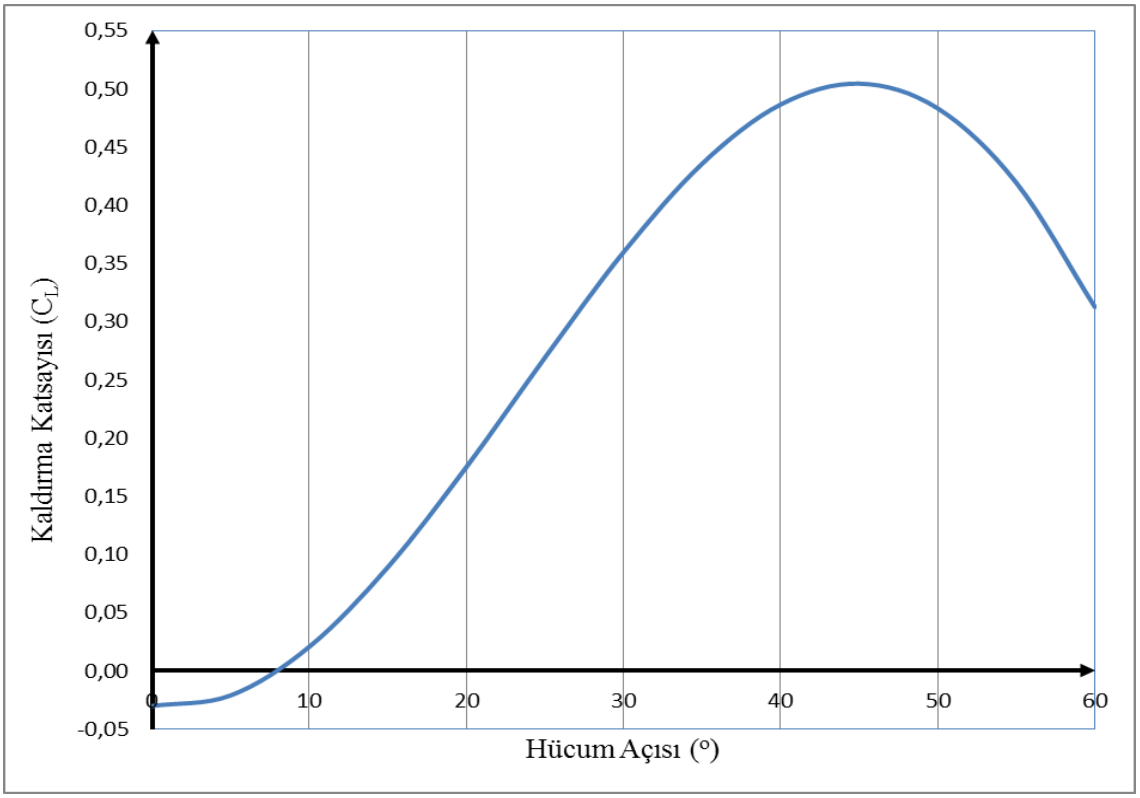
Şekil 3. 3 Hesaplama hacmine uygulanan sınır koşulları

Hesaplama hacmi belirlendikten sonra gerçekleştirilen analiz neticesinde, Şekil 3.4'de tekne üzerinde oluşan basınç dağılımı ile tekne etrafında oluşan hız dağılımı gösterilmiştir. Tekne üstündeki basınç dağılımı beklenildiği gibi tekne baş kısmında yüksek olup gemi altında düşüktür. Yüksek hücum açılı bir akışta bile yalpa dengeleyici kanatların arkasındaki akım hatlarının düzgünlüğü dikkat çekmektedir. Hız dağılımına bakılarak tekne etrafındaki hızın yalpa dengeleyici kanatlardan itibaren arttığı görülmektedir. Bunda yalpa dengeleyici kanat etrafındaki akışın etkili olduğu düşünülmektedir. Kaldırma kuvveti oluşturan kanatların alt kısmındaki akım yüksek hücum açısı sebebiyle tekne boyunca hızlanarak ilerlemektedir.



Şekil 3. 4 Tekne etrafında oluşan basınç ve hız dağılımları

Çalışmada yapılan HAD analiz neticesinde farklı hücum açılarına karşılık olarak elde edilen kaldırma katsayıları Şekil 3.5'de gösterilmiştir.

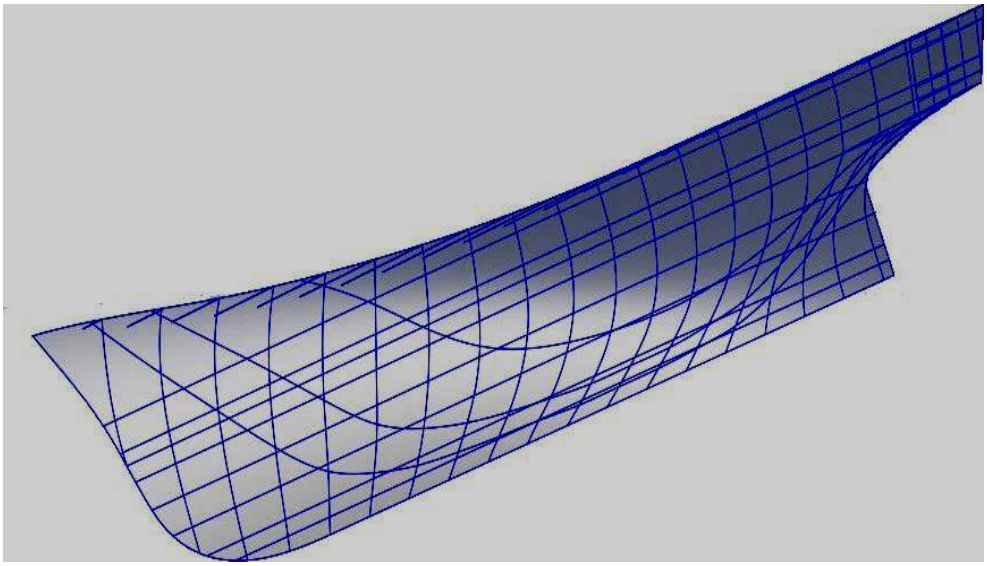


Şekil 3. 5 Balıkçı teknesi 1'e ait kaldırma katsayısı-hücum açısı değişimi

Maksimum kaldırma katsayısının 45° hücum açısında oluştuğu tespit edilmiş ve bu açıya karşılık gelen kaldırma katsayısı elde edilmiştir.

3.4 HAD Analizi için Kullanilan Balikçi Teknesi 2

Bu çalışmada kullanılan balıkçı teknesi için daha önce ifade edilen akışkan denklemleri göz önüne alınarak akış analizi yapılmış, farklı hücum açıları için kaldırma katsayıları hesaplanmıştır. Teknenin genel görünümü Şekil 3.6' da özellikleri Çizelge 3.2' de ifade edilmiştir.

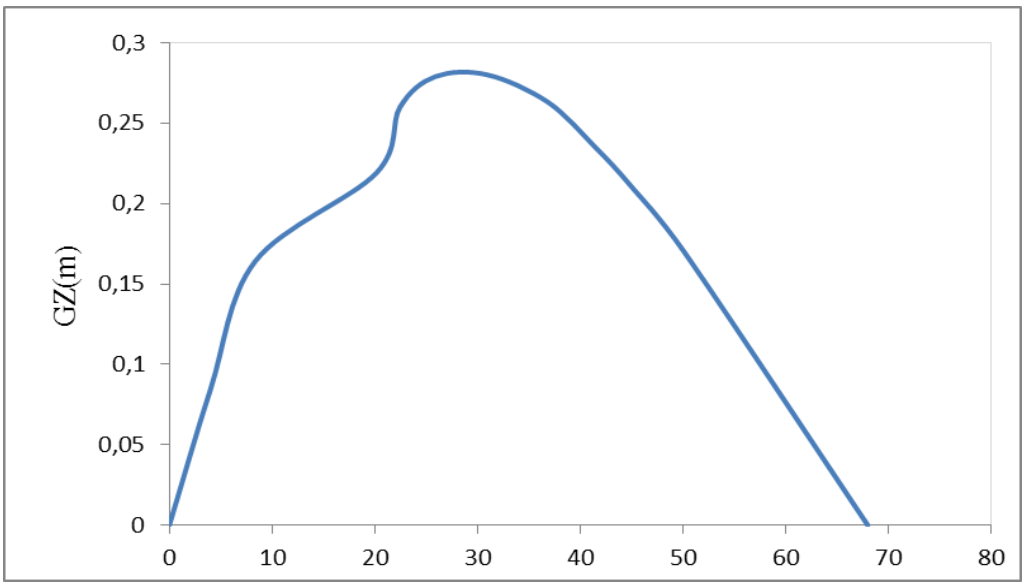


Şekil 3. 6 Balıkçı teknesi 2'nin genel görünümü [87]

Çizelge 3. 2 Balıkçı teknesi 2'ye ait karakteristik değerler

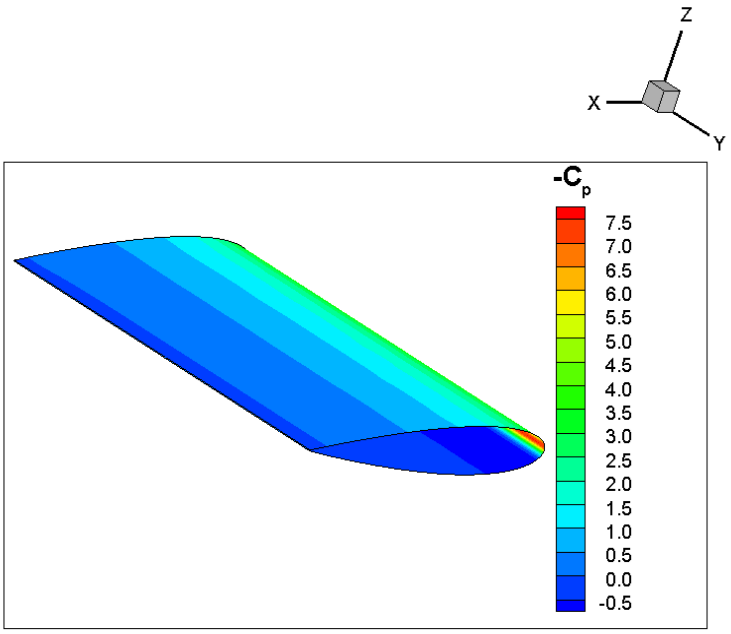
Başlıca Özellikler	Parametreler
L_{bp}	*20 m*
B	*5.714 m*
D	*3.2 m*
T	*2.285 m*
∇	*105.76 m^3*
GM	*0.8 m*
KG	*2.35 m*
C_B	*0.405*
V_s	*12 kn*
A_F	*2.81 m^2*
ϕ_v	*68^0*

Gemilerin seyir esnasında denge durumları değiştiği için dinamik stabilite kavramı büyük önem taşımaktadır. $GZ-\phi_v$ eğrisinin altında kalan alan ile ifade edilen bu kavram geminin kararlılık durumunu net bir şekilde ifade etmektedir. Balıkçı teknesi için Şekil 3.7 ile ifade edilen $GZ-\phi_v$ eğrisinde 68^0 devrilme açısıdır ve ancak bu noktaya kadar kararlı bir seyir gerçekleştirilmektedir.

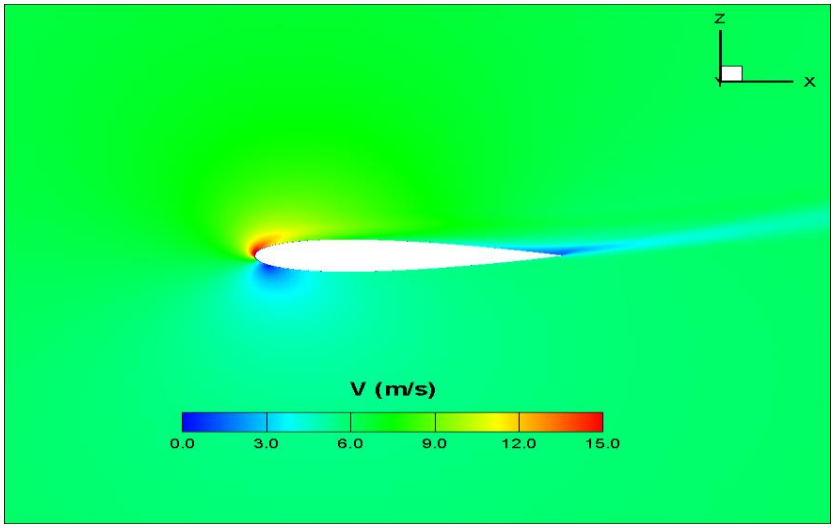


Şekil 3. 7 Balıkçı teknesi 2'nin $GZ-\phi_v(^\circ)$ Eğrisi

Yalpa dengeleyici kanat sistemine ait kaldırma katsayıları NACA 0015 kanat profili kullanılarak hesaplanmıştır. Akışın düzenli, sıkıştırılamaz ve türbülanslı olduğu kabul edilmiştir. Analize ait basınç ve hız dağılımları Şekil 3.8 ve 3.9'da gösterilmiştir. Bu grafiklerde basıncın arttığı yerde hızın düşük olduğu, hızın arttığı yerde ise basıncın düşük olduğu ifade edilmektedir.

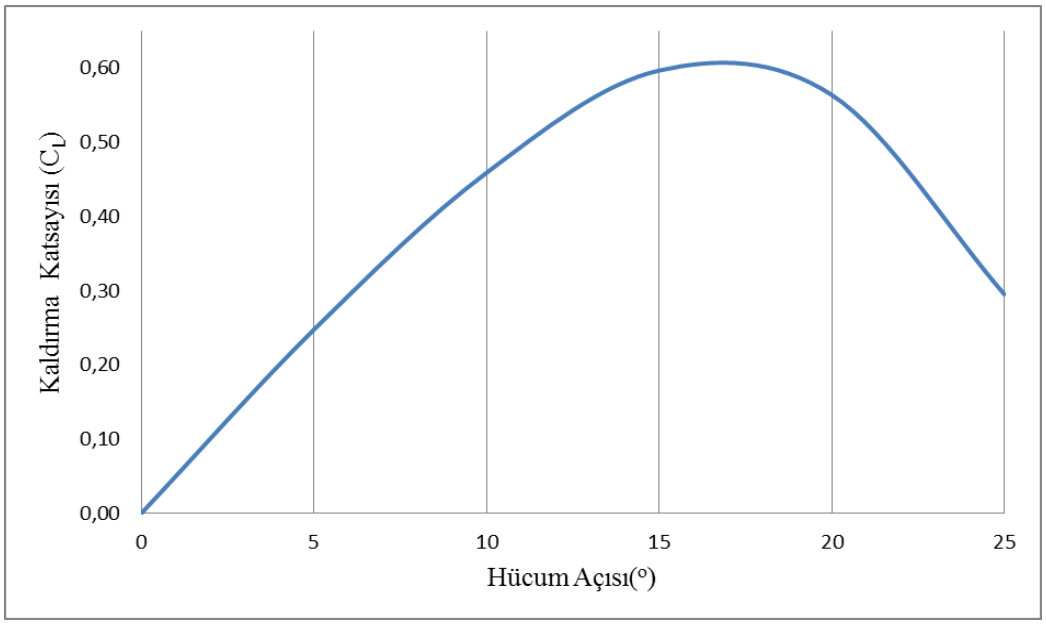


Şekil 3. 8 Balıkçı teknesi 2'ye ait kanat üzerindeki boyutsuz basınç dağılımı



Şekil 3. 9 Balıkçı teknesi 2'ye ait kanat etrafındaki hız dağılımı

Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği Analizi yapılarak farklı hücum açılarında kaldırma katsayısıları bulunmuş ve hücum açısı arasındaki ilişki Şekil 3.10'da grafikle sunulmuştur.



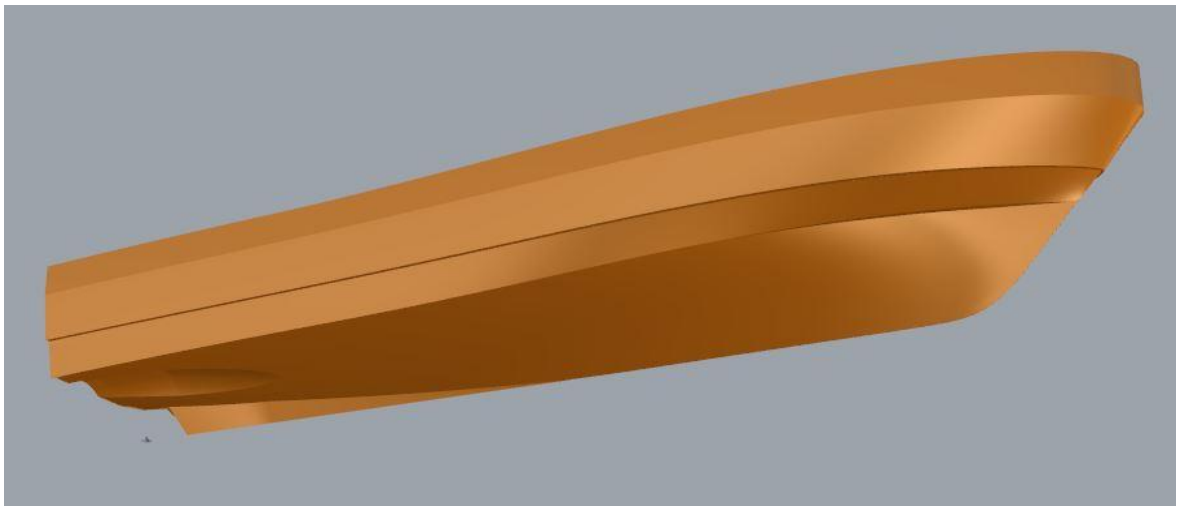
Şekil 3. 10 Balıkçı teknesi 2'ye ait kaldırma katsayısı-hücum açısı değişimi

Şekil 3.10'da görüldüğü gibi kaldırmanın katsayısının değeri kanatın hücum açısına göre değerlendirilmiş, en uygun değer belirlenerek denetim sistemi dizaynında kullanılmıştır.

3.5 HAD Analizi için Kullanılan Kayıcı Tekne

Bu tekneler hareketleri esnasında dinamik kaldırma kuvvetlerinin etkisiyle kayma haline geçtikleri için kayıcı tekneler olarak adlandırılır. Hidrodinamik açıdan değerlendirildiğinde iki farklı kaldırma kuvveti bu tekneleri etkiler. Bu kuvvetlerden ilki su altındaki kuvvet sebebiyle oluşan kaldırma kuvvetidir. Diğeri ise yüksek hızlarda kayma başlayınca oluşan dinamik kaldırma kuvvetidir. Tekne hızı arttığında oluşan dinamik kuvvetler kimi zaman teknenin sudan kesilmesini sağlar ve bu noktada güvenli seyir sağlama gerekliliği öne çıkmaktadır.

Bu çalışmada, Şekil 3.11'de gösterilen ve Çizelge 3.3'de özellikleri verilen kayıcı tekne için, daha önce ifade edilen akışkan denklemleri göz önüne alınarak akış analizi yapılmış, farklı hücum açıları için kaldırma katsayıları hesaplanmıştır.

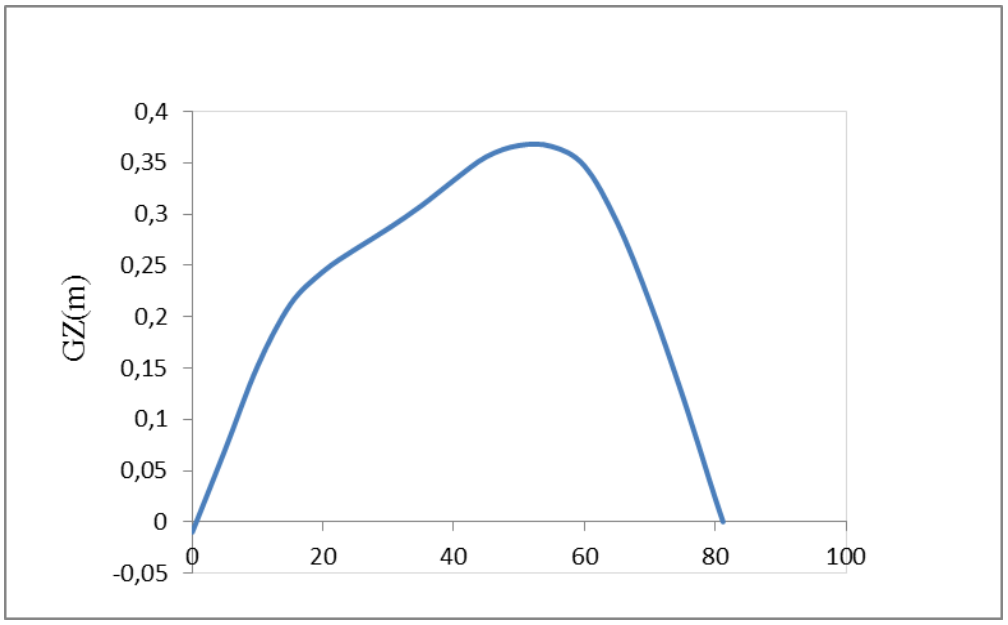


Şekil 3. 11 Kayıcı teknenin genel görünümü

Çizelge 3. 3 Kayıcı tekneye ait karakteristik değerler

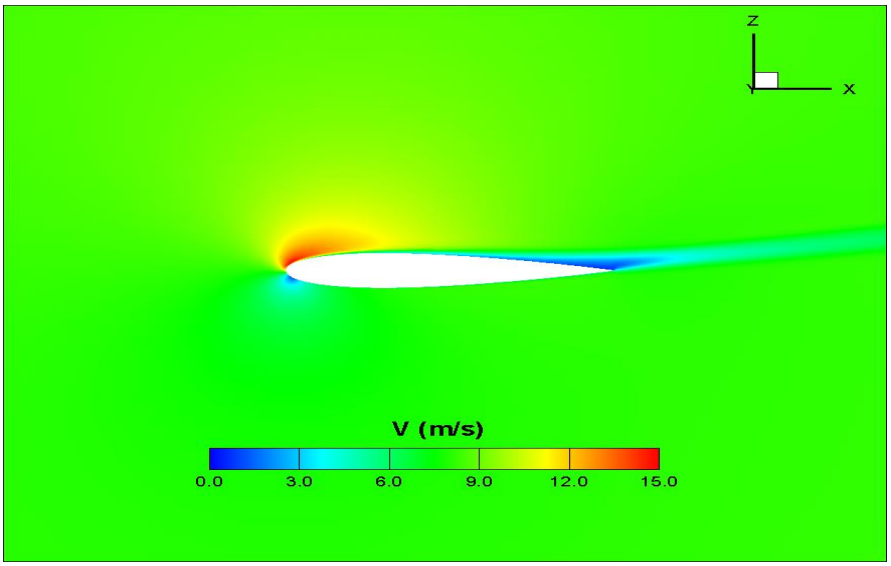
Başlıca Özellikler	Parametreler
L_{bp}	*16.95 m*
B	*4.94 m*
D	*2.78 m*
T	*1.229 m*
∇	*34.788 m^3*
GM	*0.921 m*
KG	*2.196 m*
C_B	*0.36*
V_{maks}	*16 kn*
V_{min}	*5 kn*
A_F	*2.08 m^2*
ϕ_v	*81.2^0*

Ayrıca geminin kararlılığı açısından kritik derecede öneme sahip $GZ-\phi_v$ eğrisi Şekil 3.12'de gösterilmiştir.

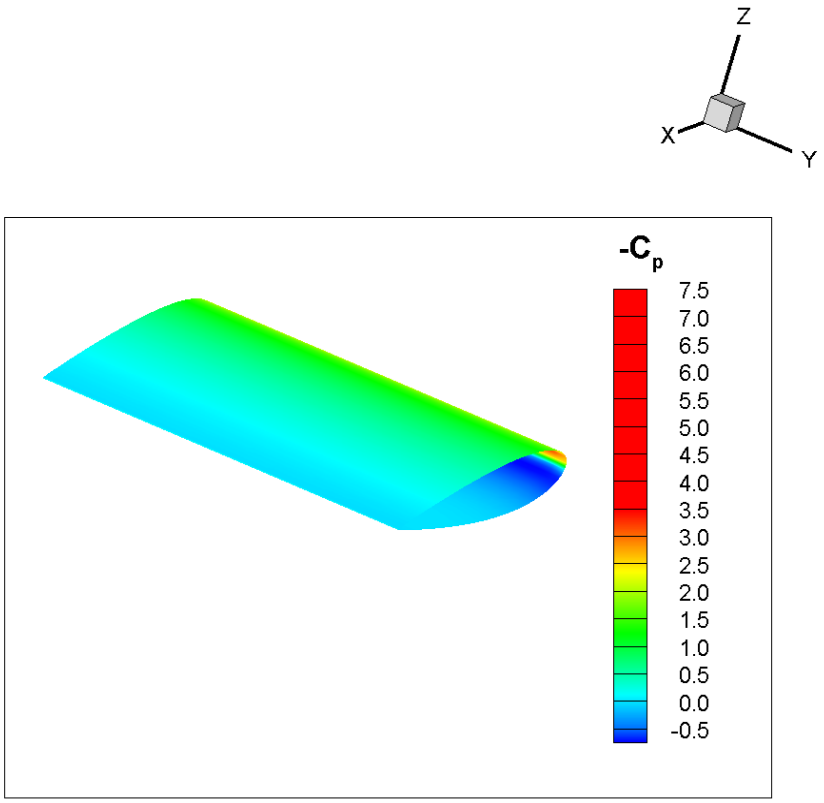


Şekil 3. 12 Kayıcı teknenin $GZ-\phi_v(°)$ eğrisi

Bu incelemede de önceki analizlerde olduğu gibi, yalpa dengeleyici kanat sistemine ait kaldırma katsayıları NACA 0015 kanat profili kullanılarak hesaplanmış buna ilaveten akışın düzenli, sıkıştırılamaz ve türbülanslı olduğu kabul edilmiştir. Analize ait hız ve basınç dağılımları Şekil 3.13 ve 3.14'de gösterilmiştir.

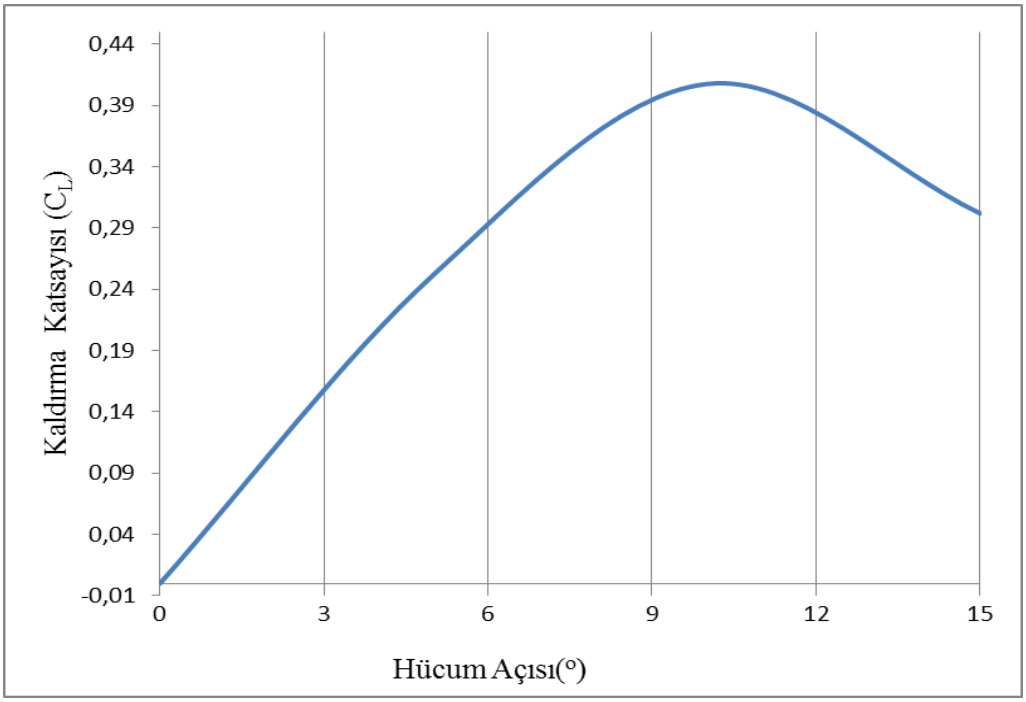


Şekil 3. 13 Kayıcı tekneye ait kanat etrafındaki hız dağılımı



Şekil 3. 14 Kayıcı tekneye ait kanat üzerindeki boyutsuz basınç dağılımı

Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği Analizi yapılarak kaldırma katsayısı farklı hücum açılarında bulunmuş ve hücum açısı arasındaki ilişki Şekil 3.15'de sunulmuştur.



Şekil 3. 15 Kayıcı teknenin kaldırma katsayısı-hücum açısı değişimi

Yukarıda ifade edildiği üzere, uygulamalarda üç farklı gemi kullanılmıştır. Gemilerin farklı açılarda dinamik stabilite durumunu ifade eden $GZ-\phi_v$ eğrisi üç farklı gemi tipi için elde edilmiştir. Üç farklı gemi için yalpa genliklerinin azaltılması amacıyla kaldırma etkisi üreten NACA 0015 kanat profili kullanılılarak, kanat üzerinde gerçekleştirilen akış analizleri ile, farklı hücum açılarına karşılık gelen kaldırma katsayıları bulunmuştur. Bu analizler belli sınır şartlarında gerçekleştilmiş ve bu şartlar detaylı olarak ifade edilmiştir. Bu değerler neticesinde denetim problemleri için gerekli parametreler elde edilmiş ve tasarlanacak denetleyici türlerinin optimum sonuca ulaşmasını sağlayacak şekilde parametrelerin seçimi yapılmıştır.

BÖLÜM 4

GEMİ YALPA HAREKETİNİN DENGELENMESİNDE GERİ ADIMLAMALI DENETLEYİCİ TASARIMI

Son yıllarda kontrol ve otomasyon alanında yaşanan teknolojik gelişmeler sistem kararsızlığının giderilmesine yönelik çalışmalara olan ilgiyi artırmıştır. Her türlü deniz ve hava şartında güvenli bir seyir gerçekleştirmesi beklenen gemiler bozucu etkiler sebebiyle kararsızlık durumuna düşmekte ve bu durum kimi zaman devrilmelere neden olmaktadır. Bu noktada bir balıkçı teknesinin yalpa hareketini kararlı seviyelere getirme, güvenli bir avlanma ve seyir sağlayabilme amacıyla geri adımlamalı denetim teorisi yalpa dengeleyici kanat sistemine uygulanarak verimli sonuçlar alınmıştır.

4.1 Geri Adımlamalı Denetleyici Dizaynı

Denetleyici için verilen denklemi en genel haliyle aşağıdaki gibi ifade ederek, genel dizayn sırasıyla ifade edilmiştir [80].

$$\dot{x}_1 = f_1(x_1) + g_1(x_1)x_2 \tag{4.1}$$

$$\dot{x}_2 = f_2(x) + g_2(x)u \tag{4.2}$$

Bu durumda;

$$g_1(x_1) \neq 0 \qquad \forall\, x_1 \in \Re \tag{4.3}$$

$$g_2(x) \neq 0 \qquad \forall\, x \in \Re^2 \tag{4.4}$$

koşulları sağlanarak sistemin çıkış denklemi $y = x_1$ şeklinde ifade edilerek bu durum için referans değerleri $\dot{y}_d(t), \ddot{y}_d(t)$ sürekli olduğu kabulü yapılarak hata değişkenleri aşağıdaki gibi belirtilmiştir.

$$z_1 = x_1 - y_d \tag{4.5}$$

$$z_2 = x_2 - \alpha_1(x_1, y_d) \tag{4.6}$$

Elbette hata değişkenleri sıfır olursa denetleyici amacına ulaşır. Bunu gerçekleştirebilmek için birinci hata denkleminin türevi alındığında,

$$\dot{z}_1 = \dot{x}_1 - \dot{y}_d \tag{4.7}$$

$$\dot{z}_1 = f_1(x_1) + g_1(x_1)x_2 - \dot{y}_d \tag{4.8}$$

bulunur. Burada x_2 yerine (4.6) 'dan çekilen ifade konulduğunda,

$$\dot{z}_1 = \dot{x}_1 - \dot{y}_d = f_1(x_1) + g_1(x_1)[z_2 + \alpha_1(z_1)] - \dot{y}_d \tag{4.9}$$

elde edilir. Geri adımlamalı denetleyici tasarımında, Lyapunov denklemine dayalı olarak kararlılık durumu belirlenmektedir. Lyapunov fonksiyonu, durum değişkenlerinin zaman sonsuza giderken sıfıra gitmesini sağlayacak bir yapı olmalıdır. Lyapunov fonksiyonunu aşağıdaki gibi ifade edilmektedir.

$$V_1 = \frac{1}{2} z_1^2 \tag{4.10}$$

Bu denklemin türevi alındığında,

$$\dot{V}_1 = z_1 \dot{z}_1 \tag{4.11}$$

$$\dot{V}_1 = z_1[f_1(x_1) + g_1(x_1)[z_2 + \alpha_1(z_1)] - \dot{y}_d] \tag{4.12}$$

$$\dot{V}_1 = z_1[f_1(z_1 + y_d) + g_1(z_1 + y_d)\alpha_1(z_1) - \dot{y}_d] + g_1(z_1 + y_d)z_1 z_2 \tag{4.13}$$

elde edilir. Kararlılık durumunun sağlanabilmesi için bu fonksiyonun zamana bağlı türevinin sıfırdan küçük olması gerekir. Bu bağlamda (4.13)'deki denklemde aşağıdaki eşitlik önerilebilir.

$$-p_1 z_1 = f_1(z_1 + y_d) + g_1(z_1 + y_d)\alpha_1(z_1) - \dot{y}_d \tag{4.14}$$

Bu eşitlikten $\alpha_1(z_1)$ ifadesi çekildiğinde,

$$\alpha_1(z_1) = \frac{1}{g_1(z_1 + y_d)}[-f_1(z_1 + y_d) - p_1 z_1 + \dot{y}_d] \tag{4.15}$$

$\alpha_1(z_1)$ sanal kontrol olarak ifade edilir ve (4.14) yerine konularak Lyapunov denklemi aşağıdaki gibi gösterilir;

$$\dot{V}_1 = p_1 z_1^{\,2} + g_1(z_1 + y_d) z_1 z_2 \tag{4.16}$$

Bu noktada kararlılık ifadesi,

$z_2 \equiv 0 \Rightarrow \dot{V}_1 < 0$ olursa gerçekleşebilir ancak (4.16) denkleminin pozitif terim içermesi sebebiyle bu olanaksızdır. Dolayısıyla bir sonraki adım olarak z_2'yi sıfır yapacak Lyapunov denklemini ifade etmek gerekir. Bu nedenle ikinci hata denkleminin türevi alındığında,

$$\dot{z}_2 = \dot{x}_2 - \dot{\alpha}_1 \tag{4.17}$$

sanal control α_1; z_1, y_d ve $\dot{y}_d$'nin bir fonksiyonu olduğundan türevi aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$\dot{\alpha} = \frac{\partial \alpha}{\partial z_1}\frac{dz_1}{dt} + \frac{\partial \alpha}{\partial y_d}\frac{dy_d}{dt} + \frac{\partial \alpha}{\partial \dot{y}_d}\frac{d\dot{y}_d}{dt} \tag{4.18}$$

$$\dot{\alpha} = \frac{\partial \alpha}{\partial z_1}\dot{z}_1 + \frac{\partial \alpha}{\partial y_d}\dot{y}_d + \frac{\partial \alpha}{\partial \dot{y}_d}\ddot{y}_d \tag{4.19}$$

(4.19) denklemindeki $\dot{z}_1$ ifadesi (4.16) denkleminin son halinden,

$$\dot{V}_1 = p_1 z_1^{\,2} + g_1(z_1 + y_d) z_1 z_2 \tag{4.20}$$

$$\dot{V}_1 = z_1(-p_1 z_1 + g_1(x_1) z_2) \tag{4.21}$$

$$\dot{z}_1 = (-p_1 z_1 + g_1(x_1) z_2) \tag{4.22}$$

olarak elde edilir. Burada (4.19) ve (4.22) denklemleri (4.17)'de yerine konulursa,

$$\dot{z}_2 = f_2(x) + g_2(x)u - \frac{\partial \alpha}{\partial z_1}[-p_1 z_1 + g_1(x_1)z_2] - \frac{\partial \alpha}{\partial y_d}\dot{y}_d - \frac{\partial \alpha}{\partial \dot{y}_d}\ddot{y}_d \tag{4.23}$$

denklem bu şekilde olur. İkinci hata değişkenini içeren Lyapunov fonksiyonu aşağıdaki gibi tanımlanabilir.

$$V(z) = V_1(z_1) + \frac{1}{2}z_2^2 \tag{4.24}$$

Lyapunov denkleminin türevi alınıp, gerekli işlemler yapıldığında,

$$\dot{V}(z) = \dot{V}_1(z_1) + z_2\dot{z}_2 \tag{4.25}$$

$$\dot{V}(z) = -p_1 {z_1}^2 + g_1(x_1)z_2 z_1) + [z_2 f_2(x) + g_2(x)u - \frac{\partial \alpha}{\partial z_1}[-p_1 z_1 + g_1(x_1)z_2] - \frac{\partial \alpha}{\partial y_d}\dot{y}_d - \frac{\partial \alpha}{\partial \dot{y}_d}\ddot{y}_d] \tag{4.26}$$

$$\dot{V}(z) = -p_1 {z_1}^2 + z_2[g_1(x_1)z_1) + [f_2(x) + g_2(x)u - \frac{\partial \alpha}{\partial z_1}[-p_1 z_1 + g_1(x_1)z_2] - \frac{\partial \alpha}{\partial y_d}\dot{y}_d - \frac{\partial \alpha}{\partial \dot{y}_d}\ddot{y}_d] \tag{4.27}$$

denklemi elde edilir. Burada ikinci hata değişkenini negatif yapacak şekilde aşağıdaki eşitlik yazılabilir.

$$-p_2 z_2 = z_1 g_1(x_1) + f_2(x) + g_2(x)u - \frac{\partial \alpha}{\partial z_1}[-p_1 z_1 + g_1(x_1)z_2] - \frac{\partial \alpha}{\partial y_d}\dot{y}_d - \frac{\partial \alpha}{\partial \dot{y}_d}\ddot{y}_d \tag{4.28}$$

Buradan da *u* çekilirse,

$$u = \frac{1}{g_2(x)}[-p_2 z_2 = z_1 g_1(x_1) - f_2(x) + \frac{\partial \alpha}{\partial z_1}[-p_1 z_1 + g_1(x_1)z_2] + \frac{\partial \alpha}{\partial y_d}\dot{y}_d + \frac{\partial \alpha}{\partial \dot{y}_d}\ddot{y}_d] \tag{4.29}$$

elde edilir ve bu durumda Lyapunov fonksiyonu $\dot{V}(z) = -p_1 {z_1}^2 - p_2 {z_2}^2$ olarak elde edilir ve $p_1, p_2 > 0$ belirlenen denetim parametreleridir.

4.2 Geri Adımlamalı Denetleyici Tasarımı Uygulaması

Geri adımlamalı denetim teorisi bir balıkçı teknesinin doğrusal olmayan yalpa hareketini dengeleyici kanat sistemiyle minimize etmek için kullanılmıştır. İncelenen yalpa denklemi doğrusal ve doğrusal olmayan sönüm ve doğrultma momenti

katsayılarını içermektedir. Bu katsayılara ilaveten kaldırma katsayılarının tespiti için akış analizi yapılmıştır. Gerçeğe yakın sonuçlar alabilmek için akış analizi teknenin her iki tarafına yerleştirilen yalpa dengeleyici kanat sistemi ile beraber bir balıkçı teknesi türü olan trol teknesinin 1/8 ölçekli modeli üzerinden yapılmış ve dengeleyici kanat sistemin geometrisi NACA 0015 kanat kesiti olarak seçilmiştir. Akış analizi sonlu hacimler metodu kullanarak Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği yazılımı kullanarak yapılmıştır. Akış problemi 3-boyutlu bir şekilde modellenmiş ve akışın türbülanslı, sıkıştırılamaz, düzenli olduğu kabulü yapılmıştır. Nümerik modelde tekne-kanat etkileşimi değerlendirilmiştir. Yalpa dengeleyici kanat sisteminin boyutsuz kaldırma katsayıları farklı hücum açıları için elde edilmiş, geri adımlamalı denetleyici uygulanan durumda hareketin genliğinin değişimi, maksimum kaldırma katsayısı için zaman düzleminde ifade edilmiştir.

4.3 Balıkçı Teknesi 1 için Geri Adımlamalı Denetleyici Tasarımı

Bir balıkçı teknesi türü olan trol teknesi için dış kuvvetlerin oluşturduğu zorlamalara karşı tekrar dengeli pozisyonu alabiliyorsa pozitif stabiliteye sahiptir ve kararlıdır denilebilmektedir. Bu noktada Lyapunov fonksiyonu (V_x) devreye girmektedir ve aşağıdaki gibi ifade edilir.

$V_x > 0$ pozitif tanımlıdır. (4.30)

$$\frac{dV(\vec{x})}{dt} \leq 0 \tag{4.31}$$

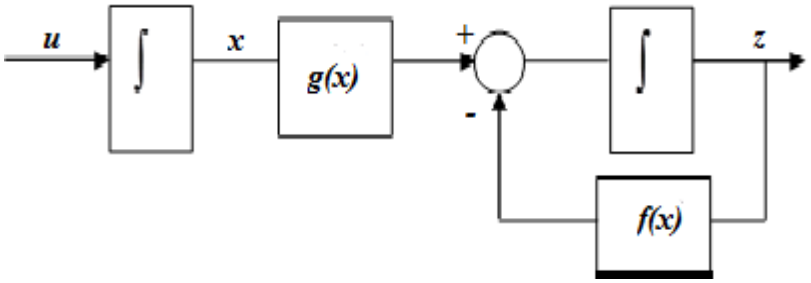
$V(x) \to \infty$ ve $\|x\| \to \infty$ şeklinde ifade edilir. (4.32)

Bu değer sıfırdan küçük ise, doğrusal olmayan yalpa hareketi kararlıdır denilmektedir. Lyapunov fonksiyonu doğrusal olmayan yalpa sönüm katsayılarına bağlı olarak aşağıdaki şekilde elde edilir.

$$\dot{V}(x) = -\phi_2^2 (b_1 + b_2 |\phi_2| + b_3 \phi_2^2) < 0 \tag{4.33}$$

$$V(x) = \omega_0^2 \frac{\phi_1^2}{2} + m_3 \frac{\phi_1^4}{4} + m_5 \frac{\phi_1^6}{6} + \frac{\phi_2^2}{2} \tag{4.34}$$

Geri Adımlamalı denetim metodu, yalpa hareketinin genliklerinin kararlı bölgelerde kalmasını sağlamak için Lyapunov fonksiyonunu kurarak sistematik bir yapı ifade etmektedir. Yalpa denklemini denetleyici için uygun hale getirmeden önce geri adımlamalı denetim metodunun temel yapısı aşağıdaki Şekil 4.1'de ifade edilmiştir.



Şekil 4. 1 Genel geri adımlamalı denetleyici dizaynı [81]

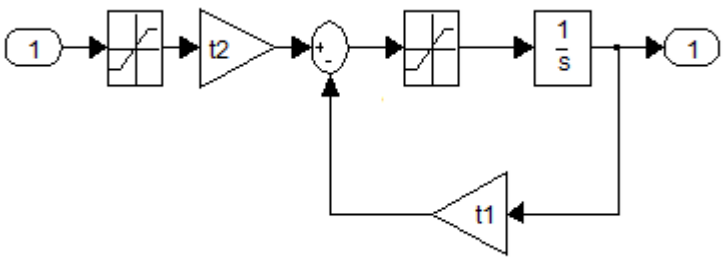
2.27 nolu denklemde ifade ettiğimiz durum değişkenleri kullanılarak, teknenin yalpa hareketi için matematik modeli aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$\ddot{\phi}+b_1\dot{\phi}+b_2\dot{\phi}|\dot{\phi}|+b_3\dot{\phi}^3+\Delta(m_1\phi+m_3\phi^3+m_5\phi^5+m_7\phi^7)=W-fs_1\alpha_F-fs_2\dot{\phi} \quad (4.35)$$

Yalpa dengeleyici sistemin dinamikleri ise aşağıdaki eşitlikte ifade ettiğimiz gibi kabul edilmiştir.

$$\dot{\alpha}_F+t_1\alpha_F=t_2u_F \quad (4.36)$$

α_F aktüatörün çıkışı (gerçek fin açısı), u ise elektro-hidrolik sistemin girişidir. Aşağıdaki şemada aralarındaki ilişki ifade edilmiştir.



Şekil 4. 2 Aktüatörün giriş-çıkış değerlerinin ilişkisi

$\dot{\phi}=x_1$, $\alpha_F=x_2$ kabulü yaptıktan sonra yalpa dengeleyici kanat sisteminin ve doğrusal olmayan yalpa denkleminin durum-uzay modeli aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$\dot{x}_1 = -(b_1 + fs_2)x_1 - b_2 x_1|x_1| - b_3 x_1^3 - \omega_0^2 \int x_1\,dt - m_3 \int x_1^3\,dt - m_5 \int x_1^5\,dt - m_7 \int x_1^7\,dt + W - fs_1 x_2 \tag{4.37}$$

$$\dot{x}_2 = -t_1 x_2 + t_2 u_F \tag{4.38}$$

Geri Adımlamalı denetim metodu kullanılarak dizayn edilen sistem için iki ana basamak aşağıdaki gibi ifade edilmiştir.

1.Basamak: Denetim hatası z_1 aşağıdaki gibi ifade edilmiştir.

$$z_1 = y - y_r = x_1 - y_r \tag{4.39}$$

$$z_2 = x_2 - \alpha(z_1, y_r) \tag{4.40}$$

Yeni durum değişkeni z_2 ilk basamakda kullanılmamıştır. z_1 'in türevi aşağıdaki ifade edilmektedir.

$$\dot{z}_1 = \left[-(b_1 + fs_2)(z_1 + y_r) - b_2|z_1 + y_r|(z_1 + y_r) - b_3(z_1 + y_r)^3\right] \left[-\omega_0^2 \int (z_1 + y_r)dt - m_3 \int (z_1 + y_r)^3 dt - m_5 \int (z_1 + y_r)^5 dt - m_7 \int (z_1 + y_r)^7 dt - fs_1\left[z_2 + \alpha(z_1, y_r)\right] - \dot{y}_r\right] \tag{4.41}$$

Geri Adımlamalı denetim prosedürüne göre birinci Lyapunov fonksiyonu ve onun türevi aşağıdaki gibidir.

$$V_1(z_1) = \frac{1}{2} z_1^2 \tag{4.42}$$

$$\dot{V}_1(z_1) = z_1 \dot{z}_1 \tag{4.43}$$

$$\dot{V}_1(z_1) = -n_1 z_1^2 + fs_1 z_1 z_2 \tag{4.44}$$

Burada n_1 pozitif dizayn parametresidir. $\dot{V}_1$ üzerindeki z_2 'nin istenmeyen etkisi bir sonraki basamakta ele alınmıştır.

2.Basamak: Bu basamakta z_2 , x_2 ve $\alpha(z_1, y_r)$'ya bağlı olarak aşağıdaki gibi sunulmuştur.

$$z_2 = x_2 - \alpha(z_1, y_r) \tag{4.45}$$

z_2 'nin türevi aşağıdaki gibidir.

$$\dot{z}_2 = \dot{x}_2 - \dot{\alpha}(z_1, y_r) \tag{4.46}$$

Genişletilmiş Lyapunov fonksiyonu aşağıdaki gibidir.

$$V_2 = V_1 + \frac{1}{2} z_2^2 \tag{4.47}$$

V_2'nin türevi aşağıdaki gibidir.

$$\dot{V}_2 = \dot{V}_1 + z_2 \dot{z}_2 \tag{4.48}$$

$$\dot{V}_2 = -n_1 z_1^2 - n_2 z_2^2 \leq 0 \tag{4.49}$$

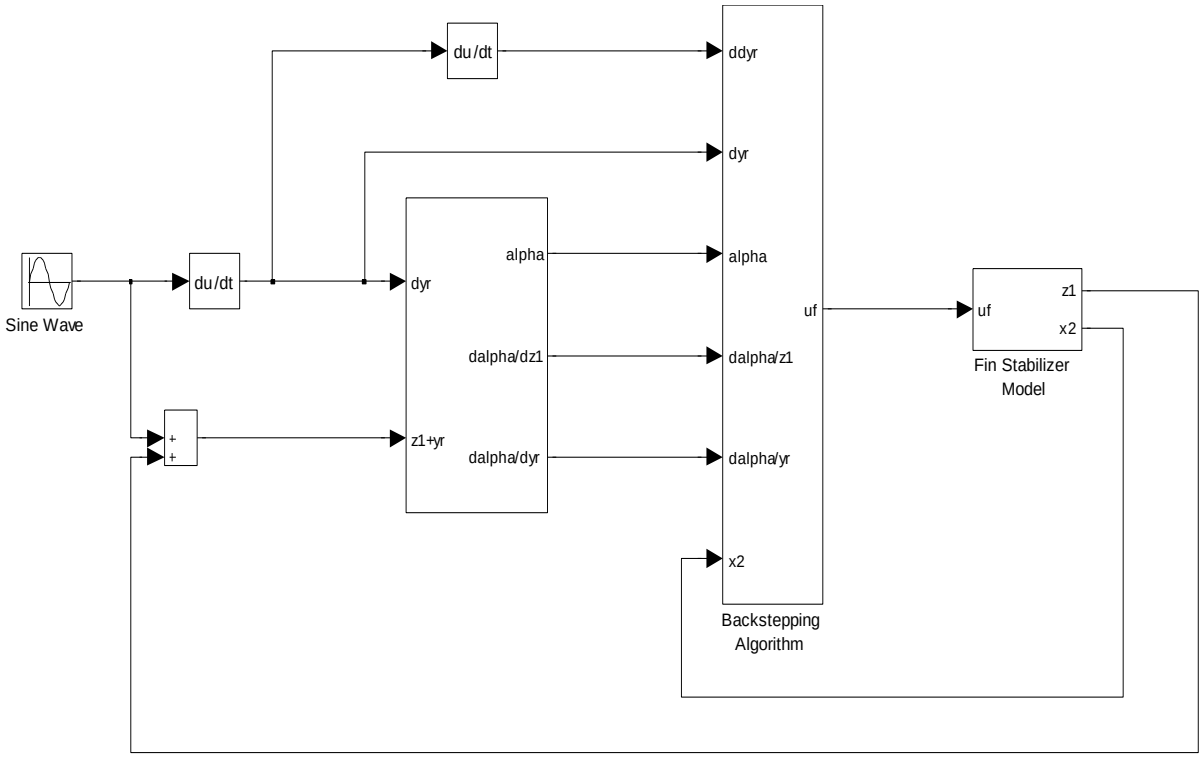
$\dot{V}_1 \leq 0$ olacağından z_1 ve z_2 sınırlandırılmıştır. Bu durum $t \to \infty$ giderken z_1 ve z_2 'nin sıfıra yaklaştığını sağlamaktadır. Geri Adımlamalı denetleyici yalpa hareketinin asimptotik stabilitesini garanti etmektedir. Denetim kuramını uyguladığımızda α aşağıdaki gibi yazılır.

$$\begin{aligned} \alpha(z_1, y_r) = & -\frac{1}{fs_1}\left[n_1 z_1 - (b_1 + fs_2)(z_1 + y_r) - b_2 |z_1 + y_r|(z_1 + y_r) - b_3 (z_1 + y_r)^3 \right] \\ & \left[-\omega_0^2 \int (z_1 + y_r) dt - m_3 \int (z_1 + y_r)^3 dt - m_5 \int (z_1 + y_r)^5 dt - m_7 \int (z_1 + y_r)^7 dt - \dot{y}_r \right] \end{aligned} \tag{4.50}$$

Denetim eylemi aşağıdaki gibi seçilmiştir.

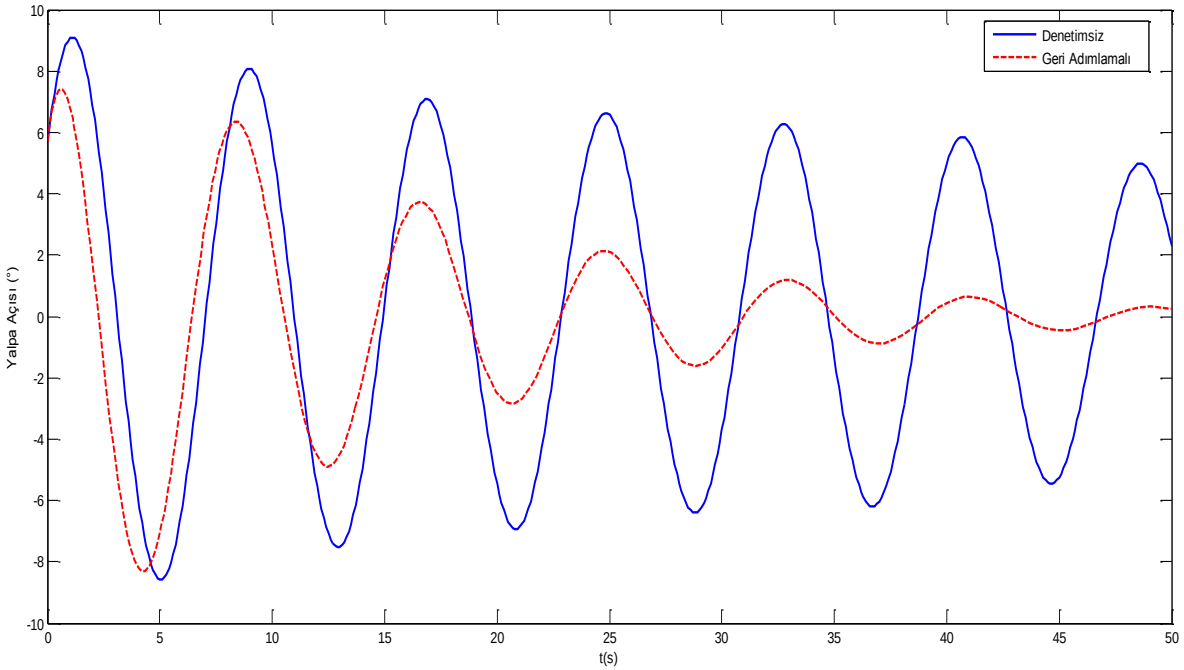
$$u_F = \frac{1}{t_2}\left[-n_2 z_2 + fs_1 z_1 + t_1 x_2 + \frac{\partial \alpha}{\partial z_1}(-n_1 z_1 - fs_1 z_2) + \frac{\partial \alpha}{\partial yr}\dot{y}_r + \frac{\partial \alpha}{\partial \dot{y}r}\ddot{y}_r \right] \tag{4.51}$$

Yalpa dengeleyeci kanat sistemi üzerinde Geri Adımlamalı Denetleyici yapısının gösterildiği blok diagramı aşağıdaki Şekil 4.3'de gösterilmiştir.

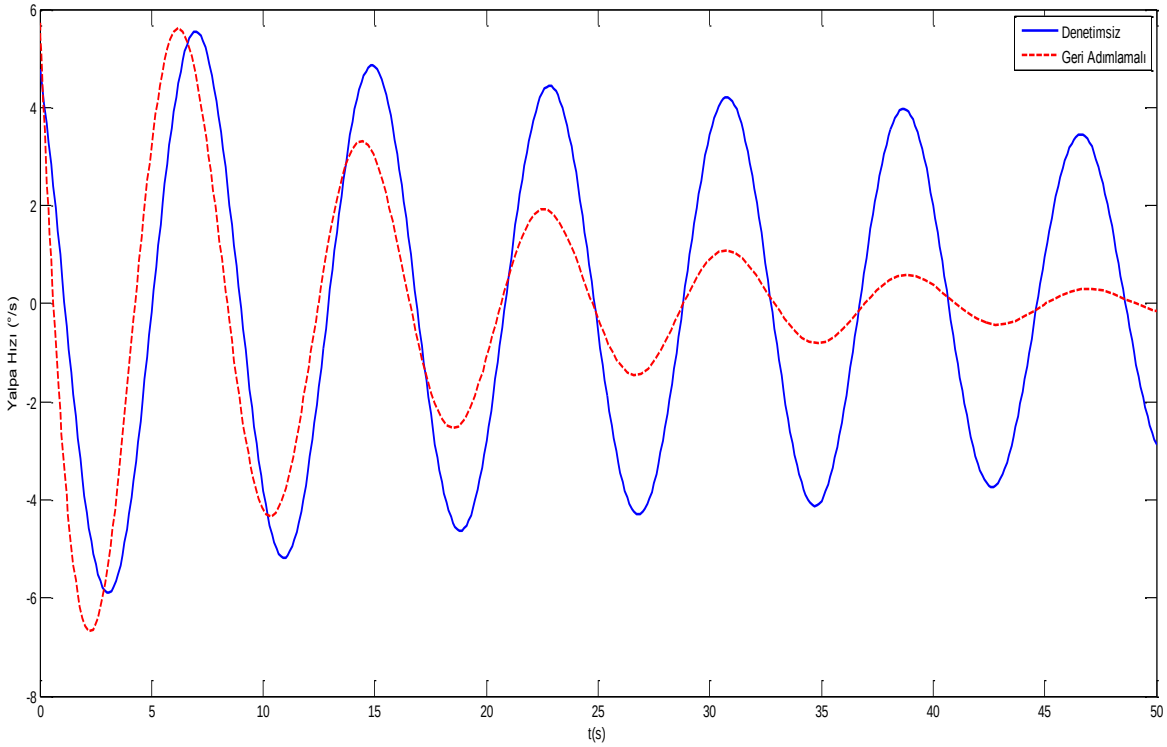


Şekil 4. 3 Modele ait Blok Diagramı

Teknenin her iki tarafına yerleştirilen yalpa dengeleyici kanat sistem, Geri adımlamalı denetim algoritması sayesinde 25 saniye gibi kısa bir sürede yalpa hareketinin genliğini 9° den 2° ye, açısal hızını ise yaklaşık 6°/s den 2°/s'ye düşürerek hızlı ve verimli bir şekilde azaltmıştır bu durum Şekil 4.4 ve Şekil 4.5 ile ifade edilmiştir.

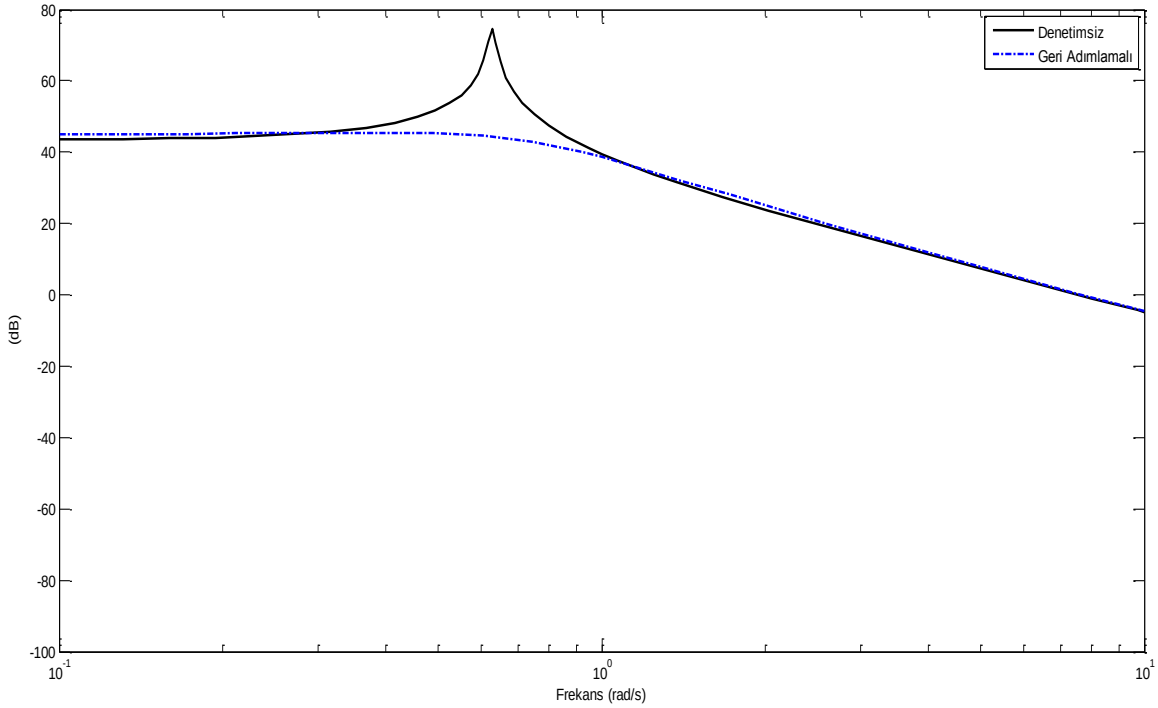


Şekil 4. 4 Denetimli ve denetimsiz durumda yalpa genliği



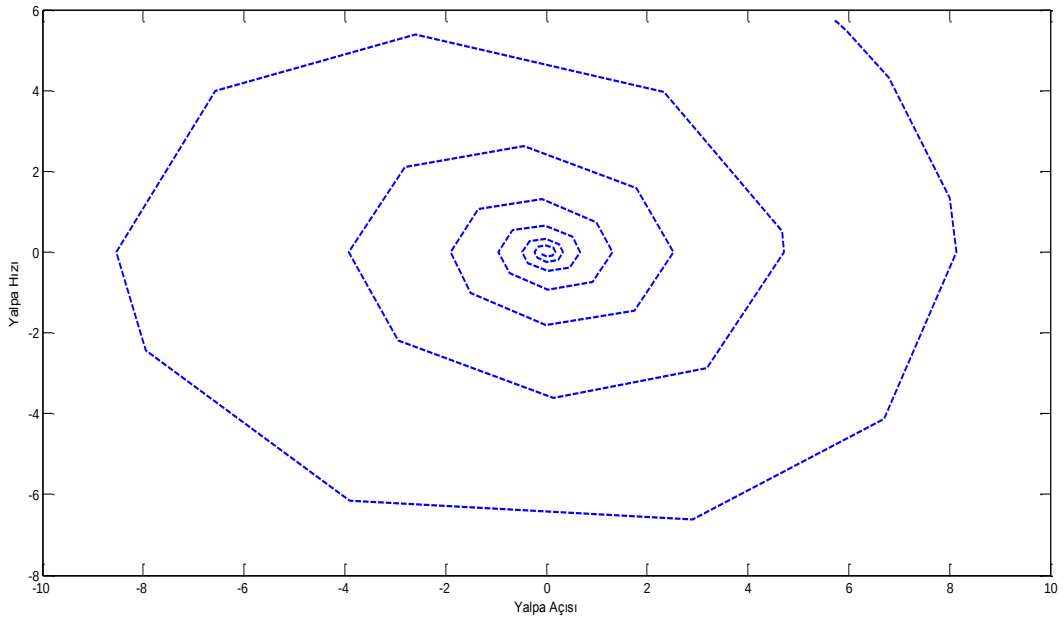
Şekil 4. 5 Denetimli ve denetimsiz durumda yalpa açısal hızı

Şekil 4.6 ile ifade edilen frekans cevabı grafiği değerlendirildiğinde, doğal frekansa karşılık gelen yaklaşık 75 (dB) olan frekans tepesi değeri, denetleyici sayesinde 45 (dB) seviyelerine indirilmiştir.



Şekil 4. 6 Denetimli ve denetimsiz durum için frekans cevabı

Balıkçı teknesinin yalpa hareketine ait genlik ve hız grafiği bir arada çizdirildiğinde, modelin kararlılığı ile ilgili net sonuç alınabilmektedir. Bu amaçla Şekil 4.7'de ifade edilen grafikte, balıkçı teknesinin yalpa hareketinin genlik ve hız diyagramı belirli bir zarf eğrisini takip ederek sıfıra yaklaşmaktadır bu durum da doğrusal olmayan modelin kararlılığını kanıtlamaktadır.



Şekil 4. 7 Doğrusal olmayan modelin faz diagramı

Yalpa sönüm oranı R_s ile, dengeleyici kanat etkin değilken oluşan yalpa değeri M_{kp} ile, dengeleyici kanat etkin iken oluşan yalpa değeri M_{ka} ile aşağıdaki gibi ifade edildiğinde[88],

$$R_s = \frac{M_{kp} - M_{ka}}{M_{kp}}$$

balıkçı teknesi için dengeleyici kanat etkin iken, Geri Adımlamalı denetleyicinin yalpa genliği ve açısal hız grafikleri değerlendirildiğinde 25 saniye gibi kısa bir sürede başarılı bir sönüm gerçekleştirdiği görülmektedir Özellikle frekans tepesindeki %40 azalma denetleyicinin başarısını garanti etmektedir. Yalpa hareketi üzerinde denetleyicinin verimliliğini ifade etmek için, hareketin kararlılığının da ifade edilmesi gereklidir. Bu bağlamda yalpa hareketinin faz diyagramı doğrusal olmayan modelin kararlı bir yapıya sahip olduğunu, sıfır noktasına doğru dengeli bir şekilde oluşan grafiklerle ifade etmektedir. Ancak tasarlanan bu denetleyici, seyir esnasında değişen parametrelere duyarlı bir tasarım olmadığı için, temel dizayn prensiplerinin uygulanmasıyla elde edilen parametrelere bağlı olarak, sönüm ve doğrultucu moment terimlerinin farklı derecelerde kullanıldığı, yalpa hareketi modelleri ile birçok gemi türü için önerilmektedir.

BÖLÜM 5

DOĞRUSAL MATRİS EŞİTSİZLİKLERİ VE TEMEL KAVRAMLAR

Bu bölümde denetleyici tasarımı için kullanılan dışbükey en iyileştirme kavramıyla bütünleşen doğrusal matris eşitsizliklerinden bahsedilmiş ve bu yaklaşımla durum geri beslemeli H_∞ ve H_2 denetleyici ile bir geminin yalpa hareketinin optimum seviyeye getirilmesi amaçlanmıştır.

Sistemimizin Doğrusal Matris Eşitsizlikleri ile analizini yaparken bozucuların etkisini azaltmak için G.H.Hardy'nin H uzayları teorisinden faydalanılmıştır. Doğrusal matris eşitsizlikleri ilk kullanım alanı (1890) Alexandır Mikhailovich Lyapunov'un kararlılık analizi olarak bilinmektedir [82]. Daha sonra konuyla ilgili çalışmalar devam etmiş H_∞ en iyileştirme denetimi, H_2 en iyileştirme denetimi gibi denetim problemlerinin doğrusal matris eşitsizlikleri ile çözülebileceği ifade edilmiştir. Bu bağlamda yapılan bu çalışmada bozucunun etkisini azaltabilmek için performans ölçütü olarak sistemin H_∞ ve H_2 normlarının minimizasyonu temelli konveks optimizasyon yaklaşımı kullanılmıştır. Bu noktada norm kavramlarından da kısaca bahsederek sistem dizayn edilip simülasyonlar ifade edilmiştir.

5.1 H_∞ ve H_2 Normları

Matematiksel olarak çok bileşenli kavramları ölçülendirirken norm kavramından faydalanılır. H_∞ doğrusal vektör uzayı (5.1) ile ifade edilen norma göre oluşturulan L_∞ Banach uzayının kapalı bir alt uzayıdır. Dolayısıyla H_∞ normuda bu uzayda tanımlıdır,

$G(s) \in H_\infty$ ise H_∞ normu;

$$\|G(s)\|_\infty = \sup_{\mathrm{Re}(s)>0} \sigma_{\max}(G(s)) = \sup_{w \in \Re} \sigma_{\max}(G(jw)) \tag{5.1}$$

şeklinde belirtilebilir. Eğer $G(s)$ tek girişli tek çıkışlı bir sistemin transfer fonksiyonunu ifade ediyorsa bu durumda H_∞ normu $\|G(s)\|_\infty = \sup_{w \in \Re} |G(jw)|$ olarak ifade edilebilir.

Doğrusal zamanla değişmeyen bir sistem için, sistem girişi $w(t)$, sistem çıkışı $z(t)$ olarak tanımlanırsa bunlara ait enerji ifadeleri aşağıdaki gibidir.

$$\|w\|_2^2 = \int_{-\infty}^{+\infty} w^T(t) w(t) dt \tag{5.2}$$

$$\|z\|_2^2 = \int_{-\infty}^{+\infty} z^T(t) z(t) dt \tag{5.3}$$

Bu durumda $G(s)$'in H_∞ normu,

$$\|G\|_\infty = \sup_{w \neq 0} \frac{\|z\|_2}{\|w\|_2} \tag{5.4}$$

şeklinde yazılır. Sonuç itibariyle bakıldığında H_∞ normunun sistemin en kötü performansını belirlediği anlaşılabilmektedir.

Bir sistemin H_2 normu ise aşağıdaki şekilde tanımlanabilir.

$$\|G(s)\|_2 = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} trace(G(jw)^* (G(jw) dw} \tag{5.5}$$

Sistemin H_2 normunun ise impuls cevabı açısından gerekli olan toplam çıkış enerjisini gösterdiği belirtilmektedir.

5.2 DME Tabanlı Durum Geri-Beslemeli H_∞ ve H_2 Denetleyici Tasarımı

Yalpa hareketini minimize ederken kullandığımız denetleyiciler farklı özellikleriyle karşımıza çıkmaktadırlar. H_∞ denetleyicinin sistemin en kötü durumunu belirleyerek, özellikle frekans alanında performansının yüksek olduğu, H_2 denetleyicinin ise geçici rejim cevaplarında etkili sonuçlar verdiği ifade edilebilir. Bu çalışmada istenen frekansı ve geçici rejim cevabını elde etmek amacıyla DME tabanlı H_∞ ve H_2 denetleyici, yalpa hareketini dengeleme problemi için uygulanmıştır.

Bu denetleyicilerle ilgili literatürde birçok çalışma bulunmaktadır. Doyle vd [83], H_∞ kontrol problemi için basit bir durum-uzay formülü çıkarmıştır. Francis [84], H_∞ kontrol probleminin matematiğini incelemiştir. Güçlü ve Yazıcı [85], ise deprem etkisi altındaki yapısal titreşimler için DME tabanlı karma durum geri beslemeli H_∞/H_2 denetleyici tasarımı gerçekleştirmişlerdir.

Problemimizi durum uzay formunda aşağıdaki gibi ifade edebiliriz.

$$\begin{aligned}\dot{x}(t) &= Ax(t) + B_1 w(t) + B_2 u(t)\\ z_1(t) &= C_1 x(t) + D_{11} w(t) + D_{12} u(t)\\ z_2(t) &= C_2 x(t) + D_{21} w(t) + D_{22} u(t)\end{aligned} \tag{5.6}$$

Burada $x(t) \in \Re^n$ durum vektörünü, $u(t) \in \Re^{m_u}$ denetim giriş vektörünü, $w(t) \in \Re^{m_w}$ bozucu giriş vektörünü, $z_1(t), z_2(t) \in \Re^p$ denetim çıkış vektörlerini ifade etmektedir. $A, B_1, B_2, C_1, C_2, D_{11}, D_{12}, D_{21}$ ve D_{22} matrisleri ile sistemin bilinen uygun boyutlu durum-uzay matrisleri belirtilmektedir. Kontrol girişi $u(t)=Kx(t)$ şeklinde tanımladıktan sonra kapalı-çevrim sistemi aşağıdaki gibi elde edilir.

$$\begin{aligned}\dot{x}(t) &= (A + B_2 K)x(t) + B_1 w(t)\\ z_1(t) &= (C_1 + D_{12} K)x(t) + D_{11} w(t)\\ z_2(t) &= (C_2 + D_{22} K)x(t) + D_{21} w(t)\end{aligned} \tag{5.7}$$

$T_{z_1 w}$ ve $T_{z_2 w}$ ifadelerini kapalı-çevrim transfer fonksiyonları olarak ifade ederek sistemin H_∞ normunu $\left\| T_{z_1 w} \right\|_\infty < \gamma$ şeklinde sınırlayıp, minimize edecek durum geri beslemeli denetim kuramını DME'ler ile türetmek amaçlanmıştır.

$V(x(t)) = x^T(t)Px(t)$ $P = P^T > 0$, $\gamma > 0$, şartıyla, başlangıç koşulları sıfır kabul edilerek, sistemin kararlılık ve performans kısıtları [85],

$$\dot{V}(x(t)) + z_1^T(t)z_1(t) - \gamma^2 w^T(t)w(t) < 0 \tag{5.8}$$

bağıntısından elde edilir, (5.7) ve (5.8) nolu ifadelerin birleştirilmesiyle,

$$\begin{aligned}&[(A + B_2K)x(t) + B_1w(t)]^T Px(t) + x(t)^T P[(A + B_2K)x(t) + B_1w(t)] + \\ &[(C_1 + D_{12}K)x(t) + D_{11}w(t)]^T[(C_1 + D_{12}K)x(t) + D_{11}w(t)] - \gamma^2 w(t)^T w(t) < 0\end{aligned} \tag{5.9}$$

5.9 nolu ifadenin düzenlenmesiyle aşağıdaki ifade elde edilir.

$$\begin{bmatrix} [(A + B_2K)]^T P + P(A + B_2K) + (C_1 + D_{12}K)^T(C_1 + D_{12}K) & PB_1(C_1 + D_{12}K)^T D_{11} \\ B_1^T P + D_{11}^T(C_1 + D_{12}K) & -\gamma^2 I + D_{11}^T D_{11} \end{bmatrix} < 0 \tag{5.10}$$

5.10 nolu ifade Schur tümleyeni kullanılarak son halini alır sağından ve solundan P^{-1} ile çarpıldığında gösterimi aşağıdadır.

$$\begin{aligned}&P^{-1}(A + B_2K)^T Px + (A + B_2K)P^{-1} + P^{-1}(C_1 + D_{12}K)^T(C_1 + D_{12}K)P^{-1} \\ &-(B_1 + P^{-1}(C_1 + D_{12}K)^T D_{11})(-\gamma^2 I + D_{11}^T D_{11})^{-1}(B_1^T + D_{11}^T(C_1 + D_{12}K)P^{-1}) < 0\end{aligned} \tag{5.11}$$

Daha sonra 5.11 no'lu ifade de $X_\infty = P^{-1}$ değişken dönüşümü yapılarak aşağıdaki DME'ler elde edilir.

$$\begin{bmatrix} ((A + B_2K)X_\infty + X_\infty(A + B_2K)^T X_\infty + X_\infty(C_1 + D_{12}K)^T(C_1 + D_{12}K)X_\infty) & B_1 + X_\infty(C_1 + D_{12}K)^T D_{11} \\ B_1^T + D_{11}^T(C_1 + D_{12}K)X_\infty & -\gamma^2 I + D_{11}^T D_{11} \end{bmatrix} < 0 \tag{5.12}$$

$$\begin{bmatrix} ((A + B_2K)X_\infty + X_\infty(A + B_2K)^T X_\infty & B_1 \\ B_1^T & -\gamma I \end{bmatrix} + \frac{1}{\gamma}\begin{bmatrix} X_\infty(C_1 + D_{12}K)^T \\ D_{11}^T \end{bmatrix}\begin{bmatrix} (C_1 + D_{12}K)X_\infty & D_{11} \end{bmatrix} < 0$$

(5.13)

Tekrardan Schur tümleyeni kullanarak $X_\infty > 0$ şartıyla DME şeklindeki H_∞ kısıtı aşağıdaki gibi elde edilir.

$$\begin{bmatrix} A + B_2K)X_\infty + X_\infty(A + B_2K)^T & B_1 & X_\infty(C_1 + D_{12}K)^T \\ B_1^T & -\gamma I & D_{11}^T \\ (C_1 + D_{12}K)X_\infty & D_{11} & -\gamma I \end{bmatrix} < 0 \tag{5.14}$$

Transfer fonksiyonunun H_2 normunun sonlu olması $D_{21} = 0$ şartıyla sağlanabilmektedir. Bu noktada H_2 performans problemi $X_2 = X_2^T$ and $Q = Q_2^T$ kabulü yapılarak,

$$(A + B_2K)X_2 + X_2(A + B_2K)^T + B_1B_1^T < 0 \tag{5.15}$$

$$\begin{bmatrix} Q & (C_2 + D_{22}K)X_2 \\ X_2(C_2 + D_{22}K)^T & X_2 \end{bmatrix} > 0 \tag{5.16}$$

$$iz(Q) < \eta \tag{5.17}$$

DME'leriyle çözülebilmektedir. DME'leri çözen X ve Q matrisleri iki farklı denetleyici için belirlenen kıstaslar doğrultusunda ayrı ayrı bulunduğunda kapalı çevrimin kazancı değişken dönüşümleri yapılarak aşağıdaki gibi elde edilir.

$$M = X_2K \qquad N = X_\infty K \tag{5.18}$$

Hesaplama ve benzetim çalışmalarında Matlab-Simulink kullanılmıştır. DME'lerin hesaplanmasında Yalmip ayrıştırıcı, Sedumi ise çözücü olarak kullanılmıştır. Yalmip, dışbükey ve içbükey optimizasyon problemlerini çözücünün anlayacağı dile dönüştüren, bilgisayar arayüzü ve çözücü arasında çalışan bir modelleme dili olarak ifade edilebilmektedir.

Yukarıda ifade edilen iki farklı denetleyici yapısı yalpa dengeleyici kanat sistemi vasıtasıyla bir balıkçı teknesinin yalpa hareketini minimize etmek için kullanılmıştır. Kullanılan matematik model aşağıdaki gibidir.

$$\begin{aligned}&(I_x + J_x)\,\ddot{\phi} + B_L\dot{\phi} + B_N\dot{\phi}|\dot{\phi}| + \Delta(G_1\phi + G_3\phi^3 + G_5\phi^5 + G_7\phi^7) = \\ &\omega_e^2\,\alpha_m\, I\cos(\omega_e t) + M_F\end{aligned} \tag{5.19}$$

Denklemimiz $(I_x + J_x)$ 'ye bölünerek aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$\begin{aligned}&\ddot{\phi} + b_l\dot{\phi} + b_n\dot{\phi}|\dot{\phi}| + \Delta(m_1\phi + m_3\phi^3 + m_5\phi^5 + m_7\phi^7) = \\ &\frac{\omega_e^2\,\alpha_m\, I\cos(\omega_e t)}{(I_x + J_x)} + \frac{M_F}{(I_x + J_x)}\end{aligned} \tag{5.20}$$

$$\begin{aligned}&\ddot{\phi} + b_l\dot{\phi} + b_n\dot{\phi}|\dot{\phi}| + \Delta(m_1\phi + m_3\phi^3 + m_5\phi^5 + m_7\phi^7) = \\ &\lambda_e\omega_e^2\,\alpha_m\cos(\omega_e t) - b_2\alpha_f - b_3\dot{\phi}\end{aligned} \tag{5.21}$$

Sönüm ve dengeleyici kanat sistemi ile ilgili katsayılar aşağıdaki şekilde bulunmuştur.

$$b_l = \frac{B_L}{(I_x + J_x)} \tag{5.22}$$

$$b_n = \frac{B_N}{(I_x + J_x)} \tag{5.23}$$

$$b_2 = \frac{\rho V^2 A_F C_L l_F}{(I_x + J_x)} \tag{5.24}$$

$$b_3 = \frac{\rho V A_F C_L l_F^{\,2}}{(I_x + J_x)} \tag{5.25}$$

Kapalı çevrim sistemimizin durum-uzay vektörleri ve matrisleri hareket denklemimizi doğrusallıştırdıktan sonra aşağıdaki gibi ifade edilmektedir.

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ m_1 & -b_l - b_3 & -b_2 \\ 0 & 0 & -\Upsilon_1 \end{bmatrix} \tag{5.26}$$

$$B_1 = \begin{bmatrix} 0 & \lambda_e \omega_e^2 \alpha_m & 0 \end{bmatrix}^T \tag{5.27}$$

$$B_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \Upsilon_2 \end{bmatrix}^T \tag{5.28}$$

$$C_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \tag{5.29}$$

$$D_{11} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T \tag{5.30}$$

$$D_{12} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^T \tag{5.31}$$

Yukarıda ifade edilen parametreler ve iki farklı denetleyici için kullanılan kısıtlamalar doğrultusunda kapalı çevrimin durum geri beslemeli kontrol matrisleri farklı *GM* durumları için hesaplanmış, bu matrisler yardımıyla denetimli ve denetimsiz durumlar için simülasyonlar yapılmış, zaman ve frekans düzleminde iki farklı denetleyici yapısı için karşılaştırmalar gerçekleştirilmiştir. Yalpa açısı, yalpa hızı, kanat açısı ve kontrol sinyali grafikleri farklı durumlar için çizdirilmiş ve değerlendirmeler yapılmıştır.

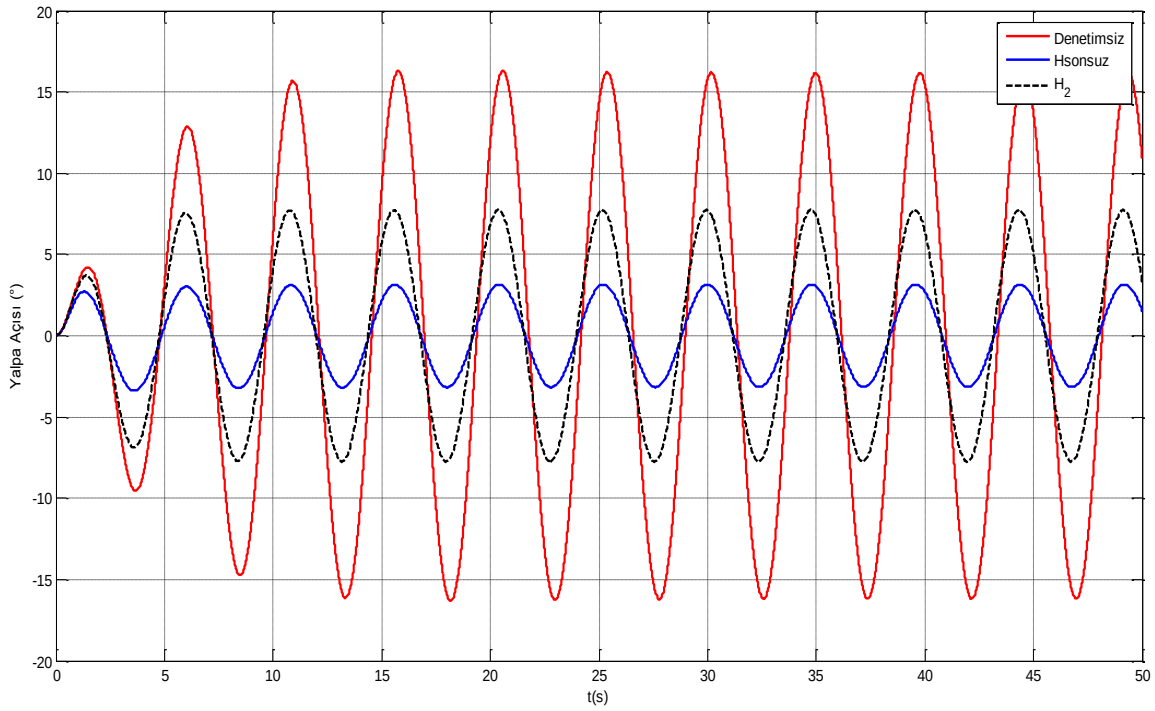
5.3 Benzetim Çalışmaları

Yapılan benzetim çalışmaları balıkçı gemisinin üç farklı *GM* durumu için gerçekleştirilmiştir. Elde edilen kontrol kazançları iki farklı denetleyici için ayrı ayrı ifade edilmiştir. *GM*=0,8 kabul edilerek yapılan analiz sonucunda elde edilen kontrol matrisleri iki farklı denetleyici için aşağıdaki gibi bulunmuştur.

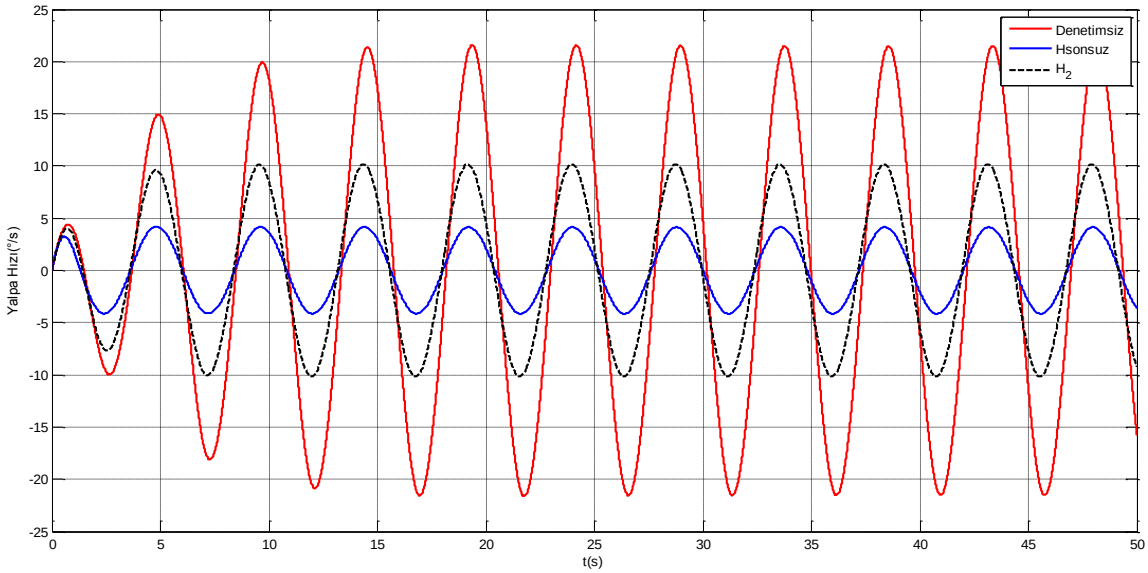
K_∞ = [-1.6642 2.8792 -0.4833]

K_2 = [-0.3434 0.6385 -0.1064]

Yukarıda ifade edilen kontrol matrisleri kullanılarak yapılan benzetim çalışması neticesinde, yalpa genlik ve hız grafikleri denetimli ve denetimsiz durumlar için Şekil 5.1 ve 5.2'de, oransal olarak ise Çizelge 5.1'de gösterilmiştir.

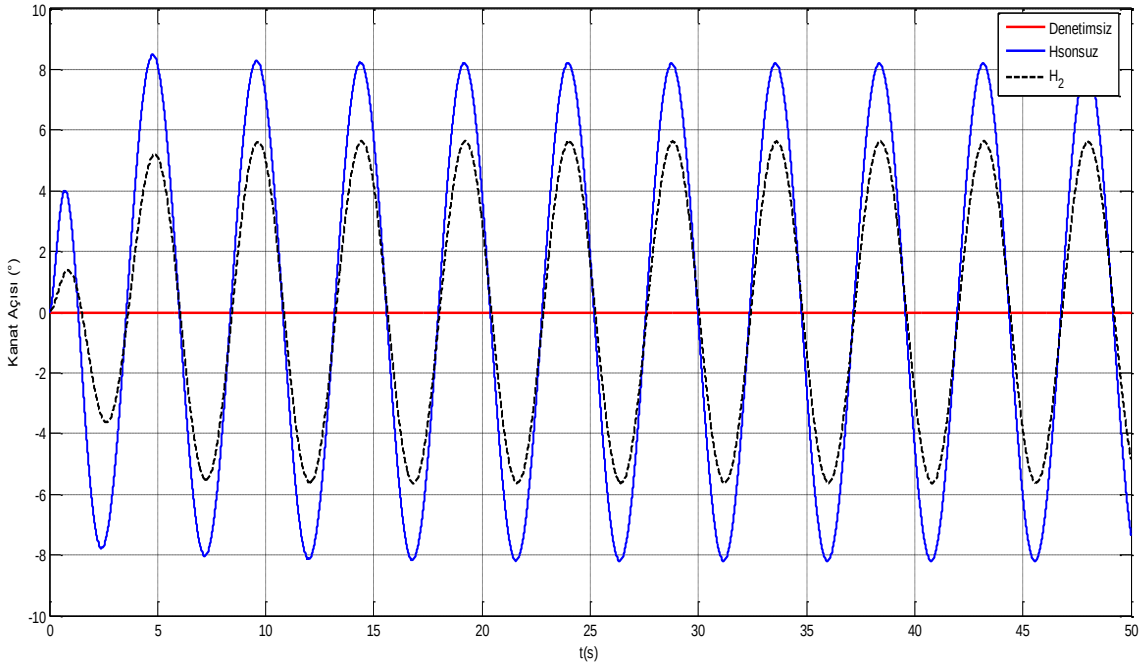


Şekil 5. 1 Yalpa hareketinin genliğinin *GM* = 0.8 için denetimli ve denetimsiz durum cevapları

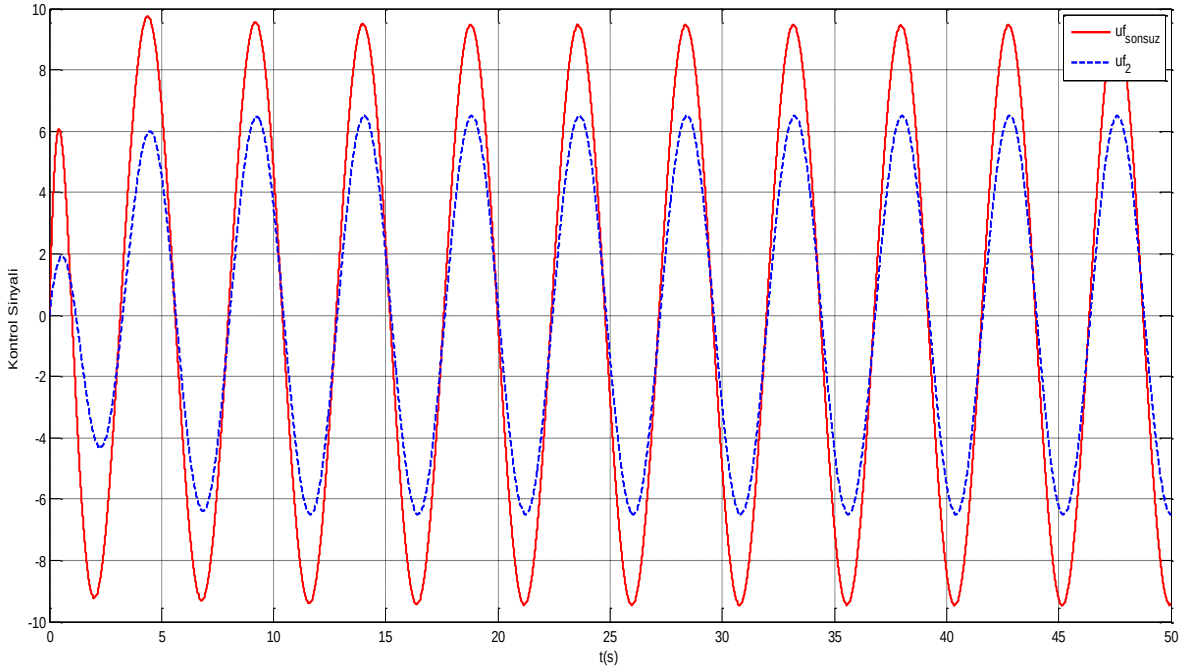


Şekil 5. 2 Yalpa hareketinin açısal hızının *GM* = 0.8 için denetimli ve denetimsiz durum cevapları

Kontrol sinyali ile kanat açısı arasındaki ilişkide, yapılan analizler neticesinde denetimli ve denetimsiz durumlar için Şekil 5.3 ve 5.4'de gösterilmiştir.



Şekil 5. 3 Kanat açısının *GM* = 0.8 için denetimli ve denetimsiz durum cevapları

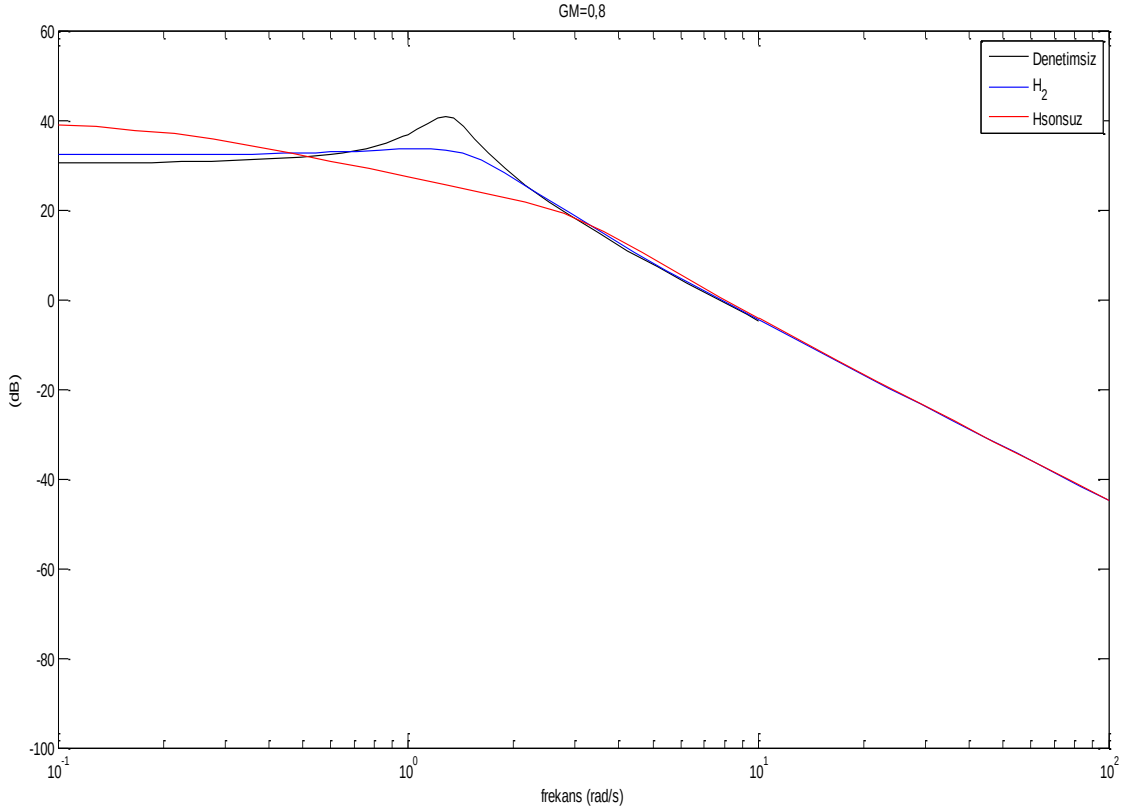


Şekil 5. 4 Kontrol sinyalinin *GM* = 0.8 için denetimli ve denetimsiz durum cevapları

Çizelge 5. 1 *GM* = 0.8 için karşılaştırmalar

GM=0.8	Denetimsiz	H_2 denetleyici	H_∞ denetleyici
Yalpa açısının değişimi	16.29°	7.737°	3.161°
Yalpa hızının değişimi	21.6 °/s	10.17°/s	4.179°/s
Yalpa açısındaki azalma	-	% 52.5	% 80.59
Yalpa hızındaki azalma	-	%52.91	% 80.65

Çizelge 5.1'de görüldüğü üzere denetimsiz duruma kıyasla, H_2 denetleyici yalpa açısını ve hızını %52 oranında, H_∞ denetleyici ise %80 oranında azaltmıştır. Şekil 5.5 ile ifade edilen frekans grafiğinde ise, denetimsiz durumda yaklaşık 41 (dB) olan frekans tepesi değeri, H_2 denetleyici ile yaklaşık 34 (dB)'e, H_∞ denetleyici ile 27 (dB)'e düşürülmüştür. Bu durum iki denetleyicinin de başarısını garanti etmekle beraber, H_∞ denetleyicinin frekans tepesini doğası gereği daha fazla azalltığını göstermiştir.



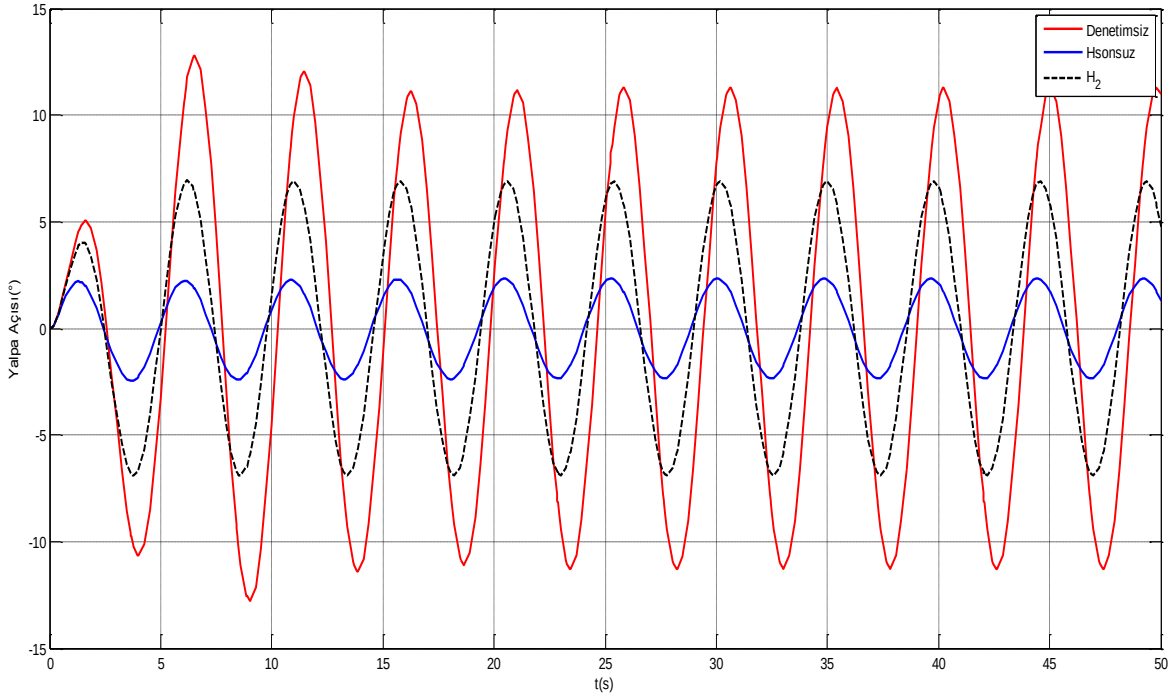
Şekil 5. 5 Yalpa hareketinin *GM* = 0.8 için frekans cevabı

GM=0,5 kabul edilerek yapılan analiz sonucunda elde edilen kontrol matrisleri iki farklı denetleyici için aşağıdaki gibi bulunmuştur.

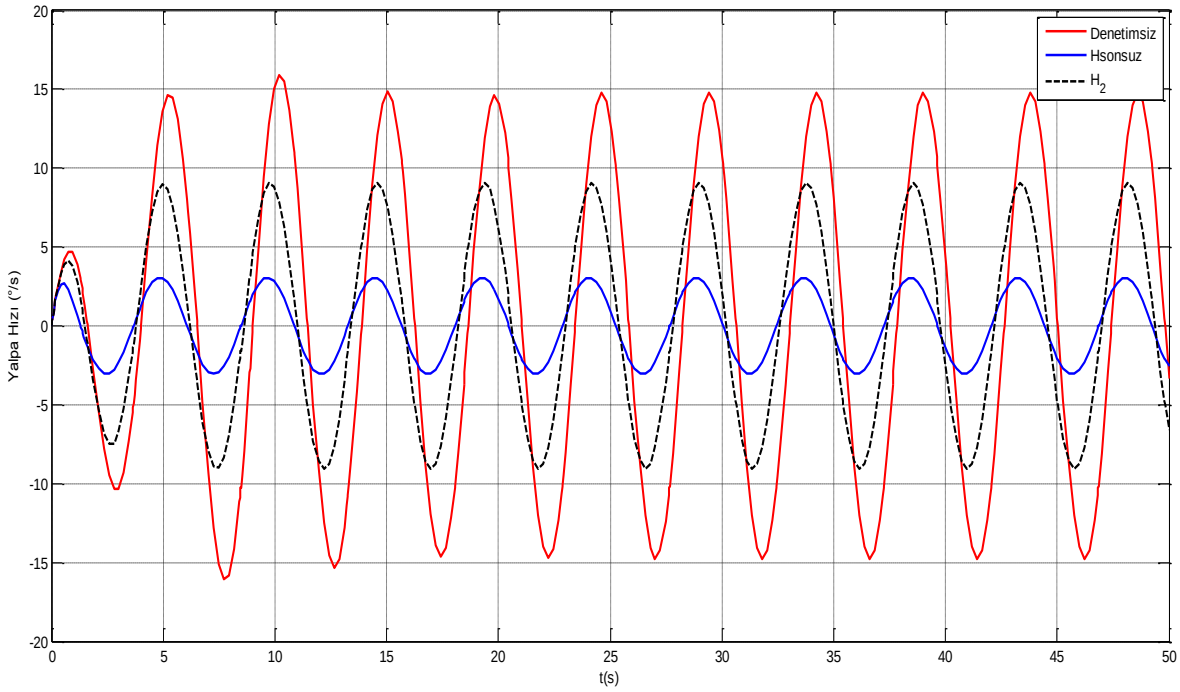
K_∞ = [-1.6586 6.3208 -1.2285]

K_2 = [-0.1851 0.8252 -0.1356]

Yukarıda ifade edilen kontrol matrisleri kullanılarak yapılan benzetim çalışması neticesinde, yalpa genlik ve hız grafikleri denetimli ve denetimsiz durumlar için Şekil 5.6 ve 5.7'de, oransal olarak ise Çizelge 5.2'de gösterilmiştir.

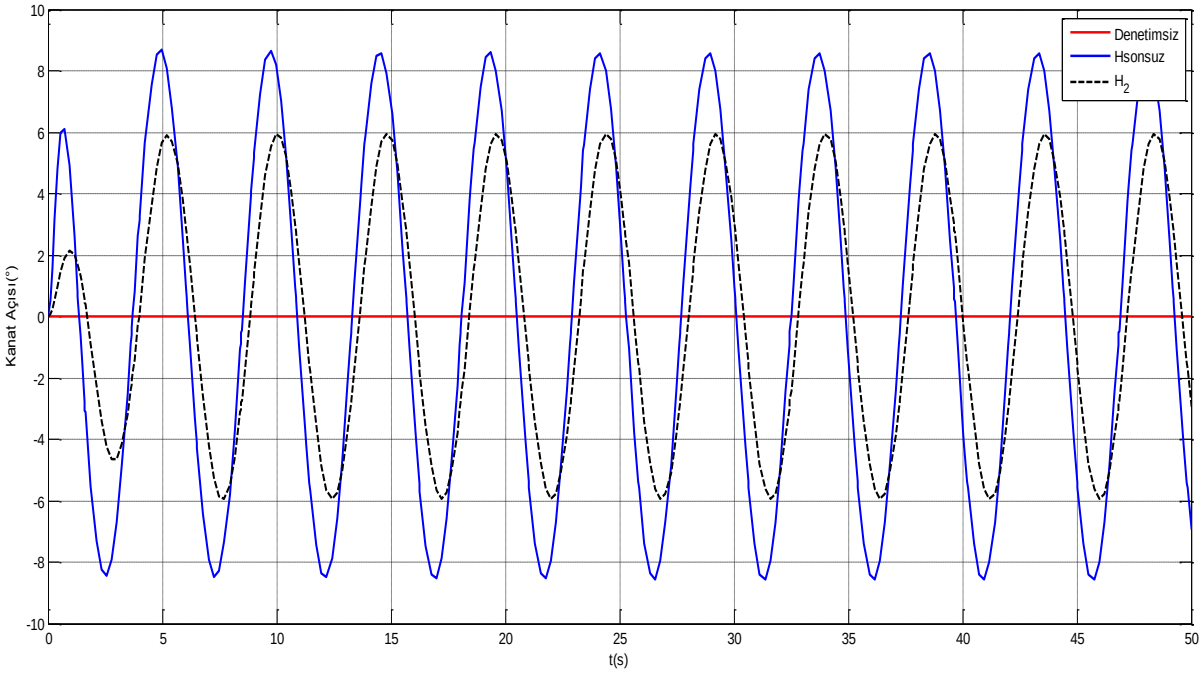


Şekil 5. 6 Yalpa hareketinin genliğinin *GM* = 0.5 için denetimli ve denetimsiz durum cevapları

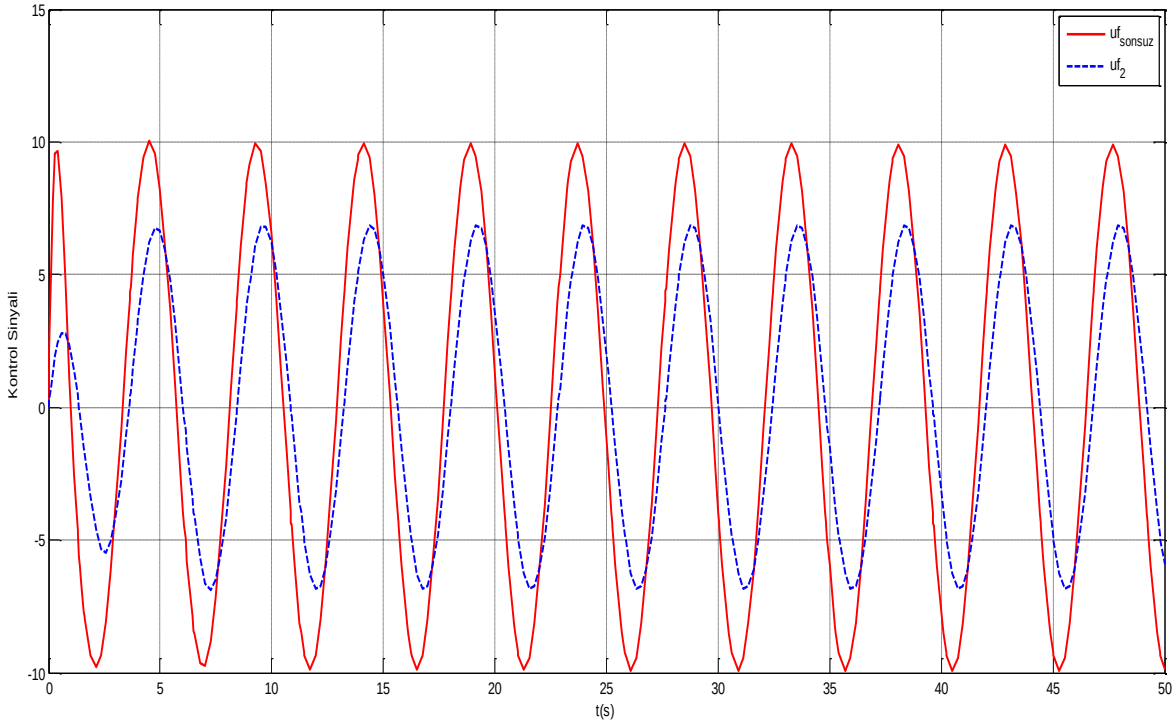


Şekil 5. 7 Yalpa hareketinin açısal hızının *GM* = 0.5 için denetimli ve denetimsiz durum cevapları

Kontrol sinyali ile kanat açısı arasındaki ilişkide, yapılan analizler neticesinde denetimli ve denetimsiz durumlar için Şekil 5.8 ve 5.9'da gösterilmiştir.



Şekil 5. 8 Kanat açısının *GM* = 0.5 için denetimli ve denetimsiz durum cevapları

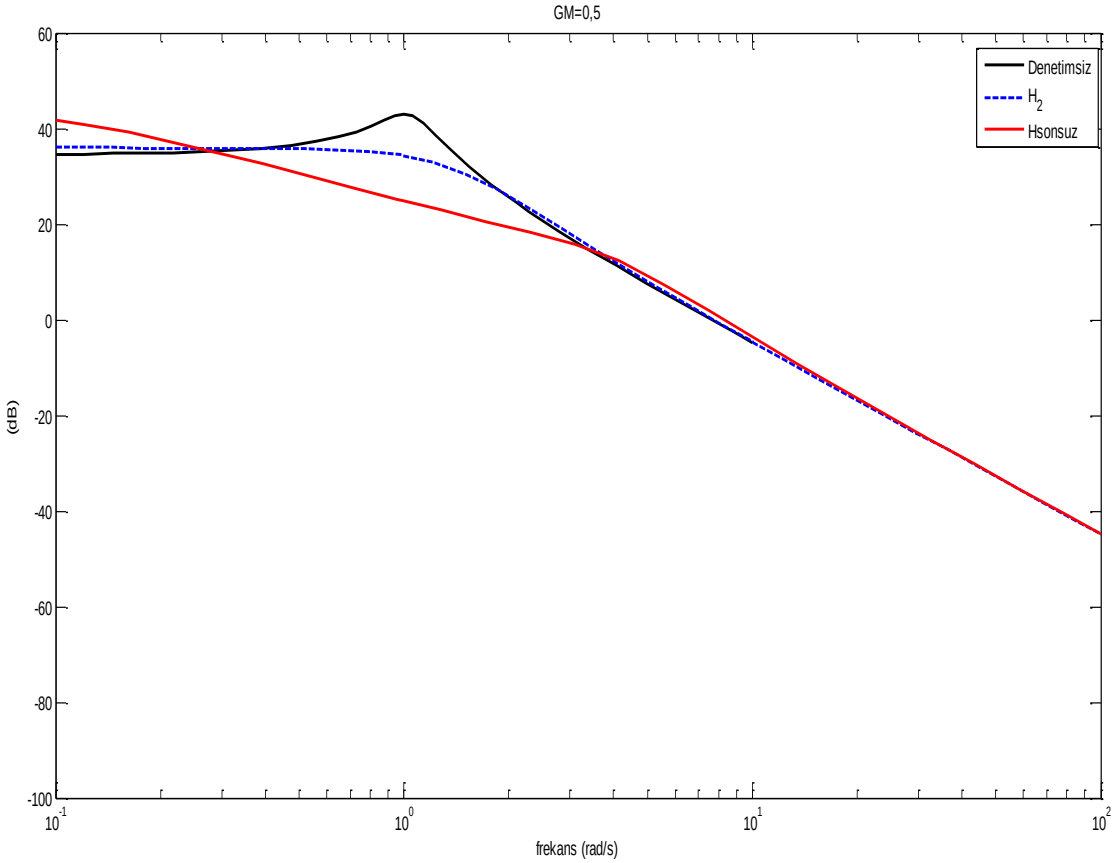


Şekil 5. 9 Kontrol sinyalinin *GM* = 0.5 için denetimli ve denetimsiz durum cevapları

Çizelge 5. 2 *GM* = 0.5 için karşılaştırmalar

***GM*=0.5**	Denetimsiz	H_2 denetleyici	H_∞ denetleyici
Yalpa açısının değişimi	12.76°	6.932°	2.342°
Yalpa hızının değişimi	15.94 °/s	9.059°/s	3.061°/s
Yalpa açısındaki azalma	-	% 45.67	% 81.64
Yalpa hızındaki azalma	-	%43.16	% 80.79

Çizelge 5.2'de görüldüğü üzere denetimsiz duruma kıyasla, H_2 denetleyici yalpa açısını %45 ve hızını %43 oranında, H_∞ denetleyici ise her ikisini %80'nin üzerinde bir oranında azaltmıştır. Şekil 5.10 ile ifade edilen frekans grafiğinde ise, denetimsiz durumda yaklaşık 43 (dB) olan frekans tepesi değeri, H_2 denetleyici ile yaklaşık 36 (dB)'e, H_∞ denetleyici ile 24 (dB)'e düşürülmüştür. Bu durum iki denetleyicinin de başarısını garanti etmekle beraber, H_∞ denetleyicinin frekans tepesini doğası gereği daha fazla azalltığını göstermiştir.



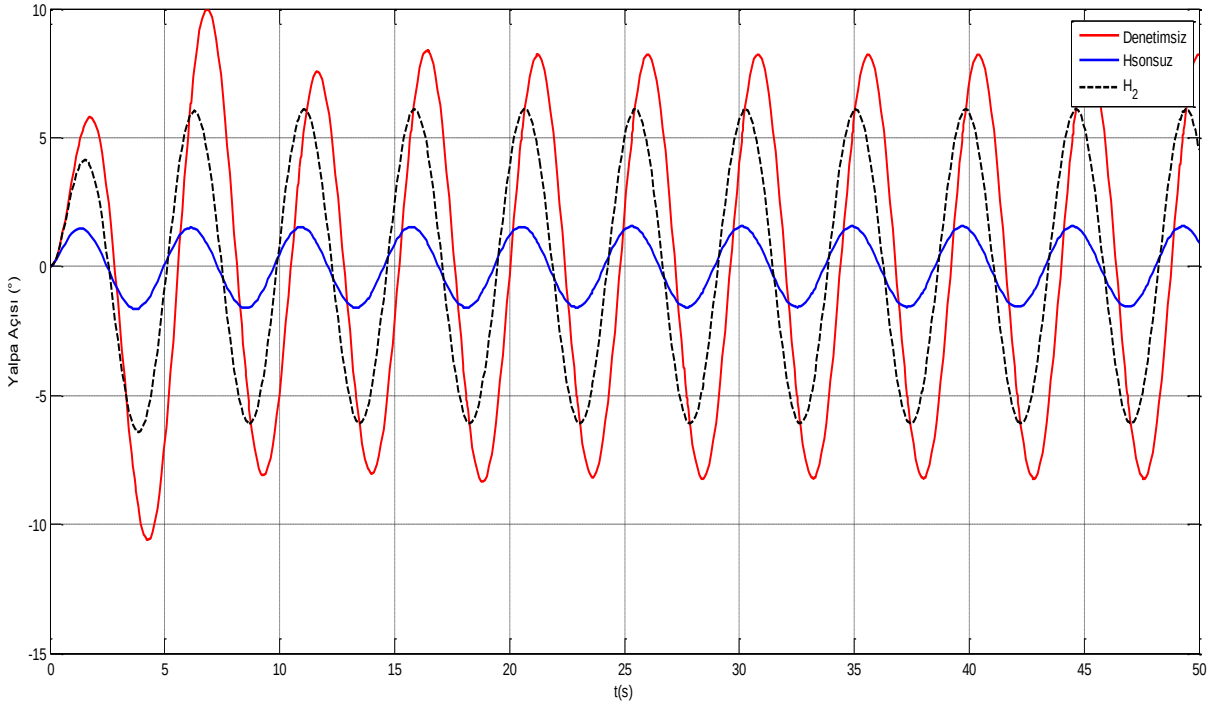
Şekil 5. 10 Yalpa hareketinin *GM* = 0.5 için frekans cevabı

GM=0,3 kabul edilerek yapılan analiz sonucunda elde edilen kontrol matrisleri iki farklı denetleyici için aşağıdaki gibi bulunmuştur.

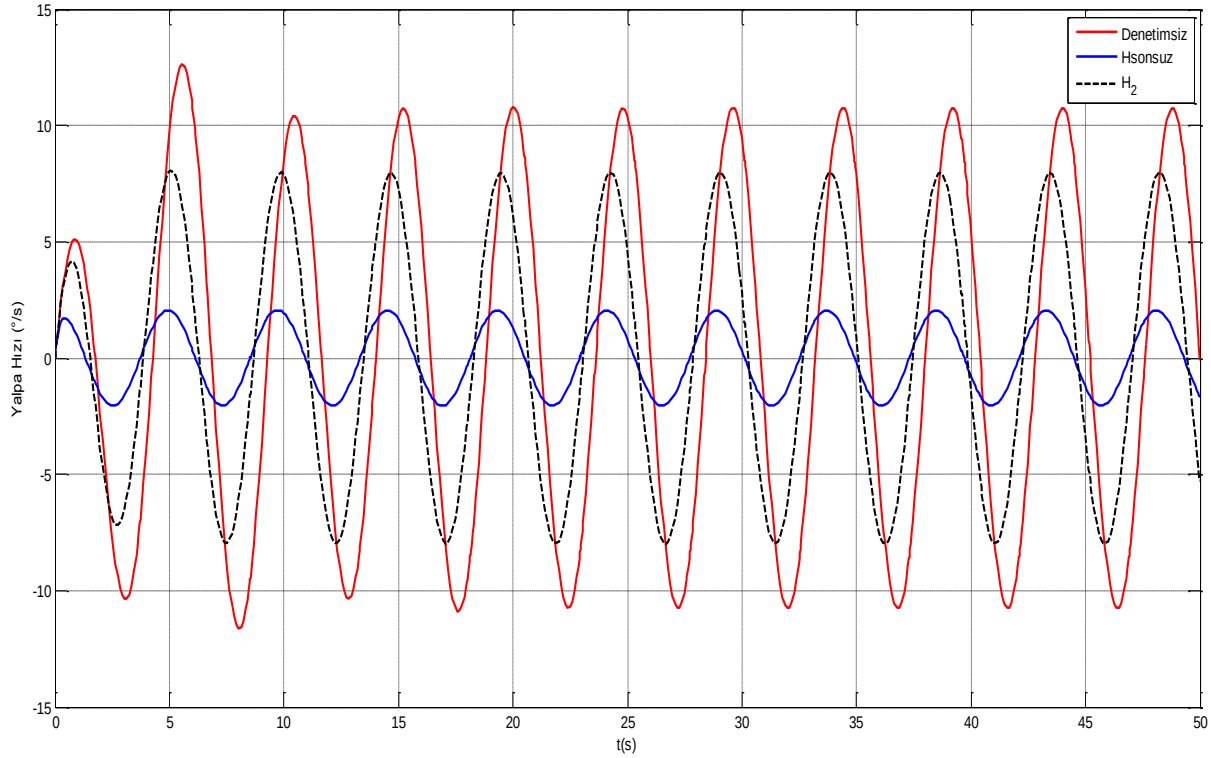
K_∞ = [-3.5262 65.6432 -14.1198]

K_2 = [0.0049 1.0728 -0.1732]

Yukarıda ifade edilen kontrol matrisleri kullanılarak yapılan benzetim çalışması neticesinde, yalpa genlik ve hız grafikleri denetimli ve denetimsiz durumlar için Şekil 5.11 ve 5.12'de, oransal olarak ise Çizelge 5.3'de gösterilmiştir.

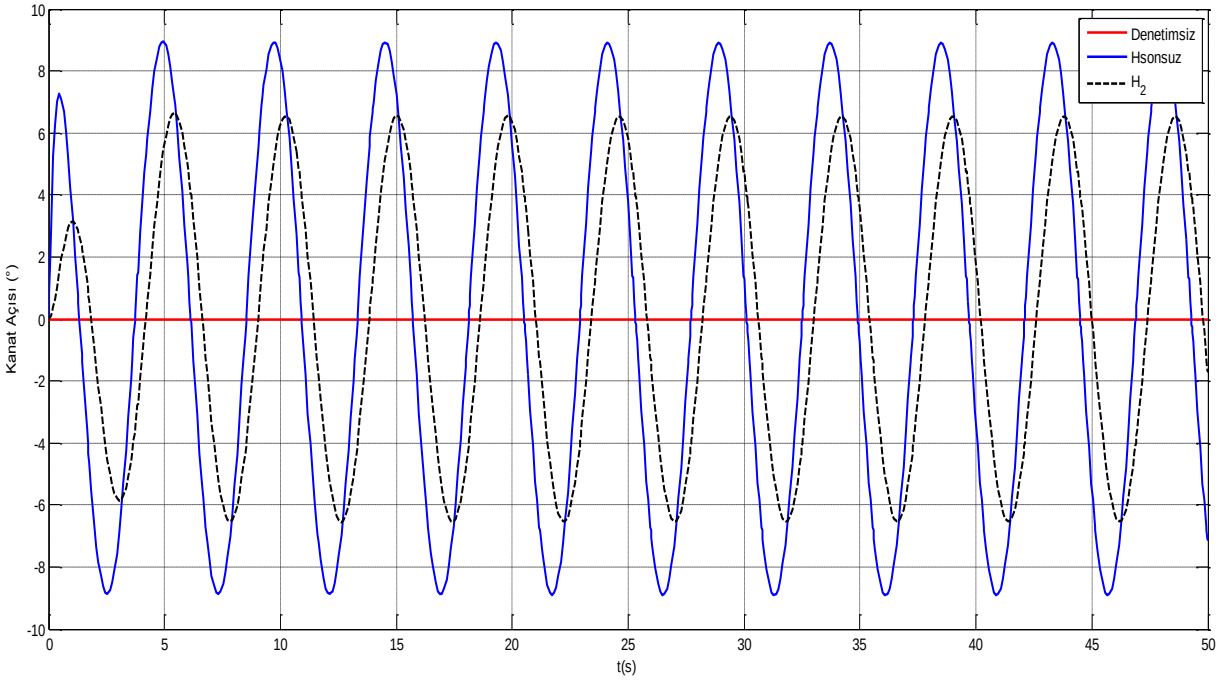


Şekil 5. 11 Yalpa hareketinin genliğinin *GM* = 0.3 için denetimli ve denetimsiz durum cevapları

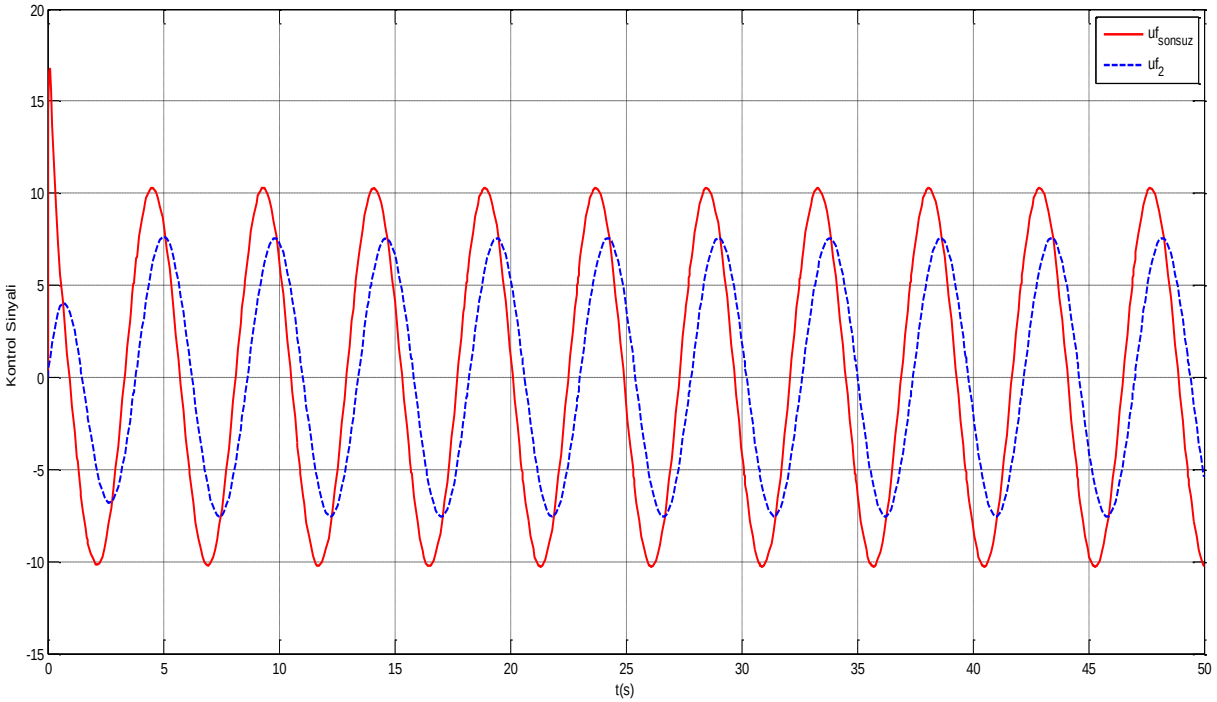


Şekil 5. 12 Yalpa hareketinin açısal hızının *GM* = 0.3 için denetimli ve denetimsiz durum cevapları

Kontrol sinyali ile kanat açısı arasındaki ilişkide, yapılan analizler neticesinde denetimli ve denetimsiz durumlar için Şekil 5.13 ve 5.14'de gösterilmiştir.



Şekil 5. 13 Kanat açısının *GM* = 0.3 için denetimli ve denetimsiz durum cevapları

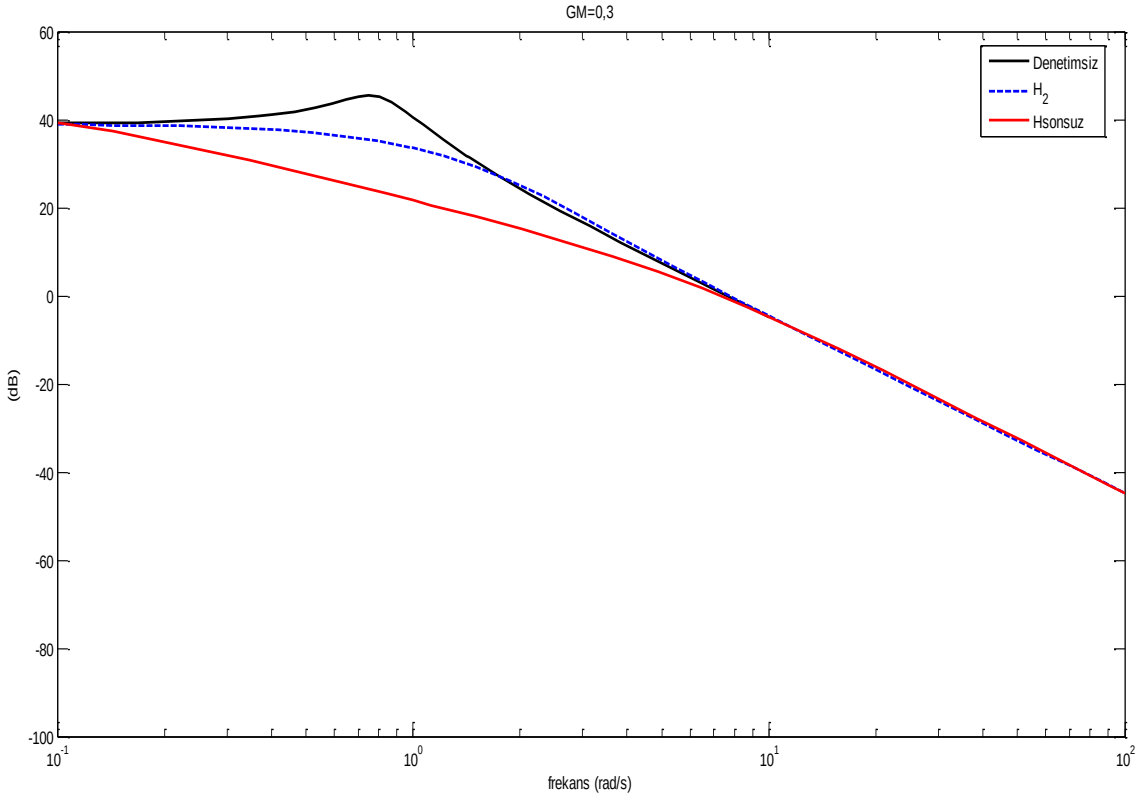


Şekil 5. 14 Kontrol sinyalinin *GM* = 0.3 için denetimli ve denetimsiz durum cevapları

Çizelge 5. 3 *GM* = 0.3 için karşılaştırmalar

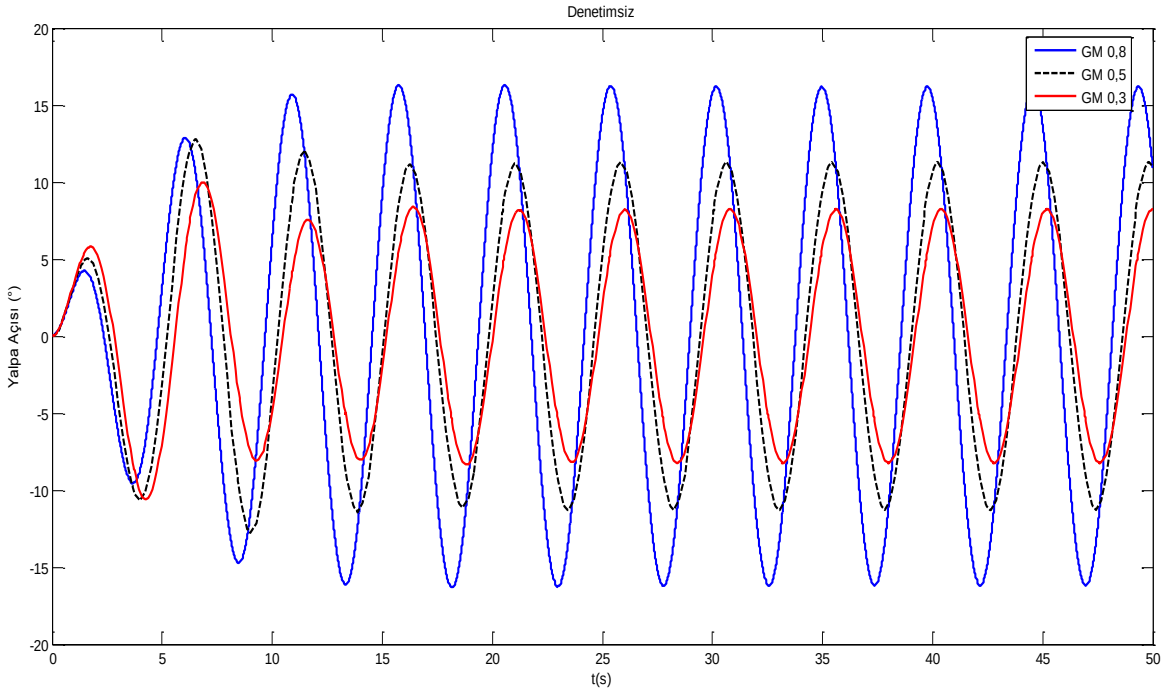
***GM*= 0.3**	Denetimsiz	H_2 denetleyici	H_∞ denetleyici
Yalpa açısının değişimi	9.983°	6.091°	1.565°
Yalpa hızının değişimi	12.61 °/s	8.063°/s	2.055°/s
Yalpa açısındaki azalma	-	% 38.98	% 84.32
Yalpa hızındaki azalma	-	%36.05	% 83.70

Çizelge 5.3'de görüldüğü üzere denetimsiz duruma kıyasla, H_2 denetleyici yalpa açısını %38 ve hızını %36 oranında, H_∞ denetleyici ise her ikisini %83'nin üzerinde bir oranında azaltmıştır. Şekil 5.15 ile ifade edilen frekans grafiğinde ise, denetimsiz durumda yaklaşık 46 (dB) olan frekans tepesi değeri, H_2 denetleyici ile yaklaşık 35 (dB)'e, H_∞ denetleyici ile 22 (dB)'e düşürülmüştür. Bu durum iki denetleyicinin de başarısını garanti etmekle beraber, H_∞ denetleyicinin frekans tepesini doğası gereği daha fazla azalltığını göstermiştir.

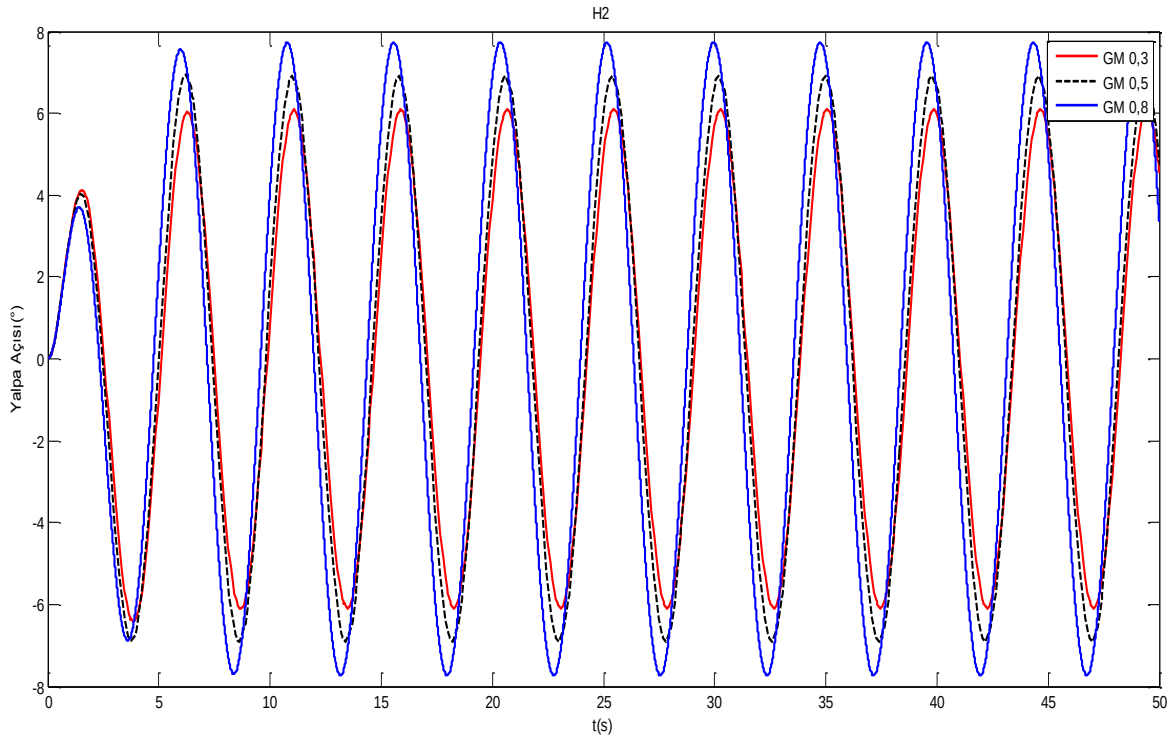


Şekil 5. 15 Yalpa hareketinin *GM* = 0.3 için frekans cevabı

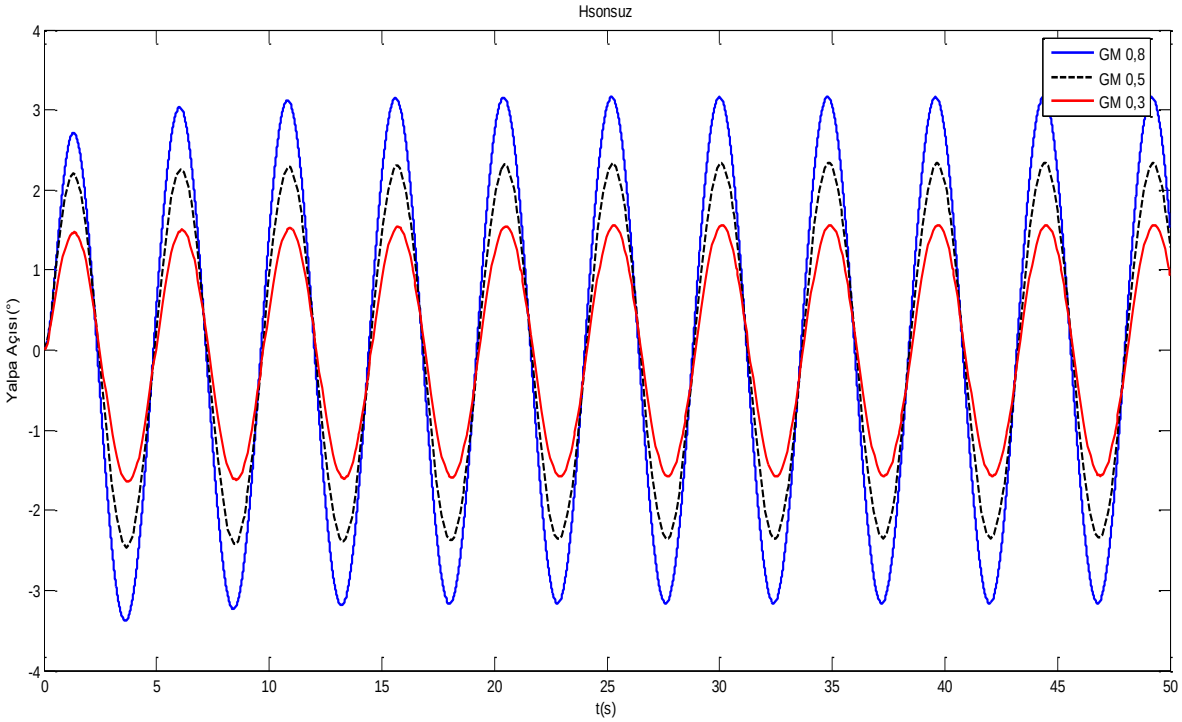
Balıkçı teknesi için iki farklı denetleyici kullanılarak alınan sonuçlar üç farklı *GM* durumu için denetimli ve denetimsiz durumlar düşünülerek elde edilmiştir. Yalpa açısı ve hız grafikleri değerlendirildiğinde, Çizelge 5.1, 5.2 ve 5.3'de oransal olarak ifade edildiği gibi, üç farklı *GM* durumu için, H_∞ denetleyicinin yalpa açısı ve hızını %80'nin üzerinde azaltabildiği görülmektedir. H_2 denetleyicinin ise yalpa açısı ve hızı grafiklerindeki azalma dikkate alındığında yine üç farklı *GM* durumu için değerlendirildiğinde %36 ile %52 arasında değişen bir başarı gösterdiği ifade edilmektedir. Bu değişimler daha açık bir şekilde ayrı ayrı aşağıda gösterilmiş, denetleyicilerin performansları net bir şekilde tekrar vurgulanmıştır.



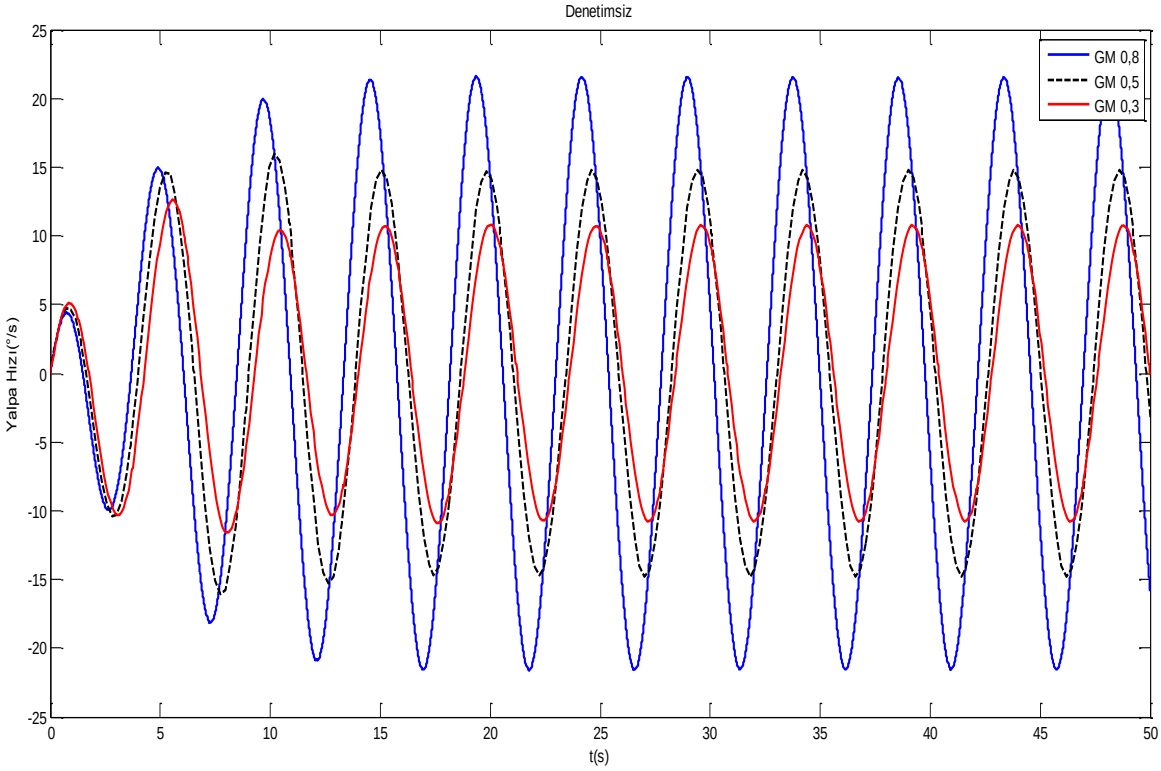
Şekil 5. 16 Üç farklı *GM* durumu için denetimsiz yalpa açısı cevapları



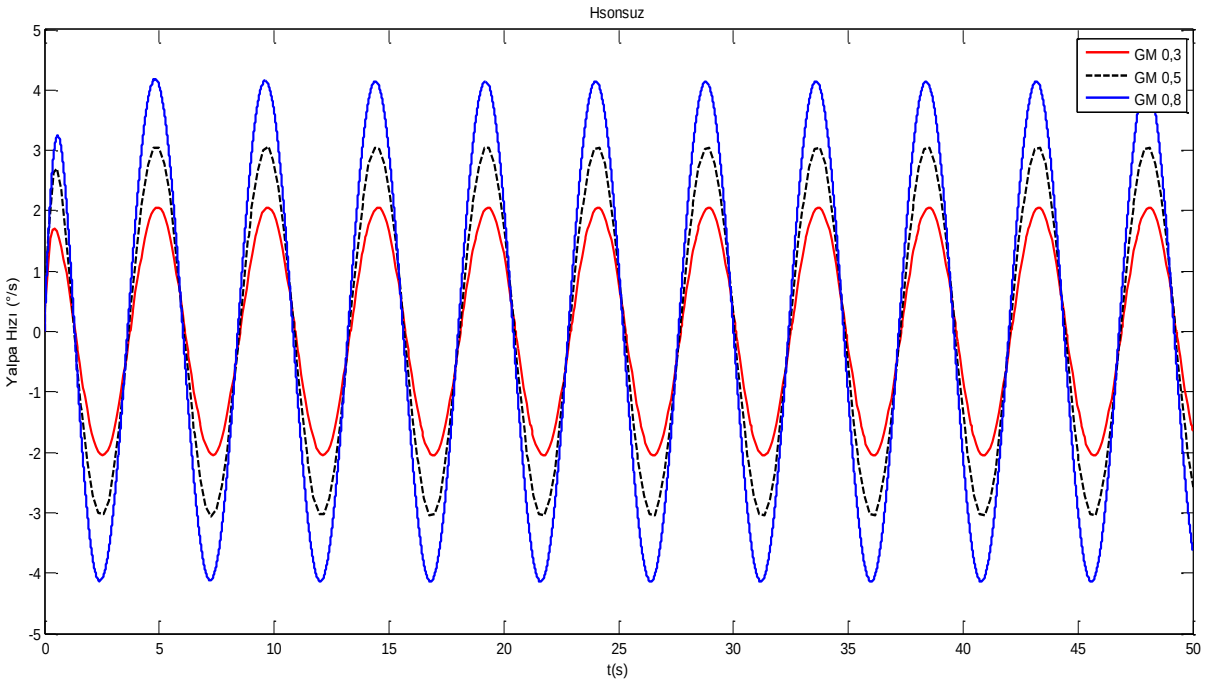
Şekil 5. 17 Üç farklı *GM* durumu için H_2 denetimli yalpa açısı cevapları



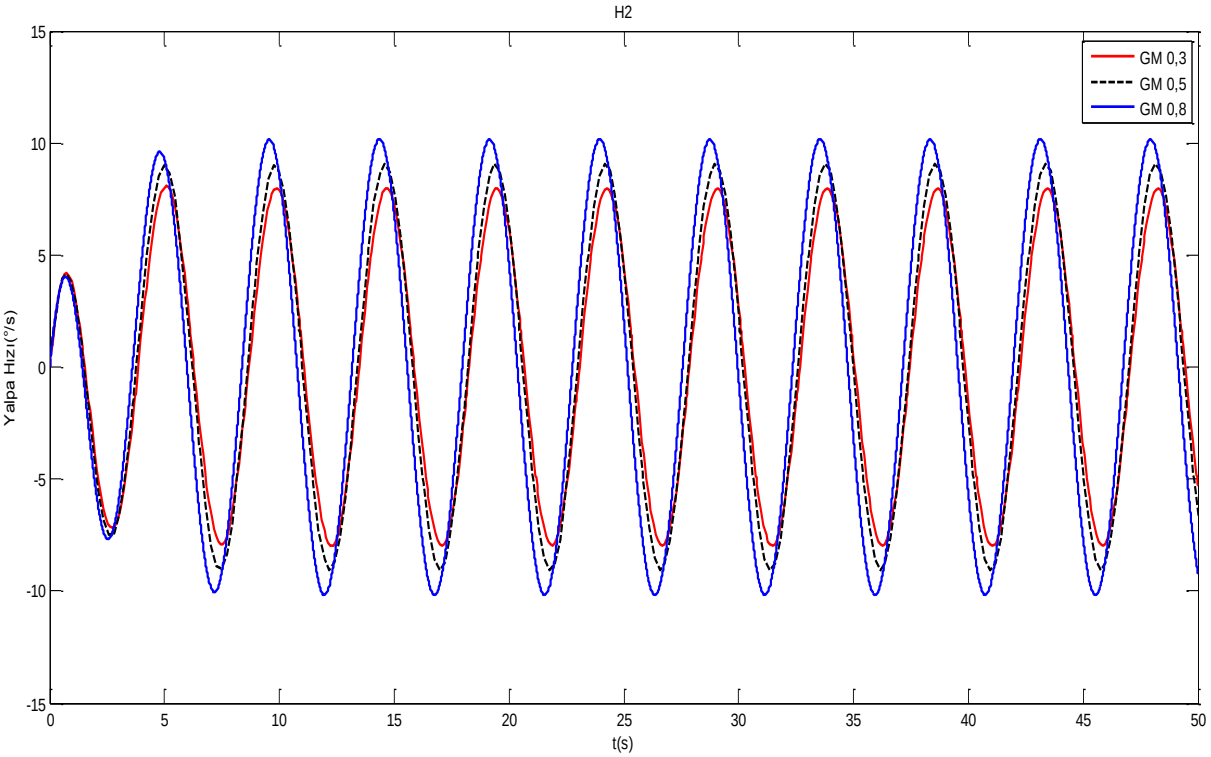
Şekil 5. 18 Üç farklı *GM* durumu için H∞ denetimli yalpa açısı cevapları



Şekil 5. 19 Üç farklı *GM* durumu için denetimsiz yalpa hızı cevapları



Şekil 5. 20 Üç farklı *GM* durumu için H∞ denetimli yalpa hızı cevapları



Şekil 5. 21 Üç farklı *GM* durumu için H_2 denetimli yalpa hızı cevapları

Benzetim çalışmalarından görüldüğü üzere yalpa açısı, hızı ve frekans cevaplarının iki denetleyicide de başarılı sonuçlar verdiği görülmüştür. Denetleyiciler maksimum 20° kanat açısı oluşturucak şekilde dizayn edilmiş olup, oluşturdukları kontrol sinyali ile kanat açısı cevapları karşılaştırıldığında bu kısıtı aşmadan çalışabildikleri anlaşılmaktadır. Bu durum oluşan kontrol kuvvetinin kabul edilebilir noktada olduğunun kanıtıdır. Benzetim çalışmalarından da anlaşılacağı üzere H_∞ denetleyicinin H_2 denetleyiciye nispeten daha etkili olduğu görülmektedir. Üç farklı GM durumu için alınan sonuçlar neticesinde, H_∞ denetleyicinin yalpa genliklerini her üç durum içinde % 80 oranında azalttığı görülmektedir. Bu sonuçlardan yola çıkarak geminin seyirde değişen *GM* durumlarına karşılık H_∞ denetleyicinin sistemin en kötü durumu için kontrol kazancını hesaplaması sebebiyle, en optimum sonucu verdiği görülmektedir, bu nedenle H_∞ denetleyici yalpa hareketinin dengelenmesi ve kararlı bölgelerde tutulması amacıyla yapılacak daha sonraki çalışmalar için önerilmektedir.

BÖLÜM 6

KAYICI TEKNENİN YALPA HAREKETİNİN DENGELENMESİ İÇİN DME TABANLI DOYUMLU DAYANIKLI DENETLEYİCİ TASARIMI

Bu bölümde bir kayıcı teknenin yalpa hareketinin dengelenmesi için doğrusal matris eşitsizliklerine dayalı dayanıklı doyumlu denetleyici tasarımı gerçekleştirilmiş ve simülasyonlar yapılmıştır. Kayıcı teknenin yalpa hareketinin sönüm katsayılarının bulunmasında Ikeda'nın deneysel sonuçlara dayalı yarı-ampirik tahmin yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntemle ilgili detaylı bilgi ve farklı froude sayılarında elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibi ifade edilmiştir [86].

6.1 Yalpa Sönümü İçin Öngörülen Metod

İkedanın metodunda yalpa sönümü belirli bileşenlerin değerlerinin tahmin edilmesiyle ifade edilmiştir. Bunlar sürtünme (F), dalga (W), girdap (E), kaldırma (L) ve yalpa omurga (BK) bileşenleridir. Sürtünme, dalga ve kaldırma bileşenleri doğrusaldır ve yalpa açısal hızıyla orantılıdır. Girdap ve yalpa omurga bileşenleri doğrusal olmayan bileşenlerdir yalpa açısal hızının karesiyle orantılıdır. Yalpa sönümü yalpa açısal hızının bir fonksiyonu olarak aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$M_R = M_F\dot{\phi} + M_W\dot{\phi} + M_L\dot{\phi} + M_E\left|\dot{\phi}\right|\dot{\phi} + M_{BK}\left|\dot{\phi}\right|\dot{\phi} \tag{6.1}$$

Lineer haliyle eş değer yalpa sönüm katsayısı B_{44} aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$B_{44} = B_F + B_W + B_L + B_E + B_{BK} \tag{6.2}$$

B_{44} yalpa sönüm katsayısı, yalpa sönüm momenti M_R'nin yalpa açısal hızı $\dot{\phi}$' ye bölünmesiyle tanımlanmıştır. İlk denklemde bahsedilen lineer olmayan ifadelerin lineerleştirilmiş hali sırasıyla aşağıdaki gibidir.

$$B_E = \frac{8}{3\pi} M_E \phi_a \omega \qquad B_{BK} = \frac{8}{3\pi} M_{BK} \phi_a \omega \tag{6.3}$$

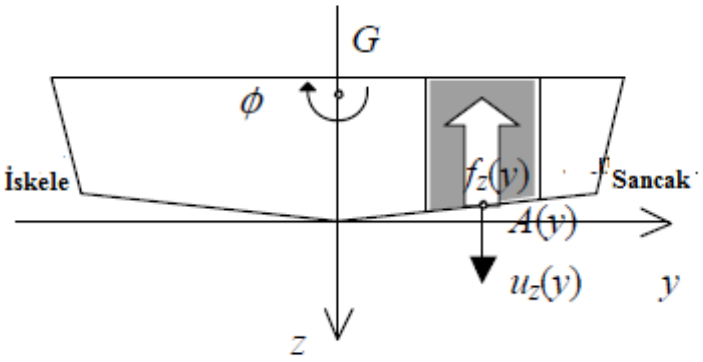
6.3 denklemi ile ifade edilen ϕ_a ve ω sırasıyla yalpa hareketinin genliğini ve dairesel frekansını ifade eder. Birinci denklemdeki bütün katsayıların ilerleme hızı ve yalpa frekansına bağlı olduğu M_E ve M_{BK}'nın ise bazı zamanlar girdap problemindeki K_C sayısının etkisi yüzünden yalpa frekansının yanı sıra yalpa genliğine de bağlı olduğu belirtilmelidir. Denklem 2.21 ile ifade edilen yalpa sönüm katsayısı B_{44}'ün boyutsuzlaştırılmış hali aşağıdaki gibidir.

$$\hat{B}_{44} = \frac{B_{44}}{\rho \nabla B^2} \sqrt{\frac{B}{2g}} \tag{6.4}$$

Boyutsuz yalpa sönüm denklemindeki kaldırma bileşeni yüksek ilerleme hızında daha etkili olduğu bilinmektedir. Yalpa hareketinin yatay eksende oluşturduğu öteleme hareketi yüzünden, gemi yan yüzeyi farklı basınçlara maruz kalmaktadır. Bu etki manevra halinde meyil deneyleri yapılarak tespit edilebilir.

6.2 Yalpa Sönümünde Dikey Kaldırma Bileşenini Öngören Metot

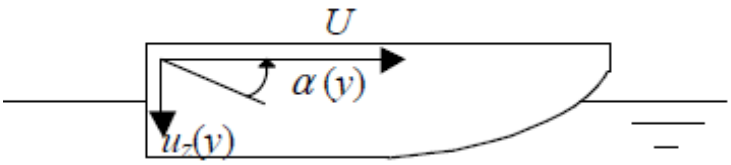
Kayıcı tekneler çok hızlı hareket ettikleri için su altındaki yanal alanları küçüktür ve bu nedenle yalpa sönümünün yatay kaldırma bileşenleride düşüktür. Ancak su yüzey alanı çok geniştir, teknenin dibindeki dikey kaldırma kuvveti etkisi büyüktür ve bu kuvvet sönümde önemli bir rol oynar bu yüzden bu bileşeni hesaplamak gereklidir. Kayıcı teknenin ağırlık merkezi etrafında periyodik yalpa hareketi yaptığı kabulüyle, Şekil 6.1 ile gösterilen enine kesit $A(y)$ noktası $u_z(y)(\mathrm{m/s})$ dikey hızına sahiptir ve bu aşağıdaki gibi ifade edilmiştir.



Şekil 6. 1 Teknenin en kesiti[86]

$$u_z(y) = \dot{\phi} y \tag{6.5}$$

$\dot{\phi}$ (rad/s) yalpa açısal hızını ifade eder, $y(m)$; $A(y)$ noktası ve ağırlık merkezi arasındaki enine uzaklıktır. Kayıcı tekne U ilerleme hızına sahipken $A(y)$ noktasını içeren kıç kesitte bağıl akış için $\alpha(y)$ hücum açısı olarak ifade edilir ve Şekil 6.2'de gçsterilen bu açı aşağıdaki gibi hesaplanır.



Şekil 6. 2 Teknenin kıç kesiti[86]

$$\alpha(y) = \tan^{-1}\frac{u_z(y)}{U} = \tan^{-1}\frac{\dot{\phi} y}{U} \cong \frac{\dot{\phi} y}{U} \tag{6.6}$$

Trim açısını τ_1 kabul ederek, tekne üzerindeki dikey kaldırma kuvvetinin etkisiyle oluşan sanal trim açısı $\tau(y)$ bağıl akış için aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$\tau(y) = \tau_1 + \alpha(y) \cong \tau_1 + \frac{\dot{\phi} y}{U} \tag{6.7}$$

Kayıcı tekne için, hidrodinamik kaldırma kuvvetinin büyüklüğü özellikle trim açısına bağlıdır. Dikey kaldırma kuvveti $f_z(y)$(kgf/m), $\alpha(y)$ hücum açısıyla, $A(y)$ noktasını içeren kıç kesit üzerinde hareket ettiğinde aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$f_z(y) = \frac{1}{2}\rho B_{wl} U^2 k_L(\tau_1)\alpha(y) \tag{6.8}$$

B_{wl} su hattı genişliğini ifade eder ve $k_L(\tau_1)$ diferansiyel katsayıdır, trim açısıyla diferansiye edilen boyutsuz dikey kaldırma katsayısı C_L ile aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$k_L(\tau_1) = \frac{\partial C_L}{\partial \tau} \tag{6.9}$$

ve ρ (kgf s^2/ m^4) akışkanın yoğunluğunu ifade eder. Bu çalışmada yarı kararlı durum kabulüyle, $f_z(y)$ (kgf/m); hidrodinamik kaldırma kuvveti F_L (kgf)'nin ortalama değeri olarak kabul edilebilir ve aşağıdaki gibidir.

$$f_z(y) = \frac{F_L}{B_{wl}} = \frac{1}{2}\rho B_{wl} U^2 C_L \tag{6.10}$$

Yalpa momenti ise aşağıdaki gibi ifade edilmiştir.

$$M_\phi = \int_{-\frac{B_{wl}}{2}}^{\frac{B_{wl}}{2}} f_z(y).y dy \tag{6.11}$$

$$M_\phi = \frac{1}{24}\rho B_{wl}{}^4 U k_L(\tau_1)\dot{\phi} = B_{VL}\dot{\phi} \tag{6.12}$$

Kayıcı teknenin dikey kaldırma bileşenini tahmin etmek için İkedanın öngördüğü bu metotta yeni bileşen olarak B_{VL} eklenmiştir. Bu metod uygulandığında elde edilen sönüm katsayıları Çizelge 6.1'de Foude sayısına bağlı olarak gösterilmiştir [86].

Çizelge 6. 1 Hıza karşılık sönüm katsayıları

Fn	B44	V(m/s)
0	0,0264	0
0,1	0,0235	1,289
0,2	0,0295	2,578
0,3	0,0362	3,868
0,4	0,0428	5,157
0,5	0,0495	6,447
0,6	0,0562	7,736
0,7	0,0629	9,026
0,8	0,0696	10,315
0,9	0,0763	11,605
1	0,083	12,89
1,10	0,0897	14,179
1,20	0,0964	15,468
1,30	0,1031	16,757
1,40	0,1097	18,046
1,50	0,1164	19,335
1,60	0,1231	20,624
1,70	0,1298	21,913
1,80	0,1365	23,202
1,90	0,1432	24,491
2,00	0,1499	25,78

6.3 Yalpa Hareketinin Dengelenmesi İçin DME Tabanlı Dayanıklı ve Doyumlu H_∞ Durum Geri Beslemeli Denetleyici Tasarımı

Denetleyici tasarımında kullanılan, denklem 2.27'de temel olarak ifade edilen yalpa hareketi matematik modeli aşağıda gösterilmiştir.

$$(I_x+J_x)\ddot{\phi}+B_L\dot{\phi}+B_N\dot{\phi}|\dot{\phi}|+\Delta(G_1\phi+G_3\phi^3+G_5\phi^5)=M_W+M_F \tag{6.13}$$

$$M_W=\omega_e^2\alpha_m I\cos(\omega_e t) \tag{6.14}$$

$$M_F=-\frac{\rho V^2 A_f C_L}{I_x+J_x}\left(\alpha_f+\frac{\dot{\phi} If}{V}\right)If \tag{6.15}$$

6.13 nolu denklemin I_x+J_x ile bölünmesiyle,

$$\ddot{\phi}+\delta_l\dot{\phi}+\delta_n\dot{\phi}|\dot{\phi}|+\Delta(m_1\phi+m_3\phi^3+m_5\phi^5)=\lambda_e\omega_e^2\alpha_m\cos(\omega_e t)-\delta_2\alpha_f-\delta_3\dot{\phi} \tag{6.16}$$

elde edilir.

Burada doğrusal ve doğrusal olmayan sönüm katsayıları ise Ikeda'nın hızlı tekneler için öngördüğü metotla hesaplanmıştır. Doğrultucu moment katsayıları ise $GZ-\phi_v$ eğrisiyle ifade ettiğimiz parametrelere bağlı olarak aşağıdaki gibi ifade edilmiştir.

$$\delta_l=\frac{B_L}{(I_x+J_x)} \tag{6.17}$$

$$\delta_n=\frac{B_N}{(I_x+J_x)} \tag{6.18}$$

$$m_1=\frac{\Delta GM}{I_x+J_x} \tag{6.19}$$

$$m_3=\frac{4\omega\phi^2}{\phi_v^{\,2}}\left(\frac{3A_{\phi_v}}{GM\phi_v^{\,2}}-1\right) \tag{6.20}$$

$$m_5=-\frac{3\omega_\phi^{\,2}}{\phi_v 4}\left(\frac{4A_{\phi_v}}{GM\phi_v^{\,2}}-1\right) \tag{6.21}$$

Bu hesaplamalardan sonra doğrusal olmayan hareket denklemi, normu sınırlı olarak parametre belirsizliği içeren bir sistem şeklinde durum uzay formunda aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$\dot{x}(t)=\left(A+\Delta A\right)x(t)+B_1w(t)+B_2u(t) \tag{6.22}$$

$$z(t)=\left(C+DK\right)x(t) \tag{6.23}$$

Burada $x(t)\in\Re^n$ durum vektörünü, $u(t)\in\Re^m$ kontrol girişini, $w(t)\in\Re^m$ bozucu girişini ifade etmektedir. A, B_1, B_2, C ve D ile de uygun boyutlu sistemin bilinen durum uzay matrisleri ifade edilmiştir.

Parametre belirsizliği ise aşağıdaki şekilde ifade edilmiştir,

$$\Delta A = GF(t)E_A \tag{6.24}$$

Burada G ve E_A sabit, bilinen uygun boyutlu gerçek matrisleri ifade etmektedir. $F(t)$ ise her $t\geq 0$ için $F^T(t)F(t)\leq I$ şartını karşılayan Lebesgue ölçülebilir bilinmeyen matris fonksiyonunu belirtmektedir.

Matematik modelle ilişkili olarak 6.23 ve 6.24 nolu denklemlerde ifade edilen durum uzay matrisleri aşağıdaki gibi yazılmıştır.

$$A=\begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -m1-((m3_{max}+m5_{max})/2) & -\delta l-((\delta 2_{max}+\delta 2_{min})-((\delta n_{max})/2) & -((\delta 1_{max}+\delta 1_{min})/2) \\ 0 & 0 & -\Upsilon 1 \end{bmatrix} \tag{6.25}$$

$$B_1=\begin{bmatrix} 0 & \lambda_e(\omega_e \text{ ^ } 2)\alpha_m & 0 \end{bmatrix}^T \tag{6.26}$$

$$B_2=\begin{bmatrix} 0 & 0 & \Upsilon 2 \end{bmatrix}^T \tag{6.27}$$

$$C_1=\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \tag{6.28}$$

$$D_{11}=\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T \tag{6.29}$$

$$D_{12} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^T \tag{6.30}$$

$$G = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ -((m3_{max} + m5_{max})/2) & -((\delta 2_{max} - \delta 2_{min})/2) & -((\delta 1_{max} - \delta 1_{min})/2) \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \tag{6.31}$$

$$E_A = I_{3x3} \tag{6.32}$$

Yukarıda ifade edilen $\Upsilon 1$ ve $\Upsilon 2$ sabit değerlerdir, $\delta 1_{max}$, $\delta 1_{min}$, $\delta 2_{max}$, $\delta 2_{min}$, δn_{max}, $m3_{max}$ ve $m5_{max}$ değerleri ise aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır.

$$\delta 1_{max} = (\rho * (V_{max})^2 * Af * Cl * lf)/I_x + J_x \tag{6.33}$$

$$\delta 1_{min} = (\rho * (V_{min})^2 * Af * Cl * lf)/I_x + J_x \tag{6.34}$$

$$\delta 2_{max} = (\rho * (V_{max}) * Af * Cl * lf^2)/I_x + J_x \tag{6.35}$$

$$\delta 2_{min} = (\rho * (V_{min}) * Af * Cl * lf^2)/I_x + J_x \tag{6.36}$$

$$\delta n_{max} = (bn * \dot{\phi}_{max}) \tag{6.37}$$

$$m3_{max} = (m3 * (\phi_{max})^2) \tag{6.38}$$

$$m5_{max} = (m5 * (\phi_{max})^4) \tag{6.39}$$

Kayıcı teknenin yalpa hareketinin dengelenmesi için DME tabanlı dayanıklı ve doyumlu H_∞ durum geri beslemeli denetleyici tasarımı gerçekleştirilirken durum geri beslemeli kontrol kanununu doğrusal bir fonksiyon olarak $u = Kx$ olarak ifade ederek kapalı çevrim sistemi son haliyle aşağıdaki gibi ifade edilmiştir.

$$\dot{x}(t) = \left(A + GF(t)E_A + B_2K\right)x(t) + B_1w(t) \tag{6.40}$$

$$z(t) = \left(C + DK\right)x(t) \tag{6.41}$$

Burada $x(t) \in \Re^n$ durum vektörünü, $w(t) \in \Re^m$ ise bozucu girişini ifade etmektedir. A, B_1 ve B_2 ile de uygun boyutlu durum uzay matrisleri belirtilmiştir.

$V := KX$ şeklinde değişken dönüşümü yapılarak eşitsizlikler elde edilmiştir. Buna ek olarak doyum kısıtı aşağıdaki gibi verilmiştir.

$$\begin{bmatrix} X & V^T \\ V & u_{\max}^2 I \end{bmatrix} > 0 \qquad (6.42)$$

$\gamma > 0$, şartıyla, $X = X^T > 0$, $V = V^T > 0$, kısıtları altında çözerek $u(t) = VX^{-1}x(t) = Kx(t)$ olarak hesaplanmıştır.

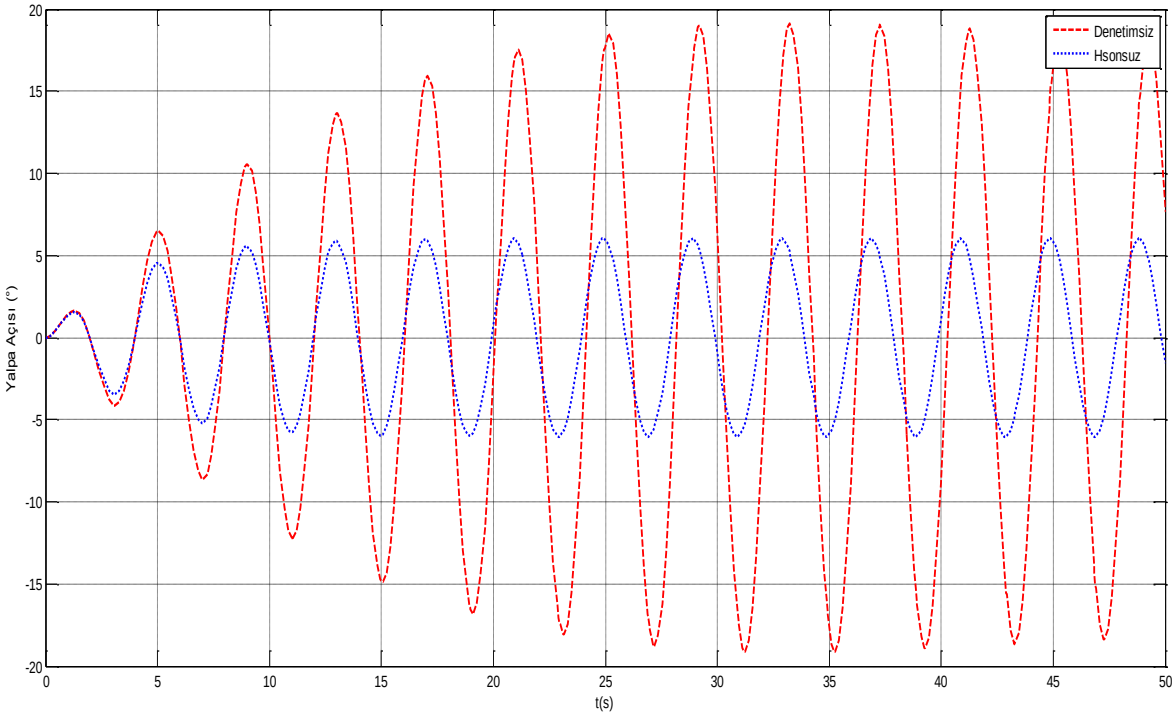
6.4 Benzetim Çalışmaları

Benzetim çalışmaları bir kayıcı tekne için denklem 6.13'de ifade edilen yalpa hareketi matematik modelinin kullanılmasıyla gerçekleştirilmiştir. Seyir halindeki kayıcı teknenin farklı hızlarına karşılık gelen sönüm katsayıları İkeda'nın metoduyla belirlenmiş ve analizlerde kullanılmıştır. Kayıcı teknenin maksimum hızı belirlenirken yalpa hareketinin kontrol açısından denetlenebilirliği belirleyici olmuştur. Belirlenen başlangıç hızı ise seyir esnasında kabul edilebilecek minimum hız olarak ifade edilmiştir. Doyum matrisindeki değerlerin maksimum %57 oranında değiştiği kabul edildiğinde, hareketin kararlılığı bozulmamış ve bu kabulle DME tabanlı dayanaklı doyumlu denetleyici tasarımı gerçekleştirilmiş, kontrol matrisleri ifade edilmiş ve sonrasında farklı hızlar için yapılan analizler grafiklerle gösterilmiştir.

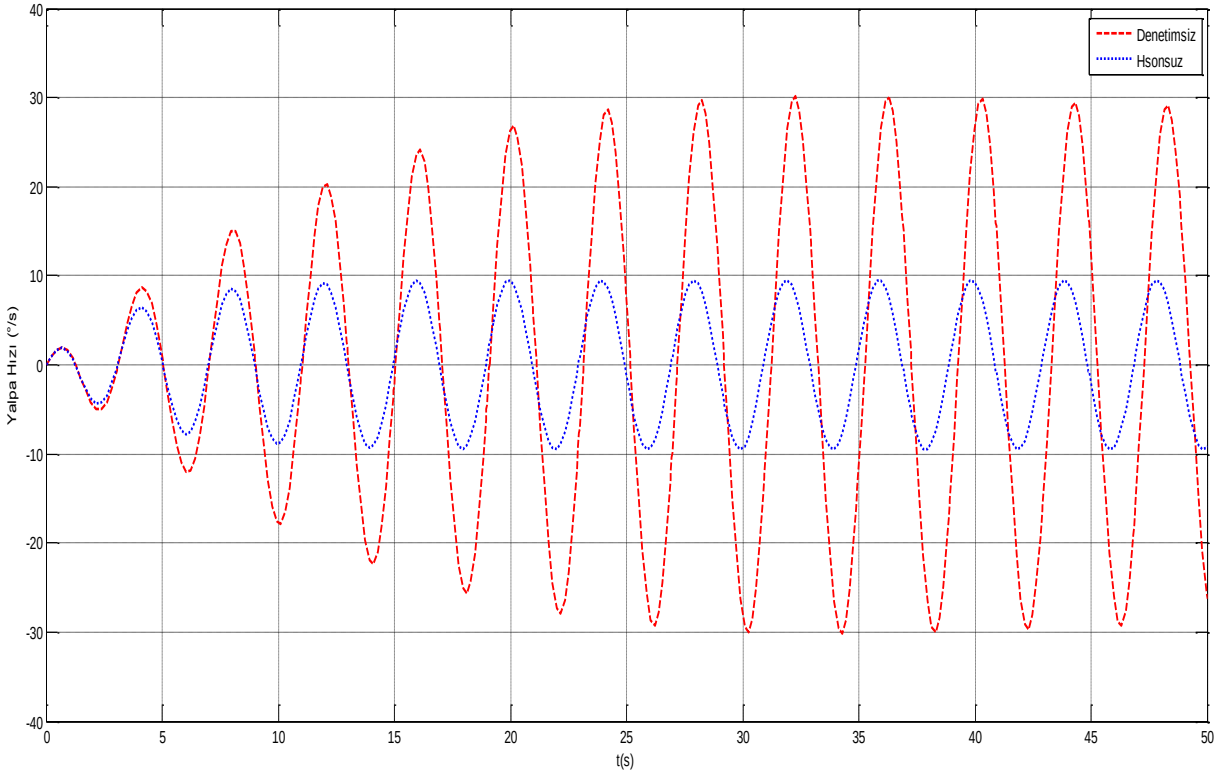
Hız = 5 kn kabulü ile elde edilen kontrol matrisi aşağıdaki gibidir.

K_∞ doyumlu dayanıklı = [-0.5001 0.4027 -0.0158]

Yukarıda ifade edilen kontrol matrisi kullanılarak yapılan benzetim çalışması neticesinde, yalpa genlik ve hız grafikleri denetimli ve denetimsiz durumlar için Şekil 6.3ve 6.4'de, oransal olarak ise Çizelge 6.2'de gösterilmiştir.

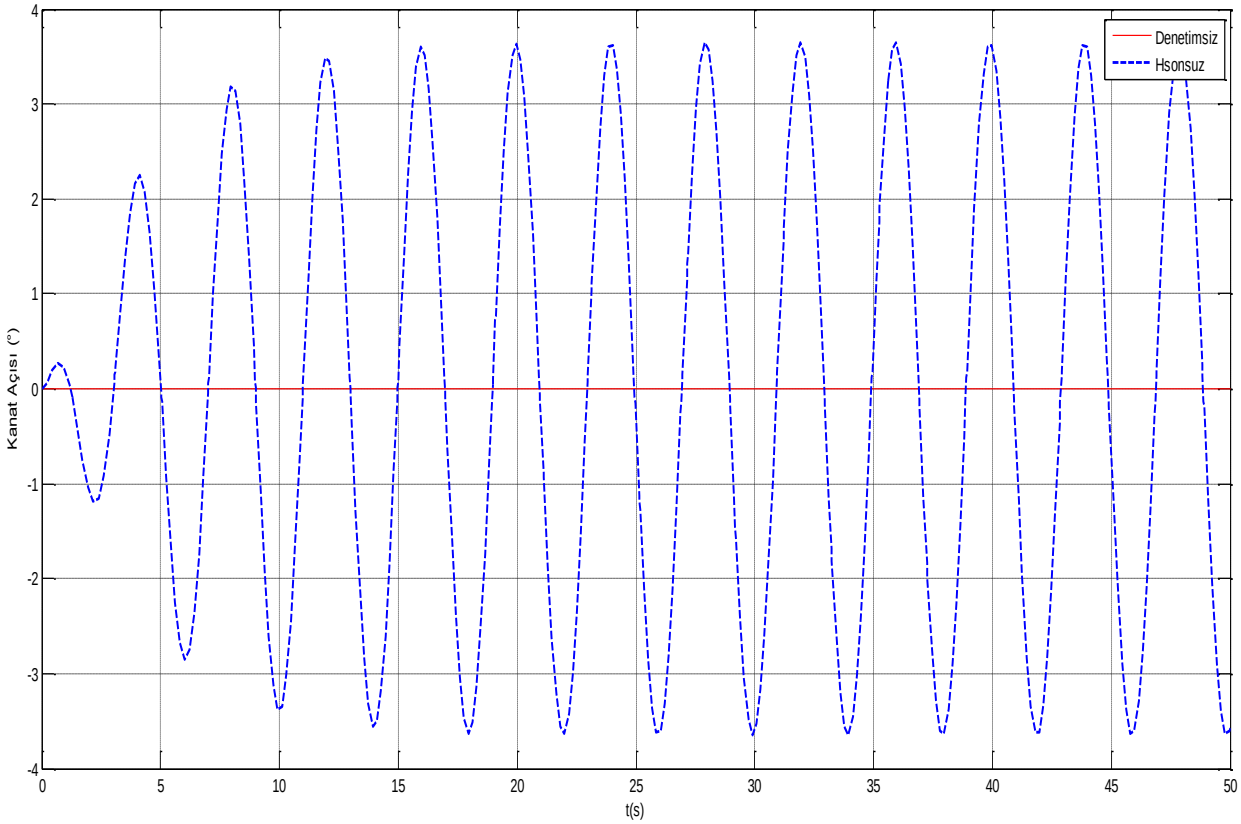


Şekil 6. 3 Yalpa genliğinin 5 knot için denetimli ve denetimsiz cevapları

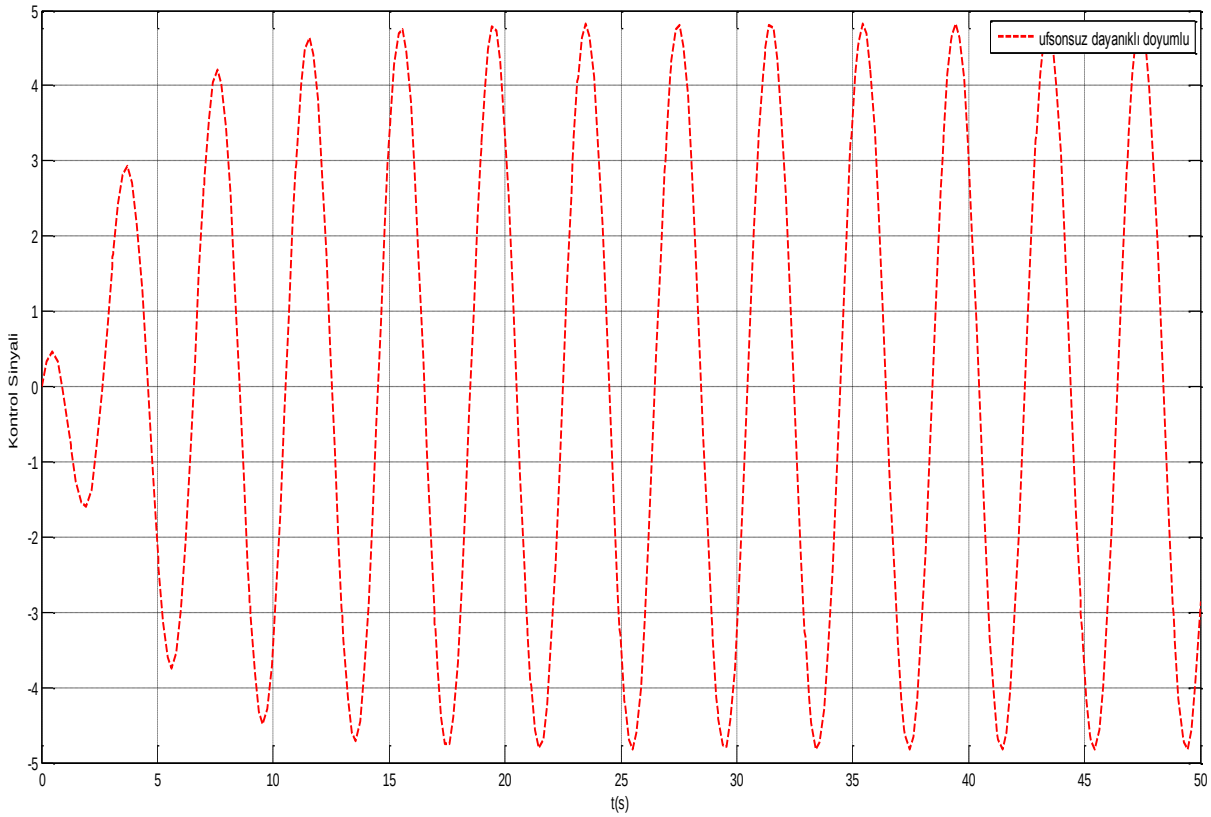


Şekil 6. 4 Yalpa açısal hızının 5 knot için denetimli ve denetimsiz cevapları

Kontrol sinyali ile kanat açısı arasındaki ilişkide, yapılan analizler neticesinde denetimli ve denetimsiz durumlar için Şekil 6.5 ve 6.6'da gösterilmiştir.



Şekil 6. 5 Kanat açısının 5 knot için denetimli ve denetimsiz durum cevapları

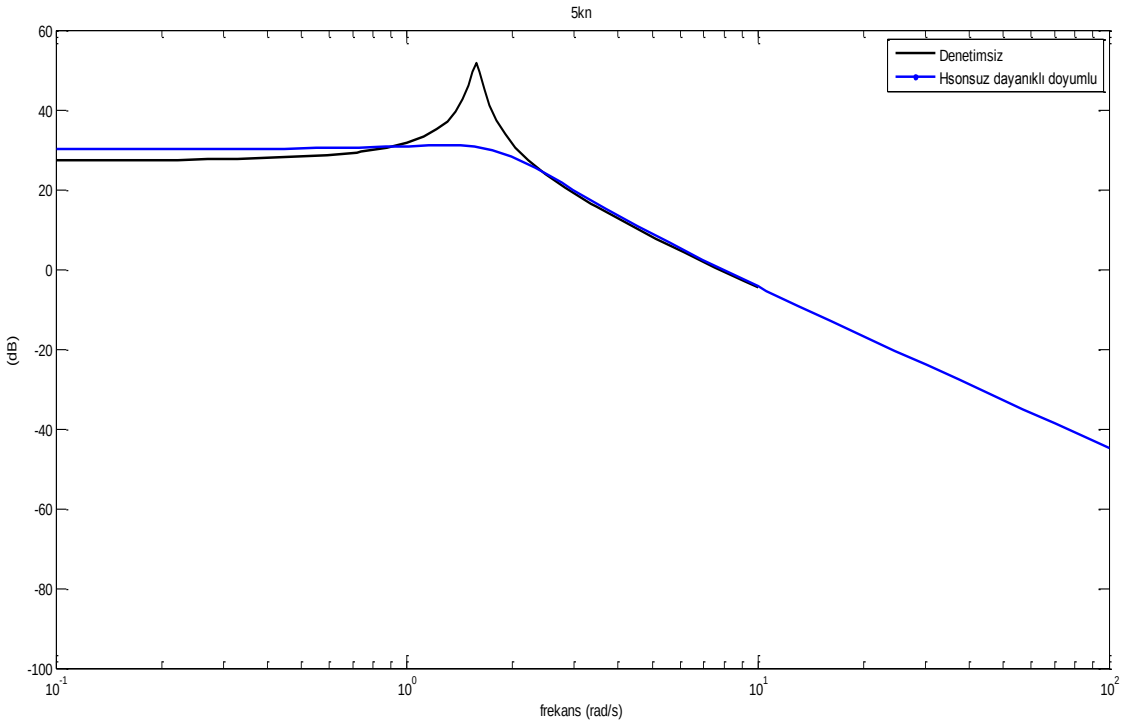


Şekil 6. 6 Kontrol sinyalinin 5 knot için denetimli ve denetimsiz durum cevapları

Çizelge 6. 2 Hız 5 knot kabulü ile karşılaştırmalar

	Denetimsiz	H∞ doyumlu dayanıklı denetleyici
Yalpa Açısı	19.14°	6.027°
Yalpa Hızı	30.13°/s	9.5°/s
Yalpa Açısındaki Azalma	-	%68.51
Yalpa Hızındaki Azalma	-	%68.46

Çizelge 6.2'de görüldüğü üzere denetimsiz duruma kıyasla, H∞ denetleyici yalpa açısını ve hızını %68'in üzerinde bir oranında azaltmıştır. Şekil 6.7 ile ifade edilen frekans grafiğinde ise, denetimsiz durumda yaklaşık 52 (dB) olan frekans tepesi değeri, H∞ denetleyici ile 32 (dB)'e düşürülmüştür. Bu durum denetleyicinin başarısını garanti etmekle beraber, H∞ denetleyicinin frekans tepesini doğası gereği önemli ölçüde azalltığını göstermiştir.

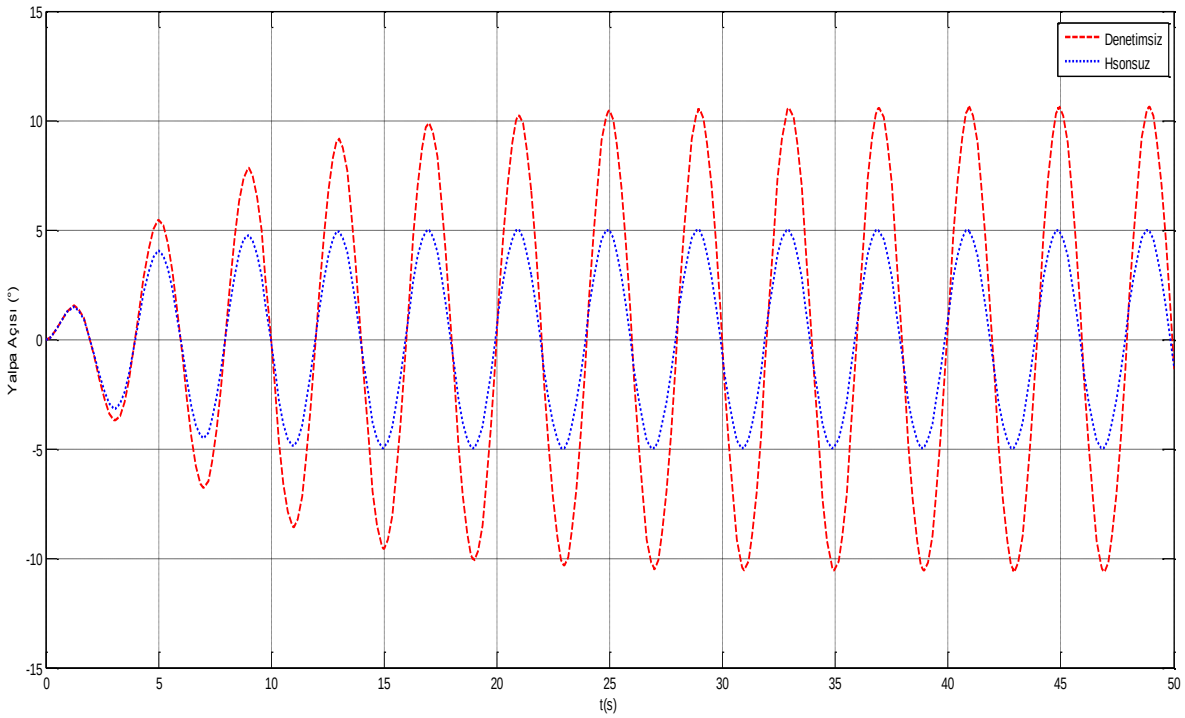


Şekil 6. 7 Hız 5 knot için denetimli ve denetimsiz frekans cevabı

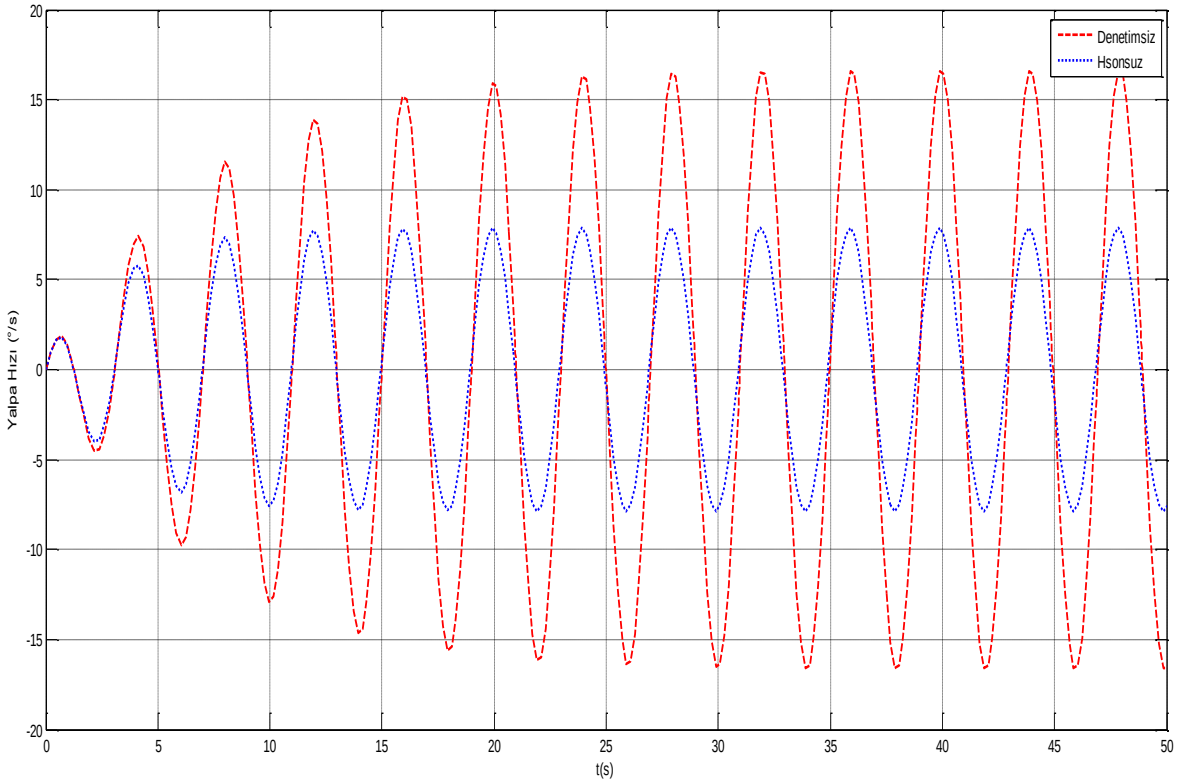
Hız = 8 kn kabulü ile elde edilen kontrol matrisi aşağıdaki gibidir.

K_∞ doyumlu dayanıklı = [-0.4326 0.3553 -0.0276]

Yukarıda ifade edilen kontrol matrisi kullanılarak yapılan benzetim çalışması neticesinde, yalpa genlik ve hız grafikleri denetimli ve denetimsiz durumlar için Şekil 6.8 ve 6.9'da, oransal olarak ise Çizelge 6.3'de gösterilmiştir.

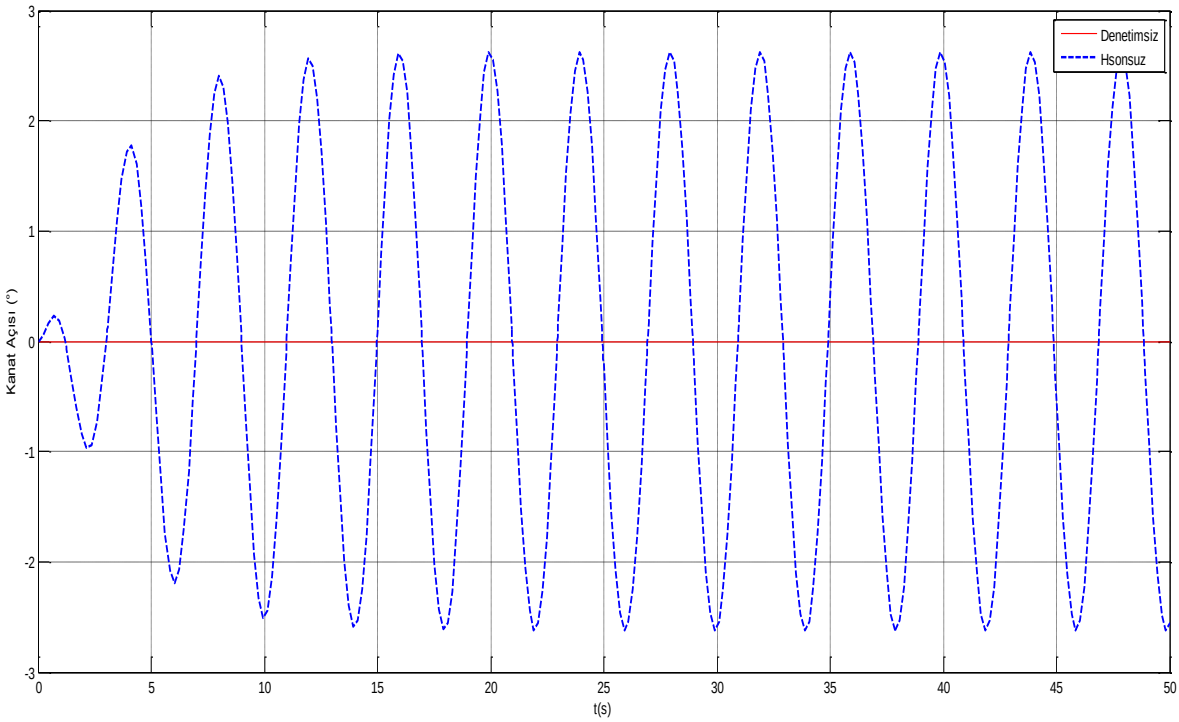


Şekil 6. 8 Yalpa genliğinin 8 knot için denetimli ve denetimsiz cevapları

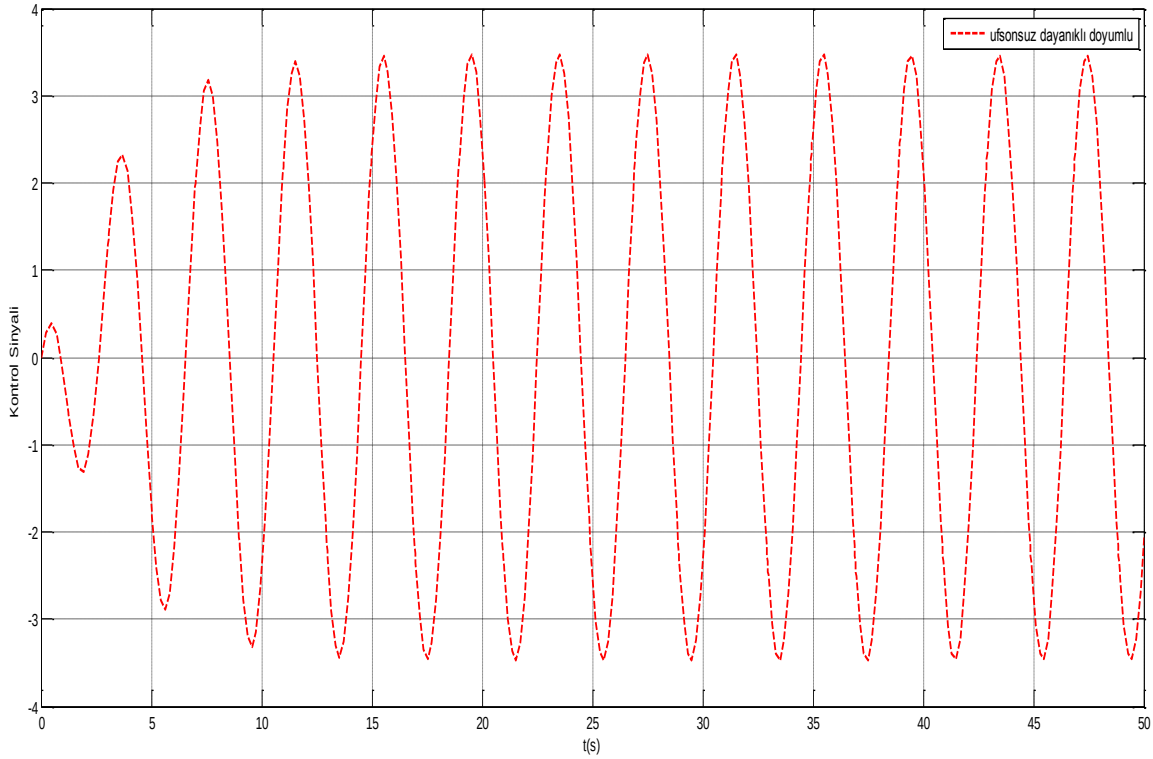


Şekil 6. 9 Yalpa açısal hızının 8 knot için denetimli ve denetimsiz cevapları

Kontrol sinyali ile kanat açısı arasındaki ilişkide, yapılan analizler neticesinde denetimli ve denetimsiz durumlar için Şekil 6.10 ve 6.11'de gösterilmiştir.



Şekil 6. 10 Kanat açısının 8 knot için denetimli ve denetimsiz durum cevapları

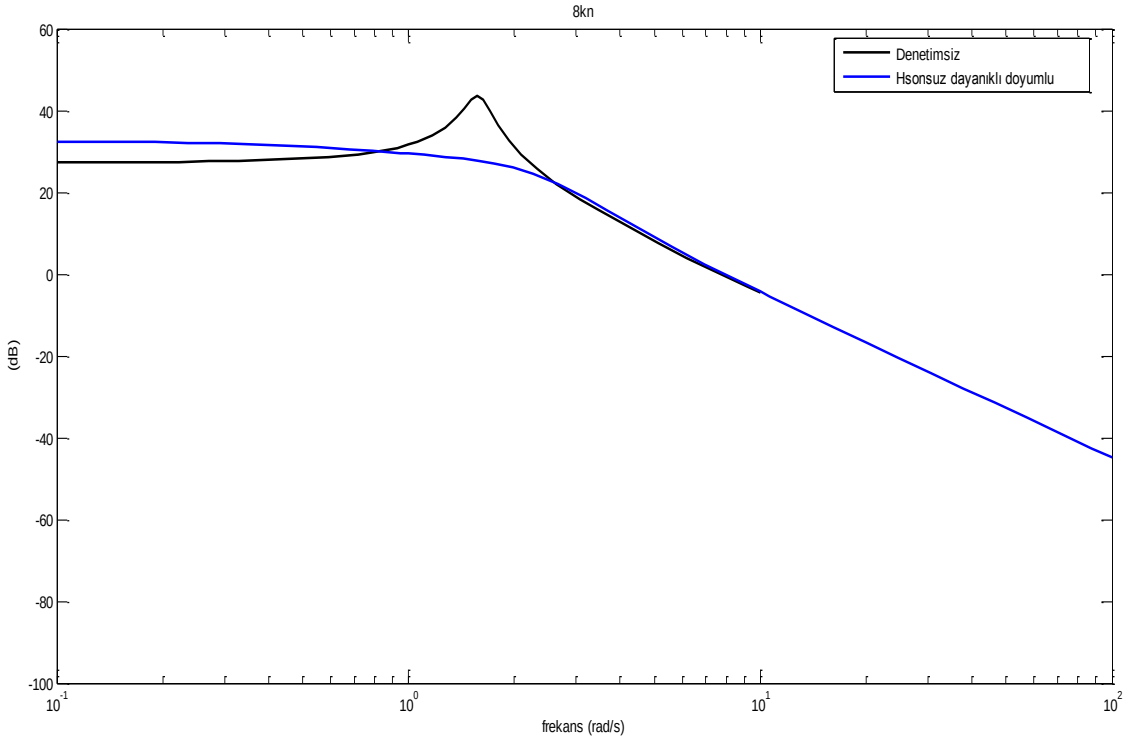


Şekil 6. 11 Kontrol sinyalinin 8 knot için denetimli ve denetimsiz durum cevapları

Çizelge 6. 3 Hız 8 knot kabulü ile karşılaştırmalar

	Denetimsiz	H∞ doyumlu dayanıklı denetleyici
Yalpa Açısı	10.58°	4.983°
Yalpa Hızı	16.62°/s	7.859°/s
Yalpa Açısındaki Azalma	-	%52.90
Yalpa Hızındaki Azalma	-	%52.71

Çizelge 6.3'de görüldüğü üzere denetimsiz duruma kıyasla, H∞ denetleyici yalpa açısını ve hızını %52'in üzerinde bir oranında azaltmıştır. Şekil 6.12 ile ifade edilen frekans grafiğinde ise, denetimsiz durumda yaklaşık 44 (dB) olan frekans tepesi değeri, H∞ denetleyici ile 28 (dB)'e düşürülmüştür. Bu durum denetleyicinin başarısını garanti etmekle beraber, H∞ denetleyicinin frekans tepesini doğası gereği önemli ölçüde azalltığını göstermiştir.

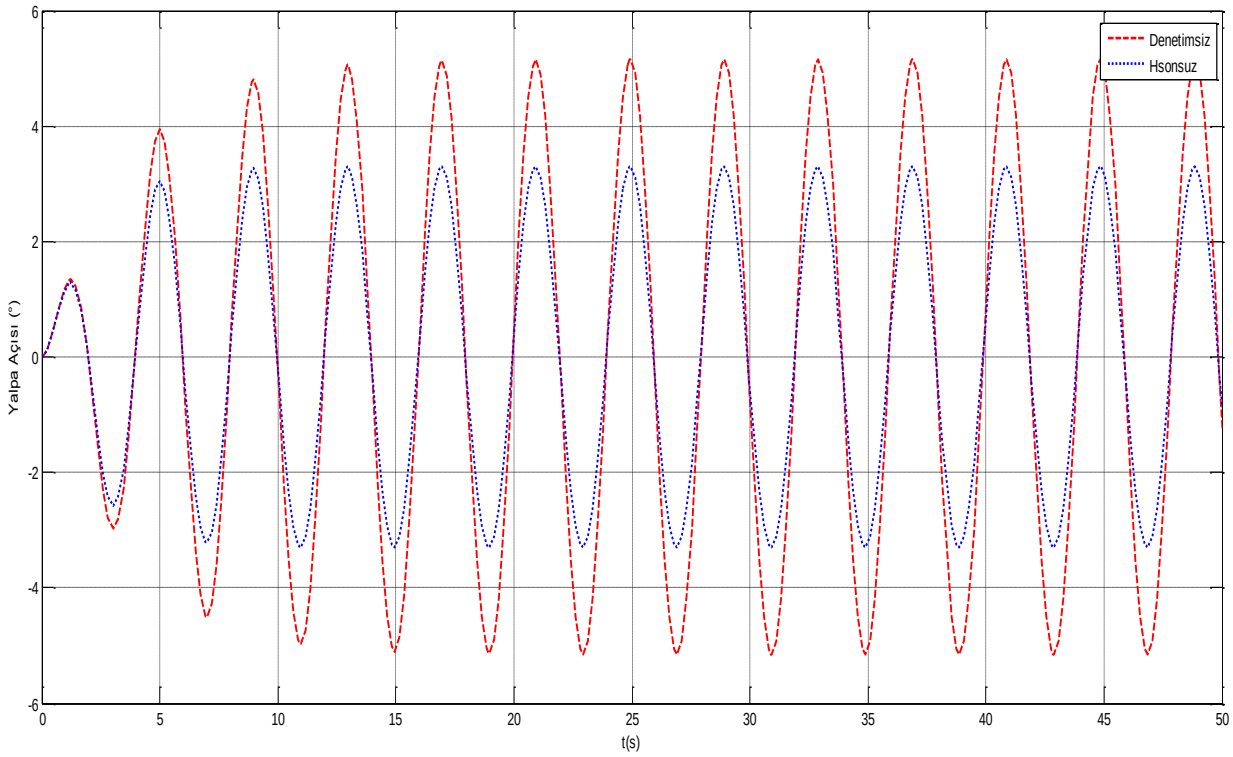


Şekil 6. 12 Hız 8 knot için denetimli ve denetimsiz frekans cevabı

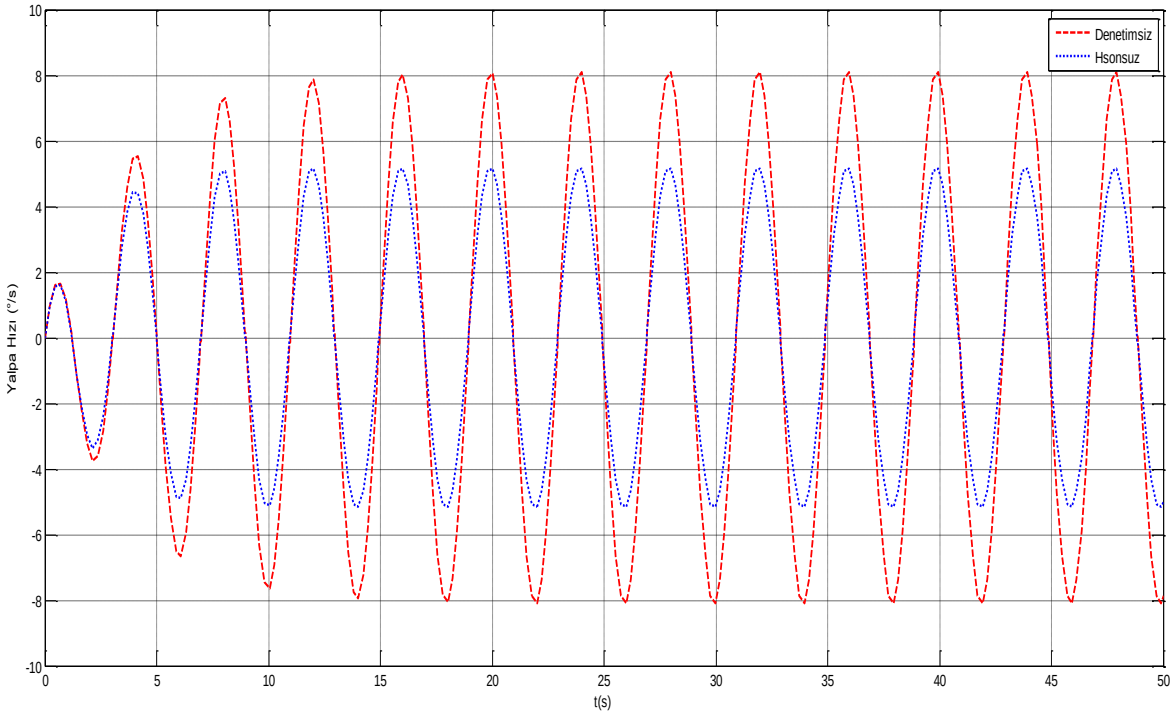
Hız = 12 kn kabulü ile elde edilen kontrol matrisi aşağıdaki gibidir.

K_∞ doyumlu dayanıklı = [-0.4284 0.3622 -0.0530]

Yukarıda ifade edilen kontrol matrisi kullanılarak yapılan benzetim çalışması neticesinde, yalpa genlik ve hız grafikleri denetimli ve denetimsiz durumlar için Şekil 6.13 ve 6.14'de, oransal olarak ise Çizelge 6.4'de gösterilmiştir.

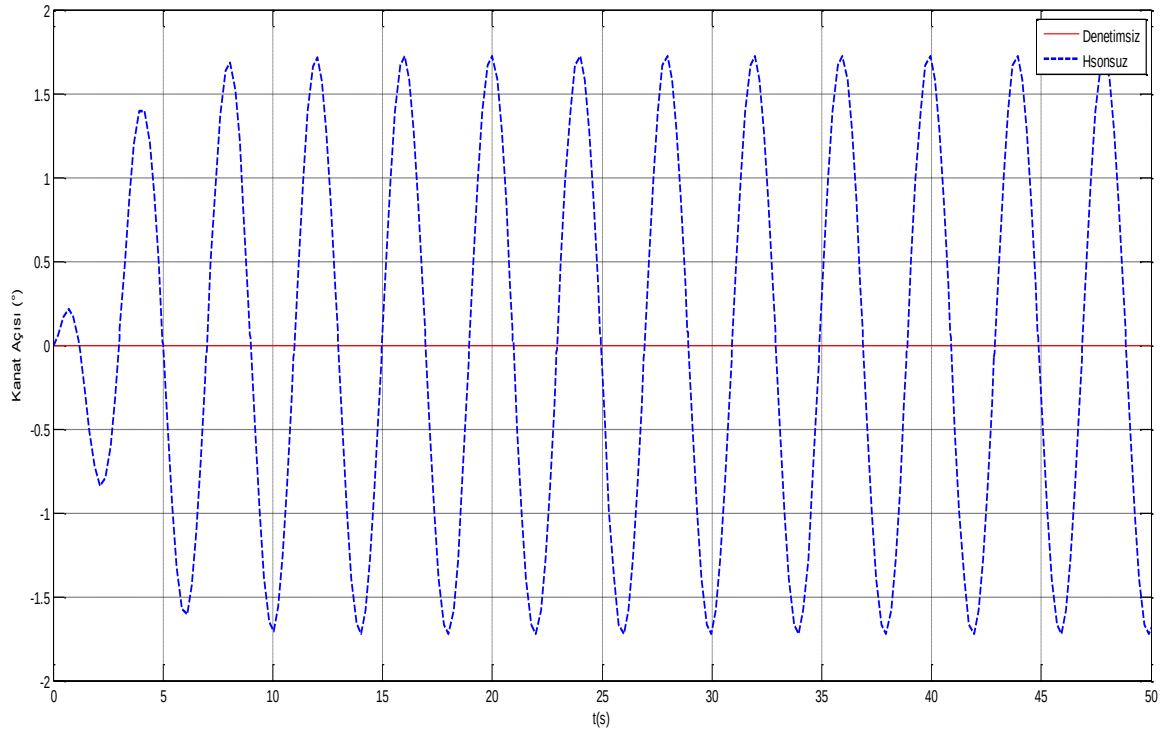


Şekil 6. 13 Yalpa genliğinin 12 knot için denetimli ve denetimsiz cevapları

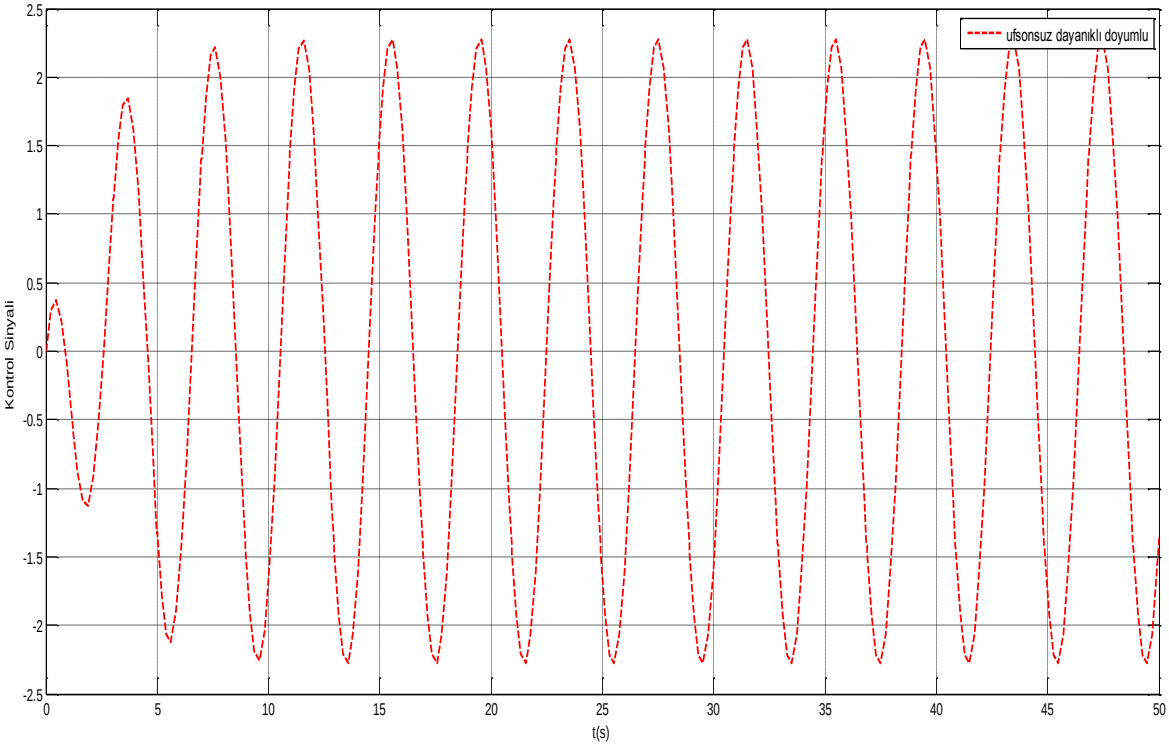


Şekil 6. 14 Yalpa açısal hızının 12 knot için denetimli ve denetimsiz cevapları

Kontrol sinyali ile kanat açısı arasındaki ilişkide, yapılan analizler neticesinde denetimli ve denetimsiz durumlar için Şekil 6.15 ve 6.16'da gösterilmiştir.



Şekil 6. 15 Kanat açısının 12 knot için denetimli ve denetimsiz durum cevapları

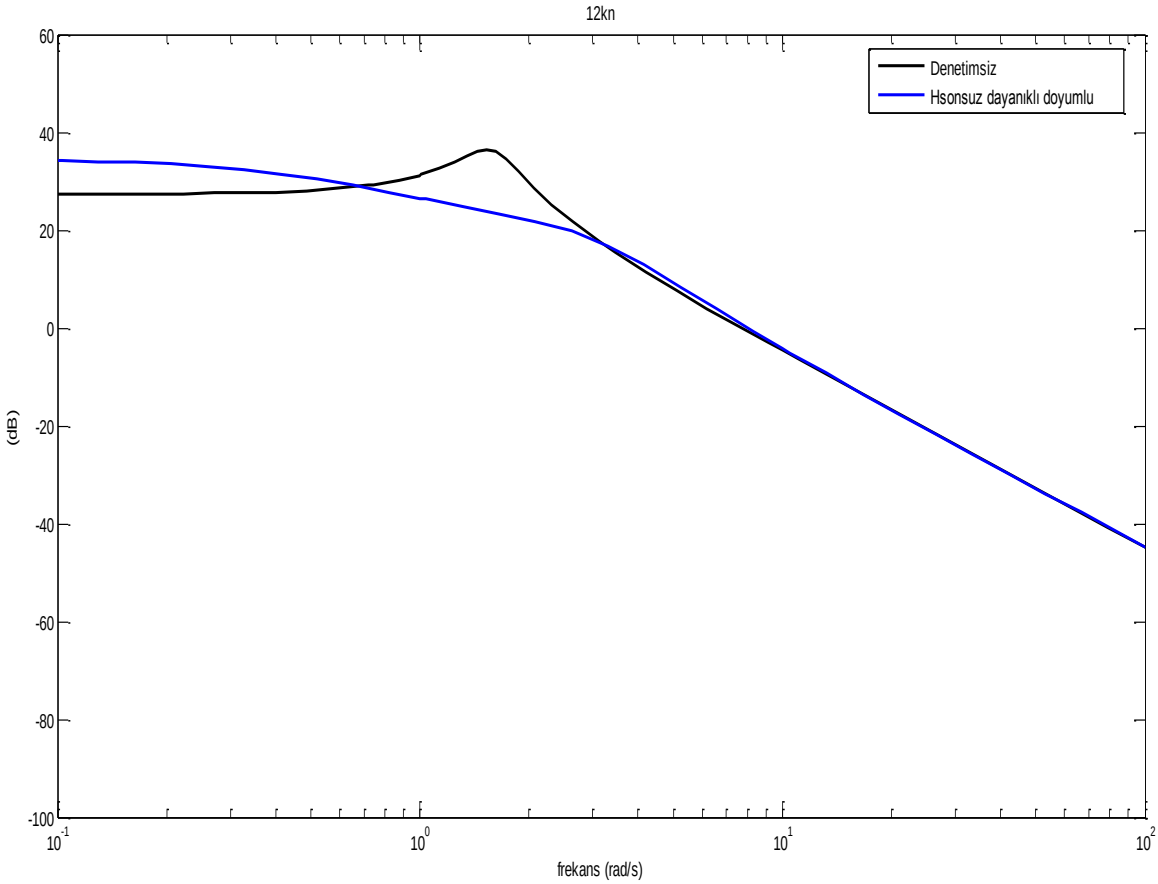


Şekil 6. 16 Kontrol sinyalinin 12 knot için denetimli ve denetimsiz durum cevapları

Çizelge 6. 4 Hız 12 knot kabulü ile karşılaştırmalar

	Denetimsiz	H_∞ doyumlu dayanıklı denetleyici
Yalpa Açısı	5.154°	3.297°
Yalpa Hızı	8.092°/s	5.16°/s
Yalpa Açısındaki Azalma	-	%36.03
Yalpa Hızındaki Azalma	-	%36.23

Çizelge 6.4'de görüldüğü üzere denetimsiz duruma kıyasla, H_∞ denetleyici yalpa açısını ve hızını %36'nın üzerinde bir oranında azaltmıştır. Şekil 6.12 ile ifade edilen frekans grafiğinde ise, denetimsiz durumda yaklaşık 37 (dB) olan frekans tepesi değeri, H_∞ denetleyici ile 24 (dB)'e düşürülmüştür. Bu durum denetleyicinin başarısını garanti etmekle beraber, H_∞ denetleyicinin frekans tepesini doğası gereği önemli ölçüde azalltığını göstermiştir.

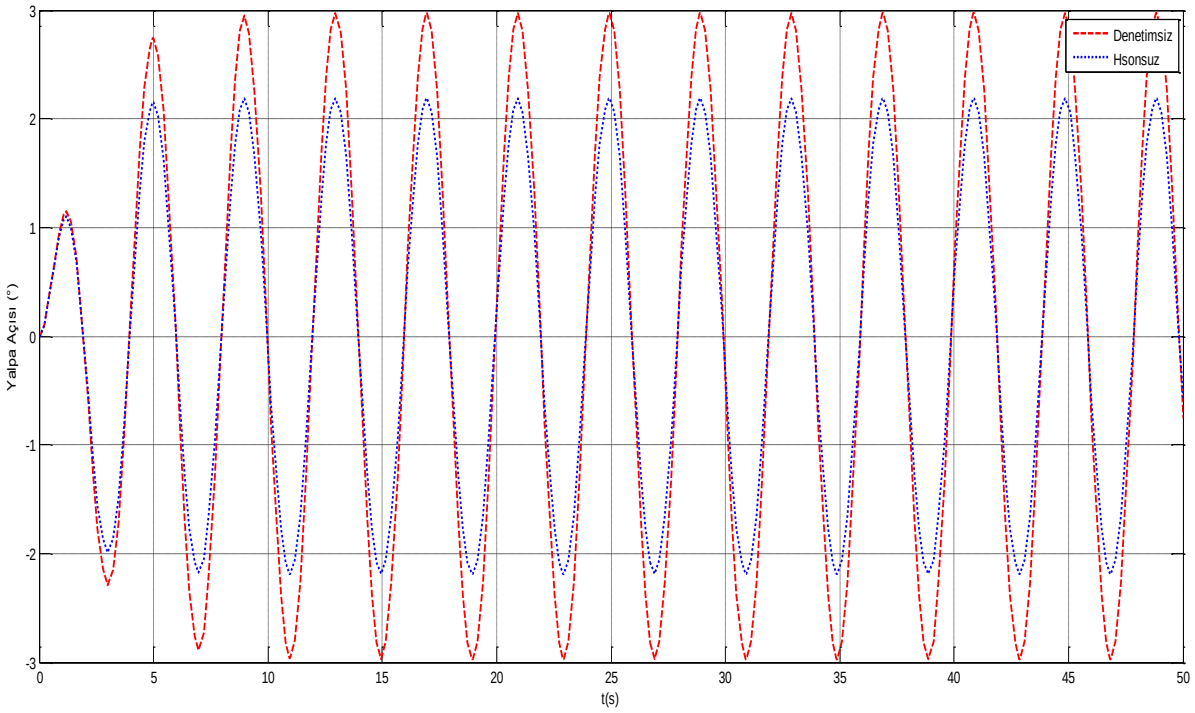


Şekil 6. 17 Hız 12 knot için denetimli ve denetimsiz frekans cevabı

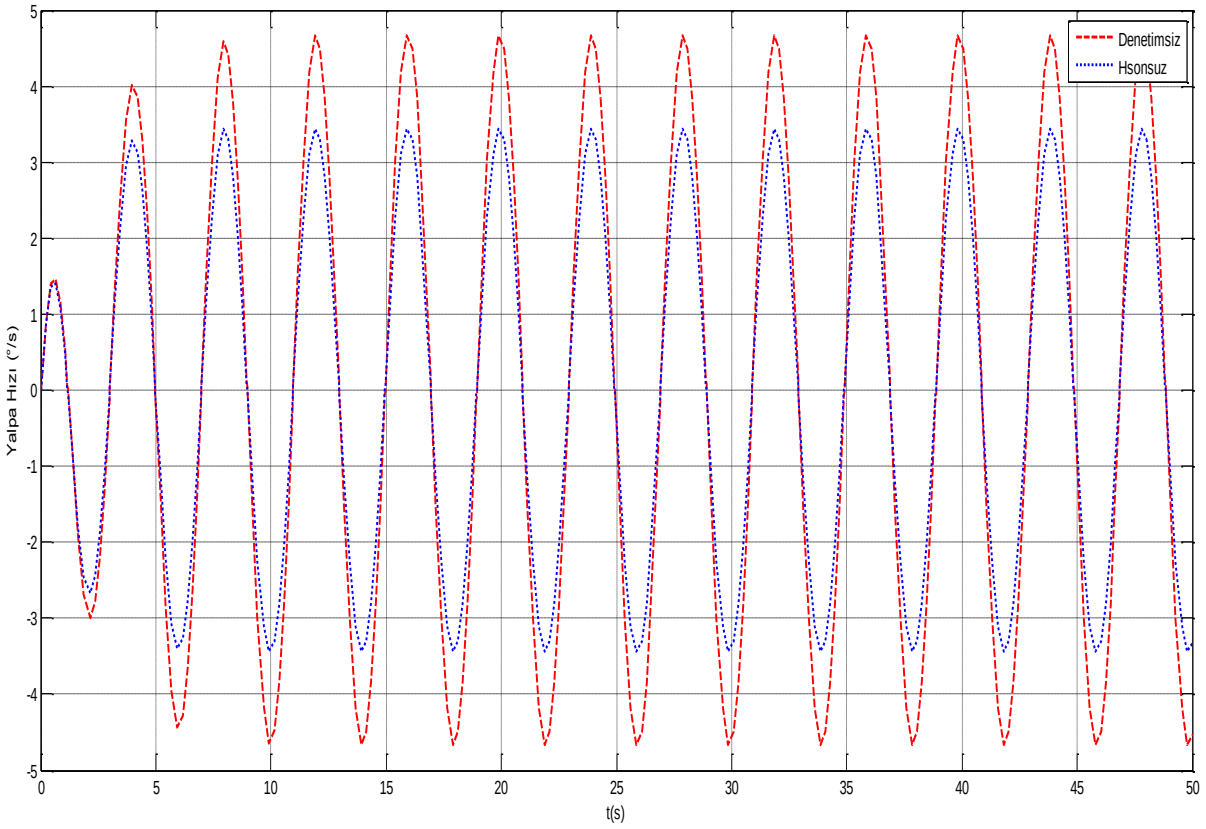
Hız= 16 kn kabulü ile elde edilen kontrol matrisi aşağıdaki gibidir.

K_∞ doyumlu dayanıklı = [-0.4651 0.4113 -0.0957]

Yukarıda ifade edilen kontrol matrisi kullanılarak yapılan benzetim çalışması neticesinde, yalpa genlik ve hız grafikleri denetimli ve denetimsiz durumlar için Şekil 6.18 ve 6.19'da, oransal olarak ise Çizelge 6.5'de gösterilmiştir.

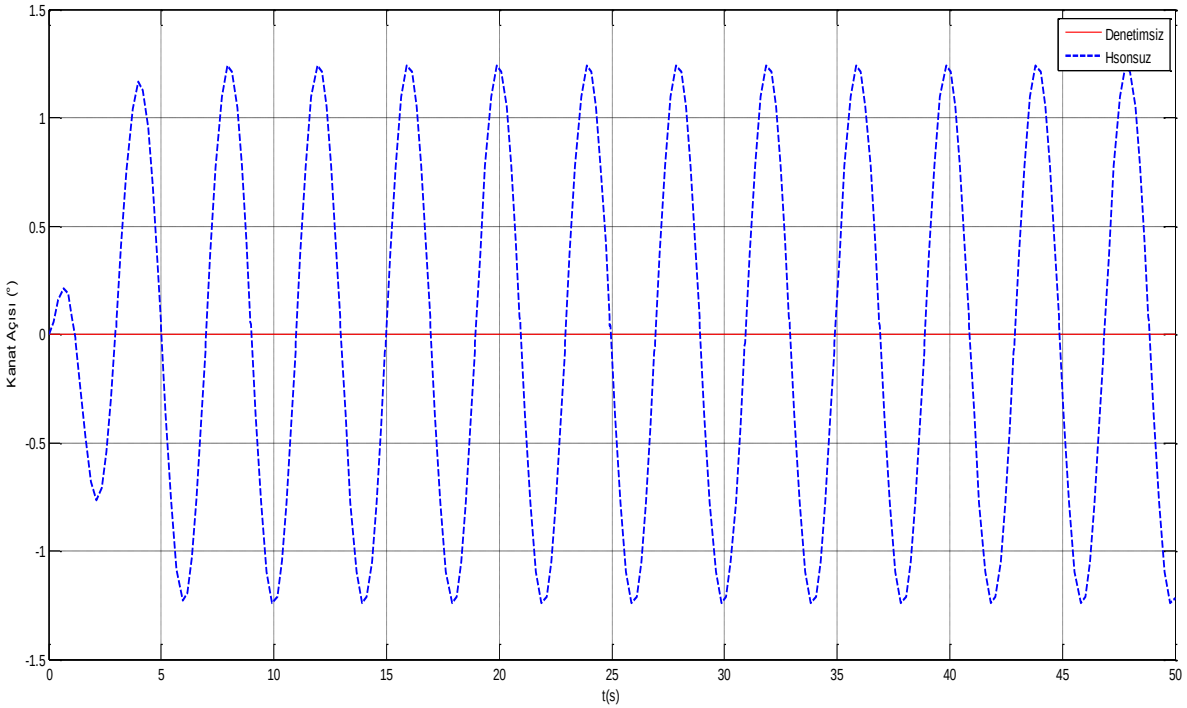


Şekil 6. 18 Yalpa genliğinin 16 knot için denetimli ve denetimsiz cevapları

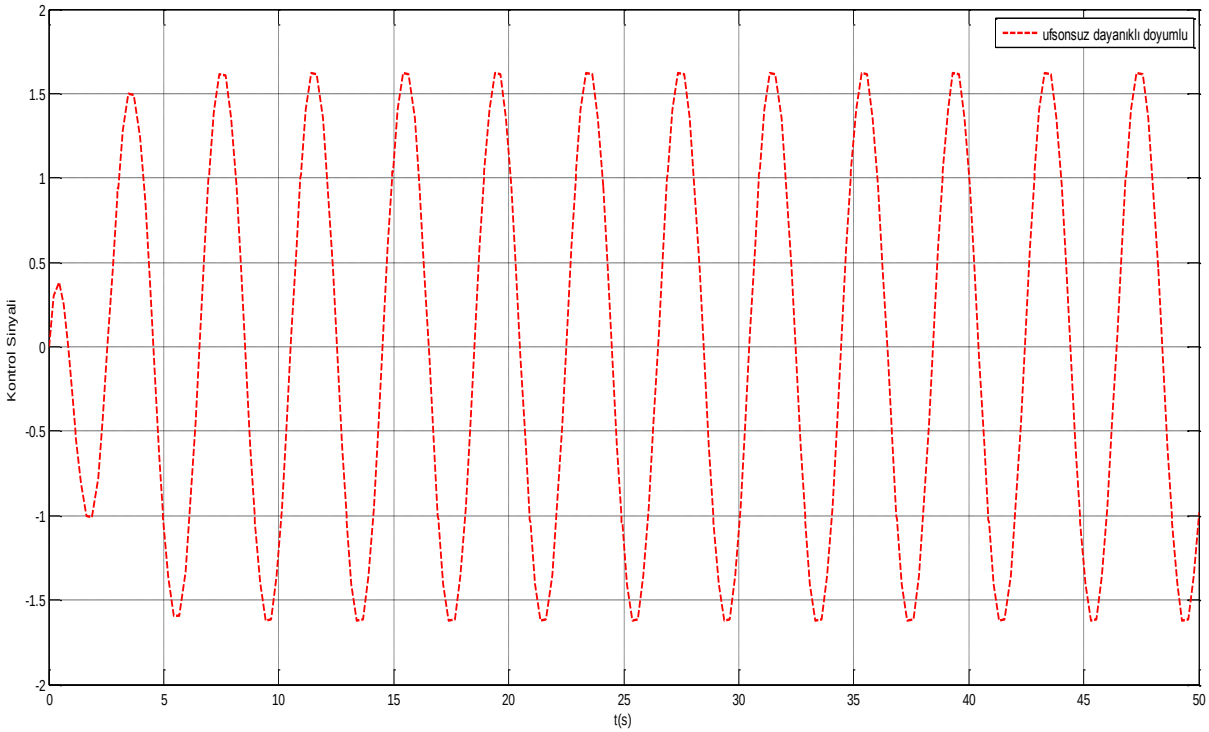


Şekil 6. 19 Yalpa açısal hızının 16 knot için denetimli ve denetimsiz cevapları

Kontrol sinyali ile kanat açısı arasındaki ilişkide, yapılan analizler neticesinde denetimli ve denetimsiz durumlar için Şekil 6.20 ve 6.21'de gösterilmiştir.



Şekil 6. 20 Kanat açısının 16 knot için denetimli ve denetimsiz durum cevapları

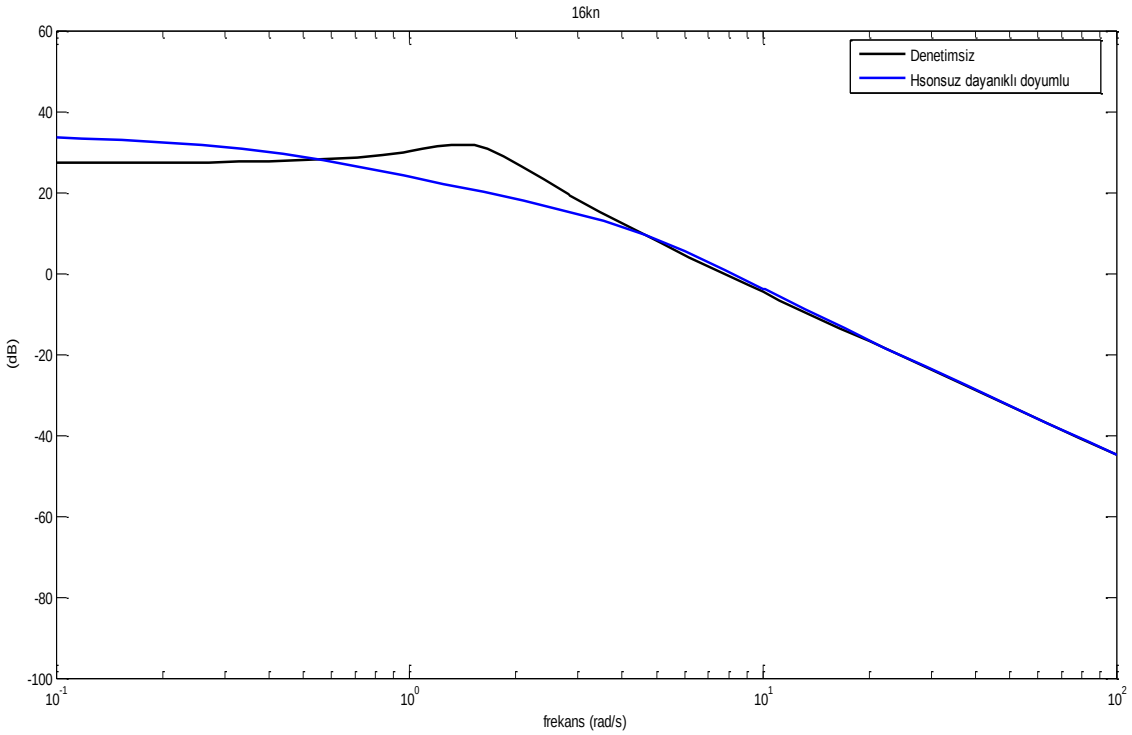


Şekil 6. 21 Kontrol sinyalinin 16 knot için denetimli ve denetimsiz durum cevapları

Çizelge 6. 5 Hız 16 knot kabulü ile karşılaştırmalar

	Denetimsiz	H∞ doyumlu dayanıklı denetleyici
Yalpa Açısı	2.969 °	2.186 °
Yalpa Hızı	4.667 °/s	3.438°/s
Yalpa Açısındaki Azalma	-	%26.37
Yalpa Hızındaki Azalma	-	%26.33

Çizelge 6.5'de görüldüğü üzere denetimsiz duruma kıyasla, H∞ denetleyici yalpa açısını ve hızını %26'nın üzerinde bir oranında azaltmıştır. Şekil 6.22 ile ifade edilen frekans grafiğinde ise, denetimsiz durumda yaklaşık 32 (dB) olan frekans tepesi değeri, H∞ denetleyici ile 18 (dB)'e düşürülmüştür. Bu durum denetleyicinin başarısını garanti etmekle beraber, H∞ denetleyicinin frekans tepesini doğası gereği önemli ölçüde azalltığını göstermiştir



Şekil 6. 22 Hız 16 knot için denetimli ve denetimsiz frekans cevabı

Benzetim çalışmalarından alınan sonuçlardanda anlaşılacağı üzere dizayn edilen denetleyici hızlı teknenin yalpa hareketini farklı hızlarda ve doyum matrisindeki parametrelerin maksimum %57 oranında değiştiği kabul edildiği durumda minimize etmeyi başarmıştır, frekans tepesininde denetleyiciyle önemli ölçüde bastırılması ile seyir halinde hareketin güvenilir noktalarda olduğu kanıtlanmaktadır. Kayıcı tekneler yapıları itibariyle hız arttığında su ile irtibatları kesilme noktasına gelir ve rijit bir hal alır ve bu hız artışı İkeda'nın yönteminden de elde edilen sonuçlardan anlaşılacağı üzere sönüm değerini artırmıştır. Sönüm değerindeki artış doğal olarak teknenin salınımını azaltmıştır. Yüksek hızlarda teknenin su üzerinde yükselmesi dengeleyici kanat sistemin oluşturduğu kaldırma etkisini azaltacağından, denetleyicinin başarısı da bu noktada düşmüştür. Denetleyici dizayn edilirken maksimum kanat açısı 25° kabul edilmiş, benzetim çalışmarından da alınan sonuçlara bakıldığında, kontrol sinyali ve kanat açısı değerlerinin bu değeri aşmadığı yani kontrol kuvvetlerinin kabul edilebilir olduğu görülmüştür. Hız, sönüm değerleri ve doyum matrisindeki parametrelerin de yüksek oranda değiştiği kabul edilerek yapılan bu çalışma, bütün bu zor şartlara rağmen farklı durumlar için geminin yalpa hareketini kararlı halde tutarak, Çizelge 6.2, 6.3, 6.4 ve 6.5'de ifade edildiği gibi yalpa genliklerinde yaklaşık % 27 ile % 69 arasında iyileşme sağlamış ve yalpa dengeleme problemi için optimal bir çözüm sunarak, anlık değişen hidrodinamik katsayılar kullanılarak yapılacak denetleyici tasarımları için temel bir çalışma olmuştur.

BÖLÜM 7

SONUÇ VE ÖNERİLER

Dalga ve rüzgar gibi bozucu etkiler altında ilerleyen bir geminin altı farklı hareket yaptığı bilinmektedir. Bu hareketler içerisinde seyir güvenliği açısından büyük genlikli olan yalpa hareketinin sönümlenmesi kritik bir önem taşımaktadır. Bu nedenle yalpa hareketine sebep olan bütün parametrelerin net bir şekilde hesaplanması ve değerlendirilmesi gereklidir. Hesaplanan bu hidrodinamik katsayılar geminin yalpa hareketinin kararlılık sınırlarını doğrudan etkilemektedir.

Bu çalışmada balıkçı teknesi ve kayıcı tekne olmak üzere iki farklı gemi tipi kullanılmıştır. Bu iki teknenin yalpa hareketinin değişimi aynı koşullarda değerlendirilmiştir. Harekete ait hidrodinamik katsayılar ampirik formüller [46] ve İkeda'nın [86] önerdiği yarı-ampirik metot kullanılarak belirlenmiştir. Yalpa hareketinin sönümlenmesi amacıyla aktif dengeleyici kanat sistemi tercih edilmiştir. Dengeleyici kanat sisteminin oluşturduğu boyutsuz kaldırma katsayıları her iki gemi tipi için farklı hücum açılarında aynı sınır koşullarında Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği metodu kullanılarak belirlenmiş ve kanat açısının değişimine bağlı olarak ifade edilmiştir. Yalpa hareketine ve dengeleyici kanat sistemine ait bütün parametreler belirlendikten sonra farklı denetleyicilerin yalpa sönümündeki performansları değerlendirilmiştir.

Balıkçı teknesi için Geri Adımlamalı denetleyici, DME tabanlı H_2 ve H_∞ durum geri beslemeli denetleyici tasarımı gerçekleştirilmiştir. Balıkçı teknesinde seyir ve avlanma şartları düşünüldüğünde farklı *GM* durumlarında çalışabilme özelliği öne çıkmaktadır. Geri Adımlamalı denetleyicinin tasarlanan tek bir *GM* durumunda oldukça başarılı

olduğu görülmüştür. Ancak değişen *GM* durumları için kararsız durum sergilediği ifade edilerek özellikle dinamik değişimlere yeni kontrol kazançları ile cevap veren, dengeleyici kanat için belirlenen kıstasları aşmadan çalışabilen, DME tabanlı H_2 ve H_∞ durum geri beslemeli denetleyici tasarımı gerçekleştirilmiştir. Bu denetleyicilerin üç farklı *GM* durumunda başarılı olduğu benzetim çalışmaları neticesinde gösterilmiştir. H_2 ve H_∞ durum geri beslemeli denetleyiciler kendi aralarında karşılaştırıldığında H_∞ denetleyicinin yalpa genliklerini geminin *GM* durumu azalsa bile, Çizelge 5.1, 5.2 ve 5.3'de ifade edildiği gibi % 80'nin üzerinde azaltabildiği görülmüştür. Kontrol sinyali çıkışı ve kanat açısı ilişkisine bakıldığında denetleyicinin belirlenen kısıtları aşmadığını yani kontrol kuvvetlerinin kabul edilebilir olduğu ifade edilebilmektedir. H_∞ durum geri beslemeli denetleyicinin sistemin en kötü durumunu değerlendirerek çalışması ve başarılı sonuçlar vermesi kayıcı tekne için yapılacak uygulamaya da referans olmuştur.

Kayıcı teknelerin yapısı itibariyle seyir esnasında kimi zaman su ile irtibatlarının kesildiği bilinmektedir. Hızlı hareket ettikleri ve manevra durumları düşünüldüğünde, kayıcı teknelerin devrilmesine neden olabilecek yalpa hareketinin genliklerinin güvenilir düzeylere getirilmesi gerekmektedir. Değişen seyir durumlarının harekete ait hidrodinamik katsayıları da değiştirdiği bilinmektedir. Dolayısıyla özel bir amaç için kullanılan, hız ve manevra şartlarının çabuk değiştiği bu gemi tipleri için, parametrelerin farklılaştığı durumlarda bile hareketi kararlı hale getirecek denetleyici ihtiyacı oluşmaktadır. Bu noktada bir önceki denetleyici dizaynında DME tabanlı H_∞ durum geri beslemeli denetleyicinin yalpa genlikleri üzerinde başarısı görülmüştür. Bu denetleyici yapısını dayanıklı hale getirerek, hareketin kararlılığını bozmadan doyum matrisindeki değerlerinde belli oranda değiştiği kabulüyle, eyleyici doyumlu DME tabanlı dayanıklı H_∞ durum geri beslemeli denetleyici dizayn edilmiştir. Farklı hızlarda benzetim çalışmaları gerçekleştirilmiş, bu hızlara karşılık gelen sönüm katsayıları İkeda'nın önerdiği deneysel metotlara dayalı yarı-ampirik yöntemle hesaplanmıştır. Bu duruma ek olarak hareketin kararlılığını bozmadan doyum matrisindeki değerlerin de maksimum % 57 oranında değiştiği kabul edilerek benzetim çalışmaları tamamlanmıştır. Yapılan incelemeler neticesinde dört farklı hızda denetleyicinin hareketin genliklerini azalttığı, frekans tepesini de başarılı ölçüde düşürdüğü görülmektedir. Ancak kayıcı tekne için düşünüldüğünde teknenin hafif ve hız

aralıklarının değişken olması kontrol edilebilirliğini zorlaştırmıştır. Tekne hızlandıkça sönüm doğal olarak artmış ve tekne dengeli hale gelmiştir. Ayrıca yüksek hızlarda teknenin su ile irtibatının kesilecek düzeye gelmesi, dengeleyici kanat sisteminin su altındaki etki alanını azaltmış, dolayısıyla yüksek hızlarda yeterli kaldırma teknenin karakteristik durumu nedeniyle oluşamamıştır. Bütün bu zorlayıcı durumlara rağmen tasarlanan denetleyici doyum matrisindeki parametrelerin %57 oranında değiştiği durumda ve 16 kn gibi yüksek bir hızda dahi hareketi daha kararlı hale getirerek, Çizelge 6.5'de ifade edildiği gibi yalpa genliklerinde yaklaşık %27 oranında bir iyileşme sağlamıştır. Tekne formu daha ağır hale getirilir ise bu iyileşmenin artacağı öngörülmektedir.

Sonuç olarak tasarlanan bu denetleyici parametrelerin belli oranda değiştiği kabulüyle bütün gemi tipleri için önerilmektedir. Bu denetleyici prosedürü gemiler için seyir esnasında anlık değişen hidrodinamik katsayılar kullanılarak yapılacak sonraki çalışmalar için temel oluşturmaktadır.

KAYNAKLAR

[1] Faltinsen, O. M., (1975). ‘’Motions of large structures in waves at zero Froude number’’, Norske Veritas, (90).

[2] Miles, M. D., (1986). ‘’Measurement of six-degree of freedom model motions using strapdown accelerometers’’, In 21st American Towing Tank Conference, (369-375).

[3] Mulk, M. T. U. ve Falzarano, J., (1994). ‘’Complete six-degrees-of-freedom nonlinear ship rolling motion’’, Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering, 116(4):191-201.

[4] Carrica, P. M., Wilson, R. V., Noack, R. W. ve Stern, F., (2007). ‘’Ship motions using single-phase level set with dynamic overset grids’’, Computers & fluids, 36(9): 1415-1433.

[5] Xiu-Feng, Z., Yong, Y. ve Yi-Cheng, J., (2007). ‘’Ship motion mathematical model with six degrees of freedom in regular wave [J]’’, Journal of Traffic and Transportation Engineering, 3: 008.

[6] Sabuncu, T., (1985), “Gemi Manevraları ve Kontrolü”, İTÜ Gemi İnşaatı ve Deniz Bilimleri.

[7] Fossen, T. I., (1994). ‘’Guidance and control of ocean vehicles’’ John Wiley & Sons Inc.

[8] Pauling, J. R. ve Rosenberg, R. M., (1959). ‘’On Unstable Ship Motions Resulting from Nonlinear Couplings’’, Journal of Ship Researchs.

[9] Schmitke, R. T., (1978). ‘’Ship sway, roll, and yaw motions in oblique seas’’, (No. Paper No. 1).

[10] Neves, M. A. ve Rodriguez, C. A., (2006). ‘’On unstable ship motions resulting from strong non-linear coupling. Ocean Engineering’’, 33(14): 1853-1883.

[11] Perez, T. ve Blanke, M., (2002). ‘’Mathematical ship modelling for control applications’’, Ørsted-DTU, Automation.

[12] Su, B., Riska, K. ve Moan, T., (2010). ‘’A numerical method for the prediction of ship performance in level ice’’, Cold Regions Science and Technology, 60(3):177-188.

[13] Seo, M. G. ve Kim, Y., (2011). ‘’Numerical analysis on ship maneuvering coupled with ship motion in waves’’, Ocean Engineering, 38(17):1934-1945.

[14] Feat, G.R., Jones, D.G. ve Marshfield W.B., (1983). ‘’Capsizing with additional heeling Stocohastic Criterion for highly nonlinear roll motion’’, Trans. RINA, 125: 1-11.

[15] Taylan, M., (2007). ‘’On the parametric resonance of container ships", Ocean Engineering’’, 34:1021-1027.

[16] Bulian, G., (2004). ‘’Approximate analytical response curve for a parametrically excited highly nonlinear 1-DOF system with an application to ship roll motion prediction’’, Nonlinear Analysis, 5:725-748.

[17] M. Taylan., (2000). “The Effect of Nonlinear Damping and Restoring in Ship Rolling”, Ocean Engineering,: 27:921-932.

[18] S. Sun., J. Hu., J. Yin. ve T. Jiang., (2014). “Design of Simplified Fuzzy Controller for Ship Fin Stabilizer”, Proc. of the 33rd Chinese Control Conference, Nanjing, China, 4534-4538.

[19] Surendran, S., Lee, S. K., Reddy, J. V. R. ve Lee, G. (2005). ‘’Non-linear roll dynamics of a Ro-Ro ship in waves’’, Ocean Engineering, 32(14):1818-1828.

[20] Fossen, T. I., (2011). ‘’Handbook of marine craft hydrodynamics and motion control’’, John Wiley & Sons.

[21] Gu, J. Y., (2004). ‘’Nonlinear rolling motion of ship in random beam seas. Journal of Marine Science and Technology’’, 12(4): 273-279.

[22] Bulian, G., (2005). ‘’Nonlinear parametric rolling in regular waves—a general procedure for the analytical approximation of the GZ curve and its use in time domain simulations’’, Ocean Engineering, 32(3): 309-330.

[23] Yang, C. L., Zhu, R. C., Mıao, G. P. ve Ju, F. A. N. (2013). ‘’Numerical simulation of rolling for 3-D ship with forward speed and nonlinear damping analysis’’, Journal of Hydrodynamics, Ser. B, 25(1):148-155.

[24] Liu, Y., Hu, A., Han, F. ve Lu, Y., (2015). ‘’Stability analysis of nonlinear ship-roll dynamics under wind and wave’’, Chaos, Solitons & Fractals, 76:32-39

[25] Lypunov, A.M., (1892), “The General Problem of the Stability of motion”, Princeton Univ.Press.

[26] Price, W. G., (1975). ‘’A stability analysis of the roll motion of a ship in an irregular seaway’’, International Shipbuilding Progress, 22(247).

[27] Resatözkan, İ., (1981). ‘’Total (practical) stability of ships’’, Ocean Engineering, 8(6): 551-598.

[28] Nayfeh, A. H. ve Sanchez, N. E., (1990). ‘’Stability and complicated rolling responses of ships in regular beam seas’’, International shipbuilding progress, 37(410): 177-198.

[29] Falzarano, J. M., Shaw, S. W. ve Troesch, A. W., (1992). ‘’Application of global methods for analyzing dynamical systems to ship rolling motion and capsizing. International Journal of Bifurcation and Chaos’’, 2(01): 101-115.

[30] Senjanovi, I., (1994). ‘’Harmonic analysis of nonlinear oscillations of cubic dynamical systems’’.

[31] Surendran, S. ve Reddy, J. V. R., (2003). ‘’Numerical simulation of ship stability for dynamic environment’’, Ocean Engineering, 30(10):1305-1317

[32] Arnold, L., Chueshov, I. ve Ochs, G., (2004). ‘’Stability and capsizing of ships in random sea–a survey’’, Nonlinear Dynamics, 36(2): 135-179.

[33] Chadwick, J.H. Jr., (1955). “On the Stabilization of Roll”, Transaction of the Society of Naval Architects and Marine Engineers, 63:237-280.

[34] Kitagawa, G., (1984). ‘’Statistical analysis of the AR type ship's autopilot system’’, Journal of dynamic systems, measurement, and control, 106, 193.

[35] Hickey, N. A., Johnson, M. A., Katebi, M. R. ve Grimble, M. J., (1999). ‘’PID controller optimisation for fin roll stabilisation’’, In Control Applications, 1999. Proceedings of the 1999 IEEE International Conference on, IEEE, 2: 1785-1790.

[36] Surendran, S., Lee, S. K. ve Kim, S. Y., (2007). ‘’Studies on an algorithm to control the roll motion using active fins’’, Ocean Engineering, 34(3): 542-551.

[37] Kula, K., (2014). ‘’Cascade control system of fin stabilizers’’, In Methods and Models in Automation and Robotics (MMAR), 2014 19th International Conference On, IEEE, 868-873.

[38] Ertogan, M., Ertugrul, S. ve Taylan, M. (2016). ‘’Application of particle swarm optimized PDD 2 control for ship roll motion with active fins’’, IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 21(2): 1004-1014.

[39] Van Amerongen, J., Van der Klugt, P. G. M. ve van Nauta Lemke, H. R., (1990). ‘’Rudder roll stabilization for ships’’, Automatica, 26(4): 679-690.

[40] Fortuna, L. ve Muscato, G., (1996). ‘’A roll stabilization system for a monohull ship: modeling, identification, and adaptive control’’, IEEE Transactions on control systems technology, 4(1):18-28.

[41] Lauvdal, T. ve Fossen, T. I., (1998). ‘’Rudder roll stabilization of ships subject to input rate saturation using a gain scheduled control law’’, In Proc. of the IFAC Conference on Control Applications in Marine Systems (CAMS'98), Fukuoka, Japan, 121-127.

[42] Yu, L., Ma, N. ve Gu, X., (2012). ‘’Study on Parametric Roll and Its Rudder Stabilization Based on Unified Seakeeping and Maneuvering Model’’, In 11th International conference on the Stability of Ships and Ocean Vehicles, Greece

[43] Gawad, A. F. A., Ragab, S. A., Nayfeh, A. H. ve Mook, D. T., (2001). ''Roll stabilization by anti-roll passive tanks'', Ocean Engineering, 28(5): 457-469.

[44] Marzouk, O. A. ve Nayfeh, A. H., (2009). ''Control of ship roll using passive and active anti-roll tanks'', Ocean engineering, 36(9):661-671.

[45] Alarçin, F., (2007). ''Internal model control using neural network for ship roll stabilization'', Journal of Marine science and Technology, 15(2):141-147.

[46] Guan, W. ve Zhang, X. K., (2010). ''Concise robust fin roll stabilizer design based on integrator backstepping and CGSA'', In Systems and Control in Aeronautics and Astronautics (ISSCAA), 2010 3rd International Symposium on, IEEE, 1392-1397.

[47] Chunmei, H., Yu, W., Man, L., Shuyan, D. ve Zongyan, Y., (2010). ''Research on Lift Control System of Single Wing Fin Stabilizer at Zero Speed'', In Computer Research and Development, 2010 Second International Conference on, IEEE, 811-814.

[48] Ghassemi, H., Dadmarzi, F., Ghadimi, P. ve Ommani, B., (2010). ''Neural network-PID controller for roll fin stabilizer'', Polish Maritime Research, 17(2): 23-28.

[49] Lee, S., Rhee, K. P. ve Choi, J. W., (2011). ''Design of the roll stabilization controller, using fin stabilizers and pod propellers'' Applied Ocean Research, 33(4):229-239.

[50] Luo, W., Lv, W. ve Zou, Z., (2013). ''Robust fin control for ship roll stabilization by using functional-link neural networks'', In Advances in Neural Networks–ISNN 2013, Springer Berlin Heidelberg, 228-237

[51] Bai, R., (2014). ''Adaptive fuzzy output-feedback method applied to fin control for time-delay ship roll stabilization'', Mathematical Problems in Engineering, 2014.

[52] Li, R., Li, T., Bai, W. ve Du, X., (2016). ''An adaptive neural network approach for ship roll stabilization via fin control'', Neurocomputing, 173: 953-957.

[53] Ghassemi, H., Malekizade, H. ve Ashrafi, A., (2017). ''Control of Roll Motion of Fishing Vessel by Fin-Stabilizer Using PID Controller'', International Journal of Physics, 4(6): 181-186.

[54] Perez, T. ve Blanke, M., (2012). ''Ship roll damping control. Annual Reviews in Control'', 36(1):129-147.

[55] Guo, Z., Lin, Z., Yang, Q. ve Li, X., (2012). ''Research of Combined Control Scheme for Fast Catamaran Motion Control Using T-foils and Interceptors'', International Journal of Intelligent Engineering & Systems, 5(2): 1-8.

[56] Townsend, N. C. ve Shenoi, R. A., (2014). ''Control Strategies for Marine Gyrostabilizers. Oceanic Engineering'', IEEE Journal of, 39(2): 243-255.

[57] Karimi, M. H., Seif, M. S. ve Abbaspoor, M., (2015). ''A study on vertical motions of high-speed planing boats with automatically controlled stern

interceptors in calm water and head waves'', Ships and Offshore Structures, 10(3): 335-348.

[58] Saari, H. ve Khichane, E., (2013). ''Robust Rudder Roll Reduction of Container Ship''.

[59] Liu, L., Liu, Z. ve Zhang, J., (2014). ''LMI-based model predictive control for underactuated surface vessels with input constraints'', In Abstract and Applied Analysis (Vol. 2014), Hindawi Publishing Corporation.

[60] Wang, Y., Bai, L. ve Liu, S., (2014). ''Robust H 2/H 8 control of nonlinear system with differential uncertainty'', In Transportation Electrification Asia-Pacific (ITEC Asia-Pacific), 2014 IEEE Conference and Expo, IEEE, 1-6.

[61] Xiuyan, P., Shuli, J. ve Yakun, Y., (2014). ''A nonlinear control method based on fuzzy optimization algorithm for rudder roll stabilization'', In Control Conference (CCC), 2014 33rd Chinese ,IEEE, 7888-7891

[62] Li, H., Lu, S., Guo, C. ve Li, X., (2014). ''Adaptive fuzzy sliding mode controller design for ship fin stabilizer under rough sea conditions'', In Information and Automation (ICIA), 2014 IEEE International Conference on, IEEE, 566-571.

[63] Hinostroza, M. A., Luo, W. ve Soares, C. G., (2015). ''Robust fin control for ship roll stabilization based on L2-gain design'', Ocean Engineering, 94:126-131

[64] Malekizade, H., Jahed-Motlagh, M. R., Moaveni, B., Moarefianpour, A. ve Ghassemi, H., (2016). ''Robust model predictive control employed to the container ship roll motion using fin-stabilizer'', Cogent Engineering, 3(1):1235478.

[65] Yu, L., Che, C., Guo, J. ve Wang, H., (2016). ''The design of H∞ mixed sensitivity controller for fin/tank roll stabilizer'', In Control Conference (CCC), 2016 35th Chinese, IEEE, 2929-2933.

[66] Demirel, H., Doğrul, A., Sezen, S. ve Alarçin, F., (2017). ''Backsteppıng Control Of Nonlınear Roll Motıon For A Trawler Wıth Fın Stabılızer'', Internatıonal Journal Of Marıtıme Engıneerıng, 159: 205-212.

[67] Demirel, H. ve Alarçin, F. (2016). ''Lmı-Based H2 And H State-Feedback Controller Desıgn For Fın Stabılızer Of Nonlınear Roll Motıon Of A Fıshıng Boat'', Brodogradnja, 67(4): 91-107.

[68] Faltinsen, O. M., (2005). ''Hydrodynamics of high-speed marine vehicles'', Cambridge university press.

[69] Journée, J. M. J., (1992). ''Quick strip theory calculations in ship design'', Newcastle upon Tyne: sn.

[70] Perez, T., (2005). Ship Motion Control, Springer.

[71] Fossen, T. I., (2002). ''Marine control systems: guidance, navigation and control of ships, rigs and underwater vehicles''.

[72] Faltinsen, O., (1993). ''Sea loads on ships and offshore structures (Vol. 1)'', Cambridge university press.

[73] Grim, O., (1954).''Zur Stabilitat der Periodisch Erzwangenen Rollschwingungen eines Schiffes'', Ingenuer Archive,22: 55-59.

[74] Zborowski, A. ve Taylan, M., (1989). ''Evaluation of small vessels roll motion stability reserve for resonance conditions'', Society of Naval Architects and Marine Engineers (SNAME), Spring Meeting/STAR Symposium, New Orleans.

[75] Taylan, M., (1990). Application of nonlinear roll motion model for assessment of ship stability in waves, Ocean Eng Department Florida Institute of Technology Doktora Tezi, Florida.

[76] Z. B. Sheng. ve L. Z. Liu., Principle of naval architecture. Shanghai, China, 2004, 392-393.

[77] Doğrul, A., (2015). Gemi Direnci ve Serbest Yüzey Deformasyonlarının Deneysel ve Sayısal Olarak İncelenmesi. Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi.

[78] Uçar, G., (2005). Helikopter etrafındaki akışın sonlu hacimler yöntemiyle analizi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.

[79] Wilcox, D. C., (2006). ''Turbulence Modeling for CFD'', La Cãnada, CA, DCW Industries.

[80] Köse, S., Değişken Hızlı Rüzgar Türbinlerinin Nonlineer Kontrolü, Yüksek Lisans Tezi, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Kocaeli.

[81] Fossen, T. I. ve Strand, J. P., (1999). ''Tutorial on nonlinear backstepping: applications to ship control'', Modeling, identification and control, 20(2): 83.

[82] Lyapunov, A., (1947). ''Problema General de la Stabilite du Mouvement, Annals of Mathematical Studies'', Princeton University Press, Princeton.

[83] J.C. Doyle., K. Glover., P.P. Khargonekar. ve B.A. Francis., (1996). "State-space solutions to standart H2 and H∞ control problems", IEEE Transactions on Automatic Control, 34(8): 831-847.

[84] B.A. Francis., (1987). "A course in H∞ control theory", Lecture Notes in Control and Information Sciences 88, Edited by M. Thoma and A. Wyner, Springer-Verlag.

[85] Yazici, H. ve Güçlü, R., (2011). ''Active vibration control of seismic excited structural system using LMI-based mixed H2/H∞ state feedback controller'', Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences, 19(6): 839-849.

[86] Ikeda, Y. ve Katayama, T., (2000). ''Roll damping prediction method for a high-speed planing craft'', In Proceedings of the 7th International Conference on Stability of Ship and Ocean Vehicles, B: 532-541.

[87] Aydın, M. ve Akyıldız, H., (2005). "Türkiye Sularına Uygun Balıkçı Gemilerinin Stabilite Karakteristiklerinin İncelenmesi",İtü Dergisi/d Mühendislik 4(6): 3-12.

[88] Kawazoe, T., Nishikido, S. ve Wada, Y., (1994). ''Effect of fin area and control methods on reduction of roll motion with fin stabilizers'', Bulletin of the MESJ, 22(1):25-32.

EK-A

MATLAB KODLARI

Benzetim çalışmalarında kullanılan DME tabanlı denetleyicilere ait kıstas aşağıda verilmiştir

A-1 Genel Bilgiler

H_{sonsuz} Kısıtları

```
X=sdpvar(n,n);

N=sdpvar(m,n,'full');

gammas=sdpvar(1,1);

LMI1=[ A*X+X*A'+B2*N+N'*B2'          B1                X*C1'+N'*D12' ;
       B1'                      -gammas*eye(q)         D11' ;
       C1*X+D12*N                    D11             -gammas*eye(cost) ];

Fset=set(LMI1<0)+set(gammas>0)+set(X>0)

solution=solvesdp(Fset, gammas, sdpsettings('solver', 'sedumi'));
```

H_2 Kısıtları

```
X=sdpvar(n,n);

Q=sdpvar(n,n);

M=sdpvar(m,n,'full');
```

```
nu2=sdpvar(1,1);

LMI1= A*X+X*A'+B2*M+M'*B2'+B1*B1';

LMI2=[    Q          C1*X+D12*M ;
        (C1*X+D12*M)'      X        ];

Fset=set(LMI1<0)+set(nu2>0)+set(X>0)+set(LMI2>0)+set(trace(Q)<nu2);

solution=solvesdp(Fset, nu2, sdpsettings('solver', 'sedumi'));
```

H_{sonsuz} dayanıklı doyumlu

```
S=sdpvar(n,n);

X=sdpvar(n,n);

V=sdpvar(m,n,'full');

alfa=sdpvar(1,1);

gammads=sdpvar(1,1);

mu=sdpvar(1,1);


LMI1=[ An*X+X*An'+B2*V+V'*B2'+G*mu*G'          B1                X*C1'+V'*D12'
X*Ea' ;
                B1'                        -gammads*eye(q)                D11'
zeros(q,n) ;
               C1*X+D12*V                      D11              -gammads*eye(cost)
zeros(cost,n);
                Ea*X                        zeros(n,q)             zeros(n,cost)
-mu*eye(n,n)];

LMI2=[X V' ; V (U_max^2)*eye(m)];

LMI3=[S eye(n) ; eye(n) X];


Fset=set(LMI1<0)+set(LMI2>0)+set(LMI3>0)+set(gammads>0)+set(X>0)+set(mu>0)+set
(trace(S)<alfa)

solution=solvesdp(Fset, gammads+alfa, sdpsettings('solver', 'sedumi'));
```

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı :Hakan DEMİREL

Doğum Tarihi ve Yeri :01/01/1988 - TOKAT

Yabancı Dili :İngilizce

E-posta :demirelhakan60@gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	**Alan**	**Okul/Üniversite**	**Mezuniyet Yılı**
Y. Lisans	Gemi Müh.	YTÜ	2013
Lisans	Gemi Müh.	YTÜ	2011
Lise	Fen Bilimleri	AÖL	2006

İŞ TECRÜBESİ

Yıl	**Firma/Kurum**	**Görevi**
2014-Devam	YTÜ	Araştırma Görevlisi
2013	BEÜ	Araştırma Görevlisi
2012	RTEÜ	Araştırma Görevlisi

YAYINLARI

Makale

1.	**Demirel, H**., Doğrul, A., Sezen, S., & Alarçin, F. (2017). Backstepping Control of Nonlinear Roll Motion for A Trawler with Fin Stabilizer. International Journal of Maritime Engineering, 158(3), 219-230. 159(2), 205-212.
2.	**Demirel, H.,** & Alarçin, F. (2016). Lmi-Based H_2 and H_∞ State-Feedback Controller Design for Fin Stabilizer of Nonlinear Roll Motion of a Fishing Boat. Brodogradnja, 67(4), 91-107.