T.C.

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

BİR SAVAŞ GEMİSİNİN YALPA HAREKETİNİN KONTROLÜ

Mustafa TAŞKIN

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Makine Teorisi ve Kontrol Programı

Danışman

Prof.Dr.Rahmi GÜÇLÜ

Mart, 2021

T.C.

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

BİR SAVAŞ GEMİSİNİN YALPA HAREKETİNİN KONTROLÜ

Mustafa TAŞKIN tarafından hazırlanan tez çalışması 03.03.2021 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Makine Teorisi ve Kontrol Programı **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Prof.Dr.Rahmi GÜÇLÜ
Yıldız Teknik Üniversitesi
Danışman

Jüri Üyeleri

Prof.Dr.Rahmi GÜÇLÜ, Danışman
Yıldız Teknik Üniversitesi ____________________

Doç.Dr.Hakan YAZICI
Yıldız Teknik Üniversitesi ____________________

Prof. Dr.Vahit MERMERTAŞ
İstanbul Teknik Üniversitesi ____________________

Danışmanım Prof.Dr.Rahmi GÜÇLÜ sorumluluğunda tarafımca hazırlanan Bir Savaş Gemisinin Yalpa Hareketinin Kontrolü başlıklı çalışmada veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Mustafa TAŞKIN

İmza

Aileme

ve

Tüm Dostlarıma

TEŞEKKÜR

Yıldız Teknik Üniversitesi 1911 yılında kurulmuş köklü bir üniversite olmanın bir gereği olarak gerek akademik açıdan donanımlı gerekse etik ilkelere bağlı mühendisler yetiştirmektedir. Lisans ve yüksek lisans eğitimlerimi Yıldız Teknik Üniversitesinde almış olmaktan mutluluk duymaktayım ve üniversiteme teşekkürlerimi bir borç bilirim.

Lisans ve yüksek lisans eğitimlerimde danışman hocam olan Prof.Dr.Rahmi Güçlü' ye her daim bilgisini ve tecrübelerini esirgemediği, gelişime, araştırmaya ve girişimde bulunmaya teşvik ettiği ve bunları yaparken de her zaman desteğini hissettirdiği için teşekkürlerimi sunarım. Gerek akademik açıdan gerekse öğrencileri ile ilişkileri açısından örnek alınacak bir akademisyen olduğu için teşekkürlerimi sunarım.

Yüksek lisans eğitimimde kendisinden alğıdım derslerde ve Yüksek lisans tez çalışmamda bilgilerini ve desteğini esirgemeyen, en zor şartlarda bile yardım istediğimde bilgilerini ulaştıran, tüm alçak gönüllülüğü ile en basit sorulara bile detaylı cevap veren, Doç.Dr.Hakan YAZICI' ya teşekkürlerimi sunarım.

Lisans ve yüksek lisans eğitimim boyunca her konuda rahatlıkla kapısını çaldığım, her zaman yol gösteren, tecrübelerini paylaşan ve birlikte mücadele eden, sorun çözücü yaklaşımı ile motivasyon kaynağı olan Arş.Gör.Abdulhakim Oğuzhan AHAN' a teşekkürlerimi sunarım.

Tüm hayatım boyunca her daim yanımda olan, güvenim, desteğim ve en önemlim olan aileme, verdikleri tüm emekler için saygılarımı ve teşekkürlerimi sunarım.

Mustafa TAŞKIN

İÇİNDEKİLER

SİMGE LİSTESİ

A_c	Kanat Profili Çevresi
A_f	Kanatçık Yüzey Alanı
$A_{\phi v}$	Gemi Devrilme Açısına Kadar Olan Kısım İçin GZ- ϕ Eğrisi Altındaki Alan
B	Gemi Genişliği
$B(\phi, \dot{\phi})$	Yalpa Sönüm Momenti
B_L	Doğrusal Sönüm Katsayısı
$B_{\phi 1}$	Doğrusal Sönüm Katsayısı
B_{N1}, B_{N2}	Doğrusal Olmayan Sönüm Katsayıları
$B_{\phi 2}, B_{\phi 3}$	Doğrusal Olmayan Sönüm Katsayıları
C_L	Boyutsuz Kaldırma Kuvveti Katsayısı
d	Gemi Su Çekimi Değeri
F_L	Kaldırma Kuvveti
g	Yerçekimi İvmesi
$G(\phi, t)$	Yalpa Doğrultucu Momenti
GZ	Doğrultucu Moment Kolu
GM	Ağırlık Merkezi ile Metasantır Noktası (M) Arası Mesafe
G_1, G_3, G_5	Yalpa Doğrultucu Moment Katsayıları
H	Dalga Yüksekliği
I_x	Geminin Kütle Atalet Momenti
I_f	Gemi Ağırlık Merkezi ile Kanatçık Basınç Merkezi Arası Uzaklık
J_x	Ek Su Kütlesinin Atalet Momenti
KB	Su Altı Hacim Merkezinin Düşey Konumu
KG	Ağırlık Merkezinin Düşey Konumu
k_ϕ	Jirasyon Yarıçapı
L	Gemi Boyu
L_f	Kanat Boyu
l	Karakteristik Doğrusal Boyut, Kanat Veter Uzunluğu
M_W	Dalga Kaynaklı Moment İfadesi
OG	Gemi Ağırlık Merkezi ile Su Hattı Arası Düşey Mesafe
ρ	Su Yoğunluğu
r	Etkin Dalga Eğimi Katsayısı
s	Dalga Dikliği
t	Zaman
T_w	Dalga Periyotu
V	Gemi İleri Hızı
ω_n	Doğal Frekans
$(\omega_n)_m$	Model Gemi Doğal Frekansı
$(\omega_n)_s$	Gemi Doğal Frekansı
ω_e	Dalga Karşılama Frekansı
ω_w	Dalga Frekansı
X	Gemi Karşılama Açısı
Z(t)	Girdiler (Bozcu ve Kontrol Girişleri)
ϕ	Yalpa Açısal Yer Değişimi (Yalpa Açısı)

$\dot{\phi}$	Yalpa Açısal Hızı (Yalpa Hızı)
$\ddot{\phi}$	Yalpa Açısal İvmesi (Yalpa İvmesi)
ϕ_m	Ortalama Yalpa Açısı
ϕ_v	Gemi Devrilme Açısı
$\Delta\phi$	Yalpa Açısı Azalımı
Δ	Gemi Deplasman Tonajı
π	Pi Sayısı
α_m	Maksimum Dalga Eğimi
α_e	Etkin Hücum Açısı
α_{mf}	Mekanik Hücum Açısı
α_r	Bağıl Hücum Açısı
λ	Dalga Boyu
ν	Akışkan Kinematik Viskozitesi
μ	Akışkan Dinamik Viskozitesi

KISALTMA LİSTESİ

BMI	Doğrusal Olmayan Matris Eşitsizliği (Bilinear Matrix Inequality)
CFD	Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (Computational Fluid Dynamics)
DME	Doğrusal Matris Eşitsizliği
HAD	Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği
IMC	Dahili Model Kontrolü (Internal Model Control)
IFRRS	Kanat ve Dümen Yalpa Sönümlemesi (Fin and Rudder Roll Stabilization)
ITTC	Uluslararası Çekme Tankı Konferansı (The International Towing Tank Conference)
LQG	Doğrusal Kuadratik Gauss (Linear Quadratic Gaussian)
MARIN	Hollanda Deniz Araştırmaları Enstitüsü (Maritime Research Institute Netherlands)
PID	Orantı, İntegral, Türev (Proportional, Integral, Derivative)
RMS	Kuadratik Ortalama (Root Mean Square)
Ro-Ro	Tekerlekli Araç Taşıyan Gemi Türü (Roll On-Roll Off)
SDP	Yarı Tanımlı Programlama (Semi Defined Programing)
YSA	Yapay Sinir Ağı

ŞEKİL LİSTESİ

TABLO LİSTESİ

ÖZET

Bir Savaş Gemisinin Yalpa Hareketinin Kontrolü

Mustafa TAŞKIN

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Prof.Dr.Rahmi GÜÇLÜ

Gemi hareketleri günümüzde araştırmacılar tarafında ilgi odağı olan bir konu olamayı sürdürmektedir. Gemi hareketleri içerisindeki yalpa hareketi ise geminin selameti açısından en önemli harekettir. Özellikle yüksek genlikli yalpa hareketlerinin genliklerinin, kontrol edilmesi ve güvenli sınırlar içerisinde tutulması gerekmektedir.

Bir gemi için, farklı deniz durumlarında farklı genliklerde yalpa hareketi ile karşılaşmak olağan bir durumdur. Bu farklılıkların sebebi, dalgaların gemiye geliş açısı, dalga modeli ve frekansı, gemi boyu ve gemi doğal frekansı, gemi ileri hızı gibi değişkenlerdir. Yalpa hareketi içerisinde çok fazla değişkeni bulunduran, matematiksel olarak modellenmesi zor bir harekettir. Yalpa matematiksel modelini oluşturan sönüm momenti ve doğrultucu moment ifadelerine ait değişkenlerin doğru tespit edilmesi, yalpa hareketinin dinamiği açısından önemli bir durumdur. Bunun yanında, bu hareketin kontrol edilmesi, yalpa genliklerinin azaltılması amacıyla çeşitli araçlar kullanılmaktadır. Bunlar içerisinde, literatürdeki çalışmalarda yaygın kullanılan aktif yalpa sönümleyici kanat yapıları, bu çalışmada da yalpa genliklerini azaltmak amacıyla kullanılmıştır. Aktif kanat yapıları kontrol için gerekli momenti oluşturan yapılar olup bu çalışma kapsamında NACA0015 kanat yapısı kullanılmıştır.

Farklı deniz durumlarında geminin baş bodoslamasından alınan dalgalar karşısında, DTMB 5415 Muhrip Gemisinin yalpa hareketinin kontrolü amacıyla, doğrusal matris eşitsizliği tabanlı, durum geri beslemeli H_2, H_∞ ve H_2/H_∞ hibirit denetleyiciler kullanılmıştır. Yalpa hareketinin denetimi için H∞ denetleyici yapısının yeterli ve başarılı bir denetleyici olduğu sonucuna varılmıştır. Tüm deniz durumları için ortak bir denetleyici kazancı önerilmiş olup, bu denetleyici kazancı için iki kademeli kontrol kanadı yapısı önerilmektedir. Çalışma kapsamında, iki kademeli (4m ve 8,5m) kontrol kanadı ve doğrusal matris eşitsizliği tabanlı, durum geri beslemeli H∞ denetleyici yapısı kullanılarak tüm deniz durumlarında %90 üzerinde bir başarımla yalpa genlikleri sönümlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Optimal kontrol, DME, DTMB 5415, yalpa dengeleyici kanat.

ABSTRACT

Control of a Warship's Roll Motion

Mustafa TAŞKIN

Department of Mechanical Engineering

Master of Science Thesis

Advisor: Prof.Dr.Rahmi GÜÇLÜ

Ship motions continue to be a focus of interest for researchers today. Roll motion within the ship motions is the most important motion for safety of ships. Especially, the amplitudes of high-amplitude roll motions must be controlled and kept within safe limits.

It is common to encounter roll motion with different amplitudes in different sea situations. The reasons for these differences are the variables such as the angle of encounter of the waves to the ship, the wave model and frequency, the length of the ship and the natural frequency of the ship, the forward speed of the ship. As it can be understood from here, roll motion is a motion that contains many variables and is difficult to model mathematically. Accurate determination of the variables of damping moment and restoring moment expressions that form the roll mathematical model is an important situation in terms of the dynamics of the roll motion. In addition, various tools are used to control this motion and to reduce roll amplitudes. Among these tools, the active roll fin stabilizer structures are the most widely used in the studies in the literature and used in this study to reduce roll amplitudes. Active fin structures are the structures that form the moment required for control and within this study NACA0015 fin structure is used.

In order to control the roll motion of the DTMB 5415 Combatant in the face of the waves encountered from stem of the ship in different sea conditions, linear matrix inequality-based state feedback H_2, H_∞ and H_2 / H_∞ hybrid controllers have been used. It has been concluded that the H_∞ controller structure is sufficient and successful for control of the roll motion. A same controller gain is proposed for all sea situations, and a two-stage control fin structure is proposed for this controller gain. Roll amplitudes are damped with a performance of over 90% in all sea situations with two-stage (4m and 8,5m) control fins and linear-matrix inequality-based state feedback H_∞ controller structure.

Keywords: Optimal control, LMI, DTMB 5415, fin roll stabilizer.

1
GİRİŞ

1.1 Literatür Özeti

Gemiler denizlerde çeşitli bozucu etkiler nedeniyle ve geminin kendi dinamikleri gereği altı serbestlik dereceli bir hareket sergilerler. Bu dış ektiler rüzgâr, akıntı ve dalga etkileri olmakla beraber gemiler buna karşı üç öteleme ve üç dönme hareketi ile cevap verirler. Bu hareketler yalpa, baş-kıç vurma, savrulma, boyuna öteleme, yan öteleme, dalıp çıkma hareketleridir. Tüm bu hareketlerin birbiri üzerinde çeşitli derecelerde etkisi mevcuttur. Bu nedenle bu hareketlerin analizinin ayrıntılı ve doğru sonuç alacak şekilde irdelenmesi, uygun çözüm yöntemleri ile çözümlenmesi gerekmektedir.

Gemiler, dinamik deniz şartlarında bordalarına etkiyen karışık dalgalar etkisinde kalırlar. Günümüzde gemi stabilitesi (istikrarı) üzerine var olan kurallar gemilerin durgun sudaki davranışları üzerinden çıkarılmıştır. Bundan dolayıdır ki, bu kurallar dinamik deniz şartlarındaki gemi dinamiğini tam olarak karşılamamaktalardır ve günümüzde hala gemiler açık denizlerde yüksek risklerle karşı karşıyalardır. Bu risklerin en hayati olanı ise batma ile sonuçlanabilecek bir durumdur.

Gemi hareketleri içerisinde bazıları, gemiler için gerek konfor gerekse hayatta kalabilme kabiliyeti açısından daha fazla öneme sahiptir. Bu nedenle hareketler ayrışık olarak çeşitli amaçlar gözetlenerek irdelenmiş ve literatüre çeşitli açılardan çıkarımlar kazandırılmıştır. Tüm mühendislik yaklaşımlarında olduğu gibi, gemi hareketleri düşünüldüğünde, sistemin doğasında birçok doğrusal olmayan karakter barındırdığı bir gerçektir. Bu amaçla birçok araştırmacı doğrusal ve doğrusal olmayan şeklinde iki farklı inceleme yönteminden birisini seçmiş ve o yönde araştırmalar yapmıştır. Doğrusal ve doğrusal olmayan terimlerin sistem karakterine etkisi ve doğrusal olmayan nitelendirmenin, sistemi ne derecede karakterize ettiğini saptamak amaçlı çeşitli karşılaştırmalar da literatürde çalışılmış konulardandır.

Günümüzde gemi hareketleri için çalışmalar devam etmektedir. Bu hareketlerin matematiksel olarak modellenmesi veya bu modelden yararlanarak hareketlerin çeşitli tasarım ve algoritmalarla kontrolü gibi çeşitli açılardan gemi hareketleri incelenmektedir.

Farklı tipte gemiler, farklı tip yalpa sönümleme sistemleri gerektirir. Bir kruvazör gemisinde veya okyanus gemisinde, aşırı genlikli hareketler, mürettebat veya yolcuların eğlence faaliyetlerine ve genel yolcu konforuna negatif anlamda müdahale eder. Dolayısıyla, mürettebatın çalışma etkinliği de bununla doğru orantılı olarak etkilenecektir. Ro-Ro gemilerinde veya birçok konteyner gemilerinde yalpa hareketi kaynaklı büyük ivmelere maruz kalan konteynerlerin ve tekerlekli araçların yuvarlanması, devrilmesi durumuyla sıkça karşılaşılır. Bazı aşırı hava koşullarında, bağlantı veya sabitleme birimleri bozulabilir veya işlevini kaybedebilir ve bu nedenle konteynerler açık denizde kaybolabilir. Yalpa hareketi, karşılaşılabilecek en büyük genlikli hareket olduğundan gemilerde önem derecesi yüksektir ve hala çalışılması gereken bir gemi hareketidir [1].

Altı serbestlik dereceli bir modelin incelenmesi her bir harekete ait olan doğrusal olmayan ve hidrodinamik kaynaklı terimleri de beraberinde getirmektedir. Bu durum, sistemin analiz edilmesini oldukça zorlaştırmaktadır. Bu nedenle Sabuncu ve Fossen çalışmalarında hesap kolaylığı açısından doğrusal olmayan hareket denklemlerini basitleştirmişlerdir. Bu tür basitleştirmeler veya doğrusallaştırma işlemleri çoğu araştırmacı tarafından sıklıkla başvurulan yöntemlerdendir [2, 3]. Mulk ve Falzarano, gemi sistemini serbestlik derecesi altı olacak şekilde (daha önce bahsedilen üç öteleme ve üç dönme hareketi) incelemiştir ve hareketin denklem takımını Euler Denklemleri ile nitelendirmişlerdir. Problemi iki farklı (doğrusal ve doğrusal olmayan) şekilde irdelemişler ve sonuç olarak da yalpa hareketinin gemi platformu için en kritik hareket olduğunu vurgulamışlardır [4, 5]. Perez ve Blanke çalışmalarında dış etkilerin, yani dalga bozucusunun gemiye hangi yönden etkidiğinin etkisini dikkate almış ve sistemi dört serbestlik dereceli (boyuna öteleme, yan öteleme, sayrulma ve yalpa) olacak şekilde modellemiştir. Kurdukları modeli, savaş ve konteyner gemisi için uygulamışlardır. Çalışmada doğrusal ve doğrusal olmayan şeklinde iki farklı model kullanmışlardır. Çalışmanın en çarpıcı yorumu, doğrusal modelin düşük frekanslara nazaran yüksek frekanslarda daha da başarılı olduğunun belirtilmiş olmasıdır. Bu durumun savaş gemileri için ihmal edilebilir sınırlar içinde olduğunu; fakat konteyner gemileri için kritik aralıklarda kaldığını belirtmişlerdir [6].

Gemi hareketleri ilgili olarak araştırmacılar, üç veya dört serbestlik dereceli sistemlerde, doğrusal modellerde doğrusal olmayan parametrelerin etkisini irdelemek amacıyla, çoğu kez tek serbestlik dereceli sistemleri doğrusal olmayan modellerle ve yüksek dereceli nitelendirilmiş terimlerle ifade etmişler ve bu şekilde araştırmışlardır. Böyle bir çalışmanın platform davranışını nitelendirmede birçok avantaj sağladığını belirtmişlerdir. Taylan bir konteyner gemisi için parametrik rezonans durumunu incelemiş ve yalpa rezonansı için etkisi yüksek parametreleri belirtmiştir. Çalışmasında, hareketi güvenli sınırlar içinde tutan sönüm katsayısı ve hız sınırlarını da belirtmiştir [7]. Yang ve diğerleri viskoz etkileşim nedeniyle oluşan doğrusal olmayan yalpa karakteristiğini tanımlamak için geleneksel yarı deneysel (ampirik) formüllerle kıyasla, hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) metodunun daha da verimli olduğunu belirtmişlerdir. Serbest ve zorlanmış şekilde iki farklı yalpa hareketini, farklı ilerleme hızları için, benzetim (simülasyon) tekniği ile üç boyutlu modellenmiş teknenin sönümünü bulmak için kullanmışlardır. Çözücü olarak “Reynold Ortalamalı Navier Stokes” denklemlerini kullanmışlar ve zorlanmış yalpa benzetimlerinden sönüm katsayılarını polinom şeklinde elde etmişlerdir. Sönüm katsayısını, yalpa açısının ve gemi hızının etkilediğini ve bu etkileşimin doğru orantılı olduğunu belirtmişler ve ileri hızın yalpa sönümü için önemli bir parametre olduğunu söylemişlerdir. Ayrıca sönümün bileşenlerinden doğrusal olmayan bileşenin hız ile ters orantılı olduğu ve yüksek hızlarda doğrusal bileşenin baskın olduğu kanısına varmışlardır [8].

Gemi yalpa hareketi analiz edilirken bu hareketin istenilen güvenli sınırlar içerisinde tutulması için kontrolünün sağlanabilmesi gerekir ve bunun için de sistemin kararlı olması gereklidir. Lyapunov kararlılık üzerine temel bir yapı teşkil eden doktorasını sunmuştur. Tezde ‘n.’ dereceli sistemler için denklem çözümlerinden yarlanan ve sistemi betimleyen denklemleri inceleyen iki farklı yöntem sunmuştur. Birinci yöntemde kararlı olma şartı, olarak doğrusal veya doğrusallaştırılmış bir sistemin bütün karakteristik değerlerinin pozitif olması şeklinde sunulmuştur. İkinci yöntemi ise denklemlerin çözümlerinde asimtotik davranışların incelenmesine dayalı Lyapunov Direkt Yöntemi olarak adlandırılan yöntemdir [9, 10].

Özkan Lyapunov Direkt Yöntemini kullanarak doğrusal olmayan yalpa hareketi için kararlılık analizinde bulunmuş ve bu yöntemi kullanarak toplam stabilite kavramını uluslararası stabilite kurallarına kazandırmıştır. Böylelikle bu alanda kritik bir katkı sağlamıştır [11].

Hava şartlarının ve gemi üzerine etkiyen dalgaların çok düzensiz olmasından dolayı bazı zor şartlarda gemiler, güvende bulundukları bölgeler dışına çıkarak devrilme, batma riski yaşarlar. Güvenli bir sefer durumu ve düzensiz hareketlerin gerçek zamanlı kontrolü için, literatürde aktif ve pasif hareket kontrol sistemleri kullanılmıştır. Gemi hareketleri içerisinde yalpa hareketi, yüksek genlikli bir hareket olmasından dolayı kritik öneme sahiptir ve bu gemi hareketi halen araştırmacıların ilgi odağında yerini korumaktadır. Araştırmacıların ileri sürdüğü ve günümüzde kullanılan yalpa sönümleyici sistemler ise şunlardır; yalpa omurgaları (pasif), aktif dengeleme tank sistemleri, dengeleyici kanat sistemleri, dümen sistemleri ve farklı kanat yapıları şeklindedir. Bu yapılarla birlikte hareketi denetleyen çeşitli kontrol algoritmaları da geliştirilmiştir. Bu tasarımlar tek giriş ve tek çıkışlı klasik doğrusal denetleyiciler ile başlamış, çok giriş ve çok çıkışlı daha modern denetleyici sistemleri gerektiren yöntemler şeklinde ilerlemiştir.

PID (Proportional, Integral, Derivative) denetleyici tasarımında temel hedefinin Kp, Kd ve Ki denetim katsayılarının saptanması ve sistemin beklenen performans çıkışlarının sağlanması şeklindedir. Surendran vd. deniz durumlarını değişken bir parametre olarak almış ve farklı durumlar için gemi hareketlerinin kritik olduğunu belirterek sönüm sisteminde PID denetleyici kullanmışlardır. Yalpa genliklerinde yaklaşık %80 oranında azalmanın elde edildiğini ve hareketi güvenli bölgelere çektiklerini göstermişlerdir [12]. Van Amerongen vd. dümen ve kanat sistemleri ile çalışmışlardır. Kontrolcü olarak LQG (Linear Quadratic Gaussian) denetim algoritmasını kullanmıştır. Modellerden aldığı ölçümlerle analizler arasında karşılaştırmalara yer vermişlerdir. Sonuç olarak dümen ile yalpa denetiminin neredeyse kanatlar kadar iyi sonuç verdiğini ve maliyet açışından daha iyi olduğunu belirtmişlerdir [13, 4]. Wang vd. karışık deniz durumunun gemi hidrodinamik karakteri ve ilgili katsayılar üzerinde etkili olduğunu ve sürekli değişebileceğini belirterek, belirlenmiş aralıklarda çalışma kabiliyeti olan H2/H∞ denetleyici önermişlerdir. Değişen parametrelere rağmen kontrol algoritmasının efektif bir sonuç çıkardığını belirtmişlerdir [14]. Yu vd. kanat veya tank sistemleri için H∞ dayanaklı denetim algoritmasını kullanmışlar ve denetleyici değerlerini Riccati Denklemleri yardımıyla bulmuşlardır. PID kontrol algoritması ile kıyasla çok daha iyi sonuçlar alındığını belirtmişlerdir [15, 4]. Demirel ve Alarçin DME (Doğrusal Matris Eşitsizlikleri) tabanlı H2 ve H∞ durum geri beslemeli denetim algoritmasını yalpa dengeleyici kanat vasıtasıyla uygulamışlardır. H∞ durum geri beslemeli denetim algoritmasının, sistem için geri adımlamalı bir sisteme göre daha etkili sonuçlar verdiğini belirtmişlerdir [16].

Alarcin, örnek aldığı bir konteyner gemisi üzerinde farklı denetleyiciler denemiş ve önerdiği denetleyicinin (Yapay Sinir Ağı (YSA) ile ağırlıklandırılmış IMC (Internal Model Control) denetleyici), PID denetleyiciye göre daha verimli bir şekilde ve daha hızlı şekilde yalpa hareketini sönümlediğini belirtmiştir [17]. Ghassemi vd. yaptıkları çalışmada iki farklı sistem, PID ve Yapay Sinir Ağı yöntemini birlikte kullanmışlardır. Sönümleyici kanat sistemi kullanmışlar ve ilgili kanat sisteminin kısıtlarını da sisteme tanımlamışlardır. Sonuç olarak bu çalışmadaki yöntemin her deniz şartı için çalışabileceğini ve hızlıca yalpa genliklerinin azaltılacağı da belirtilmişlerdir [4]. Perez ve Blanke çeşitli denetim algoritmalarını (LQ denetim algoritması, H∞ denetim algoritması ve Kayma Modlu doğrusal olmayan denetim algoritması) farklı matematik modellerde uygulanabilirliği açısından değerlendirmişler ve performansları hakkında bilgi vermişlerdir [18]. Townsend ve Shenoi yalpa hareketinin kontrolü için jiroskobik bir yöntem kullanmışlardır. Bu yöntemi yirmi metre boyunda bir tekne üzerinde, karışık deniz durumu için uygulamışlardır. Jiroskobik sistem hakkında bilgi kıtlığı açısından bu çalışmanın literatüre özellikle hareket denklemlerinin çıkarılması açısından yön verici bir katkısı olduğunu belirtmişlerdir [19].

1.1.1 Yalpa Sönüm Araçları Hakkında Genel Bilgi

Yalpa sönüm araçları ile ilgili tüm sistemlerin yıllar içerisinde kullanımları ve sistemlerin gelişimleri ile ilgili [18] nolu kaynak, literatürce kabul görmüş bir kaynaktır. Literatürü gözden geçirme şeklinde hazırlanmış olan bu çalışma faydalı bir referans olarak literatürde yerini almıştır. Bu alt başlık kapsamında bu kaynaktan yoğun bir şekilde yararlanılmıştır.

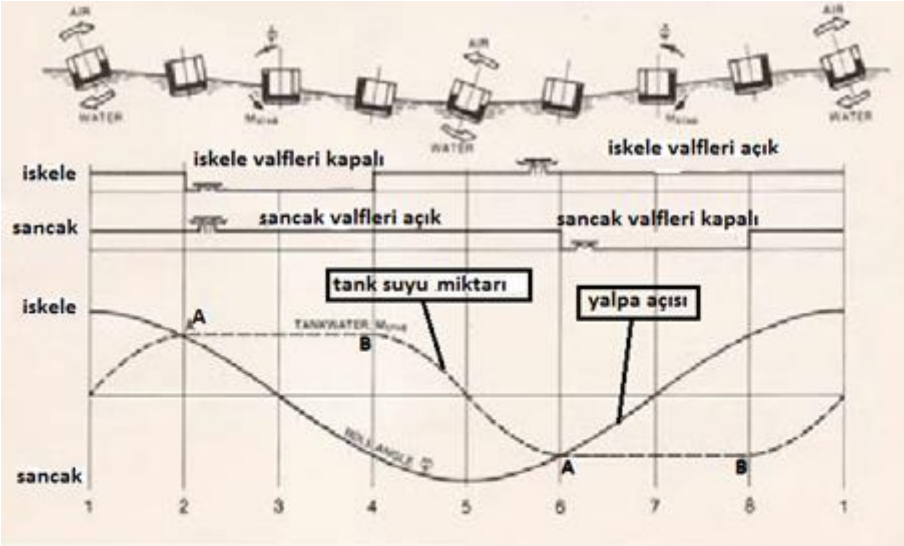
Yüz yılı aşkın süredir çeşitli araştırmacılar deniz araçlarının yalpa hareketini sönümlemeye yönelik çeşitli sistemler geliştirmişlerdir. 19. yüzyıl ortalarında yalpa hareketi kayda değer bir öneme sahip olmuş ve çalışmalar hız kazanmıştır. Yalpa hareketinin insan üzerindeki etkisi ve büyük açılarda geminin hayatta kalabilmesi açısından hareketin sönümü ve kontrolü için çeşitli yöntemler geliştirilmiştir. Günümüzde en yaygın sönüm araçları; su tankları (U tank), cayro sabitleyiciler (stabilizatörler), kanat (fin) yapıları ve dümen sistemleridir.

1.1.1.1 Su Tankları (U Tank)

Bu sistemin ilk çalışmalarından olan pasif karşı-yalpa tankları William Froude tarafından kullanılsa da bu çalışmanın devamında gelişmiş U-tank modeli Frahm tarafından 20. Yüzyıl başlarında geliştirilmiştir. Daha önce serbest-su yüzeyi mantığına dayalı eski yaklaşım, Froude ve Watt tarafından 18. yüzyılın sonlarında kullanılsa da daha verimli olan U-tank modeli kullanışlılığı ve verimliliği açısından daha tercih edilir duruma gelmiştir [1].

U-tank, prensipte gemi sancak ve iskelesindeki iki tank ve bunlar arasındaki hava kanalı sisteminden oluşur. Hava kanalı, tanklar arasında hava akışı sağlar. Bu sayede, tank üzerindeki serbest hava dolum sırasında sıkışmaz ve boşalan tanka transfer olur.

Tank diplerindeki basınç sensörleri sayesinde su seviyeleri arası fark, yani oluşan momentin miktarı ve yönü tespit edilir. Bu basınç sensörleri ve tanklar arası açılır-kapanır valfler kullanılarak tank yapısı ile oluşan moment, belli bir faz gecikmesi ile elde edilir ve bu sayede yalpa hareketi sönümlenmiş olur. En uygun dengeleyici momentin elde elilmesi bu yöntemle sağlanır.



Şekil 1.1 Yalpa ve tank su seviyesi periyotları [1]

Şekil 1.1 'de bir yalpa tankı sisteminin kademeleri görülmektedir. Şekil 1.1'den de görüldüğü üzere:

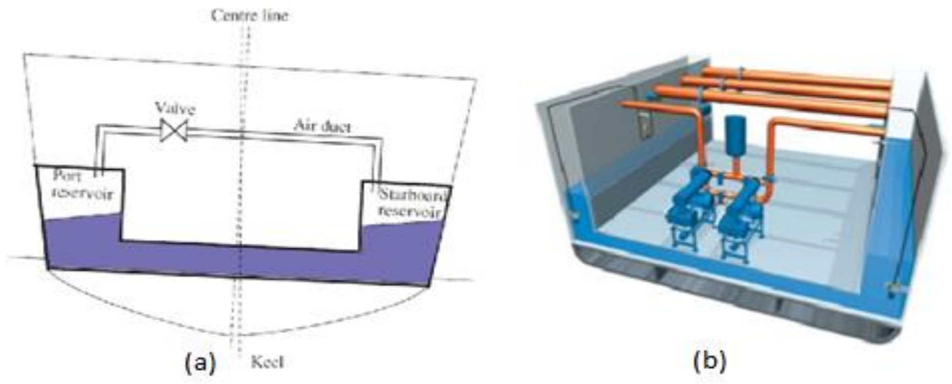
I. 1 numaralı durumda gemi iskele yönünde maksimum noktada ve iskele tankındaki su miktarı hızlı bir şekilde artmaya başlamaktadır. Bu sırada gemi sıfır (denge) noktasına doğru düzelirken yalpa açısından dolayı su miktarı artmaktadır. A noktasına gelinceye kadar sancak ve iskele valfleri açık ve iskeleye su dolmaktadır. A noktasında (2) ise maksimum su seviyesi elde edilir ve iskele valfleri kapatılır. Yani iskele tankındaki su seviyesi sabitlenmiş olur. A-B arasında bu seviye korunmaktadır.

II. A-B arasında gemi denge seviyesini geçmiş ve sancak tarafına yatmaya başlamıştır. B noktasına gelindiğinde iskele valfleri açılır ve iskeledeki su sancak tankına akmaya başlar. Bir sonraki A noktasında (6) ise sancak valfleri kapatılır. Yani iskele tankındaki su seviyesi sabitlenmiş olur. Bir sonraki B noktasına (8) kadar sabit tutulur. Bu sisteme aynı işlemler tekrarlanarak devam edilir.

III. Valf zamanlaması ile belirli biz faz gecikmesi elde edilir ve bu sayede su seviyeleri farkı ile ek bir geri getirici moment oluşturulur. Yalpa genliği bu sayede sönümlenmiş olur.

Pasif tanklarda, bir tanktan diğerine akış doğal bir şekilde sağlanırken, aktif sistemde bu akış bir pompa vasıtası ile yapılır. Aktif tanklar pasif tanka göre aynı tank hacimlerinden daha büyük sönümleyici moment üretme kabiliyetine sahiptir. Kısa sürede büyük miktarlarda su pompalama yeteneği sayesinde sönümlenme hızları da yüksektir. Tank diplerindeki basınç sensörleri sayesinde dengeleyici moment için faz gecikmesi hesaplanır. Bu sayede en uygun dengeleyici moment elde edilmiş olur.

Minorsky, tankların doğal frekansını değiştirme amaçlı bir pompa sistemi kullanmıştır. Yalpa ivmesine bağlı akışkan sıvı (su) hacmini de değiştirmiştir. Özellikle Vasta, yayınladığı raporda Amerikan Donanmasındaki ilk dönem sönüm sistemlerini özetlemiştir. Raporda, 1950'lerin başında Stanford Üniversitesinde geliştirilmiş matematiksel modelleri temel alan çeşitli gemilerde uygulamalar yer almıştır. Bugüne kadar tankın aktif kontrolü rezervuarlar üzerindeki basıncın hava kanalındaki bir valf ile kontrolü ile sağlanmıştır [18]. Şekil 1.2'de pasif ve aktif yalpa sönüm tankları görünmektedir.



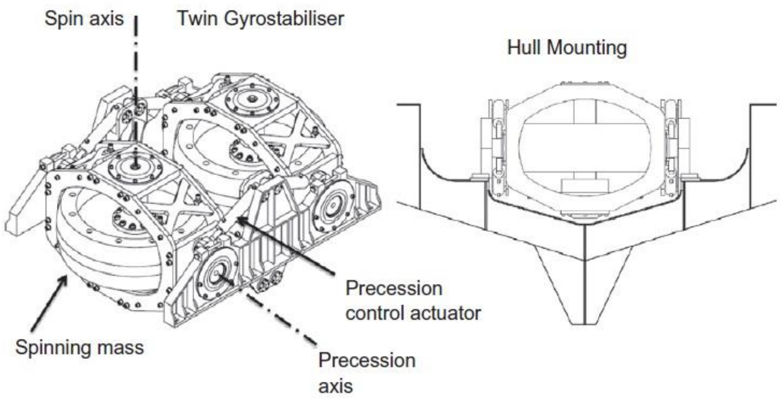
Şekil 1.2 Pasif ve aktif yalpa sönüm tankları (a. Pasif [18], b. Aktif [1])

1.1.1.2 Cayro-Sabitleyiciler

Merkez kaç (Cayroskopik) kuvvetinin kullanımı, yalpa hareketinin genliğinin azaltılmasından çok, olabildiğince en aza indiririlmesi, yok edilmesine yöneliktir. Genellikle bir veya birden fazla döner tekerlek içerir. İki adet ikiz tekerleğin gemi ağırlık merkezi yakınlarına yerleştirilmesi şeklindeki kullanımı, tekerleklerin yerleşimi açısından en yaygın kullanım türüdür.

Yalpa sönümlenmesi amaçlı cayro-sabitleyici sistemi ilk Schlik tarafından 20. yüzyılın başında kullanılmıştır. Sistem 1907 yılında Alman torpido-bot destroyer gemisinde (See-Bar) kullanılmıştır. Fakat burada dalga genlikleri ve frekanslarından ötürü bazı problemler ortaya çıkmıştır. Sperry isimli Amerikan firması Schlik tarafından geliştirilen sistemin açıklarını işaret ederek, sorunların çözümünü ana cayroskop hareketlerini anahtar kumandalı elektrik motor ve küçük cayro-servolar ile kontrol ederek sağlamıştır. Bu sistemde yalpa oranı tahmini çok daha iyi elde edilmiştir. Yalpa hareketi %95 oranlarında azaltılabiliyor olsa da yüksek maliyet, ağırlık arttırma durumu ve tekne gövdesinde oluşturduğu yüksek gerilmeler bu oranı gölgelemektedir. Yakın zamanlarda bu sistem özellikle demirde olan yatlar için geliştirilmektedir [20].

Günümüzde malzeme teknolojisi, mekanik tasarım, elektriksel tahrik yöntemleri ve dijital kontrol sistemlerinde kaydedilen gelişmeler cayroskopik dengeleyicilere olan ilgiyi canlandırdı. Yeni tahrik ve yataklama teknolojisi sayesinde, açısal hızların artırılabilmesi tekerlerin boyutunu küçültmesine izin vermektedir. Boyut küçülmesi sayesinde, yapısal yükü gövdeye dağıtmak için birden fazla sayıda teker gemide farklı bölgelerde kullanılabilir hale gelmiştir. Şekil 1.3'te çift teker cayro-sabitleyici yapısı görünmektedir.



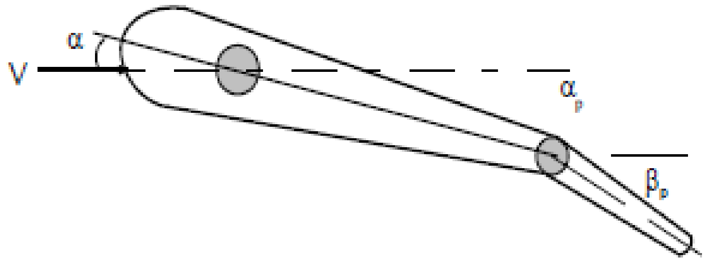
Şekil 1.3 Çift teker cayro-sabitleyici [18]

1.1.1.3 Kanat (Fin)- Sabitleyiciler

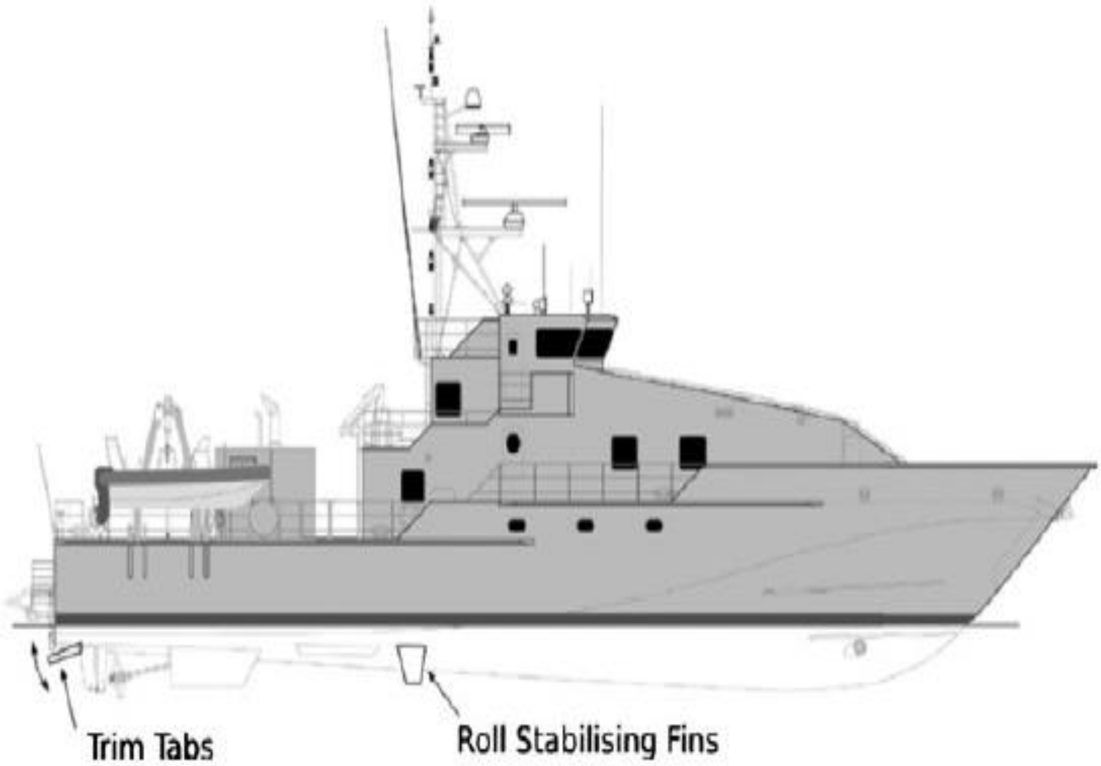
Bu tür sönümleyiciler temelde gemi gövdesine bağlı su kanatçığı (hidrofoil) mekanizmasından oluşur ve dalga kaynaklı yalpa momentinin sönümü için bir kontrol sistemi tarafından kontrol edilir. İlk kez 1923 yılında Japonya'daki Mitsubishi Nagasaki Shipyard bünyesinde S. Motora tarafından denenen bu sistem sonrasında 2. Dünya Savaşı sırasında kullanımı hızla artan bir sistem halini almıştır. İngiltere de bu sistem 2. Dünya Savaşı öncesinde de Denny ve Brown kardeşler tarafından kullanılmıştır. Günümüzde bu sistem aynı zamanda sıfır ileri hızda çırpınma (flapping) kanatları (finleri) olarak da kullanılmaktadır [18]. Şekil 1.4'te örnek bir yalpa sönümleyici kanat sistemi görünmektedir.

Şekil 1.4 Yalpa sönümleyici kanat sistemi [1]

Kanat sabitleyicileri sayesinde düzenli dalgalarda %90'lara varan yalpa sönümlerine ulaşılabilir. Düzensiz dalgalarda bu oran daha düşüktür, ancak su akışına karşı istenen etkili karşılama açısını elde etmek için kanat sapması ayarlanabilir olan kademeli kontrol yapısına sahip kanatlar kullanılabilir [21]. Şekil 1.5'te kademeli kontrol yapısına sahip bir kanat yapısı görülmektedir. Şekil 1.6'da ise kayıcı bir tekneye yerleştirilmiş kanat yapıları görülmektedir. Şekil 1.6'ya bakıldığında kanat yapıların sadece yalpa hareketinin genliklerini sönümlemek için değil, aynı zamanda yunuslama hareketinin kontrolü için de kullanıldığı görülmektedir.



Şekil 1.5 Kademeli kanat yapısı [1]



Şekil 1.6 Trim çıkıntıları ve yalpa sönümleyici kanatlar [18]

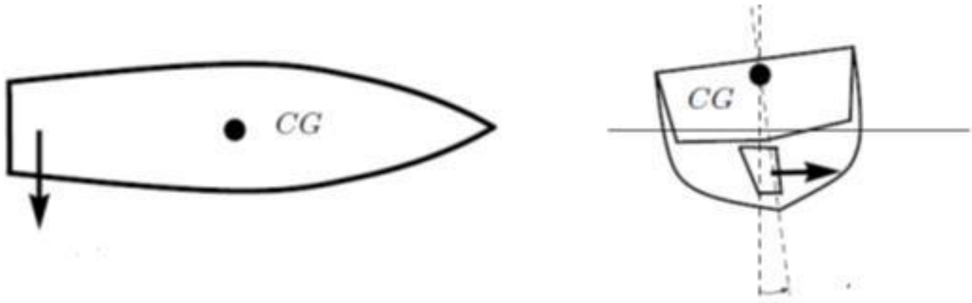
Jin vd. sıfır ileri hızda yalpa sönümü sağlaması için kullanılan kanatçıkların özelliklerini tanımlamaktalardır. Burada gemi tonajının ve saniyedeki çırpınma miktarının etkili parametreler olduğu belirtmişlerdir. Teknelerin demirde ya da limanda iken kanatların bu şekilde yani sıfır ileri hızda kullanılması durumu da güncel kullanım alanlarındandır [1].

1.1.1.4 Dümen Kontrollü Yalpa Sönümü

Bu yöntemde mevcut dümen mekanizması yalpa sönümleyici göreviyle kullanılmaktadır. Dümenin böyle bir işe yaradığı ilk kez 1967 de bir konteyner gemisinin (American Resolute) Atlantik'te seyri sırasında Taggart tarafından gözlemlenmiştir. Gözlemde çok büyük yalpa açılarında otomatik dümen sırasında dümenin yalpayı sönümlediği belirtilmiştir. Dümen hareketinin karşı-yalpa elemanı olarak kullanılabileceği anlaşılmış ve araştırmacılar bu yönde çalışmalarda bulunmuşlardır. 1974 yılında yayınlanan Gunsteren'in yayınında bir motor yat (M.S. Peggy) kullanılmıştır ve Hollanda'nın iç suyunda (Ijsselmeer) gözlemlerde bulunulmuştur. Bağımsız olarak 1972 yılında Cowley ve Lambert analog bilgisayar ve benzetim yöntemi kullanarak bir konteyner gemisinin model testini yapmışlar ve yayınlamışlardır. Bu sistem 1970'lerin başından beri bilinse de performansı zayıf bulunmuştur. Böyle görülmesinin ana sebebi kısıtlı analog bilgisayar teknolojisi ve basit kontrol yöntemleridir. Ancak, 1980'lerde dijital bilgisayarlar ve ileri kontrol yazılımları sayesinde daha başarılı deneysel sonuçlar elde edilmiştir. Baitis raporunda yalpa açılarını %50 oranında sönümlediğini belirtmiştir [18].

Crossland, 21. Yüzyılın başlarında yaptığı çalışmada örnek olarak ASW firkateyni üzerinde IFRRS (Fin and Rudder Roll Stabilization) (kanat ve dümen kombinasyonu) sisteminin standart bir kanat düzeneği yerine %3,8'lik bir gelişme gösterdiğini belirtmiştir. Agarwal, $H\infty$ yaklaşımının kullanıldığı bir kontrol tasarımını bu sönümleme sistemi için önermiştir. Oda ve diğerleri, istatistiksel bir yaklaşımla gemiyi ana hedefi olan rota tutma ve ek olarak meydana gelen yalpa hareketlerini azaltan olası bir uzlaşmayı ele almışlardır [1].

Yukarıdaki çalışmalar ışığında gemilerde hali hazırda mevcut olan dümen sisteminin bir kontrol algoritması yardımı ile yalpa sönümü için kullanılabileceği anlaşılmaktadır. Burada %50' lere varan bir azalımdan bahsedilmektedir. Gemide aktif kanat sistemleri kullanılsa bile, bu sistem dümen kontrolü ile birleştirildiğinde %3 gibi bir performans artışı sağlanabilmektedir. Dümenin ana görevi olan rota tutma aracı olması dışında ek bir görev üstlenmesinin rotadan sapmalara neden olabileceği de ihtimal dahilindedir. Şekil 1.7'de dümen sisteminin yalpa sönümleme yapısı gösterilmektedir.



Şekil 1.7 Dümen yalpa engelleyici sistemi

Yalpa sönümleme sistemleri hakkında bir karşılaştırma Tablo 1.1’deki gibidir [22].

Tablo 1.1 Yalpa sönümleme sistemlerinin karşılaştırılması

Yalpa Söndürücü	Azami Verim	Etkin Hız
Yalpa omurgası	≤%15	Düşük hızlar
Stabilite tankları	≤%40	Tüm hızlar
Aktif dümen	≤%70	Orta-Yüksek hızlar
Yalpa fini	≤%90	Orta-Yüksek hızlar

1.2 Tezin Amacı

Bu tez çalışması kapsamında, karışık denizlerde bulunan bir geminin sergilediği altı serbestlik dereceli hareketler içerisinden birisi olan yalpa hareketinin kontrol edilmesi amaçlanmıştır. Gemi hareketleri içerisinde ileri seviyede öneme sahip olan bu hareket tek serbestlik dereceli olarak ifadelendirilmiştir. Hareketin matematiksel modeli, kütlesel atalet momenti, sönümleme momenti, doğrultucu moment, bozucu dalga momenti ve kontrol momenti terimlerinden oluşmaktadır. Bu terimlerin tamamı geminin hangi türde bir gemi olduğuna ve hangi deniz durumuna maruz kaldığına göre değişmektedir. Ayrıca dalgaların gemiye geliş açısı ve gemi ileri hızı da tüm bu terimleri değiştirmektedir. Tüm bu çoklu değişkenler kümesi içerisinden özel bir alt küme seçilerek tez çalışması gerçekleştirilmiştir.

Ayrıca bu alt değişkenler kümesindeki her bir terim için literatürdeki alternatif yöntemler açıklanmış ve seçilen yöntemler yardımı ile matematiksel modeli oluşturan terimler hesaplanmıştır. Yalpa hareketinin dinamiği tüm bu terimlere göre, bu terimler ise geminin hidrostatik ve hidrodinamik özelliklerine göre değişmektedir. Geminin kendine özgü karekteristiğini bilmek ve bunu yalpa hareketi özelinde tanımlamak oldukça önemlidir. Her gemi için farklı sonuçlar alınabileceğinden, tez çalışması kapsamında örnek bir gemi seçilmiş ve bu gemi üzerinden ilerlenmiştir. Seçilen savaş gemisinin, literatüre bakıldığında üzerinde birçok farklı çalışmalar yapılmış, literatürde referans bir model olması birçok konu bakımından kolaylık sağlamıştır.

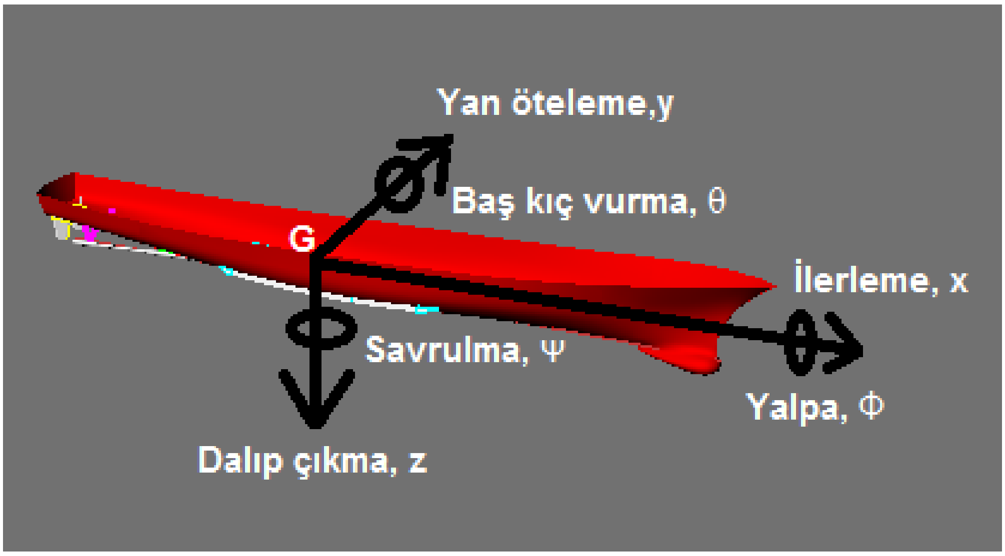
Farklı deniz durumları için kontrolsüz durumda geminin farklı karekterde yalpa hereketi sergileyeceği gerçeği dikkate alındığında birden fazla denetleyici tasarlanması amaçlanmıştır. Farklı denetleyici tasarımları için DME tabanlı H_2, H_∞ ve H_2/H_∞ hibrit olmak üzere durum geri beslemeli denetleyici yapıları kullanılmıştır. Kullanılan denetleyicilerin ihtiyacı olan kontrol momentlerini üretmek üzere denetleyici kanat sistemi kullanılmış ve bu sayede yalpa açısal yerdeğişim genliklerinin sönümlenmesi amaçlanmıştır.

1.3 Hipotez

Gemi yalpı hareketi denetleyici kanat yapıları ile denetlenebilen bir harekettir. Tek serbestlik dereceli olarak ifadelendirilmiş olan yalpa hareketinin denetlenmesinde, H_∞ denetleyici yapısının başarılı sonuçlar vereceği öngörülmektedir. Sistemin her şartta en kötü durumuna göre cevap veren bu denetleyici yapısı DME tabanlı bir yapı olup, yalpa hareketine ait matematiksel denklemin içerdiği doğrusal olmayan terimler uygun bir denge noktasında doğrusallaştırılması ile bu yapıya uygun hale getirilmelidir. Literatürde bulunan, yalpa sönümüne ait terimlerinin doğrusal kısmının yüksek hızlarda daha baskın olduğu bilgisi bakımından doğrusallaştırma işlemi, yüksek hızlarda daha verimli sonuçlar verecektir. Denetleyici kanat yapısının boyut kısıtı düşünüldüğünde H_∞ denetleyici yapısının farklı deniz durumlarında farklı oranlarda başarım sağlayacağı öngörülmektedir. Örnek seçilen savaş gemisinin boyu (100 m ve üzeri) düşünüldüğünde daha yüksek deniz durumlarında yalpa hareketi bakımından kontrolün daha kolay başarılacağı öngörülmektedir. H_∞ denetleyici ve kanat yapısı ile yalpa hareketi açısal yerdeğişim değerinin %90 civarında sönümlenebileceği, bunu sağlamak için farklı deniz durumları için farklı kanat yapılarına ihtiyaç duyulabileceği öngörülmektedir.

2
YALPA HAREKETİ MATEMATİKSEL MODELİ

Gemilerde yalpa hareketiyle ilgili literatürde birçok yaklaşım bulunmaktadır. Yalpa hareketi doğrusal bir hareket değildir. İçerisinde doğrusal olmayan değişkenler içerir. Bu durumda öncelikle hareketin denkleminin çıkarılması sonrasında ise bu denklemin çeşitli kontrol yöntemleri ile istenilen çıktıları alabileceğimiz şekilde kontrol edilmesi gerekmektedir. Şekil 2.1'den görüldüğü gibi yalpa hareketi, geminin boyuna eksende yaptığı dönme hareketidir.



Şekil 2.1 Gemi hareketleri

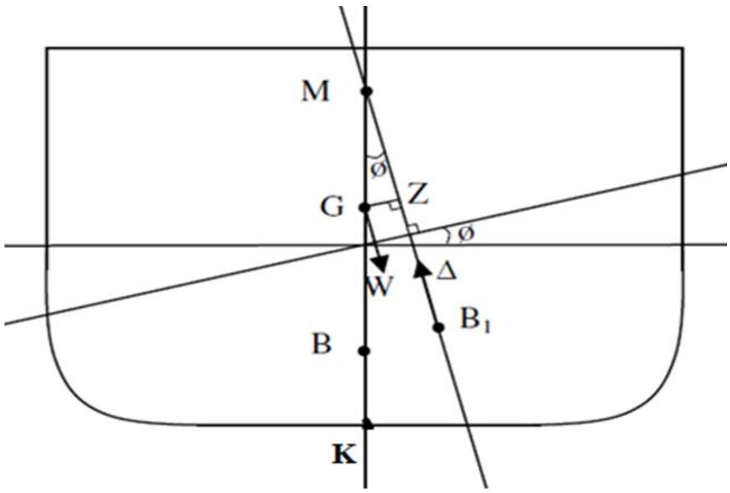
Yalpa hareketi tek serbestlik dereceli olarak ele alındığında matematiksel modeli aşağıdaki gibidir. Bu denklem literatürde çok yaygın kullanılan tanımlama biçimiyle şöyledir [1, 8, 18, 21] :

$$(I_x + J_x)\ddot{\phi}(t) + B(\phi, \dot{\phi})(t) + G(\phi, t) = Z(t) \qquad (2.1)$$

Eşitlik (2.1) içerisinde, ϕ, yalpa açısını; $\dot{\phi}$, yalpa açısal hızını; $\ddot{\phi}$, yalpa açısal ivmesini; I_x, geminin kütle atalet momentini; J_x, ek su kütlesinin atalet momentini; $B(\phi, \dot{\phi})$, yalpa sönüm momentini; $G(\phi,t)$, doğrultucu momenti; $Z(t)$, bozcu ve kontrol girişlerini temsil etmektedir.

Yukarıdaki denkleme bakıldığında denklemin yalpa hareketi açısı, açısal hızı ve ivmesi cinsinden yazıldığı ve zamanın bir fonksiyonu olduğu görülmektedir. Literatürde özellikle yalpa sönüm momentinin saptanmasına yönelik çeşitli yaklaşımlar bulunmaktadır. Denklemin en başında yalpa ivmesinin katsayısını oluşturan ataletsel bileşenler ise ilgili geminin hidrostatik hesaplamaları ve deneye dayalı formüller yardımı ile elde edilebilmektedir.

Geminin ve içinde bulunduğu sudan kaynaklı ve yalpa ivmesi ile doğrudan bağlantılı olan yalpa atalet momenti, ilerleyen bölümlerde ilgili başlık altında açıklanmıştır. Şekil 2.2'de gemi hidrostatik değişkenleri görülmektedir.



Şekil 2.2 Yalpa hareketi hidrostatik değişkenleri

Şekil 2.2'de GZ, doğrultucu moment kolunu (m); GM, ağırlık merkezi ile metasantır noktası (M) arası mesafeyi (m); KG, ağırlık merkezinin düşey konumunu (m); KB, su altı hacim merkezinin düşey konumunu(m); ϕ, yalpa açısını (rad) temsil etmeltedir.

2.1 Yalpa Atalet Momenti ($I_x + J_x$)

Yalpa hareketinin matematiksel modelinin bu bileşeni atalet moment bileşeni olup, doğrudan hareketin ivmesine bağlıdır. Literatürde bu bileşenin kolaylıkla saptanması için deneye dayalı formüller geliştirilmiştir. Bu konuda en yaygın yaklaşım aşağıdaki gibidir. Bu yaklaşımlar statik durum yaklaşımı ile elde edilmiştir.

$$(I_x + J_x) = \frac{\Delta}{12g}(B^2 + 4KG^2) \tag{2.2}$$

Yukarıda toplam olarak verilen ifade ek su kütlesi ve geminin öz kütlesinden kaynaklı toplam atalet momentini ifade etmektedir [4, 16, 23].

Toplam atalet momenti yukarıdaki formül yardımı ile kolaylıkla elde edilebilir. Toplam atalet momentinin bir kısmı ek su kütlesi kaynaklıdır ve bu oran aşağıdaki gibidir. J_x yaklaşık olarak I_x'in %20'si kadar alınabilir [24, 25]. Bu değer gemi formunun bir bağıntısı olarak gemi kütlesinin %10-%25 kadarı ile ifade edilebilir [26].

$$J_x = 0.2I_x \tag{2.3}$$

$$(I_x + J_x) = 1.2I_x \tag{2.4}$$

$$I_x = \frac{\Delta}{g}k_\phi^2 \tag{2.5}$$

Eşitlik (2.3), (2.4) ve (2.5) içerisinde yer alan Δ, geminin deplasmanını (N); B, geminin genişliğini (m); g, yer çekimi ivmesini (m/s^2); k_ϕ, jirasyon yarıçapını (m); J_x ve I_x ise kütlesel atalet ifadelerini (kg.m^2) temsil etmektedir.

I_x ifadesi hidrostatik yöntemlerle hesaplandıktan sonra yüzde yirmi fazlası alınarak denklemin ataletsel kısmı elde edilmiş olur. Yukarıdaki toplamı veren deneysel formül de kullanılabilir.

2.2 Yalpa Sönüm Momenti ($B(\phi, \dot{\phi})$)

Sönüm momentinin doğru olarak ifade edilmesi, doğru tahmini, matematiksel modelin karakteristik olarak gemi yalpa hareketini tam anlamıyla ifade etmesi açısından önemlidir. Bunla ilgili literatürde doğrusal ve doğrusal olmayan birçok yaklaşım bulunmaktadır. Yalpa genliklerinin artışı yüksek mertebeden terimleri de beraberinde getirmektedir. Bu durum, sönüm teriminin doğru bir şekilde hesaplanmasını zorlaştırmaktadır. Bu ifadelerin kullanılmaması ise hareketin matematiksel olarak doğru bir şekilde ifadesi açısından zafiyet oluşturmaktadır. Sönüm momenti geminin hızına, yapısına, viskoziteye, yalpa açısına ve hareketin frekansı gibi birçok parametreye bağlıdır. Yalpa genliklerinin artmasıyla birlikte oluşan doğrusal olmayan etkiler nedeniyle, hareket açısından gerçekçi bir tanımlama yapabilmek için hem doğrusal hem de doğrusal olmayan terimleri içinde barındıran bir fonksiyon gereklidir. Bu yaklaşımlar aşağıdaki gibidir [4, 16, 24]:

$$B(\phi, \dot{\phi}) = B_L\dot{\phi} + B_N\phi^2\dot{\phi} \tag{2.6}$$

$$B(\phi, \dot{\phi}) = B_L\dot{\phi} + B_N|\phi|\dot{\phi} \tag{2.7}$$

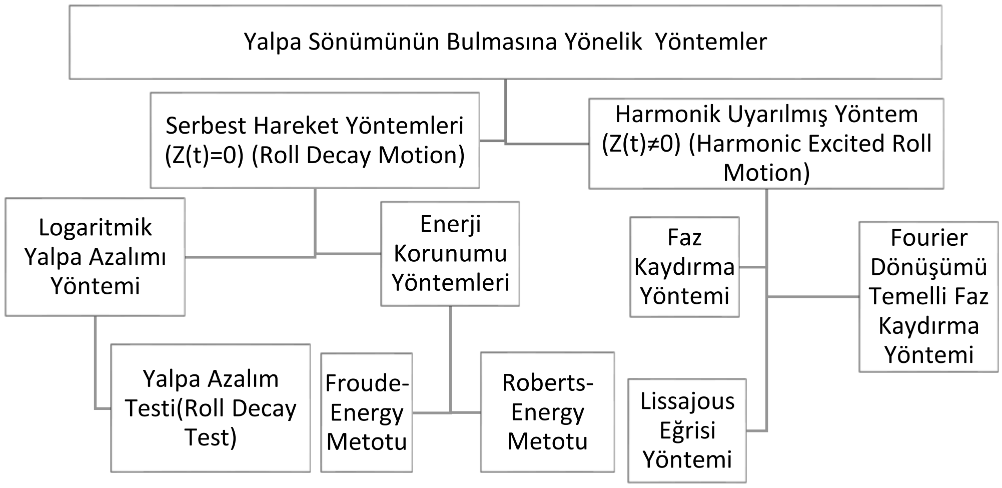
$$B(\phi, \dot{\phi}) = B_L\dot{\phi} + B_N\dot{\phi}|\dot{\phi}| \tag{2.8}$$

$$B(\phi, \dot{\phi}) = B_L\dot{\phi} + B_N\dot{\phi}^3 \tag{2.9}$$

$$B(\phi, \dot{\phi}) = B_L\dot{\phi} + B_{N1}\dot{\phi}\left|\dot{\phi}\right| + B_{N2}\dot{\phi}^3 \tag{2.10}$$

Yukarıdaki denklemlerdeki B_L ve B_{Ni} katsayılarının hesaplanmasında çeşitli yöntemler mevcuttur. Bu konuyla ilgili [27] nolu kaynak detaylı bir kaynak olup, çeşitli yönlerden ilgili yöntemleri karşılaştırmaktadır. Genel anlamda serbest ve zorlamalı yöntem olarak iki başlık halinde ayrılan yöntemler, bu iki başlık altında da alt kırılımlara uğramış ve çeşitli yaklaşımlar geliştirilmiştir. Bu tez çalışması kapsamında doğrusal olmayan terimlerin kullanılması durumunda, kullanılacak yöntem için uygulanabilirlik, zaman ve maliyet isteri, altyapının sağlanabilmesi gibi faktörler göz önüne alınmış ve mümkün olabilecek olan en uygun yöntem seçilmiştir. Bu kaynağa göre Şekil 2.3'teki genel şema verebilmektedir.

Yukarıdaki denklem (2.6) ile (2.10) arasındaki doğrusal ve doğrusal olmayan ifadelere ait B_{Ni}, B_L, ifadelerinin elde edilmesi, ilerleyen ilgili bölümde seçilen yönteme göre anlatılmış olup, doğrusal veya doğrusal olmayan modelin kullanım durumuna da ilerleyen bölümlerde karar verilmiştir.



Şekil 2.3 Yalpa sönümünün bulunmasına yönelik yöntemler [27]

Yukarıdaki denklemde doğrusal ve doğrusal olmayan ifadelere ait B_{Ni}, B_L, ifadelerinin elde edilmesi, ilerleyen ilgili bölümde seçilen yönteme göre anlatılmış olup doğrusal veya doğrusal olmayan modelin kullanım durumuna da ilerleyen bölümlerde karar verilmiştir.

2.2.1 B_L ve B_{Ni} Katsayılarının Ampirik Formüllerle Elde Edilmesi

Yukarıda çeşitli denklemler ile ifade edilen yalpa hareketinin sönüm bileşeninin eldesine yönelik (2.11) nolu denklem ele alındığında literatürde bu denklemin katsayılarının hesaplanmasına yönelik çeşitli yaklaşımlar mevcuttur [4, 16, 23]:

$$B(\dot{\phi}) = B_L\dot{\phi} + B_{N1}\dot{\phi}|\dot{\phi}| + B_{N2}\dot{\phi}^3 \tag{2.11}$$

$$B_L = \frac{2a\sqrt{(I_x + J_x)\Delta GM}}{\pi} \tag{2.12}$$

$$B_{N1} = \frac{3}{4}b(I_x + J_x) \tag{2.13}$$

$$B_{N2} = 0.7B_{N1} \tag{2.14}$$

Denklem numarası (2.12), (2.13) ve (2.14) ile verilen denklemler yalpa sönüm katsayılarını temsil etmekte olup, bu denklemlerde Δ, geminin deplasmanını (ton); GM, geminin ağırlık merkezi ile metasantır noktası arası mesafeyi (m) temsil etmektedir. Yine bu denklemlerdeki a ve b katsayıları gemi tipine göre değişmektedir. Burada gemi tipinden kasıt ise su altı formuna özgü gemi karakterdir. Tablo 2.1'de a ve b katsayıları görülmektedir [4, 16, 23].

Tablo 2.1 Gemi tipine bağlı a ve b katsayıları

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

Doğrusal olmayan bir model kurulmak istendiğinde yukarıdaki formüller yalpa sönümü için literatürde sıkça kullanılmış, güvenilir formüllerdir. Bu Formüllerde dikkat edilmesi gereken sadece üç farklı gemi tipi için geçerli olmasıdır. Katsayılarda gemi tipine bağlı farklılıklar oldukça fazladır. Çarpım durumundaki bu katsayılar sonuca ağırlıklı bir şekilde etki etmektedir. Bu durumda bu üç tip gemi haricinde kullanılmaması gerekmektedir.

2.2.2 Yalpa Sönüm Katsayılarının Deneysel Olarak Elde Edilmesi (Yalpa Azalım Testi

Yalpa sönüm katsayılarının deneysel olarak eldesi için Şekil 2.3'te belirtilen yöntemlerden Yalpa Azalım Testi (Roll Decay Test) , gerek zaman-maliyet gerekleri açısından, gerekse basitlik ve alt yapı gereksinimleri açısından en uygulanabilir yöntemdir. Burada gemi modeli deney havuzunda serbest olarak belirli bir açıda tek serbestlik dereceli olarak bırakılır ve yalpa hareketinin grafiği çizilir. Başka bir seçenek ise HAD (Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği) (CFD: Computational Fluid Dynamics) ile sistemin simülasyonunun gerçekleştirilmesidir. Yalpa genliklerinin maksimum olduğu noktalar dikkate alınarak aşağıda belirtilecek matematiksel metotlar ve eşitlikler yardımıyla B_L, B_{N1} ve B_{N2} katsayıları elde edilir. Yalpa azalım testinin anlaşılır ve basit bir şekilde anlatıldığı [28] nolu kaynak kitap bu konuda yeterli bilgiyi içermektedir ve literatürü tam anlamıyla karşılamaktadır. Ayrıca referans olarak alınabilecek [29] nolu kaynak da oldukça dikkate alınan, güvenilir bir kaynaktır.

Yalpa azalım testi serbest durumda gerçekleştirilen bir test olduğundan ilk olarak tek serbestlik dereceli, serbest sönümlü (Z(t)=0) yalpa denklemini ele almamız gerekmektedir.

$$(I_x + J_x)\ddot{\phi} + B(\phi, \dot{\phi}) + G\,(\phi, t) = 0 \tag{2.15}$$

Bu denklemde yalpa hızı ve genliği önündeki katsayılar tüm etkileri içeren toplam değerleri karşılamaktadır. Yukarıdaki denklem yalpa ivmesinin katsayısına (atalet momenti) bölünerek daha standart bir şekilde aşağıdaki gibi yazılabilir [28].

$$\ddot{\phi} + 2\alpha(\dot{\phi}) + \omega_n^2(\phi) = 0 \tag{2.16}$$

Burada;

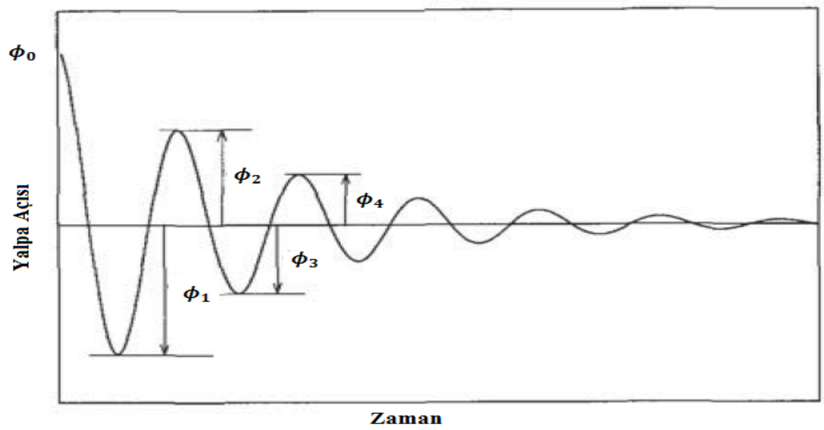
$$\alpha = B(\phi, \dot{\phi})/2(I_x + J_x) \tag{2.17}$$

$$\omega_n = \sqrt{G\,(\phi, t)/(I_x + J_x)} = \frac{2\pi}{T_n} \tag{2.18}$$

Yukarıdaki (2.15) nolu denklem aşağıdaki gibi daha açık bir şekilde yazılırsa ve aynı şekilde yalpa ivmesinin katsayısına tüm denklem bölünürse sırayla (2.19) ve (2.20) nolu denklemler elde edilir [28].

$$(I_x + J_x)\ddot{\phi} + B_L\dot{\phi} + B_{N1}\dot{\phi}|\dot{\phi}| + B_{N2}\dot{\phi}^3 + G\,(\phi, t) = 0 \tag{2.19}$$

$$\ddot{\phi} + 2\alpha(\dot{\phi}) + \beta\dot{\phi}|\dot{\phi}| + \gamma\dot{\phi}^3 + \omega_n^2(\phi) = 0 \tag{2.20}$$



Şekil 2.4 Yalpa sönüm eğrisi

Şekil 2.4'teki eğriye bakıldığında yalpa değerinin giderek azaldığı görülmektedir. Bu bize hareketin kararlılığı ile ilgili bir ipucu da vermektedir. Grafikte açının mutlak değeri dikkate alınmaktadır. Sancak veya iskele tarafında olması sadece yönü ifade etmektedir. Burada azalımla ilgilenildiğinden yönün bu aşamada dikkate alınması önemli değildir. Grafikteki en büyük ve en küçük tepe değerlerinin mutlak değerleri dikkate alınmalıdır.

Her bir tepe noktası yalpa değerinde bir azalma meydana gelmektedir. Buna yalpa azalımı denir ve $\Delta\Phi$ ile gösterilir. Her azalım adımında (sırası ile bir tepe ile bir çukur arası geçen süre) maksimum değerin ne kadar azaldığı ($\Delta\Phi$) ve bu azalımın ortalama ne kadarlık bir açı için (Ortalama yalpa açısı (Φ_m), bir tepe ile bir çukurun ortalaması) gerçekleştiği ifade edilmelidir. Bunun en iyi yolu yalpa azalımının ($\Delta\Phi$), ortalama yalpa açısına (Φ_m) göre değişim eğrisinin çizilmesidir.

$$\phi_m = \left(|\phi_j| + |\phi_{j+1}|\right)/2 \tag{2.21}$$

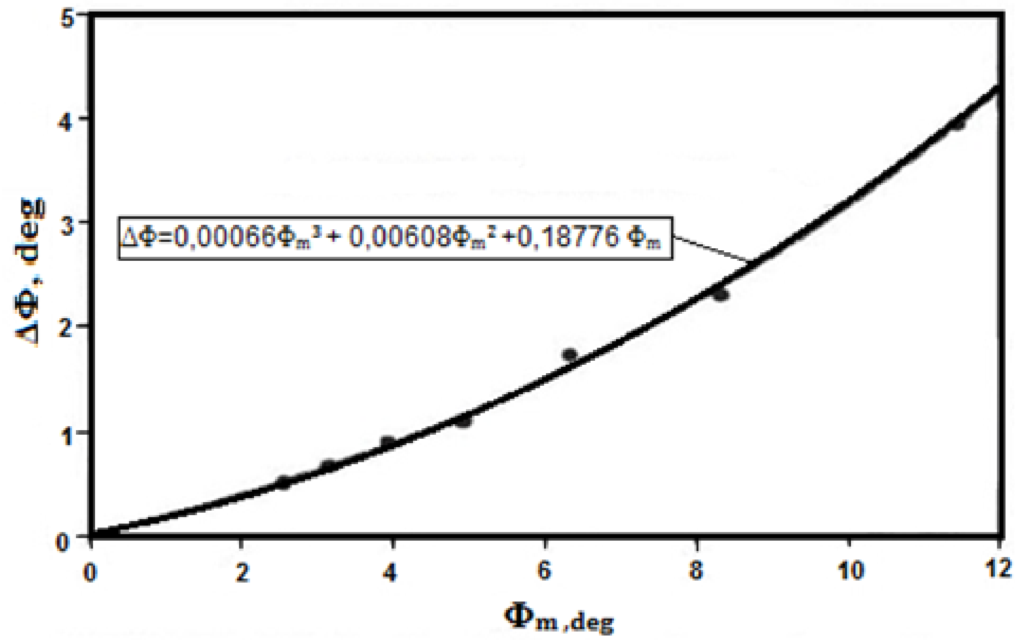
$$\Delta\phi = |\phi_j| - |\phi_{j+1}| \tag{2.22}$$

Yukarıdaki (2.20) numaralı denklemi yarım bir periyot boyunca integralini alıp, geri getirici kuvvet tarafından meydana getirilen işe, sönümlemek için harcanan enerjiyi eşitlediğimizde sonunda, ortalama yalpa genliğinin bir fonksiyonu olarak yalpa azalımı için aşağıdaki ifadeyi elde ederiz [28, 30].

$$\Delta\phi = \pi\kappa\phi_m + \frac{4}{3}\beta{\phi_m}^2 + \frac{3\pi}{8}\gamma\omega_n{\phi_m}^3 \tag{2.23}$$

Yukarıdaki denkleme bakıldığında 3. dereceden bir polinomu ifade etmekte olup polinomun değişkeni (Φm) ve değişkenin derecelerinin katsayılarını içeren bir ifadedir. Bu denklem aynı zamanda yukarıda anlatıldığı gibi bir eğri uydurma yöntemi ile (Φm- ΔΦ grafiği) ile de 3. dereceden bir polinom ile ifade edilebilir. Bu iki farklı yöntem ile bulunan denklemlerin katsayıları birbirine eşitlenerek (2.23) numaralı denklemdeki bilinmeyen ifadeler (α, β, κ) bulunabilir. Bu ifadelerin karşılıkları kullanılarak da yalpa hareketi denklemindeki katsayılar (B_L, B_{N1} ve B_{N2}) elde edilebilir.

Şekil 2.5 incelendiğinde 3. dereceden uydurulmuş olan polinomun katsayıları ile (2.23) numaralı denklemde verilen katsayılar eşitlenerek bilinmeyen ifadeler bulunmuş olacaktır. Genel olarak, (2.24) nolu denklemdeki gibi katsayılara sahip bir eğri uydurulduğunu düşünebiliriz.



Şekil 2.5 Örnek yalpa sönüm eğrisi ve eğri denklemi

$$\Delta\phi = X\phi_m + Y{\phi_m}^2 + Z{\phi_m}^3 \tag{2.24}$$

$$\Delta\phi = \pi\kappa\phi_m + \frac{4}{3}\beta{\phi_m}^2 + \frac{3\pi}{8}\gamma\omega_n{\phi_m}^3 \tag{2.25}$$

Yukarıdaki iki denklemin katsayılarını eşitlersek bilinmeyen ifadeler (α, β, κ) şu şekilde elde edilir [28, 30]:

$$\kappa = X/\pi \tag{2.26}$$

$$\beta = Y\frac{3}{4} \tag{2.27}$$

$$\gamma = Z\frac{8}{3\pi}\frac{1}{\omega_n} \tag{2.28}$$

(2.19) ve (2.20) numaralı denklemler düşünüldüğünde (α, β, γ) ifadeleri ile ilgili aşağıdaki eşitlikler kurulabilmektedir [28, 30].

$$\kappa = \alpha/\omega_n \tag{2.29}$$

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

$$\gamma = B_{N2}/(I_x + J_x) = Z\frac{8}{3\pi}\frac{1}{\omega_n} \tag{2.31}$$

$$2\alpha = B_L/(I_x + J_x) = 2\kappa\omega_n = 2\omega_n(X/\pi) \tag{2.32}$$

Yukarıdaki ifadeler düzenlenirse ilgili katsayılar (B_L, B_{N1} ve B_{N2}) aşağıdaki gibi elde edilir [28, 30].

$$B_{N1} = \beta(I_x + J_x) = Y\frac{3}{4}(I_x + J_x) \tag{2.33}$$

$$B_{N2} = \gamma(I_x + J_x) = Z\frac{8}{3\pi}\frac{1}{\omega_n}(I_x + J_x) \tag{2.34}$$

$$B_L = 2\alpha(I_x + J_x) = 2\kappa\omega_n(I_x + J_x) = 2\omega_n(X/\pi)(I_x + J_x) \tag{2.35}$$

Katsayıların son halleri, (2.33), (2.34) ve (2.35) nolu denklemelerdeki gibi elde edilmiştir.

Başlığın başından beri anlatılan yukarıdaki eşitliklerin yanında, buna benzer başka bir ifade şekli de Uluslararası Çekme Tankı Konferansı (The International Towing Tank Conference, ITTC) tarafından sunulmuştur. Bu ifade biçiminde bazı açı birimi dönüşümleri (radyan-derece) de denklemlerde uygulanmıştır [29].

$$\Delta\phi = X\phi_m + Y{\phi_m}^2 + Z{\phi_m}^3 \tag{2.36}$$

$$\Delta\phi = \frac{\pi}{2}\frac{\omega_n}{G(\phi,t)}\phi_m[B_L + \frac{8}{3\pi}\omega_n\phi_m B_{N1} + \frac{3}{4}{\omega_n}^2{\phi_m}^2 B_{N2}] \tag{2.37}$$

Yukarıdaki 2.36 ve 2.37 nolu denklemlerin katsayıları eşitlendiğinde aşağıdaki eşitlikler ortaya çıkmaktadır [29].

$$X = \frac{\pi}{2}\frac{\omega_n}{G(\phi,t)}B_L = \frac{\pi}{2}\frac{2\alpha}{\omega_n} = \frac{\pi}{2}\kappa \tag{2.38}$$

$$Y(\frac{180}{\pi}) = \frac{4}{3}\frac{{\omega_n}^2}{G(\phi,t)}B_{N1} = \frac{4}{3}\beta \tag{2.39}$$

$$Z(\frac{180}{\pi})^2 = \frac{3\pi}{8}\frac{{\omega_n}^3}{G(\phi,t)}B_{N2} = \frac{3\pi}{8}\omega_n\gamma \tag{2.40}$$

Bu üç denklemden, ana denklem katsayılarımız aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$\alpha = \frac{X\omega_n}{\pi} \tag{2.41}$$

$$\beta = Y(\frac{180}{\pi})\frac{3}{4} \tag{2.42}$$

$$\gamma = Z(\frac{180}{\pi})^2\frac{8}{3\pi\omega_n} \tag{2.43}$$

$$B_L = 2\alpha(I_x + J_x), \qquad B_{N1} = \beta(I_x + J_x), \qquad B_{N2} = \gamma(I_x + J_x) \tag{2.44}$$

Uluslararası Çekme Tankı Konferansı tarafından sunulan ifade bu kuruluşun gemi ve deniz mühendisliğinde söz sahibi bir kuruluş olmasından dolayı bu çalışmada kullanılacak olup, hesaplamalar ilerleyen bölümlerde örnek bir gemi üzerinden gerçekleştirilmiştir.

2.3 Yalpa Doğrultucu Momenti ($G(\phi, t)$)

Doğrultucu moment ifadesi de sönüm momentine benzer şekilde doğrusal ve doğrusal olmayan terimleri içeren polinomal bir fonksiyon olarak ifade edilmektedir. Deplasmanın ve yalpa açısının bir fonksiyonu olan doğrultucu moment bileşeni aşağıdaki gibi gösterilir [4, 12, 16].

$$G(\phi, t) = \Delta GZ \tag{2.45}$$

$$G(\phi, t) = \Delta(G_1\phi + G_3\phi^3 + G_5\phi^5 + G_7\phi^7 \dots) \tag{2.46}$$

Genellikle G_7 katsayısı yaralı durumdaki gemiler için kullanılır. Seçilen örnek gemi yara almamış bir gemi kabul edilmiştir. Bu nedenle, G_7 katsayısı sıfır olarak alınmıştır. Ayrıca, katsayılar $G_1>0$, $G_5>0$, $G_3<0$ ve $G_7=0$ şeklinde olmalıdır. Literatürde genellikle bu bileşen aşağıdaki iki farlı gösterimde olduğu gibi üçüncü veya beşinci dereceden polinom şeklinde ele alınmıştır [1, 16].

$$G(\phi, t) = \Delta(G_1\phi + G_3\phi^3 + G_5\phi^5) \tag{2.47}$$

$$G(\phi, t) = \Delta(G_1\phi + G_3\phi^3) \tag{2.48}$$

Yukarıdaki katsayılar için literatürdeki deneye dayalı formüller aşağıdaki gibidir [18, 22].

$$G_1 = \frac{d(GZ)}{d\phi} = GM \tag{2.49}$$

$$G_3 = \frac{4}{\phi_v^4}(3A_{\phi v} - GM{\phi_v}^2) \tag{2.50}$$

$$G_5 = -\frac{3}{\phi_v^6}(4A_{\phi v} - GM{\phi_v}^2) \tag{2.51}$$

Yukarıdaki katsayıların farklı bir gösterim şekli olarak, aşağıdaki hareket denklemi ele alındığında aşağıda verilen katsayılar eşdeğerdir [24].

$$(I_x + J_x)\ddot{\phi} + B_L\dot{\phi} + B_{N1}\dot{\phi}|\dot{\phi}| + B_{N2}\dot{\phi}^3 + \Delta(G_1\phi + G_3\phi^3 + G_5\phi^5) = 0 \tag{2.52}$$

Yukarıdaki denklem $(I_x + J_x)$ ataletsel bileşenine bölünürse aşağıdaki denklem elde edilir.

$$\ddot{\phi} + b_L\dot{\phi} + b_{N1}\dot{\phi}|\dot{\phi}| + b_{N2}\dot{\phi}^3 + (m_1\phi + m_3\phi^3 + m_5\phi^5) = 0 \tag{2.53}$$

Denklemdeki m_1, m_3, m_5 katsayıları ise aşağıdaki denklemlerdeki gibidir [24].

$$m_1 = \frac{\Delta GM}{(I_x + J_x)} = \omega_n^2 \tag{2.54}$$

$$m_3 = \frac{4\omega_n^2}{\phi_v^2}\left[\frac{3A_{\phi v}}{GM\phi_v{}^2} - 1\right] \tag{2.55}$$

$$m_5 = -\frac{3\omega_n^2}{\phi_v^4}\left[\frac{4A_{\phi v}}{GM\phi_v{}^2} - 1\right] \tag{2.56}$$

ϕ_v: Devrilme açısı

$A_{\phi v}$: Devrilme açısına kadar olan kısımda GZ- ϕ eğrisi (stabilite eğrisi) altındaki alan

Yukarıdaki denklemler yalpa doğrultucu momentinin bir polinom olarak elde edilmesine yönelik olarak geliştirilmiştir. Yalpa hareketi bir polinom olarak doğrusal olmayan bir yapıya sahip olacaktır.

Yukarıdaki denklemler ve açıklamalar yardımı ile yalpa hareketine ait doğrultucu moment katsayıları hesaplanabilir ve hareket denklemindeki yerini alabilir. Katsayıların hesaplanması ilerleyen bölümde örnek gemi üzerinden gerçekleştirilmiştir.

2.4 Doğal Frekans ve Sönüm Oranı

Bu bölüme kadar çeşitli yerlerde bahsi geçen doğal frekans, sönümlü doğal frekans ve sönüm oranı ile ilgili bağıntılar, bu bölümde detaylandırılacaktır.

Frekans çeşitleri arası bağıntılar ve frekansların hesabına yönelik kullanılabilecek denklemler aşağıdaki gibidir [25, 28, 31, 32].

$$\omega_{nd} = \sqrt{(\omega_n)^2 - \upsilon^2} \tag{2.57}$$

$$\upsilon = \kappa\omega_n \tag{2.58}$$

$$\omega_{nd} = (\omega_n)\sqrt{1 - \kappa^2} \tag{2.59}$$

Sistemi zorlayan bozucu frekansla ilgili çevrimler aşağıdaki gibi yapılabilir:

$$\upsilon = 2\pi f = \frac{2\pi n}{60} \tag{2.60}$$

υ: Bozucu frekans (radyan/saniye)

f: Bozucu frekans (hertz)

n: Bozucu frekans (devir/dakika)

$$\upsilon = \frac{gA_\phi}{2\Delta k_\phi^2} \tag{2.61}$$

Bilinen ifadesiyle bir sisteme ait doğal frekans serbest ve sönümsüz durumda sisteme ait eşdeğer yay katsayısının eşdeğer kütleye oranının kareköküdür [22].

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k_{eş}}{m_{eş}}} = \sqrt{\frac{\Delta GZ}{(I_x + J_x)}} \tag{2.62}$$

Bununla birlikte gemilerin yalpa hareketine ait doğal frekansın hesaplanmasında çeşitli formülasyonlar literatürde mevcuttur [22, 25].

$$\omega_n = \frac{\sqrt{(gGM)}}{k_\phi} \tag{2.63}$$

$$k_\phi = \sqrt{\frac{(I_x + J_x)}{\Delta}} \tag{2.64}$$

Burada, k_ϕ değeri Jirasyon yarıçapıdır. Doğal Frekans, w_n, değeri yaklaşık olarak 0,35B< k_ϕ<0,45B aralığındadır [22].

Bir diğer kaynakta aşağıdaki denklemeler sunulmuştur [28, 24, 27].

$$T_n = \frac{1}{f_n} = \frac{2\pi}{\omega_n} = \frac{2{,}27B}{\sqrt{gGM}} \tag{2.65}$$

$$\omega_n = \frac{2\pi\sqrt{gGM}}{2{,}27B} \tag{2.66}$$

$$\omega_n = \sqrt{\frac{\Delta GM}{(I_x + J_x)}} \tag{2.67}$$

$$\omega_n = \sqrt{\frac{(gGM)}{(0{,}4B_{WL})^2}} \tag{2.68}$$

2.5 Hareket Denklemi

Yukarıdaki başlıklar altında hesaplama yöntemleri verilen denkleme ait katsayıların seçimi gerçekleştirildiğinde, yalpa hareketinin denklemi aşağıdaki şekilde elde edilmiştir.

$$(I_x + J_x)\ddot{\phi} + B_L\dot{\phi} + B_{N1}\dot{\phi}|\dot{\phi}| + B_{N2}\dot{\phi}^3 + \Delta(G_1\phi + G_3\phi^3 + G_5\phi^5) = Z(t) \tag{2.69}$$

$J_x + I_x$: Kütlesel atalet ifadesi (kg.m^2)
B_L: Doğrusal yalpa sönüm katsayısı (kg.m^2/s)
B_{N1}: Doğrusal olmayan yalpa sönüm katsayısı (2. derece) (kg.m^2/rad)
B_{N2}: Doğrusal olmayan yalpa sönüm katsayısı (3. derece) (kg.m^2.s/rad^2)
G_n: Yalpa doğrultucu moment katsayıları (n:1,3,5) (sırayla; m, m/rad^2, m/rad^4)
Z(t): Bozucu ve kontrol momenti girişleri (Nm)

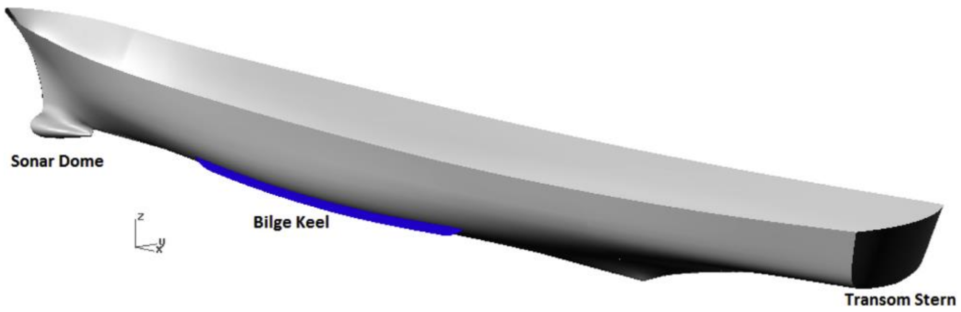
Yukarıdaki doğrusal olmayan denklemde B_{Ni}, B_L, G_n katsayılarının elde edilmesi önceki başlıklar altında anlatılmış olup, literatürden seçilen örnek bir gemi üzerinden hesaplamaları ilerleyen bölümlerde gerçekleştirilmiştir.

3
ÖRNEK GEMİ SEÇİMİ VE ÖZELLİKLERİ

Literatürden örnek bir gemi seçilmesi hususundaki araştırmalar sonucu, gerek üzerinde yapılmış birçok deneysel ve teorik çalışmaların yaygın olması, gerekse modelin güvenilir bir referans model olması sebebiyle literatürdeki "DTMB 5415" gemisi örnek olarak seçilmiştir.

Bu model (DTMB 5415) Amerikan Deniz Kuvvetleri tarafından 1980 yılında su üstü muhrip gemisi olarak tasarlanmıştır. Gemi formunun bir modeli 2000 yılında MARIN (Maritime Research Institute Netherlands) tarafından 1/35,48 ölçekli (DTMB5415) olarak üretilmiş ve aynı yerde serbest ve hareketli testleri gerçekleştirilmiştir. Buna ek olarak üç farklı çekme tankında (IIHR, FORCE ve INSEAN) farklı ölçekli DTMB modelleri (L=3,048 m, L=4,002 m ve L=5,720 m) kullanılarak çeşitli deneyler icra edilmiştir [33].

Bu Amerikan muhrip savaş gemisi ile ilgili özellikle sönüm katsayılarının hesaplanmasına yönelik olarak aşağıda referans olarak verilecek birkaç çalışma yeterli olacaktır. Ayrıca, geminin bir modeli olan "DTMB 5512" olarak adlandırılan bir modelinin de özellikleri ilerleyen aşamalarda belirtilecektir. [31] ve [32] nolu kaynaklar sıfır ileri hızda; [25] nolu kaynak ise froude sayısı (atalet kuvvetlerinin yerçekimi kuvvetlerine oranı) 0,41 olacak şekilde (Fr=0,41) çalışmalarını gerçekleştirmişlerdir. Şekil 3.1'de gemi kabuk modeline ve Şekil 3.2'de gemi ölçekli modeline ait görseller paylaşılmıştır.



Şekil 3.1 DTMB 5415 gemisinin kabuk modeli [32]

Şekil 3.2 DTMB 5415 gemisinin 1/51 ölçekli modeli [32]

3.1 DTMB 5415 Gemisine Ait Değişkenler

Gemiye ait ana özellikler ve 1/51 ölçekli modeline ait özellikler, Tablo 3.1'de belirtildiği gibidir [31, 32].

Tablo 3.1 Gemi ve modelin ana özellikleri

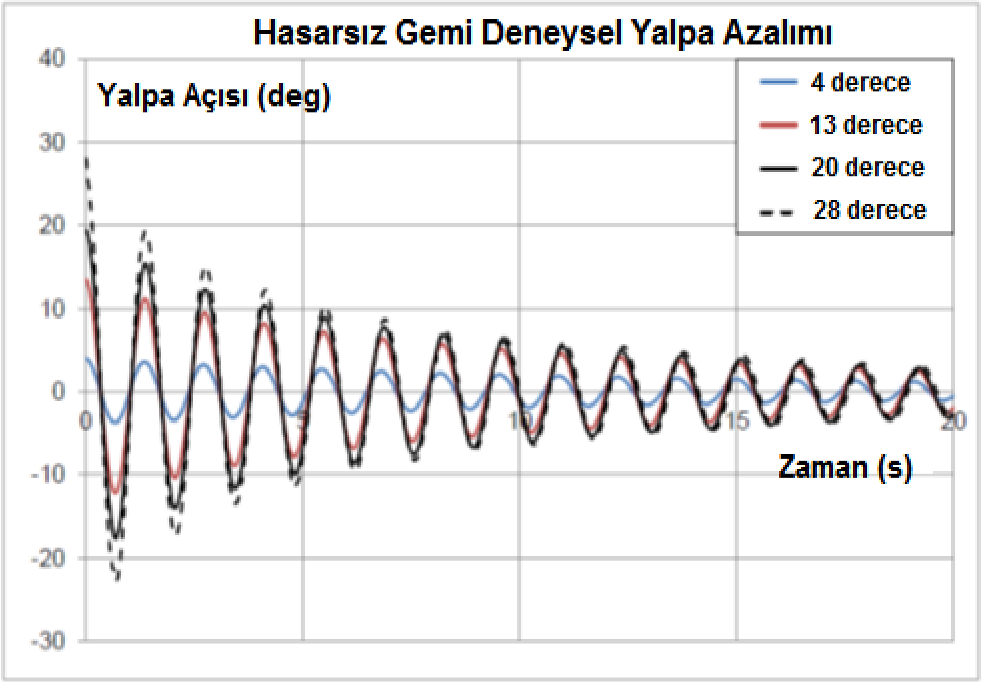
Özellik	Kısaltma	Gemi	Model
Tam Boy	LOA (m)	153,300	3,0
Kaideler Arası Boy	LPP (m)	142,200	2,788
Su Hattı Genişliği	BWL (m)	19,082	0,374
Tam Genişlik	BOA (m)	20,540	0,403
Kalıp Derinlik	D (m)	12,470	0,244
Su Çekimi	T (m)	6,150	0,120
Hacim	V(m3)	8424,4	0,0635
Deplasman	Δ (t, kg)	8635	63,5
Blok Katsayısı	CB	0,505	0,505
Prizmatik Katsayı	CP	0,616	0,616
Orta Kesit Katsayısı	CM	0,815	0,815
Metesantır Yüksekliği	KM (m)	9,493	0,186
AğırlıkMerkezinin Yüksekliği	KG (m)	7,555	0,148
Metesantır Yüksekliği	GM (m)	1,938	0,038
Ağırlık Merkezinin Boyuna Konumu	LCG (m)	70,137	1,375
Yalpa Cayrosyon Yarıçapı	kxx-WATER (m)	6,932	0,136
Yunuslama Cayrasyon Yarıçapı	kyy-AIR (m)	36,802	0,696
Sapma Cayrasyon Yarıçapı	kzz-AIR (m)	36,802	0,696

Yukarıda bahsi geçen [32] nolu çalışmanın sonucunda, gemi yalpa hareketine ait deneysel çıktılar aşağıdaki Tablo 3.2 ve Şekil 3.3'teki gibidir.

Tablo 3.2 Yalpa azalımı doğal frekansı [32]

Özellik	Yalpa Azalım Testi Sonuçları	Değer
Yalpa Doğal Frekansı	ω_n (rad/s)	4,593
Yalpa Doğal Periyodu	T_n (s)	1,368

Çeşitli başlangıç açılarında (28, 20, 13 ve 4 derece) serbest sönümlü harekete bırakılan modelin yalpa eğrisi Şekil 3.3'teki gibidir.



Şekil 3.3 Gemi yalpa hareketi [32]

Ayrıca yukarıda çıktıları sunulan [32] nolu çalışmayı referans alan başka bir çalışma olan [31] nolu çalışma, referans aldığı deneysel verilerin üzerine sayısal hesaplamalar (HAD analizi) yaparak karşılaştırmalı sonuçları sunmuştur. Bu çalışmada, sayısal hesaplamalar tek (sadece yalpa hareketine serbest) ve altı serbestlik dereceli (gemi tamamen serbest) şekilde gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmaya ait veri çıktıları ve eğriler aşağıda sunulmuştur. Tablo 3.3'te tek serbestlik dereceli ve Tablo 3.4'te altı serbestlik dereceli HAD analizi çıktıları; Tablo 3.5'te ise tek serbestlik dereceli deneysel analiz çıktıları paylaşılmıştır.

Tablo 3.3 Tek serbestlik dereceli HAD çıktıları [31]

ti	ω	ϕi	ϕ_{mean}	Δϕi
(s)	(rad/s)	(deg)	(deg)	(deg)
0	4,425	18,948	18,266	1,364
0,71	4,292	−17,584	16,764	1,277
1,442	4,304	15,945	15,306	1,277
2,172	4,304	−14,667	14,088	1,036
2,902	4,223	13,508	12,990	1,036
3,646	4,375	−12,472	12,016	0,863
4,364	4,234	11,560	11,129	0,863
5,106	4,351	−10,697	10,278	0,691
5,828	4,245	9,858	9,513	0,691
6,568	4,268	−9,167	8,836	0,701
7,304	4,304	8,506	8,155	0,701
8,034	4,351	−7,804	7,526	0,614
8,756	4,315	7,249	6,942	0,614
9,484	4,234	−6,635	6,381	0,494
10,226	4,189	6,127	5,880	0,494
10,976	4,327	−5,634	5,424	0,379
11,702	4,178	5,214	5,025	0,379
12,454	4,327	−4,835	4,662	0,331
13,18	4,363	4,488	4,323	0,331

Tablo 3.4 Altı serbestlik dereceli HAD çıktıları [31]

ti	ω	ϕi	ϕ_{mean}	Δϕi
(s)	(rad/s)	(deg)	(deg)	(deg)
0,000	4,437	19,241	18,775	0,933
0,708	4,375	−18,308	17,732	0,998
1,426	4,400	17,156	16,657	0,998
2,140	4,388	−16,158	15,682	0,858
2,856	4,400	15,205	14,776	0,858
3,570	4,375	−14,347	13,944	0,831
4,288	4,388	13,542	13,126	0,831
5,004	4,400	−12,711	12,390	0,718
5,718	4,375	12,069	11,710	0,718
6,436	4,388	−11,351	11,044	0,556
7,152	4,351	10,737	10,459	0,556
7,874	4,425	−10,181	9,901	0,534
8,584	4,388	9,620	9,353	0,534
9,300	4,400	−9,086	8,838	0,508
10,014	4,375	8,590	8,336	0,508
10,732	4,375	−8,082	7,869	0,444
11,450	4,425	7,656	7,434	0,444
12,160	4,412	−7,212	7,009	0,347
12,872	4,375	6,805	6,631	0,347

Tablo 3.5 Tek serbestlik dereceli deneysel analiz çıktıları [31]

ti	ω	ϕi	ϕ_{mean}	Δϕi
(s)	(rad/s)	(deg)	(deg)	(deg)
0,000	4,542	18,210	17,543	1,335
0,692	4,691	−16,875	15,984	1,177
1,361	4,495	15,093	14,504	1,177
2,060	4,640	−13,916	13,263	0,831
2,737	4,495	12,610	12,195	0,831
3,436	4,591	−11,779	11,294	0,710
4,121	4,591	10,809	10,454	0,710
4,805	4,542	−10,099	9,715	0,627
5,497	4,591	9,332	9,019	0,627
6,181	4,591	−8,706	8,425	0,567
6,865	4,449	8,145	7,861	0,567
7,571	4,691	−7,578	7,349	0,485
8,241	4,591	7,121	6,878	0,485
8,925	4,495	−6,636	6,450	0,432

Tablo 3.6'da deneysel ve HAD analizlerinde elde edilen gemi yalpa hereketine ait doğal frekanslar görülmektedir.

Tablo 3.6 Deneysel ve HAD analizlerine ait doğal frekanslar [31]

Deney	Yalpa Doğal Frekansı (ω_n)
HAD -9 periyot-1 Serbestlik dereceli	4,2966
HAD-9 periyot-6 Serbestlik dereceli	4,3931
Deneysel-9 periyot	4,5779
Deneysel-25 periyot	4,5934

Ayrıca başka bir model olan DTMB 5512 gemisi (DTMB 5415 gemisinin 1/46,588 ölçekli modeli) üzerine yapılmış [25] nolu çalışmada modele ait çıktılar aşağıda paylaşılmıştır. Bu çalışmada deneysel veriler ("IIHR-Hydroscience & Engineering" araştırma merkezinin deneysel verileri kullanılmıştır.) ile HAD analizi sonuçları karşılaştırması yapılmıştır. Tablo 3.7'de model gemiye ait bilgiler görülmektedir.

Tablo 3.7 DTMB 5512 özellikleri [25]

Özellik	Kısaltma	Birim	Model (DTMB 5512)
Boy	LPP	m	3,048
Genişlik	B	m	0,405
Draft	T	m	0,132
Islak Yüzey Alanı	S_W	m^2	1,459
Blok Katsayısı	C_B	-	0,506
Metesantır Yüksekliği	GM	m	0,043
Ağırlık Merkezinin Boyuna Konumu	LCG	m	1,536
Ağırlık Merkezinin Düşey Konumu	VCG	m	0,030
Yalpa Cayrosyon Yarıçapı	k_Φ	m	0,158
Doğal Yalpa Periyotu	T	s	1,54

Tablo 3.8'de model gemiye ait HAD analizi çıktıları görülmektedir.

Tablo 3.8 Yalpa azalımına ait HAD çıktıları [25]

i	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
ϕi (deg)	10	7,4	5,5	3,9	2,9	2,2	1,6	1,2	0,9	0,7	0,5	0,4	0,2
t (s)	0	0,8	1,6	2,4	3,2	4,0	4,9	5,7	6,5	7,3	8,1	8,9	9,7
ϕm (deg)	8,7	6,4	4,7	3,4	2,5	1,9	1,4	1,0	0,8	0,6	0,4	0,3	–
Δϕ	2,5	1,9	1,5	1,0	0,6	0,58	0,36	0,37	0,18	0,23	0,1	0,1	–

Tablo 3.9'da model gemiye ait deneysel analiz çıktıları görülmektedir.

Tablo 3.9 Yalpa azalımına ait deneysel analiz çıktılar [25]

i	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ϕ_i (deg)	10	7,47	5,51	4,03	3,01	2,24	1,66	1,21	0,91	0,65	0,48
t (s)	0	0,82	1,59	2,35	3,13	3,89	4,64	5,40	6,10	6,95	7,65
ϕ_m (deg)	8,74	6,49	4,77	3,52	2,63	1,95	1,44	1,06	0,78	0,56	–
Δϕ	2,53	1,96	1,48	1,01	0,77	0,58	0,45	0,31	0,26	0,16	–

Çalışmada model gemiye ait sonuçlardan tam ölçekli gemiye ait sonuçlara geçilmesi benzerlik oranı (ölçek paydası=λ) kullanılarak sağlanmıştır.

Gemi ve model katsayıları arasındaki bağıntı, Tablo 3.10'da belirtildiği gibidir.

Tablo 3.10 Gemi ve model katsayıları arasındaki bağıntılar [25]

Özellik	Eşitlik
Yalpa Periyodu ve Doğal Frekansı (T_n, ω_n)	$(T_n)_s = (T_n)_m\sqrt{\lambda}$
	$(\omega_n)_s = (\omega_n)_m/\sqrt{\lambda}$
Yalpa Sönüm Katsayıları (α, β, γ)	$(\alpha)_s = (\alpha)_m/\sqrt{\lambda}$
	$(\beta)_s = (\beta)_m$
	$(\gamma)_s = (\gamma)_m\sqrt{\lambda}$
$\kappa = \gamma/\omega_n$ Olduğundan	$(\kappa)_s = (\kappa)_m\lambda$

Aşağıda [25] nolu çalışmaya ait çıktılar, Tablo 3.11'de paylaşılmıştır.

Tablo 3.11 Deneysel ve HAD analizi doğal frekans ve periyotları [25]

Kaynak	Yalpa Doğal Frekansı	Yalpa periyodu
	Model	
	$(\omega_n)_m$	$(T_n)_m$
HAD	3,8745	1,6217
Deney	4,1107	1,5285
Kaynak	Gemi	
	$(\omega_n)_s$	$(T_n)_s$
HAD	0,5676	11,0702
Deney	0,6022	10,4341

Bu bölümde örnek gemimiz olan Amerikan Muhrip gemisi, DTMB 5415, üzerinde literatürdeki çalışmalar ve bu çalışmalara ait çıktılar paylaşılmıştır. Bu bölümde paylaşılan çıktılar üzerinde yapılan hesaplamalar ile gemiye ait yalpa hareketinin matematiksel modelindeki yalpa sönüm katsayıları elde edilmiştir. Bir sonraki başlıkta DTMB 5415 gemisi yalpa hareketi matematiksel modeline ait katsayılar hesaplanmıştır.

4
ÖRNEK GEMİ MATEMATİKSEL MODELİ

Önceki bölümlerde detaylı açıklaması yapılan gemiye ait yalpa hareketinin denklemi aşağıdaki gibidir:

$$(I_x + J_x)\ddot{\phi} + B_L\dot{\phi} + B_{N1}\dot{\phi}\left|\dot{\phi}\right| + B_{N2}\dot{\phi}^3 + \Delta(G_1\phi + G_3\phi^3 + G_5\phi^5) = Z(t) \qquad (4.1)$$

4.1 Yalpa Atalet Momenti $(I_x + J_x)$ Hesabı

Yalpa atalet momenti aşağıdaki denklemler yardımı ile hesaplanabilir. Aşağıdaki ifadelerden ikincisi kullanım kolaylığı ve daha genel bir yöntem olmasından dolayı tercih edilmektedir.

$$(I_x + J_x) = \frac{\Delta}{12g}(B^2 + 4KG^2) \qquad (4.2)$$

$$I_x = \frac{\Delta}{g}k_\phi^2 \qquad (4.3)$$

Gemiye ait değerler (k_ϕ= 6,932 (m) ve Δ= 8635000 (kg)= 67051350 (N)) Tablo 3.1'den alınmıştır. Yalpa atalet momenti, gemi için aşağıdaki gibidir.

$$(I_x)_s = \frac{67051350}{9,81}6,932^2 \text{ ve } (I_x + J_x) = 1,2(I_x) \qquad (4.4)$$

$$(I_x)_s = 414934408,2 \;\text{ ve }\; (I_x + J_x)_s = 497921290 \quad (\text{kg.m}^2) \qquad (4.5)$$

Matematiksel modelin oluşturulmasında kullanılan tüm değişkenlere ait birimler için referans olarak [34] nolu doktora çalışması örnek alınmıştır.

Modele (λ= 46,588 ve Fr=0,41) ait değerler (k_ϕ= 0,158 (m) ve Δ =(L x B x T x CB) ρ_{su} =84,512 (kg)= 829,062 (N)) Tablo 3.7'den alınmıştır. Yalpa atalet momenti, gemi modeli için aşağıdaki gibidir.

$$(\mathrm{I_x})_{\mathrm{m1}} = \frac{829{,}062}{9{,}81} 0{,}158^2 \text{ ve } (\mathrm{I_x} + \mathrm{J_x}) = 1{,}2(\mathrm{I_x}) \tag{4.6}$$

$$(\mathrm{I_x})_{\mathrm{m1}} = 2.11 \text{ ve } (\mathrm{I_x} + \mathrm{J_x})_{\mathrm{m1}} = 2.531 \quad (\mathrm{kg.m^2}) \tag{4.7}$$

Modele (λ= 51 ve Fr=0) ait değerler (k_ϕ=0,136 (m) ve Δ=63(kg)= 618,03(N)) Tablo 3.1'den alınmıştır. Yalpa atalet momenti, gemi modeli için aşağıdaki gibidir.

$$(\mathrm{I_x})_{\mathrm{m2}} = \frac{618{,}03}{9{,}81} 0{,}136^2 \text{ ve } (\mathrm{I_x} + \mathrm{J_x}) = 1{,}2(\mathrm{I_x}) \tag{4.8}$$

$$(\mathrm{I_x})_{\mathrm{m2}} = 1{,}165 \text{ ve } (\mathrm{I_x} + \mathrm{J_x})_{\mathrm{m2}} = 1{,}4 \quad (\mathrm{kg.m^2}) \tag{4.9}$$

4.2 Yalpa Sönüm Momenti ($\mathbf{B(\phi, \dot{\phi})}$) Hesabı

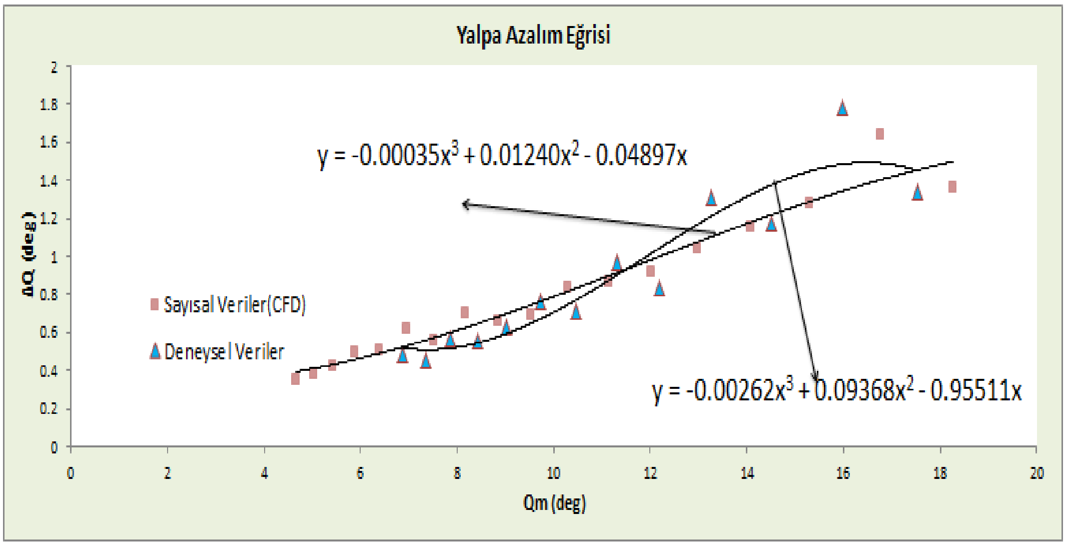
Yalpa sönüm momenti, üçüncü dereceden hesaplanmış olup sonrasında genel matematiksel modelle birlikte doğrusal hale getirilmiştir.

$$\mathrm{B}(\phi, \dot{\phi}) = \mathrm{B_L}\dot{\phi} + \mathrm{B_{N1}}\dot{\phi}\left|\dot{\phi}\right| + \mathrm{B_{N2}}\dot{\phi}^3 \tag{4.10}$$

Daha önce detayları paylaşılan [25] ve [32] nolu iki farklı çalışmada, iki farklı yöntemle (deneysel ve HAD) elde edilen, örnek gemiye ait yalpa azalımının en yüksek ve an alçak değerleri (tepe ve çukur olmak üzere uç değerler) verilmiştir. Bu değerleri kullanarak yalpa azalım testi yöntemi yardımı ile iki farklı katsayı takımı elde edilmiştir. Bu denklemlerden bir tanesi gemi ileri hızı sıfır iken, diğeri ise sıfırdan farklı iken (Fr=0,41) elde edilmiş değerleri içermektedir.

4.2.1 Yalpa Sönüm Katsayıları Hesabı (Fr=0)

Örnek gemiye ait [31] ve [32] nolu çalışmalara ait deneysel ve HAD analizi çıktıları olan maksimum yalpa genlikleri ve doğal frekans değerleri ele alınmıştır. Bu değerlerle birlikte yalpa azalım testi yöntemi kullanılarak yalpa azalım eğrileri çizdirilmiş ve yalpa sönüm katsayıları elde edilmiştir. Şekil 4.1'de ileri hızı olmayan (Fr=0) model için yalpa azalım eğrisi verilmiştir.



Şekil 4.1 Sıfır ileri hızda yalpa azalım eğrisi

Tablo 4.1'de yalpa azalım testi sonrası hesaplanan yalpa sönüm katsayıları görülmektedir.

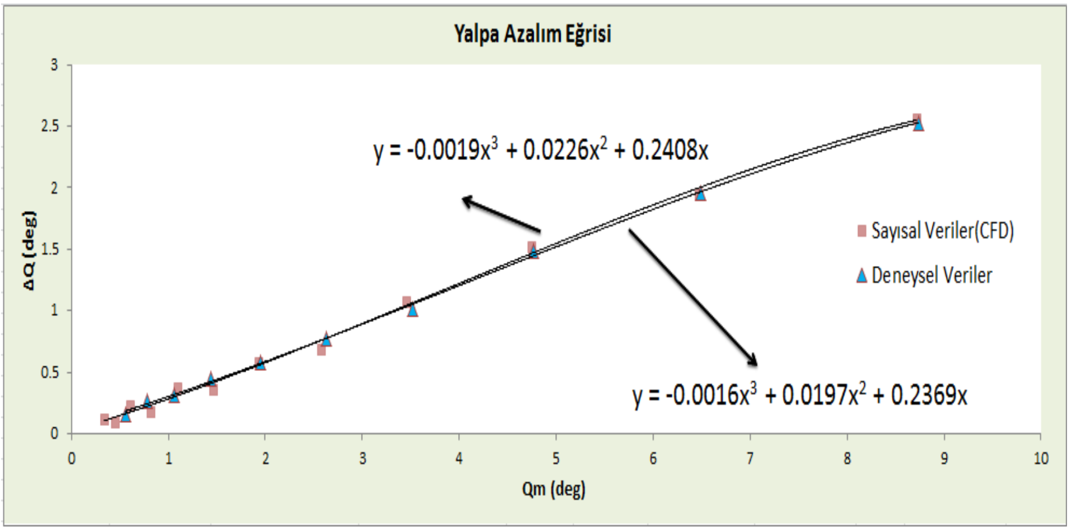
Tablo 4.1 Sıfır ileri hızda yalpa sönüm katsayıları

Katsayılar-Model				
	α	β	γ	$(\omega_n)_m$
Deneysel	-1.39177	4.0256	-1.59477	4.5779
Sayısal(CFD)	-0.067	0.5328	-0.227	4.2966
Katsayılar-Gemi				
	α	β	γ	$(\omega_n)_s$
Deneysel	-0.19488	4.0256	-11.389	0.6410
Sayısal(CFD)	-0.009378	0.53285	-1.62103	0.6016

Model ve gemiye ait parametreler arasındaki geçişler, benzerlik oranı kullanarak, Tablo 3.10'da verilen eşitlikler kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

4.2.2 Yalpa Sönüm Katsayıları Hesabı (Fr=0,41)

İleri hızda (Fr=0,41) gerçekleştirilen [25] nolu kaynaktan alınan çıktılar kullanılarak çizilen yalpa azalım eğrisi Şekil 4.2 'deki gibidir. Doğal frekans olarak yine bu çalışmadaki değerler kullanılmıştır.



Şekil 4.2 İleri hızda yalpa azalım eğrisi

Tablo 4.2'de yalpa azalım testi sonrası hesaplanan yalpa sönüm katsayıları görülmektedir.

Tablo 4.2 İleri hızda yalpa sönüm katsayıları

Katsayılar-Model				
	α	β	γ	$(\omega_n)_m$
Deneysel	0.30997	0.84654	-1.08459	4.1107
Sayısal(CFD)	0.29697	0.97116	-1.36647	3.8745
Katsayılar-Gemi				
	α	β	γ	$(\omega_n)_s$
Deneysel	0.04541	0.84654	-7.40296	0.6023
Sayısal(CFD)	0.04351	0.97116	-9.32693	0.5676

$$\ddot{\phi} + 2\alpha(\dot{\phi}) + \beta\dot{\phi}|\dot{\phi}| + \gamma\dot{\phi}^3 + \omega_n^2(\phi) = 0 \quad (4.11)$$

Yukarıdaki denklemde 2α değeri B_L katsayısının toplam kütle atalet momentine bölünmüş halidir. Aynı şekilde, β ve B_{N1} ile γ ve B_{N2} için de bu durum geçerlidir. Katsayılar bu şekilde bulunabileceği gibi, kontrol matrislerinde α, β ve γ ifadeleri kullanılacağı için bu şekliyle kullanımı da uygundur.

4.3 Yalpa Doğrultucu Momenti ($G(\phi, t)$) Hesabı

Örnek gemimize ait yalpa hareketinin matematiksel modelinin bir parçası olan, yalpa doğrultucu momentine ait katsayılar, G_1, G_2 ve G_3 aşağıdaki formülasyonlar kullanılarak hesaplanmıştır. $A_{\phi v}$, ϕ_v değerleri $GZ - \phi$ eğrisinin çizimi yardımı ile hesaplanmıştır. Gemiye ait $GZ - \phi$ eğrisi çiziminde Maxsurf (Maxsurf 20 V8i) mühendislik programı kullanılmıştır. Doğrudan geminin kendisine ait üç boyutlu modeli yardımı ile çizilen $GZ - \phi$ eğrisi, gemi dizayn su hattında (DWL de) yüzüyor ve tüm serbest yüzey etkisi oluşturacak tanklar tam dolu kabulü ile elde edilmiştir.

$$G(\phi, t) = \Delta(G_1\phi + G_3\phi^3 + G_5\phi^5) \tag{4.12}$$

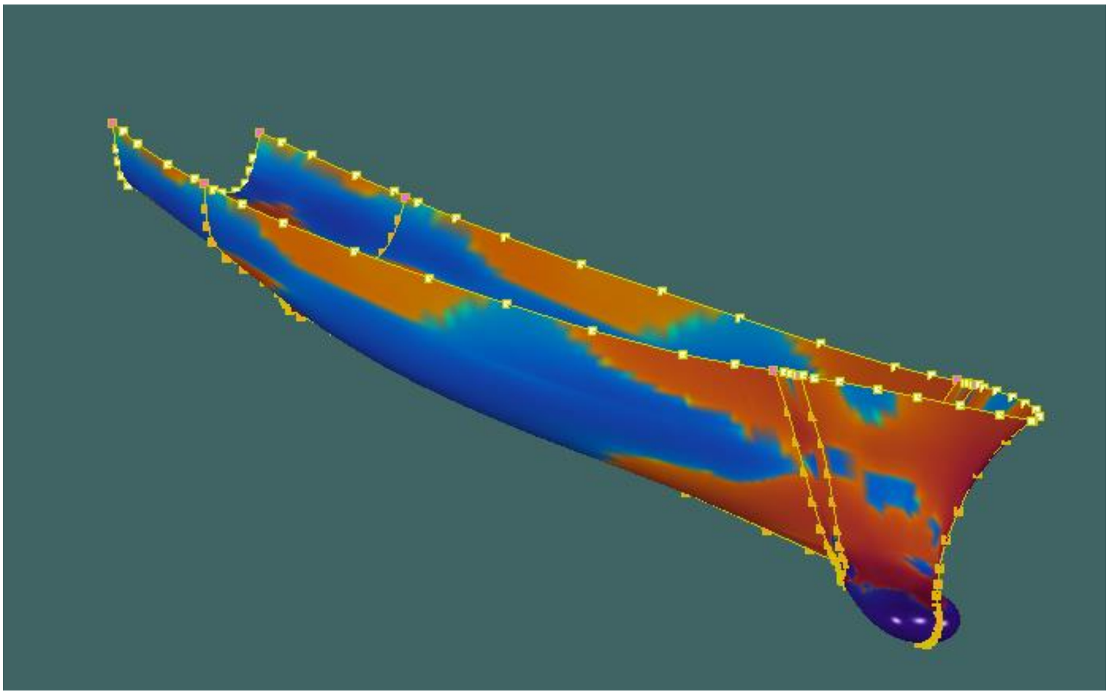
Yukarıdaki katsayılar için literatürdeki deneye dayalı formüller aşağıdaki gibidir [16, 24].

$$G_1 = \frac{d(GZ)}{d\phi} = GM \tag{4.13}$$

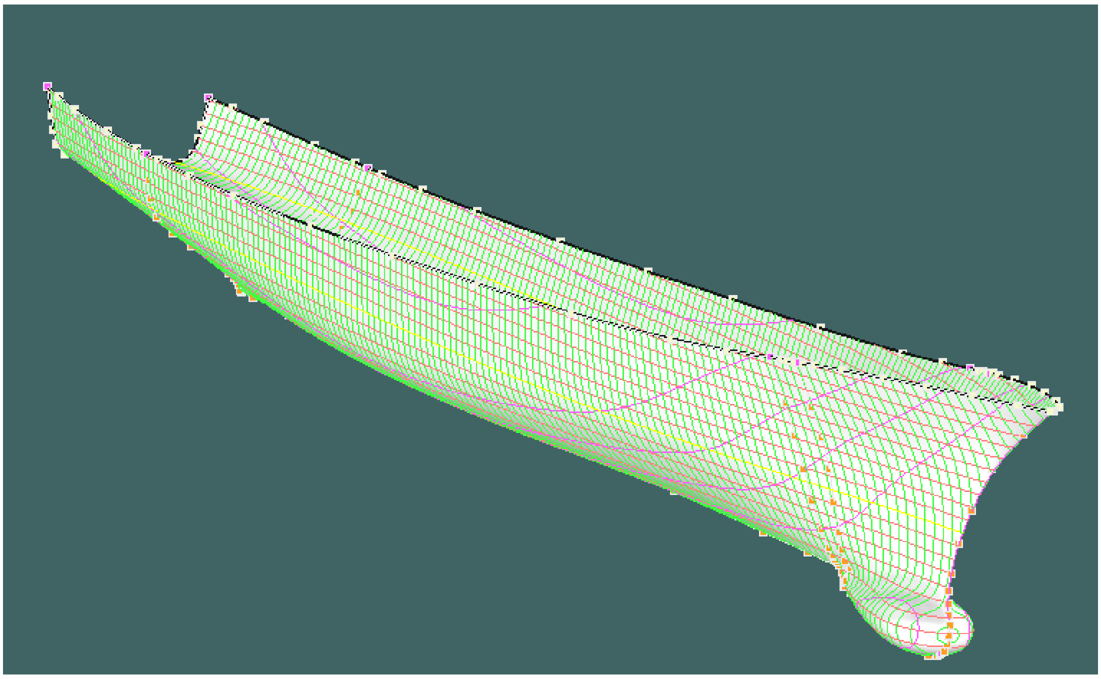
$$G_3 = \frac{4}{\phi_v^4}(3A_{\phi v} - GM{\phi_v}^2) \tag{4.14}$$

$$G_5 = -\frac{3}{\phi_v^6}(4A_{\phi v} - GM{\phi_v}^2) \tag{4.15}$$

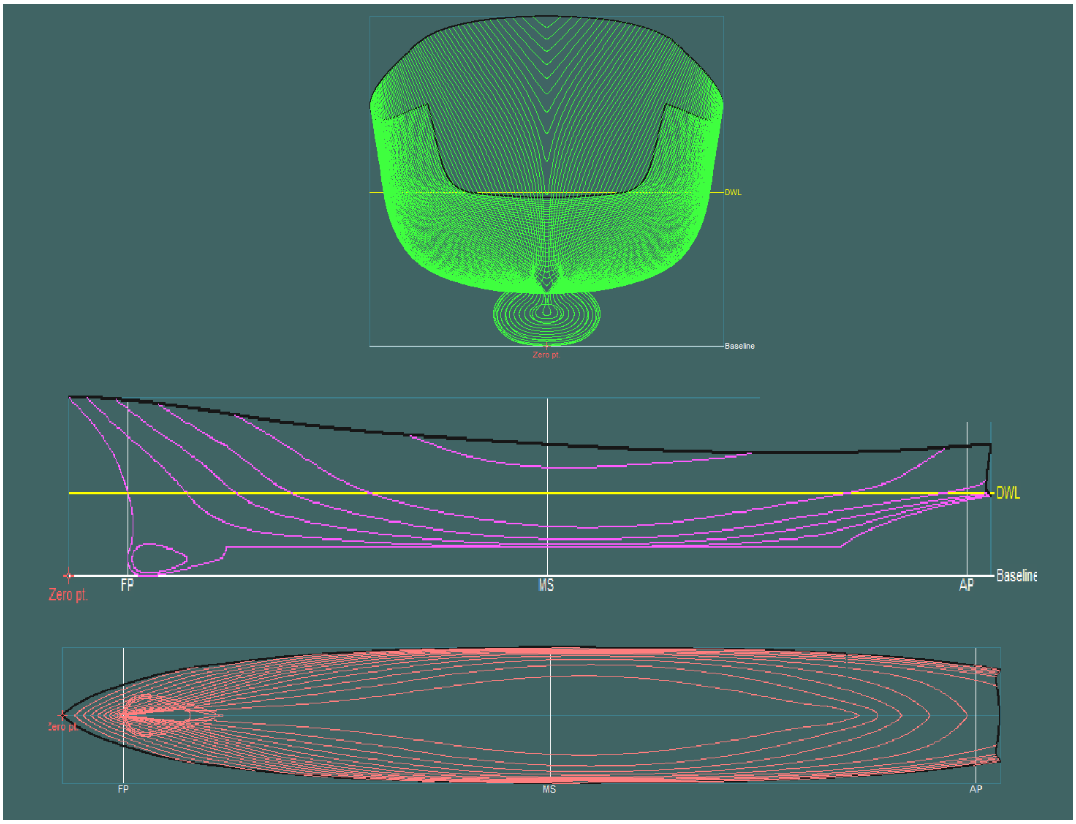
Gemiye ait geometri IIHR araştırma merkezi (çekme tankı deneysel verileri DTMB 5415 için daha önce verilen referanslarda kullanılmıştır.) tarafından paylaşılan geometri olup, geometrinin maxsurf bilgisayar programında kullanılabilecek şekilde düzenlenmesi (yüzeylerin maxsurf ortamında birleştirilmesi) ve posta, su hattı, batok vb. kesitlerinin programda tanımlanması gerçekleştirilmiştir. Bu işlemler için programın design modeller modülü kullanılmış olup sonraki aşamada GZ-Φ grafiğinin çiziminde stability advanced modülü kullanılmıştır. Şekil 4.3'te DTMB 5415 gemisinin tam ölçekli modelinin maxsurf ortamında yüzeysel olarak düzenlenmiş hali görülmektedir. Burada sadece yüzeyler birleştirilmiş durumdadır. Şekil 4.4'te ise programda hesaplamalar için kullanılan postalar, su hatları ve batoklar görülmektedir.



Şekil 4.3 DTMB 5415 gemisinin tam ölçekli modelinin maxsurf ortamında yüzeysel olarak düzenlenmesi

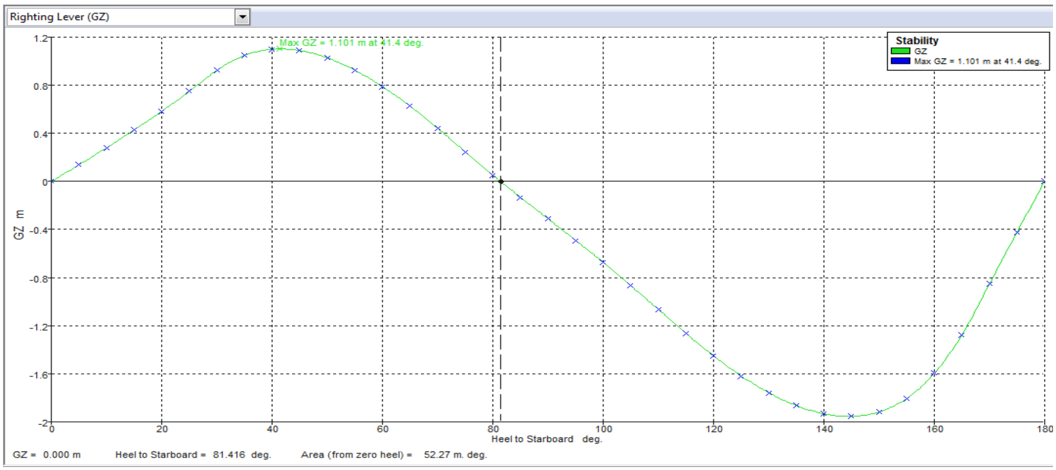


Şekil 4.4 DTMB 5415 Gemisi üzerinde maxsurf ortamında oluşturulan posta, su hattı, batoklar



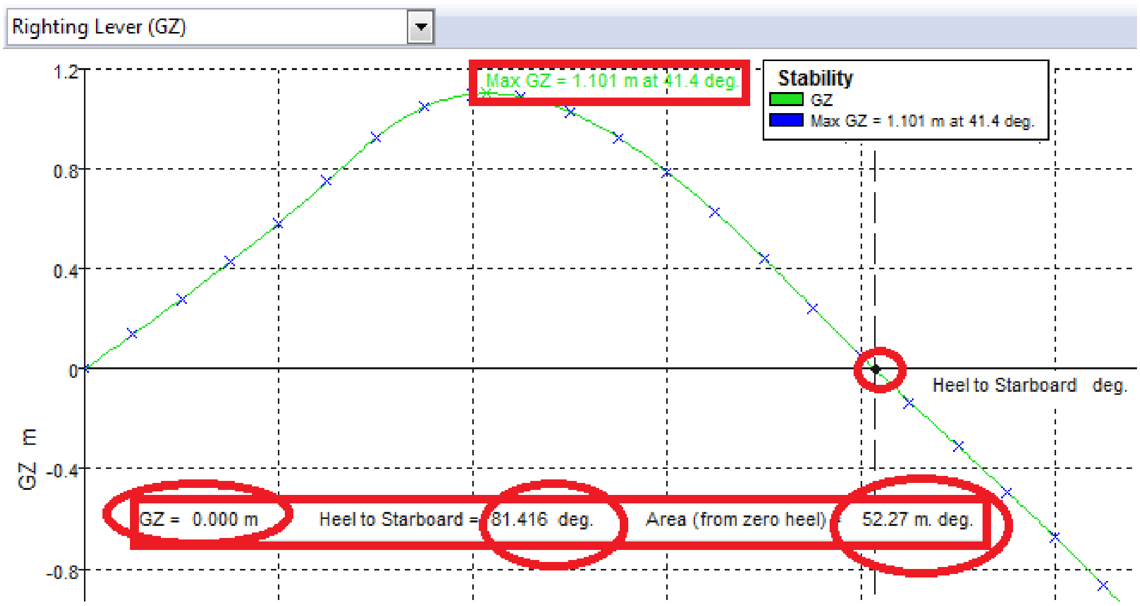
Şekil 4.5 DTMB 5415 gemisi form planı

Yükleme şartı olarak sadece geminin deplasmanı gemi ağırlık merkezinde gösterilmiştir. Tanklar tam dolu kabul edilmiştir ve maxsurf stability programı yardımı ile GZ-Φ grafiği Şekil 4.6'daki gibi elde edilmiştir.



Şekil 4.6 DTMB 5415 GZ-Φ eğrisi

Bu eğride ilgileneceğimiz kısım GZ (doğrultucu moment kolu) değerinin pozitif olduğu kısım olup, ϕ_v devrilme açısı ve bu açıya kadar olan kısımda eğri altındaki alan yani, $A_{\phi v}$ değeri önem arz etmektedir. Maxsurf stability programı bu iki değeri de sağlamaktadır. Bu değerler Şekil 4.7'de görülmektedir.



Şekil 4.7 GZ-Φ grafiği ve doğrultucu moment parametreleri

Şekil 4.7 incelendiğinde Tablo 4.3'teki değerler elde edilir.

Tablo 4.3 GZ-Φ grafiğinden okunan değerler

Değişken	Değer	Birim
ϕ_v	81,416	deg
ϕ_v	1,42	rad
$A_{\phi v}$	52,27	m.deg
$A_{\phi v}$	0,912	m.rad
GZ_{max}	1,101	m

Tablo 4.3'deki bilgiler kullanılarak matematiksel modele ait parametreler aşağıdaki gibi elde edilmiştir.

$$G_1 = \frac{d(GZ)}{d\phi} = GM = 1{,}938 \tag{4.16}$$

$$G_3 = \frac{4}{1{,}42^4}(3 \times 0{,}912 - 1{,}938 \times 1{,}42^2) = -1{,}1538 \tag{4.17}$$

$$G_5 = -\frac{3}{1{,}42^6}(4 \times 0{,}912 - 1{,}938 \times 1{,}42^2) = 0{,}095 \tag{4.18}$$

Yukarıda ifadelerde görüldüğü gibi burada; G1>0, G5>0, G3<0 şeklindedir ve G1= 1,938, G3= -1,1538 ve G5= 0,095 olarak elde edilmiştir.

4.4 Dış Etkilerin Matematiksel Modele Eklenmesi

Matematiksel modeldeki eşitliğin sağ tarafında bulunan; Z(t), bozucu ve kontrol momentlerini, yani sisteme etkiyen girişlerin tanımlanması ve bunların matematiksel modelde detaylandırılması gerekmektedir. Matematiksel modelde dış (Dalga ve kontrol kuvveti etkileri) etkiler, Z(t) şeklinde gösterilmiştir. Bu terim, kontrol momenti, M_F (Yalpa sönümleyici kanatlar tarafından oluşturulan moment) ve bozucu dalga momenti, M_W olarak ikiye ayrıldığında aşağıdaki gibidir [16, 23].

$$Z(t) = M_F + M_W \tag{4.19}$$

4.5.1 Dalga Momenti (M_W)

Dalga momenti, aşağıdaki eşitlik ile tanımlanmaktadır [4, 12, 18, 16, 21, 23].

$$M_W = \omega_e^2 \alpha_m I_x \cos(w_e t) \tag{4.20}$$

Denklem (4.20) içerisindeki ω_e, dalga karşılama frekansını (rad/s); α_m, maksimum dalga eğimini (dalga genliği, birimsiz); I_x, gemi kütle atalet momenti (Ek su kütlesi etkisi (J_x) hariç, kg.m^2); t, zamanı (s) ve M_W, dalga kaynaklı momenti (N.m) ifade etmektedir.

Burada, dalga karşılama frekansı aşağıdaki şekilde hesaplanmaktadır [16, 18, 23].

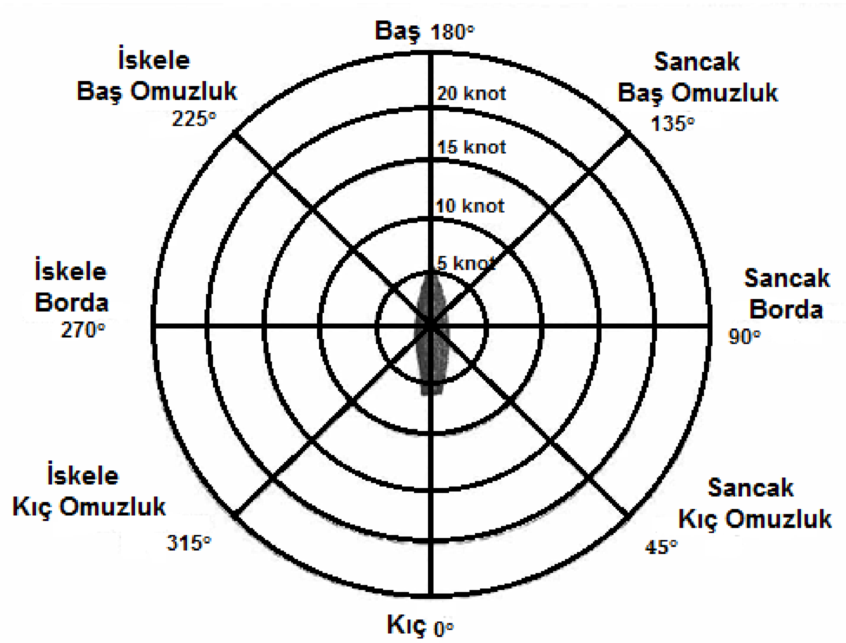
$$\omega_e = \omega_w - \frac{\omega_w^2}{g} V\cos(X) \tag{4.21}$$

$$\omega_w = 2\pi/T_w \tag{4.22}$$

$$\alpha_m = H\pi/\lambda \tag{4.23}$$

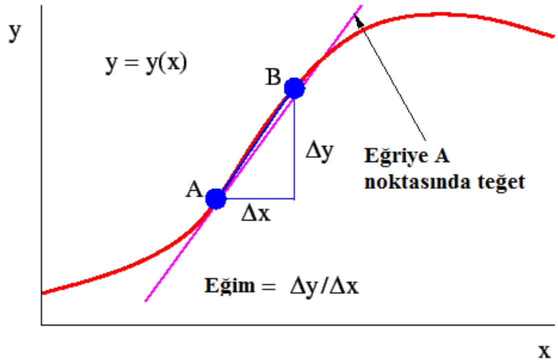
Denklem (4.21) ile (4.23) arasındaki denklemlerde ω_e, dalga karşılama frekansını (rad/s); ω_w, dalga frekansını (rad/s); T_w, dalga periyotunu (s); V, gemi hızını (m/s); X, gemi karşılama açısını (derece); g, yer çekimi ivmesini (m/s^2); H, dalga yüksekliğini (m) ve λ, dalga boyunu (m) temsil etmektedir.

Gemi karşılama açısı (X) dalganın gemiye hangi yönden geldiği ile ilgili olup bu açı değeri, Şekil 4.8'deki gibidir [18, 22].



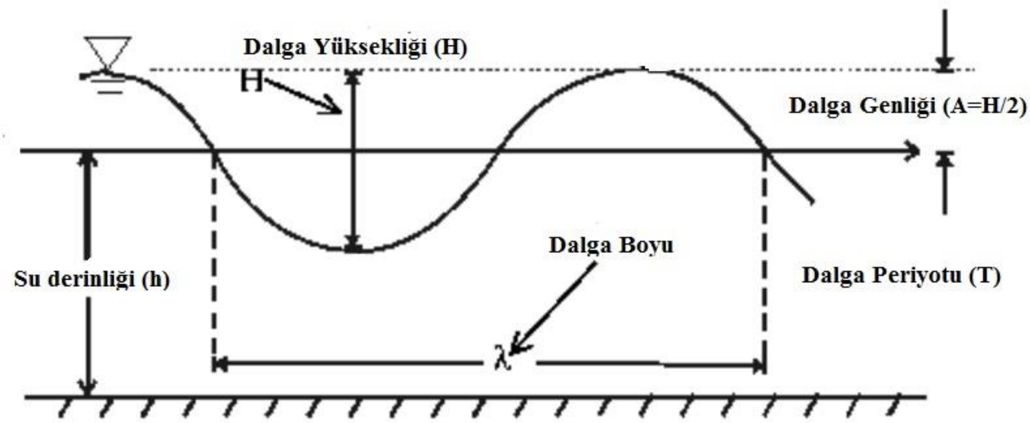
Şekil 4.8 Gemi dalga karşılama açısı

Herhangi bir eğri üzerinde bir noktada bu eğriye teğet çizilirse, bu teğetin eğimine, eğri (dalga) eğimi denir. Şekil 4.9'da bu durum görülmektedir.



Şekil 4.9 Dalga eğimi

Dalga eğimi teğetin çizildiği her noktada değişmektedir. Maksimum dalga eğimi ise dalga genliğinin olduğu noktada, yani dalga yüksekliğinin yarısında elde edilir. Şekil 4.10'da dalga geometrisi ile ilgili değişkenler gösterilmiştir.



Şekil 4.10 Dalga geometrisi ve değişken tanımlamaları

Dalga kaynaklı bozucu moment ifadesinin bulunmasında bir başka yöntem ise aşağıdaki gibidir [34, 35]. Bu gösterim çok yaygın kullanılmamakla birlikte, IMO (Uluslararası Denizcilik Örgütü) tarafından da kullanılmış bir yöntemdir.

$$M_W = \Delta GM\pi sr\sin(\omega_w t) \tag{4.24}$$

Denklem (4.24) içerisindeki $\alpha_m(\pi s)$, maksimum dalga eğimini (dalga genliği, birimsiz); s, dalga dikliğini (wave steepness, birimsiz) ve r, etkin dalga eğimi katsayısını (birimsiz) temsil etmektedir.

Etkin dalga eğimi katsayısı ve dalga dikliği, aşağıdaki gibi hesaplanabilir [35, 36].

$$r = 0{,}73 + 0{,}6\frac{OG}{d} \tag{4.25}$$

$$s = \frac{2\pi H}{gd^2} = \frac{H}{\lambda} \tag{4.26}$$

Yukarıdaki (4.25) ve (4.26) numaralı denklemlerde OG, gemi ağırlık merkezi ile su hattı arası düşey mesafeyi (m) ve d, gemi draft değerini (m) temsil etmektedir.

4.5.2 Yalpa Sönüm Kanatları Tarafından Oluşturulan Moment (M_F)

Herhangi bir kanat yapısı geometrik özelliği ve etrafındaki akışkan içerisindeki duruşu gibi çeşitli değişkenler etkisinde, akış hızının sıfır olmadığı durumda, bir kaldırma kuvvetine maruz kalır. Bu kaldırma kuvveti aşağıdaki gibi hesaplanabilir [21, 23].

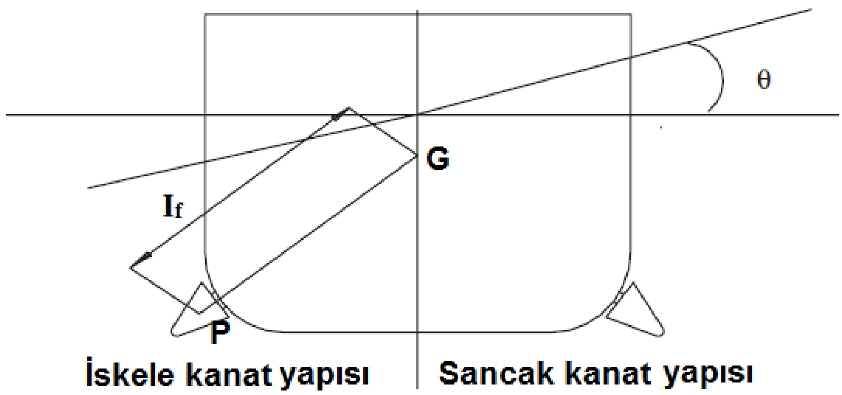
$$F_L = \frac{1}{2}\rho V^2 A_f C_L \tag{4.27}$$

Denklem (4.27) içerisindeki ρ, suyun yoğunluğunu (kg/m3); A_f, kanatçık yüzey alanını (m2); V, gemi hızını (m/s); C_L, boyutsuz kaldırma kuvveti katsayısını ve F_L, kaldırma kuvvetini (N) temsil etmektedir.

Kanat yapıları için efektif atak açısı gibi önemli bir değişken tanımlaması yapılmaktadır. Bu değişken, kaldırma kuvveti değeri ile doğrudan ilgilidir. Bunun sebebi, kanatın akışkan içerisinde ileri hızının yanında bir de yalpa hareketinden kaynaklı düşey hıza sahip olmasıdır. Bu düşey ve ileri hızın varlığı kaldırma kuvvetini meydana getiren bağıl hızı oluşturmaktadır. Düşey hız olmaması durumunda geminin ileri hızı bağıl hızı oluşturmaktadır. Burada bağıl hız yalpa hareketi kaynaklı yalpa hızı ile dönme yarıçapının (l_f) çarpımı ile bulunan çizgisel hızın farkına eşittir. Bağıl hareketten bahsedildiği için gemi hızından çizgisel hızın çıkartılması gerekmektedir.

Yalpa hareketi sebebi ile oluşan çizgisel hız, sancak ve iskele olarak iki ayrı şekilde düşünüldüğünde bir taraf için düşey doğrultuda aşağı yönde iken, diğeri için düşey doğrultuda yukarı yönde olacaktır. Hareketin sancaktan iskele yönüne doğru olduğunu düşünüldüğünde, iskele yönündeki kanat üzerinde aşağı; sancak yönündeki kanat üzerinde ise yukarı yönde bir çizgisel hız meydana gelecektir. Bu durumda iskele yönünde bu hız kaldırma kuvvetini arttırırken (Atak açısını arttırmaktadır); sancak yönünde kaldırma kuvveti azalacaktır. Her iki durumda da sancaktan iskeleye olan harekete karşı bir durum söz konusudur. Yani, sancak-iskele kanatları çift olarak çalışırlar.

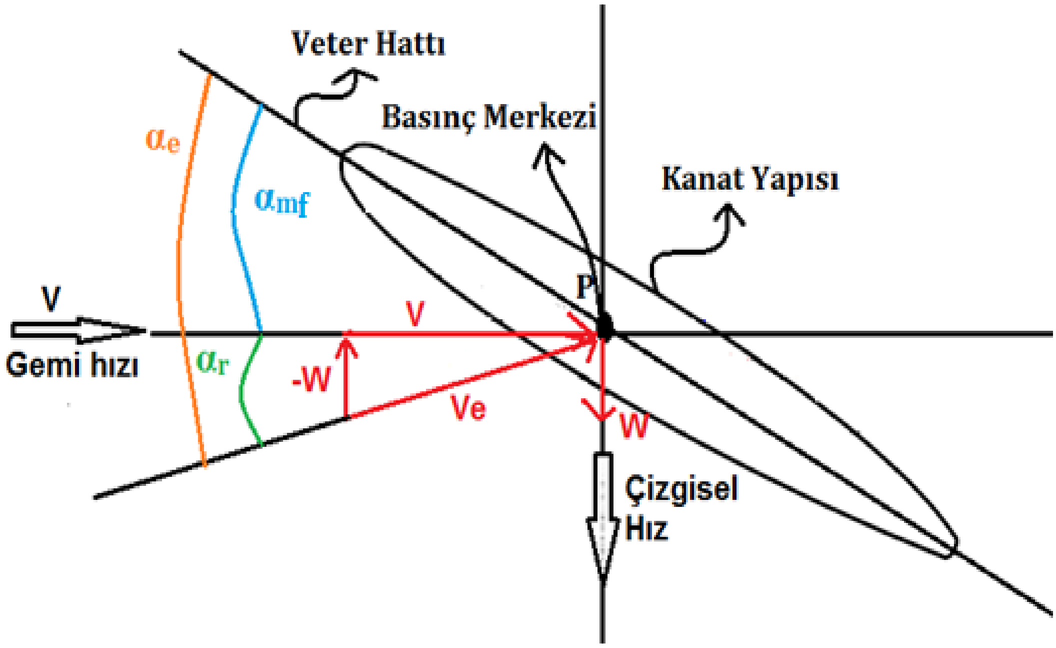
Kanatlar tarafından oluşturulan kuvvet ifadesi, gemi ağırlık merkezi ile kanat merkezi (basınç merkezi) arası uzaklık (I_f) ile çarpıldığında, kanatlar tarafından üretilen moment elde edilir. Kanatlar bir çift olarak geminin sancak ve iskelesinde yer aldığından bu ifadenin iki katının ($2F_LI_f$) ele alınması gerekmektedir. Şekil 4.11'de çift şekilde çalışan yalpa kanatları görülmektedir.



Şekil 4.11 Sancak ve iskele kanat yapıları

Şekil 4.11'deki gibi çift olarak çalışan kanat yapısına ait temsili etkin hücum açısı Şekil 4.12'de olduğu gibi gösterilebilir.

Şekil 4.12'de üç farklı hücum açısı görülmektedir. Bunlardan mekanik hücum açısı (α_{mf}), kanat yapısının veter hattı ile basınç merkezinden geçen gemi ileri hız çizgisi arasındaki açıdır. Bu açı tamamen kanat yapısının fiziksel olarak akışkan içerisinde nasıl durduğu ile ilgilidir. Bir diğer açı olan bağıl hücum açısı (α_r) ise, yalpa hareketinden kaynaklı çizgisel hız nedeni ile oluşmakta olup, bir tür bağıl hız olan etkin hız (V_e) kaynaklı bir hücum açısıdır. Etkin hücum açısı (α_e) ise bu iki açının toplamıdır.



Şekil 4.12 Kanat efektif hücum açısı

$$\alpha_e = \alpha_{mf} + \alpha_r \tag{4.28}$$

$$\alpha_r = \frac{I_f \dot{\phi}}{V} \tag{4.29}$$

$$\alpha_e = \alpha_{mf} + \left(\frac{I_f \dot{\phi}}{V}\right) \tag{4.30}$$

Boyutsuz kaldırma kuvveti katsayısı, etkin hücum açısı cinsinden ifade edilip, "$2F_L I_f$" ifadesinde yerine konulur ve düzenlenirse yalpa sönümleyici kanatlar tarafından oluşturulan moment (kontrol momenti), M_F, aşağıdaki gibi elde edilir [12, 16, 18, 21, 23].

$$M_F = -\rho V^2 A_f C_L I_f \tag{4.31}$$

Buradaki negatifliğin sebebi, dalga etkisi sebebiyle oluşan bozucu momentin pozitif alınmasıdır. Bozucu etkiyi sönümleyecek bir kontrol momenti ifadesi olduğu için bir negatiflik eklenmiştir.

4.5.3 Dalga Modeli ve Kanat Değişkenlerinin Belirlenmesi

Dalga modelinin ve kontrol kuvvetini oluşturacak kanat yapısının özelliklerinin belirlenmesi ve matematiksel modeldeki değişkenlerin hesaplanması gerekmektedir. Bu işlemler, aşağıdaki alt başlıklar altında gerçekleştirilmiştir.

4.5.3.1 Dalga Modeli Değişkenlerinin Belirlenmesi

Örnek gemiye baş omuzluktan gelen ve altı deniz durumunu temsil eden dalgalar için matematiksel ifadeler örnek olması amaçlı hesaplanmıştır. Farklı deniz durumu değerleri için kontrol aşamasında matlab(vR2018b) paket programı kullanılmıştır. Tablo 4.4'te çeşitli deniz durumlarında görülen dalga yüksekliği değerleri ve deniz durumların etkisi görülmektedir.

Tablo 4.4 Tipik bir su üstü savaş gemisinde dalgaların etkisi [22]

Deniz Durumu	Dalga Yüksekliği (m)	Etki
1-4	<2,5	• İhmal edilebilir
5	2,5-4	• Mürettebatta genel rahatsızlık • Görevlerin yerine getirilmesinde zorluk • Sensörlerde etkilenme • Denizde ikmalde zorluk
6	4-6	• Mürettebatın yarısını deniz tutar • Mürettebat uyumada zorluk çeker • Mürettebat yorgun ve bitaptır • Helikopter operasyonu çok zordur • Birçok silah sistemi çalıştırılamaz
7 ve üstü	>6	• Gemi bir savaş sistemi olma özelliğini kaybeder

Gemi hız olarak 0,41 Froude sayısına denk gelen hız seçilmiştir. Bu değer için gemi hızı, V=15,31 (m/s) ≈ 30 knot olarak bulunur. Froude sayısı atalet kuvvetlerinin yerçekimi kuvvetlerine oranı ile ifade edilen boyutsuz bir sayıdır.

$$\mathrm{Fr} = \frac{\text{Atalet Kuvvetleri}}{\text{Yerçekimi Kuvvetleri}} = \frac{\mathrm{V}}{\sqrt{\mathrm{gL}}} \tag{4.32}$$

Denklem (4.32) içerisindeki V, gemi hızını (m/s); g, yer çekimini ivmesini (m/s^2) ve L, gemi boyunu (m) temsil etmektedir.

Yer çekimi ivmesi (g), 9,81 (m/s^2) kabul edilmiştir ve geminin dalgayı karşılama açısı (X), 135 derece , yani sancak baş omuzluk olarak seçilmiştir. Bu seçimin nedeni, gemi kaptanlarının yüksek deniz durumlarında dalgaları baş omuzluktan almalarıdır. Bu sayede gemi kaptanları, gemi pervanesinin sudan çıkması gibi bir problemin önüne geçebilmektelerdir. Dalga yüksekliği seçimi için Tablo 4.4'ten deniz durumu altı olması hali hedef seçilmiştir ve bu durumda dalga yüksekliği (H), 4-6 metre aralığında değişmektedir. Ortalama olarak 5 metre alınmıştır.

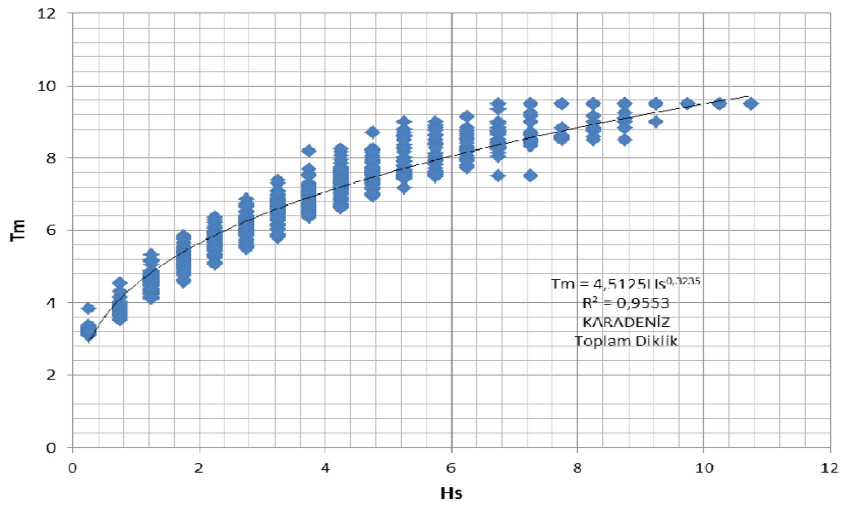
Dalga frekansı ve dalga boyu seçimi derin su kabulü (derinlik ≥ λ/2 , $\frac{H}{\lambda} \leq \frac{1}{20}$) ve aşağıdaki formülasyon kullanılmıştır [22].

$$\lambda = \frac{gT^2}{2\pi} \tag{4.33}$$

$$T = \sqrt{\frac{\lambda 2\pi}{g}} \tag{4.34}$$

Dalga yüksekliği (H) 5 metre alındığından, λ≥ 100 metre olarak bulunur. Bu durumda 100 metreye eşit olması kabulü ile, dalga periyotu (T), 8 saniye olarak elde edilir.

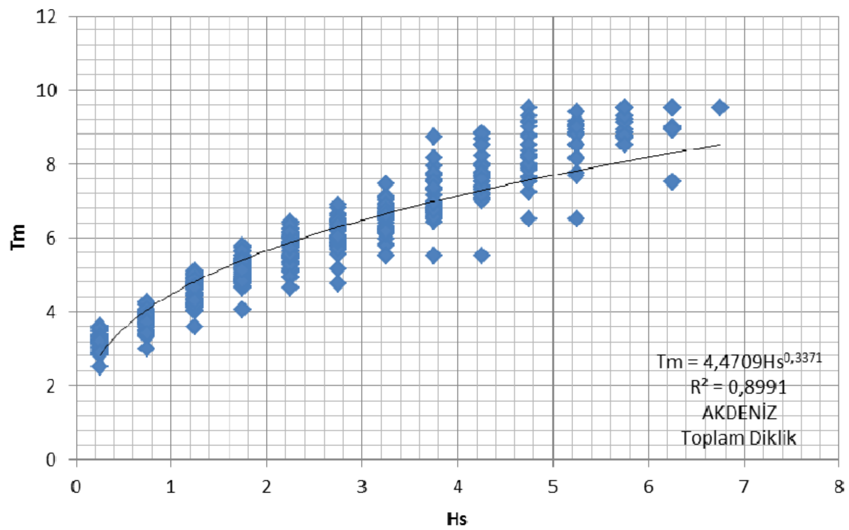
Ayrıca, bu konu özelinde Akdeniz ve Karadeniz için yapılan [37] nolu çalışmadan yararlanılmıştır. Bu çalışmada, Akdeniz ve Karadeniz için paylaşılan eğriler Şekil 4.13 ve Şekil 4.14'teki gibidir. Eğriler denizlerde dalga dikliğine denk gelen dalga periyotlarını göstermektedir. Eğrilerin matematiksel ifadesi, şekiller üzerinde ve Tablo 4.5'te görülmektedir.



Şekil 4.13 Karadeniz dalga dikliği [37]

Şekil 4.13'teki eğride dalga dikliği 5 metre alındığında, dalga periyotu değerinin 7-9 saniye arasında değiştiği görülmektedir. Derin su kabulü ile yapılan hesaplamada dalga periyotu 8 saniye bulunmuştur ve bu eğri değeri ile de uyumludur. Eğrinin matematiksel modeli kullanıldığında, aynı şekilde 8 saniye değeri elde edilmektedir.

Şekil 4.13 için yapılan tüm hesaplamalar, Şekil 4.14 için de yapılmıştır ve burada da 8 saniye değerine ulaşılmıştır.



Şekil 4.14 Akdeniz dalga dikliği [37]

Sonuç olarak, Akdeniz ve Karadeniz için dalga periyotu (T) değerinin 8 saniye ve dalga boyu (λ) değerinin 100 metre alınması uygun olacaktır. Ayrıca, diğer denizlerimiz için Tablo 4.5'te verilen formülasyonlar kullanılabilir.

Tablo 4.5 Türkiye denizleri dalga diklikleri [37]

Deniz	İlişki	R2
Karadeniz	$T_m=4{,}513xH_s^{0{,}3235}$	0,9553
Marmara (Mermer Denizi)	$T_m=3{,}521xH_s^{0{,}3327}$	0,9621
Ege (Adalar Denizi)	$T_m=3{,}623xH_s^{0{,}35}$	0,9426
Akdeniz	$T_m=4{,}473xH_s^{0{,}3371}$	0,8991

Dalga momentini oluşturan değişkenlerin değerleri aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

$$\omega_w = 2\pi/T_w = 2\pi/8 = 0{,}785 \tag{4.35}$$

$$\omega_e = \omega_w - \frac{\omega_w^2}{g} V\cos(X) = 0{,}785 - \frac{0{,}785^2}{9{,}81} 15{,}31\cos(135) = 1{,}46 \tag{4.36}$$

$$\alpha_m = H\pi/\lambda = 5\pi/100 = 0{,}157 \tag{4.37}$$

$$M_W = \omega_e^2 \alpha_m I_x \cos(w_e t) = 1{,}46^2 0{,}157 I_x \cos(1{,}46t) \tag{4.38}$$

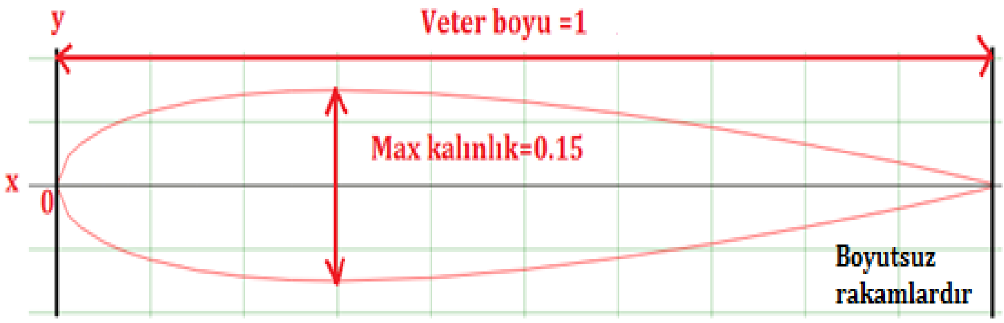
$$M_W = 0{,}33466 I_x \cos(1{,}46t) \tag{4.39}$$

4.5.3.2 Kanat Yapısına Ait Değişkenlerin Belirlenmesi

Kanat yapısına ait değişkenler ile ilgili seçimler aşağıdaki gibidir. Bu seçimlerden kanat boyu, kontrolcü tasarımından sonra belirlenmiş bir değişkendir. Kontrol momenti kanat boyu ve hücum açısına bağlı olarak değişecektir.

Suyun yoğunluğu deniz suyu olduğundan 1025 (kg/m^3) olarak ele alınmıştır. Gemi hız olarak 0,41 Froude sayısına denk gelen hız seçilmiştir. Bu değer için gemi hızı, 15,31 (m/s) ≈ 30 knot olarak bulunur.

Kanat kesit profili olarak NACA0015 kesiti seçilmiştir. Bu kesitin simetrik yapıda olması üretim açısından kolaylık sağlayacaktır. NACA0015 Profiline ait kesit bilgisi Şekil 4.15'deki gibidir.



Şekil 4.15 NACA0015 kesit geometrisi

Tablo 4.6'da Xflr5 (v6.47) programından elde edilen NACA0015 kanat profilin koordinatları görülmektedir.

Tablo 4.6 NACA0015 geometrik boyutsuz koordinatlar

X ordinatı	Y ordinatı(+-)	X ordinatı (Devam)	Y ordinatı(+-) (Devam)
1,0000	0,00158	0,2500	0,07427
0,9500	0,01008	0,2000	0,07172
0,9000	0,01810	0,1500	0,06682
0,8000	0,03279	0,1000	0,05853
0,7000	0,04580	0,0750	0,05250
0,6000	0,05704	0,0500	0,04443
0,5000	0,06617	0,0250	0,03268
0,4000	0,07254	0,0125	0,02367
0,3000	0,07502	0	0

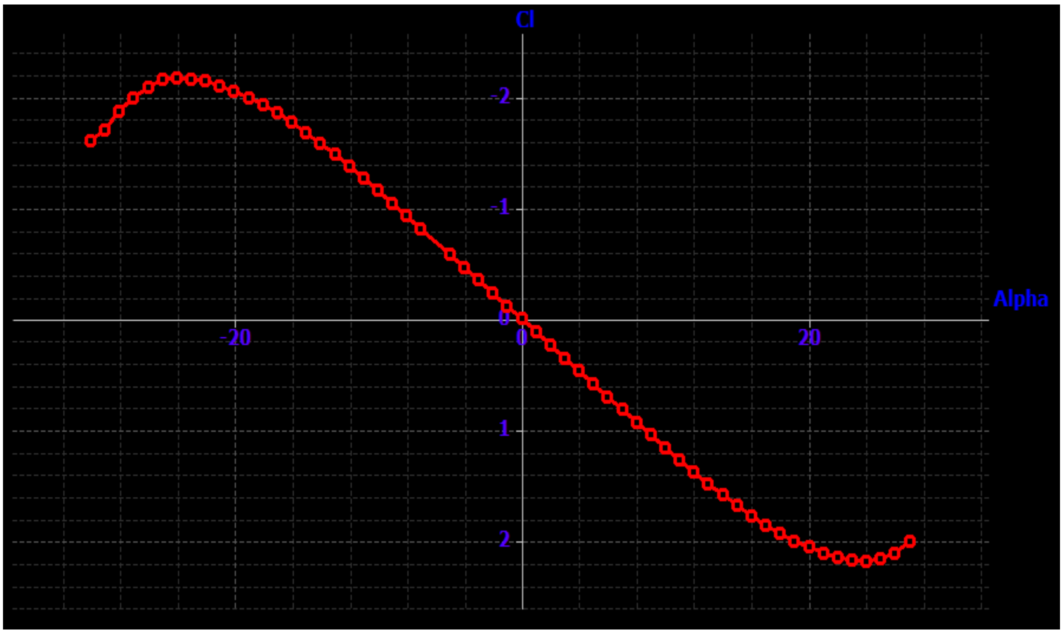
Öncelikle kanat etrafındaki akış için reynold sayısı hesabı yapmamız gerekmektedir. Bunun için de öncelikle veter boyunu belirlememiz gerekmektedir. Boyutsuz koordinatlar buna göre boyutlandırılacaktır. Gemi yanında boylamasına uzun çıkıntıların istenmeyeceğini düşünerek veter boyu 4 m olarak seçilmiştir. Reynold sayısı aşağıdaki gibi hesaplanabilir.

$$\mathrm{Re} = \frac{\text{Atalet Kuvvetleri}}{\text{Viskozite Kuvvetleri}} = \frac{\mathrm{Vl}}{\nu} = \frac{\rho \mathrm{Vl}}{\mu} \qquad (4.40)$$

$$Re = \frac{1025 \times 15,31 \times 4}{1,002 \times 10^{-3}} = 62645708 \quad (4.41)$$

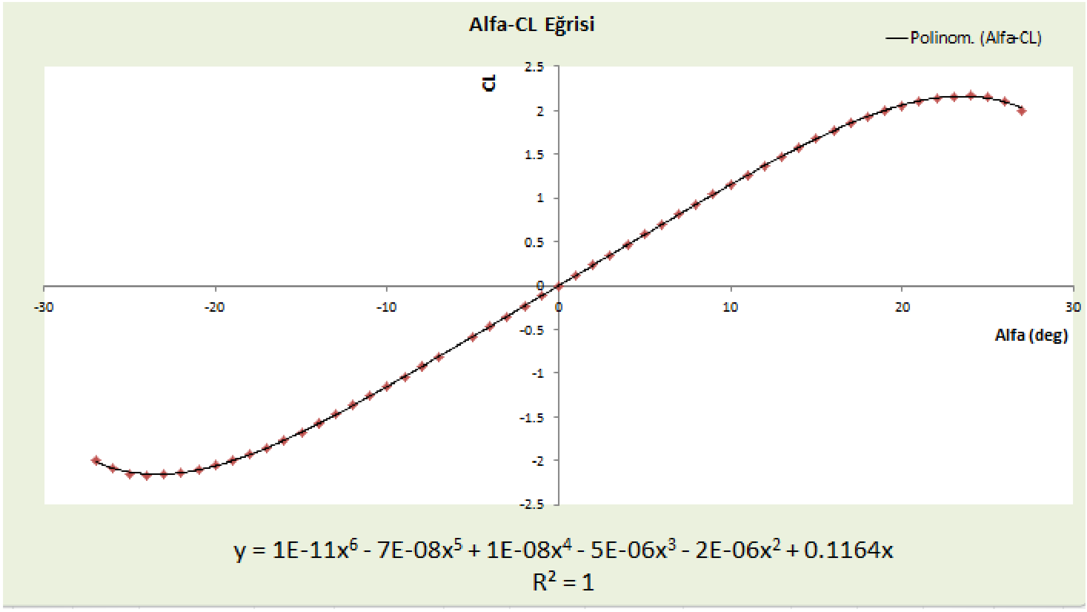
Denklem (4.40) içerisindeki V, Akışkan hızını (gemi hızı, m/s); l, karakteristik doğrusal boyunu (kanat veter uzunluğu, m); ν, akışkan kinematik viskozitesini (m2/s); ρ, su yoğunluğunu (kg/m3) ve μ, akışkan dinamik viskozitesi (Meteoroloji Genel Müdürlüğü verilerine göre Akdeniz ve Karadeniz için ortalama deniz suyu sıcaklığı 20 C° civarındadır. Bu yaklaşıma göre seçilmiştir. kg/m.s) temsil etmektedir.

Reynold sayısına bakıldığında türbülanslı bir akış olduğu görülmektedir. Bu reynold sayısında NACA0015 profiline ait etkin hücum açısına (α_e) bağlı boyutsuz kaldırma katsayısı (Cl) grafiği Xflr5 (V 6.47) programı yardımı ile Şekil 4.16'daki gibi elde edilmiştir.



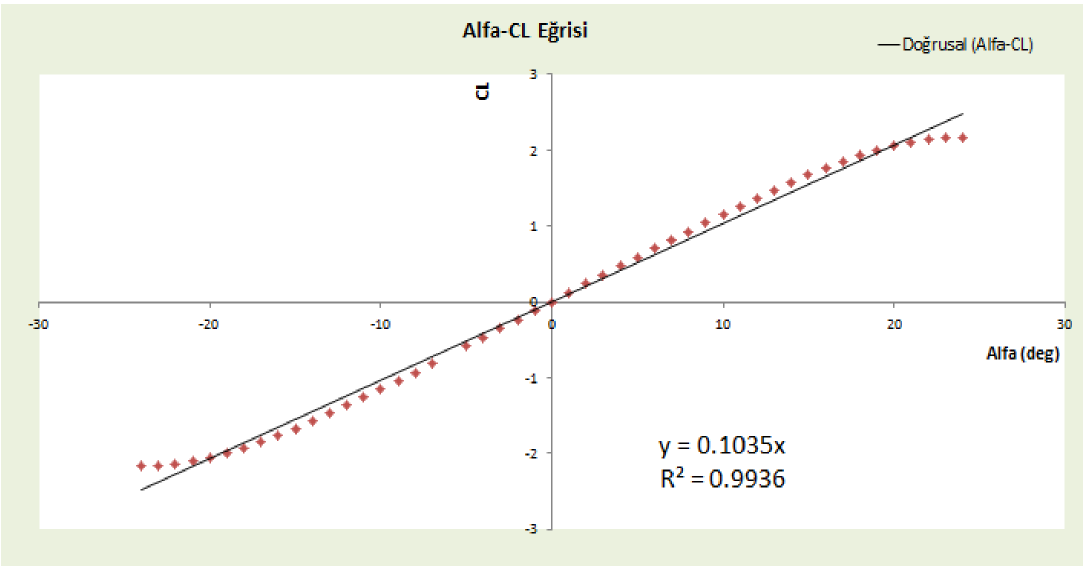
Şekil 4.16 Xflr5 hücum açısı (α)- kaldırma katsayısı (Cl) eğrisi

Ayrıca bu program (Xflr5) üzerinden alınan veriler eğri olarak çizdirildiğinde aşağıdaki eğri ve eğri üzerinde uydurulan matematiksel model, aşağıda Şekil 4.17'deki gibidir.



Şekil 4.17 Polinomal atak açısı (α)- kaldırma katsayısı (Cl) eğrisi

Eğriler ve Xflr5 programından elde edilen veriler kullanılarak maksimum kaldırma katsayısının 24° hücum açısında elde edildiği görülmektedir. 24° için C_L=2,17 olmaktadır. 24° değeri, devrilme açısı (Stall Angle) olarak tespit edilmiştir. Bu açıya kadar olan veriler için yeni bir eğri çizildiğinde ve doğrusal bir eğri uydurulduğunda, Şekil 4.18'deki gibi bir matematiksel denklem elde ederiz.



Şekil 4.18 Doğrusal atak açısı (α)- kaldırma katsayısı (Cl) grafiği

$$C_L = 0{,}1035\alpha_e \quad (4.42)$$

$$\alpha_e = \frac{C_L}{0{,}1035} \quad (4.43)$$

Kanat yüzey alanı (A_f) ise aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

$$A_f = A_c L_f \quad (4.44)$$

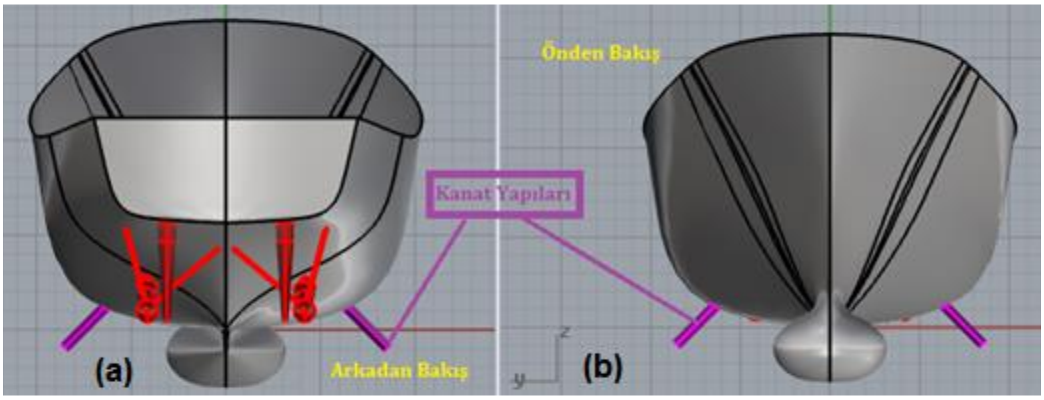
Denklem (4.44) içerisindeki A_c, kanat profili çevresini (m) ve L_f, kanat boyunu (m) temsil etmektedir.

Kanat çevresi (Ac) değerinin hesaplanmasında RhinoCeros (V5) endüstriyel tasarım programı kullanılmıştır. Kesit alını bu program yardımı ile çizilmiş ve kesit çevresi hesaplanmıştır ve 8,224 (m) olarak elde edilmiştir. Kanat boyu değeri, gerekli olacak maksimum kontrol momenti hesaplandıktan sonra kontrolcü tasarımı sırasında belirlenmiştir. Bu aşamada kanat yapısı tarafından üretilecek moment ifadesi bu değişkene bağlı olarak ifade edilmiştir.

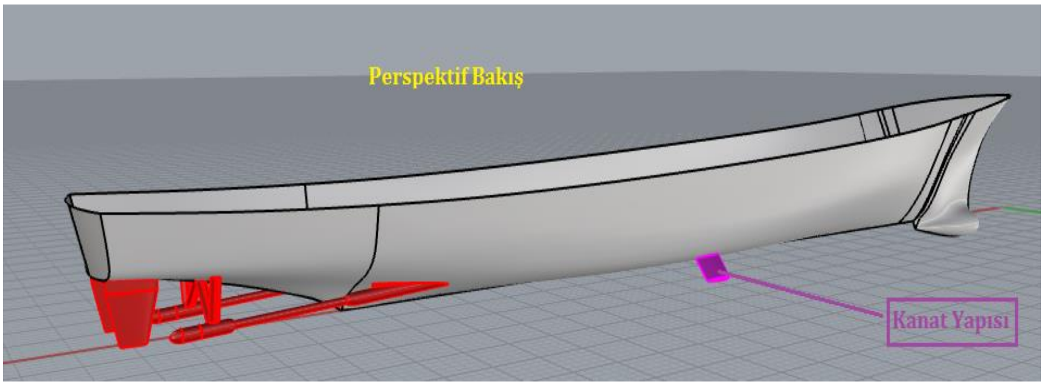
$$A_f = 8{,}224 L_f \quad (4.45)$$

Gemi ağırlık merkezi ile kanat merkezi (basınç merkezi) arası uzaklık (I_f) değerinin hesaplanması için kanat yapısının gemi üzerinde yerleşiminin yapılması gerekmektedir. Boyuna konum olarak gemi ağırlık merkezi ile aynı konumda olması durumu ele alınmıştır. Yerleşim işlemi için RhinoCeros (V5) endüstriyel tasarım programı kullanılmıştır. Yerleşime ait temsili (kanat boyu henüz belirli değildir.) görseller Şekil 4.19 ve Şekil 4.20'deki gibidir.

Gemi ağırlık merkezi ile kanatçık merkezi (basınç merkezi) arası uzaklık, kanat başlangıç noktası (gemi bordasına temas ettiği uç kısım) ile gemi ağırlık merkezi arası mesafe ile kanat boyunun yarısının toplamı şeklinde olacaktır. Kanatların yerleşim açısı, bu yöntemi sağlayacak şekilde gerçekleştirilmiştir. Yerleşimin seçiminde kanatların yeterince derinde olması önemli bir durumdur. Kanatların mümkün olduğunca sudan dışarı çıkmayacakları bölgelere yerleştirilmeleri gerekir. Bu bölgeler, daha çok gemi altına denk gelen bökgelerdir. Gemi altlarına yakın bölgelere yapılan yerleşimler ise aynı kanat boyu düşünüldüğünde, kontrol momenti değerini azaltacaktır. Yerleşimin bu iki etki göz önüne alınarak yapılması gerekmektedir.



Şekil 4.19 Kanat yapılarının gemi üzerindeki yerleşimi (a, arkadan görünüş; b, önden görünüş)



Şekil 4.20 Kanat yapılarının gemi üzerindeki yerleşimi (perspektif görünüş)

Kanat kesiti kanat boyu boyunca sabit (NACA0015) olup yerleşim, ağırlık merkezinden 45° aşağıya açı verilerek yapılmıştır. Bu yerleşimde kanat başlangıcı ile gemi ağırlık merkezi arası uzaklık 9,078 m olarak bulunmuştur. I_f değeri aşağıdaki gibi hesaplanabilir.

$$I_f = 9{,}078 + \frac{L_f}{2} \tag{4.46}$$

$$M_F = -\rho V^2 A_f (0{,}1035\alpha_e) I_f \tag{4.47}$$

$$M_F = -(b_1\alpha_{mf} + b_2\dot{\phi}) \tag{4.48}$$

$$M_F = -(M_{F1} + M_{F2}) \tag{4.49}$$

$$M_{F1} = b_1\alpha_{mf} \tag{4.50}$$

$$M_{F2} = b_2\dot{\phi} \tag{4.51}$$

$$b_1 = \rho V^2 A_f (0{,}1035) I_f \tag{4.52}$$

$$b_2 = \rho V A_f (0{,}1035) {I_f}^2 \tag{4.53}$$

Yukarıdaki b_1 ve b_2 değerleri, daha önce bulunan değişkenler yerine konulduğunda aşağıdaki gibi elde edilir.

$$b_1 = (1025 \times 15{,}31^2)(8{,}224L_f)(0{,}1035)(9{,}078 + L_f/2) \tag{4.54}$$

$$b_2 = (1025 \times 15{,}31)(8{,}224L_f)(0{,}1035)(9{,}078 + L_f/2)^2 \tag{4.55}$$

Son durumda kanat yapıları tarafından oluşturulan moment ifadesi aşağıdaki gibi elde edilmiştir.

$$M_F = -(b_1\alpha_{mf} + b_2\dot{\phi}) \tag{4.56}$$

Denklem (4.56) içerisindeki M_F, kanatlar tarafından oluşturulan momenti (N.m); α_{mf}, kanat mekanik atak açısını (derece) ve $\dot{\phi}$, yalpa hareketine ait açısal hız değerini (1/s) temsil etmektedir.

Burada dikkat edilirse "$-M_{F2}$" ifadesi yalpa hareketinin hızına ait bir etki mekanizması olup, bu değer kontrol aşamasında sistemin dinamiğine eklenmiştir. Geriye kalan ifade ise kontrol moneti, kanat dinamiği sayesinde oluşturulan moment olarak ele alınmıştır.

5
YALPA HAREKETİNİN KONTROLÜ

Bu bölümde yalpa hareketinin kontrolü sağlanacak olup, kontrol yöntemi olarak doğrusal matris eşitsizliği (DME) tabanlı H_∞, H_2 ve H_∞/H_2 hibrit optimal kontrol teorileri kullanılacaktır. H_∞ denetleyici sistemin kalıcı durum cevabını iyileştirmede; H_2 denetleyici ise sistemin geçici durum cevabını iyileştirmede yetenekli kontrol yapılarıdır. Bu nedenle bu iki kontrol yapısının birlikte kullanıldığı hibrit kontrol sistemleri yaygın olarak kullanılmaktadır. İsminden de anlaşılacağı gibi doğrusal bir teori olup, bu sebeple matematiksel modelimizin doğrusal hale dönüştürülmesi gerekmektedir. Neredeyse her fiziksel sistem doğrusal olmamasına rağmen, genellikle bir denge noktasının belirli bir çalışma aralığı içindeki davranışına, doğrusal bir model yaklaşımı ile makul bir şekilde yaklaşılabilir. Matematiksel modelin bir karar noktası (yalpa genliği, hızı ve ivmesinin sıfır olduğu 0° noktası) etrafında doğrusallaştırılması gerekmektedir.

5.1 Yalpa Hareketi Denkleminin Doğrusal Hale Getirilmesi

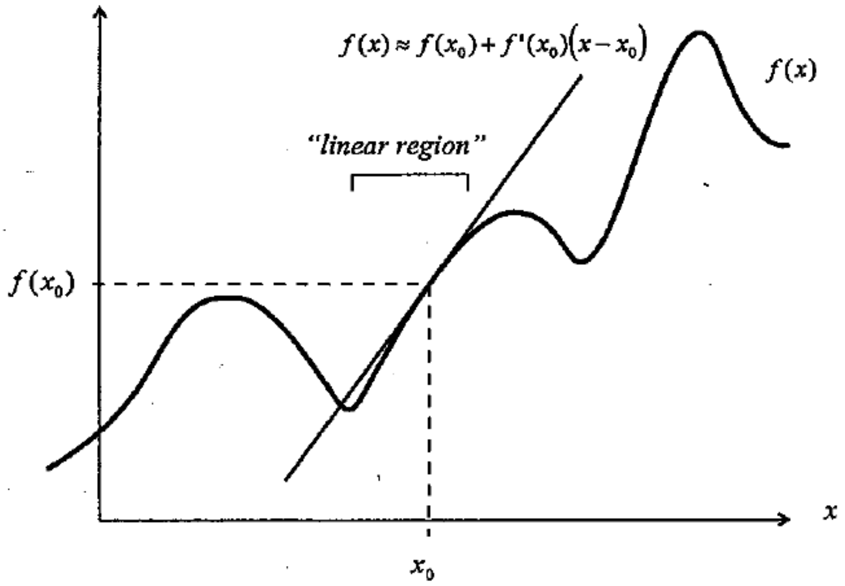
İlk Olarak Taylor Serisi açılımının üzerinden geçilmesi gerekmektedir. Bir F(x) fonksiyonunun x_0 noktasında (çalışma noktası, karar noktası) Taylor Serisi açılımı aşağıdaki şekilde ifade edilebilir [38].

$$F(x) = \sum_{n=0}^{\infty} \left(\frac{1}{n!}\frac{d^n F(x)}{dx^n}\right)\Bigg|_{x=x_0} (x - x_0)^n \tag{5.1}$$

Bu gösterin sonsuza kadar alağıdaki şekilde gitmektedir [38].

$$F(x) = F(x_0) + \frac{dF(x)}{dx}\Bigg|_{x=x_0} (x - x_0) + \frac{1}{2}\,\frac{d^2F(x)}{dx^2}\Bigg|_{x=x_0} (x - x_0)^2 + \ldots \tag{5.2}$$

Sadece yukarıda verilen ilk iki terim ele alındığında ve yüksek dereden ifadeler ihmal edildiğinde Şekil 5.1'deki gibi bir doğrusallaştırma yapılmış olur. Şekilde karar noktası etrafında doğrusallaştırılmış, doğrusal olmayan bir fonksiyon görülmektedir.



Şekil 5.1 Karar noktası etrafında Taylor açılımı

Bir fonksiyon, F(x) gibi, tek bir değişken içerebileceği gibi, birden çok değişkene sahip, $F(x_1,x_2,\ldots x_n)$ gibi bir fonksiyon da olabilir. Böyle bir durumda tüm değişkenlere göre çapraz türevler (Cross-Derivatives) alınır. Bu durum aşağıdaki gibi ifade edilebilir [38].

$$
\begin{aligned}
&F(x_1,x_2,x_3,\ldots x_n) = F(x_{10},x_{20},x_{30},\ldots x_{n0}) \\
&+\left[(x_1 - x_{10})\frac{\partial}{\partial x_1} + \cdots + (x_n - x_{n0})\frac{\partial}{\partial x_n}\right] F(x_1,x_2,x_3,\ldots x_n)\Big|_{x_i=x_{i0}} \\
&+\frac{1}{2!}\left[(x_1 - x_{10})\frac{\partial}{\partial x_1} + \cdots + (x_n - x_{n0})\frac{\partial}{\partial x_n}\right]^2 F(x_1,x_2,x_3,\ldots x_n)\Big|_{x_i=x_{i0}} \\
&+\cdots
\end{aligned}
\tag{5.3}
$$

Birçok değişken içeren birçok fonksiyonun (denklem takımı gibi) doğrusal hale getirilmesi istendiğinde matrislerden yararlanılır [38].

Modern kontrol yöntemlerinde, durum uzay gösterimi ile matris yapılar kullanılmakatadır. Durum uzay gösterim kullanılarak tasarlanan kontrolcüler için bu tür doğrusallaştırma yöntemi, daha uygun ve kolaylık sağlayan bir yöntemdir.

$$f(x) = \begin{bmatrix} f_1(x_1, x_2, x_3, \dots x_n) \\ f_2(x_1, x_2, x_3, \dots x_n) \\ f_3(x_1, x_2, x_3, \dots x_n) \\ . \\ . \\ . \\ f_m(x_1, x_2, x_3, \dots x_n) \end{bmatrix} \tag{5.4}$$

$$f = [f_1 \;\; f_2 \;\; f_3 \; \dots \; f_m]^T \; , \; x = [x_1 \;\; x_2 \;\; x_3 \; \dots \; x_n]^T \tag{5.5}$$

$$f(x) \approx f(x_0) + \left.\frac{\partial f(x)}{\partial x}\right|_{x_0} (x - x_0) \tag{5.6}$$

Burada $f(x)$, $m \times 1$ boyutunda bir vektördür ve $n \times 1$ boyutunda bir vektöre göre türevi alınmaktadır. Bu türev alma işlemi sonucu elde edilen matrise, Jakobiyen Matris denilir ve aşağıdaki gibi ifade edilir [38].

$$J_{ij} = \frac{\partial f}{\partial x} = \left[\frac{\partial f_i}{\partial x_i}\right] = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \frac{\partial f_1}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial x_{n-1}} & \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \\ \frac{\partial f_2}{\partial x_1} & \frac{\partial f_2}{\partial x_2} & & \frac{\partial f_2}{\partial x_{n-1}} & \frac{\partial f_2}{\partial x_n} \\ \vdots & & \ddots & & \vdots \\ \frac{\partial f_{m-1}}{\partial x_1} & \frac{\partial f_{m-1}}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_{m-1}}{\partial x_{n-1}} & \frac{\partial f_{m-1}}{\partial x_n} \\ \frac{\partial f_m}{\partial x_1} & \frac{\partial f_m}{\partial x_2} & & \frac{\partial f_m}{\partial x_{n-1}} & \frac{\partial f_m}{\partial x_n} \end{bmatrix} \tag{5.7}$$

Aşağıdaki sıralama ile gerçekleştirilen işlem adımları ile denklemler doğrusal hale getirilmektedir.

- Öncelikle yukarıdaki Jakobiyan matrisi bizim örneğimiz için elde edilmiştir.
- Sonrasında bu matriste karar noktası olarak seçtiğimiz değerler yerine konulmuştur.
- Değişkenlerimizden karar noktası değerlerini çıkardığımız vektör elde edilip bir önceki maddede elde edilen matris ile çarpılmıştır.
- Karar noktası değerlerimizi fonksiyonlarda yerine koyduğumuzda elde ettiğimiz çıktıları içeren vektör ile bir önceki maddede elde edilen matris toplanmıştır.

Aşağıda bu işlem adımlarına sırayla yer verilmiştir.

$$(I_x + J_x)\ddot{\phi} + B_L\dot{\phi} + B_{N1}\dot{\phi}|\dot{\phi}| + B_{N2}\dot{\phi}^3 + \Delta(G_1\phi + G_3\phi^3 + G_5\phi^5) \\ = \omega_e^2\alpha_m I_x \cos(\omega_e t) - (b_1\alpha_{mf} + b_2\dot{\phi}) \tag{5.8}$$

$$b_1 = (1025 \times 15{,}31^2)(8{,}224L_f)(0{,}1035)(9{,}078 + L_f/2) \tag{5.9}$$

$$b_2 = (1025 \times 15{,}31)(8{,}224L_f)(0{,}1035)(9{,}078 + L_f/2)^2 \tag{5.10}$$

Yalpa hareketine ait zorlanmış sönümlü hareket denklemi yukarıdaki gibidir. Bu denklemde her iki taraf "$(I_x + J_x)$" ifadesi ile bölünür ve yalpa ivmesi ifadesi yalnız bırakılırsa aşağıdaki denklem elde edilir.

$$\ddot{\phi} = -b_L\dot{\phi} - b_{N1}\dot{\phi}|\dot{\phi}| - b_{N2}\dot{\phi}^3 - \Delta(g_1\phi + g_3\phi^3 + g_5\phi^5) \\ + \omega_e^2\alpha_m\lambda_e\cos(\omega_e t) - (c_1\alpha_{mf} + c_2\dot{\phi}) \tag{5.11}$$

$$c_1 = b_1\frac{1}{(I_x + J_x)} \tag{5.12}$$

$$c_2 = b_2\frac{1}{(I_x + J_x)} \tag{5.13}$$

$$g_1 = G_1\frac{1}{(I_x + J_x)}, \qquad g_3 = G_3\frac{1}{(I_x + J_x)}, \qquad g_5 = G_5\frac{1}{(I_x + J_x)} \tag{5.14}$$

$$b_L = B_L\frac{1}{(I_x + J_x)}, \qquad b_{N1} = B_{N1}\frac{1}{(I_x + J_x)}, \qquad b_{N2} = B_{N2}\frac{1}{(I_x + J_x)} \tag{5.15}$$

$$\lambda_e = I_x\frac{1}{(I_x + J_x)} = \frac{I_x}{(I_x + 0{,}2I_x)} \approx 0{,}8333 \tag{5.16}$$

Denklem (5.11) için aşağıdaki gibi değişken atamaları (Değiştirmesi) yaparak türevli ifadelerden kurtulduğumuzda aşağıdaki iki denklem elde edilmiş olur.

$$x_1 = \phi\,, \qquad x_2 = \dot{\phi} = \dot{x}_1, \qquad x_3 = \ddot{\phi} = \dot{x}_2, \qquad f_1 = x_2, \qquad f_2 = x_3 \tag{5.17}$$

$$f_1 = x_2 \tag{5.18}$$

$$f_2 = -b_L x_2 - b_{N1} x_2 |x_2| - b_{N2} {x_2}^3 - \Delta(g_1 x_1 + g_3 {x_1}^3 + g_5 {x_1}^5) \\ + \omega_e^2 \alpha_m \lambda_e \cos(\omega_e t) - (c_1 \alpha_{mf} + c_2 x_2) \tag{5.19}$$

Değişken değiştirme işleminden sonra elde edilen yukarıdaki iki denklem yalpa hareketine ait matematiksel modeli temsil etmektedir. Bu denklemlerin daha önce anlatılılan yöntem yardımı ile doğrusallaştırılması gerekmektedir.

Doğrusallaştırma sonrası durum-uzay formda gösterimi aşağıdaki gibidir. Bu gösterindeki "Δ" simgesi içeren ifadeler, karar noktasındaki değerlerin değişkenlerden çıkarılması ile elde edilen vektörleri temsil etmektedir.

$$\begin{aligned} \Delta\dot{x} &= A\Delta x + B\Delta u \\ \Delta y &= C\Delta x + D\Delta u \end{aligned} \tag{5.20}$$

Üzerinde yıldız(*) işareti olan terimler karar noktasında değişkenlerin aldığı değerleri temsil etmekte olup, karar noktası değişken değerleri ve değişkenlerimizin yeni ifadeleri (Değişkenlerden karar noktalarının çıkarılması) aşağıdaki gibidir.

$$\begin{aligned} x^* &= [x_1^* \quad \dots \quad x_n^*] \\ u^* &= [w^* \dots \ c^*] \end{aligned} \tag{5.21}$$

$$\begin{gathered} \Delta x = \begin{bmatrix} \Delta x_1 \\ \vdots \\ \Delta x_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 - x_1^* \\ \vdots \\ x_n - x_n^* \end{bmatrix} \\ \Delta u = u - u^* \\ \Delta y = y - h(x^*, u^*) \end{gathered} \tag{5.22}$$

A, B, C ve D matrislerinin doğrusallaştırması amacıyla elde edilmesi aşağıdaki formülasyonlar ile bulunabilir. Bu yöntem daha önce anlatılan Taylor serisi açılımı ile aynıdır. Sadece durum-uzay form için uyarlanmış halidir.

$$A=\left[\frac{\partial f}{\partial x}\right]_{x^*,u^*}=\begin{bmatrix}\frac{\partial f_1}{\partial x_1}(x_1^*,\dots x_n^*,\dots u^*) & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial x_n}(x_1^*,x_n^*,\dots u^*)\\ \dots & \dots & \dots\\ \frac{\partial f_n}{\partial x_1}(x_1^*,x_n^*,\dots u^*) & \dots & \frac{\partial f_n}{\partial x_n}(x_1^*,x_n^*,\dots u^*)\end{bmatrix} \tag{5.23}$$

$$B=\left[\frac{\partial f}{\partial u}\right]_{x^*,u^*}=\begin{bmatrix}\frac{\partial f_1}{\partial w}(x_1^*,\dots x_n^*,\dots u^*) & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial c}(x_1^*,x_n^*,\dots u^*)\\ \dots & \dots & \dots\\ \frac{\partial f_n}{\partial w}(x_1^*,x_n^*,\dots u^*) & \dots & \frac{\partial f_n}{\partial c}(x_1^*,x_n^*,\dots u^*)\end{bmatrix} \tag{5.24}$$

$$C=\left[\frac{\partial h}{\partial x}\right]_{x^*,u^*}=\left[\frac{\partial h}{\partial x_1}(x_1^*,\dots x_n^*,\dots u^*)\quad . \quad . \quad . \quad \frac{\partial h}{\partial x_n}(x_1^*,x_n^*,\dots u^*)\right] \tag{5.25}$$

$$D=\left[\frac{\partial h}{\partial u}\right]_{x^*,u^*} \tag{5.26}$$

Karar noktası olarak sıfır derece yalpa noktası seçilmiştir. Bu noktada tüm değerler (genlik, hız, ivme) sıfıra eşit olacaktır ($[x_1^*\ x_2^*\ u^*]=[0\ 0\ 0]$). Bu durumda yukarıda yıldız (*) içeren değerlerin tamamı sıfıra eşit olacaktır. (5.18) ve (5.19) nolu denklemler dikkate alındığında, durum-uzay gösterimindeki matrisler aşağıdaki gibi elde edilir.

$$A=\begin{bmatrix}\left.\frac{\partial f_1}{\partial x_1}\right|_{(0,0,0)} & \left.\frac{\partial f_1}{\partial x_2}\right|_{(0,0,0)}\\ \left.\frac{\partial f_2}{\partial x_1}\right|_{(0,0,0)} & \left.\frac{\partial f_2}{\partial x_2}\right|_{(0,0,0)}\end{bmatrix} \tag{5.27}$$

$$A=\begin{bmatrix}0 & 1\\ (-\Delta(g_1+3g_3x_1^2+5g_5x_1^4))|_{(0,0,0)} & (-b_L-2b_{N1}x_2-3b_{N2}x_2{}^2)|_{(0,0,0)}\end{bmatrix} \tag{5.28}$$

$$A=\begin{bmatrix}0 & 1\\ -\Delta g_1 & -(b_L)\end{bmatrix} \tag{5.29}$$

$$u(t)=\begin{bmatrix}m_w\\ m_F\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\lambda_e\alpha_m\omega_e^2\cos(\omega_e t)\\ c_1\alpha_{mf}+c_2x_2\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}w(t)\\ c(t)\end{bmatrix} \tag{5.30}$$

$$B = \begin{bmatrix} \left.\frac{\partial f_1}{\partial w}\right|_{(0,0,0)} & \left.\frac{\partial f_1}{\partial c}\right|_{(0,0,0)} \\ \left.\frac{\partial f_1}{\partial w}\right|_{(0,0,0)} & \left.\frac{\partial f_1}{\partial c}\right|_{(0,0,0)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & -1 \end{bmatrix} \tag{5.31}$$

$$h(x,u) = x_1, \qquad C = \begin{bmatrix} \left.\frac{\partial h}{\partial x_1}\right|_{(0,0,0)} & \left.\frac{\partial h}{\partial x_2}\right|_{(0,0,0)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix} \tag{5.32}$$

$$h(x,u) = x_1, \qquad D = \begin{bmatrix} \left.\frac{\partial h}{\partial w}\right|_{(0,0,0)} & \left.\frac{\partial h}{\partial c}\right|_{(0,0,0)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \end{bmatrix} \tag{5.33}$$

Yukarıda elde edilen doğrusal modelimize ait matrisler aşağıdaki gibi durum-uzay formda yazılabilir.

$$\begin{gathered} \dot{x} = Ax + Bu \\ y = Cx + Du \end{gathered} \tag{5.34}$$

$$\begin{gathered} \dot{x} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\Delta g_1 & -(b_L) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} m_w \\ m_F \end{bmatrix} \\ y = \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} m_w \\ m_F \end{bmatrix} \end{gathered} \tag{5.35}$$

Denklemlerin açık halleri aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\begin{gathered} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = -\Delta g_1 x_1 - (b_L) x_2 + m_w - m_F \\ y = x_1 \end{gathered} \tag{5.36}$$

Burada y, çıkış vektörünü; u ise kontrol ve bozucu girişleri içeren giriş vektörünü temsil etmektedir. Çıkış vektöründe hareketin açısal yerdeğişimi ($\phi = x_1$) alınmak istediğinden, C ve D matrisleri bu duruma göre kurgulanmıştır. Çıkış vektörü denetleyici tasarımında nihai şeklini alacaktır.

Kontrol momenti (m_F) daha önce gösterildiği gibi iki farklı bileşene (m_{F1}, m_{F2}) ayrılırsa ve bu bileşenlerden ” m_{F2} “ bileşeni sistem matrisi içerisine dahil edilirse yeni matris takımımız aşağıdaki gibi olur.

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\Delta g_1 & -(b_L + c_2) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} m_w \\ m_{F1} \end{bmatrix}$$
$$y = \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} m_w \\ m_{F1} \end{bmatrix} \tag{5.37}$$

Sisteme ait durum-uzay formunda gösterimi aşağıdaki şekilde bozucu (w) ve kontrol (c) vektörlerini ayırarak ve farklı performans çıkış vektörleri (z_1, z_2) kullanarak aşağıdaki gibi tanımlanabilir.

$$\dot{x} = Ax + B_1 w + B_2 c$$
$$z_1 = C_1 x + D_{11} w + D_{12} c \tag{5.38}$$
$$z_2 = C_2 x + D_{21} w + D_{22} c$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\Delta g_1 & -(b_L + c_2) \end{bmatrix}, \qquad B_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}, \qquad B_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ -1 \end{bmatrix}$$
$$C_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix}, \qquad D_{11} = [0], \qquad D_{12} = [0] \tag{5.39}$$

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\Delta g_1 & -(b_L + c_2) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} [m_w] + \begin{bmatrix} 0 \\ -1 \end{bmatrix} [m_{F1}]$$
$$z_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + [0][m_w] + [0][m_{F1}] \tag{5.40}$$

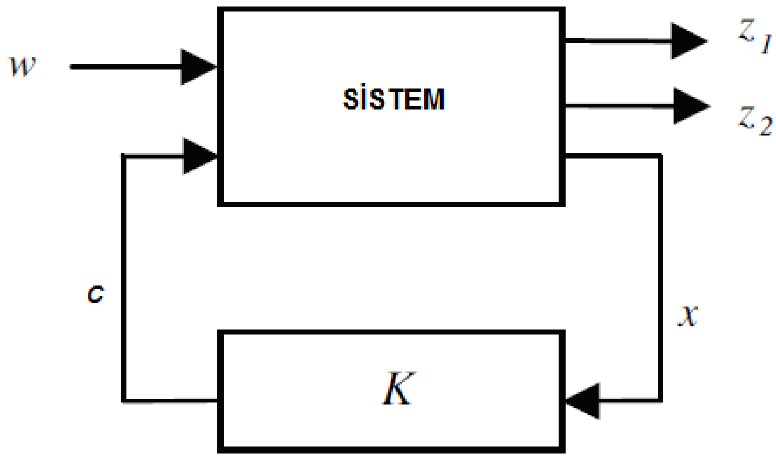
Denklemlerin açık halleri değişmemiş olup aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\dot{x}_1 = x_2$$
$$\dot{x}_2 = -\Delta g_1 x_1 - (b_L + c_2) x_2 + m_w - m_{F1} \tag{5.41}$$
$$z_1 = x_1$$

Bu aşamadan sonra kontrol sistemi tanımlaması ve algoritma tasarımına geçilebilir.

5.2 Doğrusal Matris Eşitsizliği Tabanlı, Durum Geri Beslemeli Optimal Kontrolcü Tasarımı

Durum geri beslemeli kontrolcüde, sistemin çıkışındaki durumlar belirli bir kazanç çarpanı ile çarpılarak tekrar sisteme bir giriş olarak uygulanır. Bu sistemlerde sistemin tüm durumlarının ölçülüyor olması gerekmektedir. Sistem, bu amaçla gerekli sensör yapısına sahip olmalıdır. Gemilerde (özellikle savaş gemilerinde) ataletsel pusula (cayro pususla) sistemi sayesinde yedekli bir şekilde gemiye ait durumlar 6 serbestlik dereceli olarak (3 dönme 3 öteleme) ve bunun yanında hız ve ivme ifadeleri de sergilenmektedir. İhtiyaç duyan sistemlere bu bilgiler veri dağıtım sistemleri aracılığı ile iletilmektedir. Şekil 5.2'de en basit hali ile durum geri beslemeli kontrol mimarisi verilmiştir.



Şekil 5.2 Durum geri beslemeli kontrol

Sistemin durumları (x_i) bir kontrol kazancı (K) ile çarpılarak sisteme bir kontrol girişi (c) olarak etkimektedir. Sisteme etkiyen bozucu giriş (w) ve performans çıkışları (z_1 ve z_2) Şekil 5.2'den görülmektedir.

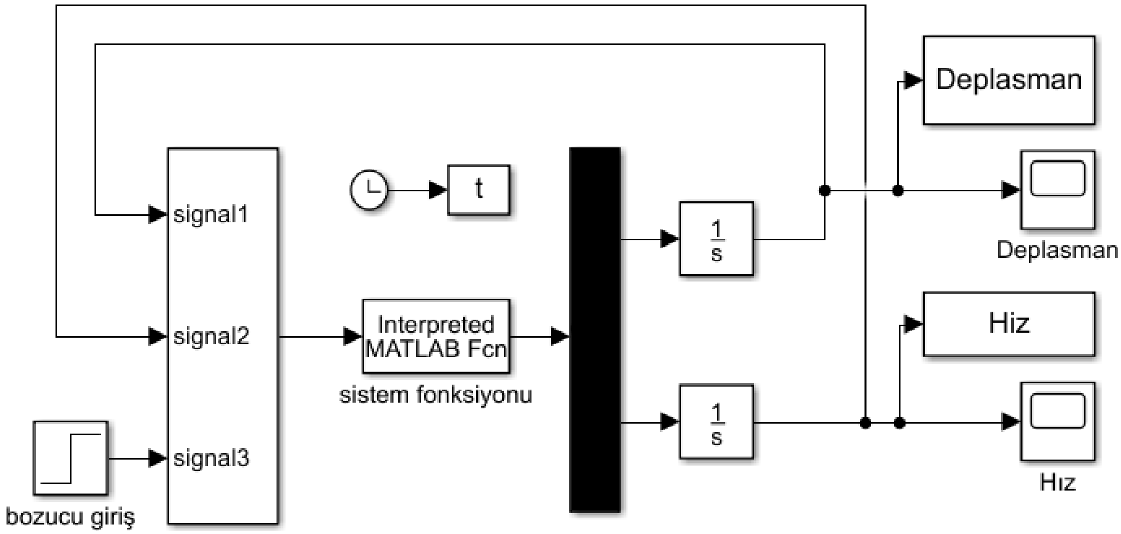
5.2.1 Sistem Kararlılığı

Denetleyici tasarımına başlamadan önce sistemimizin kararlılık durumu incelenmelidir. Kararlılık Teorisine göre "$\dot{x} = A \times x$" şeklindeki herhangi bir sistemin kararlı olabilmesi için ancak ve ancak tüm özdeğerlerinin (A matrisinin özdeğerleri) reel kısmı negatif olmalıdır. Sistem kutuplarının sol yarı s-düzleminde bulunması kararlılık için gerek ve yeter şarttır. Yani, aşağıdaki koşulda sistem kararlıdır.

$$\mathrm{Re}((\lambda_A)_i) < 0\,, \qquad i = 1, 2,3, \dots n \tag{5.42}$$

Bir sistem için, girişine uygulanan sınırlı genlikteki bir işaretin daima sınırlı bir çıkış üretmesi şeklinde, kararlılık tanımlanabilir. Bu tanımlamaya Sınırlı Giriş-Çıkış (Bounded Input-Output) Kararlılık denir.

Kontrolsüz durumda sisteme birim basamak girişi uygulanırsa sistemin kararlılığı hakkında bilgi sahibi olunabilir. Sisteme ait simulink model, Şekil 5.3'teki gibidir.



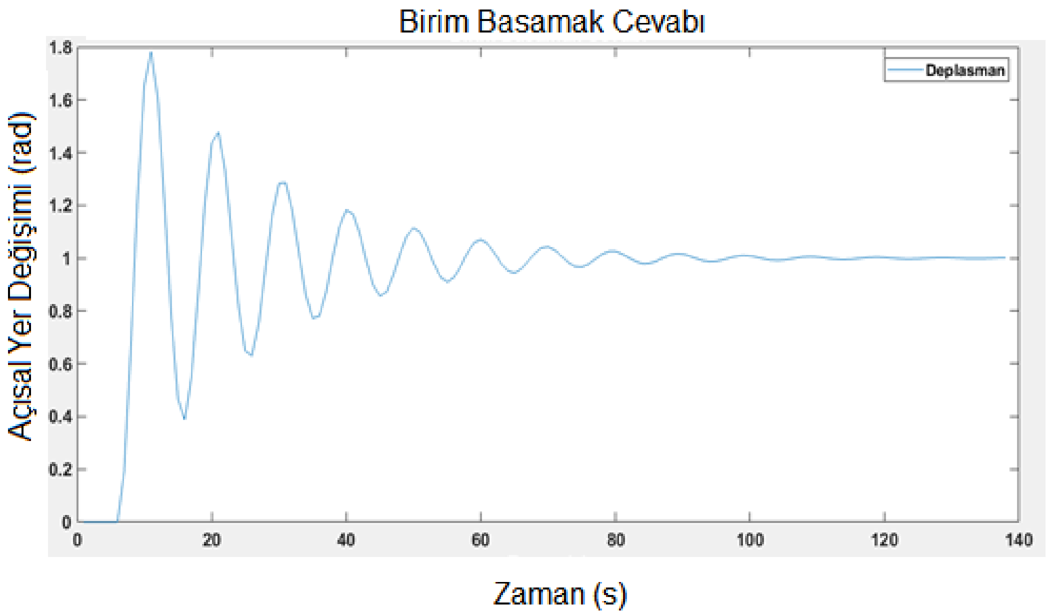
Şekil 5.3 Durum geri beslemeli sistemin birim basamak cevabı

Yukarıdaki Şekil 5.3'te belirtilen fonksiyon aşağıdaki gibidir.

```
function xdot=system(u)
%Kontrolsuz Durum
x=u(1:2);
w=u(3);
A= [0,1; -delta*g1,-(bL)];
B= [0;1];
xdot=A*x+B*w;
end
```

Bu durumda sistemin özdeğerleri, " -0.0439 + 0.5725i" ve "-0.0439 - 0.5725i" şeklinde elde edilmiştir.

Özdeğerlerin reel kısımları negatiftir (sol yarı düzlemde) ve sistem kararlı bir sistemdir. Bu durumda sistemin birim basamak yanıtı Şekil 5.4'teki gibidir.



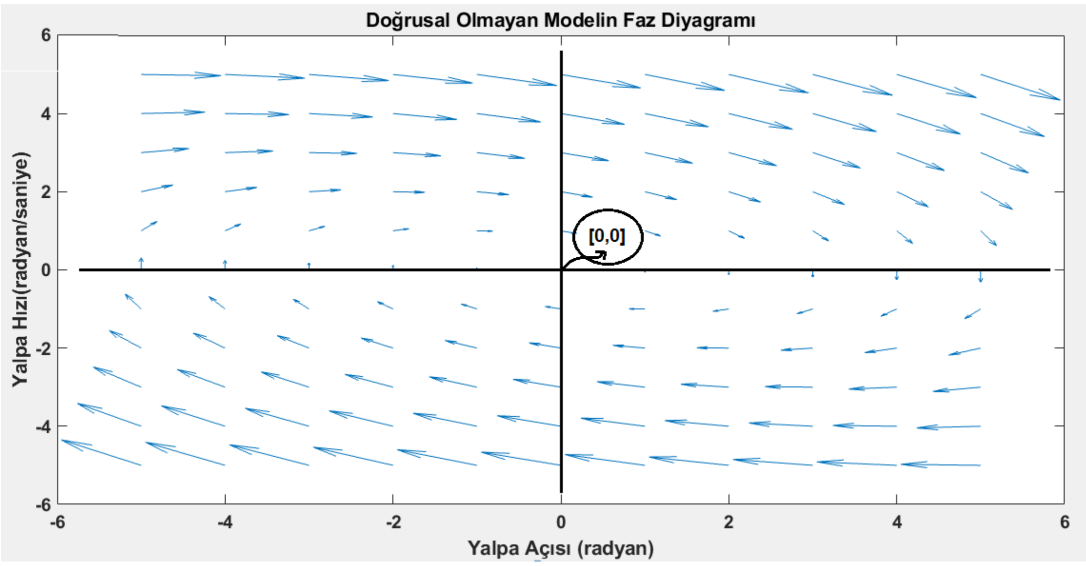
Şekil 5.4 Kontrolsüz sistemin birim basamak cevabı

Yukarıdaki birim basamak girişine karşı sistem cevabına bakıldığında, sistemin yalpa açısal yerdeğiştirme çıkışı, zaman sonsuza giderken sabit bir değer olan 1 radyan değerine ulaşmaktadır ve sabit kalmaktadır. Sistem kararlı bir sistemdir.

Ayrıca yukarıdaki yöntemlere ek olarak doğrusal olmayan modele ait faz diyagramından sistemin kararlı olup olmadığı anlaşılabilir. Diyagramdaki vektörlerin sıfır yalpa açısı ve sıfır yalpa hızına denk gelen sıfır noktasına yaklaşıyor olması sistemin kararlı olduğunu göstermektedir. Aşağıdaki gibi ilgili Matlab(R2018b) kodları paylaşılmıştır. Birimler radyan ve radyan/s cinsindedir.

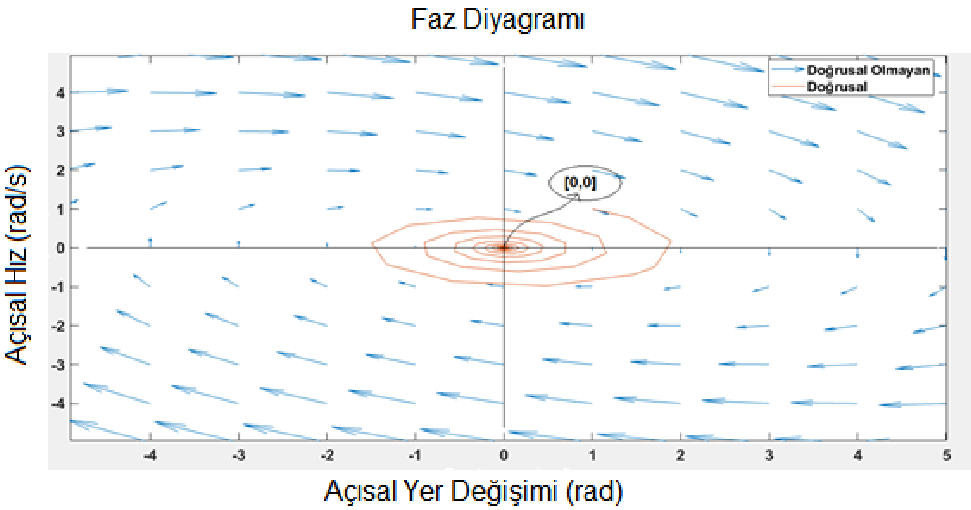
1- [dep, hiz] = meshgrid(-5:1:5,-5:1:5);
2- dep_dot=hiz;
3- hiz_dot=-bL* hiz -bN1* hiz *abs(hiz)-bN2* hiz ^3
4- delta*(m1* dep +m3*(dep ^3)+m5*(dep ^5));
5- q=quiver(dep, dep_dot, hiz, hiz_ dot);

Şekil 5.5'te sisteme ait doğrusal olmayan modelin, faz diyagramı görülmektedir.



Şekil 5.5 Doğrusal olmayan modele ait faz diyagramı

Doğrusal olmayan yalpa hareketinin genlik ve hız diyagramı belirli bir zarf eğrisini takip ederek sıfıra yaklaşmaktadır bu durum da doğrusal olmayan modelin kararlılığını kanıtlamaktadır. Ayrıca doğrusal modele ait faz diyagramını doğrusal olmayan modelin faz diyagramı üzerine çizilmesi ile Şekil 5.6'daki görsel elde edilmiştir. Bu görselden doğrusal ve doğrusal olmayan modellerin faz diyagramları görülmektedir.



Şekil 5.6 Doğrusal olmayan ve doğrusal modele ait faz diyagramı

Bir başlangıç koşulu (1 rad,1 rad/s) ile doğrusal sistemin faz diyagramı Şekil 5.6'daki gibi çizildiğinde, doğrusal olmayan model ile aynı yönelimde olduğu ve doğrusal olmayan modelin bunu kapsadığı görünmektedir. Ayrıca diyagramlar bir zarf eğrisini takip ederek sıfır (0,0) noktasına yaklaşmaktadır. Bu durum doğrusal ve doğrusal olmayan sistemlerin kararlı sistemler olduğunu göstermektedir.

5.2.2 Doğrusal Matris Eşitsizliği Tabanlı Durum Geri Beslemeli Hibrit H2/H∞ Optimal Kontrolcü Tasarımı

Durum geri beslemeli denetleyici yapılarında, sistem çıkısından alınan durumlar bir kontrol kazancı (K) ile çarpılarak sisteme giriş olarak eklenmektedir. Bu durumda kontrol giriş vektörü aşağıdaki şekilde sisteme dahil edilebilir. Sisteme ait durum-uzay form aşağıdaki şekilde ifade edilebilir.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + B_1 w + B_2 c \\ z_1 &= C_1 x + D_{11} w + D_{12} c \\ z_2 &= C_2 x + D_{21} w + D_{22} c \\ c &= Kx \end{aligned} \tag{5.43}$$

$$\begin{aligned} \dot{x} &= (A + B_2 K)x + B_1 w \\ z_1 &= (C_1 + D_{12} K)x + D_{11} w \\ z_2 &= (C_2 + D_{22} K)x + D_{21} w \end{aligned} \tag{5.44}$$

Diyelim ki, $T_{z_1 w}$ ve $T_{z_2 w}$ ifadeleri w bozucu girişi için sırayla z_1 ve z_2 çıkışlarını karşılayan kapalı çevrim transfer fonksiyonları olsun. Bunlar için sistemin H_2 normunu H_∞ normuna tabi olarak minimize edecek, sınırlayacak ($\|T_{z_2 w}\|_2$ bağlıdır $\|T_{z_1 w}\|_\infty \prec \gamma$) bir durum geri beslemeli ($c(t) = Kx(t)$) çok amaçlı, hibrit bir kontrolcüyü doğrusal matris eşitsizlikleri kullanarak elde etmek, bu başlık kapsamında hedeflenmiştir.

Sistem kararlılığını garantilemek amacıyla kapalı çevrim sistem için Lyapunov Fonksiyonu aşağıdaki gibi yazılırsa ve düzenlenirse bir Matris Eşitsizliği (ME) elde edilir. Bu matris eşitsizliğinin Doğrusal Matris Eşitsizliği (DME) haline getirilmesi gerekir. Her “t” zamanı için aşağıdaki ifade yazılabilir [39].

$$V_x = x^T P x \succ 0\,, \qquad P = P^T \succ 0, \qquad \gamma \succ 0 \tag{5.45}$$

Bu ifadenin türevi aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$\dot{V}_x = \dot{x}^T P x + x^T P \dot{x} \prec 0 \tag{5.46}$$

Başlangıç koşulları sıfır kabul edildiğinde sisteme ait Hamiltonian ifadesi aşağıdaki gibidir ve tüm w ve x değerleri için negatif olmalıdır.

$$\dot{V}_x + (z_1(t)^T z_1(t) - \lambda^2 w(t)^T w(t)) \prec 0 \tag{5.47}$$

Yukarıdaki eşitsizliğin ilk kısmı Lyapunov Kararlığını ikinci kısım ise H_∞ performansını sağlamaktadır. (5.46) ve (5.47) nolu denklemler birleştirilirse aşağıdaki eşitsizlik elde edilir.

$$\dot{x}(t)^T P x(t) + x(t)^T P \dot{x}(t)) + (z_1(t)^T z_1(t) - \lambda^2 w(t)^T w(t)) \prec 0 \tag{5.48}$$

Yukarıdaki ifade, çerisinde konveksliği bozan terimler bulundurmaktadır. Bu terimlerin yok edilmesi ve tüm yapının doğrusal matris eşitsizliği şekline dönüşmesi gerekmektedir. (5.48) nolu eşitsizliğe, (5.44) nolu denklemdeki ”$\dot{x}$” ve “z_1” ifadeleri yerine konulursa (5.49) nolu eşitsizlik elde edildir. Daha kolay irdelenmesi açısından aşağıda (5.50) nolu eşitsizlik gibi matris çarpımı halinde yazılır. Bu çarpım açıldığında yukarısındaki eşitsizliği verdiği kolayca kontrol edilebilir.

$$\begin{gathered}[(A + B_2K)x + B_1w]^T P x + x^T P[(A + B_2K)x + B_1w] + [(C_1 + D_{12}K)x + \\ D_{11}w]^T[(C_1 + D_{12}K)x + D_{11}w] - \gamma w^T w \prec 0\end{gathered} \tag{5.49}$$

$$[x^T \quad w^T][\Omega][\begin{smallmatrix} x \\ w \end{smallmatrix}] \prec 0 \tag{5.50}$$

Her w ve x ifadesi sıfırdan farklı kabul edildiğinden yukarıdaki ifade aşağıdaki halini alır. Eşitlik (5.51) ‘teki omega (Ω) için sırayla aşağıdaki maddeler halinde verilen işlemler uygulanmalıdır.

$$[\Omega] = \begin{bmatrix} \Omega_{11} & \Omega_{12} \\ \Omega_{21} & \Omega_{22} \end{bmatrix} \prec 0$$

$$\Omega_{11} = ((A + B_2K)^T P + P(A + B_2K) + (C_1 + D_{12}K)^T (C_1 + D_{12}K))$$

$$\Omega_{12} = (PB_1 + ((C_1 + D_{12}K)^T) D_{11}) \tag{5.51}$$

$$\Omega_{21} = B_1^T P + D_{11}^T (C_1 + D_{12}K)$$

$$\Omega_{22} = -\gamma^2 I + D_{11}^T D_{11}$$

Schur Tümleyeni [39]:

$\begin{bmatrix} P & S \\ S^T & R \end{bmatrix}$>0 ifadesi P ve R matrislerinin simetrik olması ve P>0 şartı ile şu ifade ile eşdeğerdir: $P - SR^{-1}S^T > 0$

Omega (Ω) ifadesine Schur Tümleyeni uygulanır ve elde edilen eşitsizlik sağından ve solundan "P^{-1}" ifadesi ile çarpılırsa aşağıdaki şeklini alır:

$$\begin{aligned} P^{-1}(A + B_2K)^T + (A + B_2K)P^{-1} + P^{-1}(C_1 + D_{12}K)^T (C_1 + D_{12}K)P^{-1} \\ - (B_1 + P^{-1}(C_1 + D_{12}K)^T D_{11})(-\gamma^2 I + D_{11}D_{11}{}^T)^{-1}(B_1{}^T \\ + D_{11}{}^T (C_1 + D_{12}K)P^{-1}) \prec 0 \end{aligned} \tag{5.52}$$

Yukarıdaki eşitsizlikte "$P^{-1} = X_\infty$" dönüşümü yapılır ve sonrasında bu eşitsizlik Kalman Yakubovich Popuv Lemması yardımıyla parçalanırsa tekrardan Schur Tümleyeni uygulanabilecek bir hal alır. Aşağıda önce dönüşüm yapılan hali (Omega (Ω) matrisi) sonra Kalman Yakubovich Popuv Lemması uygulanmış hali paylaşılmıştır.

Omega (Ω) matrisine ait elemanlar değişken dönüşümü sonrası aşağıdaki gibi olur [39].

$$\Omega_{11} = (A + B_2K)X_\infty + X_\infty(A + B_2K)^T + X_\infty(C_1 + D_{12}K)^T (C_1 + D_{12}K)X_\infty$$

$$\Omega_{12} = (B_1 + X_\infty((C_1 + D_{12}K)^T) D_{11}) \tag{5.53}$$

$$\Omega_{21} = B_1^T + D_{11}^T (C_1 + D_{12}K)X_\infty$$

$$\Omega_{22} = -\gamma^2 I + D_{11}^T D_{11}$$

Kalman Yakubovich Popuv Lemması uygulanması sonrası aşağıdaki gibi olur:

$$\mathrm{S_{11} - S_{12}S_{22}{}^{-1}S_{21}{}^{T} \prec 0} \tag{5.54}$$

$$\mathrm{S_{11}} = \begin{bmatrix} \mathrm{((A + B_2K)X_\infty + X_\infty(A + B_2K)^T)} & \mathrm{B_1} \\ \mathrm{B_1{}^T} & -\gamma\mathrm{I} \end{bmatrix}$$

$$\mathrm{S_{22}{}^{-1}} = -\frac{1}{\gamma} \tag{5.55}$$

$$\mathrm{S_{12}} = \begin{bmatrix} \mathrm{X_\infty(C_1 + D_{12}K)^T} \\ \mathrm{D_{11}^T} \end{bmatrix}$$

$$\mathrm{S_{21}{}^T = [(C_1 + D_{12}K)X_\infty \quad D_{11}]}$$

Yukarıdaki eşitsizlik ($S_{11} - S_{12}S_{22}{}^{-1}S_{21}{}^{T} \prec 0$) Schur Tümleyeni uygulanabilecek bir haldedir. Bu eşitsizliğe tekrardan Schur Tümleyeni uygulandığında, $\mathrm{X_\infty} \succ 0$ için aşağıdaki eşitsizlik yazılabilir.

$$\begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix} \prec 0 \tag{5.56}$$

Matrisi oluşturan elemanlar (5.55) nolu denklem ile verilen elemanlar ile aynı olup, kolaylık olması açısından böyle bir gösterim şekli seçilmiştir. Bazı elemanların matris olduğuna dikkat edilmelidir.

Son olarak bir önceki adımda elde edilen eşitsizlikte "$\mathrm{M = KX_\infty}$" ve "$\mathrm{M^T = X_\infty\, K^T}$" dönüşümleri yapıldığında son durumda tamamı ile konveks yapıda doğrusal matris eşitsizliği elde edilmiş olur [40].

$$\begin{bmatrix} \mathrm{(AX_\infty + X_\infty A^T + B_2M + M^TB_2^T)} & \mathrm{B_1} & \mathrm{(X_\infty C_1^T + M^TD_{12}^T)} \\ \mathrm{B_1^T} & -\gamma\mathrm{I} & \mathrm{D_{11}^T} \\ \mathrm{(C_1X_\infty + D_{12}M)} & \mathrm{D_{11}} & -\gamma\mathrm{I} \end{bmatrix} \prec 0 \tag{5.57}$$

Optimal H_2 kontrolcü aşağıdaki doğrusal matris eşitsizliklerini karşılayan minimum bir η değeri ($\eta > 0$) aranarak elde edilebilir. H_2 normu sadece D_{21}=0 için aranabilir [39, 40]. Her "$\mathrm{X_2 = X_2{}^T}$" ve "$\mathrm{Q = Q^T}$" için aşağıdaki ifadeler yazılabilir.

$$\mathrm{(A + B_2K)X_2 + X_2(A + B_2K)^T + B_1B_1{}^T \prec 0} \tag{5.58}$$

$$\begin{bmatrix} Q & (C_2 + D_{22}K)X_2 \\ X_2(C_2 + D_{22}K)^T & X_2 \end{bmatrix} \succ 0 \tag{5.59}$$

$$\dot{I}z(Q) \prec \eta \tag{5.60}$$

Yukarıdaki eşitsizlikte "$M = KX_2$" dönüşümü yapıldığında aşağıdaki doğrusal matris eşitsizliği elde edilir [39, 40].

$$\begin{bmatrix} Q & (C_2X_2 + D_{22}M) \\ X_2{C_2}^T + M^T{D_{22}}^T & X_2 \end{bmatrix} \succ 0 \tag{5.61}$$

H_2/H_∞ çok amaçlı, hibrit kontrol kazancının bulunması için yukarıda ayrı ayrı bulunan doğrusal matris eşitsizlikleri birlikte çözülmelidir. "$M = KX_2 = KX_\infty$ " ve "$X=X_2 = X_\infty$" için Q, X ve M değerleri bulunabilir ise optimal bir hibrit denetleyici kazancı, K, bulunmuş olur. K kontrol kazancı sistemin H_∞ ve H_2 normu için aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$\begin{bmatrix} (AX + XA^T + B_2M + M^TB_2^T) & B_1 & (XC_1^T + M^TD_{12}^T) \\ B_1^T & -\gamma I & D_{11}^T \\ (C_1X + D_{12}M) & D_{11} & -\gamma I \end{bmatrix} \prec 0 \tag{5.62}$$

$$\begin{bmatrix} Q & (C_2X + D_{22}M) \\ X{C_2}^T + M^T{D_{22}}^T & X \end{bmatrix} \succ 0 \tag{5.63}$$

$$\dot{I}z(Q) \prec \eta \tag{5.64}$$

$$K = MX^{-1} \tag{5.65}$$

Yukarıdaki eşitsizlikler Yarı Tanımlı Programlama (Semi Defined Programing, SDP) yardımıyla çözülebilmektedir. Çözüm işlemi Matlab (vR2018b) paket programı yardımı ile yapılmış olup, çözümler ilerleyen aşamalarda sunulmuştur.

Çözümlemede Yalmip ayrıştırıcı olarak; Sedumi ise çözücü olarak kullanılmıştır. Yalmip, kurulan optimizasyon problemini Sedumi diline çeviren bir modeldir. Bilgisayar ile çözücü bu arayüz sayesinde iletişim kurarlar.

5.2.3 Doğrusal Matris Eşitsizliği Tabanlı Durum Geri Beslemeli H∞ Optimal Kontrolcü Tasarımı

Yukarıda hibrit olarak tasarlanan, konrolcü kazancını bulmak için kullanılacak matris eşitsizliklerinden sadece aşağıdakiler için (X>0 ve γ>0 için) bir K kazancı bulunması halinde bu H∞ optimal denetleyici kazancı olacaktır.

$$\begin{bmatrix} (AX + XA^T + B_2M + M^TB_2^T) & B_1 & (XC_1^T + M^TD_{12}^T) \\ B_1^T & -\gamma I & D_{11}^T \\ (C_1X + D_{12}M) & D_{11} & -\gamma I \end{bmatrix} \prec 0 \tag{5.66}$$

$$K = MX^{-1} \tag{5.67}$$

5.2.4 Doğrusal Matris Eşitsizliği Tabanlı Durum Geri Beslemeli H2 Optimal Kontrolcü Tasarımı

Yukarıda hibrit olarak tasarlanan, kontrolcü kazancını bulmak için kullanılacak matris eşitsizliklerinden sadece aşağıdakiler için (X>0 ve η>0 için) bir K kazancı bulunması halinde bu H2 optimal denetleyici kazancı olacaktır.

$$(A + B_2K)X + X(A + B_2K)^T + B_1{B_1}^T \prec 0 \tag{5.68}$$

$$\begin{bmatrix} Q & (C_2X + D_{22}M) \\ X{C_2}^T + M^T{D_{22}}^T & X \end{bmatrix} \succ 0 \tag{5.69}$$

$$\dot{I}z(Q) \prec \eta \tag{5.70}$$

$$K = MX^{-1} \tag{5.71}$$

5.3 Yalpa Hareketine Ait Değişkenlerin Tanımlanması

Matlab paket programında tanımlanacak değişkenlerin hesaplanması gerekmektedir. Burada, katsayıların hesaplanmasında kullanılan yalpa azalımına ait en küçük açı değerine dikkat edilmelidir. Burada, sıfır ileri hızda kullanılan değerlerin deneysel veriler için 7 derecede; sayısal analiz verileri için 5 derece civarında sona erdiği görülmektedir. Daha küçük yalpa açılarındaki değerleri de karşılaması açısından bu değerlerden sayısal analiz sonucu elde edilmiş verilerin kullanılması daha uygun olacaktır. Belirli bir ileri hızda (Fr=0,41) gerçekleştiren deneysel ve sayısal analiz verilerine bakıldığında 1 derecenin altındaki değerlere kadar kapsamaktadır ve sönüm katsayıları her iki yöntemde birbirine yakın çıkmaktadır. Bu yaklaşımla ileri hızdaki verilerden de deneysel veriler, kullanım için seçilebilirler. Literatür taraması kısmında belirtildiği gibi, sönüm katsayısı yalpa açısı ve gemi hızınından etkilenmektedir ve bu etkileşim doğru orantılı bir etkileşimdir. Gemi hızı yalpa sönümü için önemli bir değişkendir. Ayrıca sönümün bileşenlerinden doğrusal olmayan bileşen hız ile ters orantılıdır ve yüksek hızlarda doğrusal bileşen daha baskın durumdadır [4, 8].

Bu durumda, 30 knot ileri hızında, bu hızda elde edilmiş sönüm katsayılarını kullanmak doğru olacaktır. Ayrıca, matematiksel modelde doğrusallaştırma adımı uygulanacağı için yine ileri hızda elde edilmiş yalpa sönüm katsayıları kullanılması daha uygun bir seçim olacaktır.

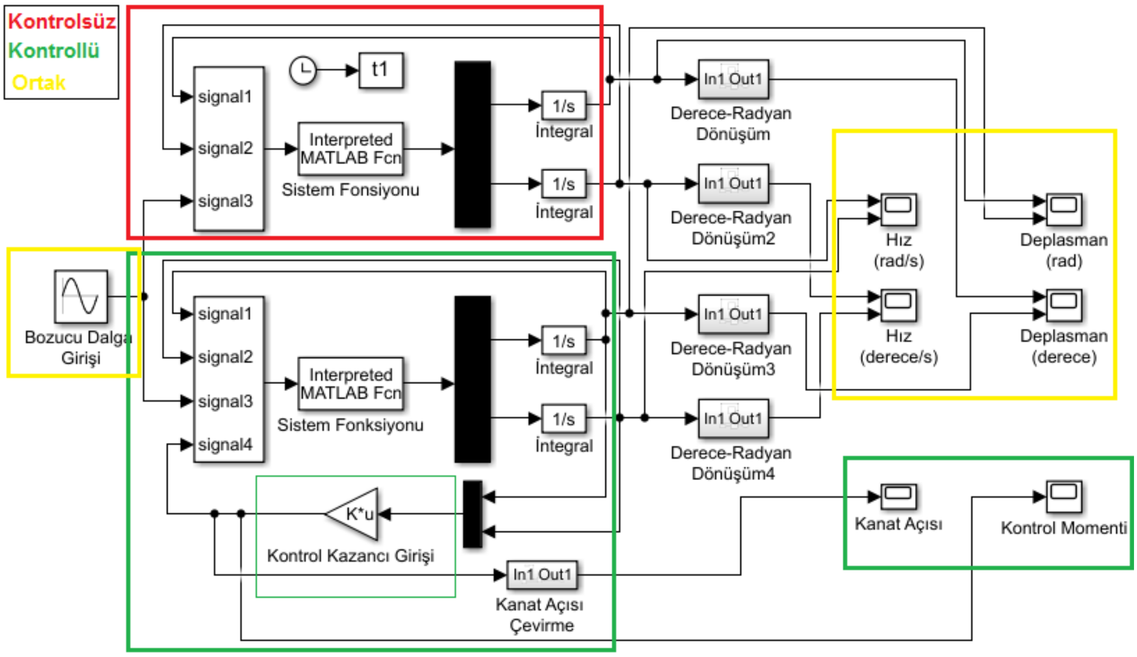
Sonuç olarak, Tablo 5.1'deki, ileri hızdaki verilerden deneysel veriler, ilerleyen aşamalarda kullanım için seçilmiştir.

Tablo 5.1 Matematiksel model değişken değerleri

Katsayı	Birim
$(I_x + J_x)_s$=497921290	kg.m^2
$b_L=2\alpha$=0,04541x2=0,09082 $b_{N1}=\beta$ =0,84654 $b_{N2}=\gamma$=-7,40296	$b_L=2\alpha$=1/s $b_{N1}=\beta$ =1/rad $b_{N2}=\gamma$=s/rad^2
g_1=1,938/$(I_x + J_x)_s$=3,89218e-9 g_3=-1,1538/$(I_x + J_x)_s$=2,3156e-9 g_5=0,095/$(I_x + J_x)_s$=1.90793e-10	g_1=1/kg.m g_3=1/kg.m.rad^2 g_5=1/kg.m.rad^4
c_1=Kanat boyuna göre değişecektir. c_2= Kanat boyuna göre değişecektir. λ_e=Deniz durumuna göre değişecektir. α_m= Deniz durumuna göre değişecektir. ω_e= Deniz durumuna göre değişecektir.	c_1=1/s^2 c_2=1/s^2 λ_e=birimsiz α_m=birimsiz ω_e=rad/s

5.4 Kontrollü ve Kontrolsüz Sistem Çıktıları

Kontrollü ve kontrolsüz durumda sistemlere daha önceki bölümlerde detaylandırılan bozucu girişler uyguladı ve her bir denetleyicinin (Farklı K kazancına sahip denetleyiciler) Maksimum (Peak Value) ve RMS (Root Mean Square, Ortalama Karelerin Karekökü) cinsinden bozucuyu ne kadar (yüzde oranla) bastırdığı bilgisi aşağıda paylaşılmıştır. Bu kapsamda Matlab-Simulink (vR2018b) paket programı kullanılmış olup, programda kullanılan simulink model Şekil 5.7'deki gibidir.



Şekil 5.7 Matlab-simulink model

Şekil 5.7'de kontrollü ve kontrolsüz durumda kullanılan sistem fonksiyonları aşağıdaki gibidir.

- Kontrolsüz Durumdaki Sistem Fonksiyonu:

  1- function xdot=system(u)

  2- x=u(1:2);

  3- w=u(3);

  4- A1= [0,1; -delta*m1,-(bL)];

  5- B1= [0;1];

```
xdot=A1*x+B1*w;
end
```

- Kontrollü Durumdaki Sistem Fonksiyonu:

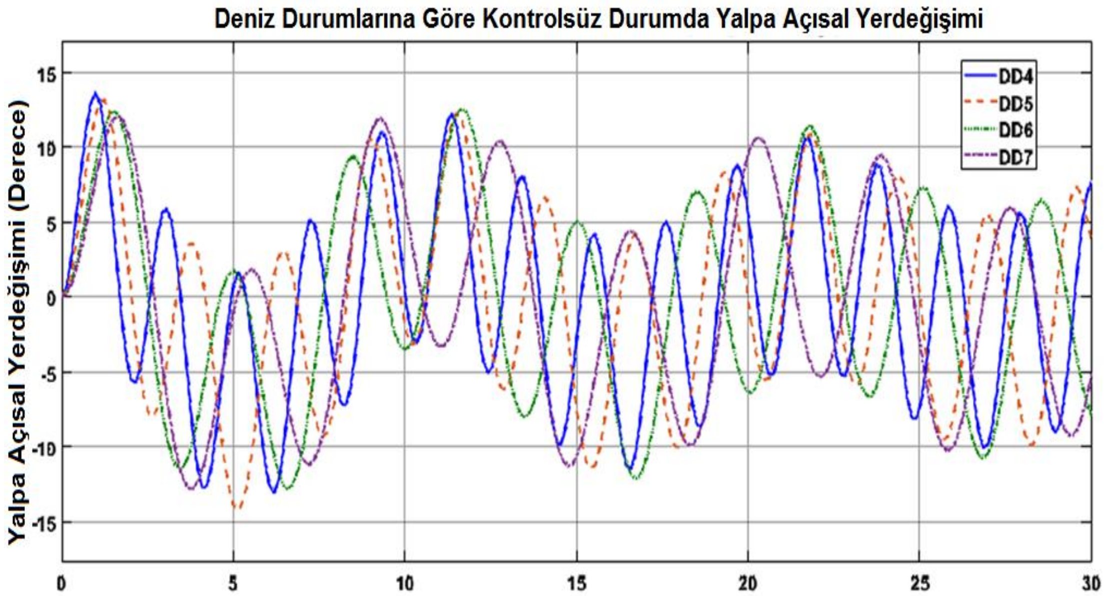
```
function xdot=system_c(u)
x=u(1:2);
w=u(3);
c=u(4);
wc=[w;c];
Ac= [0,1; -delta*m1,-(bL+c2)];
Bc= [0,0; 1,-1/Ixx];
xdot=Ac*x+Bc*wc;
end
```

Denetleyici kazancının hesaplanmasında kullanılan matlab kodları, son kısımdaki ekler kısmında (EK-A) paylaşılmıştır.

H_∞ denetleyici, sistemin kalıcı durum cevabını iyileştirmede; H_2 denetleyici ise sistemin geçici durum cevabını iyileştirmede yetenekli denetleyici yapılarıdır. Bu nedenle bu iki denetleyici yapısının birlikte kullanıldığı hibrit kontrol sistemleri yaygın olarak kullanılmaktadır.

Problem bir bozucu bastırma problemi olduğu için sistemin kalıcı durum cevabının çözümümüzdeki önem katsayısı düşüktür. Burada önemli olan, bozucuya karşı sistemin açısal yerdeğişim değerinin kontrolsüz duruma kıyasla ne oranda azaltıldığıdır. Bir diğer husus ise, maksimum açısal yerdeğişim azalımını ararken, bunu sağlayacak kontrol momenti değerinin ulaşılabilir olması ve günümüzde bu momenti üretebilecek, gemi yapısında kullanılabilecek eyleyici yapılarının mevcutta olmasıdır. Bu nedenle, en uygun (optimal) denetleyici kazancı (K) hesabı için kullandığımız algoritmada, yukarıda bahsedilen hususların sağlaması amaçlı çeşitli ağırlıklandırmalar yapılacaktır. Bu ağırlıklandırma işlemi denetleyici kazancı hesabında kullanılan C ve D matrislerindeki değerlerin artırılıp azaltılması yöntemi ile sağlanacaktır.

Kontrolsüz durum incelendiğinde, geminin genel şartları açısından en tehlikeli durum, deniz durumu 6 ve 7 ile karşılaşması durumudur. Bunun yanında sadece yalpa hareketi özelinde, hangi deniz durumunun etkili bir bozucu olduğu kararına Şekil 5.8 yardımı ile varılabilinir.



Şekil 5.8 Kontrolsüz durumda farklı deniz durumları için yalpa açısal yerdeğişim değerleri

Şekil 5.8'de görüldüğü gibi deniz durumu 4 ve altı ile 5 için yalpa genlikleri benzer şekilde (ilk 10 saniyede 3 ten fazla tepe sayısı) gözlemlenmektedir. Deniz durumu 6 ve üzeri ise benzer karaktere (ilk 10 saniyede 3 tepe sayısı) sahiptir. Hem geminin genel selameti, hem de yalpa hareketi açısından düşünüldüğünde özel olarak selameti açısından deniz durumu 4 ve 6 için iki farklı uygulamada bulunulması doğru olacaktır.

5.4.1 Denetleyici Kazancı Hesabı 1

Yukarıda belirtildiği üzere asıl amacımızın bozucu bastırma problemi olduğu söylenebilir. Burada bunu sağlarken aynı zamanda sistemin kalıcı durum cevabını da mümkün mertebede iyi hale getiren denetleyiciyi arandığında Tablo 5.2 ve Tablo 5.3'teki denetleyici kazançları elde edilmiştir.

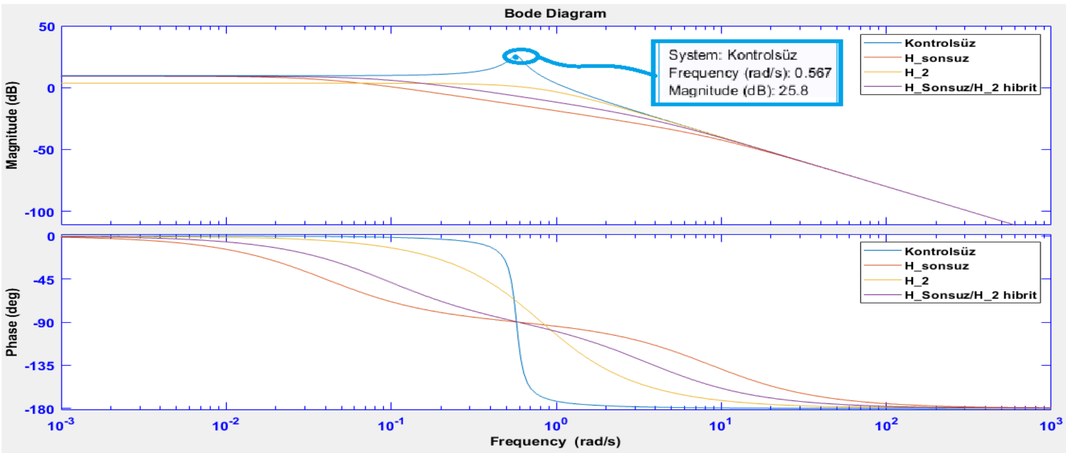
Tablo 5.2 Denetleyici kazançları-6 deniz durumu-hesap 1

Kontrolcü	Kontrol Kazancı(K)
H∞	K=[8,3966886e+06 4,2582279702e+09];
H2	K=[1,658288144e+08 6,673172315e+08];
H∞/ H2 Hibrit	K=[8,0565984e+06 1,8513362026e+09];

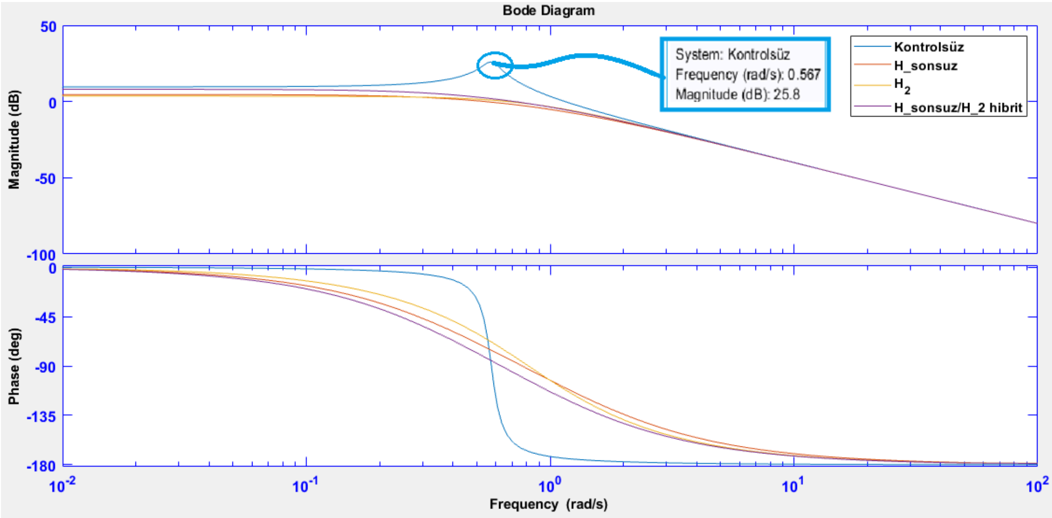
Tablo 5.3 Denetleyici kazançları-4 deniz durumu-hesap 1

Kontrolcü	Kontrol Kazancı(K)
H∞	K=[1.29312787e+08 8.25355077e+08];
H2	K=[1.661450615e+08 6.68219386e+08]
H∞/ H2 Hibrit	K=[3.3349117e+07 6.3953277e+08];

Tablolardaki denetleyici kazançlarının kullanıldığı kontrollü durumlara karşılık gelen sistemin frekans cevabları (bozucu giriş ve açısal yerdeğişim çıkışına denk gelen transfer fonksiyonu için) Şekil 5.9 ve Şekil 5.10'daki gibidir.

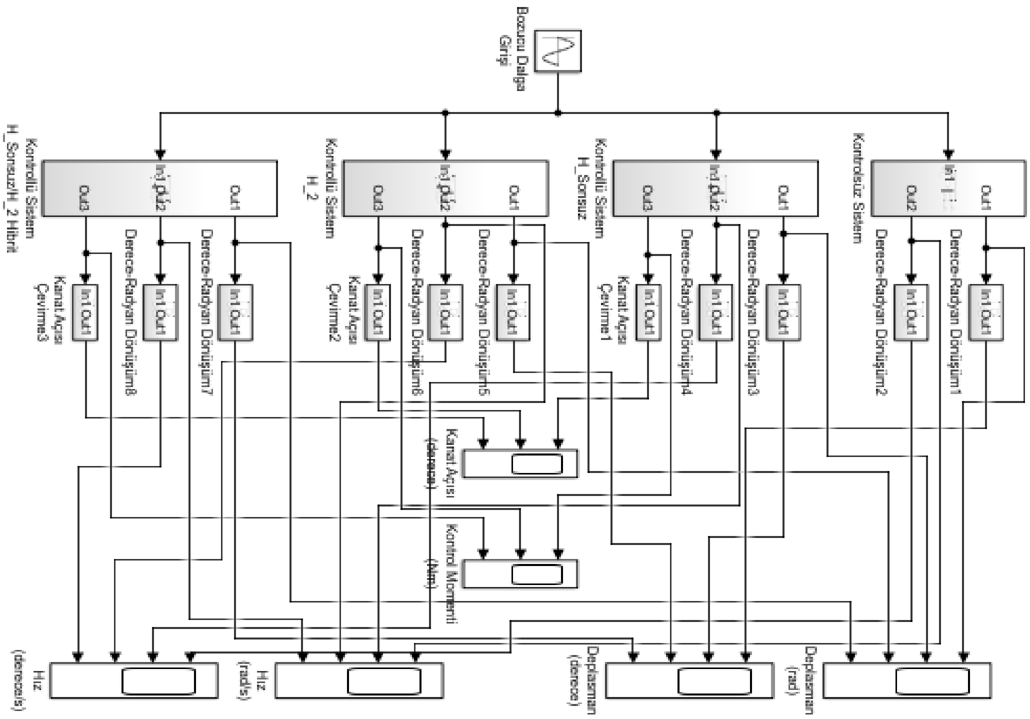


Şekil 5.9 Sistemin frekans cevabı-6 deniz durumu-hesap 1



Şekil 5.10 Sistemin frekans cevabı-4 deniz durumu-hesap 1

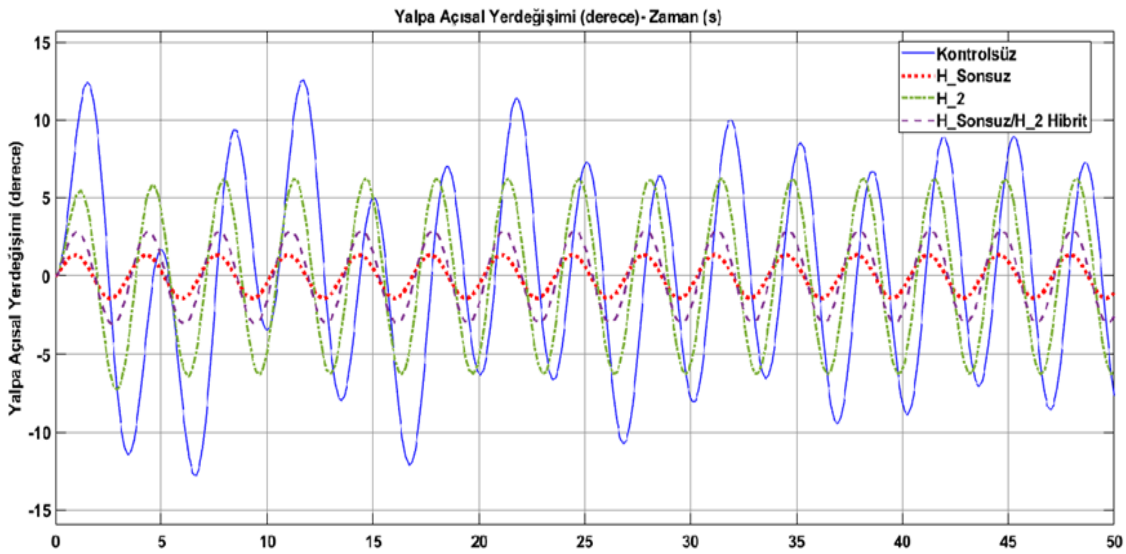
Yukarıdaki denetleyici kazançlarının kullanıldığı Matlab-Simulik (vR2018b) model, Şekil 5.7’de paylaşılan modelin bir alt model şekline getirilmesi ve sayı olarak çoğaltılması ile kurulan aşağıdaki model içerisinde kullanılmıştır. Bu simulink model farklı denetleyicilerin karşılaştırılması amacı ile oluşturulmuştur. Şekil 5.11’de bu model görülmektedir.



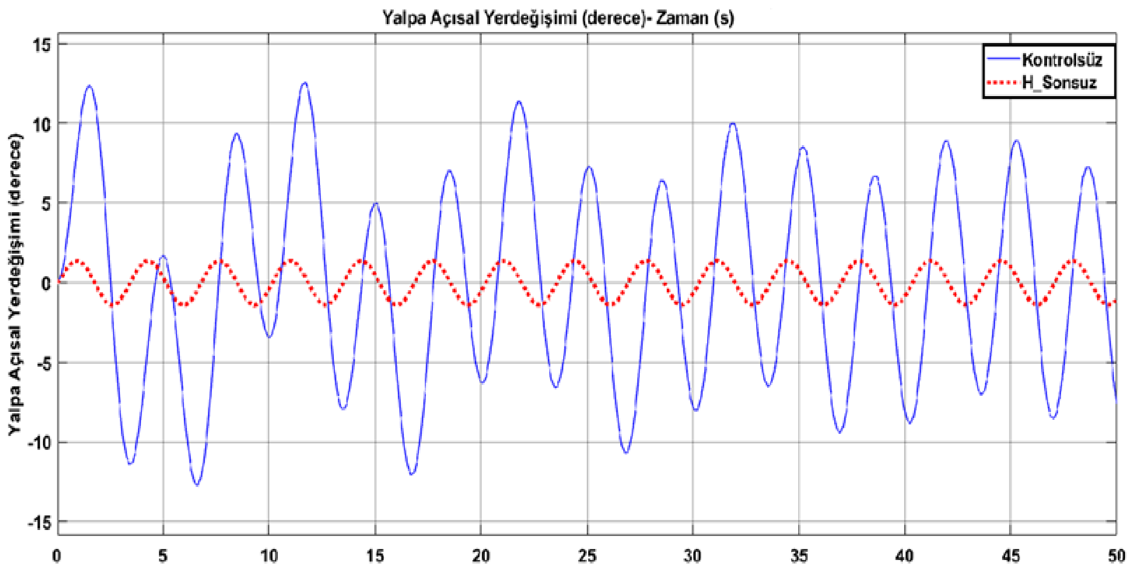
Şekil 5.11 Karşılaştırmalı simulink model

Bu model yardımı ile açısal yerdeğişim ve kanat açısı değerleri karşılaştırılmış olup, ayrıca bu değerler tablolar halinde de paylaşılmıştır.

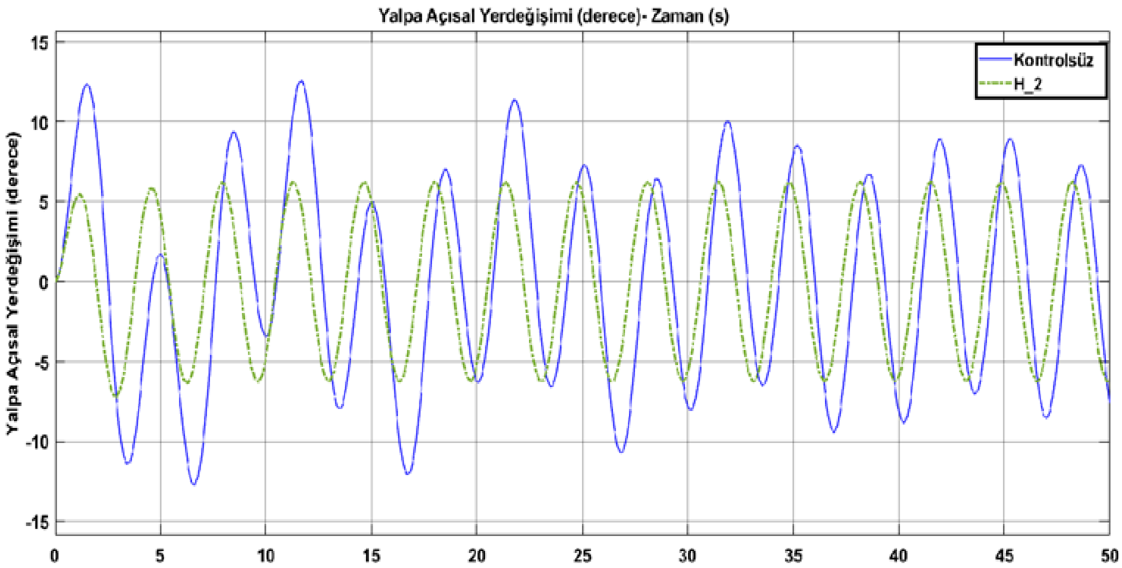
Kontrollü ve kontrolsüz durumda yalpa açısal yerdeğişim değerleri derece cinsinden aşağıdaki şekillerdeki gibidir. Şekil 5.12 ile Şekil 5.15 arasındaki şekiller 6 deniz durumu için kontrollü ve kontrolsüz durumlarda yalpa açısal yerdeğişimini göstermektedir.



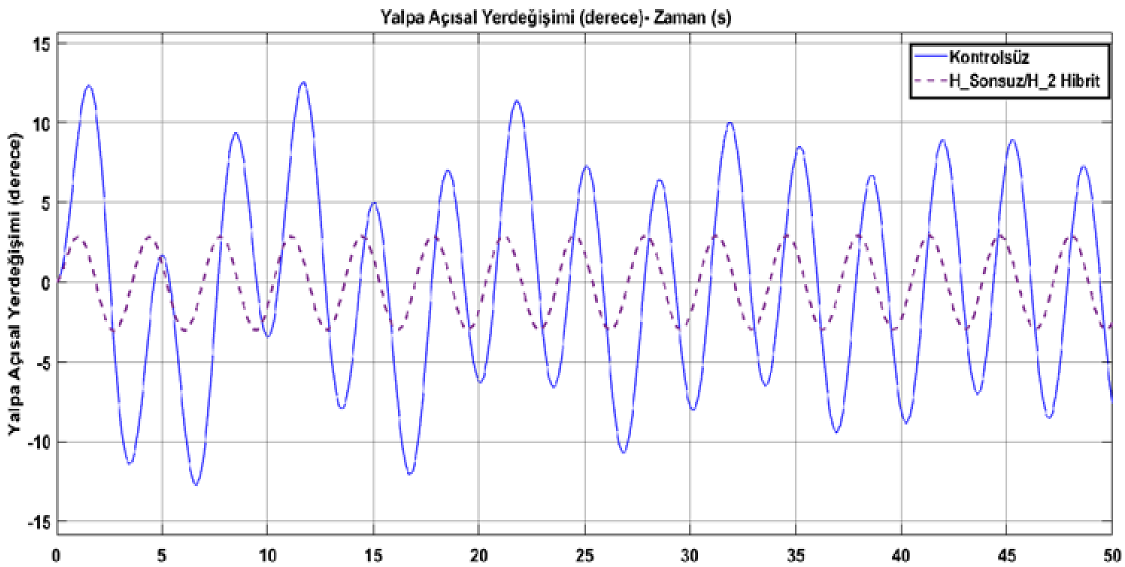
Şekil 5.12 Yalpa açısal yerdeğişimi değerleri-6 deniz durumu-hesap 1



Şekil 5.13 Yalpa açısal yerdeğişimi değerleri-H∞ kontrol-6 deniz durumu-hesap 1



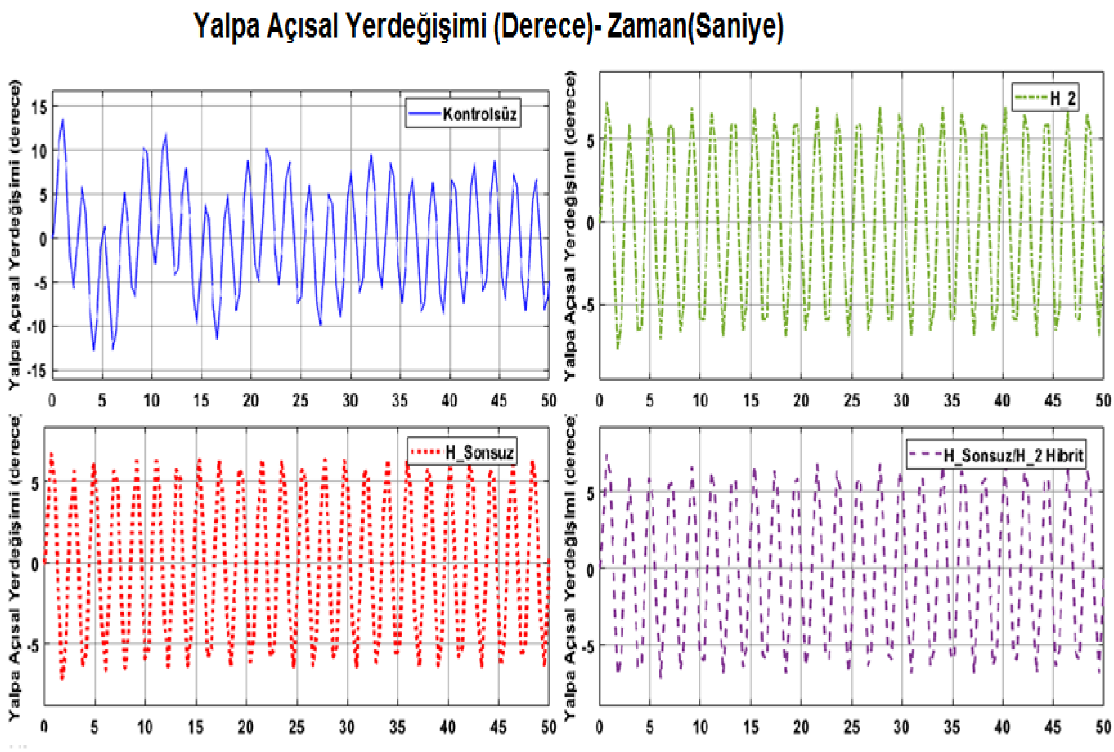
Şekil 5.14 Yalpa açısal yerdeğişimi değerleri- H_2 kontrol -6 deniz durumu-hesap 1



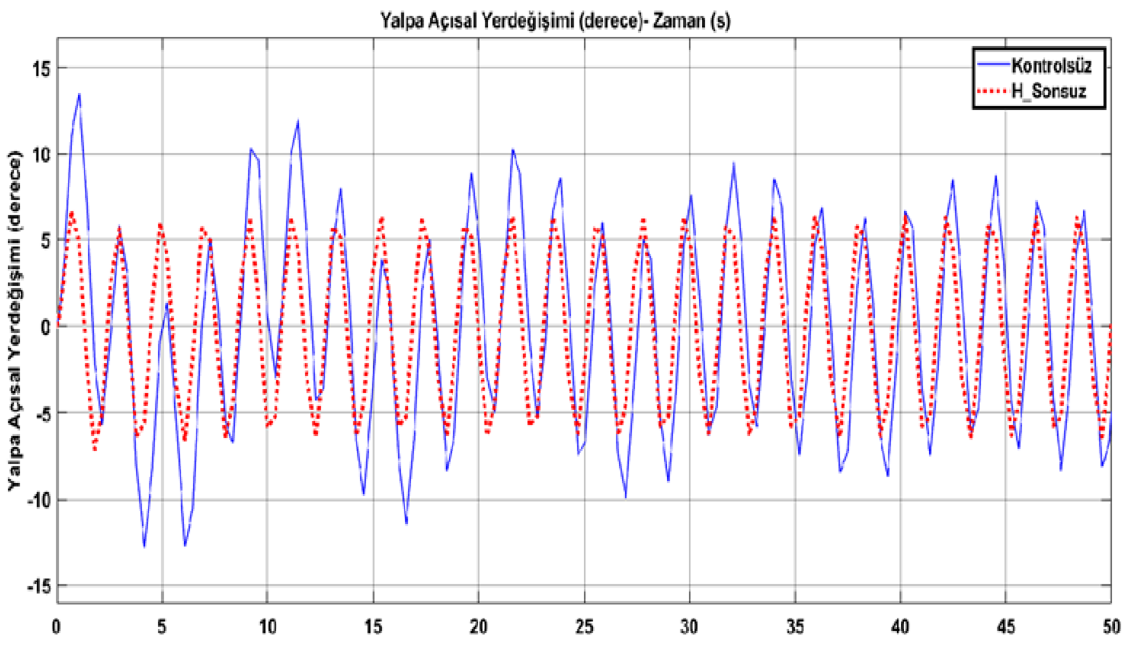
Şekil 5.15 Yalpa açısal yerdeğişimi değerleri- H_∞/ H_2 hibrit kontrol -6 deniz durumu-hesap 1

Şekil 5.12, Şekil 5.13, Şekil 5.14 ve Şekil 5.15'den farklı kontrolcülerin farklı sönümleme oranlarını başardığı görülmektedir.

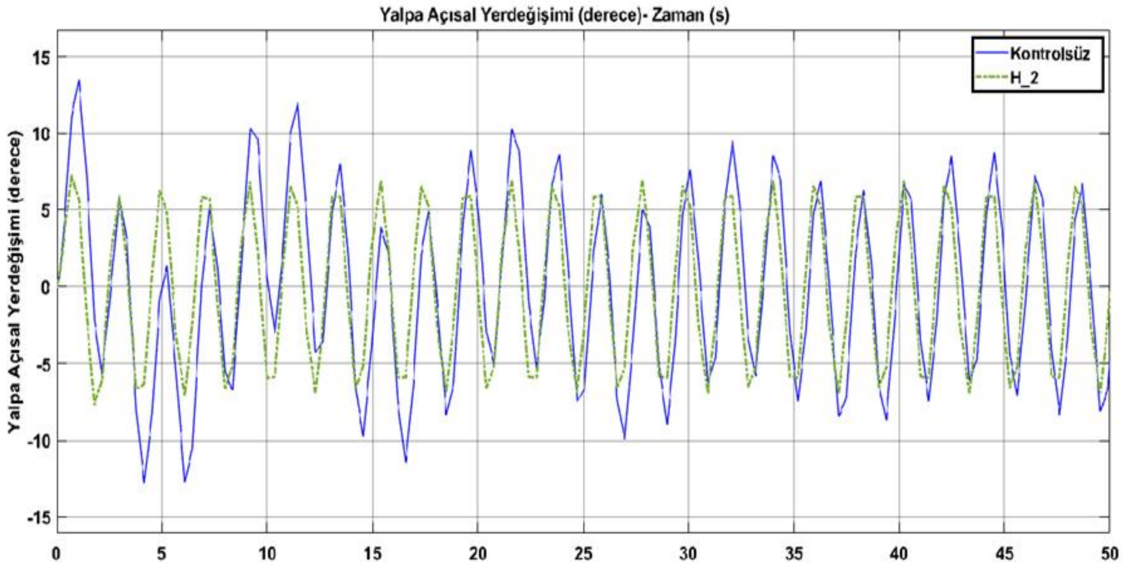
Şekil 5.16 ile Şekil 5.19 arasındaki görseller, 4 deniz durumu için kontrollü ve kontrolsüz durumlarda yalpa açısal yerdeğişimini göstermektedir.



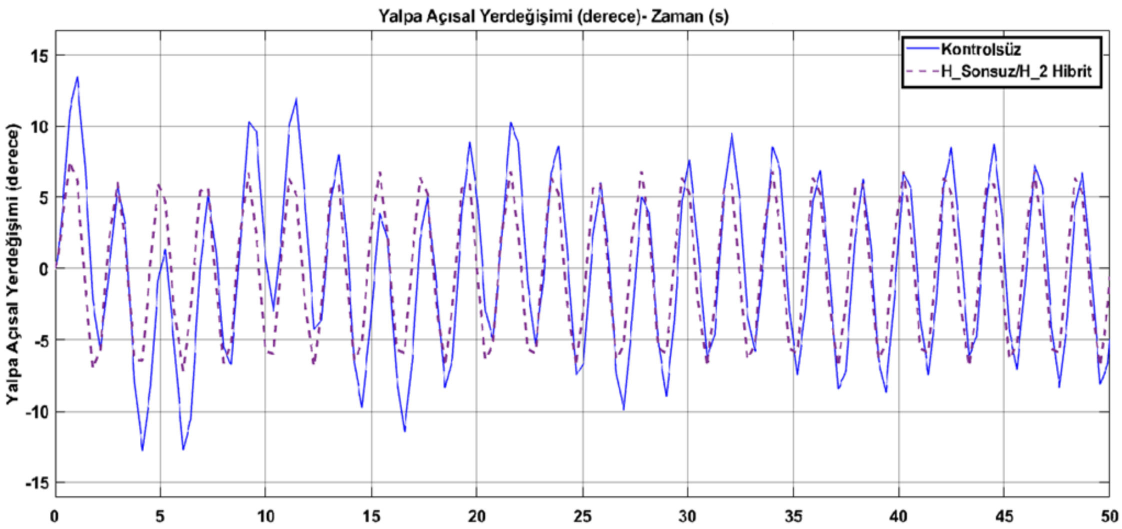
Şekil 5.16 Yalpa açısal yerdeğişimi değerleri-4 deniz durumu-hesap 1



Şekil 5.17 Yalpa açısal yerdeğişimi değerleri- H∞ kontrol -4 deniz durumu-hesap 1



Şekil 5.18 Yalpa açısal yerdeğişimi değerleri-H_2 kontrol-4 deniz durumu-hesap 1



Şekil 5.19 Yalpa açısal yerdeğişimi değerleri- H_∞/ H_2 hibrit kontrol -4 deniz durumu-hesap 1

Deniz durumu 4 ve 6 için paylaşılan kontrollü ve kontrolsüz durumdaki yalpa genlikleri eğrilerinin bir özeti olarak, Tablo5.4'de deniz durumu 6 için; Tablo5.5'de ise deniz durumu 4 için elde edilen çıktılar paylaşılmıştır.

Tablo 5.4 Yalpa açısal yerdeğişimi sönüm oranları ve kanat açıları-6 deniz durumu-hesap 1

Kontrolcü	Maximum Açısal Yerdeğişimi (Derece)	Sönüm Oranı (%)	Ortalama Açısal Yerdeğişimi (RMS) (Derece)	Sönüm Oranı (%)	Maksimum Kanat Açısı (Derece)
Kontrolsüz Durum	12,57	-	6,19	-	
H∞	1,37	89,1	0,94	84,8	23,8
H2	6,27	50,1	4,28	30,8	17,44
H∞/ H2 Hibrit	2,95	76,5	2,02	67,3	22,3

Tablo 5.4'teki maksimum kanat açısı değerleri, kanat boyu 3,6 m olan kanatlar kullanılarak elde edilen değerlerdir. Ayrıca, H_2 denetleyici için aynı kontrol momenti, 2,8 m kanat boyu ve 23,2 derece maksimum kanat açısı ile sağlanabilmektedir.

Tablo 5.5 Yalpa açısal yerdeğişimi sönüm oranları ve kanat açıları-4 deniz durumu-hesap 1

Kontrolcü	Maximum Açısal Yerdeğişimi (Derece)	Sönüm Oranı (%)	Ortalama Açısal Yerdeğişimi (RMS) (Derece)	Sönüm Oranı (%)	Maksimum Kanat Açısı (Derece)
Kontrolsüz Durum	13,5	-	5,85	-	
H∞	6,7	50,37	4,6	21,36	23,7
H2	7,26	46,22	4,94	15,15	21
H∞/ H2 Hibrit	7,5	44,44	4,87	16,75	19,6

Tablo 5.5'teki maksimum kanat açıları, kanat boyu 5 m olan kanat tasarımı için elde edilen değerlerdir. Ayrıca, H_∞/ H_2 hibrit denetleyici için aynı kontrol momenti 4,5 m kanat boyu ve 23,3 derece maksimum kanat açısı ile sağlanabilmektedir.

Yukarıdaki tablolardaki değerlere bakıldığında, 3,6 m kanat boyu için 6 deniz durumunda sönüm açısından önemli sönüm değerleri elde edilmiştir. Ortalama sönüm oranı açısından kabiliyet sıralaması en başarılıdan başlamak üzere H_∞ denetleyici, H_∞ /H_2 Hibrit denetleyici ve H_2 denetleyici şeklindedir.

Sönüm değerlerini daha kısa boylu kanatlarla (daha küçük kontrol momenti değeri ile) sağlayabilmek ve maksimum kanat açısı sınırı olan 24 dereceye yeterince yaklaşmak amacıyla denetleyici kazancı hesabında C ve D matrislerinde çeşitli ağırlıklandırmalar yapılması gerekmektedir. Bu amaçla, yeni kontrolcü kazançları hesaplanmalıdır.

5.4.2 Denetleyici Kazancı Hesabı 2

Kanat boyunu en küçük olacak şekilde, çeşitli denetleyici kazancı hesabı denemelerinde dikkat edilmesi gereken şey, performanstan ne ölçüde ödün verilebileceğidir. Bu bir en iyiyi elde etme (optimizasyon) problemidir ve istenilen değerlere yaklaşma metodu ile çeşitli denemeler sonrasında elde edilebilir.

Kanat boyunun, normal şartlar altında güncel örnekler incelendiğinde, gemi boyuna (Su hattı boyu) oranının %2-4 oranında bir uzunluğa sahip olduğu görülmektedir. Bu orana göre, örnek olarak seçilen DTMB 5415 gemisi için, yaklaşık olarak kanat boyunun 2,84-5,68 (m) aralığında bir boya sahip olması gerekmektedir. Burada kastedilen bu boy aralığında (veter boyu, ıslak alan, CL değerleri vb. diğer parametreler değişebilmektedir.) bir kanat yapısı ile ilgili kontrol momentlerinin üretildiğidir.

Kanat açısı olarak maksimum 24 dereceyi geçmeyecek ve ilgili kontrol momentini yukarıda bahsedilen kanat boyu aralıklarında sağlayacak, bunu sağlarken de önemli ölçüde yalpa sönümünü sağlayacak bir denetleyici tasarlanması gerekmektedir.

Bu başlık altında ortalama olarak 4 m kanat boyu ve daha da altındaki bir değere inilmeye çalışılmıştır. Bunun yanında, sönüm oranının ortalama değerde en az %70-80 ve üzerinde tutulması da amaçlanmıştır.

Bu kapsamda bulunan denetleyici kazançları, Tablo 5.6 ve Tablo 5.7’deki gibidir. Tablo 5.6’da deniz durumu 6 için elde edilen denetleyici kazançları; Tablo 5.7’de ise deniz durumu 4 için elde edilen denetleyici kazançları paylaşılmıştır.

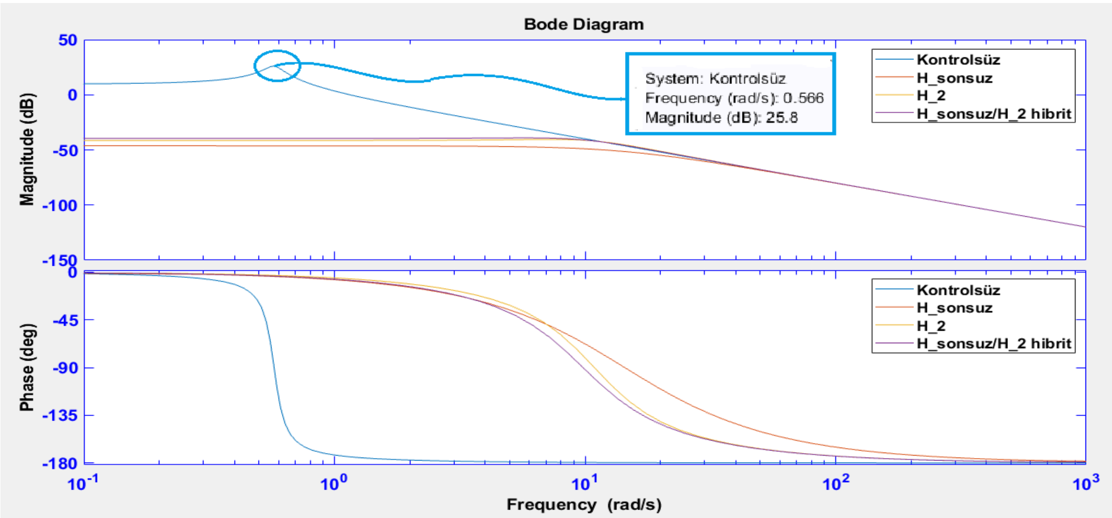
Tablo 5.6 Denetleyici kazançları-6 deniz durumu-hesap 2

Kontrolcü	Kontrol Kazancı(K)
H∞	[1,02901803708e+11 1,2940369582e+10]
H2	[5,8892886684e+10 5,614121194e+09]
H∞/ H2 Hibrit	[4,7753025705e+10 5,554539919e+09]

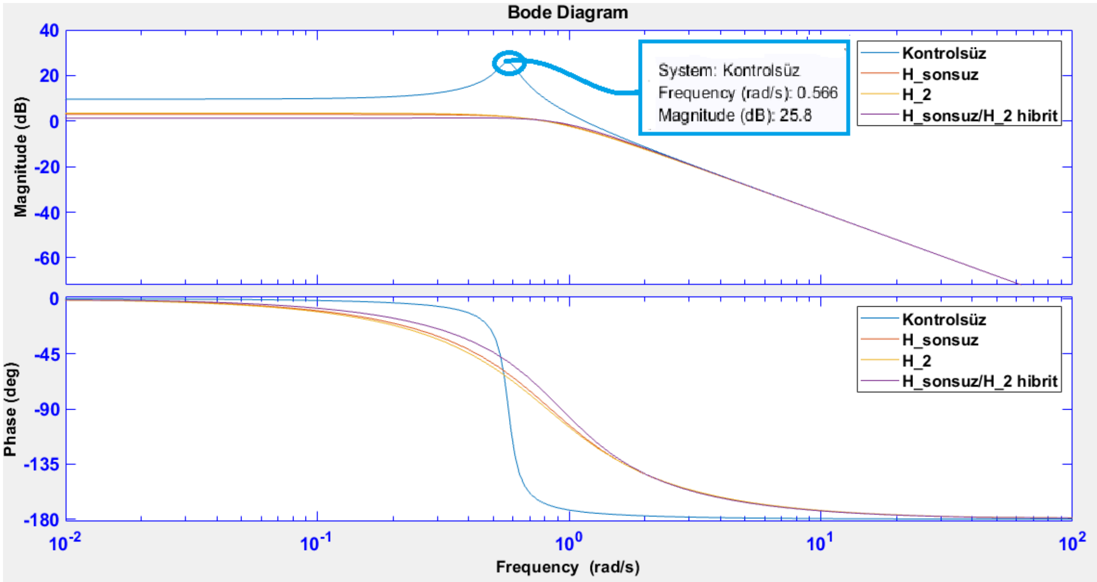
Tablo 5.7 Denetleyici kazançları-4 deniz durumu-hesap 2

Kontrolcü	**Kontrol Kazancı(K)**
H∞	[1,90862677e+08 5,60584289e+08]
H2	[1,68513073e+08 5,72377632e+08]
H∞/ H2 Hibrit	[2,67267874e+08 5,38148126e+08]

Tablolardaki denetleyici kazançlarının kullanıldığı kontrollü durumlara karşılık gelen sistemin frekans cevabları (bozucu giriş ve açısal yerdeğişim çıkışına denk gelen transfer fonksiyonu için) Şekil 5.20 ve Şekil 5.21'deki gibidir.

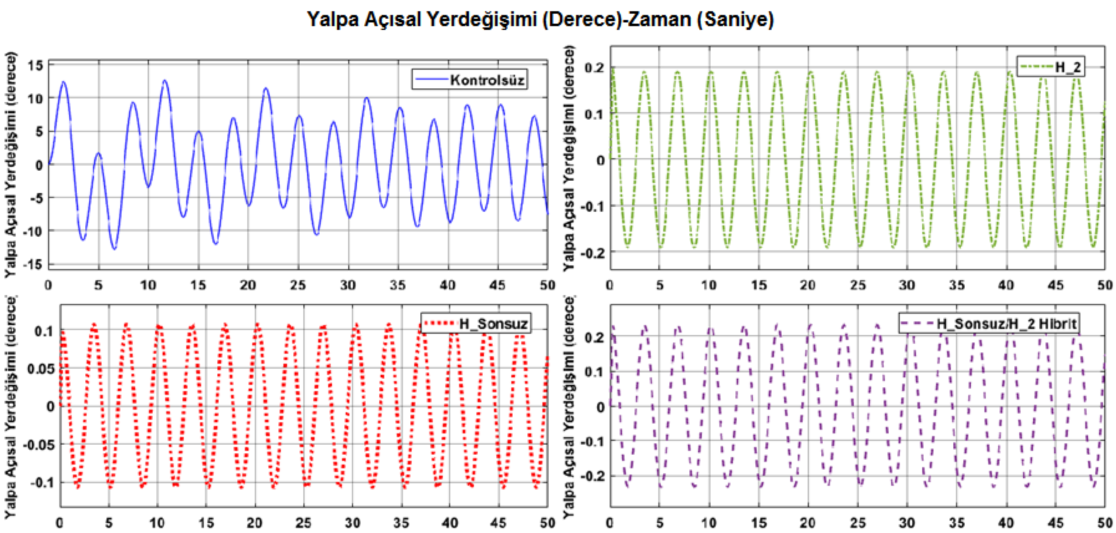


Şekil 5.20 Sistemin frekans cevabı-6 deniz durumu-hesap 2



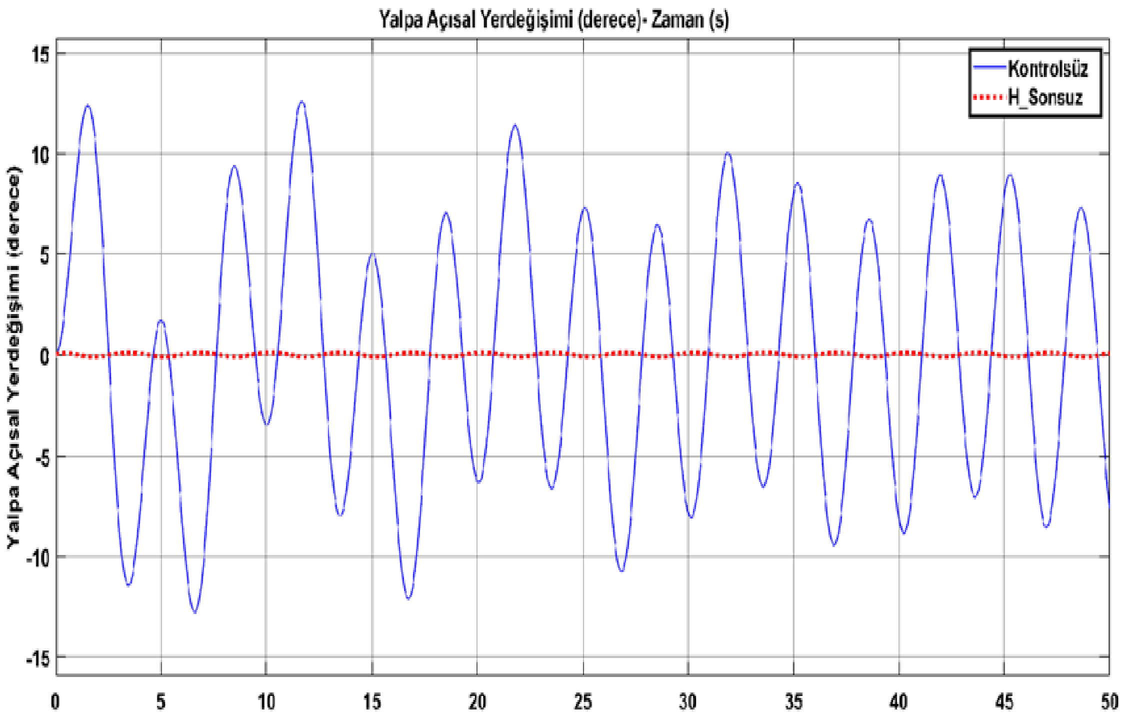
Şekil 5.21 Sistemin frekans cevabı-4 deniz durumu-hesap 2

Denetleyici sistemin yalpa açısal yerdeğişimini sönümleme oranları, 6 deniz durumu için, Şekil 5.22 ile Şekil 5.25 arasındaki görsellerdeki gibidir.

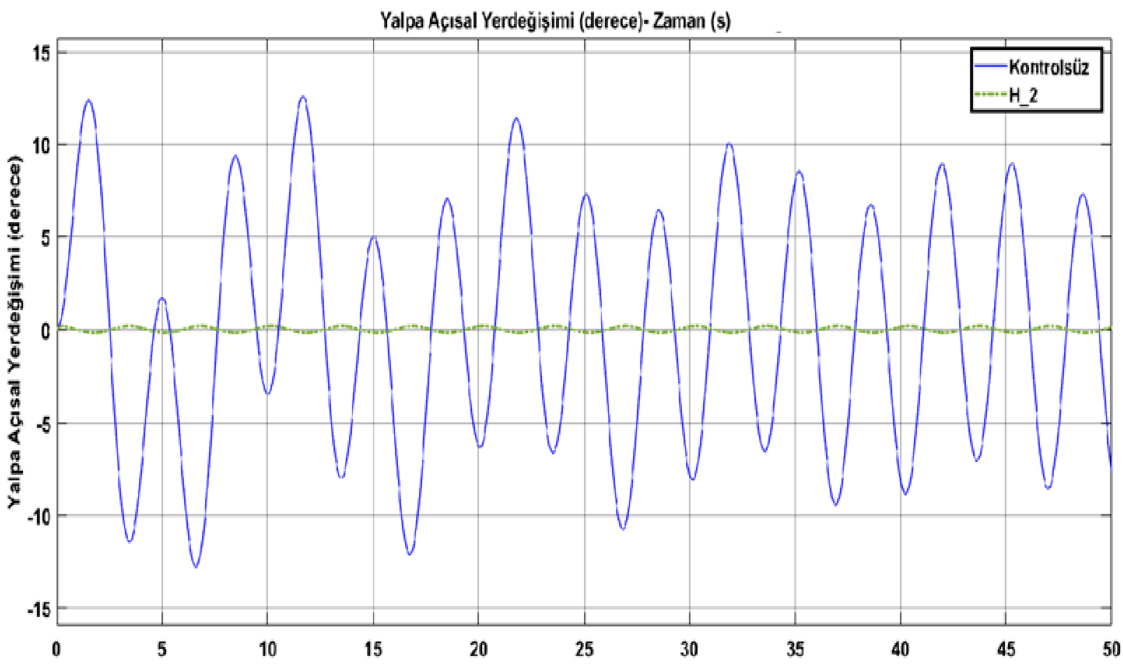


Şekil 5.22 Yalpa açısal yerdeğişimi değerleri-6 deniz durumu-hesap 2

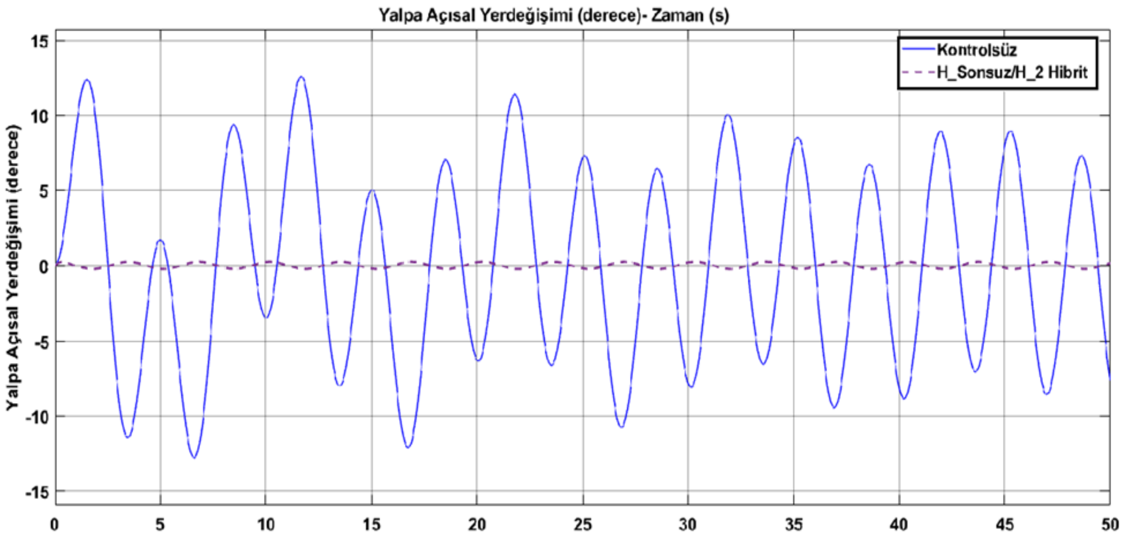
Şekil 5.22'de görüldüğü gibi, deniz durumu 6 için etkin bir sönümleme sağlanmıştır. Bu oran %90 üzerinde bir orandır. Bu oranda bir sönüm değeri, gemiyi güvenli sınırlar içerisinde tutabilecek bir değerdir.



Şekil 5.23 Yalpa açısal yerdeğişimi değerleri-H∞ kontrol-6 deniz durumu-hesap 2

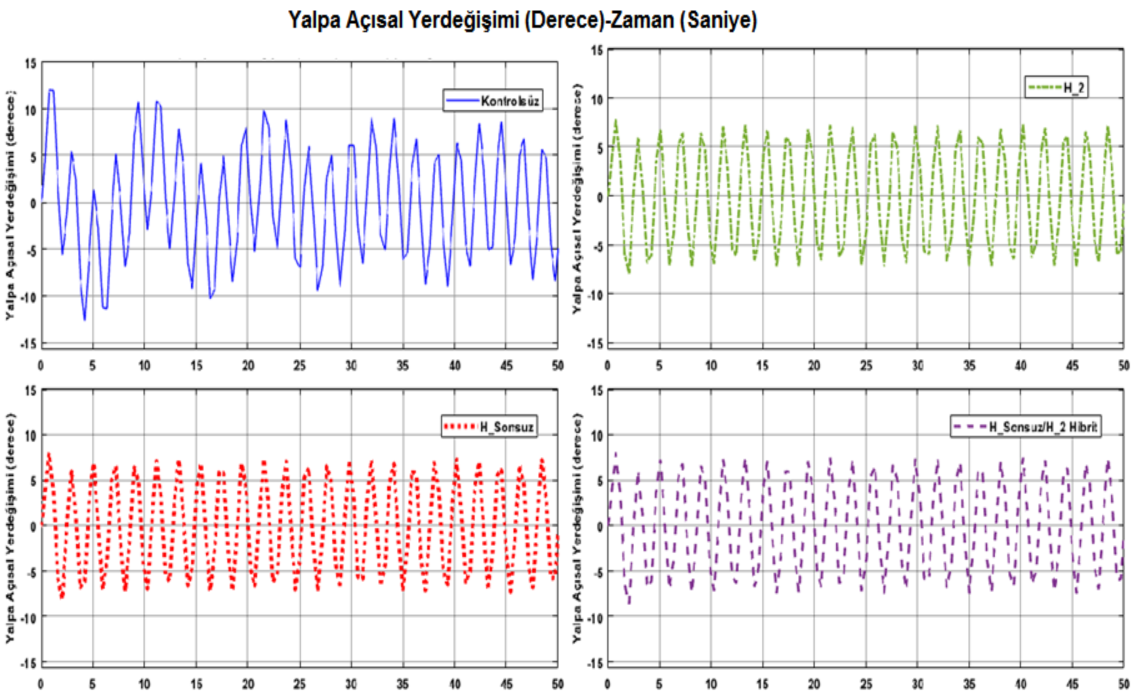


Şekil 5.24 Yalpa açısal yerdeğişimi değerleri-H_2 kontrol-6 deniz durumu-hesap 2

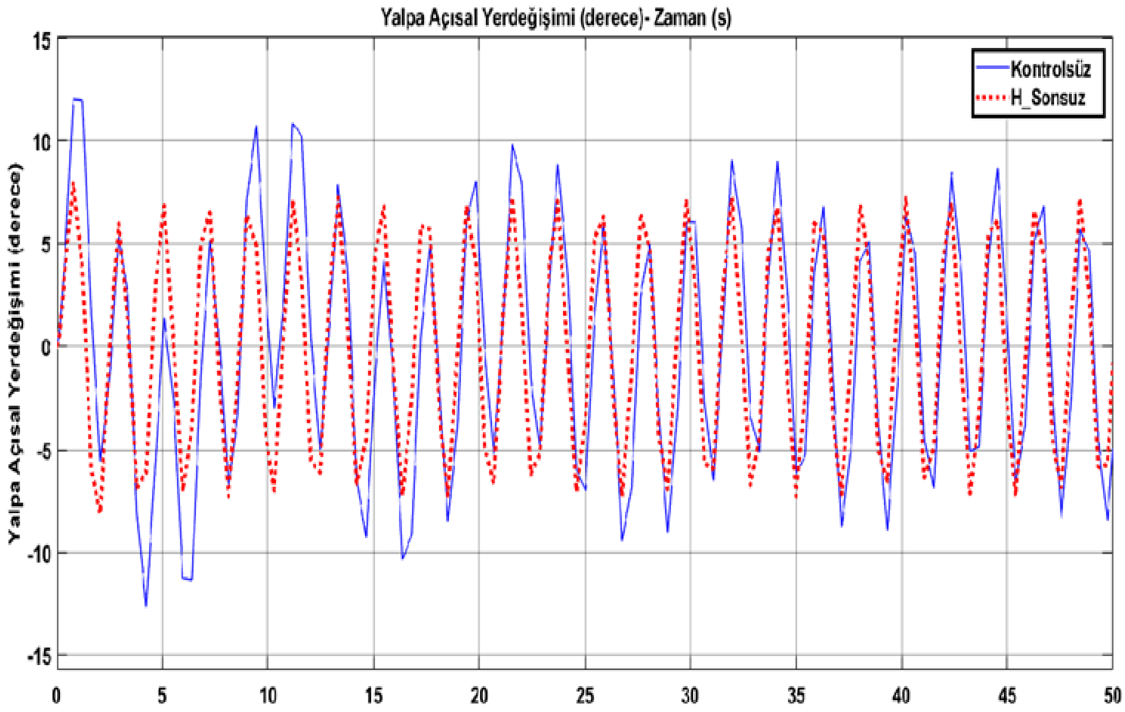


Şekil 5.25 Yalpa açısal yerdeğişimi değerleri- H∞/ H_2 hibrit kontrol-6 deniz durumu-hesap 2

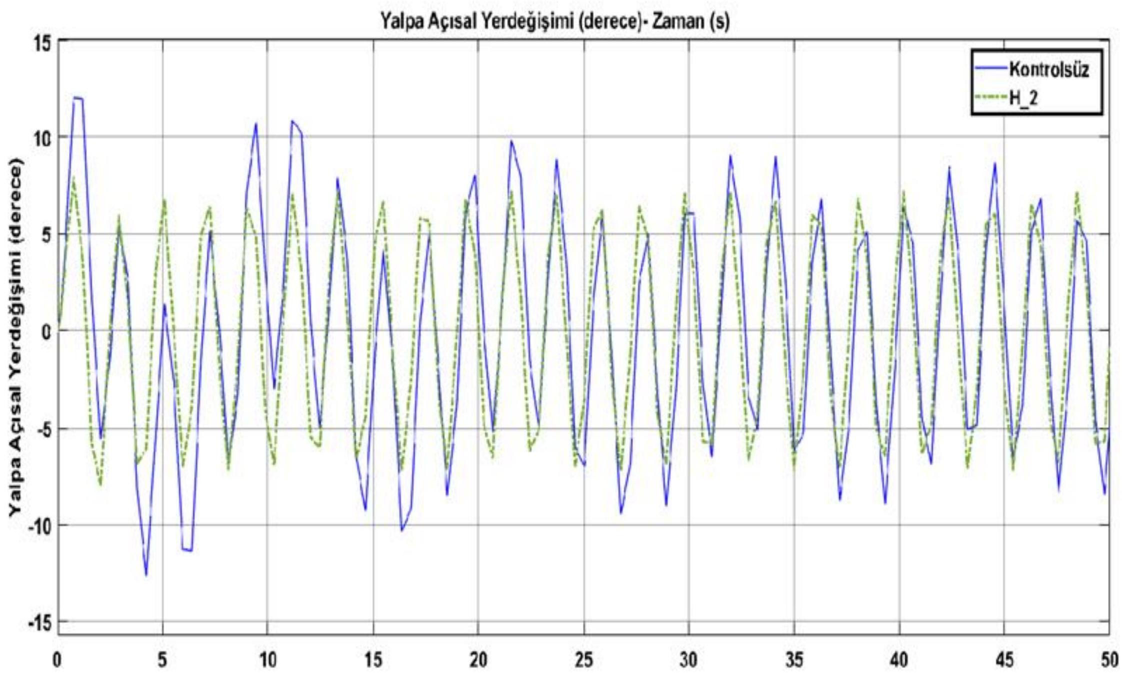
Denetleyici sistemin yalpa açısal yerdeğişimini sönümleme oranları, 4 deniz durumu için, Şekil 5.26 ile Şekil 5.29 arasındaki görsellerdeki gibidir.



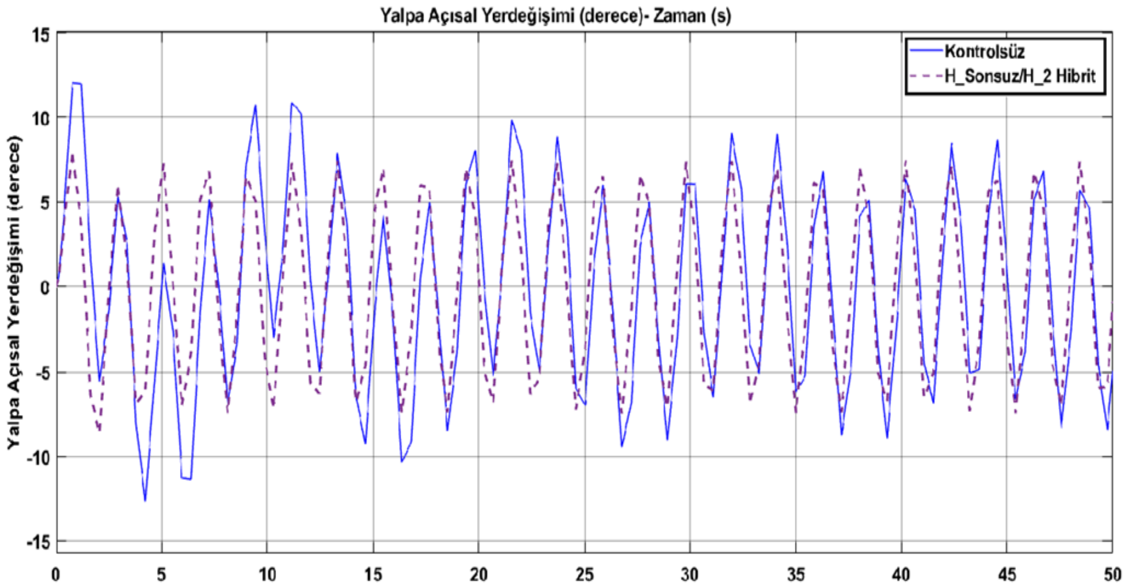
Şekil 5.26 Yalpa açısal yerdeğişimi değerleri-4 deniz durumu-hesap 2



Şekil 5.27 Yalpa açısal yerdeğişimi değerleri-H∞ kontrol-4 deniz durumu-hesap 2



Şekil 5.28 Yalpa açısal yerdeğişimi değerleri-H_2 kontrol -4 deniz durumu-hesap 2



Şekil 5.29 Yalpa açısal yerdeğişimi değerleri-H∞/ H2 hibrit kontrol-4 deniz durumu-hesap 2

Yukarıda paylaşılan görsellerin bir özeti olarak, Tablo 5.8'de 6 deniz durumu için; Tablo 5.9'da ise deniz durumu 4 için elde edlen çıktılar paylaşılmıştır.

Tablo 5.8 Yalpa açısal yerdeğişimi sönüm oranları ve kanat açıları-6 deniz durumu-hesap 2

Kontrolcü	Maksimum Açısal Yerdeğişimi (Derece)	Sönüm Oranı (%)	Ortalama Açısal Yerdeğişimi (RMS) (Derece)	Sönüm Oranı (%)	Maksimum Kanat Açısı (Derece)
Kontrolsüz Durum	12,61	-	6,56	-	-
H∞	0,107	99,1	0,078	98,8	24
H2	0,19	98,5	0,14	97,8	24
H∞/ H2 Hibrit	0,23	98,1	0,17	97,4	24

Tablo 5.8'deki maksimum kanat açıları, kanat boyu 4 m olan kanat tasarımı için elde edilen değerlerdir. Aynı denetleyici yapısı ile 4 deniz durumu için herhangi bir sönümleme elde edilememiştir. Aynı denetleyici yapısı ve 8.5 metre kanat boyu ile

maksimum kanat açısı (24 derece) değerini sağlayarak, 4 deniz durumu için şu oranlarda sönümlemeler sağlanabilmektedir. H∞ kontrolcü için %98 maksimum ve %96,7 ortalama, H2 kontrolcü için %96,3 maksimum ve %94,2 ortalama ve H∞/ H2 hibrit kontrolcü için %95,4 maksimum ve %92,7 ortalama değerlerinde sönümlemeler sağlanmıştır.

Tablo 5.9 Yalpa açısal yerdeğişimi sönüm oranları ve kanat açıları-4 deniz durumu-hesap 2

Kontrolcü	Maximum Açısal Yerdeğişimi (Derece)	Sönüm Oranı (%)	Ortalama Açısal Yerdeğişimi (RMS) (Derece)	Sönüm Oranı (%)	Maksimum Kanat Açısı (Derece)
Kontrolsüz Durum	12,06	-	5,91	-	-
H∞	7,97	34	5,07	14,21	24
H2	7,94	34,1	5,02	15,05	24
H∞/ H2 Hibrit	8	33,66	5,2	12,01	24

Tablo 5.9'daki maksimum kanat açısı değerleri, kanat boyu 4 m olan kanat tasarımı için elde edilmiş değerlerdir. Aynı denetleyici ve aynı kanat boyları (4 m) için maksimum kanat açısı (24 derece) ile, 6 deniz durumundaki yüzde sönüm değerleri şu şekildedir; H∞ için %44,8 maksimum ve %24,16 ortalama, H2 için %46,34 maksimum ve %25,8 ortalama ve H∞/ H2 hibrit için %41,46 maksimum ve %20,76 ortalama.

Yukarıdaki tablolardan da anlaşılacağı gibi deniz durumu 6 için yalpa açısal yerdeğişimi, 4 m kanat boyu ile %90 üzerinde sönümlenmektedir. Deniz durumu 4 için 4 metre kanat boyu ile maksimum değerler %34 oranında, ortalama olarak ise %15 civarında bir sönüm sağlanmaktadır. Aynı kanatlar deniz durumu 6 düşünüldüğünde maksimum değerler için %46, ortalama olarak ise %25 sönüm sağlayabilmektedir. Deniz durumu 6 için tasarlanan denetleyiciler 4 m kanat boyu ile kayda değer bir sönüm sağlayamamaktadır. Fakat aynı denetleyiciler 8,5 m kanat boyları ile son derece iyi (%90 üzerinde) sönüm performansı sağlamaktadır.

Daha önce paylaşılan tablolar incelendiğinde, deniz durumu 4 için yaklaşık aynı sönümleme oranları 1 metre daha kısa kanatlar ile elde edilmiştir. Deniz durumu 6 için ise daha önce paylaşılan (Hesap 1) tablo ile karşılaştırıldığında yaklaşık aynı kanat boyu ile %90 üzerinde sönümleme (Hesap 1'e göre çok daha iyi) sağlanmıştır. C ve D matrislerinin ağırlıklandırılması işlemi ile elde edilen denetleyiciler daha kabiliyetlidir ve daha iyi bir çözüm sunmaktadırlar.

Deniz durumu 4 ve altı ile deniz durumu 5 ve üzeri için iki farklı denetleyici kullanılması çalışmanın bir özeti olarak ortaya çıkmaktadır.

İyi bir sönüm oranı için;

- 4 m kanat boyu ile 6 ve üzerinde (örnek olarak 6 deniz durumu) yukarıdaki herhangi bir denetleyici (en iyisi sönüm sağlanan H∞ olabilir) ile %90 üzerinde bir sönümleme sağlanmaktadır. Bu şartlarda çok iyi bir sönüm elde edilmiştir.
- 4 m kanat boyu ile deniz durumu 5 ve altı (örnek olarak 4 deniz durumu) için çok iyi bir sönüm oranı elde edilememiş olup bunun için farklı çözümlere gidilmelidir. Bu çözümler şunlar olabilir;
    - Deniz durumu 6 için bulunan denetleyiciler ile uzayıp kısalan kanat yapıları kullanılabilir.
    - Sancak ve iskeleye birer tane ek kanat eklenip 8,5 m gibi fazla olan kanat boyu neredeyse 4 m ye kadar düşürülebilir. Kanat yerleşimi ağırlık merkezine göre gemi boyu doğrultusunda simetrik olmalıdır. Bu yerleşim sayesinde geminin yaptığı yunuslama hareketine fazladan bir etkiden kaçınılabilir. Başka bir yerleşim şekli olarak, kanatların tam aksine ağırlık merkezinden uzak mesafelere konularak daha gelişmiş, yunuslama hareket denklemlerini de içeren, bir sistem modelinin kontrol edildiği yapı önerilebilir.
- Operasyonel kavram olarak her an çok iyi bir yalpa açısal yerdeğişimi sönümlemesine ihtiyaç duyulmamaktadır. Sadece özel görevler (helikopter iniş-kalkış, denizde ikmal vb.) icrasında iyi bir yalpa sönümlenmesi ihtiyaç olacağından uzayıp kısalan kanat yapısı kullanılması da önerilebilir. 6 ve üzeri deniz durumlarında tek kademe sabit olan kısım (4m) ve yukarıdaki

%90 üzeri sönüm sağlayan denetleyiciler kullanılabilir. Deniz durumun 5 ve altı için çok iyi sönümleme gerektiren durumlarda, aynı denetleyiciler ile kanatların ikinci kademesi olan uzayıp kısalan yapı (8,5 m kanat boyu) kullanılabilir. Tüm deniz durumları için çok iyi bir yalpa sönümlenmesi ihtiyacı olmaması durumunda yukarıda 4 deniz durumu için bulunan (Hesap-2) denetleyiciler 4 m kanat boyu ile kullanılabilir.

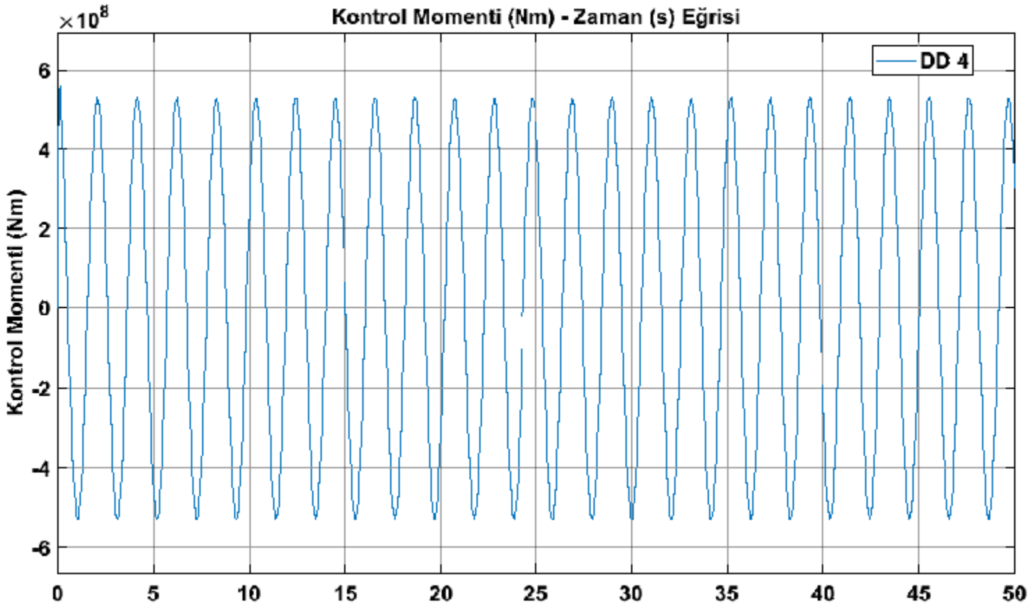
H_∞ denetleyici yapısı sistemin her şartta en kötü durumuna göre cevap veren bir yapıya sahiptir. Yukarıdaki tablolarda bulunan değerler incelendiğinde genellikle H_∞ denetleyicinin diğerlerine göre biraz daha iyi sonuçlar sergilediği görülmektedir. H_∞ denetleyici yapısının, yukarıda önerilen iki farklı kontrol kanatı yapısı için, farklı deniz durumlarına bağlı aşağıdaki açıklanan yapı ile sönüm kabiliyeti denenmiştir ve sonuçları Tablo 5.10'daki gibidir.

- 6 ve üstü deniz durumu için 4 m kanat boyu ile 6 deniz durumu için tasarlanmış (Hesap 2) H_∞ denetleyici yapısı kullanılmıştır.
- 5 ve altı deniz durumu için 8,5 m kanat boyu ile 6 deniz durumu için tasarlanmış (Hesap 2) H_∞ denetleyici yapısı kullanılmıştır.

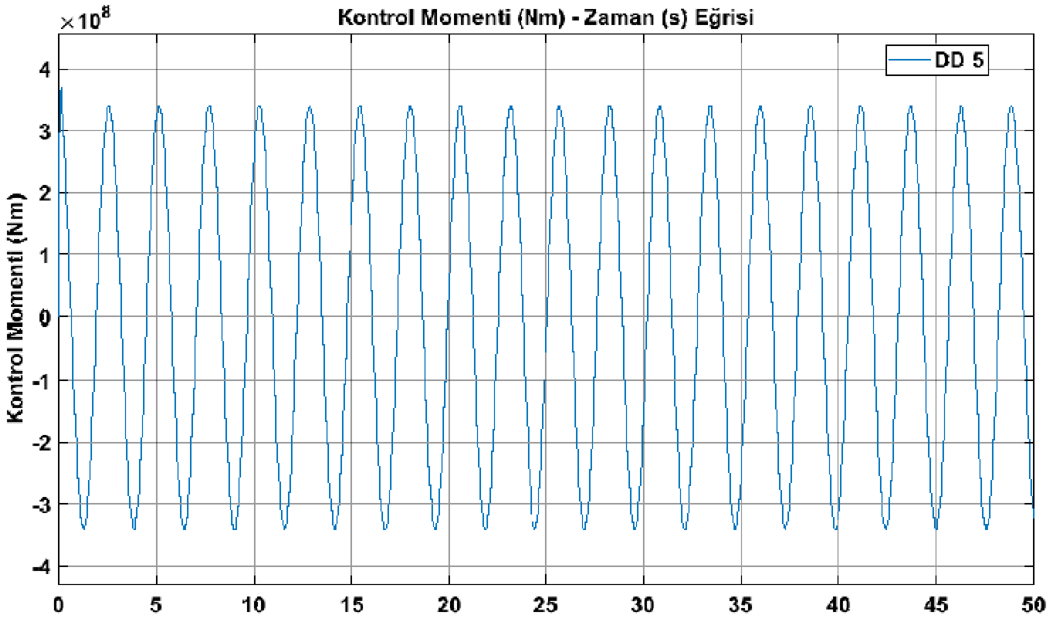
Tablo 5.10 Yalpa açısal yerdeğişimi sönüm oranları ve kanat açıları- tüm deniz durumları

Yalpa Açısal Yerdeğişimi	≤DD4	DD5	DD6	≥DD7
	Kontrolsüz /H_∞	Kontrolsüz /H_∞	Kontrolsüz /H_∞	Kontrolsüz /H_∞
Maximum Yerdeğişim (Derece)	13,66/ 0,27	13,22/ 0,18	12,61/ 0,1	12,12/ 0,09
Sönüm Oranı (%)	98	98	99	99
Ortalama Yerdeğişim (RMS) (Derece)	5.87/ 0,2	6,02/ 0,13	6,3/ 0,078	6,43/ 0,065
Sönüm Oranı (%)	96	97	98	99
Maksimum Kanat Açısı (Derece)	24	15,85	24	20

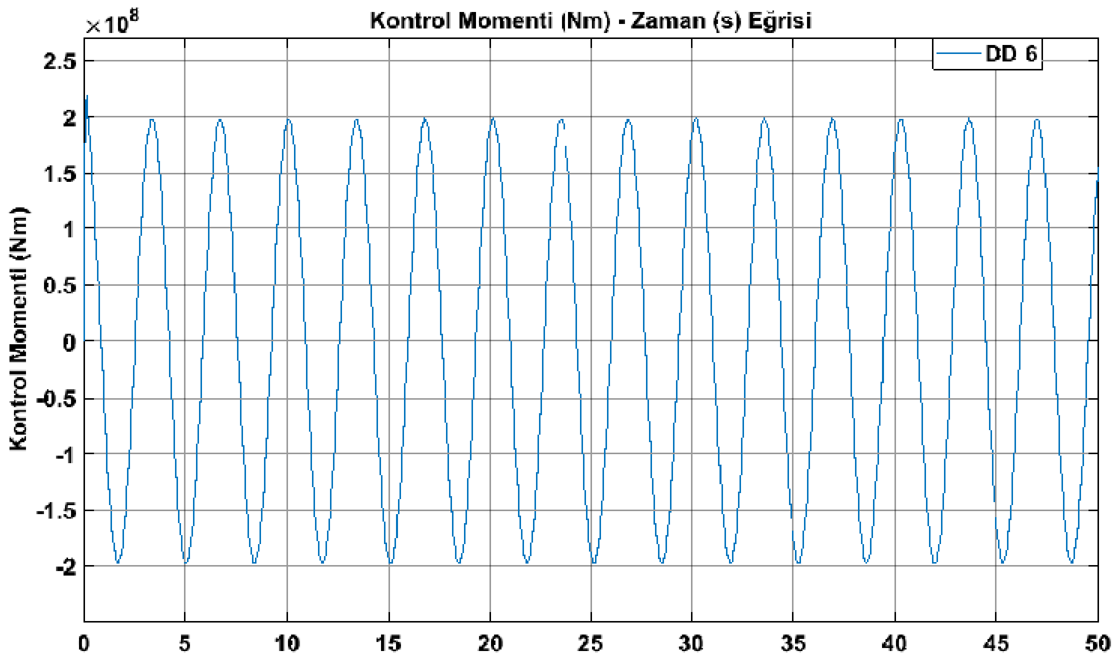
Tablo 5.10'daki sönüm oranlarına karşılık gelen kontrol momentleri Şekil 5.30, Şekil 5.31, Şekil 5.32 ve Şekil 5.33'te verilmiştir. Moment eğrilerinde sırayla deniz durumu 4, 5, 6 ve 7 için olan değerler mevcuttur.



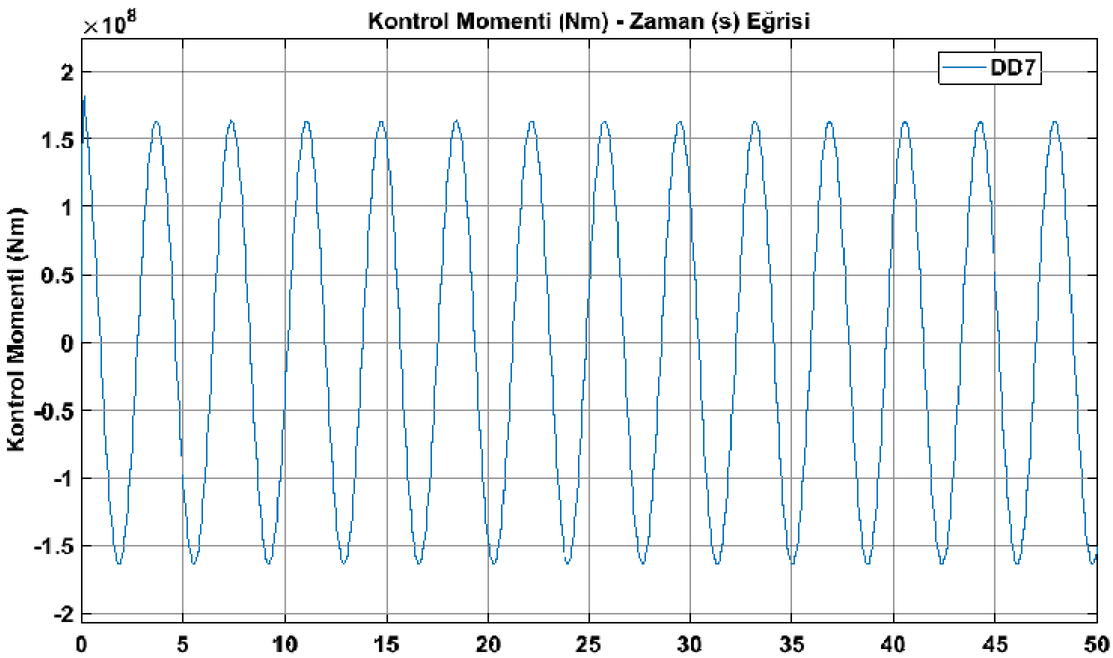
Şekil 5.30 Kontrol momenti (deniz durumu 4)



Şekil 5.31 Kontrol momenti (deniz durumu 5)



Şekil 5.32 Kontrol momenti (deniz durumu 6)



Şekil 5.33 Kontrol momenti (deniz durumu 7)

6
SONUÇ VE ÖNERİLER

Daha önceki bölümlerde gerçekleştirilen çalışmalar, bir Amerikan muhrip gemisi olan DTMB 5415 gemisinin yalpa hareketinin sönümlenmesine yönelik çalışmalar olup, bu çalışmalara ait çıktılar şu şekildedir:

Gemi yalpa hareketine ait matematiksel model, çok sayıda doğrusal olmayan terimler içermektedir. Bu terimler matematiksel modelin belirli bir çalışma, karar noktası etrafında doğrusallaştırılması ile elimine edilmiştir. Bu sayede doğrusal kontrol teorilerinin üzerinde uygulanabileceği bir matematiksel model oluşturulmuştur. Seçilen gemi ileri hızı yüksek bir hız (30 knot) olduğundan bu hızlarda yalpa sönüm katsayılarından doğrusal olan terim baskın durumdadır ve doğrusallaştırmaya uygundur. Matematiksel model için literatüre de bakıldığında yalpa hareketi özelinde çoğunlukla doğrusal olan hali ile kullanıldığı görülmüştür. Bu bakımdan, çalışmada hareketin doğası açısından bakıldığında doğru bir model kullanılmıştır.

Çalışmada çeşitli denetleyicler (DME Tabanlı H_∞ ,H_2, H_∞/ H_2 Hibrit Durum Geri Beslemeli Optimal Denetleyici) kullanılmıştır ve çeşitli denetleyici kazançları (K) elde edilmiştir. Yalpa hareketi açısal yerdeğişimine bakıldığında bazı denetleyici ve kontrol kanatı boyutu seçimleri ile %90 üzerinde sönümlemeler elde edilmiştir.

Kullanılan denetleyici yapılarına bakıldığında H_∞ denetleyici yapısının, verimli, yeterli ve uygun bir denetleyici olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Sistemin tek serbestlik dereceli olması ve H_∞ denetleyici yapısının da sistemin başına gelebilecek en kötü durum özelinde verimli olan bir denetleyici olması sebebiyle, yeterli ve uygun bir denetleyici olduğu görülmüştür. Denetleyici kazancı ve seçilen kanat boyları (iki kademeli açılır-kapanır kanat yapısı için) Tablo 6.1'deki gibidir.

Tablo 6.1 Önerilen denetleyici kazancı ve yalpa sönüm oranları

Deniz Durumu	Denetleyici	Denetleyici Kazancı (K)	Sönüm (%)	Kanat Boy/Açı
≤ 5	H_∞	[1,03e+11 1,3e+10]	Ortalama:96 Maksimum:98	8,5m / 24°
≥ 6			Ortalama:98 Maksimum:99	4m / 24°

Tablo 6.1'den anlaşılacağı gibi, özellikle daha düşük deniz durumları için kanat boyunun uzunluğu, yalpa sönümü açısından önemli bir değişken halini almaktadır. Burada kanat boyunu artıran gerekli kontrol momentinin artmış olması olduğundan, bu momenti daha farklı ve daha kısa kanat yapıları ile elde etmek bir hedef olmalıdır. Aynı kontrol momentini sağlayacak daha kısa kanat yapıları için kademeli kanat yapılarının kullanılması gerekmektedir. Bu yapıların uygulanamadığı durumlarda, uzayıp-kısalan kanat yapılarının kullanılması gerekmektedir. Bu yapılar üretim maliyeti, bakım-onarım zorluğu, karmaşık yapıları nedeniyle yüksek arızalanma olasılıkları sebebiyle tercih edilmeleri düşük olan yapılardır. Bu yüzden, aynı moment değerini sağlayan, sancak ve iskelede birer çift olacak şekilde, çift kanat yapılarının tercih edilmesi gerekir.

Çalışmada bozucu dalgalar, gemiye baş bodoslamadan gelmektedir. Bunun seçilme sebebi, yüksek deniz durumlarında kaptanların dalgaları baş bodoslamadan alacak şekilde seyir almalarıdır. Daha etkili bir kontrol için, dalgaların gemiye geliş açıları çeşitlendirilmeli ve her bir durum için farklı denetleyici kazançları hesaplanmalıdır. Bu kazançların, kaptanın seyir tercihine göre önceliklendirilmesi gerekmektedir.

Gemi ileri hızı olarak tek bir hızda yalpa hareketine ait değişkenler ve kontrol kanatı değişkenleri hesaplanmış olup, bu durum, detaylandırılması ve örneklerin arttırılması gereken bir durumdur. Tüm bu değişkenler farklı hızlar için elde edilmeli ve hıza bağlı olarak bir fonksiyon şeklinde ifadelendirilmelidir. Bu sayede, gemi ileri hızına bağlı olarak matematiksel model sürekli değişecek ve denetleyici kazançları bu değişkeni de içerecek, karşılayacak şekilde hesaplanmış olacaktır. Önceden hesaplanmış olan denetleyici kazançları kümesinden, geminin durumuna

(Geminin dalgayı alış şekli, geminin içinde bulunduğu deniz durumu, gemi ileri hızı vb.) göre en uygun olanının seçimi bir algoritma yardımıyla kolaylıkla sağlanabilir bir durumdur. Bu durumun gerçekleştirilmesi verim açısından literatürdeki örneklerle karşılaştırıldığında çok büyük bir fark yaratacaktır.

Kademeli veya uzayıp-kısalan kanat yapılarının kullanılması halinde her bir kademede açısı veya kanat boyuna denk gelen durum için farklı kaldırma kuvvetleri, kontrol momentleri elde edilebilecektir. Bu durumda önceki maddelerde bahsedilen denetleyici kazancı kümesindeki herbir kazanç için, istenilen sönüm oranına göre bir kontrol momenti elde edilmesi gerekecektir. Bu momenti sağlayacak kanat parametrelerinin seçimi de bir algoritma yardımı ile sağlanabilir. Bu sayede farklı modlarda çalışan bir yalpa sönümleyici sistemin kurulması da sağlanmış olacaktır. Genel seyir, helikopter operasyonları, aktif sonar, denizde ikmal gibi farklı modlar ve bu modlara karşılık gelen farklı sönüm oranları da algoritma yardımı ile sağlanabilecektir.

Gerek sistem durumlarında (yalpa açısal ivmesi ve hızı) meydana gelebilecek ölçüm tutarsızlığı, gerekse bu durumların zaman gecikmeli olarak elde edilmesi açısından dayanıklı kontrol yapısının kullanılması daha verimli bir tercih olacaktır. Deniz durumlarındaki değişimler ve gemi karekteristik katsayılarındaki (özellikle sönüm katsayıları) değişimler beraberinde gemi dinamiğinde öngörülemez farklılıkları da getirmektedir. Ayrıca yalpa sönüm kanatlarındaki hücum açısı değişimi de anlık olarak sağlanamayabilir bir durum olabilmektedir. Tüm bu öngörülemez dinamik değişimlere karşı, dayanıklı kontrol yapısının kullanılması daha verimli bir tercih olacaktır.

Yukarıda bahsedilen önerilerin çok disiplinli bir çalışma gerektirdiği bir gerçektir. Bu nedenle, bu çalışmada bahsi geçen öneriler için çok disiplinli bir çalışma önerilmektedir.

KAYNAKÇA

[1] K. S. Kula, “An Overview of Roll Stabilizers and Systems for Their Control”, TransNav, Int. J. Mar. Navig. Saf. Sea Transp., c. 9, sayı 3, ss. 405–414, 2015, doi: 10.12716/1001.09.03.14.

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

[3] T. I. Fossen, Guidance and Control of Ocean Vehicles, c. 32, sayı 8. Chichester, 1996.

[4] H. Demirel, “Doğrusal Matris Eşitsizliklerine Dayalı Optimal Kontrol Yöntemleriyle Yalpa Hareketinin Denetlenmesi”, Yıldız Teknik Üniversitesi, 2017.

[5] M. Mulk ve J. Falzarano, ‘’Complete six-degrees-of-freedom nonlinear ship rolling motion’’, Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering, 116(4):191-20, 1994.

[6] T. Perez ve M. Blanke, “Mathematical Ship Modeling for Control Applications”, Tech. Univ. Denmark, ss. 1–22, 2002,

[7] M. Taylan, “On the parametric resonance of container ships”, Ocean Eng., c. 34, sayı 7, ss. 1021–1027, 2007, doi: 10.1016/j.oceaneng.2006.04.007.

[8] C. L. Yang, R. C. Zhu, G. P. Miao ve J. Fan, “Numerical simulation of rolling for 3-D ship with forward speed and nonlinear damping analysis”, J. Hydrodyn., c. 25, sayı 1, ss. 148–155, 2013, doi: 10.1016/S1001-6058(13)60348-0.

[9] J. Mawhin ve A. M. Liapunov, “The general problem of the stability of motion (1892)”, Int. J. Control, c. 55, sayı 1892, ss. 1–17, 1992.

[10] M.Dahleh ve G. Verghese, “Lectures on Dynamic Systems and Control”, 2011, MIT Open Courses-Chapter 13.

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

[12] S. Surendran, S. K. Lee ve S. Y. Kim, “Studies on an algorithm to control the roll motion using active fins”, Ocean Eng., c. 34, sayı 3–4, ss. 542–551, 2007, doi: 10.1016/j.oceaneng.2006.01.008.

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

[14] Y. Wang, L. Bai ve S. Liu, “Robust H2/H∞ control of nonlinear system with differential uncertainty”, IEEE Transp. Electrif. Conf. Expo, ITEC Asia-Pacific 2014 - Conf. Proc., ss. 1–6, 2014, doi: 10.1109/ITEC-AP.2014.6940618.

[15] L. Yu, C. Che, J. Guo ve H. Wang, “The design of H∞ mixed sensitivity controller for fin/tank roll stabilizer”, Chinese Control Conf. CCC, c. 2016-August, ss. 2929–2933, 2016, doi: 10.1109/ChiCC.2016.7553808.

[16] H. Demirel ve F. Alarçin, “LMI - based H2 and H∞ state - Feedback controller design for fin stabilizer of nonlinear roll motion of a fishing boat”, Brodogradnja, c. 67, sayı 4, ss. 91–107, 2016, doi: 10.21278/brod67407.

[17] F. Alarçin, “Internal model control using neural network for ship roll stabilization”, J. Mar. Sci. Technol., c. 15, sayı 2, ss. 141–147, 2007.

[18] T. Perez ve M. Blanke, “Ship roll damping control”, Annu. Rev. Control, c. 36, sayı 1, ss. 129–147, 2012, doi: 10.1016/j.arcontrol.2012.03.010.

[19] N. C. Townsend ve R. A. Shenoi, “Control strategies for marine gyrostabilizers”, IEEE J. Ocean. Eng., c. 39, sayı 2, ss. 243–255, 2014, doi: 10.1109/JOE.2013.2254591.

[20] T. Perez ve P. D. Steinmann, “Analysis of ship roll gyrostabiliser control”, c. 42, sayı 18. IFAC, 2009.

[21] K. Kula, “Cascade control system of fin stabilizers”, 2014 19th Int. Conf. Methods Model. Autom. Robot. MMAR 2014, sayı 2, ss. 868–873, 2014, doi: 10.1109/MMAR.2014.6957471.

[22] T. Yılmaz(editör), “Gemi Mühendisliği El Kitabı”. Gemi Mühendisleri Odası Yayınları, İstanbul, 2008.

[23] W. Guan ve X. K. Zhang, “Concise robust fin roll stabilizer design based on integrator backstepping and CGSA”, ISSCAA2010 - 3rd Int. Symp. Syst. Control Aeronaut. Astronaut., ss.1392–1397, 2010,

doi: 10.1109/ISSCAA.2010.5632500.

[24] M. Taylan, “The effect of nonlinear damping and restoring in ship rolling”, Ocean Eng., c. 27, sayı 9, ss. 921–932, 2000, doi: 10.1016/S0029-8018(99)00026-8.

[25] M. K. Gokce ve O. K. Kinaci, “Numerical simulations of free roll decay of DTMB 5415”, Ocean Eng., c. 159, sayı February 2017, ss. 539–551, 2018, doi: 10.1016/j.oceaneng.2017.12.067.

[26] T. Sabuncu, Gemi Hereketleri, 1524. baskı. İstanbul: İstanbul Teknik Üniversitesi, 1993.

[27] S. Wassermann, D. F. Feder ve M. Abdel-Maksoud, “Estimation of ship roll damping - A comparison of the decay and the harmonic excited roll motion technique for a post panamax container ship”, Ocean Eng., c. 120, ss. 371–382, 2016, doi: 10.1016/j.oceaneng.2016.02.009.

[28] Philip L- F Liu, The Dynamics Of Marine Crafts, 22. baskı. Washington DC, USA: World Scientific, 2004.

[29] T. Katayama, “Numerical Estimation of Roll Damping”, ITTC - Recomm. Proced., ss. 1–33, 2011.

[30] Y. Himeno, “Prediction of Ship Roll Damping – State of The Art”. Report of Department of Naval Architecture & Marine Engineering, University of Michigan (239), 1981.

[31] S. Mancini, E. Begovic, A. H. Day ve A. Incecik, “Verification and validation of numerical modelling of DTMB 5415 roll decay”, Ocean Eng., c. 162, sayı May, ss. 209–223, 2018, doi: 10.1016/j.oceaneng.2018.05.031.

[32] S. Mancini, E. Begovic, D. Pizzirusso ve S. Day, “Roll damping assessment of intact and damaged ship by CFD and EFD methods”, Proc. 12th Int. Conf. Stab. Ships Ocean Veh., sayı June, 2015.

[33] Ö. F. Sukas, Ö. K. Kınacı, Ş. Bal, Ö. F. Sukas, Ö. K. Kınacı ve Ş. Bal, “Gemilerin Manevra Performans Tahminleri için Genel Bir Değerlendirme -I A Review on Prediction of Ship Manoeuvring Performance , Part 1”, sayı December, ss. 37–75, 2017.

[34] D. Madrid ve S. D. I. Navales, “On Ship Roll Damping : Analysis and Contributions on Experimental Techniques M . Sc . in Naval Architecture Ph.D . Thesis”.

[35] IMO, “Interim Guidelines For Alternetive Assessment Of The Weather Criterion”. International Maritime Organization (IMO), London, 2006.

[36] Wolfson Unit, “Intact Stability Severe Wind and Rolling Criterion -An Equivalent Standard”, Maritime & Coastguard Agency, 2007.

[37] B. B. Yalçın Yüksel, E. Çevik, B. Aydoğan, A. Arı, K. E. Saraçoğlu, R. Alpli, “Türkiye Denizleri Dalga İklim Modeli ve Uzun Dönem Dalga İklim Analizi Modelling of Wave Climate and Long Term Wave Analyses for Turkish Coasts”, 7. Kıyı Mühendisliği Sempozyumu, ss. 411–420, 2011.

[38] B. John S., “Fundamentals of Linear State Space Systems”. The McGraw-Hill Companies, Inc., USA, 1999.

[39] H. Yazici ve R. Güçlü, “Active vibration control of seismic excited structural system using LMI-based mixed H2/H∞ state feedback controller”, Turkish J. Electr. Eng. Comput. Sci., c. 19, sayı 6, ss. 839–849, 2011, doi: 10.3906/elk-1007-592.

[40] K. Nonami ve S. Sivrioglu, “Active vibration control using LMI-based mixed H2/H∞ state and output feedback control with nonlinearity”, Proc. IEEE Conf. Decis. Control, c. 1, sayı January 1997, 1996, doi: 10.1109/CDC.1996.574282.

A
MATLAB-SİMÜLİNK KODLARI

Kontrolcü Hesabında Kullanılan Matlab-Simülink Kodları

```
clear all
clc
%1-Katsayilarin Hesaplanmasi
%1.2 Kütlesel Atalet Ifadesi
g=9.81;  %yer çekimi ivmesi(m/s^2)
delta=8635000*g;  % deplasman(N)
B_s=19.082; %gemi genislik(m)
kxx=6.932;  %Jirasyon yaricapi (m)
KG=7.555; %gemi agirlik merkezi düsey konumu (m)
%1.2.1- Kütlesel Atalet Ifadesi
Ix=(1/g)*delta*kxx^2;
Jx=Ix*0.2;
Ixx=Ix*1.2;
%1.3 Dogrultucu Moment Ifadesi
GM=1.938;      %(metre)
fi_v=1.42;   %(radyan)
A_fi_v=0.912;      %(radyan.m)
G1=GM;
G3=(4/(fi_v)^4)*(3*(A_fi_v)-GM*(fi_v)^2);
G5=-(3/(fi_v)^6)*(4*(A_fi_v)-GM*(fi_v)^2);
m1=G1/Ixx;
m3=G3/Ixx;
m5=G5/Ixx;
%2-Bozucu Dalga Ifadesi
%2.1-Deniz Durumu ve Dalga Yuksekligi Ifadesi
Deniz_Durumu=input ('Lütfen Istediginiz Deniz Durumunu Giriniz:')
```

```
if (Deniz_Durumu<=4)
H=2;%2m dalga yükseklıgi
elseif (Deniz_Durumu==5)
H=3;%3m dalga yükseklıgi
elseif (Deniz_Durumu==6)
H=5;%5m dalga yükseklıgi
Else
Deniz_Durumu=7;
H=6;%6m dalga yükseklıgi
End
%2.2-Dalga Yuksekligi ve Dalga Periyodu
%2.2.1-Karadeniz
Tk=4.513*H^0.3235;
%2.2.2-Akdeniz
Ta=4.473*H^0.3371;
%2.2.2-Ortalama Periyod
T=(Tk+Ta)/2;   % ortalama dalga periyodu(s)
%2.3-Dalga Frekansi
omega_w=(2*pi)/T;   %dalga frekansi(rad/s)
%2.4-Karsilama Frekansi
V=15.31;   %gemi hizi (m/s)
g=9.81;      %yer çekimi ivmesi (m/s^2)
X_e=input('Lütfen Karsilama Acisini Giriniz:');   %karsilama acisi (derece)
omega_e=omega_w-(((omega_w)^2)/g)*V*cos(X_e);
%2.5-Dalga Boyu
lamda_d=H*20;   %dalga boyu (m),Derin su yaklasimi
%2.6-Maksimum Dalga Egimi
alfa_max=(H*pi)/lamda_d;   %maksimum dalga eğimi
%2.7-Dalga Momenti Genligi
lamda_e=0.8333;   %boyutsuz atalet kuvveti=Ix/(Ix+Jx);
amp=lamda_e*alfa_max*(omega_e)^2;   %dalga momenti genliği
%2.8-Dalga Momenti Genligi-2
```

```
KG=7.555;   %gemi agirlik merkezi düsey konumu (m)
T=6.150;   %draft(m)
OG=KG-T;   %agirlik merkezi ile su hatti arasi mesefe
r=0.73+(0.6*(OG/T));   %etkin dalga egimi katsayisi
S=H/lamda_d;   %dalga dikligi(wave steepness)
amp2=r*pi*S*delta*GM/Ixx;   %dalga momenti genligi-2
%3.4 Yalpa Sonumu Ifadesi
%3.4.1 Yalpa Sonumu Ifadesi-Roll Decay
wnm=3.8745;  %Modele ait dogal frekans
a=0.2428;      %Yalpa Azalim Egrisi Katsayileri:a,b,c
b=0.0216;
c=-0.0019;
%3.4.1.1 Yalpa Sonumu Ifadesi-Model
alfa_m=(a*(wnm))/pi;
beta_m=(3/4)*b*(180/pi)
gama_m=(8/(3*pi))*(1/wnm)*c*(180/pi)^2;
%3.4.1.2 Yalpa Sonumu Ifadesi-Gemi
lamda=46.588;         %benzerlik orani(model olcegi)
wns=wnm/((lamda)^0.5);
alfa_s=alfa_m/((lamda)^0.5);
beta_s=beta_m;
gama_s=gama_m*((lamda)^0.5);
bL=2*alfa_s;
bN1=beta_s;
bN2=gama_s;
%3.5 Kontrol Kanati Degiskenleri
Lf=input('Lütfen Kanat Boyunu Giriniz:')
Af=8.224*Lf;   %kanat yüzey alan? (m^2)
If=9.078+(Lf)/2;   %kanat basinc merkezi ile gemi agirlik merkezi arasi
    mesafe(m)
g_su=1025;   %su yogunlugu (kg/m^3)
b1=g_su*(V^2)*Af*0.1035*If;
```

```
b2=g_su*(V)*Af*0.1035*(If)^2;
c1=b1/Ixx;
c2=b2/Ixx;
%4-Matrislerin Olusturulmasi-Linnerlestirme
%4.1-Matrislerin Olusturulmasi-Kontrolsuz Durum
A= [0, 1;-delta*m1,-(bL)];
B= [ 0; delta*m1];
C= [1,0];
D= [0];
%4.2-Matrislerin Olusturulmasi-Kontrollu Durum
A1= [0, 1; -(delta*m1),-(bL+c2)];
B1= [0; delta*m1];
B2=[ 0; -1/Ixx];
C1=[0.909,0; 0,10]
D11=[0; 0];
D12=[0;1];
C2=C1;
D22=D12;
%5-Kontrolcu Tasarimi
%5.1 Matris Buyutlarinin Belirlenmesi
[n,n]=size(A1);
[n,m]=size(B1);
[n,m]=size(B2);
[n,n]=size(C1);
[n,m]=size(D11);
[n,m]=size(D12);
[n,n]=size(C2);
[n,m]=size(D22);
I1=eye(1,1)
I2=eye(2,2)
%5.2 Yari Tanimli Programlama Algoritmasi
```

```
M=sdpvar(m,n,'full');   %SDP(Semi Defined   Programing)(Yari Tanimli Programlama)
X=sdpvar(n,n);
nn=sdpvar(1,1);
gammas=sdpvar(1,1);
Q=sdpvar(n,n);
%DME(LMI)(Dogrusal Matris Esitsizlikleri)
DME1=[A1*X+X*A1'+B2*M+M'*B2',B1,X*C1'+M'*D12'; B1',gammas*I1,D11'; C1*X+D12*M,D11,-gammas*I2]<0;
DME2=[Q,C2*X+D22*M; (C2*X+D22*M)',X]>0;
DME3=trace(Q)<nn
DME4=[A1*X+X*A1'+B2*M+M'*B2'+B1*B1']<0;
%Diger Kisitlar
F1=nn>0;
F2=X>0;
F3=gammas>0;
%5.2.1 H_inf Kontrolcu
Fset_i=[DME1,F2,F3];
solution_i=optimize(Fset_i);
checkset(Fset_i);
X_i=value(X);
M_i=value(M);
gammas_i=value(gammas);
K_i=M_i*inv(X_i);
%5.2.2 H_2 Kontrolcu
Fset_2=[DME2,DME3,DME4,F1,F2];
solution_2=optimize(Fset_2);
checkset(Fset_2);
X_2=value(X);
M_2=value(M);
gammas_2=value(gammas);
K_2=M_2*inv(X_2);
```

```
%5.2.3 H_inf/H_2 Hibrit Kontrolcu
Fset_h=[DME1,DME2,DME3,F1,F2,F3];
solution_h=optimize(Fset_h);
checkset(Fset_h);
X_h=value(X);
M_h=value(M);
gammas_h=value(gammas);
K_h=M_h*inv(X_h);
%6-Bode Diyagrami Cizimi
%6.1-Kontrolsuz Durum
BB=[0;1];  %yardimci matris
DD=[0];  %yardimci matris
[num,den]=ss2tf(A,BB,C,DD);
G=tf(num,den);  %transfer fonksiyonu
s=tf('s');  % Laplace değişkeni
bode(G);  % Bode çizgesi
grid;
hold  on;
%6.2-H_Sonsuz Kontrollu Durum
Acl_i=A1+B2*K_io;
C1_i=[1,0];  %yardimci matris
D11_i=[0];  %yardimci matris
Ccl_i=C1_i+D11_i*K_io;
[numi,deni]=ss2tf(Acl_i,BB,Ccl_i,D11_i);
Gi=tf(numi,deni);     %transfer fonksiyonu
s=tf('s');  % Laplace değişkeni
bode(Gi);% Bode çizgesi
grid;
hold on;
%6.3-H_2 Kontrollu Durum
Acl_2=A1+B2*K_2o;
C1_2=[1,0];  %yardimci matris
```

```
D11_2=[0];   %yardimci matris
Ccl_2=C1_2+D11_2*K_2o;
[num2,den2]=ss2tf(Acl_2,BB,Ccl_2,D11_2);
G2=tf(num2,den2);      %transfer fonksiyonu
s=tf('s');   % Laplace değişkeni
bode(G2);%   Bode çizgesi
grid;
hold  on;
%6.4-H_Sonsuz/H_2 Hibrit Kontrollu Durum
Acl_h=A1+B2*K_ho;
C1_h=[1,0];   %yardimci matris
D11_h=[0];   %yardimci matris
Ccl_h=C1_h+D11_h*K_ho;
[numh,denh]=ss2tf(Acl_h,BB,Ccl_h,D11_h);
Gh=tf(numh,denh);      %transfer fonksiyonu
s=tf('s');   % Laplace değişkeni
bode(Gh);% Bode çizgesi
grid;
hold  on;
```

TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR

İletişim Bilgisi: mstftsknnn@gmail.com.tr

Konferans Bildirileri

1. M. Taskin, R. Guclu and A. O. Ahan, "H∞ Optimal Control of DTMB 5415 Combatant Roll Motion with Active Fins," 2020 4th International Symposium on Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies (ISMSIT), Istanbul, Turkey, 2020, pp. 1-5, doi: 10.1109/ISMSIT50672.2020.9254683.