

**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**GEMİ HAREKETLERİNİN DİNAMİK ANALİZİ VE  
ADAPTİF YAKLAŞIMLARLA KONTROLÜ**

Makina Yük. Müh. Fuat ALARÇIN

**FBE Makine Anabilim Dalı Konstrüksiyon Programında  
Hazırlanan**

**DOKTORA TEZİ**

**Tez Savunma Tarihi** : 02/12/2005  
**Tez Danışmanı** : Doç. Dr. İsmail YÜKSEK  
**Jüri Üyeleri** : Prof. Dr. Faris KAYA  
: Prof. Dr. Ahmet Dursun ALKAN  
: Doç. Dr. Selim Sivrioğlu  
: Doç. Dr. Arif Adlı

**İSTANBUL, 2005**

**İÇİNDEKİLER**

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ .....	vi
KISALTIMA LİSTESİ .....	viii
ŞEKİL LİSTESİ .....	viii
ÇİZELGE LİSTESİ .....	xi
ÖNSÖZ .....	xiii
ÖZET .....	xiii
ABSTRACT .....	xiii
1 GİRİŞ .....	1
1.1 Önceki Çalışmalar .....	2
1.2 Tezin Amacı .....	11
2 GEMİ DİNAMİĞİ .....	12
2.1 Gemi Hareket Notasyonları .....	12
2.2 Newton-Euler Yöntemi ile Rijid Gemi Hareket Denklemlerinin Elde Edilmesi ..	14
2.2.1 Kütle Merkezine Göre Öteleme Hareket Denklemlerinin Elde Edilmesi .....	15
2.2.2 Kütle Merkezine Göre Dönme Hareket Denklemlerinin Elde Edilmesi .....	16
2.3 Hidrodinamik Kuvvet ve Momentler .....	21
2.3.1 Ek Kütle Ataletinin Gemi Hareketine Etkisi .....	22
2.3.2 Sönüm Kuvvet ve Momentleri .....	25
2.3.3 Doğrultucu Kuvvet ve Momentleri .....	25
2.4 Dalga Kuvvet ve Momentleri .....	27
2.5 Hidrodinamik ve Çevre Etkilerinin İlave Edildiği Nonlineer Gemi Hareketleri ..	30
2.6 Konteyner Gemisi Hareket Analizi .....	33
2.6.1 Konteyner Gemi Manevra Hareketi .....	38
3 GEMİLERDE OTOPİLOT KONTROL SİSTEMLERİ VE UYGULAMALARI	42
3.1 Bir Serbestlik Dereceli Konteyner Gemi Savrulma Hareketi .....	43
3.2 Bir Serbestlik Dereceli Konteyner Gemi Savrulma Hareketi Kontrolü .....	46
3.2.1 Bir Serbestlik Dereceli Konteyner Gemi Savrulma hareketi Klasik Kontrolü .....	46
3.2.2 Bir Serbestlik Dereceli Konteyner Gemi Savrulma Hareketi LQR Kontrolü .....	51
3.2.3 Bir Serbestlik Dereceli Konteyner Gemi Savrulma Hareketi MRAK Kontrolü ...	54
3.2.4 Bir Serbestlik Dereceli Konteyner Gemi Savrulma Hareketi BM ile Kontrolü ....	60
3.3 Üç Serbestlik Dereceli Konteyner Gemi Savrulma Hareketi .....	66
3.3.1 Üç Serbestlik Dereceli Konteyner Gemi Savrulma Hareketi PD Kontrolü .....	67
3.3.2 Üç Serbestlik Dereceli Konteyner Gemi Savrulma Hareketi LQR Kontrolü .....	70
3.3.3 Üç Serbestlik Dereceli Konteyner Gemi Savrulma Hareketi MRAK Kontrolü .....	72
3.3.4 Üç Serbestlik Dereceli Konteyner Gemi Savrulma Hareketi BM Kontrolü .....	74

4	YALPA DENGELEME SİSTEMLERİ VE KONTROLÜ .....	77
4.1	Yalpa Dengeleme Sistemlerinin Çalışma Prensipleri.....	77
4.2	Yalpa Kanat Geometrisi .....	79
4.2.1	Kanat Yüzeyinde Oluşan Kuvvet ve Momentler.....	82
4.3	Bir Serbestlik Dereceli Konteyner Gemisi Yalpa Hareketi .....	84
4.4	Konteyner Gemisinde Yalpa Hareketi Kontrolcü Tasarımı .....	88
4.4.1	Bir Serbestlik Dereceli Konteyner Gemisi Yalpa Hareketinde PID Kontrolü .....	89
4.4.2	Bir Serbestlik Dereceli Konteyner Gemisi Yalpa Hareketinin LQR Kontrolü .....	92
4.4.3	Bir Serbestlik Dereceli Konteyner Gemisi Yalpa Hareketinde MRAK Kontrolü .....	95
4.4.4	Bir Serbestlik Dereceli Konteyner Gemisi Yalpa Hareketinde BM Kontrolü .....	99
4.5	Üç Serbestlik Dereceli Konteyner Gemisi Yalpa Hareketi .....	104
4.5.1	Üç Serbestlik Dereceli Konteyner Gemisi Yalpa Hareketinin PID Kontrolü .....	107
4.5.2	Üç Serbestlik Dereceli Konteyner Gemisi Yalpa Hareketinde LQR Kontrolü .....	110
4.5.3	Üç Serbestlik Dereceli Konteyner Gemisi Yalpa Hareketinde MRAK Kontrolü .....	113
4.5.4	Üç Serbestlik Dereceli Konteyner Gemisi Yalpa Hareketinde BM Kontrolü.....	116
5	SAVRULMA VE YALPA HAREKETİNİN DÜMEN VE YALPA DENGELEME SİSTEMLERİ KULLANILARAK KONTROLÜ.....	119
5.1	Savrulma ve Yalpa Birleşik Hareketin Dinamiği .....	121
5.2	Konteyner Gemi Savrulma ve Yalpa Hareketlerinin Dahili Model Kontrol Metodu ile Kontrolü.....	124
5.3	Konteyner Gemi Savrulma ve Yalpa Hareketlerinin Bulanık Dahili Model ile Kontrolü.....	129
6	SONUÇLAR.....	136
	KAYNAKLAR.....	141
	EKLER .....	146
	Ek 1 .....	147
	Ek 2 .....	151
	Ek 3 .....	152
	Ek 4 .....	153
	Ek 5 .....	156
	Ek 6 .....	158
	Ek 7 .....	161

Ek 8.....	162
Ek 9.....	164
Ek 10.....	167
Ek 11 .....	168
Ek 12 .....	168
ÖZGEÇMİŞ.....	169

**SİMGE LİSTESİ**

$x$	İlerleme miktarı
$y$	Yan öteleme miktarı
$z$	Dalıp çıkma miktarı
$\phi$	Yalpa açısı
$\theta$	Baş-kıç vurma açısı
$\psi$	Savrulma açısı
$u$	İlerleme hızı
$v$	Yan öteleme hızı
$w$	Dalıp çıkma hızı
$p$	Yalpalama açısal hızı
$q$	Baş-kıç vurma açısal hızı
$r$	Savrulma açısal hızı
$XYZ$	Yere sabitlenmiş referans eksen
$X_0Y_0Z_0$	Gemi gövdesine sabitlenmiş referans eksen
$\omega$	Açısal hız
$r_G$	Ağırlık merkezi koordinatları
$v$	Genel hız ifadesi
$h_0$	Genel açısal momentum ifadesi
$\rho$	Yoğunluk
$m$	Kütle
$I_x, I_y, I_z$	$X_0, Y_0$ ve $Z_0$ eksenlerindeki atalet momentleri
$I_c$	Atalet tensörü
$C(v)$	Coriolis vektörü
$M_{RG}$	Rijid gövde atalet matrisi
$\tau_H$	Hidrodinamik kuvvetler
$M_A$	Ek su kütlesi
$D(v)$	Sönüm kuvvet etkisi
$G(v)$	Doğrultucu kuvvetler
$D_s(v)$	Yüzey sürtünmesi
$D_d(v)$	Dalga sürüklenme sönümü
$D_v(v)$	Vortex sönümü
$T_A$	Akışkan kinetik enerji
$r_B$	Su altı hacim merkezi koordinatları
$g$	Yerçekimi ivmesi
$GM_T$	Geminin boyuna metasantr yüksekliği
$GM_L$	Geminin enine metasantr yüksekliği
$A$	Su düzlemi yüzey alanı
$\nabla$	Yer değiştiren su hacmi
$\zeta$	Dalga genliği
$H$	Dalga yüksekliği
$H_{1/3}$	Karakteristik dalga yüksekliği
$\lambda$	Dalga uzunluğu

$k_i$	Dalga sayısı
$\omega_i$	Dalga frekansı
$S(\omega)$	Dalga dağılımı
$T$	Dalga periyodu
$V_r$	19,4 m. Yüksekliğindeki rüzgâr hızı
$H_s$	Dalga yüksekliği ile rüzgâr ilişkisi
$A, B$	ITTC dalga dağılım katsayıları
$K_\omega$	Dalga şiddetine bağlı katsayı
$\xi$	Sönüm sabiti
$\omega_e$	Karşılaşma frekansı
$t$	Zaman boyutu
$s$	Frekans boyutu
$L_{OA}$	Gemi başı ile kıç arası uzunluk
$B$	Gemi maksimum kalıp genişliği
$\delta$	Dümen sapması
$\alpha$	Yalpa kanat sapması
$J$	Performans kriteri
$Q, R$	Optimal kontrol kazançları
$\frac{\partial e}{\partial \theta}$	Duyarlılık parametresi
$e$	Hata miktarı
$t_0, s_0$	Adaptif düzenleyici parametreleri
$V$	Lyapunov fonksiyonu
$\dot{V}(t)$	Lyapunov fonksiyonunun zamana bağlı türevi
$\mu_A$	Üyelik fonksiyonu
$C_R$	Kanat kök giriş uzunluğu
$C_T$	Kanat uç giriş uzunluğu
$s_p$	Kanat ortalama açıklığı
$\bar{C}$	Ortalama giriş uzunluğu
$A_k$	Yalpa kanat alanı
$W$	Gemi ağırlığı
$C$	Kontrolcü
$Q$	Kontrol edilen transfer fonksiyonu
$F$	Filtre fonksiyonu

Not: Tüm değerler **SI** birimlerindedir. Sembollerde ITTC **1990** Konferansında önerilen standartlar referans alınmıştır.

### KISALTMA LİSTESİ

PM	Pierson Moskowitz
SNAME	The Society of Naval Architects and Marine Engineers
PID	Proportional-Integrative-Derivative
LQR	Lineer Quadratik Regülatör
MRAK	Model Referans Adaptif Kontrol
BMK	Bulanık Mantık Kontrol
MIT	Massachusetts Institute of Technology
DMK	Dahili Model Kontrol
IMO	International Maritime Organisation

## ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1 Gövdeye ve yere göre sabitlenmiş referans eksen takımı .....	13
--	----

Şekil 2.2 Yere sabitlenmiş referans dönme eksenini ( $X_1Y_1Z_1$ ) ve gövdeye sabitlenmiş referans dönme eksenine ( $X_0Y_0Z_0$ ) göre gemi modeli .....	14
Şekil 2.3 Potansiyel sönüm etkilerinin gösterimi .....	21
Şekil 2.4 Yalpa hareketinde kuvvetler .....	26
Şekil 2.5 Sinüzoidal dalga fonksiyonu .....	27
Şekil 2.6 PM dağılım fonksiyonu, (1 knots = 0.51 m/s) .....	28
Şekil 2.7 Konteyner gemisi .....	33
Şekil 2.8 Yalpa hareketinde geometrik gösterim .....	35
Şekil 2.9 Yan öteleme hareketi kök yeri diyagramı .....	37
Şekil 2.10 Yalpa hareketi kök yeri diyagramı .....	37
Şekil 2.11 Savrulma hareketi kök yeri diyagramı .....	37
Şekil 2.12 Dümen açısı değişimi .....	38
Şekil 2.13 Konteyner gemisi konum değişimi .....	38
Şekil 2.14 Seyir hızındaki değişim .....	39
Şekil 2.15 Yan öteleme hızındaki değişim .....	39
Şekil 2.16 Savrulma açısı değişimi .....	40
Şekil 2.17 Savrulma hızı değişimi .....	40
Şekil 2.18 Yalpa açısı değişimi .....	40
Şekil 2.19 Yalpa hızı değişimi .....	41
Şekil 3.1 Savrulma ve yalpa dengeleme sistemi blok diyagramı .....	42
Şekil 3.2 Gemi hareket gösterimi .....	44
Şekil 3.3 Nomoto modeli blok diyagramı .....	44
Şekil 3.4 Kapalı çevrim Nomoto modeli blok diyagramı .....	45
Şekil 3.5 Savrulma hareketi PID kontrol blok diyagramı .....	47
Şekil 3.6 Klasik kontrollü konteyner gemi savrulma açısı mukayesesi .....	49
Şekil 3.7 Klasik kontrollü konteyner gemi savrulma hız mukayesesi .....	49
Şekil 3.8 PD kontrollü konteyner gemi savrulma kontrol işareti .....	49
Şekil 3.9 Optimal geri besleme blok diyagramı .....	51
Şekil 3.10 LQR ile bir serbestlik dereceli konteyner gemi savrulma açısı mukayesesi .....	52
Şekil 3.11 LQR ile bir serbestlik dereceli konteyner gemi savrulma hız mukayesesi .....	52
Şekil 3.12 LQR ile bir serbestlik dereceli konteyner gemi savrulma faz mukayesesi .....	53
Şekil 3.13 LQR kontrollü konteyner gemi savrulma kontrol işareti .....	53
Şekil 3.14 Model referans adaptif kontrol blok şeması .....	55
Şekil 3.15 MIT kuralı uygulanmış savrulma açısı MRAK blok diyagramı .....	58
Şekil 3.16 MRAK ile bir serbestlik dereceli konteyner gemi savrulma açısı mukayesesi .....	58
Şekil 3.17 MRAK ile bir serbestlik dereceli konteyner gemi savrulma hız mukayesesi .....	58
Şekil 3.18 MRAK ile bir serbestlik dereceli konteyner gemi savrulma faz mukayesesi .....	59
Şekil 3.19 MRAK kontrollü konteyner gemi savrulma kontrol işareti .....	59
Şekil 3.20 Bulanık mantık kontrolcüsü temel elemanları .....	60
Şekil 3.21 Üçgen üyelik fonksiyonu .....	61
Şekil 3.22 Gemi savrulma hareketi bulanık mantık blok diyagramı .....	62
Şekil 3.23 Kontrol giriş ve çıkış değerlerinin üyelik fonksiyonları .....	62
Şekil 3.24 BM ile bir serbestlik dereceli konteyner gemi savrulma açısı mukayesesi .....	63
Şekil 3.25 BM ile bir serbestlik dereceli konteyner gemi savrulma hız mukayesesi .....	64
Şekil 3.26 BM ile bir serbestlik dereceli konteyner gemi savrulma faz mukayesesi .....	64
Şekil 3.27 BM kontrollü konteyner gemi savrulma kontrol işareti .....	64
Şekil 3.28 PD kontrol ile üç serbestlik dereceli konteyner gemi savrulma açısı mukayesesi .....	68
Şekil 3.29 PD ile üç serbestlik dereceli konteyner gemi savrulma hız mukayesesi .....	68

Şekil 3.30 PD kontrollü konteyner gemi savrulma kontrol işareti .....	69
Şekil 3.31 Üç serbestlik dereceli konteyner gemi yalpa açısı değişimi .....	69
Şekil 3.32 LQR ile üç serbestlik dereceli konteyner gemi savrulma açısı mukayesesi .....	70
Şekil 3.33 LQR ile üç serbestlik dereceli konteyner gemi savrulma hız mukayesesi .....	70
Şekil 3.34 LQR kontrollü konteyner gemi savrulma kontrol işareti .....	71
Şekil 3.35 Üç serbestlik dereceli konteyner gemi yalpa açısı mukayesesi .....	71
Şekil 3.36 MRAK ile üç serbestlik dereceli konteyner gemi savrulma açısı mukayesesi .....	72
Şekil 3.37 MRAK ile üç serbestlik dereceli konteyner gemi savrulma hız mukayesesi .....	72
Şekil 3.38 MRAK kontrollü konteyner gemi savrulma kontrol işareti .....	73
Şekil 3.39 Üç serbestlik dereceli konteyner gemi yalpa açısı mukayesesi .....	73
Şekil 3.40 BMK ile üç serbestlik dereceli konteyner gemi savrulma açısı mukayesesi .....	74
Şekil 3.41 BMK ile üç serbestlik dereceli konteyner gemi savrulma hız mukayesesi .....	74
Şekil 3.42 BM kontrollü konteyner gemi savrulma kontrol işareti .....	75
Şekil 3.43 Üç serbestlik dereceli konteyner gemi yalpa açısı mukayesesi .....	75
Şekil 3.44 Kontrolcü Performanslarının mukayesesi .....	76
Şekil 4.1 Yalpa omurgaları .....	78
Şekil 4.2 Yalpa tankları .....	78
Şekil 4.3 Yalpa kanatları .....	78
Şekil 4.4 Aktif kanat dengeleme sistemi .....	79
Şekil 4.5 Yalpa dengeleme hidrolik sistem diyagramı .....	80
Şekil 4.6 Kontrol yüzey geometrisi .....	81
Şekil 4.7 Dalga meyil kapasitesine bağlı olarak kanat alanı seçimi .....	81
Şekil 4.8 Hücum açısı ile kaldırma ve sürtünme kuvvetleri .....	82
Şekil 4.9 Kanat kaldırma katsayılarının ( $C_L$ ) hücum açısına bağlı değişimi .....	83
Şekil 4.10 Kanat etkisi ile oluşan hücum açısı .....	84
Şekil 4.11 Kanat dengeleme sistemi ile yalpa sönümü .....	85
Şekil 4.12 Konteyner gemi yalpa hareketi kök yeri diyagramı .....	87
Şekil 4.13 Kontrolsüz gemi yalpa hareketi frekans cevabı .....	87
Şekil 4.14 Gemi yalpa dengeleme sistemi seçim şeması .....	88
Şekil 4.15 PID kontrollü gemi yalpa modeli blok diyagramı .....	89
Şekil 4.16 PID kontrollü bir serbestlik dereceli konteyner gemi yalpa açısı mukayesesi .....	90
Şekil 4.17 PID kontrollü bir serbestlik dereceli konteyner gemi yalpa hız mukayesesi .....	90
Şekil 4.18 PID kontrollü bir serbestlik dereceli konteyner gemi yalpa faz mukayesesi .....	90
Şekil 4.19 PID kontrollü konteyner gemi savrulma kontrol işareti .....	91
Şekil 4.20 LQR ile bir serbestlik dereceli konteyner gemi yalpa açısı mukayesesi .....	93
Şekil 4.21 LQR ile bir serbestlik dereceli konteyner gemi yalpa hız mukayesesi .....	93
Şekil 4.22 LQR ile bir serbestlik dereceli konteyner gemi yalpa faz mukayesesi .....	94
Şekil 4.23 LQR kontrollü konteyner gemi savrulma kontrol işareti .....	94
Şekil 4.24 Yalpa hareketi Model Referans Adaptif Kontrolü blok diyagramı .....	95
Şekil 4.25 MRAK kontrollü bir serbestlik dereceli konteyner gemi yalpa açısı mukayesesi .....	97
Şekil 4.26 MRAK kontrollü bir serbestlik dereceli konteyner gemi yalpa hız mukayesesi .....	97
Şekil 4.27 MRAK kontrollü konteyner gemi savrulma frekans mukayesesi .....	98
Şekil 4.28 MRAK kontrollü konteyner gemi savrulma kontrol işareti .....	98
Şekil 4.29 Bulanık mantık ile yalpa dengeleme kontrolü blok diyagramı .....	99
Şekil 4.30 Bulanık mantık yalpa dengeleme üyelik fonksiyonları .....	100
Şekil 4.31 Bulanık mantık gemi yalpa blok diyagramı .....	101
Şekil 4.32 BMK ile bir serbestlik dereceli konteyner gemi yalpa açısı mukayesesi .....	101
Şekil 4.33 BMK ile bir serbestlik dereceli konteyner gemi yalpa hız mukayesesi .....	102
Şekil 4.34 BMK ile bir serbestlik dereceli konteyner gemi savrulma frekans mukayesesi .....	102
Şekil 4.35 BMK kontrollü konteyner gemi savrulma kontrol işareti .....	103

Şekil 4.36 Kontrolcü Performanslarının mukayesesi .....	103
Şekil 4.37 Yalpa kontrol yüzeyi gövdeye yerleşimi.....	106
Şekil 4.38 PID kontrollü üç serbestlik dereceli konteyner gemi yalpa açısı mukayesesi.....	107
Şekil 4.39 PID kontrollü üç serbestlik dereceli konteyner gemi yalpa hız mukayesesi.....	108
Şekil 4.40 Üç serbestlik dereceli konteyner gemi savrulma açısı mukayesesi .....	108
Şekil 4.41 PID kontrollü konteyner gemi savrulma kontrol işareti.....	108
Şekil 4.42 LQR ile üç serbestlik dereceli konteyner gemi yalpa açısı mukayesesi.....	111
Şekil 4.43 LQR ile üç serbestlik dereceli konteyner gemi yalpa hız mukayesesi.....	111
Şekil 4.44 Üç serbestlik dereceli konteyner gemi savrulma açısı mukayesesi .....	112
Şekil 4.45 LQR kontrollü konteyner gemi savrulma kontrol işareti .....	112
Şekil 4.46 MRAK ile üç serbestlik dereceli konteyner gemi yalpa açısı mukayesesi .....	113
Şekil 4.47 MRAK ile üç serbestlik dereceli konteyner gemi savrulma hız mukayesesi.....	114
Şekil 4.48 Üç serbestlik dereceli konteyner gemi savrulma açısı mukayesesi .....	114
Şekil 4.49 MRAK kontrollü konteyner gemi savrulma kontrol işareti .....	114
Şekil 4.50 BMK ile üç serbestlik dereceli konteyner gemi yalpa açısı mukayesesi.....	116
Şekil 4.51 BMK ile üç serbestlik dereceli konteyner gemi savrulma hız mukayesesi.....	117
Şekil 4.52 BM kontrollü konteyner gemi savrulma kontrol işareti .....	117
Şekil 4.53 Kontrolcü Performanslarının mukayesesi .....	118
Şekil 5.1 (a) DMK yapısı (b) Klasik geri besleme yapısı .....	119
Şekil 5.2 Savrulma ve yalpa hareketi koordinat sistemi.....	122
Şekil 5.3 İki giriş ve iki çıkışlı sistemin transfer fonksiyonu gösterimi.....	125
Şekil 5.4 Dahili model kontrol MATLAB/Simulink blok diyagramı .....	126
Şekil 5.5 Dalga giriş fonksiyonu .....	127
Şekil 5.6 DMK ile savrulma açısı kontrolü .....	127
Şekil 5.7 DMK ile yalpa açısı kontrolü .....	127
Şekil 5.8 Savrulma ve yalpa hareketi kontrol performans mukayesesi.....	128
Şekil 5.9 Bulanık dahili model kontrol blok şeması.....	129
Şekil 5.10 Konteyner gemisi yalpa ve savrulma bulanık mantık kontrolcü diyagramı.....	130
Şekil 5.11 Bulanık mantık yalpa dengeleme üyelik fonksiyonları .....	131
Şekil 5.12 Savrulma açısı bulanık kontrol üyelik fonksiyonları .....	132
Şekil 5.13 Bulanık Dahili model kontrol MATLAB/Simulink blok diyagramı .....	133
Şekil 5.14 BM-DMK ile savrulma açısı kontrolü .....	133
Şekil 5.15 BM-DMK ile savrulma hız kontrolü .....	134
Şekil 5.16 Basamak girişli BM-DMK ile savrulma açısı kontrolü .....	134
Şekil 5.17 BM-DMK ile yalpa açısı kontrolü .....	134
Şekil 5.18 BM-DMK ile yalpa hız kontrolü.....	135
Şekil 5.19 Basamak girişli BM-DMK ile yalpa açısı kontrolü .....	135
Şekil 6.1 BM-DMK savrulma ve yalpa kontrol performans mukayesesi .....	140

## ÇİZELGE LİSTESİ

Çizelge 2.1 Gemi hareket notasyonları .....	13
Çizelge 2.2 a, b ve c sabitleri.....	34
Çizelge 2.3 Konteyner gemi boyutları.....	35

Çizelge 2.4 Konteyner gemisi için hidrodinamik boyutsuz katsayılar .....	36
Çizelge 2.5 Yan öteleme, yalpa ve savrulma hareketi kökleri .....	36
Çizelge 2.6 Dümen açısı 5 derecede iken dönme karakteristiği.....	41
Çizelge 2.7 Dümen açısı 5 derecede iken dönme karakteristiği (Blanke ve Perez, 2000).....	41
Çizelge 3.1 PID kazançlarının performans değişimine etkileri.....	47
Çizelge 3.2 Bulanık mantık savrulma hareket kontrol kural çizelgesi.....	63
Çizelge 3.3 Bir serbestlik dereceli modelde savrulma hareketi kontrol sonuçları .....	65
Çizelge 3.4 Üç serbestlik dereceli modelde savrulma hareketi kontrol sonuçları.....	76
Çizelge 4.1 Gemilerde kullanılan yalpa dengeleme sistemlerinin karşılaştırılması.....	79
Çizelge 4.2 Bir konteyner gemisine ait ve NACA 0015 profiline ait bilgiler.....	86
Çizelge 4.3 Kontrol kural çizelgesi .....	100
Çizelge 4.4 Bir serbestlik dereceli modelde yalpa hareketi kontrol sonuçları .....	103
Çizelge 4.5 Karar çizelgesi .....	115
Çizelge 4.6 Üç serbestlik dereceli modelde yalpa kontrol sonuçları .....	117
Çizelge 5.1 Transfer fonksiyonu sabitleri .....	123
Çizelge 5.2 Savrulma ve yalpa hareketi kontrol sonuçlarının özetleri.....	128
Çizelge 5.3 Yalpa hareket kontrol kural çizelgesi .....	132
Çizelge 5.4 Savrulma hareket kontrol kural çizelgesi .....	132
Çizelge 5.5 BM-DMK savrulma ve yalpa kontrol sonuçları.....	135
Çizelge 6.1 Dümen ile savrulma açısı kontrol sistemi sonuçları .....	137
Çizelge 6.2 Yalpa dengeleme sistemi ile yalpa açısı kontrol sonuçları .....	138

**ÖNSÖZ**

Bu tez çalışması esnasında yardımlarını esirgemeyen değerli hocam Doç. Dr. İsmail YÜKSEK beye, konunun tespitinden itibaren her zaman vakit ayırarak çok değerli fikirleri ile çalışmalarına yön veren ve tezin bu noktaya gelmesine yardımcı olan hocalarım Prof. Dr. Ahmet Dursun ALKAN, Doç. Dr. Hüseyin YILMAZ, Dr. Tamer KEPÇELER, Dr. İsmail BAYER beye ve her zaman desteğini aldığım değerli arkadaşım gemi inş. yüksek mühendisi Yavuz ER, Arş. Gör. Aykut SAFA ve Seyfettin BAYRAKTAR beye, teşekkürü bir borç bilirim.

## ÖZET

Dümen ve yalpa dengeleme sistemleri, yolcu gemileri, askeri gemiler ve yük taşıyan konteyner gemileri için oldukça fazla öneme sahiptir. Bu gemiler içinde en fazla hareket dengeleme ihtiyacı özellikle konteyner gemileri için söz konusudur. Bu nedenle geminin yanlamasına hareketi sırasında belirgin olarak yaptığı savrulma ve yalpa hareketlerinin kontrolü tehlikeli durumlara karşı güvenliği arttırmak için gereklidir.

Bu çalışmada, bir konteyner gemisinin seyir gereksinimlerinin karşılanması amacıyla klasik ve modern kontrol yaklaşımları kullanılarak gemi savrulma ve yalpa hareketlerinin dengelenmesi modellenmiştir. Dalga kuvvet ve momentleri etkisindeki bir ve üç serbestlik dereceli bir konteyner gemisinin savrulma hareketi dümen ile yalpa hareketi yalpa dengeleme kanatları kullanılarak kontrol edilmiştir. Tezin genel yaklaşımı doğrultusunda alınan sonuçlar incelendiğinde hareketlerin dengelendiği belirlenmiştir. Savrulma ve yalpa otopilot kontrol sistemlerinin, hidrodinamik katsayıların da dahil edildiği gerçek konteyner gemi modeline uyarlanması ile kullanım alanı genişletilmiştir.

Geminin dinamik modeli göz önüne alınarak, kontrol sistemlerinin performanslarını karşılaştırmak amacıyla, gemi savrulma ve yalpa hareketlerinin kontrolü önce adaptif olmayan yöntemlerden Oransal-İntegral-Türev (PID) ve Lineer Quadratik Regülâtör (LQR) ile adaptif yöntemlerden Model Referans Adaptif (MRAK) ve Bulanık Mantık (BM) yöntemleri geliştirilerek ayrı ayrı yapılmıştır. Buraya kadar yapılan çalışmalar sonucunda, gerek savrulma gerekse yalpa hareketlerinin kontrolünde gösterdiği başarılı performans nedeniyle bulanık kontrol algoritması önerilmektedir.

Gemiler dalgaların karakteristiklerine ve gemiye geliş yönlerine göre hem savrulma ve hem de yalpa hareketini diğer hareketlere göre daha belirgin yapmaktadır. Bu nedenle aynı anda hem savrulma hareketi ve hem de yalpa hareketi, dümen ve yalpa kanat kontrol sistemlerine Dahili Model Kontrol (DMK) metodu uygulanmıştır. Bu kontrol metodu için bulanık uyarlama mekanizması geliştirilmiş ve model alınan gemide kullanılmak üzere Bulanık ayarlamalı Dahili Model Kontrol (BA-DMK) yeni bir yaklaşım olarak sunulmuştur. Burada amaç gemi savrulma ve yalpa hareketlerini kontrolünü yalnızca dahili model kontrol ile yapmak veya yalnızca bulanık mantık kontrolcülerle kontrol etmek yerine, konteyner gemisi hareketlerinin dahili model kontrol kazançlarının değişen çevre şartlarına göre kararlılığı bozmayacak şekilde, bulanık mantık ile ayarlamaktır.

Bu tezde ele alınan kontrol yöntemleri bir konteyner gemi modeline uygulanmış ve yöntemlerin başarımları ayrı ayrı incelenerek birbirlerine göre üstünlükleri tartışılmıştır. Ayrıca bu adaptif kontrol yöntemlerinin gemi hareket dengeleme sistemleri üzerindeki performansı ve geleneksel yöntemlere yapacağı geliştirici katkılar incelenmiştir.

**Anahtar kelimeler:** Konteyner gemisi savrulma otopilotu, yalpa dengeleme sistemleri, PID, LQR, MRAK, BMK ve DM kontrol metotları.

**ABSTRACT**

Yaw and roll motion stabilization systems have crucial importance for passenger ships, military vessels and freight hauling container vessels. The container ships, in particular, have the greatest need for motional stability. Therefore, controlling yaw and roll motion, which are particularly apparent during sideward movement of the vessel, is of great importance for increasing safety against hazardous situations.

In this study, the stabilization of a vessel's yaw and roll motion in order to satisfy cruising needs of a container ship is modeled by utilizing classic and contemporary approaches. The yaw motion of a container ship with one and three degrees of freedom that is under the effect of wave power and moment is controlled by means of the rudder, and the rolling motion is controlled by utilizing the roll stabilization fins. When the results that were obtained under the general approach of the thesis are examined, it is noted that motions are diminished. The field of application was enhanced by means of implementing yaw and roll autopilot systems into true container ship models, which include hydrodynamic coefficients.

In order to compare the performance of control systems in consideration of the vessel's dynamic model, the control of ship's yaw and roll motion was conducted separately; first by developing non-adaptive methods of Proportional-Integrative-Derivative (PID) and Linear Quadratic Regulator (LQR), and then the adaptive methods of Model Reference Adaptive (MRAK) and Fuzzy Logic (BM). In conclusion of the studies that were conducted up to this point, fuzzy logic control is recommended due to superior performance that it has demonstrated in controlling both yaw and roll motion.

The vessels produce yaw and roll motion distinctively in comparison to others, depending on the wave characteristics and the direction from which waves strike the vessel. Therefore, Internal Model Control (DMK) method is applied to simultaneous yaw and roll motion, rudder and roll fin control systems. A fuzzy adaptation mechanism has been developed for this control method and Fuzzy adaptation of Internal Model Control (B-DMK) is presented as a new approach to be used on the modeled ship. The purpose here is to utilize fuzzy logic to adjust the container ship internal model control gains based on ever changing environmental conditions in a manner that would not disrupt stability, rather than performing the control of ship way and roll motions only with internal model control or only with fuzzy logic controllers.

The control systems that are examined in this study have been applied to a container ship model and the superiority of each model over one another is discussed by separately examining the performance of each system. Furthermore, the performance of these adaptive control systems over ship motion stabilization systems and the positive contributions thereof to traditional methods are examined.

**Keywords:** Container ship yaw autopilot, roll stabilization systems, PID, LQR, MRAK, FL and IMC control methods.

## 1. GİRİŞ

Dalga, akıntı ve rüzgâr etkisi ile oluşan gemi hareketleri seyir esnasında yolcu ve çalışanları etkilerken rotadan sapma ve devrilme problemlerine de yol açmaktadırlar. Bu hareketler dalgaların karakterine ve gemiye geliş yönlerine göre değişim göstermektedir. Gemi dinamiğinin analiz aşamasında bu hareketlerin nasıl bir davranışa sahip olduğunu anlamak büyük bir öneme sahiptir. Bu nedenle gemi hareketlerinin dinamik analizlerinin teorik ve deneysel olarak yapılması ve gerekli önlemlerin alınması gerekmektedir.

Gemilerin dinamik davranışlarını kontrol etmek için dümen ve yalpa dengeleme sistemleri geliştirilmiştir. Bu sistemler geminin kullanılacağı amaç doğrultusunda boyutlarına ve deniz durumuna göre tasarlanmaktadır. Eğer gemide beklenen sadece rota kontrolü olması durumunda dümen sistemleri ile problemi çözmek mümkündür. Fakat konteyner gemilerinde olduğu gibi konteyner taşıma amaçlı olarak kullanılacak bir gemide durum biraz daha farklıdır. Bunun nedeni devrilme olayı ve stabilite probleminin bu tip gemiler için önemli olmasıdır.

Gemi hareketlerinin dinamik analizi ve kontrolünün yapılmasıyla elde edilecek yararlar aşağıdaki gibi verilebilir.

- Geminin rota tutuş performansını arttırmak,
- Yakıt tüketimi ve seyir süresini azaltmak,
- Dalgalı deniz durumlarında yalpa etkisi ile oluşabilecek devrilme olayını önlemek,
- Taşıman yüklerde oluşabilecek hasarları önlemek,
- Gemi hareket kontrol sistemlerinin gelişimine yardımcı olmaktır.

Bu çalışmada bu istekler dikkate alınarak savrulma hareketi dümen sistemi ile yalpa hareketleri ise yalpa dengeleme sistemleri ile kontrol edilmeye çalışılmıştır. Bu çerçevede savrulma ve yalpa hareketlerinin dengelenmesinde Oransal-İntegral-Türev kontrol (Proportional- Integrative-Derivative, PID), Lineer Kuadratik Regülâtör (LQR), Model Referans Adaptif Kontrol (MRAK), Bulanık Mantık (BM), Dahili Model Kontrol (DMK) ve Bulanık Mantık Ayarlamalı Dahili Model Kontrol (BMA-DMK) kontrolcü tasarımı ve performanslarının karşılaştırılması amaçlanmıştır. Bu tez çalışmasında uygulanan kontrol yöntemlerinin hedefi, konteyner gemisinin belirgin olarak yaptığı savrulma ve yalpa genliklerinin azaltılmasını sağlamaktır.

## 1.1 Önceki Çalışmalar

Gemi hareketlerinin analizi konusunda bugüne kadar çok sayıda araştırma yapılmış olmasına rağmen seyir emniyeti açısından insanların duyarlılık ve beklentilerinin artması, enerji tasarrufu ve bozucu etkilerin istenilen seviyede giderilememiş olması gibi sebeplerle önemini korumaktadır.

Bu nedenle, iyi bir hareket analizi yapılmak suretiyle bozucu etkilerin gemi dinamiğine etkileri önlenebilir. Gemi hareketlerinin dinamik analizi ve bozucu etkilerin manevra karakteristiğine olan etkisi konusunda çalışmalar mevcut olmakla birlikte bu alanda çalışmalara ihtiyaç devam etmektedir. Gemi hareket analizi konusunda yapılan çalışmalar genel olarak iki gruba ayrılabilir.

1. Gemi dinamiği ve bozucu çevre etkilerinin incelenmesi,
2. Savrulma ve yalpa hareketlerinin klasik ve modern metotlar ile kontrolü.

Yapılan birinci grup çalışmalarda, gemi dinamiği iki farklı şekilde modellenmektedir. Bunlardan birincisi, bütün kuvvet ve momentlerin ilave edildiği katı gövde hareketi ile tanımlanırken, ikincisi geminin çevresini saran su kütlesi ile oluşan zorlayıcı hidrodinamik kuvvetlerin de eklenmesi ile tanımlanır (Gill, 1979).

Gemi hareket analizi konusunda yapılan çalışmalar Nomoto vd. 1957 yılındaki incelemelerine dayanır. Bu çalışmada savrulma hareketi için Newton yasası esas alınarak ikinci dereceden hareket modeli oluşturulmuş ve bu modelin altı serbestlik dereceli hareket modeline göre daha basit ve kullanışlı olduğu gösterilmiştir.

Gemi hareket eşitliklerinin elde edilmesinde genellikle Newton ve Lagrange denklemlerinden faydalanılır. Şuhubi (1981), Newton yasalarını bir katı cismin hareketlerini kuvvet adını verdiğimiz dış etkenlere bağlayan yasalar olarak ifade etmiştir. Buna karşın Lagrange denklemleri ise hareket denklemlerini nitelik yönünden incelemiştir. Bir başka ifade ile konservatif bir sistemin potansiyel enerjisinin maksimum olduğu durumda dengesiz, minimum civarında ise dengede olduğu kabul edilmiştir (Fossen, 1994).

Gemilerin dinamik davranışında en etkili bozucu kaynağı denizin durumudur (Kim ve Rhee, 1998). Bu davranış hali havanın, rüzgârın ve akıntının karakteristik özelliklerinden kaynaklanmaktadır. Pierson lineer bir teori ile karışık deniz halinde dalganın özellikleri ve dalga spektrumlarının hesaplanması konusuna incelemiştir (Pierson ve Moskowitz, 1964). Önerilen dalga hesaplamalarında, dalgaların tek yönden geldiği ve formunun bozulmadığı

kabulü yapılarak, dalga yüksekliklerinin belirli frekans aralığında olduğu ifade edilmiştir. Dalgalı deniz halinin tanımında 15.ITTC konferansında istatistiksel dalga dağılımı önerilmiştir (ITTC, 1978).

IMO (International Maritime Organization-Uluslararası Denizcilik Organizasyonu) tarafından 1983 yılına kadar süren çalışmalarla dalga ve rüzgâr gibi fiziksel çevre şartlarının dikkate alındığı hareket ve stabilite üzerinde çalışmalar yapılmıştır. Düzgün dalgalar ve rüzgârın bordadan kombine etkisindeki zorlayıcı ve doğrultucu moment dengesini inceleyen IMO hava kriterleri geliştirilmiştir.

Denizcilik konusundaki ilk çalışmalardan olan Lewis'in 1967'de yayınladığı araştırmasında, sıvı üzerinde ivmeli, bir hareket yapan bir cisme etkiyen akışkan kuvvetinin, bu cismin ağırlık kuvvetinden daha büyük olduğu sonucuna varmıştır. Çalışmada ek su kütlesi olarak adlandırılan bu iki kuvvet arasındaki farkın, cismin düşey ivmesinin hesabında dikkate alınması önerilmiştir.

Fossen ve Fjellstad (1995), yaptıkları incelemelerde geminin içinde bulunduğu ortamın hidrodinamik ek su kütle, Coriolis ve atalet kuvvetleri de hesaba katılarak gerçeğe yakın matematik model elde edilebileceğini göstermişlerdir. Berge ve Fossen (2000), bu kuvvetlere ek olarak vorteks, yüzey sürtünmesi, potansiyel sönüm nedeniyle oluşan lineer ve nonlineer etkilerde hareket denklemlerine ilave edilerek doğru modelleme yapılabileceğini ifade etmişlerdir.

Eş zamanlı altı serbestlik dereceli hareketler nonlineer terimler içerdiği için incelemelerde zorluklar göstermektedir. Sabuncu (1985), belirli bir rota üzerinde ilerleyen geminin davranışını inceleyebilmek için nonlineer gemi hareket denklemleri sistematik bir şekilde basitleştirmek gerektiğini ifade etmiştir. Bunun için, geminin hareketinde referans alınan eksenin başlangıç noktası ağırlık merkezinde olduğu kabulü ve gemide enine ve boyuna simetri alınmak suretiyle hesaplamalarda kolaylık sağlanmış olur. Altı serbestlik dereceli gemi hareketlerine ek olarak, dört serbestlik dereceli modelin de oldukça iyi yaklaşım sağladığı bir çok bilim adamı tarafından ifade edilmiştir (Abkowitz, 1975; Chislett ve Stomjenden, 1965; Fan ve Xia, 2002).

Literatürde hesap yükünden kurtulmak için geminin yapısı gereği üç veya dört serbestlik dereceli modelin (yan öteleme, savrulma ve yalpa hareketleri) yapılacak çalışmalar için

yeterli olduğuna karar verilmiştir (Perez ve Blanke, 1998). Bu hareketleri inceleyebilmek için dalgaların gemiye tam olarak yan taraftan geldiği kabul edilmiştir.

İkinci grup çalışmalar ise, gemi hareketlerinin kontrolü için uygun kontrol metotlarını belirlemeye yönelik çalışmalardır.

Gemi hareket kontrol sistemleri doğrultu ve yalpa dengelemesi, dinamik pozisyonlama, yalpa sönümü konuları ile ilgilenmektedir (Sorensen ve Strand, 2000; Kallström, 2000; Morawski ve Pomirski, 1998). Bu kontrol sistemlerinin tasarımında, gemi dinamik karakteristiği hakkında kapsamlı bilgiye sahip olunması önerilmiştir (Fossen, 1994). Yapılan çalışmalarda genelde iki hedef üzerinde durulmuştur. Bunlardan biri yolcunun ve yüklerin etkilenmesini en aza indirmek diğeri ise seyir karakteristiğini düzenlemektir. Bu iki özellik birbirine bağlı olması genel anlamda birinin iyileşmesi diğerininde iyileşmesi anlamına gelmektedir.

Seyir karakteristiğinin iyileştirilmesi için birçok kontrol metodu önerilmesine karşın gemi hareket kontrolünde yaygın olarak Oransal-İntegral-Türev (PID) etkili kontrolcüler kullanılmaktadır. PID kontrol metodu, kontrol teorisinin ortaya çıkışından bu yana en çok kullanılan kontrol uygulamalarının başında gelmiştir. Gemi kontrol uygulamalarında Minorsky (1957) tarafından kullanılan klasik PID tipi kontrol parametreleri aşağıdaki gibidir.

$$\delta = K_p \psi_e + K_d \dot{\psi}_e + K_i \int \psi_e dt$$

Bu formdaki kontrol sistemleri klasik PID kontrol sistemi olarak adlandırılır. Burada,  $\delta$  dümen sapması,  $\psi_e$  savrulma açısındaki hata,  $K_p$ ,  $K_d$  ve  $K_i$  PID kontrol kazançlarıdır. Mort (1957)'e göre bu ifadedeki integral terimi dümen cevabını yavaşlatabildiğini ve bu durumun ortadan kaldırılması için ivmeleme teriminin kontrol eşitliklerine ilave edilebileceğini göstermiştir. Bununla birlikte, lineer gemi hareket analizinde istenilen kararlı davranış şeklinin elde edilmesi için gemi dinamiğine (boyut, hız) ve dış şartlara (deniz, rüzgâr ve akıntılar) bağlı olarak uygun kontrol kazanç değerlerinin seçilmesi gerekmektedir. Kontrol parametrelerinin ayarlanmasına ilişkin birçok değişik yöntem önerilmiştir (Skjetne vd., 2001).

Fossen, (1994), ikinci dereceden Nomoto modelini esas alarak dümen dinamiğinin kararlı olup olmadığı ve kararsız olan sistemin PID kontrol yöntemi ile kazanç değerlerini değiştirerek sistemin kararlı olabileceğini göstermiştir.

Bir başka çalışmada ise ikinci dereceden Nomoto modeli kullanılarak PD kontrolcü ile sabit 'U' hızında seyir eden bir kargo gemisi rota doğrultusu dengelenmeye çalışılmıştır (Erkal

1998). Bu çalışmada yan öteleme ve savrulma açısının birleşik olmadığı varsayımı altında savrulma açısı dümen sistemi ile kontrol edilmiştir. Aynı zamanda, PD kontrolcüsünün sistemin kararlılığı üzerindeki etkilerine ilişkin birçok değişik kararlılık analiz metodu önerilmiştir. Amerongen (1980), yaptığı çalışmalarda parametre ayarı iyi yapılmış bir PID kontrolcüsünün belirli şartlarda kontrol performansının oldukça iyi olduğunu ancak bozucu etkilerin şiddetini arttırdığı durumlarda yetersiz olduğunu ve yakıt tüketimini de azaltmadığını ifade etmiştir.

Belirtilen kararsızlık durumlarının ortadan kaldırarak geminin seyir konforunu ve otopilot performansını iyileştirmek için optimal kontrol kavramı ortaya çıkmış ve birçok optimizasyon kuralları önerilmiş ve geliştirilmiştir.

Amerongen ve Cate (1975), gemi otopilot kontrol sistemlerinin her durumda optimal kontrolü için gemi hızı ve dalga etkilerinin de hesaba katılması gerektiğini ifade etmiştir. Bu durumda doğru rota kontrolü ve minimum yakıt tüketimi problemleri ile karşılaşmıştır. Problemlerin çözümü için optimizasyon fonksiyonları türetilmiş ve performans ölçütleri ihtiyaca göre düzenlenmiştir.

Athans ve Falb (1966), bir problemin optimal çözüm aşamasında faydalanılan performans ölçütlerini aşağıdaki gibi ifade etmişlerdir.

1. Durum değişkenleri
2. Kontrol değişkenleri
3. Sistem parametreleri

Gemi durum değişkenleri pozisyon ve hız ifadeleri ile tanımlanır. Kontrol değişkenleri ise dümen ve yalpa dengeleme etkileridir. Sistem parametreleri de kontrol cevaplarıdır.

Amerongen ve Lemke (1978), tanker ve kargo için dümen sevkinden dolayı oluşan direnç artışını engellemede yukarıda ifade edilen performans ölçütlerini kullanmışlardır. Bu çalışmaya ilave olarak Koyama (1967) ve Norrbin (1963) dümen kontrol performans ölçütlerini incelemişlerdir. Brayson (1999) ise modelin lineer olup olmadığına göre optimal kvadratik kontrol uygulamasını yapmıştır. Bununla birlikte hidrodinamik belirsizliklerin ortadan kaldırılması için filtreleme tekniğinden faydalanarak optimal rota kontrolü Holzhüter (1997) tarafından gerçekleştirilmiştir.

Buna karşın bu hidrodinamik belirsizlikler nedeniyle otopilot kontrol performansı düşmektedir. Kalstöm ve Aström (1979) tarafından yapılan çalışmalarda, adaptif kontrol metodunun meydana gelen bu problemin çözümünde etkin olduğu ifade edilmiştir.

İlk defa 1950'li yıllarda bahsedilmeye başlayan adaptif kontrol metodu özellikle son yıllarda bu konuya ilgi artmış uçak, robot ve taşıt hareket kontrol alanlarında da uygulama imkânı bulmuştur (Dubowsky ve Des Forges, 1979).

Adaptif bir kontrol, sürekli ve otomatik olarak sistemin dinamik karakteristiklerini ölçer ve istenen dinamik karakteristiklerle kıyaslar, farkları kontrol parametrelerini ayarlamak için kullanır (Nejim, 1998).

Günümüzde yaygın olarak kullanılan birçok adaptif kontrol metodu önerilmiştir. Ancak bunlardan uygulanabilir olanlarının sayısı oldukça azdır.

1. PID kontrol ilave edilmiş adaptasyon-Sugimoto ve Kujima (1978)
2. Model referans adaptif kontrol (MRAK)-Amerongen ve Cate (1975)
3. Kendi kendine adaptasyon (STR)-Aström ve Wittenmark (1989).

Bu adaptif sistemler içerisinde model referans adaptif kontrolün yapısı daha basittir ve sadece sistem ile referans değer arasındaki hatanın minimizasyonunu içeren bir işlem adımı vardır. Model referans adaptif kontrol sistemleri 1958 yılında Whitaker vd. tarafından uçak kontrol sistemlerine uygulanmıştır. Bu uygulamada, uçuş kontrol sistemi adaptif olarak düşünülerek, istenen ve gerçek olan işaretler arasındaki hata kontrol edilmiştir.

Aynı zamanda, model referans adaptif kontrol metodu 1975 yılında Amerongen ve Cate tarafından gemi rota kontrolü için kullanılmıştır. Bu kontrol metodunda parametrelerin ayarı için gereken mekanizma Gradyen yöntemi ve Lyapunov teorisi kullanılmak suretiyle iki farklı yolla elde edilmiştir.

Gradyen kuralı (MIT) model referans için orijinal bir yaklaşımdır. Massachusetts Teknoloji Enstitüsü laboratuvarlarında geliştirilen bu kural ismini Massachusetts Institute of Technology olan enstitü isminin baş harflerinden almıştır. Bu yöntem ile parametrelerin ayarı amaç fonksiyonunun minimize edilmesi ile mümkündür.

Kararlılık üzerine bugüne kadar yapılan çalışmaların en önemlilerinden birisi Lyapunov'un (1892) doktora tezidir. Lyapunov kararlılık problemini n. dereceden sistemler için genelleştirmiş ve iki ayrı yöntem önermiştir. Birinci yöntem denklem çözümlerinden yararlanır. "Lyapunov Direkt Yöntemi" olarak bilinen ikinci yöntem ise sistemi tanımlayan denklemleri nitelik yönünden incelenmesini içerir (Jordan ve Smith, 1979).

Bazı uygulamalarda Gradyen yöntemi ile oluşturulan model referans adaptif kontrol algoritması karmaşık olduğundan tercih edilmemiştir. Bu metot yerine kararlılık güvencesi olan Lyapunov kararlılık kriteri ile kurulmuş adaptif sistem tercih edilmiştir (Erkal, 1998).

Aström ve Wittenmark, adaptif kontrolün diğer bir önemli konusu olan kendi kendini ayarlayabilen sistemleri (Self Tuning Regulator) 1989'da incelemişlerdir. Bu tip otopilotlar her bir örnekleme zamanında sürekli rejim halinde çözüm yaparak çalışır. Harris ve Billings (1981) eğer sistem parametre ayarlarını yapamıyorsa mekanizmanın kendi kendine adaptasyonu söz konusu olmadığını ifade etmişlerdir.

Öğrenme ve adaptasyon bulanık kontrol sistemlerinin temel özellikleridir (Linkens ve Nyongesa, 1996). Klasik yöntemlerle yapılan adaptif kontrollerin daha hızlı ve dayanıklı olabilmesi için bulanık kontrol ile birlikte uygulanabilir. Bu kontrol yöntemi insanın düşünüş şekline yakın olmasından dolayı PID ve adaptif kontrol algoritmaları için iyi bir alternatiftir.

Bulanık mantık kavramı ilk kez 1965 yılında California Berkeley Üniversitesinden Prof. Lotfi A. Zadeh'in bu konu üzerinde yaptığı çalışmaların yayınlanmasıyla duyulmuştur. Bulanık kümeler, bulanık algoritmalar ve bulanık karar verme gibi bulanık teorisinin temel kavramları Zadeh tarafından 1960'ların sonu ile 1970'lerin başlarında ortaya konmuştur. Bu temel kontrol kural tablosu oluşturulurken aşağıdaki üç farklı aşama takip edilir. İlk olarak, sistem el ile kontrol edilebilmeli, ikincisi, sistem ve istenen kontrol hedefleri hakkında bilgilere sahip olunmalı üçüncü olarakta performans uygun kontrol tablosu oluşturulmalıdır (Woo, 1998).

Zadeh bir başka çalışmasında, sözel değişkenler kavramını ve insanların deneyim bilgilerinin eğer-ise şeklinde kurallar ile ifade edilmesini önermiş ve böylece bulanık mantığın temellerini atmıştır.

Bulanık mantık ile kontrol uygulaması, ilk olarak 1975'te Mamdani ve arkadaşları tarafından bir buhar makinasının denetimi için bulanık kural tabanlı bir kontrolcü geliştirmeleri ile

başlamıştır. 1980'de Sugeno, Japonların ilk bulanık mantık uygulaması olan Fuji Electric su arıtma tesisinin kontrolünü gerçekleştirmiştir.

Bulanık kontrolün endüstriyel sistemlerin kontrolünden başka, artık el tipi küçük kameralardan, çamaşır makinelerine kadar güncel uygulama alanları bularak evlerimize kadar girmiştir. Son yıllarda bulanık kontrol teorisinin gemi kontrol sistemlerindeki uygulamaları çeşitli yayınlarda göze çarpmaktadır (Sutton ve Roberts, 1989; Yang, Zhou ve Jia, 2002; Lee ve Cho, 2003;).

Gemi yalpa sönümü ile ilgili çalışmalar yıllar öncesine dayanmakta ve günümüzde de devam etmektedir. Bu çalışmalar genel olarak sakin suda gemi yalpa hareketinin incelenmesi, aktif ve pasif yalpa azaltıcı ile yalpa hareketinin sönümlemesini içermektedir.

Yalpa sönümü ile ilgili ilk ciddi çalışmalar Dalzell (1978) tarafından yapılmış ve alternatif sönüm modelleri ortaya koymuştur. Özel balıkçı gemileri için sönüm momenti modelleri üzerine deneysel çalışmalar Haddara (1984), Haddara vd. (1999) devam etmiş sadece hıza bağlı quadratik sönüm modelinin en iyi sonuç verdiğini göstermiştir. Özkan (1977), durgun denizde yüzen bir geminin ağırlık ve su altı kuvvetlerinin eşit olması ile dengede olduğunu ve bu denge kavramının doğrultma moment kolu (GZ) ile belirleneceğini ifade etmiştir.

Yalpa azaltıcı sistemler üzerine yapılan çalışmalar iki ana gruba ayrılır. Pasif yalpa azaltıcı sistemler ve aktif yalpa azaltıcı sistemler olarak ifade edilebilir. İlk gruba ait en önemli yalpa azaltıcıları, yalpa omurgaları, sabit kanatlar, pasif yalpa tankları ve pasif hareketli yalpa ağırlıklarıdır. Başlıca aktif yalpa azaltıcı sistemler ise aktif yalpa kanatları, aktif yalpa tankları, aktif hareketli ağırlıklar ve dümen sistemlerinden oluşmaktadır.

Gövdenin her iki yanına yerleştirilen sabit kanat kaldırma sistemi, askeri gemilerde ve petrol tankerlerinde güvenliği sağlamak için Dr. Shintoro Motora (1922) tarafından uygulanmıştır. Günümüzde yolcu ve askeri gemilerin pek çoğunda otomatik yalpa dengeleme sistemleri mevcuttur. Özellikle hava koşullarının kötü olduğu durumlarda yalpa dengelemesi oldukça zor bir iştir. Böyle durumlar için otomatik yalpa dengeleme sistemlerine ihtiyaç vardır.

Sgobbo ve Persons (1999), bir serbestlik dereceli modeli esas alarak aktif kanat dengeleme sistemi ile yalpa hareketini sönümlemeye çalışmışlardır. Aynı zamanda üç serbestlik dereceli WMEC901 sınıfı geminin model alındığı bu çalışmada yalpa dengeleme sistemlerinin yalpa genliğini %35 azalttığı görülmüştür.

Gövdenin dış kuvvetlere cevabı gövdedeki yalpa dengeleme sistemi performansına etkisi önemlidir. Bu nedenle optimum kanat alanı seçmek için hem dalga meyil kapasitesi hem de gövde hareket simülasyonlarına dikkat edilmelidir (Vetus, 2003).

Yalpa hareketinin dengelenmesinde, geminin her iki tarafına optimum kanat alanına sahip hidrolik kanat sistemi yerleştirilmiştir. Kawazoe vd. (1994) bu uygulamada optimum kanat alanı yalpa sönüm performansını arttırdığını ifade etmişlerdir.

Sutton ve Roberts (1989), çok girişli çok çıkışlı bir sistemin bulanık modelini esas alan bir kontrolcü performans analizini yapmıştır. Bu çalışmada sistemde belirsizlik ve karmaşıklık arttıkça bulanık modellemenin yararlı olacağı da vurgulanmıştır.

Denizcilik endüstrisinde, gemilerde yalpa hareketlerinde bulanık kontrolcü Sutton ve Craven (2001); Witt, Sutton ve Miller (1994); Omerdic, Koroman ve Kuljaca (1997) tarafından uygulanmıştır. Velagic vd. (2003), Sugeno bulanık tipi otopilot simülasyonlarında deniz akıntıları ve dalga bozucu etkilerini dikkate almışlardır. Bu amaçla akıntılı ve dalgalı denizde uygulanan adaptif bulanık otopilot simülasyon sonuçlarından, standart bulanık otopilotundan daha iyi performansa sahip olduğu gösterilmiştir.

Kontrol edilmek istenilen ve en iyi performansı almak için ilgilenilen sistemlerin karmaşıklıklarının artması ile birlikte kontrol sistem mühendisliğinin önemi geçen yıllara boyunca artmış durumdadır. Bundan dolayı sistemin karmaşık olması ile birlikte, çok sayıda kontrol değişkeninin birbirleri ile ilişkilendirilmesi ve bunların kontrol şemalarında yer alması gerekliliği doğmuştur.

Genellikle çok değişkenli sistemler birden fazla giriş-çıkış değişkenine sahip olmasına karşın ayrıık sistemler olarak da ele alınabilmektedir. Çok değişkenli paralel sistemlerin kontrol tasarımı için ilk önce sistemin statik ve dinamik özelliklerinin belirlenmesi ve bunlara ilişkin sistem modelleme yöntemleri incelemiştir (Ogawara ve Iwamoto, 1998).

Dahili model kontrol diğer tasarım metotlarına nazaran daha yeni olarak 1980'lerin başlarında ortaya konulmuştur. Bu yöntemeye göre her bir giriş değişkenini diğerlerini sabit tutmak koşulu ile basamak fonksiyonları uygulamakla tüm çıkış değişkenleri ölçülerek ifade edilmiştir. Daha sonra bu karakteristik ifadelerden yararlanarak transfer fonksiyon matrisleri oluşturulmuştur. Elde edilen transfer fonksiyonlarına dayanarak sistemlerin kontrol yapıları, tasarım algoritmaları ve uygulama yaklaşımları Skogestad ve Postlethwaite (2000) tarafından incelenmiştir. Burada, kontrol edilecek sisteme ait karakteristik denklem bulunduktan sonra

kararlılık analizi yapılmıştır. Watanabe vd. (2002, 2003) kararsız kutup ve sıfıra sahip çok değişkenli sistemlerde maksimum performansı sağlayacak şekilde ayarlandığında kararsızlık durumu ortadan kalkacağını göstermişlerdir.

Dahili model kontrol, gemi yalpa hareketinin dengelenmesi amacı ile Tzeng (1999), Tzeng vd. (1999, 2000, 2001) tarafından bozucu etkilerin engellenmesi için çıkışa duyarlı fonksiyon olarak biçimlendirilmiştir.

Literatürde tek girişli tek çıkışlı sistemlerin kontrolü için önerilen dahili model kontrol yalnızca bir kontrolcü olarak tasarlandığı gibi adaptif ve bulanık mantık kontrol metotları ile birlikte de sunulmuştur (Watanabe ve Muramatsu, 2003). Garcia ve Morari (1982) tarafından sunulan geri beslemeli dahili model kontrol yönteminin iyi özelliklerini daha etkin bir yapıya sokabilmek amacı ile yeni bir yöntem olarak bulanık ayarlamalı dahili model kontrol yöntemi önerilmiştir. Önerilen bu yeni yöntemin temel yaklaşım felsefesi ve öngörülen temel ilkeleri Posthletwaite vd. (1997) tarafından kimyasal problemlere uygulanmıştır. Bulanık mantığın kullanıldığı bu yaklaşımda, özel durumlarda kontrolcü cevabının nasıl olması gerektiği, kayıt edilmiş bilgilerden belirlenerek yeniden düzenlenmiştir.

Gemi hareket kontrolü için geçmişte uygulanmış ve güvenilirliği ispatlanmış metotlar bulunmasına rağmen gelişen teknolojiye paralel olarak, bir konteyner gemisine aynı anda iki farklı hareketin kontrolü için güncel metotlardan biri olan bulanık mantık ayarlamalı dahili model kontrol uygulanmıştır. Dahili model kontrol algoritmasının, mevcut kontrol sistemlerine göre daha iyi sonuçlar verdiği, enerji ve zaman tasarrufu sağladığı gözlemlenmiştir. Ayrıca, tez literatürde konteyner gemisi savrulma ve yalpa hareketlerinin dengelenmesinde görülen eksikliği giderilmesine katkıda bulunmuştur.

## 1.2 Tezin Amacı

Denizde ilerleyen bir gemi göz önüne alındığında, işletme ve çevre etkileri geminin yönünü ve pozisyonunu değiştirmeye zorlamakta ve bunun sonucunda zamana bağlı olarak değişik kuvvetlerin etkilemesine ve haliyle deplasmanında bir değişim oluşmasına neden olmaktadır. Bu nedenle, gemilerin seyir kontrol gereksinimlerinin karşılanması amacıyla klasik ve modern kontrol yöntemleri ile dümen ve yalpa dengeleme sistem performansı incelenmiştir. Bu çalışmadaki hedefler genel olarak üç gruba ayrılabilir.

1. Geminin rota dengesini sağlamak
2. Yalpa hareketi ile meydana gelen devrilme olayını engellemek
3. İdeal bir seyir durumu için savrulma ve yalpa hareketlerinin birlikte kontrolü.

İlk durumda, geminin rota hatasının minimuma indirerek hız düşmelerinin, ek yakıt ve zaman harcamalarının önüne geçilmesi hedeflenmiştir. Bunun için, adaptif ve adaptif olmayan (PID, LQR, MRA ve BM) kontrol yöntemlerinin dümen etkisi ile uygun kuvvetler ve momentler oluşturularak geminin hızı, konumunun dengede kalmasına çalışılmıştır. Ayrıca bu yöntemlerin birbirlerine göre karşılaştırmaları yapılarak hangi yöntemin daha uygun olduğu araştırılmıştır.

Tez çalışmasında öngörülen bir diğer durumda gemi yalpa konumu göz önüne alınarak yalpa dengeleme kanatları yardımıyla gemi ve yüklerin etkilenmesini önlemektir. Dalgalı deniz ortamında seyir eden bir konteyner gemisinin yalpa hareketi, yukarıdaki kontrol yöntemleri kullanılarak dengelenmeye çalışılmıştır. Burada amaç bozucu etkiler altındaki geminin tehlikeli durumlardan en kısa sürede güvenli konuma gelmesine yardımcı olmaktır.

Bu tezde, konteyner gemi savrulma açısının kontrolü ve yalpa hareketi sönüm oranının artırılması hedeflenmiştir. Bu amaçla, iki girişli iki çıkışlı sistemin dahili model kontrol yöntemi ile kontrolü yapılmıştır. Bu yöntemin özelliklerini iyileştirmek için kontrolcü parametrelerinin ayarlanması bulanık mantık ile yapılması hedeflenmiştir. Kısaca belirtmek gerekirse bu tezde önerilen bu yöntem, konteyner gemisi savrulma ve yalpa hareketlerinin ne yalnızca dahili model kontrolü nede yalnızca bulanık mantık kontrolü ile kontrol etmek değil, bunun yerine, konteyner gemisinin dahili model kontrol kontrolcü kazançlarını değişen çalışma ve yük durumuna göre kararlılığı bozmayacak şekilde, bulanık mantık ile ayarlamaktır.

## 2. GEMİ DİNAMIĞI

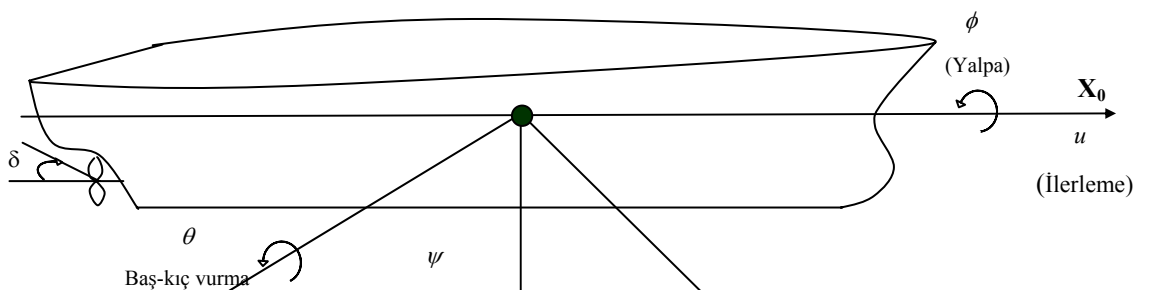
Dinamik sistemlerin analizinde sistemin hangi kısımlardan oluştuğu ve ne yapması gerektiği belirlenmelidir. Ele alınan sistemin yapısı belirlendikten sonra, tasarımcı sisteme en uygun matematik modeli ifade etmelidir. Bu bölümde, konteyner gemisinin gerçek parametre ve fiziksel boyutları gözönüne alınarak dinamik model elde edilmiştir. İncelemelerde gemi hareketlerinin matematik modeli SNAME (The Society of Naval Architects and Marine Engineers) notasyonu esas alınarak Newton mekaniği ile ifade edilmiştir.

## 2.1 Gemi Hareket Notasyonları

Denizde ilerleyen bir gemi gözönüne alındığında, işletim ve çevre etkileri geminin yönünü ve pozisyonunu değiştirmeye zorlamakta ve bunun sonucunda zamana bağlı olarak değişik kuvvetlerin etkilemesine ve haliyle deplasmanında bir değişim oluşmasına neden olmaktadır. Bu zorlayıcı etkiler, gemide altı serbestlik dereceli salınım hareketlerini oluşturmaktadır. Gemilerin seyir ve değişik servis hallerinde oluşan bu salınım hareketleri üçü öteleme ve üçü dönelemler olmak üzere iki gruba ayrılmaktadır. Bu hareketler aşağıda kısa tanımlar halinde verilmiştir.

1. İlerleme : Boyuna ekseninde geminin ileri ve geri doğrusal hareketi,
2. Yan öteleme : Enine ekseninde geminin her iki yöndeki doğrusal hareketi,
3. Savrulma : Geminin düşey eksenine etrafındaki dönelemler veya açısal hareketi,
4. Dalıp-çıkma : Düşey ekseninde geminin her iki yöndeki doğrusal hareketi,
5. Yalpa : Geminin boy ekseninde yaptığı dönme hareketi,
6. Baş-kıç vurma : Geminin enine ekseninde kıçta ve başta açısal hareketi.

Gerçek halde yüzen bir cisim eşzamanlı olarak yukarıda tanımlanan altı serbestlik derecesine sahip hareketler yapmaktadır. Bu hareketlerden ilerleme, savrulma ve yan öteleme hareketleri geminin konumunu ifade ederken dalıp-çıkma, baş-kıç vurma ve yalpa hareketleri de geminin denge pozisyonunu bozan dış kuvvetlere karşılık verdiği tepki hareketidir. Ancak dalgaların karakterine ve gemiye geliş yönlerine göre farklı şekillerde zorlanan gemiler bir tür hareketi veya daha fazla türden birleşik hareketi diğerlerine göre daha belirgin yapabilirler. Altı farklı hareket bileşeni Çizelge 2.1'deki SNAME (1950) notasyonu esas alınarak ifade edilmiştir.



Şekil 2.1 Gövdeye ve yere göre sabitlenmiş referans eksen takımı (SNAME, 1950).

Bir geminin hareket analizinin yapılabilmesi için önce geminin orijinine referans eksen takımı yerleştirilir. Bu eksen takımı  $X_0Y_0Z_0$  Şekil 2.1’de görüldüğü gibi sağ el kuralına uygun, geminin ağırlık merkezini orijin kabul eden, geminin gövdesine sabitlenmiş eksen takımıdır. Sabit eksenin orijini ‘0’ noktası seçilerek,  $X_0$  (baştan kıça doğru),  $Y_0$  (sancak tarafa doğru) eksenleri sakin su yüzeyinde ve  $Z_0$  (ekseni yerçekimi yönünde) aşağı doğru pozitif olarak alınmıştır. Yere bağlı sabit bir eksen takımında, yine sağ el kuralına uygun fakat orijini deniz seviyesinde seçilen ‘ $X_1$ ’ ve ‘ $Y_1$ ’ eksenleri sakin su yüzeyinde, ‘ $Z_1$ ’ eksenini yerçekimi yönünde aşağı doğru pozitifdir.

Çizelge 2.1 Gemi hareket notasyonları (Fossen, 1994).

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

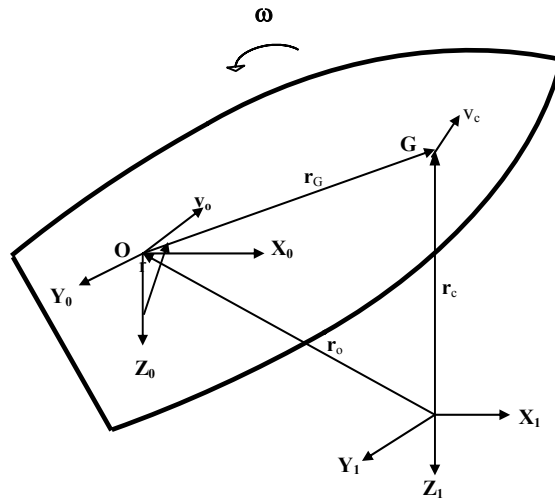
Konumlar  $[x \ y \ z]^T$  ve  $[\phi \ \theta \ \psi]^T$ ; lineer hızlar  $[u \ v \ w]^T$  ve açısal hızlar  $[p \ q \ r]^T$ ; sırası ile kuvvet ve momentler  $[X \ Y \ Z]^T$ ,  $[K \ M \ N]^T$  gövdeye sabitlenmiş eksen takımına göre ifade edilir.

## 2.2 Newton-Euler Yöntemi ile Rijid Gemi Hareket Denklemlerinin Elde Edilmesi

Bir gemi gövdesinin dinamik modeli, gemi gövdesinin dinamik davranışını belirleyen hareket eşitliklerinden oluşur. Gemi hareketlerinin dinamik analizi, dış etkiler ve tahrik elemanları tarafından uygulanan moment veya kuvvet büyüklükleri ile gemi gövdesinin zamana göre yer değiştirmesi arasındaki ilişkilerin incelenmesi anlamına gelir. Gemi hareket eşitliklerinin basitçe ifade edilmesi için aşağıdaki bazı kabuller yapılmıştır. Bunlar kısaca şöyle ifade edilebilir.

1. Dinamik analiz sırasında gemi kütlelerinin sabit olduğu,
2. Geminin katı bir cisim olduğu,

Bu kabuller altında geminin üç tane doğrusal üç tane de açısal yer değiştirmeden kaynaklanan altı hareketi söz konusudur (Perez ve Blanke, 1998)



Şekil 2.2 Yere sabitlenmiş referans dönme eksenine  $(X_1 Y_1 Z_1)$  ve gövdeye sabitlenmiş referans dönme eksenine  $(X_0 Y_0 Z_0)$  göre gemi modeli

Hareket denklemleri gemiye bağlı keyfi bir ‘O’ başlangıç noktasından geçen ve eksenleri asal atalet eksenlerine paralel olarak alınan bir sistem için elde edilmiştir.

Hareket denklemlerini elde etmek için gövdeye sabitlenmiş koordinat sistemi orijini dikkate alındığında hız değişimi,

$$\dot{\omega} = \overset{\circ}{\omega} + \omega \times \omega = \overset{\circ}{\omega} \quad (2.1)$$

ile gösterilir. Burada,  $\dot{\omega}$  yeryüzüne sabitlenmiş  $X_1Y_1Z_1$  referans ekseninde  $\omega$ ’nin zamana göre türevidir.  $\overset{\circ}{\omega}$  gemiye bağlı referans ekseninde  $(X_0Y_0Z_0)$   $\omega$ ’nin zamana göre türevidir. ‘x’ vektörel çarpım operatörüdür. Basitleştirilmiş durumlarda, yeryüzüne sabitlenmiş referans ekseninde ve gövdeye sabitlenmiş referans eksenindeki açısal ivmelenme birbirine eşittir. Hareket denklemleri ilk kademe olarak kütle merkezinden geçen eksenlere göre elde edilecektir. Su yüzeyinde yüzen bir geminin dış kuvvetler ile dengesinin bozulduğu kabulü yapılarak kütle merkezinin hareketi

$$F = m a \quad (2.2)$$

Newton’un hareket kanunu ile yazılır. Burada ‘F’ gemiye dışarıdan etkiyen toplam su kuvvetlerinin bileşkesi, ‘m’ gemi kütlelerini,  $a$  ise kütle merkezi ivmesini göstermektedir.

### 2.2.1 Kütle Merkezine Göre Öteleme Hareket Denklemlerinin Elde Edilmesi

Kütle merkezi ve ‘O’ başlangıç noktasından geçen referans eksen esas alınarak,

$$r_c = r_0 + r_G \quad (2.3)$$

toplam halinde gösterilir. Her iki tarafın sabit eksen takımının türevi hıza bağlı olarak,

$$v_c = \frac{dr_c}{dt} = \dot{r}_0 + \dot{r}_G \quad (2.4)$$

ifade edilir. Rijid gövde için  $v_0 = \dot{r}_0$  ve  $r_G = 0$  ifadeleri ile yer referans eksenine göre,

$$\dot{r}_G = \overset{\circ}{r}_G + \omega \times r_G = \omega \times r_G \quad (2.5)$$

kütle merkezi hız değişimi bulunur. (2.5) eşitliği (2.4)’de yerleştirilirse,

$$v_c = v_0 + \omega \times r_G \quad (2.6)$$

hızın değişimi bulunur. Burada  $\omega$  açısal hız vektörüdür. Kütle merkezinin ivmesi hızın zamana göre türevi olduğundan,

$$\dot{v}_C = \dot{v}_0 + \dot{\omega} \times r_G + \omega \times \dot{r}_G \quad (2.7)$$

veya

$$\dot{v}_C = \overset{0}{v}_0 + \omega \times \overset{0}{v}_0 + \dot{\omega} \times r_G + \omega \times (\omega \times r_G) \quad (2.8)$$

şeklinde ifade edilir. Son durumda, (2.8) eşitliği (2.2) eşitliğinde yerleştirilirse,

$$m(\overset{0}{v}_0 + \omega \times \overset{0}{v}_0 + \dot{\omega} \times r_G + \omega \times (\omega \times r_G)) = F_0 \quad (2.9)$$

Newton kanununa göre kuvvet denklemi elde edilir.  $X_0Y_0Z_0$  gövdeye sabitlenmiş koordinat sisteminin orijini geminin kütle merkezi olarak seçilirse,  $r_G = [0, 0, 0]^T$  alınır. Böylece (2.9) eşitliğinde  $F_0 = F_C$ ,  $v_0 = v_C$  kabulü yapılarak,

$$m(\overset{0}{v}_C + \omega \times \overset{0}{v}_C) = F_C \quad (2.10)$$

en genel haldeki öteleme hareket denklemi elde edilir.

### 2.2.2 Kütle Merkezine Göre Dönme Hareket Denklemlerinin Elde Edilmesi

Şekil 2.2'deki gemiye bağlı her hangi bir 'O' noktasına göre açısal momentumu,

$$h_0 \cong \int_V r \times v \rho_A dV \quad (2.11)$$

ile gösterilebilir. Bu ifadenin zamana göre diferansiyeli alındığında,

$$\dot{h}_0 = \int_V r \times \dot{v} \rho_A dV + \int_V \dot{r} \times v \rho_A dV \quad (2.12)$$

sağ taraftaki birinci terim ile moment vektörü elde edilir.

$$m_0 \cong \int_V r \times \dot{v} \rho_A dV \quad (2.13)$$

Şekil 2.2 esas alınarak,

$$v = v_0 + \dot{r} \quad \dot{r} = v - v_0 \quad (2.14)$$

(2.13) ve (2.14) ifadeleri (2.12)'de yerleştirildiğinde,

$$\dot{h}_0 = m_0 - v_0 \times \int_V v \rho_A dV \quad (2.15)$$

veya

$$\dot{h}_0 = m_0 - v_0 \times \int_V (v_0 + \dot{r}) \rho_A dV = m_0 - v_0 \times \int_V \dot{r} \rho_A dV \quad (2.16)$$

açısal momentumun türevi elde edilir. Burada,

$$r_G = \frac{1}{m} \int_V r \rho_A dV \quad (2.17)$$

kütle merkezinin zamana göre türevi alındığında

$$m \dot{r}_G = \int_V \dot{r} \rho_A dV \quad (2.18)$$

ve  $\dot{r}_G = \omega \times r_G$  dönüşümü yapıldığında,

$$\int_V \dot{r} \rho_A dV = m \times (\omega \times r_G) \quad (2.19)$$

kütle merkezine göre açısal momentumun son durumu elde edilir.

$$\dot{h}_0 = m_0 - m v_0 \times (\omega \times r_G) \quad (2.20)$$

(2.14) eşitliği ile (2.11) yeniden düzenlerek,

$$h_0 = \int_V r \times v \rho_A dV = \int_V r \times v_0 \rho_A dV + \int_V r \times (\omega \times r) \rho_A dV \quad (2.21)$$

şeklinde gösterilir. Bu ifadenin sağ tarafındaki birinci terimi,

$$\int_V r \times v_0 \rho_A dV = \left( \int_V r \rho_A dV \right) \times v_0 = m r_G \times v_0 \quad (2.22)$$

kütle merkezine bağlı olarak elde edilir. (2.21) eşitliğinin sağ tarafındaki açısal momentum,

$$I_0 \omega = \int_V r \times (\omega \times r) \rho_A dV \quad (2.23)$$

'O' dan geçen eksenlere göre kütle momentleri kullanmak suretiyle,

$$h_0 = I_0 \omega + m r_G \times v_0 \quad (2.24)$$

bulunur.

Bu ifadenin her iki tarafının sabit eksen takımına göre türevleri

$$\dot{h}_0 = \dot{I}_0 \omega + I_0 \dot{\omega} + m \dot{r}_G \times v_0 + m r_G \times \dot{v}_0 \quad (2.25)$$

veya (2.1), (2.5) ve (2.6) eşitlikleri kullanılarak

$$\dot{h}_0 = I_0^0 \dot{\omega} + \omega \times (I_0 \omega) + m (\omega \times r_G) \times v_0 + m r_G \times (\dot{v}_0 + \omega \times v_0) \quad (2.26)$$

elde edilir.  $(\omega \times r_G) \times v_0 = -v_0 \times (\omega \times r_G)$  ilişkisi ve (2.20) eşitliği (2.26)'da yerleştirildiğinde,

$$I_0^0 \dot{\omega} + \omega \times (I_0 \omega) + m r_G \times (\dot{v}_0 + \omega \times v_0) = m \dot{c} \quad (2.27)$$

moment ifadesi elde edilir. Burada,  $r_G = [x_G, y_G, z_G]^T$  ağırlık merkezi ve  $I_0$  'O' noktasına göre atalet tensörüdür.

$$I_0 \approx \begin{bmatrix} I_x & -I_{xy} & -I_{xz} \\ -I_{yx} & I_y & -I_{yz} \\ -I_{zx} & -I_{zy} & I_z \end{bmatrix}; \quad I_0 = I_0^T > 0; \quad \dot{I}_0 = 0 \quad (2.28)$$

$I_x, I_y$  ve  $I_z$  terimleri  $X_0, Y_0$  ve  $Z_0$  eksenlerindeki atalet momentleridir. Eksenler etrafındaki atalet momentleri  $I_x, I_y, I_z$  ve  $I_{xy} = I_{yx}, I_{xz} = I_{zx}$  ve  $I_{yz} = I_{zy}$  ve gövdeye sabitlenmiş  $X_0 Y_0 Z_0$  koordinat sisteminin orijini kütle merkezi seçilerek moment deklemleri aşağıdaki gibi basitleşir.

$$I_0^0 \dot{\omega} + \omega \times (I_0 \omega) = m \dot{c} \quad (2.29)$$

Sonuç olarak atalet tensörünün (2.27)'de yerleştirilmesi ile altı serbestlik dereceli hareket denklemleri,

$$\begin{aligned} m [\dot{u} - v r + w q - x_G (q^2 + r^2) + y_G (qp - \dot{r}) + z_G (pr + \dot{q})] &= X \\ m [\dot{v} - w p + u r - y_G (p^2 + r^2) + z_G (qr - \dot{p}) + x_G (pq + \dot{r})] &= Y \\ m [\dot{w} - u q + v p - z_G (p^2 + q^2) + x_G (rq - \dot{q}) + y_G (qr + \dot{p})] &= Z \end{aligned} \quad (2.30a)$$

$$\begin{aligned}
I_x \dot{p} + (I_z - I_y)qr - (\dot{r} + pq)I_{xz} + (r^2 - q^2)I_{yz} + (pr - \dot{q})I_{xy} \\
+ m[y_G(\dot{w} - uq + vp) - z_G(\dot{v} - wp + ur)] = K \\
I_y \dot{q} + (I_x - I_z)rp - (\dot{p} + qr)I_{yx} + (p^2 - r^2)I_{xz} + (qp - \dot{r})I_{yz} \\
+ m[z_G(\dot{u} - vr + wq) - x_G(\dot{w} - uq + vp)] = M \\
I_z \dot{r} + (I_y - I_x)pq - (\dot{q} + rp)I_{zy} + (q^2 - p^2)I_{xy} + (rq - \dot{p})I_{zx} \\
+ m[x_G(\dot{v} - wp + ur) - y_G(\dot{u} - vr + wq)] = N
\end{aligned} \tag{2.30b}$$

biçiminde ifade edilir (Lloyd, 1975). Burada,  $u, v, w$  doğrusal hız ve  $p, q, r$  açısız hız bileşenlerini;  $X, Y, Z$  kuvvet ve  $K, M, N$  moment bileşenlerini göstermektedirler. İlk üç eşitlik öteleme hareketini temsil ederken, son üç eşitlik de dönme hareketini temsil etmektedir. Hidrodinamik etkiler altında, zorlayıcı çevre etkilerinin mevcut olmadığı altı serbestlik dereceli nonlinear gemi hareket denklemleri vektörel olarak aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$M_{RG} \dot{v} + C(v)_{RG} v = \tau_{RG} \tag{2.31}$$

$M_{RG}$ , rijid gövde atalet matrisi,  $C(v)_{RG}$  terimi Coriolis vektörüdür. Rijid gövde atalet matrisi,

$$M_{RG} = \begin{bmatrix} m & 0 & 0 & 0 & mz_G & -my_G \\ 0 & m & 0 & -mz_G & 0 & mx_G \\ 0 & 0 & m & my_G & -mx_G & 0 \\ 0 & -mz_G & my_G & I_x & -I_{xy} & -I_{xz} \\ mz_G & 0 & -mx_G & -I_{yx} & I_y & -I_{yz} \\ -my_G & mx_G & 0 & -I_{zx} & -I_{zy} & I_z \end{bmatrix}, \quad v = \begin{bmatrix} \dot{u} \\ \dot{v} \\ \dot{w} \\ \dot{p} \\ \dot{q} \\ \dot{r} \end{bmatrix} \tag{2.32}$$

elde edilir (Fossen ve Fjellstad, 1995). (2.30) eşitliğinden faydalanarak  $\omega \times v$  ve  $\omega \times (\omega \times r_G)$  terimlerinin içeren rijid gövdeye ait  $C_{RG}(v)$ , Coriolis matrisi,

$$C_{RG}(\nu) \cong \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ -m(y_G q + z_G r) & m(y_G p + w) & m(z_G p - v) \\ m(x_G q - w) & -m(z_G r + x_G p) & m(z_G q + u) \\ m(x_G r + v) & m(y_G r - u) & -m(x_G p + y_G q) \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} m(y_G q + z_G r) & -m(x_G q - w) & -m(x_G r + v) \\ -m(y_G p + w) & m(z_G r + x_G p) & -m(y_G r - u) \\ -m(z_G p - v) & -m(z_G q + u) & m(x_G p + y_G q) \\ 0 & -I_{yz} q - I_{xz} p + I_z r & I_{yz} r + I_{xy} p - I_y q \\ I_{yz} q + I_{xz} p - I_z r & 0 & -I_{xz} r - I_{xy} q + I_x p \\ -I_{yz} r - I_{xy} p + I_y q & I_{xz} r + I_{xy} q - I_x p & 0 \end{bmatrix}, \nu = \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \\ p \\ q \\ r \end{bmatrix} \quad (2.33)$$

$$\tau_{RG} = [X \ Y \ Z \ K \ M \ N]^T \quad (2.34)$$

ile gösterilir (Fossen, 1994).

### 2.3 Hidrodinamik Kuvvet ve Momentler

Gemi birleşik hareketlerini elde edebilmek için gemiye etkiyen zorlayıcı kuvvet ve momentlerin hesaplanması gerekir. Bu kuvvetler hidrodinamik, doğrultucu ve ek kütle atalet kuvvetleridir. Herhangi bir anda gemi birim boyuna etkiyen kuvvet ve momentler,

$$\tau_H = \underbrace{-M_A \dot{v} - C_A(v)v}_{\text{Ek kütle}} - \underbrace{D_p(v)v}_{\text{Sönüm}} - \underbrace{G(\eta)}_{\text{Doğrultucu kuvvetler}} \quad (2.35)$$

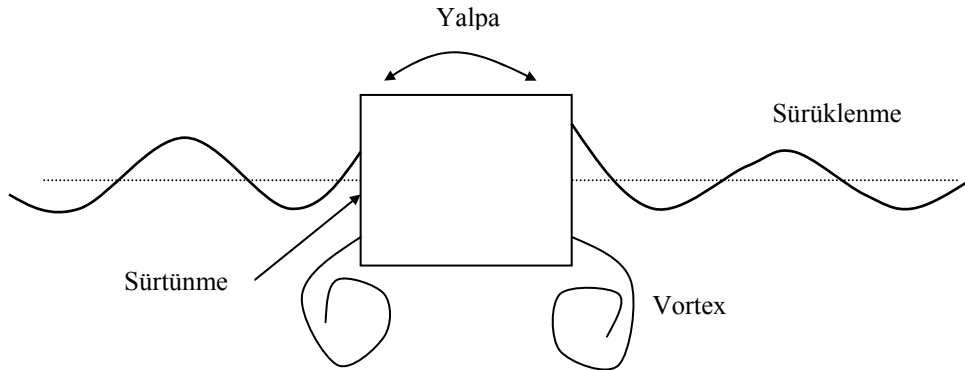
sembolik olarak ifade edilir. Burada  $M_A$  ve  $C_A$  ek su kütlesi,  $D_p$  potansiyel sönüm kuvveti katsayısı ve  $G$  doğrultucu kuvvet katsayılarıdır. Hidrodinamik ek kütle kuvvetleri, geminin ivmeli hareketiyle beraber gemi hareketine ters yönde meydana gelir. Gemiye etkiyen doğrultucu moment yatırıcı kuvvete zıt yönde ve kaldırıcı su kuvvetlerinin momentine eşittir. Sönüm kuvveti, geminin hareketi ile iki yanında meydana gelen dalgalar, gövdeden aldıkları potansiyel enerji ile sönüm etkisini oluşturur. Potansiyel sönüm, hareket ile meydana gelen diğer sönüm etkilerini de içerir (Şekil 2.3). Bunlar,

1. Yüzey sürtünme sönümü
2. Dalga sürüklenme sönümü
3. Vortex sönümü veya viskoz sönüm ile tanımlanır.

$$D_p(v) = \underbrace{-D_S(v)v}_{\text{Yüzey sürtünmesi}} - \underbrace{D_D(v)v}_{\text{Dalga sürüklenme sönümü}} - \underbrace{D_V(v)v}_{\text{Vortex sönümü}} \quad (2.36)$$

Sönüm kuvvetleri, hidrodinamik ve potansiyel sönüm eşitliklerinin toplamı ile gösterilir.

$$D(v) \cong D_p(v) + D_H(v) \quad (2.37)$$



Şekil 2.3 Potansiyel sönüm etkilerinin gösterimi

Gemiyi harekete zorlayan dış kuvvetler üç farklı gruba ayrılır.

1. Dalgalar
2. Rüzgâr
3. Akıntı
4. Hidrodinamik kuvvetler.

$$\tau = \tau_{dalga} + \tau_{rüzgar} + \tau_{akıntı} + \tau_H \quad (2.38)$$

gibi istenmeyen kuvvetler mevcuttur. Bu kuvvetlere genel bozucu etkiler denir. Rota tutuşunda karşılaşılan en önemli denge bozucu etkenler deniz dalgaları ile ani rüzgâr sağanaklarıdır.

### 2.3.1 Ek Kütle Ataletinin Gemi Hareketine Etkisi

Katı cisim, sıvı içindeki ivmeli hareketi esnasında ivmesi ile orantılı, hareketinin zıt yönünde hidrodinamik bir atalet kuvveti ile karşılaşır. Geminin su yüzeyinde hareketiyle doğan su kuvvet ve momentlerinin gemi hız ve ivmesine bağlı oldukları kabul edilecektir. Bu halde kuvvetler,

$$X = X(u, v, w, p, q, r, \dot{u}, \dot{v}, \dot{w}, \dot{p}, \dot{q}, \dot{r})$$

$$Y = Y(u, v, w, p, q, r, \dot{u}, \dot{v}, \dot{w}, \dot{p}, \dot{q}, \dot{r})$$

$$Z = Z(u, v, w, p, q, r, \dot{u}, \dot{v}, \dot{w}, \dot{p}, \dot{q}, \dot{r})$$

momentler,

$$K = K(u, v, w, p, q, r, \dot{u}, \dot{v}, \dot{w}, \dot{p}, \dot{q}, \dot{r}) \quad (2.39)$$

$$M = M(u, v, w, p, q, r, \dot{u}, \dot{v}, \dot{w}, \dot{p}, \dot{q}, \dot{r})$$

$$N = N(u, v, w, p, q, r, \dot{u}, \dot{v}, \dot{w}, \dot{p}, \dot{q}, \dot{r})$$

şeklinde ifade edilir. Bu kuvvet ve moment eşitlikleri akışkan kinetik enerji ifadesinden elde edilir (Lamb, 1932).

$$T_A = \frac{1}{2} \nu^T M_A \nu \quad (2.40)$$

Burada  $M_A$  atalet matrisini ifade eder (Fossen ve Fjellstad, 1995).

$$M_A \cong - \begin{bmatrix} X_{\dot{u}} & X_{\dot{v}} & X_{\dot{w}} & X_{\dot{p}} & X_{\dot{q}} & X_{\dot{r}} \\ Y_{\dot{u}} & Y_{\dot{v}} & Y_{\dot{w}} & Y_{\dot{p}} & Y_{\dot{q}} & Y_{\dot{r}} \\ Z_{\dot{u}} & Z_{\dot{v}} & Z_{\dot{w}} & Z_{\dot{p}} & Z_{\dot{q}} & Z_{\dot{r}} \\ K_{\dot{u}} & K_{\dot{v}} & K_{\dot{w}} & K_{\dot{p}} & K_{\dot{q}} & K_{\dot{r}} \\ M_{\dot{u}} & M_{\dot{v}} & M_{\dot{w}} & M_{\dot{p}} & M_{\dot{q}} & M_{\dot{r}} \\ N_{\dot{u}} & N_{\dot{v}} & N_{\dot{w}} & N_{\dot{p}} & N_{\dot{q}} & N_{\dot{r}} \end{bmatrix}, \quad \dot{v} = \begin{bmatrix} \dot{u} \\ \dot{v} \\ \dot{w} \\ \dot{p} \\ \dot{q} \\ \dot{r} \end{bmatrix} \quad (2.41)$$

Örnek olarak eksenlerdeki bazı ek su kuvveti türevleri aşağıdaki gibidir.

$$X_{\dot{u}} \cong \frac{\partial X}{\partial \dot{u}}, \quad X_{\dot{v}} \cong \frac{\partial X}{\partial \dot{v}}, \quad X_{\dot{w}} \cong \frac{\partial X}{\partial \dot{w}} \quad (2.42)$$

Bir başka ifade ile 'X' eksenini doğrultusunda ilerleme, yan öteleme ve dalıp-çıkma doğrultusunda oluşan hidrodinamik ek kütle kuvvetidir. Akışkanın viskoz olmadığı, gövdenin battığı kabulü yapılarak enerji ifadesi elde edilir (Faltinsen, 1990).

$$2T_A = -X_{\dot{u}}u^2 - Y_{\dot{v}}v^2 - Z_{\dot{w}}w^2 - 2Y_{\dot{w}}vw - 2X_{\dot{w}}wu - 2X_{\dot{v}}uv - K_{\dot{p}}p^2 - M_{\dot{q}}q^2 - N_{\dot{r}}r^2 - 2M_{\dot{r}}qr - 2K_{\dot{r}}rp - 2K_{\dot{q}}pq - 2\left[p(X_{\dot{p}}u + Y_{\dot{p}}v + Z_{\dot{p}}w) + q(X_{\dot{q}}u + Y_{\dot{q}}v + Z_{\dot{q}}w) + r(X_{\dot{r}}u + Y_{\dot{r}}v + Z_{\dot{r}}w)\right] \quad (2.43)$$

(2.43) eşitliğinin eksenlere göre kısmi türevi alındığında hidrodinamik kuvvetler,

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial T_A}{\partial u} = r \frac{\partial T_A}{\partial v} - q \frac{\partial T_A}{\partial w} - X_A \quad (2.44a)$$

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial T_A}{\partial v} = p \frac{\partial T_A}{\partial w} - r \frac{\partial T_A}{\partial u} - Y_A \quad (2.44b)$$

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial T_A}{\partial w} = q \frac{\partial T_A}{\partial u} - p \frac{\partial T_A}{\partial v} - Z_A \quad (2.44c)$$

hidrodinamik momentler,

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial T_A}{\partial p} = w \frac{\partial T_A}{\partial v} - v \frac{\partial T_A}{\partial w} + r \frac{\partial T_A}{\partial q} - q \frac{\partial T_A}{\partial r} - K_A \quad (2.44d)$$

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial T_A}{\partial q} = u \frac{\partial T_A}{\partial w} - w \frac{\partial T_A}{\partial u} + p \frac{\partial T_A}{\partial r} - r \frac{\partial T_A}{\partial p} - M_A \quad (2.44e)$$

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial T_A}{\partial r} = v \frac{\partial T_A}{\partial u} - u \frac{\partial T_A}{\partial v} + q \frac{\partial T_A}{\partial p} - p \frac{\partial T_A}{\partial q} - N_A \quad (2.44f)$$

diferansiyel biçimde hesaplanabilir. (2.44) eşitlikleri her bir eksen için ayrı ayrı yazılırsa,

ilerleme ek su kütle kuvveti,

$$X_A = X_{\dot{u}}\dot{u} + X_{\dot{w}}(\dot{w} + uq) + X_{\dot{q}}\dot{q} + Z_{\dot{w}}wq + Z_{\dot{q}}q^2 + X_{\dot{v}}\dot{v} + X_{\dot{p}}\dot{p} + X_{\dot{r}}\dot{r} - Y_{\dot{v}}vr - Y_{\dot{p}}rp - Y_{\dot{r}}r^2 - X_{\dot{v}}ur - Y_{\dot{w}}wr + Y_{\dot{v}}vq + Z_{\dot{p}}pq - (Y_{\dot{q}} - Z_{\dot{r}})qr \quad (2.45a)$$

yan öteleme ek su kütle kuvveti,

$$Y_A = X_{\dot{v}}\dot{u} + Y_{\dot{w}}\dot{w} + Y_{\dot{q}}\dot{q} + Y_{\dot{v}}\dot{v} + Y_{\dot{p}}\dot{p} + Y_{\dot{r}}\dot{r} + X_{\dot{v}}vr - Y_{\dot{w}}vp + X_{\dot{r}}r^2 + (X_{\dot{p}} - Z_{\dot{r}})rp - Z_{\dot{p}}p^2 - X_{\dot{w}}(up - wr) + X_{\dot{u}}ur - Z_{\dot{w}}wp - Z_{\dot{q}}pq + X_{\dot{q}}qr \quad (2.45b)$$

dalıp-çıkma ek su kütle kuvveti,

$$Z_A = X_{\dot{w}}(\dot{u} - wq) + Z_{\dot{w}}\dot{w} + Z_{\dot{q}}\dot{q} - X_{\dot{u}}uq - X_{\dot{q}}q^2 + Y_{\dot{w}}\dot{v} + Z_{\dot{p}}\dot{p} + Z_{\dot{r}}\dot{r} + Y_{\dot{v}}vp + Y_{\dot{r}}rp + Y_{\dot{p}}p^2 - X_{\dot{v}}up + Y_{\dot{w}}wp - X_{\dot{v}}vq - (X_{\dot{p}} - Y_{\dot{q}})pq - X_{\dot{r}}qr \quad (2.45c)$$

yalpa ek su kütle momenti,

$$K_A = X_{\dot{p}}\dot{u} + Z_{\dot{p}}\dot{w} + K_{\dot{q}}\dot{q} - X_{\dot{v}}wu + X_{\dot{r}}uq - Y_{\dot{w}}w^2 - (Y_{\dot{q}} - Z_{\dot{r}})wq + M_{\dot{r}}q^2 + Y_{\dot{p}}\dot{v} + K_{\dot{p}}\dot{p} + K_{\dot{r}}\dot{r} - Y_{\dot{w}}v^2 - (Y_{\dot{q}} - Z_{\dot{r}})vr + Z_{\dot{p}}vp - M_{\dot{r}}r^2 - K_{\dot{q}}rp + X_{\dot{w}}uv - (Y_{\dot{v}} - Z_{\dot{w}})vw - (Y_{\dot{r}} + Z_{\dot{q}})wr - Y_{\dot{p}}wp - X_{\dot{q}}ur + (Y_{\dot{r}} + Z_{\dot{q}})vq + K_{\dot{r}}pq - (M_{\dot{q}} - N_{\dot{r}})qr \quad (2.45d)$$

baş-kıç vurma ek su kütle momenti,

$$M_A = X_{\dot{q}}(\dot{u} + wq) + Z_{\dot{q}}(\dot{w} - uq) + M_{\dot{q}}\dot{q} - X_{\dot{w}}(u^2 - w^2) - (Z_{\dot{w}} - X_{\dot{u}})wu + Y_{\dot{q}}\dot{v} + K_{\dot{q}}\dot{p} + M_{\dot{r}}\dot{r} - Y_{\dot{p}}vr - Y_{\dot{r}}vp - K_{\dot{r}}(p^2 - r^2) + (K_{\dot{p}} - N_{\dot{r}})rp - Y_{\dot{w}}uv + X_{\dot{v}}vw - (X_{\dot{r}} + Z_{\dot{p}})(up - wr) - (X_{\dot{p}} - Z_{\dot{r}})(wp + ur) - M_{\dot{r}}pq + K_{\dot{q}}qr \quad (2.45e)$$

savrulma ek su kütle momenti eksenlere bağlı olarak,

$$N_A = X_{\dot{r}}\dot{u} + Z_{\dot{r}}\dot{w} + M_{\dot{r}}\dot{q} + X_{\dot{v}}u^2 + Y_{\dot{w}}wu - (X_{\dot{p}} - Y_{\dot{q}})uq - Z_{\dot{p}}wq - K_{\dot{q}}q^2 + Y_{\dot{r}}\dot{v} + K_{\dot{r}}\dot{p} + N_{\dot{r}}\dot{r} - X_{\dot{v}}v^2 - X_{\dot{r}}vr - (X_{\dot{p}} - Y_{\dot{q}})vp + M_{\dot{r}}rp + K_{\dot{q}}p^2 - (X_{\dot{u}} - Y_{\dot{v}})uv - X_{\dot{w}}vw + (X_{\dot{q}} + Y_{\dot{p}})up + Y_{\dot{r}}ur + Z_{\dot{q}}wp - (X_{\dot{q}} + Y_{\dot{p}})vq - (K_{\dot{p}} - M_{\dot{q}})pq - K_{\dot{r}}qr \quad (2.45f)$$

elde edilir (Implay, 1961). (2.45) denklemlerinden Coriolis matrisi her bir eksene,

$$C_A(v) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & -a_3 & a_2 \\ 0 & 0 & 0 & a_3 & 0 & -a_1 \\ 0 & 0 & 0 & -a_2 & a_1 & 0 \\ 0 & -a_3 & a_2 & 0 & -b_3 & b_2 \\ a_3 & 0 & -a_1 & b_3 & 0 & -b_1 \\ -a_2 & a_1 & 0 & -b_2 & b_1 & 0 \end{bmatrix}, v = \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \\ p \\ q \\ r \end{bmatrix} \quad (2.46)$$

bağlı olarak ifade edilir (Berge ve Fossen, 2000). Coriolis matrisindeki a ve b değişkenleri,

$$\begin{aligned}
a_1 &= X_{\dot{u}}u + X_{\dot{v}}v + X_{\dot{w}}w + X_{\dot{p}}p + X_{\dot{q}}q + X_{\dot{r}}r \\
a_2 &= X_{\dot{v}}u + Y_{\dot{v}}v + Y_{\dot{w}}w + Y_{\dot{p}}p + Y_{\dot{q}}q + Y_{\dot{r}}r \\
a_3 &= X_{\dot{w}}u + Y_{\dot{w}}v + Z_{\dot{w}}w + Z_{\dot{p}}p + Z_{\dot{q}}q + Z_{\dot{r}}r \\
b_1 &= X_{\dot{p}}u + Y_{\dot{p}}v + Z_{\dot{p}}w + K_{\dot{p}}p + K_{\dot{q}}q + K_{\dot{r}}r \\
b_2 &= X_{\dot{q}}u + Y_{\dot{q}}v + Z_{\dot{q}}w + K_{\dot{q}}p + M_{\dot{q}}q + M_{\dot{r}}r \\
b_3 &= X_{\dot{r}}u + Y_{\dot{r}}v + Z_{\dot{r}}w + K_{\dot{r}}p + M_{\dot{r}}q + N_{\dot{r}}r
\end{aligned} \tag{2.47}$$

şeklinde gösterilir.

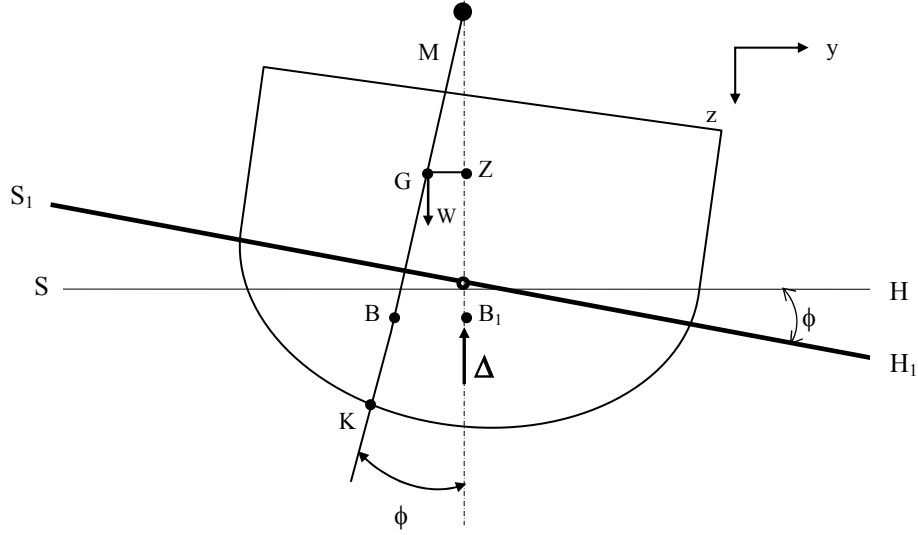
### 2.3.2 Sönüm Kuvvet ve Momentleri

Su yüzeyinde yüzen bir geminin hidrodinamik etki ile dengesi bozulursa sönüm kuvvet ve momentleri oluşur. Gemiye etkileyen potansiyel sönüm etkisi dikkate alındığında herbir eksenindeki sönüm kuvvet ve matrisi aşağıdaki gibidir (Berge ve Fossen, 2000).

$$D(v) = - \begin{bmatrix} X_u & X_v & X_w & X_p & X_q & X_r \\ Y_u & Y_v & Y_w & Y_p & Y_q & Y_r \\ Z_u & Z_v & Z_w & Z_p & Z_q & Z_r \\ K_u & K_v & K_w & K_p & K_q & K_r \\ M_u & M_v & M_w & M_p & M_q & M_r \\ N_u & N_v & N_w & N_p & N_q & N_r \end{bmatrix}, \quad v = \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \\ p \\ q \\ r \end{bmatrix} \tag{2.48}$$

### 2.3.3 Doğrultucu Kuvvet ve Momentleri

Bir geminin denge durumundan dalga kuvveti ile yatırıldıktan sonra geminin eski konumuna dönebilmesi için zıt yönde doğrultucu kuvvet ve momentler oluşur. Hidrodinamik terminolojide, ağırlık merkezi ve hacim merkezi kuvvetleri doğrultucu kuvvet olarak adlandırılır. Ağırlık merkezi kuvveti ‘ $W$ ’, geminin ağırlık merkezine  $r_G = [x_G, y_G, z_G]^T$  etkiyecektir. Benzer olarak su altı hacim merkezi kuvveti ‘ $B$ ’, hacim merkezine  $r_B = [x_B, y_B, z_B]^T$  etkiyecektir (Şekil 2.4).



Şekil 2.4 Yalpa hareketinde kuvvetler

Geminin ağırlıkları toplamı 'W' geminin ağırlık merkezinden düşey doğrultuda, 'Δ' suyun kaldırma kuvvetleri geminin su altı hacim merkezi B<sub>1</sub>'den yukarı doğrultuda gemiye etkiyeceklerdir. Simetrik olan gemi gövdesi doğrultucu 'G' matrisi aşağıdaki formda olur.

$$G = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & Y_\phi & 0 & 0 \\ 0 & 0 & Z_z & 0 & Z_\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & K_\phi & 0 & 0 \\ 0 & 0 & M_z & 0 & M_\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & N_\phi & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad \eta = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ \phi \\ \theta \\ \psi \end{bmatrix} \quad (2.49)$$

Doğrultucu kuvvetler yalnızca dalıp çıkma, baş kış vurma ve yalpa modlarında etki etmektedir.  $Y_\theta Z_\theta$  düzlemi simetrik kabul edilirse dalıp çıkma kuvvet ve baş kış vurma momentleri,  $Z_\theta = M_z = 0$  olur. Eksenlerdeki kuvvet ve moment bileşenleri,

$$K_\phi = -\rho g \nabla (z_B - z_G) + \rho g \iint_A y^2 dA \cong -\rho g \nabla GM_T \quad (2.50)$$

$$M_\theta = -\rho g \nabla (z_B - z_G) + \rho g \iint_A x^2 dA \cong -\rho g \nabla GM_L \quad (2.51)$$

yoğunluk, yerçekimi ivmesi ve ağırlık merkezi koordinatlarına bağlı olarak ifade edilir.  $GM$  değerine geminin metasantr yüksekliği denir.

$\rho$  : Su yoğunluğu (kg /m<sup>3</sup>)       $g$  : Yerçekimi ivmesi (m/s<sup>2</sup>)

$z_G$	:	z eksenindeki ağırlık merkezi (m)
$z_B$	:	z eksenindeki hacim merkezi (m)
$\nabla$	:	Deplasman yapan su hacmi ( $m^3$ )
$A$	:	Su düzlemi yüzey alanı ( $m^2$ )
$GM_T$	:	Enine metasentrik yükseklik (m)
$GM_L$	:	Boyuna metasentrik yükseklik (m)
$K_\phi$	:	Boyutsuz yalpa hidrodinamik momenti
$M_\theta$	:	Boyutsuz baş-kıç vurma hidrodinamik momenti

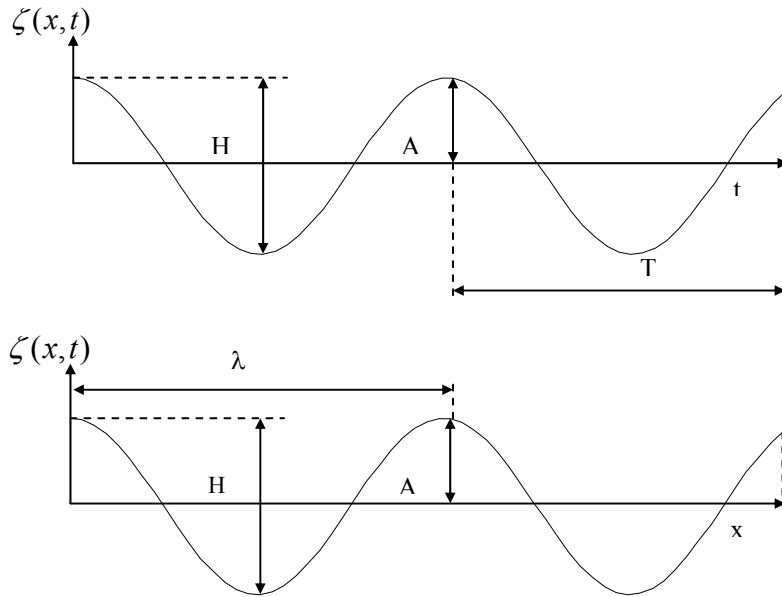
#### 2.4 Dalga Kuvvet ve Momentleri

Herhangi bir dış etki ile dengesi bozulan durgun su yüzeyinin yer çekimi nedeniyle tekrar eski konumuna dönebilmesi için yapmış olduğu hareketler su yüzeyindeki dalga hareketlerini oluşturur. X eksenini yönünde ilerleyen iki boyutlu düzgün dalga profili,

$$\zeta(x,t) = A_i \cos(\omega_i t - k_i x + \varepsilon) \quad (2.52)$$

sinüs fonksiyonu olarak ifade edilir. Burada, ‘ $A_i$ ’ dalga genliği, ‘ $\varepsilon$ ’ faz açısı, ‘ $\lambda$ ’ dalga uzunluğu,  $k_i = \frac{2\pi}{\lambda_i}$ , dalga sayısı, i.nci dalga frekansı,  $\omega_i = \frac{2\pi}{T_i}$  ve ‘H’ dalga yüksekliğidir.

Şekil 2.5’de basit bir dalgaya ait profil şekli gösterilmiştir (Newmann, 1977).



Şekil 2.5 Sinüzoidal dalga fonksiyonu

Dalgalı denizlerde gemilerin davranışını incelemek için istatistiksel modellerden yararlanır. Yapılan çok sayıda gözlemlerden ve alınan kayıtlardan dalga enerji dağılımını tanımlayan çeşitli formüller geliştirilmiştir. Bunlardan birisi, Pierson ve Moskowitz (PM) (1964) dalga dağılım formülü aşağıdaki gibidir (Şekil 2.6).

$$S(\omega) = A \omega^{-5} \exp(-B\omega^{-4}) \quad (m^2 s) \quad (2.53a)$$

$$A = 8.1 \cdot 10^{-3} g^2 \quad (2.53b)$$

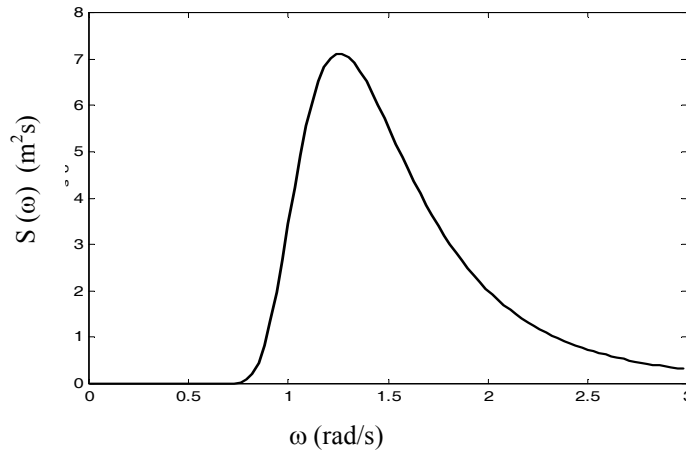
$$B = 0.74 \left( \frac{g}{V_r} \right)^4 \quad (2.53c)$$

' $V_r$ ' 19,4 m yüksekliğindeki rüzgâr hızı,  $g$  yerçekimi ivmesidir. Dalga etkileri önemli dalga yüksekliklerine bağlı olarak,

$$B = 0.0323 \left( \frac{g}{H_s} \right)^2 = \frac{3}{H_s^2} \quad (2.54)$$

ifade edilir. Önemli dalga yüksekliği  $H_s$  ile rüzgâr hızı arasındaki ilişki aşağıdaki gibidir.

$$H_s = 0.21 \frac{V_r^2}{g} \quad (2.55)$$



Şekil 2.6 PM dağılım fonksiyonu, (1 knots = 0.51 m/s)

Simülasyon çalışmalarında kullandığımız PM dalga modeli Saelid, Jenssen ve Balchen (1983)

$$h(s) = \frac{K_\omega s}{s^2 + 2\xi\omega_e s + \omega_e^2} \quad (2.56)$$

tarafından ifade edilmiştir. Burada,  $K_\omega$  dalga şiddetine bağlı katsayı,  $\xi$  sönüm sabiti,  $\omega_e$  karşılaşma frekansdır. Uygulamalarda sönüm sabiti  $\xi = 0.05 - 0.1$ , karşılaşma frekansı

$\omega_e = 0.3 - 1.3$  rad/s değerleri arasında seçilir (Tzeng ve Chen, 1999). Dalga kuvvet ve momentleri Zuidweg (1970) tarafından aşağıdaki kabuller yapılarak ifade edilmiştir.

1. Kuvvet ve momentler ıslak yüzeye etkir.
2. Dalga alanı gemi tarafında bozulmamaktadır.

L uzunluğunda, B genişliğinde, T yüksekliğinde, dikdörtgen şeklinde bir gemiye etkiyen dalga kuvvet ve momentleri (Kallström vd. 1979 ),

$$X_{dalga}(t) = \sum_{i=1}^N \rho g B L T \cos \beta s_i(t) \quad (2.57a)$$

$$Y_{dalga}(t) = \sum_{i=1}^N -\rho g B L T \sin \beta s_i(t) \quad (2.57b)$$

$$N_{dalga}(t) = \sum_{i=1}^N \frac{1}{24} \rho g B L (L^2 - B^2) \sin 2\beta s_i^2(t) \quad (2.57c)$$

$\beta$  karşılaşma açısına bağlı olarak ifade edilir. Dalga meyili aşağıdaki gibi hesaplanabilir.

$$s_i(t) = s_i(0, t) = A_i k_i \sin(\omega_{ei}t + \varepsilon_i) \quad (2.58)$$

Her bir eksenindeki dalga kuvvet ve momentleri genel formda,

$$\tau_{dalga} = [X_{dalga}, Y_{dalga}, Z_{dalga}, K_{dalga}, M_{dalga}, N_{dalga}]^T \quad (2.59)$$

ifade edilebilir.

## 2.5 Hidrodinamik ve Çevre Etkilerinin İlave Edildiği Nonlineer Gemi Hareketleri

Hidrodinamik etkilerin ilave edildiği hareket denklemleri aşağıdaki gibi ifade edilir.

İlerleme hareket dinamiği,

$$\begin{aligned} & (m - X_{\dot{u}})\dot{u} - X_{\dot{v}}\dot{v} - X_{\dot{w}}\dot{w} - X_{\dot{p}}\dot{p} + (m z_G - X_{\dot{q}})\dot{q} - (m y_G + X_{\dot{r}})\dot{r} - (X_{\dot{w}}q - X_{\dot{v}}r)u + (Y_{\dot{v}}r + Y_{\dot{w}}q)v \\ & - (Z_{\dot{w}}q - Y_{\dot{w}}r)w + [(m y_G + Z_{\dot{p}})q + (m z_G + Y_{\dot{p}})r]p - [(m x_G + Z_{\dot{q}})q + m w]q - [(m x_G r + Y_{\dot{r}})r - m v]r \\ & - (Y_{\dot{q}} - Z_{\dot{r}})qr - (X_u u + X_v v + X_w w + X_p p + X_q q + X_r r) = X_{da1ga} \end{aligned} \quad (2.60a)$$

yan öteleme hareket dinamiği,

$$\begin{aligned} & -X_{\dot{v}}\dot{u} + (m - Y_{\dot{v}})\dot{v} - Y_{\dot{w}}\dot{w} - (m z_G - Y_{\dot{p}})\dot{p} - Y_{\dot{q}}\dot{q} + (m x_G - Y_{\dot{r}})\dot{r} + (-X_{\dot{v}}r + Y_{\dot{w}}p)v + (X_{\dot{w}}p - X_{\dot{u}}r)u \\ & + (Z_{\dot{w}}p - X_{\dot{w}}r)w + [-(m y_G p - Z_{\dot{p}})p + m w - X_{\dot{p}}r]p + [(m z_G - X_{\dot{q}})r + (m x_G + Z_{\dot{q}})p]q \\ & [- (m y_G - X_{\dot{r}} + u)r + Z_{\dot{r}}p]r - (Y_u u + Y_v v + Y_w w + Y_p p + Y_q q + Y_r r) + Y_{\phi}\phi = Y_{da1ga} \end{aligned} \quad (2.60b)$$

dalıp-çıkma hareket dinamiği,

$$\begin{aligned} & -X_{\dot{w}}\dot{u} - Y_{\dot{w}}\dot{v} + (m - Z_{\dot{w}})\dot{w} + (m y_G - Z_{\dot{p}})\dot{p} - (m x_G + Z_{\dot{q}})\dot{q} - Z_{\dot{r}}\dot{r}(X_{\dot{u}}q - X_{\dot{v}}p)u + (Y_{\dot{v}}p + X_{\dot{v}}q)v \\ & + (X_{\dot{w}}q - Y_{\dot{w}}p)w + [-(m z_G + Y_{\dot{p}})p + m v + X_{\dot{p}}q]p + [-(m z_G - X_{\dot{q}})q - m u + Y_{\dot{q}}p]q \\ & + [(m x_G + X_{\dot{r}} + y_G)q - Y_{\dot{r}}p]r - (Z_u u + Z_v v + Z_w w + Z_p p + Z_q q + Z_r r) + Z_z z + Z_{\theta}\theta = Z_{da1ga} \end{aligned} \quad (2.60c)$$

yalpa hareket dinamiği,

$$\begin{aligned} & -X_{\dot{p}}\dot{u} - (m z_G + K_{\dot{v}})\dot{v} + (m y_G - Z_{\dot{p}})\dot{w} + (I_x - K_{\dot{p}})\dot{p} - (I_{xy} + K_{\dot{q}})\dot{q} - (I_{xz} + K_{\dot{r}})\dot{r} \\ & [- (m y_G + X_{\dot{r}})q - (m z_G - X_{\dot{q}})r + X_{\dot{v}}w - X_{\dot{w}}v]u + (m y_G p + Y_{\dot{v}}w - Y_{\dot{w}}v - Y_{\dot{r}}q)v + (m z_G p - Z_{\dot{w}}v)w \\ & (Y_{\dot{w}}w + Z_{\dot{r}}q - Z_{\dot{q}}r)w - (Z_p v + K_{\dot{q}}r + Y_{\dot{p}}w - K_{\dot{r}}q)p + [-(I_{yz} + M_{\dot{r}})q - I_{xz}p + (I_z + M_{\dot{q}})r + Y_{\dot{q}}w]q \\ & - Z_{\dot{q}}vq + [(I_{yz} + M_{\dot{r}})r + I_{xy}p + (-I_y + N_{\dot{r}})q + (Y_{\dot{q}} - Z_{\dot{r}})v + Y_{\dot{r}}w]r - (K_u u + K_v v + K_w w + K_p p \\ & K_q q + K_r r) + W GM \phi = K_{da1ga} \end{aligned} \quad (2.60d)$$

baş-kıç vurma hareket dinamiği,

$$\begin{aligned} & (m z_G - X_{\dot{q}})\dot{u} - Y_{\dot{q}}\dot{v} - (m x_G + Z_{\dot{q}})\dot{w} - (I_{xy} + K_{\dot{q}})\dot{p} + (I_y - M_{\dot{q}})\dot{q} + (-I_{yz} - M_{\dot{r}})\dot{r} \\ & [- (m - X_{\dot{w}})u + Y_{\dot{w}}v - X_{\dot{u}}w + X_{\dot{r}}p + m x_G - X_{\dot{p}}r]u + (-m z_G r + m x_G p - Y_{\dot{p}}r + Y_{\dot{r}}p - X_{\dot{v}}w)v \\ & (m z_G p + Z_{\dot{w}}u + Z_{\dot{p}}r + Z_{\dot{r}}p)w + [I_{yz}q + (I_{xz} + K_{\dot{r}})p - (I_x + K_{\dot{p}})r - Z_{\dot{p}}u - X_{\dot{p}}w]p - (X_{\dot{q}}w - Z_{\dot{q}}u)q \\ & + (M_{\dot{r}}p - K_{\dot{q}}r)q + [(-I_{xz} + K_{\dot{r}})r + (-I_z + N_{\dot{r}})p - I_{xy}q - X_{\dot{r}}w + Z_{\dot{r}}u]r - (M_u u + M_v v + M_w w \\ & M_p p + M_q q + M_r r) + M_z z + M_{\theta}\theta = M_{da1ga} \end{aligned} \quad (2.60e)$$

savrulma hareket dinamiği,

$$\begin{aligned}
& (-m y_G - X_{\dot{r}}) \dot{u} + (m x_G - N_{\dot{v}}) \dot{v} - Z_{\dot{r}} \dot{w} - (I_{zx} + N_{\dot{p}}) \dot{p} - (I_{yz} + M_{\dot{r}}) \dot{q} + (I_z - N_{\dot{r}}) \dot{r} \\
& (m x_G r + X_{\dot{u}} v - X_{\dot{v}} u + X_{\dot{p}} q + X_{\dot{q}} p) u + (m y_G r - Y_{\dot{v}} u + X_{\dot{v}} v - Y_{\dot{q}} p + Y_{\dot{p}} q) v - (m x_G p + m y_G q) w \\
& + (Y_{\dot{w}} u + Z_{\dot{p}} q + X_{\dot{w}} v - Z_{\dot{q}} p) w + [-I_{yz} r - (I_{xy} p + K_{\dot{q}} p) + (I_y + K_{\dot{p}} q) + X_{\dot{p}} v - Y_{\dot{p}} u] p \\
& [I_{xz} r + (I_{xy} + K_{\dot{q}}) q - I_x p - Y_{\dot{q}} u + X_{\dot{q}} v] q + (X_{\dot{r}} v - M_{\dot{r}} p - Y_{\dot{r}} u + K_{\dot{r}} q) r - (N_u u + N_v v + N_w w \\
& N_p p + N_q q + N_r r) + N_{\phi} \phi = N_{dalg a}
\end{aligned} \tag{2.60f}$$

eşitlikleri ifade edilir. En genel halde altı serbestlik dereceli hareket eşitliği,

$$M \dot{v} + C(v)v + D(v)v + G(\eta) = \tau \tag{2.61}$$

ile ifade edilmiştir. Burada, kütle matrisi sırasıyla (2.32) ve (2.41) rijid ve ek kütle matrisi,

$$M \cong M_{RG} + M_A$$

$$M = \begin{bmatrix} m - X_{\dot{u}} & -X_{\dot{v}} & -X_{\dot{w}} & -X_{\dot{p}} & m z_G - X_{\dot{q}} & -m y_G - X_{\dot{r}} \\ X_{\dot{v}} & m - Y_{\dot{v}} & -Y_{\dot{w}} & -m z_G - Y_{\dot{p}} & -Y_{\dot{q}} & m x_G - Y_{\dot{r}} \\ -X_{\dot{w}} & -Y_{\dot{w}} & m - Z_{\dot{w}} & m y_G - Z_{\dot{p}} & -m x_G - Z_{\dot{q}} & -Z_{\dot{r}} \\ -X_{\dot{p}} & -m z_G - Y_{\dot{p}} & m y_G - Z_{\dot{p}} & I_x - K_{\dot{p}} & -I_{xy} - K_{\dot{q}} & -I_{xz} - K_{\dot{r}} \\ m z_G - X_{\dot{q}} & -Y_{\dot{q}} & -m x_G - Z_{\dot{q}} & -I_{yx} - K_{\dot{q}} & I_y - M_{\dot{q}} & -I_{yz} - M_{\dot{r}} \\ -m y_G + X_{\dot{r}} & m x_G - Y_{\dot{r}} & -Z_{\dot{r}} & -I_{zx} - K_{\dot{r}} & -I_{zy} - M_{\dot{r}} & I_z - N_{\dot{r}} \end{bmatrix} \tag{2.62}$$

ve Coriolis matrisi (2.33) ve (2.46) matrislerinin toplamıdır (Berge ve Fossen, 2000).

$$C(v) \cong C_{RG}(v) + C_A(v)$$

$$C(v) \cong \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ -m(y_G q + z_G r) & m(y_G p + w) - a_3 & m(z_G p - v) + a_2 \\ m(x_G q - w) + a_3 & -m(z_G r + x_G p) & m(z_G q + u) - a_1 \\ m(x_G r + v) - a_2 & m(y_G r - u) + a_1 & -m(x_G p + y_G q) \\ m(y_G q + z_G r) & -m(x_G q - w) - a_3 & -m(x_G r + v) + a_2 \\ -m(y_G p + w) + a_3 & m(z_G r + x_G p) & -m(y_G r - u) - a_1 \\ -m(z_G p - u) - a_2 & -m(z_G q + u) + a_1 & m(x_G p + y_G q) \\ 0 & -I_{yz} q - I_{xz} p + I_z r - N_{\dot{r}} r & I_{yz} r + I_{xy} p - I_y q \\ I_{yz} q + I_{xz} p - I_z r + b_3 & 0 & -I_{xz} r - I_{xy} q + I_x p - b_1 \\ -I_{yz} r - I_{xy} p + I_y q - b_2 & I_{xz} r + I_{xy} q - I_x p + b_1 & 0 \end{bmatrix} \tag{2.63}$$

$$D(v) = - \begin{bmatrix} X_u & X_v & X_w & X_p & X_q & X_r \\ Y_u & Y_v & Y_w & Y_p & Y_q & Y_r \\ Z_u & Z_v & Z_w & Z_p & Z_q & Z_r \\ K_u & K_v & K_w & K_p & K_q & K_r \\ M_u & M_v & M_w & M_p & M_q & M_r \\ N_u & N_v & N_w & N_p & N_q & N_r \end{bmatrix}, \quad v = \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \\ p \\ q \\ r \end{bmatrix} \quad (2.64)$$

$$G = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & Y_\phi & 0 & 0 \\ 0 & 0 & Z_z & 0 & Z_\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & WGM & 0 & 0 \\ 0 & 0 & M_z & 0 & M_\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & N_\phi & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad \eta = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ \phi \\ \theta \\ \psi \end{bmatrix} \quad (2.65)$$

$$\tau = [X_\delta \quad Y_\delta \quad Z_\delta \quad K_\delta \quad M_\delta \quad N_\delta]^T \quad (2.66)$$

ile gösterilir.

## 2.6 Konteyner Gemisi Hareket Analizi

Literatürde verilen çalışmalarda, bir serbestlik dereceli gemi modelinden, çok daha yüksek serbestlik derecesine kadar birçok gemi modeli bulunmaktadır. Bu gemi modelleri taşıdıkları yüklere ve kullanıldıkları alanlara göre farklılık göstermektedir. Sistemin çok serbestlik dereceli olarak kabul edilmesi, çalışmayı oldukça karmaşık hale getireceğinden bu kısımda yalnızca yalpa, savrulma ve yan öteleme hareketleri incelenmiştir. Sakin kabul edilmiş bir deniz ortamında seyir eden bir konteyner gemisi Şekil 2.7’de görülmektedir.



Şekil 2.7 Konteyner gemisi

(2.60) eşitlikleri ile ifade edilen altı serbestlik dereceli hareket denklemleri aşağıdaki kabuller yapılarak üç serbestlik dereceli (savrulma, yalpa ve yan öteleme) harekete indirgenebilir.

1. Ağırlık merkezinin ‘O’ noktasına taşınması,  $r_G = [0, 0, 0]^T$
2.  $X_0Z_0$  simetri düzleminde homojen kütle dağılımı,  $(I_{xy} = I_{yz} = 0)$ .
3. İlerleme, dalıp çıkma, baş kış vurma ve modları ihmal edilirse,  $(u = w = q = \dot{u} = \dot{w} = \dot{q} = 0)$ .
4. Birleşik hareketlerin etkisi ve çevre kuvvetleri ihmal edilirse,

Böylece üç serbestlik dereceli gemi hareketleri konum, hız ve ivme terimlerine bağlı,

$$\text{Yan öteleme} : (m - Y_{\dot{v}})\dot{v} = Y_v v + Y_{\phi}\phi + Y_p p + Y_{\dot{p}}\dot{p} + Y_r r + Y_{\dot{r}}\dot{r} + Y_{\delta}\delta \quad (2.67a)$$

$$\text{Yalpa} : (I_x - K_{\dot{p}})\dot{p} + WGM\phi = K_p p + K_v v + K_{\dot{v}}\dot{v} + K_r r + K_{\dot{r}}\dot{r} + K_{\delta}\delta \quad (2.67b)$$

$$\text{Savrulma} : (I_z - N_{\dot{r}})\dot{r} = N_r r + N_{\phi}\phi + N_p p + N_{\dot{p}}\dot{p} + N_v v + N_{\dot{v}}\dot{v} + N_{\delta}\delta \quad (2.67c)$$

olarak ifade edilir. (2.67) eşitliklerine Laplace dönüşümü uygulandığında frekans düzleminde,

$$[(m - Y_{\dot{v}})s - Y_v]V(s) = (Y_{\phi} + Y_p s + Y_{\dot{p}} s^2)\phi(s) + (Y_r s + Y_{\dot{r}} s^2)\psi(s) + (Y_{\delta})\delta(s) \quad (2.68a)$$

$$[(I_x - K_{\dot{p}})s^2 - K_p s + WGM]\phi(s) = (K_v + K_{\dot{v}} s)V(s) + (K_r s + K_{\dot{r}} s^2)\psi(s) + (K_{\delta})\delta(s) \quad (2.68b)$$

$$[(I_z - N_{\dot{r}})s^2 - N_r s]r(s) = (N_{\phi} + N_p s + N_{\dot{p}} s^2)\phi(s) + (N_v + N_{\dot{v}} s)V(s) + (N_{\delta})\delta(s) \quad (2.68c)$$

yan öteleme, yalpa savrulma ve dümen sapmasına bağlı hareket eşitlikleri elde edilir. Hesaplamalarda kolaylık için (2.68) eşitliği  $a_i$ ,  $b_i$  ve  $c_i$  ifadelerine bağlı olarak gösterilebilir.

$$a_1 V(s) = a_2 \phi(s) + a_3 \psi(s) + a_4 \delta(s) \quad (2.69a)$$

$$b_1 \phi(s) = b_2 V(s) + b_3 \psi(s) + b_4 \delta(s) \quad (2.69b)$$

$$c_1 \psi(s) = c_2 V(s) + c_3 \phi(s) + c_4 \delta(s) \quad (2.69c)$$

Çizelge 2.2  $a_i$ ,  $b_i$  ve  $c_i$  ifadeleri ( $i = 1, \dots, 4$ )

$a_1 = (m - Y_{\dot{v}})s - Y_v$	$b_1 = (I_x - K_{\dot{p}})s^2 - K_p s + WGM$	$c_1 = (I_z - N_{\dot{r}})s^2 - N_r s$
$a_2 = Y_{\dot{p}} s^2 + Y_p s + Y_{\phi}$	$b_2 = K_{\dot{v}} s + K_v$	$c_2 = N_{\dot{v}} s + N_v$
$a_3 = Y_{\dot{r}} s + Y_r$	$b_3 = K_{\dot{r}} s + K_r$	$c_3 = N_{\dot{p}} s^2 + N_p s + N_{\phi}$
$a_4 = Y_{\delta}$	$b_4 = K_{\delta}$	$c_4 = N_{\delta}$

(2.69a) ve (2.69c) eşitliklerinden sırasıyla yan öteleme hız 'v', yalpa açısı ' $\phi$ ' ve savrulma açısı ' $\psi$ ' ile dümen açısı ' $\delta$ ' arasındaki ilişki aşağıdaki gibi elde edilir (Ek 1).

$$\text{Yan öteleme : } G_1 = \frac{V(s)}{\delta(s)} = \frac{a_2 (b_4 c_1 + b_3 c_4) + a_3 (b_4 c_3 + b_1 c_4) + a_4 (b_1 c_1 - b_3 c_3)}{a_1 (b_1 c_1 - b_3 c_3) - a_2 (b_2 c_1 + b_3 c_2) - a_3 (b_1 c_2 + b_2 c_3)} \quad (2.70a)$$

$$\text{Yalpa : } G_2 = \frac{\phi(s)}{\delta(s)} = \frac{a_1 (b_4 c_1 + b_3 c_4) + a_3 (b_2 c_4 - b_4 c_2) + a_4 (b_2 c_1 + b_3 c_2)}{a_1 (b_1 c_1 - b_3 c_3) - a_2 (b_2 c_1 + b_3 c_2) - a_3 (b_1 c_2 + b_2 c_3)} \quad (2.70b)$$

$$\text{Savrulma : } G_3 = \frac{\psi(s)}{\delta(s)} = \frac{a_1 (b_1 c_4 + b_4 c_3) + a_2 (b_4 c_2 - b_2 c_4) + a_4 (b_1 c_2 + b_2 c_3)}{a_1 (b_1 c_1 - b_3 c_3) - a_2 (b_2 c_1 + b_3 c_2) - a_3 (b_1 c_2 + b_2 c_3)} \quad (2.70c)$$

(2.67b)'deki ' $WGM$ ' terimi doğrultucu yalpa momentidir.

$$WGM = \rho g \nabla GZ(\phi) \quad (2.71)$$

' $\nabla$ ', gemi deplasmanı, 'g' yerçekimi sabiti, ' $\rho$ ' deniz suyu yoğunluğu ve ' $GZ(\phi)$ ' doğrultucu moment fonksiyonu çok küçük açılarda aşağıdaki gibidir (Lewis, 1967).



Çizelge 2.3’de özellikleri belirtilen, konteyner gemisi dış kuvvetler ve momentler etkisi ile zorlanıp denge konumu bozulmuştur. Model aldığımız bu gemi için yan öteleme, yalpa ve savrulma hareketleri dikkate alınmıştır.

Çizelge 2.4 Konteyner gemisi için hidrodinamik boyutsuz katsayılar (Blanke ve Perez, 1998)

<u>K-katsayıları.(10<sup>-2</sup>)</u> <u>s<sub>1</sub></u>	<u>Y-katsayıları.(10<sup>-2</sup>)</u> <u>s<sub>1</sub></u>	<u>N-katsayıları.(10<sup>-2</sup>)</u> <u>s<sub>1</sub></u>
$K_{\dot{v}} = 0$	$Y_{\dot{v}} = -878$	$N_{\dot{v}} = -300$
$K_{\dot{r}} = -1$	$Y_{\dot{r}} = -48.1$	$N_{\dot{r}} = -30$
$K_{\dot{p}} = -0.7$	$Y_{\dot{p}} = 23.3$	$N_{\dot{p}} = 0.2$
$K_v = 25$	$Y_v = -725$	$N_v = -300$
$K_r = 0.8$	$Y_r = 118.2$	$N_r = -290$
$K_p = -3$	$Y_p = -3.4$	$N_p = -8$
$K_{\delta} = -6.5$	$Y_{\delta} = 248.1$	$N_{\delta} = -128.9$
$WGM = 26.5$	$Y_{\phi} = 37.7$	$N_{\phi} = -17.9$
$m = 750.81$	$I_x = 1.3$	$I_z = 43.25$

(2.70a-b-c) eşitliklerine Çizelge 2.4’deki hidrodinamik sabitler yerleştirildiğinde yan öteleme hızı ( $V$ ), yalpa açısı ( $\phi$ ) ve savrulma açısının ( $\psi$ ) dümen açısına ( $\delta$ ) bağlı transfer fonksiyonları sayısal olarak aşağıdaki gibi verilir.

$$G_1 = \frac{V(s)}{\delta(s)} = \frac{2.38 \cdot 10^{-10} s^5 + 1.40 \cdot 10^{-9} s^4 + 1.49 \cdot 10^{-9} s^3 + 2.24 \cdot 10^{-9} s^2 - 6.05 \cdot 10^{-10} s - 1.038 \cdot 10^{-11}}{2.9 \cdot 10^{-11} s^5 + 4.88 \cdot 10^{-7} s^4 + 2.185 \cdot 10^{-7} s^3 + 1.66 \cdot 10^{-9} s^2 + 1.75 \cdot 10^{-9} s + 7.15 \cdot 10^{-10}} \quad (2.73a)$$

$$G_2 = \frac{\phi(s)}{\delta(s)} = \frac{-4.95 \cdot 10^{-10} s^3 - 2.46 \cdot 10^{-9} s^2 + 7.8 \cdot 10^{-10} s - 7.46 \cdot 10^{-10}}{2.9 \cdot 10^{-11} s^5 + 4.88 \cdot 10^{-7} s^4 + 2.185 \cdot 10^{-7} s^3 + 1.66 \cdot 10^{-9} s^2 + 1.75 \cdot 10^{-9} s + 7.15 \cdot 10^{-10}} \quad (2.73b)$$

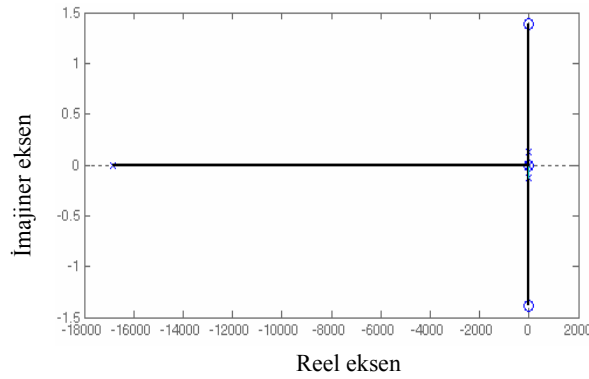
$$G_3 = \frac{\psi(s)}{\delta(s)} = \frac{-4.07 \cdot 10^{-10} s^3 - 6.79 \cdot 10^{-8} s^2 + 8.08 \cdot 10^{-8} s - 1.26 \cdot 10^{-7}}{2.9 \cdot 10^{-11} s^5 + 4.88 \cdot 10^{-7} s^4 + 2.185 \cdot 10^{-7} s^3 + 1.66 \cdot 10^{-9} s^2 + 1.75 \cdot 10^{-9} s + 7.15 \cdot 10^{-10}} \quad (2.73c)$$

Çizelge 2.5 Yan öteleme, yalpa ve savrulma hareketi kökleri

Kutup değerleri	Sıfır değerleri
-----------------	-----------------

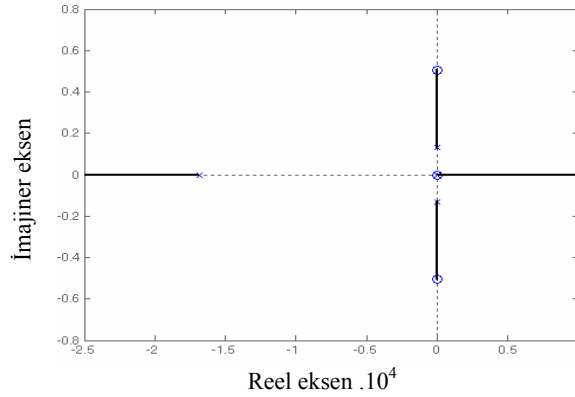
$G_1 = \frac{V(s)}{\delta(s)}$	$k_1 = -1.6827 \cdot 10^4, k_{2,3,4} = 0$	$s_1 = -5.0296, s_2 = -0.5390 + 1.3884i,$ $s_3 = -0.5390 - 1.3884i, s_4 = 0.2414, s_5 = -0.0162$
$G_2 = \frac{\phi(s)}{\delta(s)}$	$k_1 = -1.6827 \cdot 10^4, k_{2,3,4} = 0$	$s_1 = -5.3192, s_2 = 0.1748 + 0.5028i,$ $s_3 = 0.1748 - 0.5028i,$
$G_3 = \frac{\psi(s)}{\delta(s)}$	$k_1 = -1.6827 \cdot 10^4, k_{2,3,4} = 0$	$s_1 = -1.6802 \cdot 10^2, s_2 = (0.0060 + 0.0122i)$ $s_3 = (0.0060 - 0.0122i).$

Yan öteleme transfer fonksiyonu köklerine bakıldığında kararlı olduğu görülür.

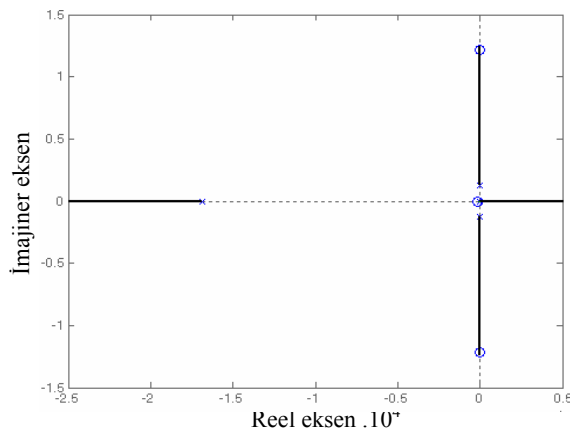


Şekil 2.9 Yan öteleme hareketi kök yeri diyagramı

Savrulma ve yalpa hareketi transfer fonksiyonu köklerine bakıldığında köklerden biri sağ yarı düzleme kaydığından sistemlerimizin kararsız düzleme doğru gittiği görülmektedir.



Şekil 2.10 Yalpa hareketi kök yeri diyagramı

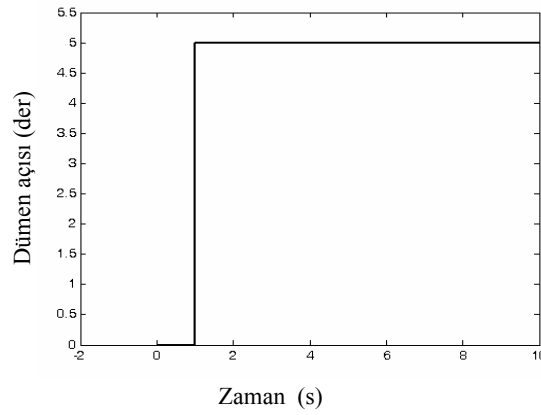


Şekil 2.11 Savrulma hareketi kök yeri diyagramı

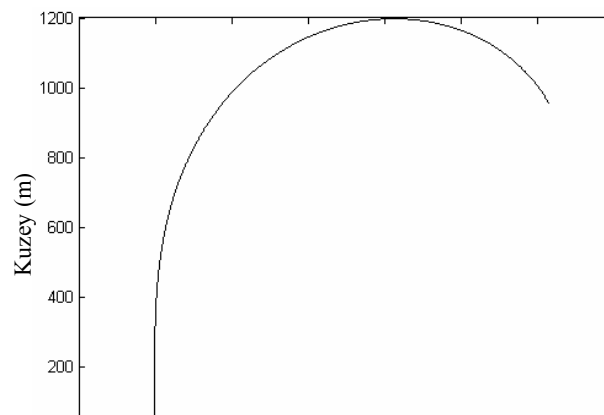
### 2.6.1 Konteyner Gemi Manevra Hareketi

Bundan önceki kısımda ifade edilmiş olan üç serbestlik dereceli konteyner gemi modeli savrulma ve yalpa manevra analizi için yeterli eşitliklerdir. Değişen savrulma ve yalpa hareketinin dengelenmesi, gemide kontrollü bir şekilde yörünge değiştirebilme kabiliyetinin bulunması ile mümkündür. Bu nedenle gemi hareket dengesini veya yörünge değiştirebilme kabiliyetinin sağlanması için manevra deneyleri yapılır.

Danimarka Denizcilik Enstitüsü tarafından dümen makinesi ilave edilmiş dört serbestlik dereceli konteyner gemisi düzlemsel hareket mekanizma (PMM) manevra deney sonuçları esas alınarak üç serbestlik dereceli konteyner gemisi manevra simülasyon sonuçları ile mukayese edilmiştir. Yapılan simülasyonlarda, dümenin 5 derece kadar saptığı ve bu durumda sabit olarak tutulduğu kabul edilmiştir (Şekil 2.12, Şekil 2.13).

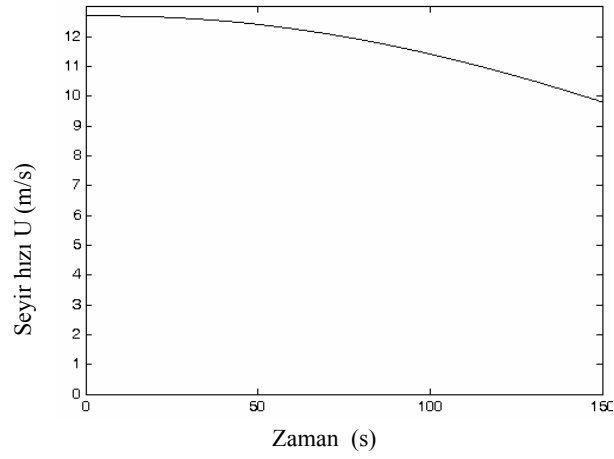


Şekil 2.12 Dümen açısı değişimi

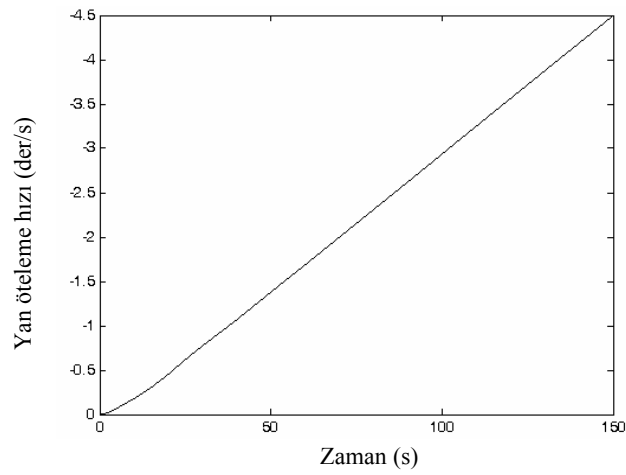


Şekil 2.13 Konteyner gemisi konum değişimi

Çizelge 2.4'deki hidrodinamik katsayılar kullanılarak doğrusal yörünge üzerinde 'U' hızı ile hareket eden gemide hız ve hareket değişimi incelenmiştir (Şekil 2.14, Şekil 2.15). Gemi dönme hareketi esnasında direnç kuvvetleri ile karşılaşacağından seyir hızında azalma görülür.

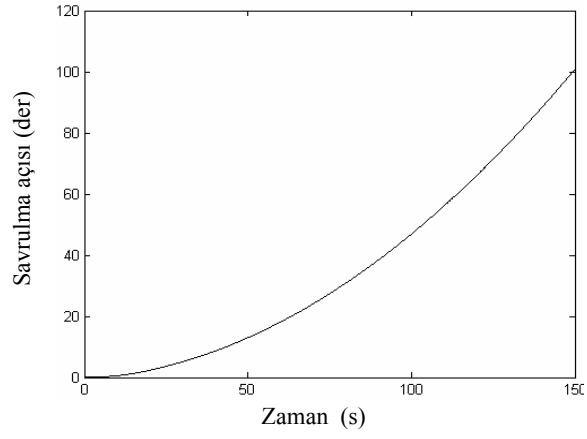


Şekil 2.14 Seyir hızındaki değişim

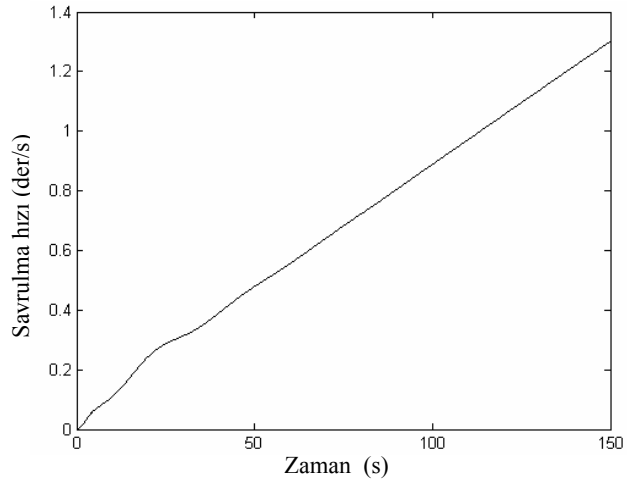


Şekil 2.15 Yan öteleme hızındaki değişim

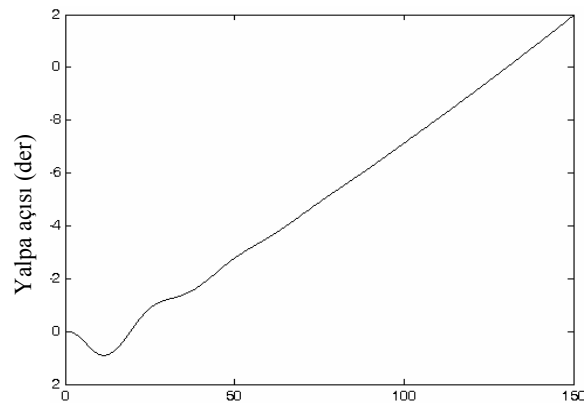
Yapılan dönme hareketinde meydana gelen kuvvet ve momentlerin etkisiyle gemi savrulma hareketleri meydana gelir (Şekil 2.16, Şekil 2.17). Şekillerden görüldüğü gibi gemi savrulma açısı ortalama 0,822 der/s'lik hızla artarak değişmektedir.



Şekil 2.16 Savrulma açısı değişimi



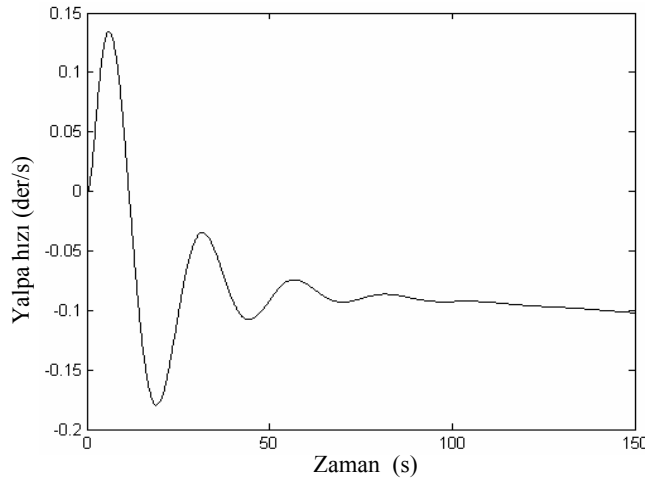
Şekil 2.17 Savrulma hızı değişimi



Şekil 2.18 Yalpa açı değişimi

Dönme hareketiyle oluşan yalpa açısı ve hız değişimi Şekil 2.18, Şekil 2.19'da görülmektedir. Burada yalpa hareketi ortalama 0,077 der/s hızla değişmektedir.

Dönme esnasında oluşan meyilin, dinamik etkenlerinde eklenmesi nedeniyle yalpa açısının arttırdığı gözlemlenmiştir. Bununla birlikte yalpa hızı azalarak dengelenmektedir.



Şekil 2.19 Yalpa hız değişimi

Çizelge 2.6 Dümen

açısı 5 derecede

iken dönme karakteristiği

Zaman (s.)	Seyir hızı (m./s.)	Savrulma açısı (der.)	Savrulma hızı (der./s.)	Yalpa açısı (der.)	Yalpa hızı (der./s.)	Yan öteleme hızı (m./s.)
30	12,592	3,356	0,442	2,54	0,054	1,0725
60	12,183	16,13	0,8052	6,2	0,0619	2,1874
90	11,733	33,09	1,1842	9,3	0,101	3,5575
120	11,356	58,22	1,6579	10,74	0,148	5,0979
150	11,052	101,36	2,1632	11,9	0,19	6,7661

Çizelge 2.7 Dümen açısı 5 derecede iken dönme karakteristiği (Blanke ve Perez, 2000)

Zaman (s.)	Seyir hızı (m./s.)	Savrulma açısı (der.)	Savrulma hızı (der./s.)	Yalpa açısı (der.)	Yalpa hızı (der./s.)	Yan öteleme hızı (m./s.)
30	12,682	5,1	0,316	1	0,046	0,728
60	12,58	18,1	0,574	3,5	0,0891	1,667

90	12,425	38,6	0,825	6	0,0972	2,581
120	12,179	66,64	1,076	8,6	0.101	3,520
150	11,891	102,34	1,319	11,7	0.1029	4,433

Konteyner gemisi için yapılan çalışmalarda, Çizelge 2.6 ve Çizelge 2.7'deki karşılaştırıldığında savrulma açısı teorik ve deney sonuçları arasında ortalama 2,7 derecelik hata görülürken yalpa açısında 1,9 derecelik hata mevcuttur. Hareket analizinden elde edilen bu sonuçlar deney sonuçları ile benzerlik göstermektedir. Bu durum modelin ve izlenen yöntemin doğruluğunu göstermektedir. Ek 2'de, Çizelge 2.6 elde edilirken oluşturulan Matlab programı görülmektedir.

### 3. GEMİLERDE OTOPİLOT KONTROL SİSTEMLERİ VE UYGULAMALARI

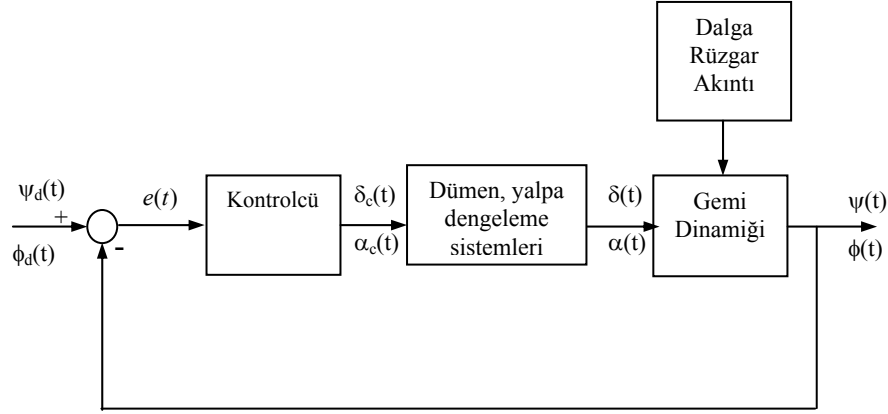
Gemiler için kontrol sistemi tasarlanırken, her bir görev için farklı serbestlik derecesi ve matematiksel model tipi dikkate alınır. Örneğin, savrulma hareketi kontrolü için kullanılan standart otopilotlarda savrulma ve yan öteleme hareketinin modellenmesi gerekir. Dümen yalpa dengelemesi isteniyorsa, ek olarak yalpa hareketinin modellenmesi gerekmektedir.

Gemilerde kullanılan otomatik kontrol sistemleri rota kontrolü, iz takibi, savrulma ve yalpa hareketlerinin dengelemesinin istendiği hallerde kullanılır. Bu isteklerin yerine getirilebilmesi için birçok kontrol metodu geliştirilmiştir.

1. Oransal (P), Oransal-Türev (PD) ve Oransal-İntegral-Türev (PID) kontrol sistemleri – Minorsky (1922), Sugimoto ve Kojima (1978),
2. Lineer Quadratik Regulator (LQR) – Katebi (1987),
3. Model Referans Adaptif Kontrol (MRAK) – Van Amerongen (1981),
4. Bulanık Mantık Kontrol (BM) – Hasegawa (1987).

Gemiler bulunduğu hidrodinamik ortam nedeniyle bozucu etkilerle karşı karşıyadır. Bu bozucu etkiler kontrolcülerle ortadan kaldırılabilir. Literatürde sistemin dayanıklılığını arttırmak ve istenen performansı sağlayacak şekilde PID türü klasik kontrolcüler, optimal, adaptif ve zeki kontrol metotları kullanılmaktadır.

Gemi hareket kontrol otopilotu, en basit halde Şekil 3.1'deki blok diyagramı ile gösterilir. Gemilerde kullanılan kontrol sistemlerinin kullanım amacı, savrulma ve yalpa açılarının, dümen ve yalpa dengeleme sistemleri ile istenilen şekilde davranmasını sağlamaktır.



Şekil 3.1 Savrulma ve yalpa dengeleme sistemi blok diyagramı

Bu bölümde, konteyner gemilerinin savrulma ve yalpa hareketlerinin oransal, integral ve türev, lineer quadratik regülatör, model referans adaptif kontrolü ve bulanık mantık yöntemleri ile kontrolü yapılmıştır. Yapılan simülasyonlarda bir serbestlik dereceli savrulma hareketi için ikinci dereceden Nomoto modeli, üç serbestlik dereceli model için ise (2.67)'deki eşitlikler kullanılmıştır.

### 3.1 Bir Serbestlik Dereceli Konteyner Gemi Savrulma Hareketi

Savrulma hareketi için kullanılan otopilotlar pusuladan ölçülen savrulma açısının geri beslenmesi esasına dayanır. Savrulma açısı, sensör, pusula nümerik hesaplamaları veya tahmini olarak elde edilmektedir. (2.67) eşitliği ile ifade edilen üç serbestlik dereceli konteyner gemi modelinde yalpa hareketi ihmal edilirse yan öteleme ve savrulma hareketi eşitliği elde edilir.

$$(m - Y_{\dot{v}})\dot{v} = Y_v v + Y_r r + Y_{\dot{r}} \dot{r} + Y_{\delta} \delta \quad (3.1a)$$

$$(I_z - N_{\dot{r}})\dot{r} = N_r r + N_v v + N_{\dot{v}} \dot{v} + N_{\delta} \delta \quad (3.1b)$$

Bu eşitliklere Laplace dönüşümü uygulandığında,

$$(m - Y_{\dot{v}})sV(s) = Y_v V(s) + Y_r R(s) + Y_{\dot{r}} sR(s) + Y_{\delta} \delta(s) \quad (3.2a)$$

$$(I_z - N_{\dot{r}})sR(s) = N_r R(s) + N_v V(s) + N_{\dot{v}} sV(s) + N_{\delta} \delta(s) \quad (3.2b)$$

frekans düzlemindeki hali elde edilir.

$$V(s) [(m - Y_{\dot{v}})s - Y_v] = R(s) [Y_{\dot{r}} s + Y_r] + \delta(s) [Y_{\delta}] \quad (3.3a)$$

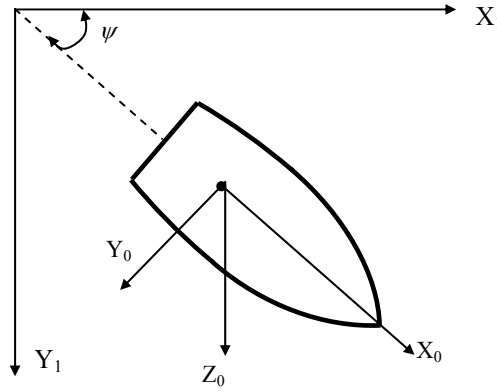
$$R(s) [(I_z - N_{\dot{r}})s - N_r] = V(s) [N_{\dot{v}} s + N_v] + \delta(s) [N_{\delta}] \quad (3.3b)$$

Bu ifadeye ters Laplace dönüşümü uygulandığında ikinci dereceden Nomoto eşitliği elde edilir (Ek 3).

$$T \dot{r} + r = K \delta \quad (3.4)$$

Burada zaman ve orantı kazanç sabitleri hidrodinamik türev katsayılarına bağlı olarak aşağıdaki gibi ifade edilir (Zhang vd., 1996).

$$T = \frac{-[Y_r(I_z - N_{\dot{r}}) + N_r(m - Y_{\dot{v}})]}{(N_r Y_v + N_v Y_r)} - \frac{(N_{\delta}(m - Y_{\dot{v}}) + N_{\dot{v}} Y_{\delta})}{(N_v Y_{\delta} - N_{\delta} Y_v)}, \quad K = \frac{(N_v Y_{\delta} - N_{\delta} Y_v)}{(N_r Y_v + N_v Y_r)} \quad (3.5)$$



Şekil 3.2 Gemi hareket gösterimi

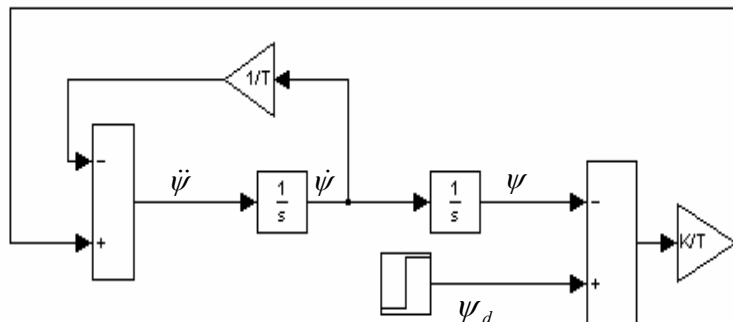
Şekil 3.2' deki gösterimde konteyner gemisi dalga etkisi ile ' $\psi$ ' açısı kadar dönmektedir. Bu durumda,  $r = \dot{\psi}$  dönüşümü yapılarak (3.4) eşitliği aşağıdaki gibi gösterilebilir (Skjetne, 2001).

$$T \ddot{\psi}(t) + \dot{\psi}(t) = K (\psi_d(t) - \psi(t)) \quad (3.6)$$

$\psi(t)$  - Savrulma açısı (der.)                       $\delta$  - Dümen sapması (der.)

K - Orantı kazancı ( $s^{-1}$ )                      T - Zaman kazancı (s)

Şekil 3.3'de (3.6) eşitliği esas alınarak oluşturulan Nomoto modeli blok diyagramı gösterilmektedir.

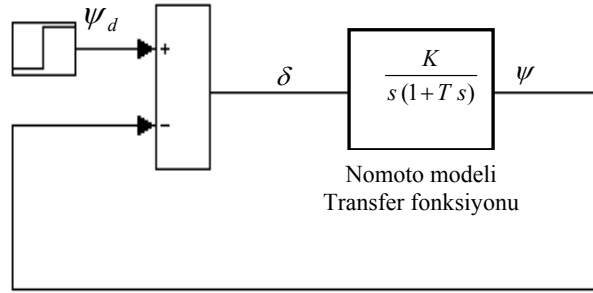


Şekil 3.3 Nomoto modeli blok diyagramı (Skjetne, 2001)

T ve K kazançları ikinci dereceden Nomoto parametreleridir. Bu parametreler su derinliği, yükleme ve hız ve diğer faktörlere bağlı olarak değişmektedir (Journee ve Beukelman, 2001). Bu kazançların hesaplanması için (3.6) eşitliğinin her iki tarafına Laplace dönüşümü uygulanır ve düzenlenirse,

$$G = \frac{\psi(s)}{\delta(s)} = \frac{K}{s(1+Ts)} \quad (3.7)$$

savrulma açısı ile dümen arasındaki transfer fonksiyonu ifade edilir. Şekil 3.4'de Laplace dönüşümü uygulanmış kapalı çevrimli Nomoto modeli blok diyagramı gösterilmektedir.



Şekil 3.4 Kapalı çevrimli Nomoto modeli blok diyagramı

(3.6) eşitliğini durum uzayı formunda ifade etmek için,

$x^T = [x_1 \ x_2]$  ve  $x_1 = \psi$ ,  $x_2 = \dot{\psi} = r$  kabulü yapılarak sistemin katsayı matrisleri aşağıdaki gibi,

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{K}{T} & -\frac{1}{T} \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{K}{T} \end{bmatrix} x_d \quad A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{K}{T} & -\frac{1}{T} \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{K}{T} \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

gösterilir. Sistemin transfer fonksiyonu ikinci dereceden sistem ile temsil edildiğinde,

$$G(s) = \frac{\psi(s)}{\delta(s)} = \frac{\frac{K}{T}}{s^2 + \frac{1}{T}s + \frac{K}{T}} = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2} \quad (3.9)$$

T ve K parametreleri doğal frekans ve sönüm değerine bağlı olarak,

$$T = \frac{1}{2\xi\omega_n}, \quad K = \frac{\omega_n}{2\xi} \quad (3.10)$$

değişmektedir. Genel olarak sönüm oranı  $0.8 \leq \xi \leq 1$  aralığında seçilebilir (Fossen, 1994). Kritik sönümlü gemilerde  $\xi = 1$  kabul edilir. Doğal frekans değeri sönüm ve T parametresine bağlı olarak ifade edilir.

$$\omega_n = \frac{2\pi}{T\sqrt{1-\xi^2}} \quad (rad/s) \quad (3.11)$$

### 3.2 Bir Serbestlik Dereceli Konteyner Gemi Savrulma Hareketinin Kontrolü

Bu kısımda, bir serbestlik dereceli konteyner gemisi savrulma hareketinin PID, Lineer Quadratik Kontrol, Model Referans Adaptif Kontrolü ve Bulanık Mantık yöntemleri ile kontrolü yapılacaktır. Otopilotun kontrol amacı savrulma açısının her durumda sabit kalmasını sağlamaktır.

Geminin bir serbestlik dereceli hareketi (3.4) eşitliğindeki ikinci dereceden Nomoto modeli ifade edilmiştir. Uygulamada davranış kriterlerinin seçimi şu şekilde,

1. Savrulma hızı  $0.25 \text{ der/s}$
2. Aşım  $\leq \% 20$

yapılmıştır (Skjetne ve Fossen, 2001). Birim basamak yanıtında sistem sönüm oranı ve aşım düzelecek şekilde gemi savrulma hareketi kontrol edilmelidir. Kontrol işlemine başlamadan önce sistemimizin kontrol edilebilirliğinin incelenmesi gerekir. Bunun için, durum uzayı formunda ifade edilmiş savrulma hareketi kontrol edilebilir olması için gerek ve yeter koşul aşağıdaki  $(n \times nr)$  boyutlu kontroledilebilirlik matris rankının 'n' olması gerekir (Ogata, 1990).

$$\dot{x} = Ax + Bu$$

$$y = Cx \quad (3.12)$$

$$S = [B \ AB \ A^2B \ \dots \ A^{n-1}B]$$

$$S = [B \ AB] = \begin{bmatrix} 0 & K/T \\ K/T & -K/T^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0.0021 \\ 0.0021 & -0.000000697 \end{bmatrix} = 2 \quad (3.13)$$

Bu modelimizin kontrol edilebilirlik matrisini oluşturduğumuzda matris rank'ının iki olduğunu görürüz.

### 3.2.1 Bir Serbestlik Dereceli Konteyner Gemi Savrulma Hareketinin Klasik Metotlar ile Kontrolü

Birçok araştırmada çok sayıda değişik çözüm yolları önerilmesine karşın, çoğu uygulamalarda kontrol sistemi PID kontrol esasına dayanmaktadır. Bu yaygın kullanımın bazı sebepleri şu şekilde sıralanabilir.

- 1) PID kontrol sistemi dayanıklı ve tasarımı basittir.
- 2) PID ile sistem cevabına ait parametreler arasında belirgin bir ilişki mevcuttur.
- 3) Son yıllarda parametrelerin ayarlanmasına ilişkin birçok değişik yöntem önerilmiştir.

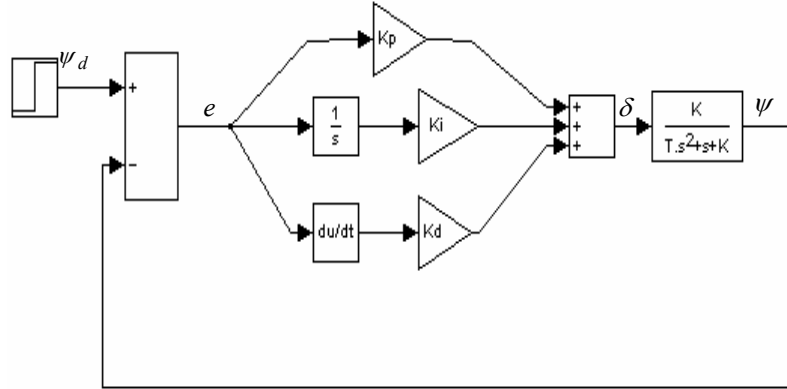
PID kontrolcü tasarımının temel hedefi  $K_p$ ,  $K_d$  ve  $K_i$  kontrol katsayılarının hesaplanması ve verilen kapalı döngü sisteminin performans koşullarını sağlayacak şekilde ayarlanmasıdır. PID kontrol edici tasarımında izlenecek temel basamaklar:

1. Sistemin transfer fonksiyonu elde edilmesi.
2. Sisteme yükselme zamanını iyileştirmek için oransal kontrolcü eklenmesi.
3. Sistemde ani tepkinin iyileştirilmesi için türevsel kontrolcünün sisteme eklenmesi.
4. Kararlı durum hatasını yok etmek için integral kontrolcünün sisteme eklenmesi.
5. Bütün  $K_p$ ,  $K_d$  ve  $K_i$  katsayılarının istenilen genel tepkiyi verene kadar ayarlanması.

Çizelge 3.1 PID kazançlarının performans değişimine etkileri (Skjetne, 1997).

Kontrolcü	Yükselme zamanı	Sistem ani tepkisi	Oturma zamanı	Durum hatası
$K_p$	Azalır	Artar	Az değişir	Azalır
$K_i$	Azalır	Artar	Artar	Yok eder
$K_d$	Az değişir	Azalır	Azalır	Az değişir

Bu kısımda çok fazla ayrıntıya girmeksizin konteyner gemisi savrulma hareketinin klasik PID türü kontrolcü ile kontrolü, Şekil 3.5'deki blok diyagramı esas alınarak yapılmıştır.



Şekil 3.5 Savrulma hareketi PID kontrol blok diyagramı

PID kontrollü dümen dinamiği,

$$\delta = K_p e + K_d \dot{e} + K_i \int_0^t e dt \quad (3.14)$$

şeklinde ifade edilir. Bu standart PID gösteriminde, ' $\delta(t)$ ' dümen kontrol sinyali, ' $e = (\psi_d - \psi)$ ' hata miktarı, ' $K_p$ ' orantı katsayısı, ' $K_d$ ' türev katsayısı, ' $K_i$ ' integral katsayısıdır.  $K_p > 0$ ,  $K_d > 0$  ve  $K_i > 0$  kontrolcü katsayısı pozitif olmalıdır. (3.14) ifadesindeki integral kazancı ihmal edilerek (3.6) eşitliğinde yerleştirildiğinde,

$$T \ddot{\psi} + \dot{\psi} = K (\delta - \delta_0) \quad (3.15)$$

$$T \ddot{\psi} + \dot{\psi} = K [K_p (\psi_d - \psi) + K_d (\dot{\psi}_d - \dot{\psi})] \quad (3.16)$$

PD kontrollü Nomoto eşitliği elde edilir. Burada, ' $\delta_0$ ', dümen sapma açısı başlangıç değeri sıfır olarak ayarlanırken referans değerın türevi sıfırdır. Kontrol kazançlarının bulunması için gemi dinamiği ve oransal-türev kontrolcülerini aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$T \ddot{\psi} + (1 + KK_d) \dot{\psi} + KK_p \psi = K K_p \psi_d \quad (3.17)$$

Bu eşitlik ikinci dereceden sisteme uygun hale getirilerek,

$$\ddot{\psi} + 2\xi \omega_n \dot{\psi} + \omega_n^2 \psi = \omega_n^2 \psi_d \quad (3.18)$$

kontrol katsayıları doğal frekans ' $\omega_n$  (rad/s)' ve sönüm oranına ' $\xi$ ' bağlı,

$$K_p = \frac{T \omega_n^2}{K} \quad K_d = \frac{2T \xi \omega_n - 1}{K} \quad (3.19)$$

gösterilir. Nomoto denklemine PID kontrol uygulandığında,

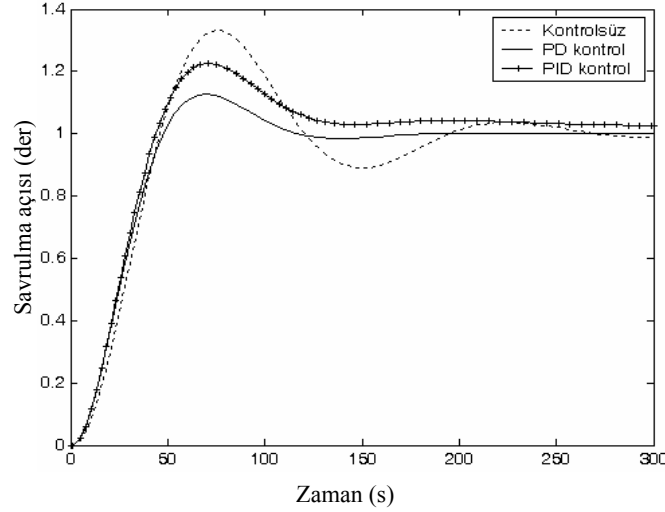
$$T \ddot{\psi} + \dot{\psi} = K \left[ K_p + K_d s + K_i \frac{1}{s} \right] (\psi_d - \psi) \quad (3.20)$$

$$T\sigma^3 + (1 + KK_d)\sigma^2 + KK_p\sigma + KK_i = 0 \quad (3.21)$$

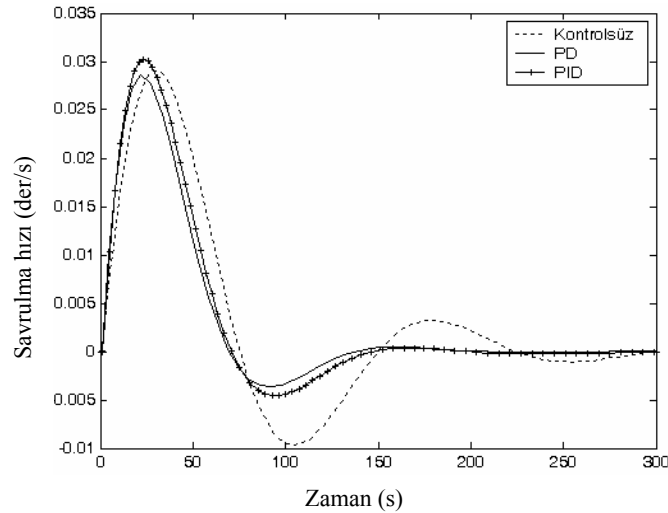
integral kazancı aşağıdaki gibi elde edilir (Fossen, 1994).

$$K_i = \frac{\omega_n}{10} \quad (3.22)$$

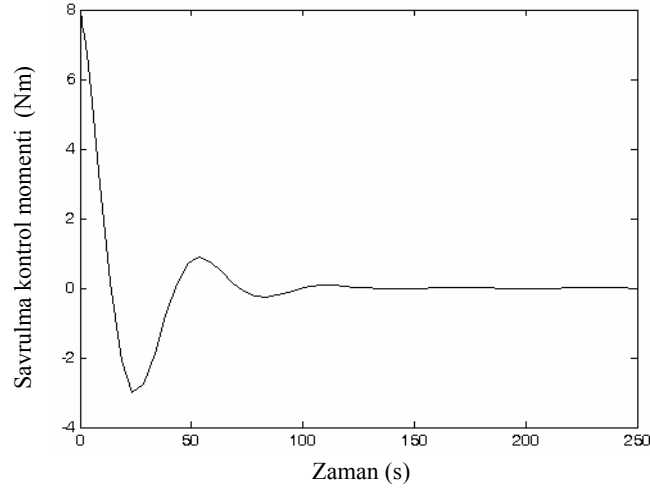
Bu tasarıma ilişkin simülasyon sonuçları Şekil 3.6, Şekil 3.7 ve Şekil 3.8’de sunulmuştur.



Şekil 3.6 Klasik kontrollü bir serbestlik dereceli konteyner gemi savrulma açısı mukayesesi



Şekil 3.7 Klasik kontrollü bir serbestlik dereceli konteyner gemi savrulma hız mukayesesi



Şekil 3.8 PD kontrollü konteyner gemi savrulma kontrol işareti

Uygulamada konteyner gemi savrulma hareketini kontrol altına alabilmek için PD ve PID kontrol yöntemleri uygulanmıştır. Amaç kontrolcünün referans değerini mümkün olduğu kadar çabuk ve etkin bir şekilde yakalamasıdır.

Simülasyon sonucunda kontrolsüz durumda referansa 250 sn. civarında %30 aşım yaparak yerleşmiştir. Şekil 3.6'dan görüleceği üzere, PD ve PID kontrol ile referansa aynı sürede yaklaşık 130 sn.'de yerleşirken PD kontrolde %10 aşım, PID kontrolde %20 aşım ile yerleşmektedir. Aynı zamanda PID kontrolde 0.02 derecelik bir kalıcı konum hatası gözükmeyle beraber bu hata kontrolcü parametrelerinin daha uygun seçilmesi ile giderilebilir bir hata miktarıdır.

Yer değişimlerin incelenmesi tek başına yeterli olmadığından kontrol işaretinin değişimi de dikkate alınmıştır (Şekil 3.8). Uygulama sonucunda PD kontrolün daha uygun neticeler verdiği görülmüştür.

### 3.2.2 Bir Serbestlik Dereceli Konteyner Gemi Savrulma Hareketinin Lineer Quadratik Kontrolü

Bu kontrol uygulanmasındaki asıl amaç geminin klasik kontrolcü ayarlarını otomatik hale getirmek ve geminin minimum zamanda istenilen noktaya ulaşmasını sağlamaktır. Sürekli rejimde savrulma açısının optimum kontrolü için oluşturulan performans kriteri

$$J(t_o, t) = \frac{1}{2} \int_{t_o}^t [e^T(t) Q e(t) + u^T(t) R u(t)] dt \quad (3.23)$$

şeklinde seçilmiştir (Athans ve Falb, 1966). Hata sinyali  $e = \psi_d - \psi$  olarak tanımlanır. Burada,  $Q > 0$ ,  $R > 0$  olup bu matrislerin uygun seçimi ile yukarıda verilen performans kriterini minimum yapacak geribesleme kazancı aşağıdaki gibi hesaplanır.

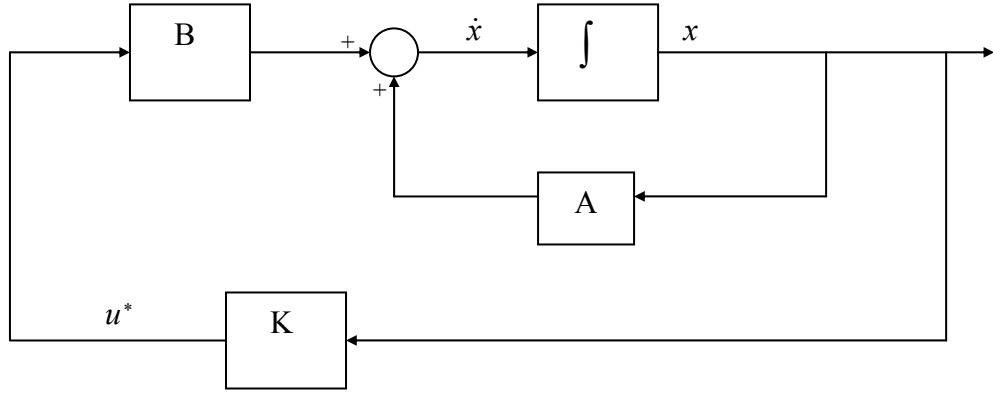
$$K = R^{-1} B^T P x \quad (3.24)$$

$$u^* = K x \quad (3.25)$$

Aşağıdaki ifade Riccati denkleminin çözümüdür (Ek 4).

$$-P A - A^T P + P B R^{-1} B^T = Q \quad (3.26)$$

A ve B matrisleri bir serbestlik dereceli model için (3.8) eşitliği ile ifade edilmiştir. Optimal durum geri besleme matrisleri ile birlikte sistemin blok diyagramı Şekil 3.9'daki gibidir.

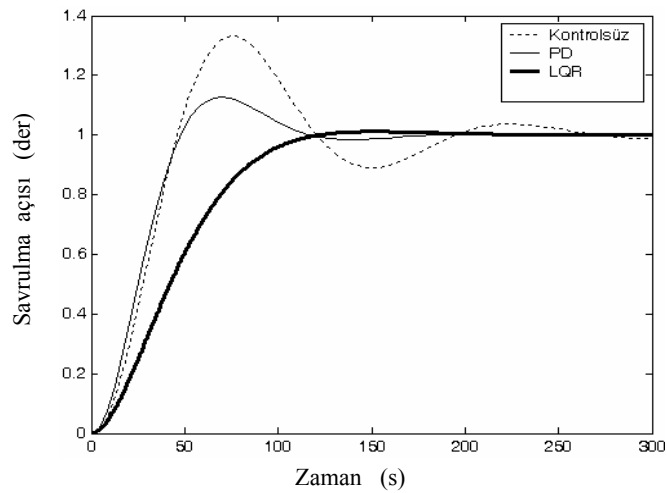


Şekil 3.9 Optimal geri besleme blok diyagramı

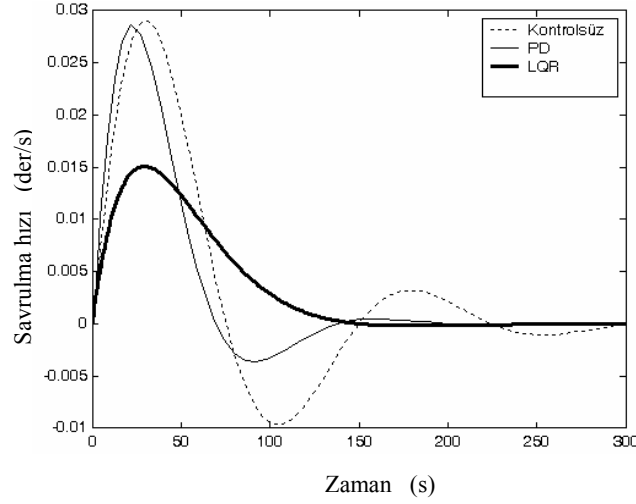
Simülasyon için PD ve LQR otopilot sistemine sahip konteyner gemisine birim referans sinyali uygulanmıştır. Gemi otopilot sistemlerinden beklenenler aşağıdaki gibidir.

1. Minimum zamanda referansa ulaşma
2. Minimum aşma yüzdesi

Bu kriterler göz önüne alınarak yapılan simülasyonlarda, öncelikle PD kontrollü otopilot sistemine sahip modelde savrulma açısının değişimi incelenmiştir. Daha sonra Çizelge 2.3'deki veriler kullanılarak LQR kontrol ile PD kontrol performansı mukayese edilmiştir.

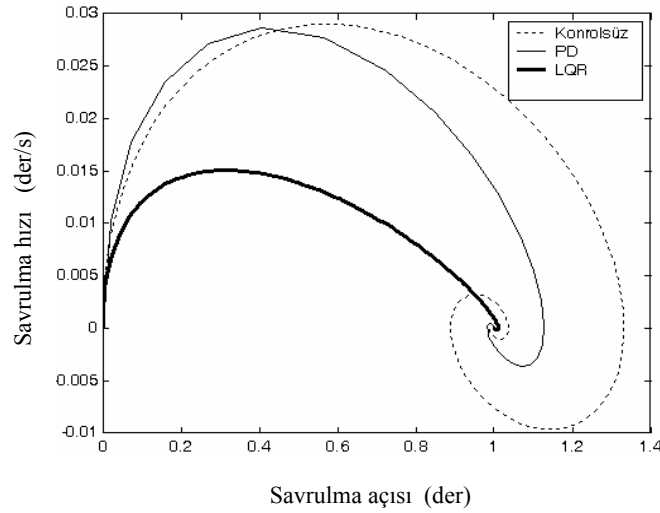


Şekil 3.10 LQR ile bir serbestlik dereceli konteyner gemi savrulma açı mukayesesi



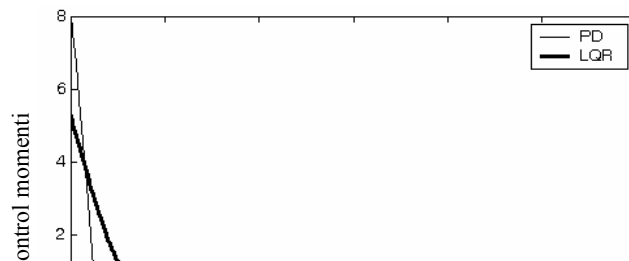
Şekil 3.11 LQR ile bir serbestlik dereceli konteyner gemi savrulma hız mukayesesi

Bir serbestlik dereceli modelin esas alındığı LQR uygulamasında Şekil 3.10 ve 3.11'deki simülasyon sonuçlarından da görüldüğü gibi, savrulma açısı birim referansa aşırımsız yerleşirken 0.8 dereceye ulaşma süresinde bir gecikme görülmüştür.



Şekil 3.12 LQR ile bir serbestlik dereceli konteyner gemi savrulma faz mukayesesi

Sistemin faz düzleminde, durum hataları sıfıra gitmekte, kararlılık özelliği ile PD kontrolcüye göre daha uygun olduğu görülmektedir (Şekil 3.12).



Şekil 3.13 LQR ile bir serbestlik dereceli konteyner gemi savrulma kontrol işareti

Bu metot ile elde edilen kontrol işareti oldukça düzgün ve kullanılabilir niteliktedir

(Şekil 3.13).

### **3.2.3 Bir Serbestlik Dereceli Konteyner Gemi Savrulma Hareketinin Model Referans Adaptif Kontrolü**

Klasik gemi dümen otopilotlarının çalışması genel olarak sabit parametrelili PID kontrol esasına dayanır. Bu kontrolcüler özel şartlarda oldukça iyi sonuçlar verir. Fakat sevk hızı, yükleme ve çevre etkilerinin (rüzgâr, dalgalar, akıntılar vb.) gibi koşulların değişimi ile geminin rotasında sapmalar meydana gelir. Bu nedenle sığ ve dar denizlerde adaptif rota kontrolü oldukça büyük öneme sahiptir.

Günlük dilde ‘Adaptif’ sözcüğü, değişen çevre şartlarına uyum sağlayabilir anlamında kullanılmaktadır. Adaptif kontrolcü kontrol edilen sistemin dinamiğindeki yada bozucuların karakterindeki değişimlere karşı kendini ayarlayarak sisteme uyarlayıcı kontrol işaretini üreten bir kontrolcüdür (Gürleyen, 1999).

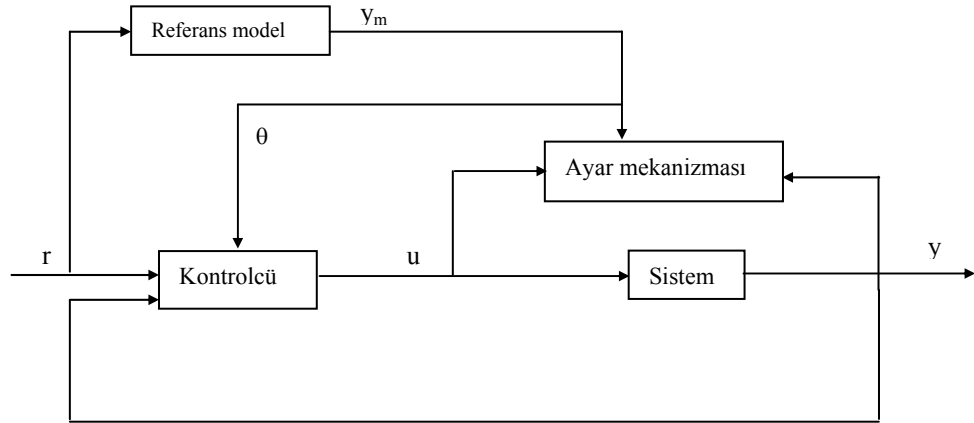
Adaptif kontrolün yaygın olarak kullanılan iki yaklaşım prensibi vardır. Bunlardan biri model referans adaptif kontrol (MRAK) diğeri de kendi kendini ayarlayan kontrol (KKAK) metodudur. MRAK sisteminde, ayar mekanizması hem hata miktarını sıfıra yaklaştırmalı hem de sistem davranışının kararlı olmasına göre düzenlenmelidir.

Model referans adaptif kontrol sisteminin kullanımındaki amaç, bilinmeyen sistem çıkışını kontrol sisteminin bir parçası olan referans model çıkışına asimptotik olarak yaklaştırmaktır. Uygun yaklaşımın sağlanması için, kontrolcü parametreleri Gradyen metodu ile tanımlanmıştır (Nejım, 1998). Parametrelerin zamanla değişimi performansı etkilediğinden

adaptasyon esnasında parametreler düzenli olarak güncellenmektedir. Ayrıca çevre etkileri de performansın önemli miktarda azalmasına sebep olmaktadır. Kontrolcü bu etkileri dikkate almaz ise istenen yaklaşımı sağlayamayacaktır.

Bu kontrol sisteminin en büyük avantajı kritik sönümlü bir kontrolü mümkün kılmasıdır. Model referans adaptif kontrol, sistemden istenen performansın bir referans model ile sağlandığı bir adaptif kontrolcü olarak ifade edilebilir. MRAK'de parametrelerin ayarı için gereken mekanizma Gradyen metodu kullanılarak veya Lyapunov kararlılık teorisi uygulanmak sureti ile iki yolla elde edilebilir.

Model referans adaptif kontrolde amaç sistemin çıkışının referans model çıkışını takip etmesidir. Uygun bir takip olması için kontrolcü parametreleri ayarlanmalıdır. Bu çalışmada parametrelerin ayarlanması MIT (Massachusetts Institute of Technology) kuralı ile açıklanmıştır. Model referans adaptif kontrol sisteminin genel yapısı Şekil 3.14'deki gibidir. Kontrolcü ve kontrol edilen sistemin klasik bir geri besleme devresi ile kontrol edildiği bir çevrime ve ayrıca kontrolcü parametre değişikliklerini sağlayan ikinci bir geri besleme devresine sahiptir. Kontrolcü parametreleri hata sinyalinden, yani sistem çıkışı ile referans model çıkış sinyali arasındaki fark sinyalinden alınan geri besleme ile değiştirilir. Klasik geri besleme iç çevrim, parametre ayar geri beslemesi ise dış çevrim olarak adlandırılır.



Şekil 3.14 Model referans adaptif kontrol blok şeması (Aström ve Wittenmark, 1989).

MIT kuralı model referans adaptif kontrol, için orijinal bir yaklaşımdır. Massachusetts Teknoloji Enstitüsü laboratuvarlarında geliştirilen bu kural ismini, Massachusetts Institute of Technology olan enstitü isminin baş harflerinden almıştır. MIT kuralının açıklanmasında öncelikle ayarlanabilen bir ' $\theta$ ' parametresi bulunan kontrolçüye sahip bir kapalı çevrim

sistemi ele alınmalıdır. Arzu edilen kapalı çevrim cevabı, ' $y_m$ ' çıkışına sahip bir model ile belirlenmiştir. Kontrolcü parametresinin değişimi sistem çıkışı ile referans model çıkışı arasındaki hata miktarının sıfıra yaklaştıracak şekildedir. Gradyen metodu ile yapılan parametre ayarında tanımlanan amaç fonksiyonu kontrolcü parametreleri ile ayarlanarak minimize edilir.

$$J(\theta) = \frac{1}{2}e^2(t) \quad (3.27)$$

Kapalı çevrim çıkışı ' $y$ ' ve model çıkışı ' $y_m$ ' arasındaki fark ' $e$ ' hata miktarı, ' $\theta$ ' ayar parametresi olarak ifade edilmektedir. Amaç fonksiyonunun minimum olması için parametreler  $J$ 'nin negatif gradyeni doğrultusunda kısmi türevleri alınarak elde edilir. Bu ifade diferansiyel denklemlerle gösterilir.

$$\frac{d\theta}{dt} = -\gamma \frac{\partial J}{\partial \theta} = -\gamma e \frac{\partial e}{\partial \theta} \quad (3.28)$$

(3.28) eşitliği MIT kuralı olarak anılmaktadır (Vinagre vd., 2002). Burada, adaptif kazanç  $\gamma$  ile belirtilir ve bu kazancın seçimi oldukça önemlidir. Hatanın ayar parametresine göre kısmi türevi  $\frac{\partial e}{\partial \theta}$  duyarlılık parametresi olarak ifade edilir. Bu ifade ayar parametresinin, ufak değişimlerin hatayı nasıl etkilediğini gösterir. Eğer parametre değişiklikleri sistemin diğer değişkenlerinden daha yavaş değiştiği kabul edilirse duyarlılık işareti doğrultusunda  $\theta$ 'nın sabit olduğu değerlendirilebilir.

Model referans adaptif sistem kullanılarak yapılan kontrol sistemlerinde kontrol edilecek sistemin matematiksel modelinin iyi çalışması gerekir. Klasik kontrol ile karşılaştırıldığında kontrolcü daha hızlı ayar edilir aynı zamanda daha doğru ve ekonomiktir. Bu çalışmada, Çizelge 2.3'de gösterilen bir pervane ve dümene sahip bir konteyner gemisi esas alınmıştır. Gemi savrulma hareketi için performans kriteri,

$$J(\theta) = \frac{1}{2}\psi_e^2(t) \quad (3.29)$$

hatanın değişimine göre ifade edilir. Gemi savrulma açısı hata değişimi aşağıdaki gibidir.

$$\psi_e(t) = \psi(t) - \psi_m(t) \quad (3.30)$$

Burada  $\psi$  ölçülen savrulma açısı,  $\psi_m$  model savrulma açısıdır. Performans kriterini minimize etmek için ' $\theta$ ' parametresi  $J$ 'nin negatif gradyeni doğrultusunda güncellenmelidir. Böylece,

$$\frac{d\theta}{dt} = -\gamma \psi_e(t) \frac{\partial \psi_e(t)}{\partial \theta} \quad (3.31)$$

duyarlılık parametresinin değişimi elde edilir. Uygulamada (3.6) eşitliği esas alınarak eşitlik durum uzayı formunda aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$\frac{dy}{dt} = -a y + b u \quad (3.32)$$

Burada,  $y = [\psi \ \dot{\psi}]^T$  savrulma açısı ve hız değişimi,  $u = \delta$  ise dümen sapmasıdır.

Referans model olarak lineer, ikinci dereceden zamanla değişmeyen bir sistem gözönüne alınmıştır. Böyle bir seçimin amacı, istenen model performansına ait yükselme zamanı, yüzde aşım, yerleşme zamanı gibi karakteristiklerin minimum sayıda parametre ile belirlenmesidir.

Referans modelin durum uzayı formu,

$$\dot{y}_m = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\omega_n^2 & -2\xi\omega_n \end{bmatrix} y_m + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{K}{T} \end{bmatrix} u_c = -a_m y_m + b_m u_c \quad (3.33)$$

şeklinde ifade edilir. Burada  $y_m = [\psi_m \ \dot{\psi}_m]^T$  modelin savrulma açısı ve hız değişimi,  $u_c = \delta_c$  ise modelin dümen sapmasıdır.  $\omega_n$ ,  $\xi$  sırasıyla referans model doğal frekansı ve sönüm oranıdır. Kontrolcü parametreleri,

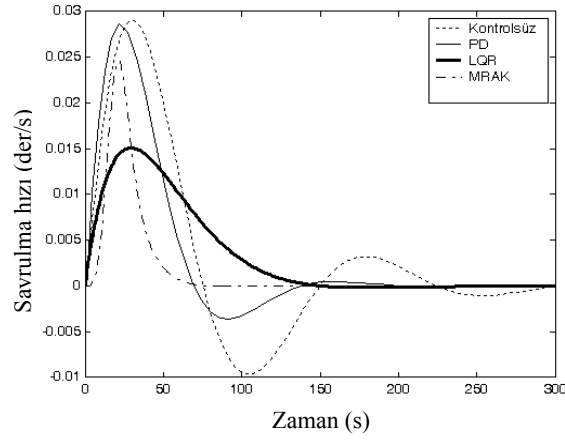
$$t_0 = \frac{b_m}{b}, \quad s_0 = \frac{a_m - a}{b} \quad (3.34)$$

ve hata miktarı aşağıdaki gibi ifade edilirse,

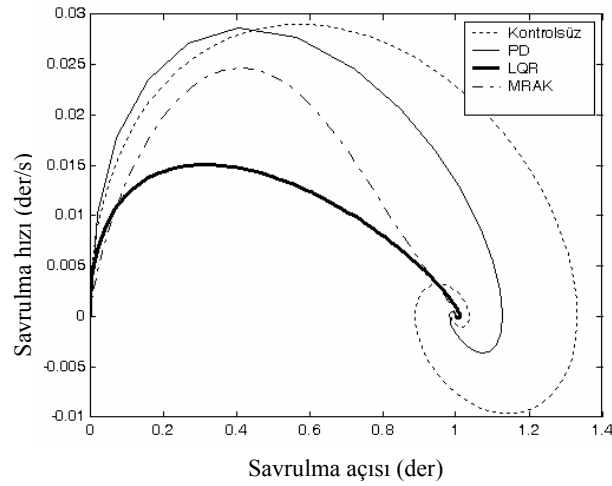
$$e = y - y_m \quad (3.35)$$



Şekil 3.16 MRAK ile bir serbestlik dereceli konteyner gemi savrulma açısı mukayesesi

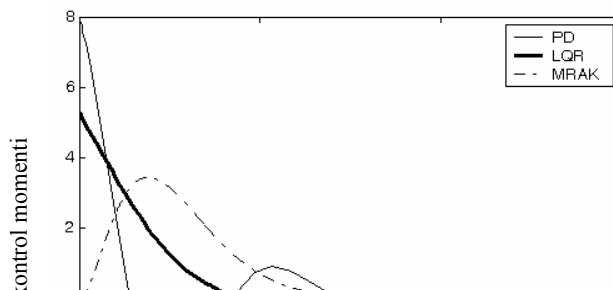


Şekil 3.17 MRAK ile bir serbestlik dereceli konteyner gemi savrulma hız mukayesesi Model referans adaptif kontrol başarımını gösteren savrulma açısı ve hız değişimleri Şekil 3.16 ve Şekil 3.17'de sunulmuştur. Bu kontrol yöntemi ile savrulma açısı 50 saniye civarında bir sürede referansa yerleştiği görülmüştür. Buna karşın bu yöntemin sağladığı kararlılık özelliği ile diğerlerine göre daha uygun bir kontrol kuralıdır.



Şekil 3.18 MRAK ile bir serbestlik dereceli konteyner gemi savrulma faz mukayesesi

Şekil 3.18'deki faz diyagramından görüldüğü üzere savrulma hareketinin kararlı bir davranışa sahip olduğu belirlenmiştir. Aynı zamanda, Lyapunov fonksiyonu esas alınarak modelimizin asimtotik kararlı olduğu gösterilmiştir (Ek 5).



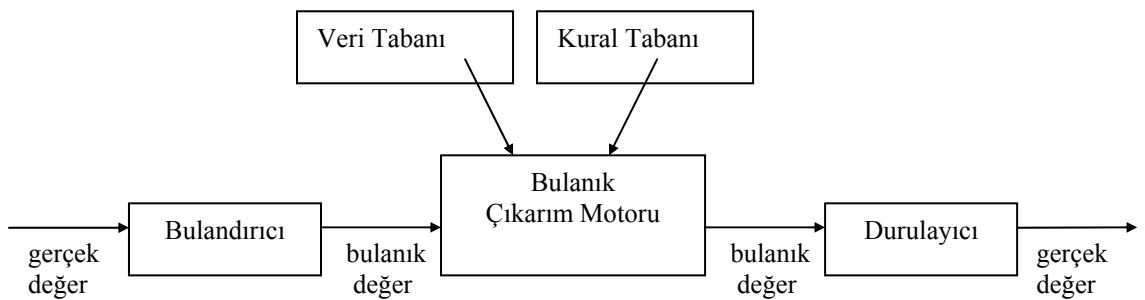
Şekil 3.19 MRAK ile bir serbestlik dereceli konteyner gemi kontrol işareti

Model referans adaptif kontrol kuralı ile elde edilen kontrol işareti Şekil 3.19'dan da görüldüğü üzere konum hatasını gidermek için yaklaşık 25 saniyeye kadar artış göstermektedir.

### 3.2.4 Bir Serbestlik Dereceli Konteyner Gemi Savrulma Hareketinin Bulanık Kontrolü

Bilindiği gibi PID algoritmadaki integral işlemi, sistemin sapma durumlarına daha iyi cevap vermesi için kullanılır. Ancak, çalışma koşullarının değişmesi, bir dış etkinin olması gibi durumlarda sistem dalgalanmaya maruz kalabilir. Böyle durumda eğer bulanık algoritma kullanılırsa, cevap süresinin uzun olması ve salınıma girme gibi istenmeyen durumların önüne geçilebilir.

Bulanık mantık kavramı ilk kez 1965 yılında California Berkeley Üniversitesinden Prof. Lotfi A. Zadeh'in bu konu üzerinde ilk makaleleri yayınlanmasıyla duyuldu. Son yıllarda, bulanık küme teorisinin gemi otopilot sistemlerine uygulanması oldukça yeni bir alandır. Şekil 3.20'de Mamdani ve arkadaşları tarafından geliştirilen bulanık kontrol kural şeması gösterilmektedir. Bulanık mantıklı kontrol sistemi aşağıda gösterildiği gibi bulanıklaştırıcı, kurallar Çizelgesi, karar mekanizması (çıkartım birimi) ve durulaştırıcı elemanlarını içeren bir



yapıdan oluşur.

### Şekil 3.20 Bulanık mantık kontrolcü temel elemanları

Bulanık mantığın temel yapısı dört ayrı kısımdan oluşmaktadır.

#### 1. Bulanık Kural Tabanı

Bulanık çıkarımda dilsel EĞER-İSE kural tabanından oluşur.

#### 2. Bulanık Çıkarım Motoru

Bulanık çıkarımda kurallar üzerinde bulanık mantık yürütülür ve bulanık kural tabanını kullanarak giriş ve çıkış uzayı arasında bir bağıntı kurar.

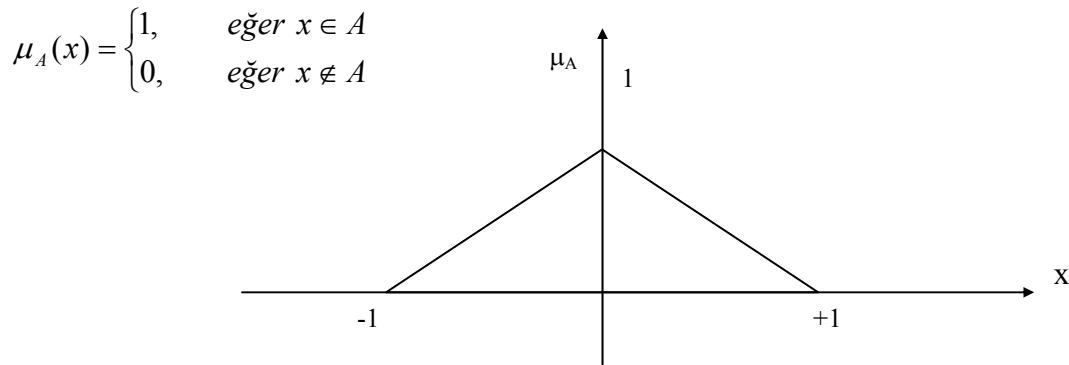
#### 3. Bulandırıcı

Bu bölüm giriş değişkenlerini ölçer, onlar üzerinde bir ölçek değişikliği yapar ve bulanık kümelere dönüştürür.

#### 4. Durulayıcı

Çıkarım motorunun bulanık küme çıkışı üzerinde gerekli ölçek değişikliklerini yapar ve bunları gerçek sayılara dönüştürür.

Klasik küme kavramında bir eleman bir kümenin üyesidir veya değildir. Bulanık mantıkta küme aitlik derecesi 0 ile 1 arasında değişir. 0 kümeye ait olmamayı, 1 ise kesin olarak o kümenin üyesi olmayı gösterir. Küme aitlik derecesi üçgen, yamuk, Gaussian eğrisi gibi standart fonksiyonlarla tanımlanabildiği gibi çok farklı fonksiyonlarda oluşturulabilir. Şekil 3.21’de seçilen üyelik fonksiyonlarının ( $\mu_A(x)$ ) grafiksel ifadesi görülmektedir.



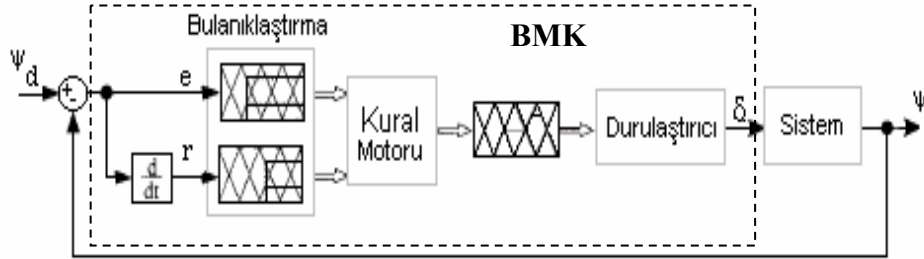
Şekil 3.21 Üçgen üyelik fonksiyonu

Bulanık bir problemi çözerken iki yöntem söz konusudur. Birinci yöntem insan tecrübesi ve bilgisinden yararlanarak üyelik fonksiyonlarının belirlenmesi. İkinci yöntem ise çeşitli

sensörler aracılığıyla toplanan bilgilerden yararlanarak üyelik fonksiyonlarını oluşturmaktadır.

Bulanıklaştırma işleminde, tanımlanmış üyelik fonksiyonu ile hata ve hatanın değişimi dilsel forma çevrilmiştir. Üyelik fonksiyonları üçgen formda değişmektedir. Hata ve hata değişiminin üyelik dereceleri hesaplanırken çizelge olarak hazırlanmış üyelik fonksiyonlarından yararlanılmıştır.

Bu kısımda kontrol yöntemleri için, yeni bir yaklaşım olan bulanık mantık algoritması ile konteyner gemisine ait savrulma otopilotunun kontrolü gerçekleştirilmiştir. Bulanık kontrolcüde hata ( $e$ ) ve hatanın türevine ( $\dot{e}$ ) göre bir kontrol işareti ( $u$ ) üretilir. Savrulma hareketinin kontrolünde kullanılan bulanık otopilotta iki kontrol girişi mevcuttur, hata  $e = \psi_d - \psi$  ve savrulma oranı  $r = \frac{d\psi}{dt}$ , kontrolcü tarafından oluşturulan dümen etkisi ' $\delta$ ' ile gösterilmektedir. Savrulma hareketi kontrol sistemlerinde en doğru konum girişinin sağlanması için oluşturulan blok diyagramı Şekil 3.22'de görülmektedir. Kontrolcü tasarımında hata, hatanın türevi ve kumanda için üyelik fonksiyonları ayrı ayrı tanımlanmıştır.



Şekil 3.22 Gemi savrulma hareketi bulanık mantık blok diyagramı

Gerçekleştirilen bulanık kontrol yapısında, bulanık önerme “Eğer  $e$  pozitif büyük ve  $\dot{e}$  pozitif büyük ise  $u$  pozitif büyüktür” şeklindedir. Bulanık mantık yaklaşımıyla rota otopilotu gerçekleştirilen konteyner gemisinin matematik modelinin simülasyonu, MATLAB paket programının “Simulink” ve “Bulanık Mantık” araç kutuları kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Kontrol girişleri bulanıklaştırma işleminde Şekil 3.23’de gösterildiği gibi tanımlanmış yedi adet sözel ifadeyle üyelik fonksiyon (UF) dereceleri belirlenir. Üyelik fonksiyonları en yaygın olarak kullanılan iç içe geçmiş üçgen formda oluşturulmuştur. Değişken aralıkları  $[-1, 1]$  aralığında tanımlanmıştır. Değişkenlerin gerçek aralıkları  $G_e$ ,  $G_r$  ve  $G_u$  ölçeklendirme katsayıları kullanılarak belirlenmiştir. Üyelik dereceleri belirlenen bulanık kontrol giriş

değişkenleri kural motoruna gönderilir. Burada bulanık değişkenler oluşturulan kural Çizelgesine göre değerlendirilir.

NB-negatif büyük

NO-negatif orta

NK-negatif küçük

SI-sıfır

PK-pozitif küçük

PO-pozitif orta

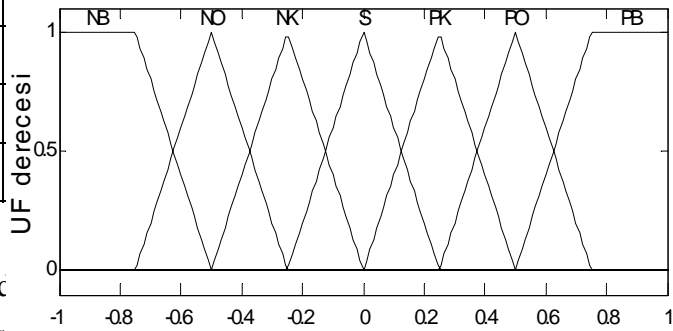
PB-pozitif büyük

Şekil 3.23 Kontrol giriş ve çıkış değerlerinin üyelik fonksiyonları

Üyelik dereceleri hesaplanan bulanık değişkenler karar verme işlemine kullanılmaktadır. Her bir değişken 7 adet üyelik fonksiyonuyla ifade edildiği için toplam 49 kural Çizelge 3.2'de gösterildiği gibi tanımlanmıştır. Bu kural çizelgesi yardımıyla hata ve hata değişimi belirlenmiştir.

Çizelge 3.2 Bulanık mantık savrulma hareket kontrol kural çizelgesi

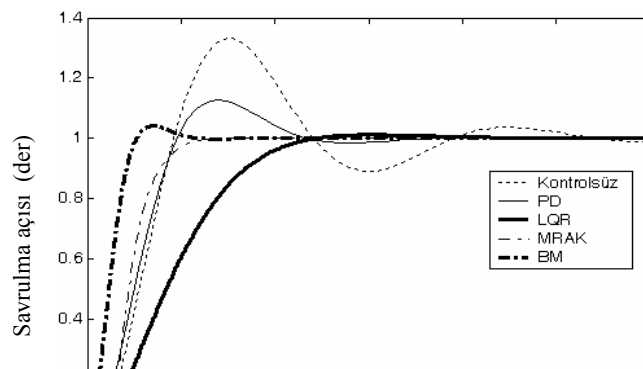
$e$	NB	NO	NK	SI	PK	PO	PB
NB	NB	NB	NB	NB	NO	NK	S
NO	NB	NB	NB	NO	NK	S	PK
NK	NB	NB	NO	NK	S	PB	PO
SI	NB	NO	NK	S	PK	PO	PB
PK	NB	NO	NK	S	PK	PO	PB
PO	NB	NO	NK	S	PK	PO	PB
PB	NB	NO	NK	S	PK	PO	PB



Basamak giriş için  $e_c$

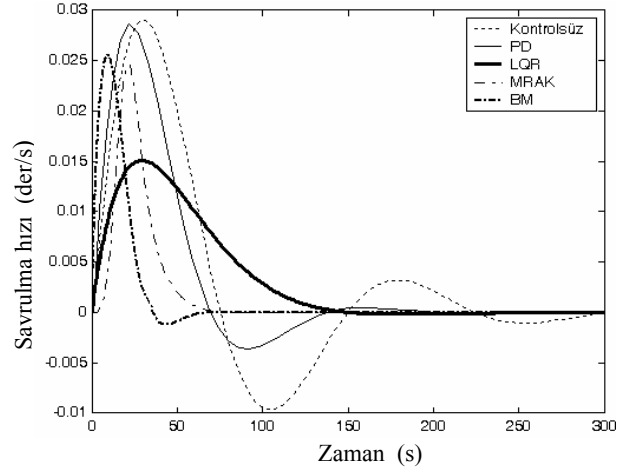
karşılaştırıldığı sonuçlar Şekil 3.24 ve Şekil 3.25'te  $e_r$  ve  $u$  kontrolcülerle

kontrolcülerle

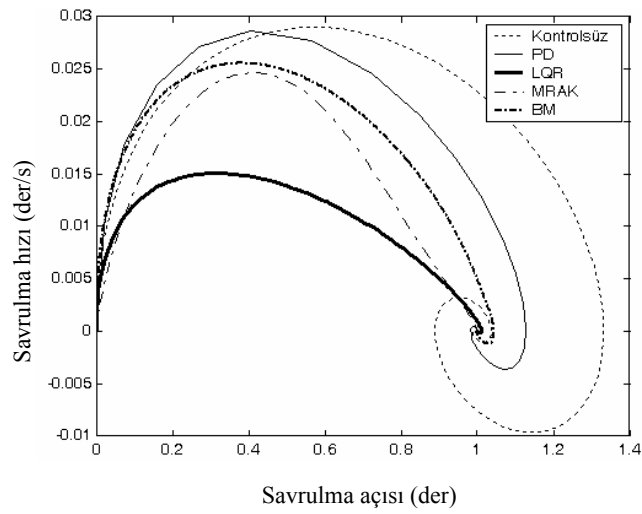


Şekil 3.24 BMK ile bir serbestlik dereceli konteyner gemi savrulma açısı mukayesesi

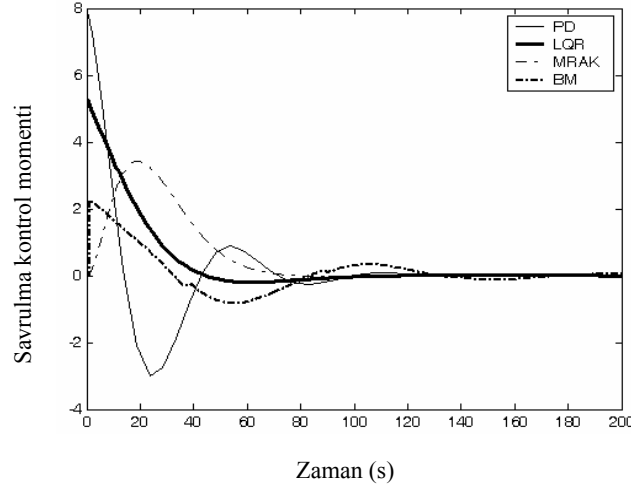
Şekil 3.24'den bulanık kontrol savrulma açısı referansa 25 saniye civarında bir zamanda yerleşmektedir.



Şekil 3.25 BMK ile bir serbestlik dereceli konteyner gemi savrulma hız mukayesesi



Şekil 3.26 BMK ile bir serbestlik dereceli konteyner gemi savrulma faz mukayesesi



Şekil 3.27 BM kontrollü bir serbestlik dereceli konteyner gemi kontrol işareti

Bu yöntemle elde edilen kontrol işaretleri ise oldukça düzgün ve uygulanabilir niteliktedir. Hata ve hata değişimi ve kontrol değerlerinin belirlenen aralıklar arasında kalmak koşuluyla sistemden en iyi sonuç alana kadar Çizelge 3.2’de verilen kurallar oluşturulmuştur. Yapılan simülasyonlarda elde edilen sonuçlardan bulanık kontrolcülü sistemin çok hızlı olarak referans değere ulaştığı görülmektedir. Uygulanan yöntemler ile elde edilen kontrol sistem davranışlarını karşılaştıracak olursak Çizelge 3.3’den görüldüğü gibi, bulanık mantık yaklaşımının diğer kontrol metodlarından daha üstün olduğu görülebilir.

Çizelge 3.3 Bir serbestlik dereceli modelde savrulma hareketi kontrol sonuçları

	% Aşım	Yerleşme süresi (s.)
Kontrolsüz	30	250
PD	10	130
LQR	0	120
MRAK	0	50
BMK	0.05	20

### 3.3 Üç Serbestlik Dereceli Konteyner Gemi Savrulma Hareketi

Bu kısımda, kontrol uygulamaları için uygun üç serbestlik dereceli konteyner gemi hareketi esas alınarak savrulma hareketi dengelenmeye çalışılmıştır. Uygulamalarda Danimarka Denizcilik Enstitüsü tarafından deneyleri yapılmış konteyner gemi modeli esas alınmıştır (Blanke ve Perez, 1998). En genel halde altı serbestlik dereceli lineer hareket eşitliği aşağıdaki gibidir.

$$M \dot{v} + D(v)v + G(\eta) = \tau \delta \quad (3.39)$$

Üç serbestlik dereceli konteyner gemi hareketleri konum, hız ve ivme terimlerine bağlı olarak

$$\text{Yan öteleme} : (m - Y_{\dot{v}})\dot{v} = Y_v v + Y_{\phi} \phi + Y_p p + Y_{\dot{p}} \dot{p} + Y_r r + Y_{\dot{r}} \dot{r} + Y_{\delta} \delta \quad (3.40a)$$

$$\text{Yalpa} : (I_x - K_{\dot{p}})\dot{p} + WGM\phi = K_p p + K_v v + K_{\dot{v}} \dot{v} + K_r r + K_{\dot{r}} \dot{r} + K_{\delta} \delta \quad (3.40b)$$

$$\text{Savrulma} : (I_z - N_{\dot{r}})\dot{r} = N_r r + N_{\phi} \phi + N_p p + N_{\dot{p}} \dot{p} + N_v v + N_{\dot{v}} \dot{v} + N_{\delta} \delta \quad (3.40c)$$

ifade edilir. (3.40) eşitliklerinden faydalanılarak üç serbestlik dereceli model matris formunda yazıldığında rijid gemi gövde kütle matrisi,

$$M = \begin{bmatrix} m - Y_{\dot{v}} & -Y_{\dot{p}} & -Y_{\dot{r}} \\ -K_{\dot{v}} & I_x - K_{\dot{p}} & -K_{\dot{r}} \\ -N_{\dot{v}} & -N_{\dot{p}} & I_z - N_{\dot{r}} \end{bmatrix}, \quad \dot{v} = \begin{bmatrix} \dot{v} \\ \dot{p} \\ \dot{r} \end{bmatrix} \quad (3.41)$$

sönüm matrisi,

$$D = \begin{bmatrix} -Y_v & -Y_p & -Y_r \\ -K_v & -K_p & -K_r \\ -N_v & -N_p & -N_r \end{bmatrix}, \quad v = \begin{bmatrix} v \\ p \\ r \end{bmatrix} \quad (3.42)$$

doğrultucu kuvvet matrisi,

$$G = \begin{bmatrix} 0 & -Y_\phi & 0 \\ 0 & WGM & 0 \\ 0 & -N_\phi & 0 \end{bmatrix}, \quad \eta = \begin{bmatrix} x \\ \phi \\ \psi \end{bmatrix} \quad (3.43)$$

kontrol kuvvet vektörü elde edilir.

$$\tau = \begin{bmatrix} Y_\delta \\ K_\delta \\ N_\delta \end{bmatrix} \delta \quad (3.44)$$

Kuvvet ve moment ifadeleri bilinen konteyner gemi matematik modelinin durum uzayı formu aşağıdaki gibidir.

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (3.45)$$

Burada durum değişkeni,

$$x = [v \quad p \quad r \quad \phi \quad \psi]^T \quad (3.46)$$

$$u = \delta \quad (3.47)$$

ile gösterilir. Çizelge 2.3 ve (3.39) eşitliği dikkate alınarak geminin durum uzayı matris değerleri sayısal olarak aşağıdaki gibi elde edilmiştir.

$$A = \begin{bmatrix} -0.0406 & -1.9614 & 0.2137 & 0.1336 & 0 \\ 0.0011 & -0.1326 & -0.1246 & -0.0331 & 0 \\ -0.001 & 0.0147 & -0.1163 & -0.0006 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.48)$$

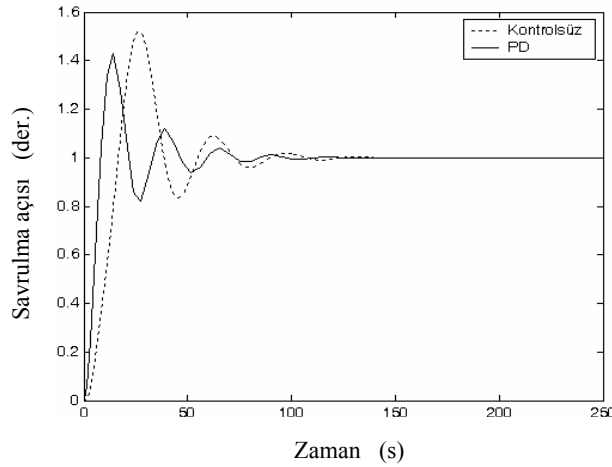
$$B = \begin{bmatrix} -0.06 \\ 0.035 \\ 0.026 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.49)$$

### 3.3.1 Üç Serbestlik Dereceli Konteyner Gemi Savrulma Hareketinin PD Kontrolü

Bu kısımda çok fazla ayrıntıya girmeksizin konteyner gemisi savrulma hareketinin klasik PD türü kontrolcü ile kontrolü, Ek 7'deki matlab programı esas alınarak yapılmıştır. PD kontrollü dümen dinamiği,

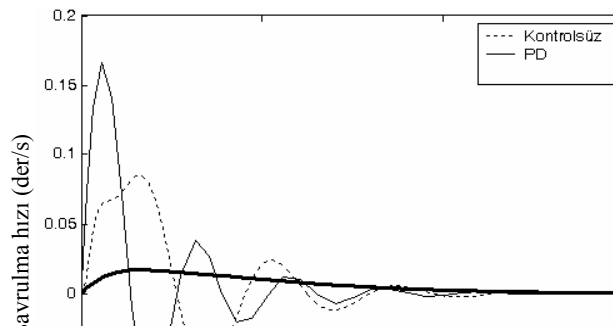
$$\delta = K_p e + K_d \dot{e} \quad (3.50)$$

şeklinde ifade edilir. Bu tasarıma ilişkin sonuçlar Şekil 3.28 ve Şekil 3.29'da sunulmuştur.



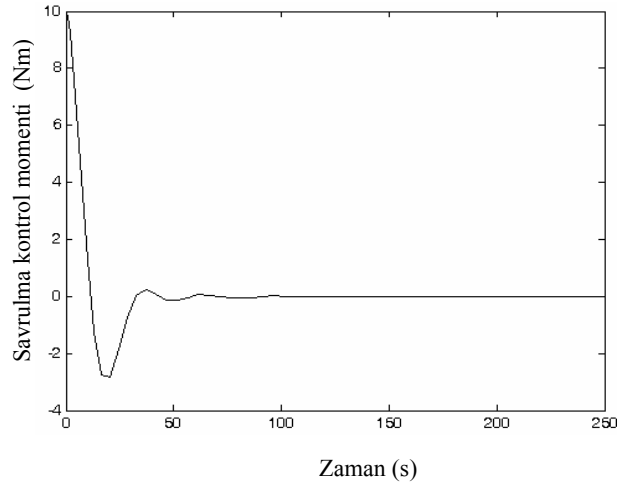
Şekil 3.28 PD kontrol ile üç serbestlik dereceli konteyner gemi savrulma açısı mukayesesi

Şekil 3.28'den görüleceği üzere, PD kontrol ile referansa yaklaşık 100 sn.'de aşımli olarak yerleşmektedir. Yer değişimlerin incelenmesi tek başına yeterli olmadığından hız-zaman cevapları Şekil 3.29'da dikkate alınmıştır. Uygulama sonucunda PD kontrolün belirli şartlarda uygun neticeler verdiği söylenebilir.



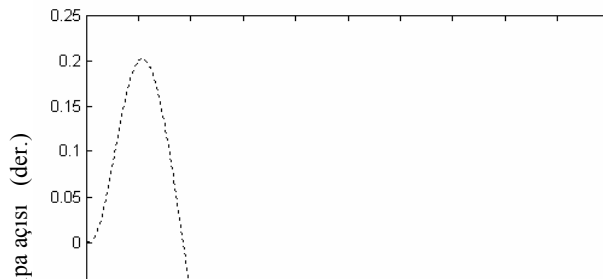
Şekil 3.29 PD kontrol ile üç serbestlik dereceli konteyner gemi savrulma hız mukayesesi

Ayrıca konum hatalarının azaltılması sırasında kontrol işaretleri 0-25 saniye arası ani değişim göstermektedir. (Şekil 3.30)



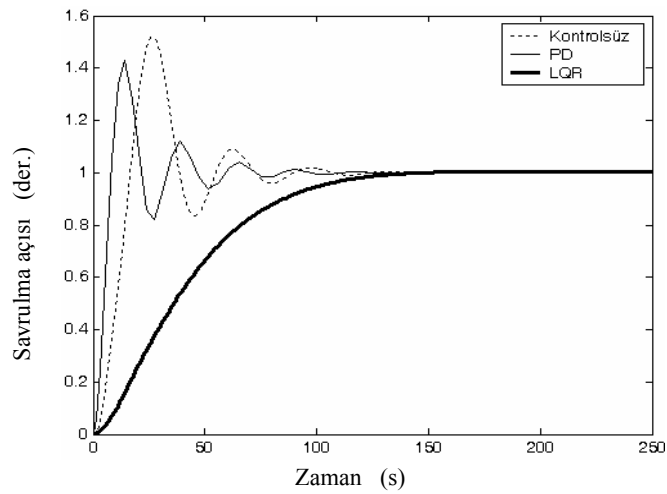
Şekil 3.30 PD kontrollü Konteyner gemisi savrulma kontrol işareti

Savrulma hareketi PD kontrol metodu ile kontrol edilirken yalpa hareketinde herhangi bir kontrolcü etkisi yoktur. Bu durumda yalpa açısının değişimi Şekil 3.1'de görülmektedir. Yalpa hareketi ortalama 0.0137 der./s. hızla 0.05 derecelik hata ile yaklaşık 100 saniye sonra denge konumuna geri dönmektedir.



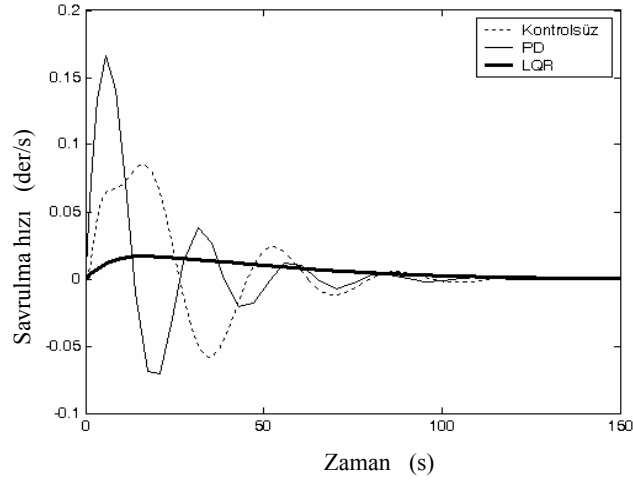
Şekil 3.31 Üç serbestlik dereceli konteyner gemi yalpa açısı değişimi

**3.3.2 Üç Serbestlik Dereceli Konteyner Gemi Savrulma Hareketinin LQR ile Kontrolü**  
 (3.2) bölümünde ifade edilen kriterler göz önüne alınarak üç serbestlik dereceli modelde PD, LQR, MRAK ve BM kontrolcileri uygulanmıştır. Öncelikle PD kontrollü daha sonra optimal kontrollü otopilot sisteminde savrulma açısının değişimi incelenmiştir.



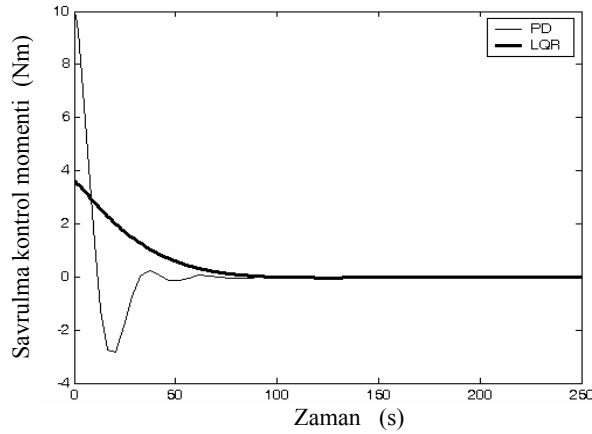
Şekil 3.32 LQR ile üç serbestlik dereceli konteyner gemi savrulma açısı mukayesesi

Üç serbestlik dereceli modellerde savrulma hareketinin kontrolünde bir serbestlik dereceli model kazanç değerleri kullanılarak yer ve hız değişimleri mukayese edilmiştir. Yapılan simülasyonlarda hem PD hem de LQR ile aynı sürede referansa yerleşme olurken PD kontrolde aşım görülmüştür. LQR kontrol kuralı ile yapılan simülasyon sonuçlarından da görüldüğü gibi savrulma açısının 0.8 dereceye ulaşmasında bir faz gecikmesi olduğu görülmektedir.

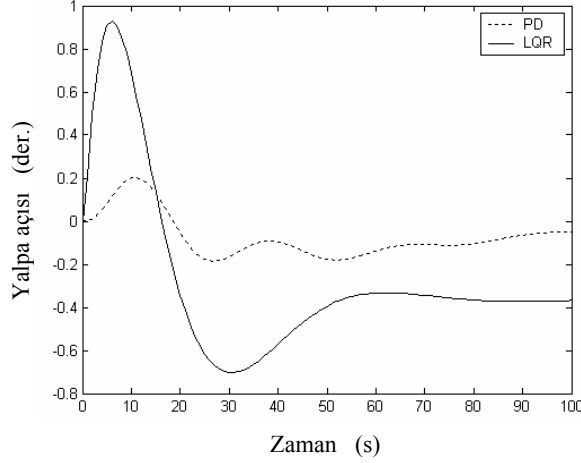


Şekil 3.33 LQR ile üç serbestlik dereceli konteyner gemi savrulma hız mukayesesi

Bir serbestlik dereceli modelde olduğu gibi bu modelde de optimal kontrol uygulaması ile savrulma açısı ve hız değişiminde iyileşme açık olarak gözlenmektedir. Bu çalışmada elde edilen simülasyon sonuçları serbestlik derecesi artsa dahi lineer kvadratik regülatör kontrol metodu ile konteyner gemi savrulma hareketinin dengelenmesinde önemli ölçüde gelişmeler sağlanabileceği görülmüştür. Üç serbestlik dereceli modelde LQR kontrol kuralı ile elde edilen kontrol işaretinin uygun işaretler olduğu görülmektedir (Şekil 3.34).



Şekil 3.34 LQR kontrollü Konteyner gemisi savrulma kontrol işareti



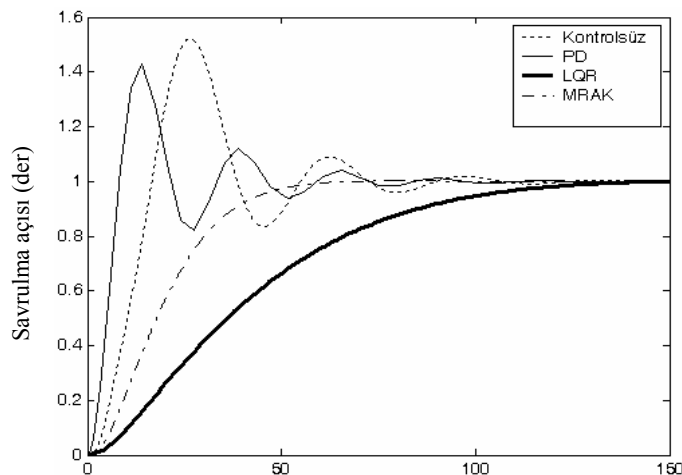
Şekil 3.35 Üç serbestlik dereceli konteyner gemi yalpa açısı mukayesesi

Savrulma hareketi LQR kontrol metodu ile kontrol edilirken yalpa hareketinde herhangi bir kontrolcü etkisi yoktur. Bu durumda yalpa açısının ve hızının değişimi Şekil 3.35’de görülmektedir. Şekilden görüldüğü gibi yalpa hareketi ortalama 0.00386 der./s. hızla 3.3 derecelik hata ile denge konumuna geri dönmektedir.

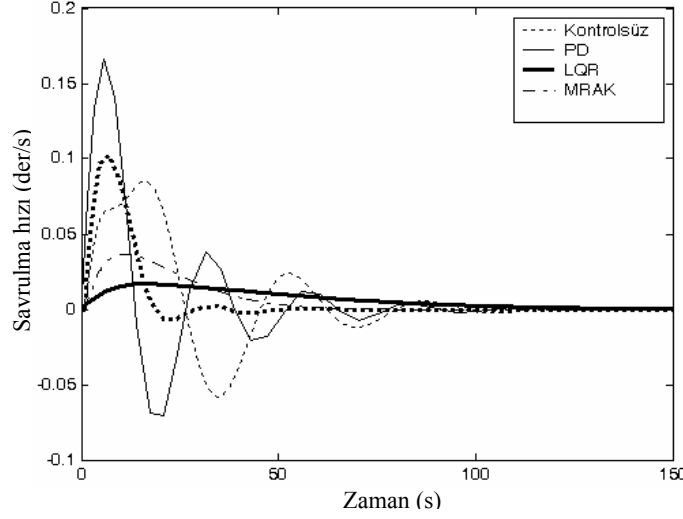
**3.3.3 Üç Serbestlik Dereceli Konteyner Gemi Savrulma Hareketinin MRAK Kontrolü** (2.70a-b-c) eşitliklerine Çizelge 2.4’deki hidrodinamik sabitler yerleştirildiğinde Ek 1’de görüldüğü gibi savrulma açısı ile dümen açısı arasındaki transfer fonksiyonu,

$$\frac{\psi(s)}{\delta(s)} = \frac{-4.07 \cdot 10^{-10} s^3 - 6.79 \cdot 10^{-8} s^2 + 8.08 \cdot 10^{-8} s - 1.26 \cdot 10^{-7}}{2.9 \cdot 10^{-11} s^5 + 4.88 \cdot 10^{-7} s^4 + 2.185 \cdot 10^{-7} s^3 + 1.66 \cdot 10^{-9} s^2 + 1.75 \cdot 10^{-9} s + 7.15 \cdot 10^{-10}} \quad (3.51)$$

elde edilir. Üç serbestlik dereceli modelde, (3.51)’deki savrulma hareketi transfer fonksiyonu esas alınarak PD, LQR ve MRAK kontrol sonuçları Şekil 3.36 ve Şekil 3.37’de karşılaştırılmıştır. Bu modelde model referans kontrol metodunu kullanmaktaki amaç hem hatayı sıfıra götürmek hem de sistemi kararlı yapmaktır.

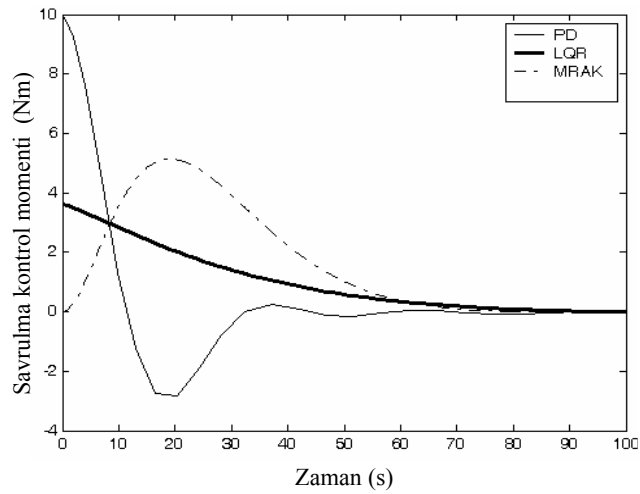


Şekil 3.36 MRAK ile üç serbestlik dereceli konteyner gemi savrulma açısı mukayesesi

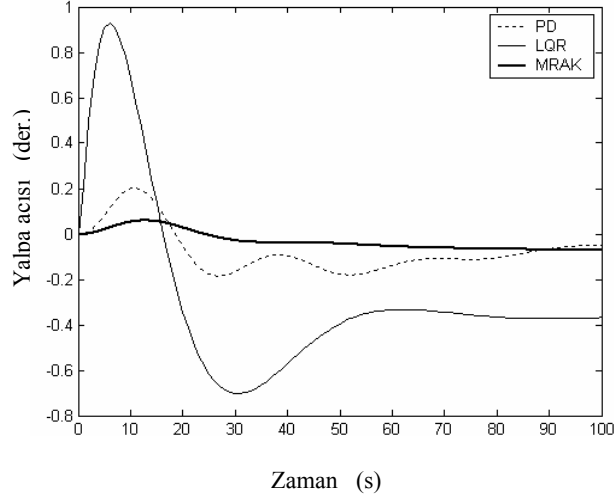


Şekil 3.37 MRAK ile üç serbestlik dereceli konteyner gemi savrulma hızı mukayesesi

Serbestlik derecesinin artması ile gerçeğe yakın modelleme yapıldığından belirsizlikler ortadan kalkmaktadır. Bu durum üç serbestlik dereceli modelde MRAK kontrol sonuçlarını iyileştirmiştir. Son olarak model referans yöntemi ile elde edilen sonuçlar oldukça düzgün ve uygulanabilir nitelikte olduğu görülmüştür. Kontrol etkisi olmayan yalpa açısı değişimi Şekil 3.39'da görülmektedir.



Şekil 3.38 MRAK kontrollü konteyner gemisi savrulma kontrol işareti

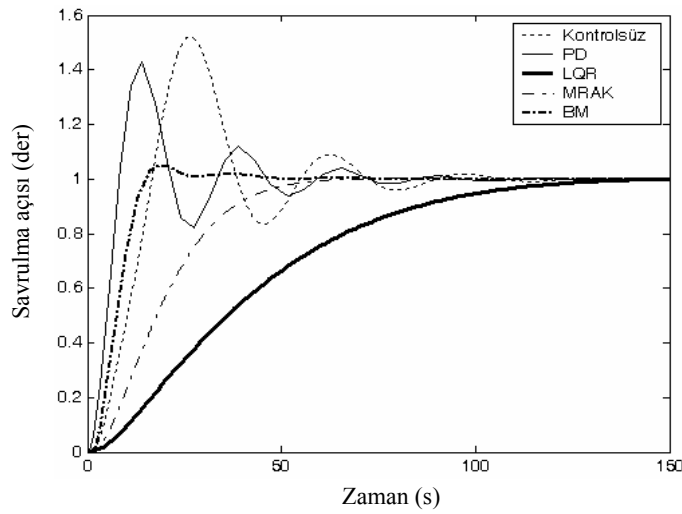


Şekil 3.39 Üç serbestlik dereceli konteyner gemi yalpa açısı mukayesesi

Şekilden görüldüğü gibi yalpa hareketi ortalama 0.00046 der./s. hızla sönümlenmektedir. MRAK kontrollü uygulama sonucu ile PD kontrollü uygulama sonucu hemen hemen aynı değişimi göstermektedir.

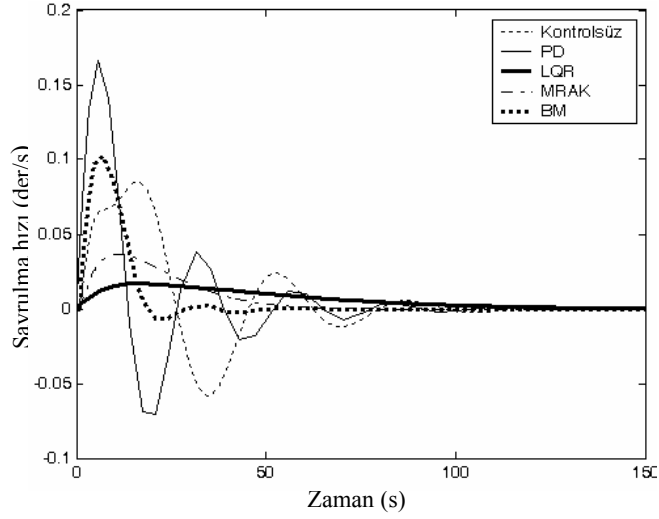
### 3.3.4 Üç Serbestlik Dereceli Konteyner Gemi Savrulma Hareketinin BM Kontrolü

Bu kısımda üç serbestlik dereceli konteyner gemisi savrulma hareketi bulanık mantık kontrol yöntemi ile dengelenmiştir. Simülasyonlarda bir serbestlik dereceli model için kullanılan hata ve hata değişim aralıkları bu model için de aynı kabul edilmiştir.



Şekil 3.40 BMK ile üç serbestlik dereceli konteyner gemi savrulma açısı mukayesesi

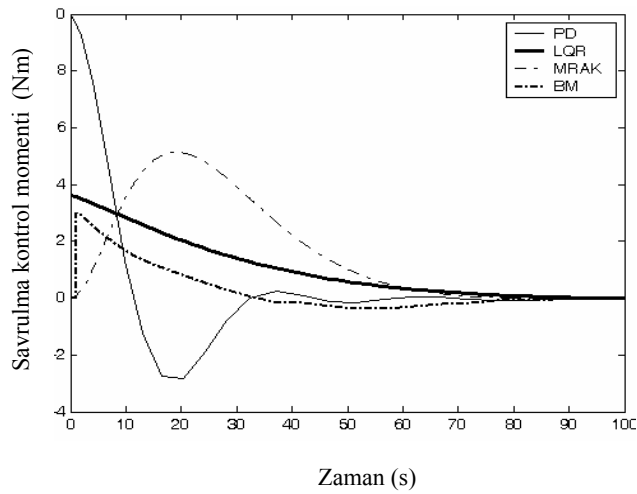
Geliştirilen bulanık kontrol yöntemi üç serbestlik dereceli konteyner gemisine uygulanarak elde edilen simülasyon sonuçları birim basamak referans değere göre Şekil 3.40 ve Şekil 3.41’de verilmiştir.



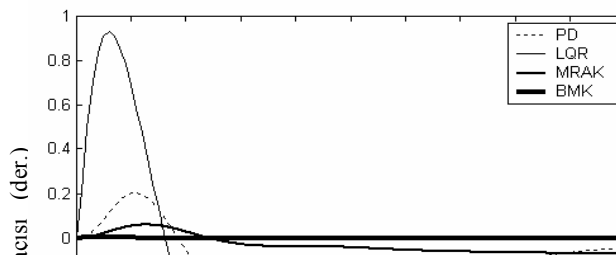
Şekil 3.41 BMK ile üç serbestlik dereceli modelde savrulma hızı mukayesesi

Bulanık kontrol uygulamasından elde edilen sonuçlara bakıldığında bir zaman gecikmesi olmaksızın 0.11 der/s hızla referansa yerleşmektedir.

Bu uygulamada elde edilen sonuçlar her ne kadar zaman açısından dikkate değer bir aşma olmaksızın referansa yerleşse de savrulma hız değişiminde bir kararsızlık gözlemlenmiştir. Ancak, Şekil 3.42’den bulanık mantık kontrol yöntemi ile savrulma hareketinin kontrolü basit ve uygulanabilir olduğu görülmüştür. Yalpa açısının ve hızının değişimi Şekil 3.41 ve Şekil 3.42’de görülmektedir.



Şekil 3.42 BM kontrollü konteyner gemi kontrol moment mukayesesi

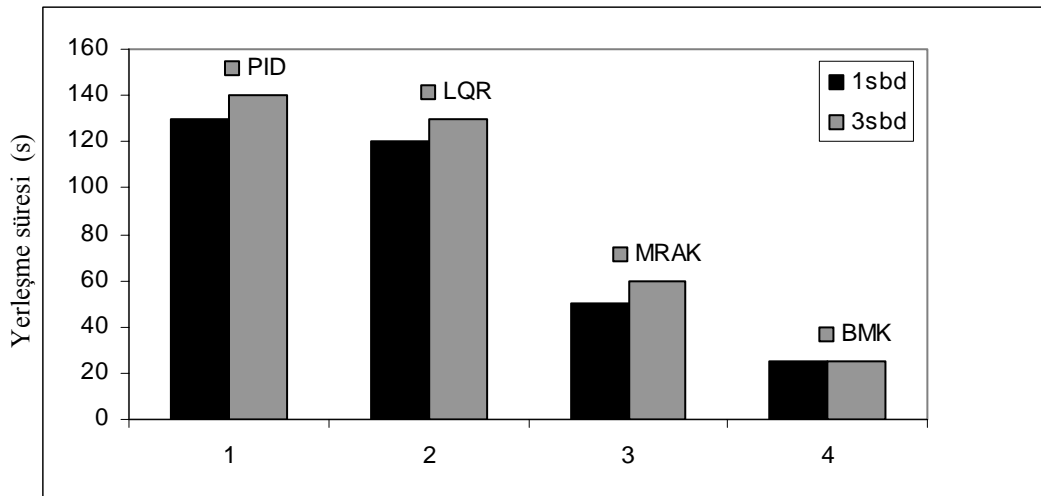


Şekil 3.43 Üç serbestlik dereceli konteyner gemi yalpa açısı mukayesesi

Adaptif ve adaptif olmayan kontrol yöntemleri, tezin genel yaklaşımına uygun olarak önce bir serbestlik dereceli modele sonra da üç serbestlik dereceli dinamik modele uygulanmıştır. Her iki modelden elde edilen sonuçlara bakıldığında savrulma açısı bulanık mantık kontrolcü performansının diğer yöntemlerinkinden daha iyi olduğu Çizelge 3.4'te gösterilmiştir.

Çizelge 3.4 Üç serbestlik dereceli modelde savrulma hareketi kontrol sonuçları

	% Aşım	Yerleşme süresi (s.)
PD	40	100
LQR	0	130
MRAK	0	60
BMK	0.05	25



### Şekil 3.44 Kontrolcü performanslarının mukayesesi

Çizelge 3.3 ve Çizelge 3.4 verilerinden faydalanarak Şekil 3.44 grafiği elde edilmiştir. Bu durum yerleşme süresi azaldıkça kontrolcü performansının arttığını göstermektedir. Ayrıca, bir ve üç serbestlik dereceli modelde kontrolcü performanslarının değişimi aynı olmaktadır.

#### **4. YALPA DENGELEME SİSTEMLERİ VE KONTROLÜ**

Denge konumunda, yani düşey veya buna yakın bir konumda, yüzmekte olan bir gemi belli bir geçici tesir altında bu konumdan ayrılıp, denge konumu etrafında salınım hareketi yaparak zamanla eski konumuna ulaşıyorsa, bu durumda denge konumuna kararludur denir (Özkan 1977).

Eğer, geminin denge konumunu bozucu olan tesirler kısa bir süre için etki etmek yerine gemiye sürekli olarak etki ediyorsa, dalga, rüzgâr gibi, bu takdirde geminin ilk konumuna dönmesi söz konusu değildir. Bununla birlikte, yalpa hareketi yapan bir gemide başlıca; yüklerin hasar görmesi, yolcular için rahat bir seyahat ortamı sağlanamaması, gemideki görevlilerin işlerini gerektiği gibi ve zamanında yapamaması, gemi rotasının dalgalara göre sürekli değiştirilmesi gibi problemlerle karşılaşmaktadır.

Bu nedenle yalpa hareketinin genel karakteristiği ve meydana gelen problemler göz önüne alınarak ortaya birçok yalpa söndürücü sistem teorisi ve tasarımı çıkartılmıştır. Gemilerde yalpa azaltıcı düzenler, pasif yalpa azaltıcı sistemler ve aktif yalpa azaltıcı sistemler olarak iki ana grupta ifade edilir.

Pasif yalpa azaltıcılarda, ek bir güce ve özel bir kontrol aygıtına ihtiyaç yoktur. Yalpa hareketi yardımıyla harekete zıt yönde moment oluşturularak enerji absorbe edilir. Bu gruba ait en önemli yalpa azaltıcıları, yalpa omurgaları, sabit kanatlar, pasif yalpa tankları ve pasif hareketli yalpa ağırlıklarıdır.

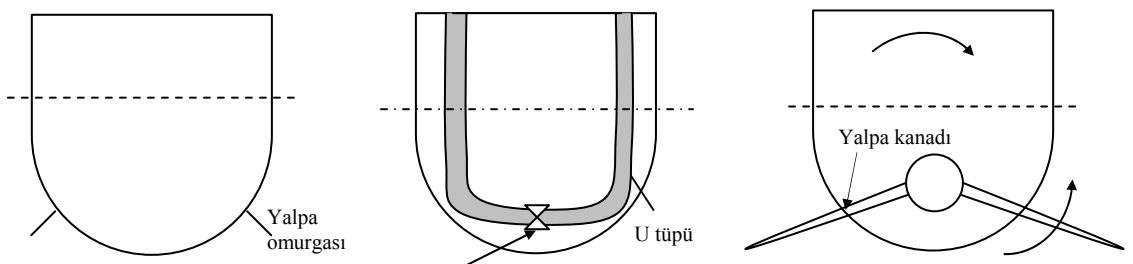
Aktif yalpa azaltıcı sistemlerde gemi su altı yüzeyinden dışarı çıkabilen kontrol yüzeyleri, bordadan bordaya sıvı veya katı ağırlıklar hareket ettirilerek veya dümen sistemi ile yalpa genlikleri azaltılabilir. Bütün aktif yalpa azaltıcılarının çalışma prensibi yalpaya karşı zıt bir moment oluşturma esasına dayanır. Başlıca yalpa azaltıcı sistemler aktif yalpa kanatları, aktif yalpa tankları, aktif hareketli ağırlıklardır.

#### 4.1 Yalpa Dengeleme Sistemlerinin Çalışma Prensipleri

Genel olarak yalpa azaltıcı sistemlerle yapılmaya çalışılan yalpa açılarının küçültülmesi ve periyotlarının rahatsızlık çıkarmayacak kadar uzatılmasıdır. Yalpa omurgaları ilerleme yönünde ve an az direnç oluşturacak şekilde, gemi gövdesine sintine dönümüne dik ve akım hatlarına paralel olarak yerleştirilirler. (Şekil 4.1). Yalpa omurgaları ucuz olmasına karşın gövde direncini arttırmaktadır. Bununla birlikte önemli miktarda seyir hızında azalmalar görülür.

Yaygın olarak kullanılan yalpa azaltıcı tanklar, serbest su yüzeyli tanklar, U borusu biçimindeki ve ayrılmış şeklindedir (Şekil 4.2). Bu sistemler, düşük hızlarda yalpa hareketi sönümü sağlamaktadır. Dezavantajı ise serbest su yüzeylerinden dolayı metasandır yüksekliğini azaltmaktadır. Ayrıca oldukça fazla yer kaplamaktadırlar. İlk olarak 1874 yılında kullanılmışlardır.

Yalpa azaltıcı kontrol yüzeyleri yüksek seyir hızlarında oldukça iyi yalpa sönümü sağlamaktadır. Gemide daha az yer işgal etmesi, hafif oluşu nedenleriyle çok kullanılmaktadırlar (Şekil 4.3). Bu tip kontrol yüzeyinin dezavantajı gövde direncini artırması ve yatırım maliyetinin pahalı oluşudur. Aynı zamanda düşük seyir hızlarında yalpa azaltmadaki etkinliği hemen hemen ortadan kalkar.



Şekil 4.1 Yalpa omurgaları      Şekil 4.2 Yalpa tankları      Şekil 4.3 Yalpa kanatları

Dümen ile yalpa azaltılması kontrol yüzeyli sisteme göre oldukça ucuzdur ve aynı etkinlik elde edilmektedir. Buna karşın, dümen yalpa dengeleyici sistemindeki dümen hızı değişiminin  $\dot{\delta}_{\max} = 5 - 10$  (der/s) aralığında  $v_{\text{alf}}$  olması gerekmektedir. Diğer bir dezavantajı ise, gemi hızı düşük ise verimli olmamasıdır. Çizelge 4.1’de yalpa azaltıcı sistemler ve karşılaştırılması gösterilmektedir.

Yalpa söndürücü bir sistemle donatılması gereken bir gemide mevcut koşullar iyice araştırılmalı, kapsamlı bir değerlendirmeden sonra en uygun sisteme karar verilmelidir. Unutulmaması gereken, yalpa söndürmek için birçok başarılı sistem tasarlanmış olmasına rağmen her geminin ihtiyacı farklıdır. Rastgele yapılan bir seçim sonucunda beklentiler karşılanamayacağı gibi işe yaramayan ve boş yere hacim kaplayan bir grup teçhizat yığını ile başbaşa kalınabilir.

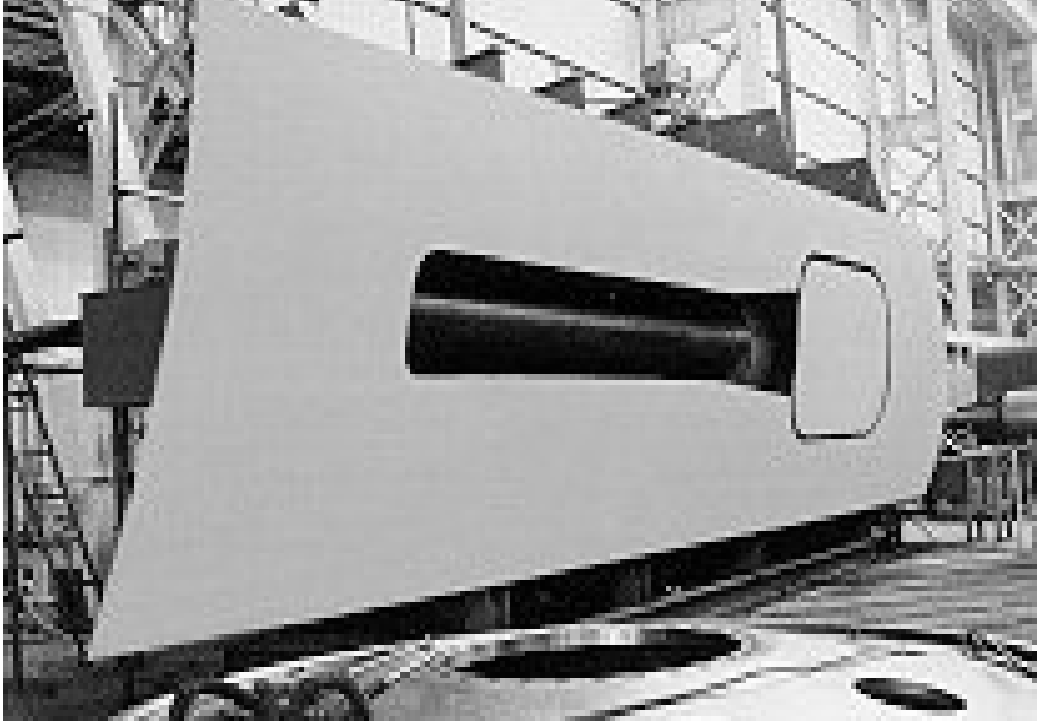
Çizelge 4.1 Gemilerde kullanılan yalpa dengeleme sistemlerinin karşılaştırılması  
(Sellars ve Martin, 1992)

<u>Dengeleme tipi</u>	<u>Uygulama yeri</u>	<u>%Yalpa Sönümü</u>	<u>Maliyet (\$x1000)</u>
Kanat (hareketli)	Yolcu, feribot, savaş ve konteyner gemileri	90	400–1500
Kanat (sabit)	Askeri gemiler	90	300–1300
Tank	Yolcu ve kargo gemileri	75	30–50
Yalpa omurgası	Genel	25–20	-----

#### 4.2 Yalpa Kanat Geometrisi

Yalpa kanatları, gemi sintine dönümü civarında, gemi yüzeyine dik olarak bu yüzeyden dışarıya doğru uzanan, içeriye çekilebilir veya katlanabilir tiplerde olabilen geminin sancak ve iskelesinde eşit büyüklükte ve aynı eksen üzerinde düzenlenmiş dümene benzer kanatçıklardır. Çoğunlukla simetrik hidrofoil kesitlere sahiptirler. Yalpa kanatları tek parça

olarak imal edilebildikleri gibi hareketli olarak da üretilebilmektedir. Şekil 4.4’de aktif kanat sistemlerinin montajı gösterilmektedir.

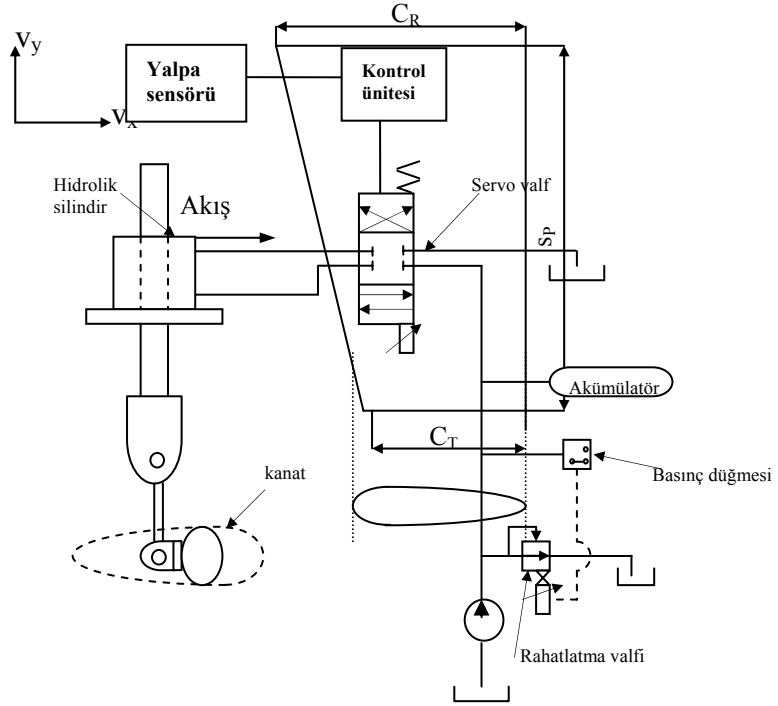


Şekil 4.4 Aktif kanat dengeleme sistemi (Sperry Marine).

Yalpa dengeleme sistemleri ile donatılmış gemilerde karşılaşılabilecek en önemli sorun bazen gemi hızının kaldırma kuvveti yaratamayacak kadar düşük olmasıdır. Özellikle geminin hızının sıfır olduğu durumlarda hiçbir kaldırma kuvveti oluşmayacaktır.

Kanat dengeleme sistemi savaş gemilerinde, özellikle uçak gemileri ve helikopter inişine gerek duyulan gemilerde pistlerin sabit bir seviyede sallantısız tutulmasına gerek olan durumlarda sıkça kullanılır. Günümüzde yalpa kanatları petrol tankerleri, savaş gemileri, konteyner gemileri arabalı vapurlar ve yolcu gemilerinde de oldukça yaygın olarak kullanılmaktadır.

Uygulanan her hangi bir dış kuvvetin etkisi altında sakin suda meyilli olarak yüzen bir gemi, bu momentin kaldırılması sonucu periyodik karakterde bir hareket olan yalpa hareketini yapar. Zorlayıcı kuvvet etkisi ile meyil yapan gemide kontrolcü kuvveti Şekil 4.5’deki kontrol ünitesi ile oluşturulur.



Şekil 4.5 Yalpa dengeleme hidrolik sistem diyagramı (Kawazoe vd., 1994)

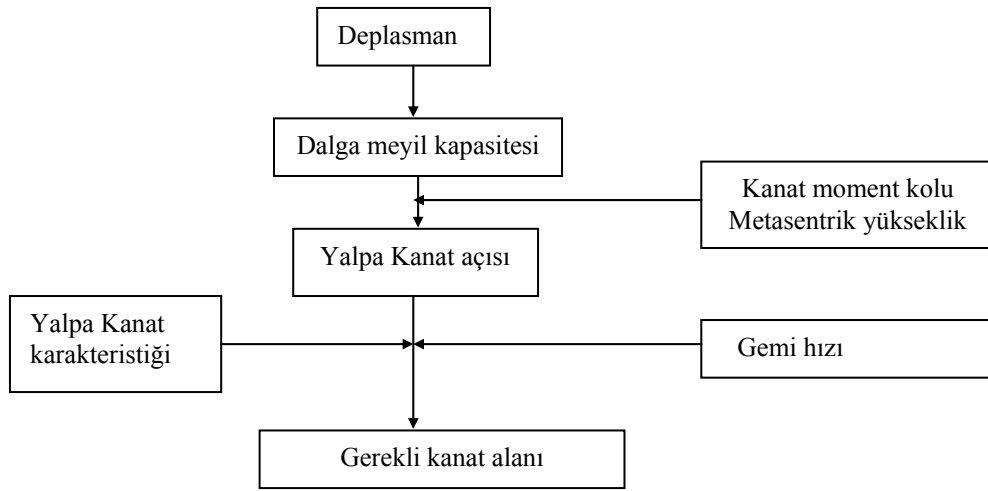
Şekil 4.6'da en basit ve en çok kullanılan tam hareketli bir kontrol yüzeyi gösterilmiştir. Kontrol yüzeylerinin boyutları, bunlara ait ortalama giriş uzunluğu ve açıklığı ile belirlenir.

Şekil 4.6 Kontrol yüzey geometrisi

Kanatın tekneye en yakın olarak takıldığı kenarına kök, bunun karşıtı olan kenarına uç denir. Böylece kök kiriş uzunluğu  $C_R$ , uç kiriş uzunluğu  $C_T$  ve  $s_p$ 'de ortalama açıklık olarak tanımlanır. Ortalama kiriş uzunluğu  $\bar{C}$ , kanat alanı  $A_k$  ve yan oranı 'a' kanadın hidrodynamic karakteristiğini belirlemek için kullanılır. Geometrik özelliklerin birbirleri ile ilişkisi aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$\bar{C} = \frac{C_R + C_T}{2}, \quad A_k = s_p \bar{C} \quad a = \frac{2s_p}{\bar{C}} \quad (4.1)$$

Kanat alanı seçimi basit olarak Şekil 4.7'deki akış diyagramına göre seçilmektedir.



Şekil 4.7 Dalga meyil kapasitesine bağlı olarak kanat alanı seçimi (Kawazoe vd., 1994).

Yalpa dengeleme kanatlarının konumlandırılacağı en uygun yer, gemi su hattı boyunun kıçtan başlamak sureti ile %40-%50 hizasıdır. Kanatların alt ucunun geminin eninden dışarı taşmamasına dikkate edilmelidir. Aksi takdirde geminin yanaşma durumunda zarar görebilirler. Uygun kanat ebadı aşağıdaki formül uygulanarak tespit edilir.

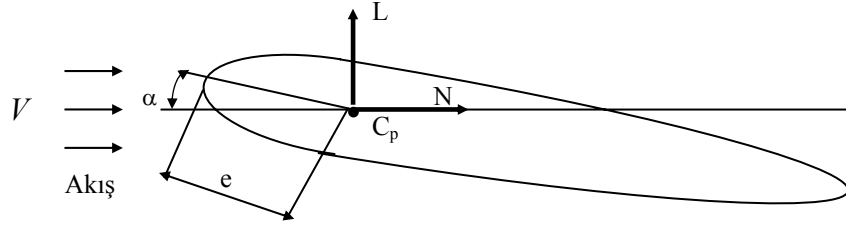
$$A_k = \frac{3,5 \cdot B \cdot D}{T^2 \cdot V^2} \quad (4.2)$$

Burada,

$B$  : Geminin su hattı genişliği       $T$  : Yalpa periyodu  
 $D$  : Geminin deplasmanı               $V$  : Geminin hızı (knot)

#### 4.2.1 Kanat Yüzeyinde Oluşan Kuvvet ve Momentler

Akışkan etkisi ile kanat belli bir hücum açısı yapacak şekilde ilerler. Dönme ve hücum açısı nedeniyle oluşan kuvvet ve momentler Şekil 4.8'de görülmektedir. 'V' akış hızıyla hareket eden sıvı içindeki kanatın bir yüzeyinde oluşan kuvvetler basınç merkezine  $C_p$ 'ye etkirler. Kaldırma kuvveti 'L' akış yönüne dik doğrultuda iken sürtünme kuvveti 'N' ise akış yönüne paralel olarak basınç merkezine etkirler. Bu merkez kanatın kenarından 'e' kadar mesafededir. Basınç merkezi ufak hücum açılarında  $e = 0.25 \bar{C}$  kabul edilir (Perez vd., 2000).



Şekil 4.8 Hücum açısı ile kaldırma ve sürtünme kuvvetleri

Kaldırma kuvveti ( $L$ ) ve sürtünme kuvveti ( $N$ ) iki boyutlu kanat teorisine uygun olarak ifade edilir. Akış etkisi ile oluşan kanattaki hızlar  $V = [V_x \ V_y]^T$  eksenlere bağlı olarak gösterilir. Kanat yüzeylerindeki kaldırma ve sürtünme kuvvetleri,

$$L = \frac{1}{2} \rho V A_k C_L \quad (4.3)$$

$$N = \frac{1}{2} \rho V^2 A_k \left( C_{D0} + \frac{C_L \alpha^2}{0.9 \pi a} \right) \quad (4.4)$$

bağıntılarına göre hesaplanır.

$C_L$  : Kaldırma kuvveti katsayısı

$V$  : Geminin ilerleme hızı (m/s)

$A_k$  : Kontrol yüzeyinin alanı ( $m^2$ )

$\rho$  : Akışkan yoğunluğu ( $kg/m^3$ )

$C_{D0}$  : Minimum kesit sürtünmesi (NACA 15 profilinde  $C_{D0} = 0.0065$ )

Toplam kuvvet, paralel akıma dik doğrultuda kaldırma ve akım yönünde sürtünme kuvvetleri olmak üzere aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$F = \sqrt{L^2 + N^2} \quad (4.5)$$

Pratik çalışmalardan, kaldırma ve sürtünme boyutsuz ifadeleri aşağıdaki gibi gösterilir.

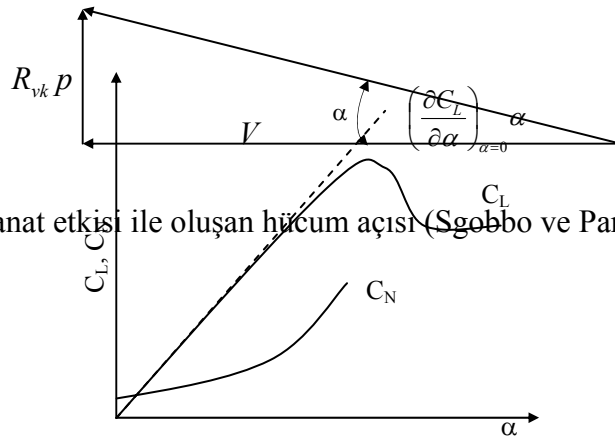
$$C_L = \frac{L}{0.5 \rho V^2 A_k} \quad C_N = \frac{N}{0.5 \rho V^2 A_k} \quad (4.6)$$

$$C_L = \left( \frac{\partial C_L}{\partial \alpha} \right) \quad (4.7)$$

Bu ifade de,  $C_L = f(\alpha)$  eğrisinin  $\alpha$  apsis eksenine ile yapmış olduğu eğim olup, pratik olarak durma açısına kadar sabit kaldığı durma açısından büyük açı değerlerinde kaldırma kuvvetlerinde süreksizlik olduğu görülür. Kanat kaldırma katsayılarının ( $C_L$ ) hücum açısına bağlı değişimi Şekil 4.9'da görülmektedir.

Şekil 4.9 Kanat kaldırma katsayılarının ( $C_L$ ) hücum açısına bağlı değişimi (Perez vd., 2000).

Bu şekilden, hücum açısı arttıkça kaldırmanın yaklaşık olarak lineer değiştiği görülür. Bu lineer davranış (4.7) eşitliğindeki  $C_L$  ifadesinin sonucudur. Şekil 4.10'da yalpa hızı etkisi ile kanatta oluşan kaldırma etkisi gösterilmektedir.



Şekil 4.10 Kanat etkisi ile oluşan hücum açısı (Sgobbo ve Parsons, 1999).

Hücum açısı,

$$\alpha_k = -a \tan \frac{R_{vk} p}{V} \quad (4.8)$$

ve toplam kanat açısı,



Şekil 4.11 Yalpa dengeleme sistemi ile yalpa sönümü

B<sub>0</sub>: Sualtı hacim merkezi, W: Gemi ağırlığı, G: Ağırlık merkezi

Yalpa kanatları gemi gövdesine, dönme merkezi ile 38 derece açı yapacak şekilde yerleştirilir (Sgobbo ve Parsons, 1999).

Doğrultucu moment aşağıdaki gibidir.

$$G = \Delta GM \quad (4.13)$$

Diğer gemi hareketlerinde olduğu gibi yalpa hareketinde de ek-kütle etkisi mevcuttur. Geminin tipine bağlı olarak deplasmanın %10–30' u arasında değişir. Toplam atalet momenti, gemi ve ek su kütlesi atalet momentinin toplamı,

$$I_x + K_{\dot{\phi}} = \frac{G}{\omega_n^2} \quad (4.14)$$

sönüm,

$$\xi = \frac{D}{2\sqrt{(I_x + K_{\dot{\phi}})G}} \quad (4.15)$$

doğal frekans aşağıdaki şekilde ifade edilir.

$$\omega_{\phi} = 2\pi \sqrt{\frac{\rho g \nabla GM}{I_x + K_{\dot{\phi}}}} \quad (4.16)$$

(4.11) denklemini durum uzayı formunda ifade etmek için her iki tarafı  $(I + K_{\dot{\phi}})$ ' ye bölünür,

$$\ddot{\phi} = \frac{M_k}{I_x + K_{\dot{\phi}}} - \frac{D}{I_x + K_{\dot{\phi}}} \dot{\phi} - \frac{G}{I_x + K_{\dot{\phi}}} \phi \quad (4.17)$$

ve düzenlenirse,

$$\begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \ddot{\phi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{G}{I_x + K_{\dot{\phi}}} & -\frac{D}{I_x + K_{\dot{\phi}}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phi \\ \dot{\phi} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{I_x + K_{\dot{\phi}}} \end{bmatrix} M_k \quad (4.18)$$

yalpa açısı ve hızına bağlı olarak ifade edilir. (4.11) eşitliğine Laplace dönüşümü uygulandığında gemi kütle, sönüm ve doğrultma kuvvetlerine bağlı yalpa denklemi,

$$(I_x + K_{\dot{\phi}})s^2 \phi(s) + Ds\phi(s) + G\phi(s) = M_k(s) \quad (4.19)$$

elde edilir. Kanat etkisi ile oluşan moment aşağıdaki gibidir (Sgobbo ve Parsons, 1992).

$$M_k = \rho A_k V^2 C_L \alpha_t R_{vk} \quad (4.20)$$

Yalpa açısı transfer fonksiyonu elde edilir (Tzeng ve Wu, 2000).

$$G(s) = \frac{\phi(s)}{\alpha(s)} = \frac{\rho A_k V^2 C_L \alpha_t R_{vk}}{(I_x + K_{\dot{\phi}})s^2 + Ds + G} \quad (4.21)$$

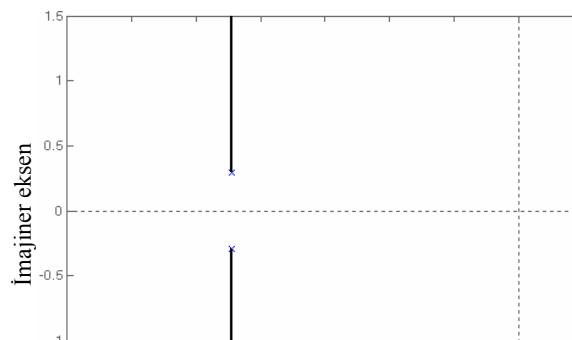
Çizelge 4.2 Bir konteyner gemisine ait ve NACA 0015 profiline ait bilgiler

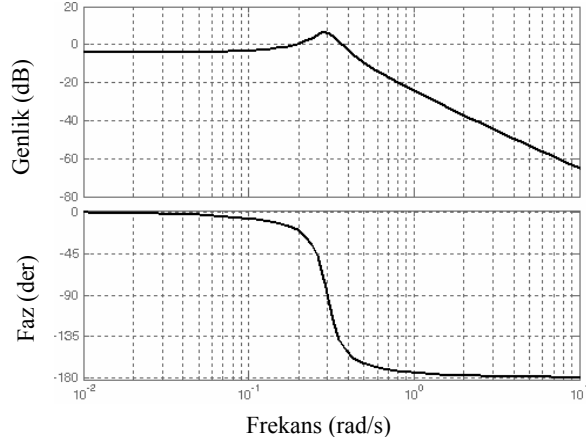
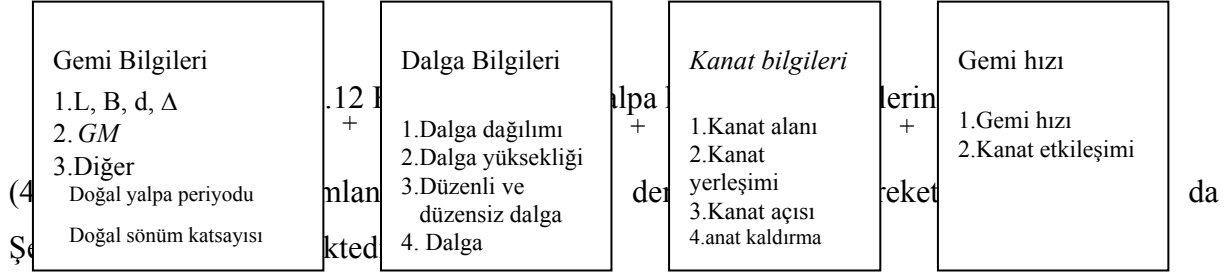
<u>Konteyner gemisi</u>		<u>Yalpa kanadı</u>	
Boy ( $L$ )	230.66 m	Kanat alanı	3.6 m <sup>2</sup>
Genişlik ( $B$ )	32 m	$C_{L\alpha}$	2.464 1/rad
Derinlik ( $D$ )	10.7 m	$s_p$	3 m
Metasantr ( $GM$ )	0.83 m	$\bar{c}$	1.2 m
Seyir hızı ( $V$ )	12.7 m/s	Kanat şekli	NACA 0015
Hacim ( $\Delta$ )	46070m <sup>3</sup>		

(4.21) eşitliği ve Çizelge 4.2 dikkate alınarak yalpa hareketi transfer fonksiyonu aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$G(s) = \frac{0.055}{s^2 + 0.089s + 0.089} \quad (4.22)$$

Şekil 4.12'den görüldüğü gibi transfer fonksiyonun özdeğerleri sol yarı düzlemde olduğu için sistemimiz kararlı durumdadır. Aynı zamanda, Lyapunov teoreminden faydalanarak sistemimizin asimptotik kararlı olduğu söylenebilir (Ek 8).





Şekil 4.13 Kontrolsüz gemi yalpa hareketi frekans cevabı

Bu grafikten yalpa hareketi rezonans frekansının  $\omega = 0.297$  (rad/s) olduğu görülmektedir.

#### 4.4 Konteyner Gemisi Yalpa Hareketi Kontrolcü Tasarımı

Yalpa dengeleme sisteminin en önemli görevi, dinamik sistem olan geminin yalpa hareketinin genliğini sönümlemesidir. Gemi yalpa sistem seçimi ve kontrolü için genel bir blok şeması, Şekil 4.14'de gösterilmektedir.

#### Şekil 4.14 Gemi yalpa dengeleme sistemi seçim şeması

Bu kısımda, bir ve üç serbestlik dereceli konteyner gemi yalpa hareketinin PID, Lineer Quadratik Kontrol, Model Referans Adaptif Kontrolü ve Bulanık Mantık yöntemleri ile kontrolü yapılmıştır. Bu kısımda önerilen kontrol yöntemleri ile yalpa hareketlerinin yalpa dengeleme sistemi kullanılarak sönümlenmesine çalışılmıştır. Elde edilen simülasyon sonuçları karşılaştırmalı olarak sunulmuştur.

Simülasyon uygulamalarında, konteyner gemisi yalpa hareketi kontrol kriterleri,

1. Maksimum aşma  $\leq \%20$ ,
2. Yalpa oranı ortalama  $0.25 \text{ der/s}$ ,
3. Yerleşme süresi  $\leq 60 \text{ s}$

olarak öngörülmüştür. Kontrolcü tasarımın amacı,

1. Sönümü arttırmak
2. Yalpa genliğini azaltmaktır.

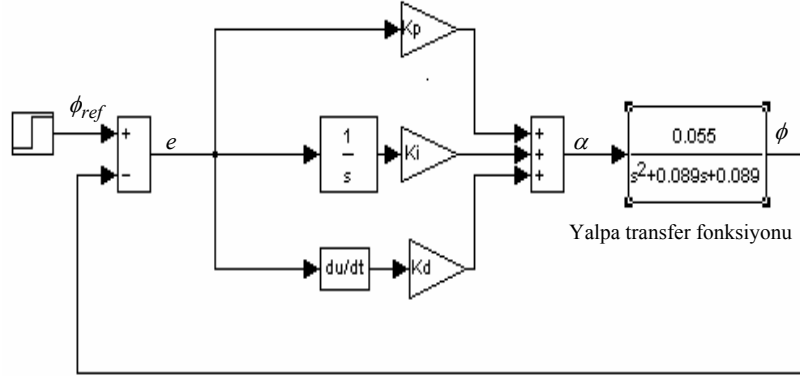
#### 4.4.1 Bir Serbestlik Dereceli Konteyner Gemisi Yalpa Hareketinin PID Kontrolü

Bu çalışmada otomatik kontrol yöntemlerinin geminin yalpa hareketine etkileri incelenirken, rüzgâr ve deniz akıntıları sabit olarak kabul edilecektir. Şekil 4.15’de yalpa hareketi Oransal-Integral-Türev (PID) kontrollü blok diyagramı gösterilmektedir. Bu kontrolcü gemi yalpa dengeleme sistemine uygulandığında,

$$\alpha_i = K_p \phi + K_d \dot{\phi} + K_i \int_0^t \phi d\tau \quad (4.23)$$

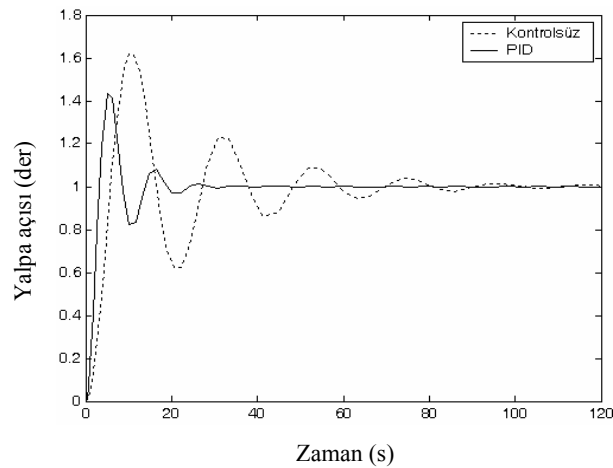
elde edilir. Burada, ' $\phi$ ' yalpa açısı (der), ' $\dot{\phi}$ ' yalpa açısız hızı (der / s),  $K_p > 0$ ,  $K_d > 0$ ,  $K_i > 0$  yalpa kontrolcü kazançlarıdır.

$$G(s) = \frac{\phi(s)}{\alpha(s)} = \frac{(I + K_p)s^2 + Ds + G}{K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s} \quad (4.24)$$

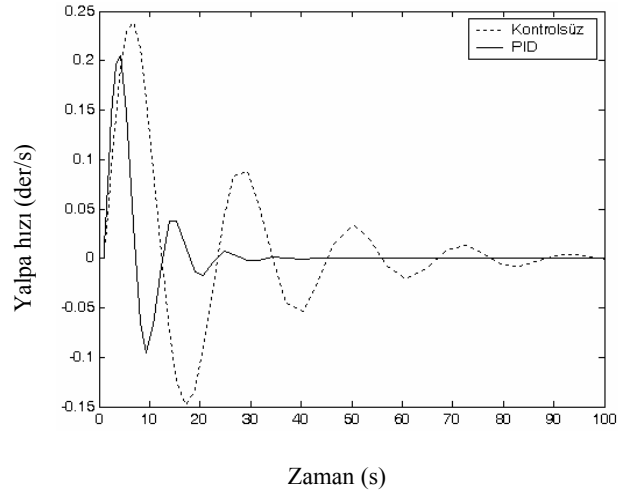


Şekil 4.15 PID kontrollü gemi yalpa modeli blok diyagramı

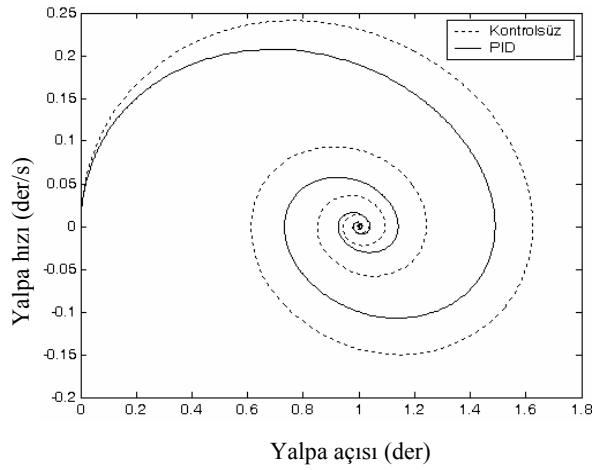
Bu kontrolcü uygulamasında Çizelge 4.2'de fiziksel boyut ve özellikleri verilen bir konteyner gemisi dinamik modeli esas alınmıştır. Yalpa açısı için, verilen kriterlere göre tasarlanan PID kontrolcü kazançları aşağıda verilmiş ve bu tasarıma ilişkin simülasyon sonuçları Şekil 4.16, Şekil 4.17 ve Şekil 4.18'de gösterilmiştir.



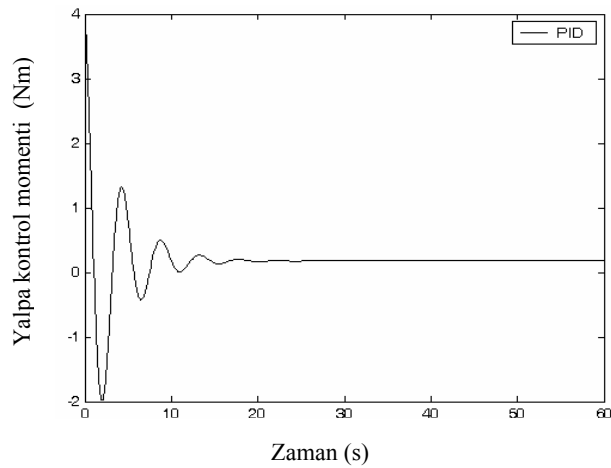
Şekil 4.16 PID kontrollü bir serbestlik dereceli konteyner gemi yalpa açısı mukayesesi



Şekil 4.17 PID kontrollü bir serbestlik dereceli konteyner gemi yalpa hız mukayesesi



Şekil 4.18 PID kontrollü bir serbestlik dereceli konteyner gemi yalpa faz mukayesesi



#### Şekil 4.19 PID kontrollü konteyner gemi yalpa kontrol işareti

PID kontrolcü ile yapılan simülasyon sonuçlarından da görüldüğü gibi ortalama % 23 aşım, 0.22 der./s. hız değişimi ile 45 saniyede referansa yerleşmiştir. Sonuç olarak bu yöntem konteyner gemi yalpa hareketine uygulanmış ancak yeterli başarıyı sağlayamadığı gözlemlenmiştir. Yapılan simülasyondan da görüldüğü gibi kontrol işareti, yalpa hareketini sönümleyerek sıfıra gitmektedir (Şekil 4.19).

Bilindiği gibi PID kontrol kuralı, dış bozuculara ve modellenmemiş belirsizliklere karşı dayanıklı değildir ya da dayanıklılık sınırlıdır. Konteyner gemisinin seyir esnasında, meydana gelecek yük ve çevre etkilerinin değişimlerine karşı duyarlılık ve dayanıklılık sağlayabilmek için, tezin daha sonraki bölümlerinde değişik kontrol yöntemleri incelenecektir. Burada PID kontrol uygulanmasındaki amaç, bu kontrol kuralının bilinen en yaygın ve basit kontrol yöntemi olmasıdır.

#### 4.4.2 Bir Serbestlik Dereceli Konteyner Gemisi Yalpa Hareketinin LQR ile Kontrolü

PID kontrolünün dayanıklı ve tasarımları basit olmasına karşın bütün kontrol problemlerine karşı genel bir çözüm sağlayamamaktadır. Yalpa genliğinin sönümlemesinde oluşan bu problemler optimizasyon kriterleri uygulanarak engellenir. Seyir konforunu, taşınan yüklerin güvenliği ve yalpa dengeleme performansını geliştirebilmek için LQR algoritması kullanılmıştır. Bu çalışma, konteyner gemisi yalpa hareketinin optimal kontrole göre davranış biçimini ve kontrolcü başarımını göstermek bakımından önemli görülerek yapılmıştır. En genel halde yalpa denklemi durum-uzayı formunda aşağıdaki dönüşümler yapılarak

$$x^T = [x_1 \quad x_2] \quad \text{ve} \quad x_1 = \phi, \quad x_2 = \dot{\phi} = p \quad (4.25)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \ddot{\phi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ \frac{-G}{I+K_p} & \frac{-D}{I+K_p} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phi \\ \dot{\phi} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 \\ \frac{1}{I+K_p} \end{bmatrix} \rho A_k V^2 C_L R_{vk} \alpha = A x + B \alpha \quad (4.26)$$

$$y = \phi = [1 \quad 0] x = C x \quad (4.27)$$

elde edilir. Çizelge 4.2'den faydalanarak konteyner gemisinin durum uzay modeli sayısal olarak aşağıdaki gibi verilmiştir.

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -0.089 & -0.089 \end{bmatrix} \quad (4.28)$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0.055 \end{bmatrix} \quad (4.29)$$

$$C = [1 \quad 0] \quad (4.30)$$

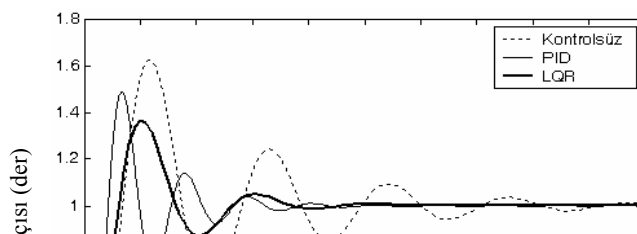
Optimal kontrol algoritmasında, performans ölçütü amaçlanan dinamik yörüngede yalpa açısını referans değere getirecek şekilde seçilmiştir. Bu çalışmada kullanılacak olan performans ölçütü 'J' ile gösterilir.

$$J(t_o, T) = \left( \frac{1}{2} \int_{t_o}^T [e^T(t) Q e(t) + f^T(t) R f(t)] dt \right) \quad (4.31)$$

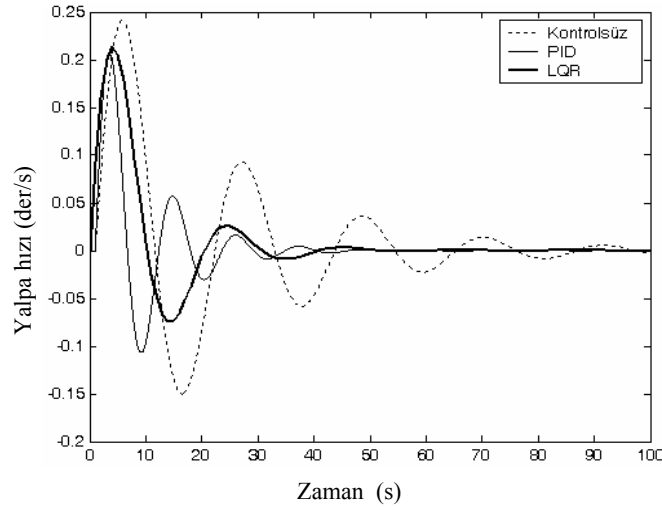
Burada,  $Q > 0$ ,  $R > 0$  olup bu matrislerin uygun seçimi ile yukarıda verilen performans kriterini minimum yapacak kontrol kazancı hesaplanır.

İstenen çıkış fonksiyonu  $\phi_d(t) = C x_d(t)$  olursa, hata  $e(t) = \phi_d(t) - \phi(t)$  olarak tanımlanır (Athans ve Falb, 1966). LQR kontrol sürecinde, ağırlık fonksiyonları  $\phi$  çıkış değeri istenen cevap değerine mümkün olduğu kadar yakın olacak şekilde ayarlanır. Bu çıkış ile istenen cevap karşılaştırılıp aralarındaki hata değeri bulunur ve bu değeri en aza indirmek için ağırlık değerleri optimize edilip ayarlanır. Burada  $\phi(t)$ , yalpa genliği,  $\phi_d(t)$  ise istenen yalpa genliğidir. Hata miktarını en aza indiren geribesleme kazancı aşağıdaki gibidir.

$$K = R^{-1} B^T P \quad (4.32)$$

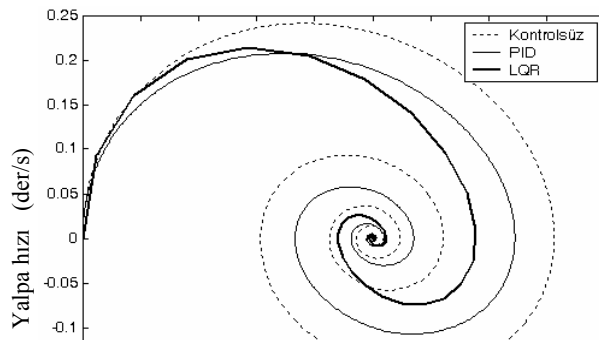


Şekil 4.20 LQR ile bir serbestlik dereceli konteyner gemi yalpa açısı mukayesesi

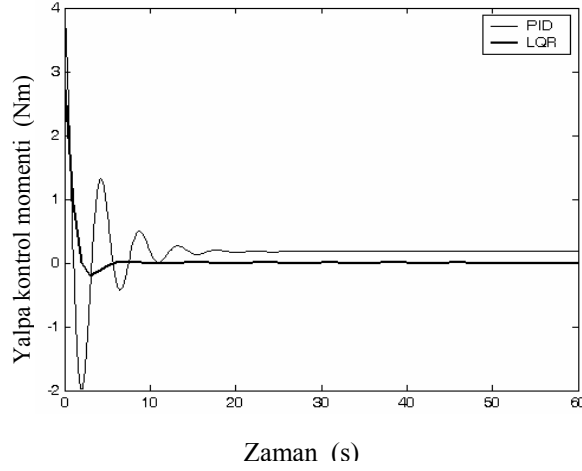


Şekil 4.21 LQR ile bir serbestlik dereceli konteyner gemi yalpa hızı mukayesesi

Şekil 4.20, Şekil 4.21 ve Şekil 4.22’de LQR kontrolün yalpa sönümüne etkileri görülmektedir. LQR metodu ile yapılan simülasyonlardan da görüldüğü gibi konumlar, PID kontrol uygulamasına göre daha düşük genliklerde ve daha az aşım yaparak 40 saniyede ortalama 0.22 (der/s) hızla referansa oturmaktadır. Bu bakımdan LQR kontrol yöntemi ile kontrol kriterlerine uygun sonuçlar elde edilmiştir. Bu yöntemin sağladığı kararlılık özelliği ile PID kontrolden daha uygun bir kontrol kuralı olduğu Şekil 4.22’de görülmektedir.



Şekil 4.22 LQR ile bir serbestlik dereceli konteyner gemi yalpa faz mukayesesi



Şekil 4.23 LQR kontrollü konteyner gemi yalpa kontrol işareti

Ayrıca elde edilen kontrol kuvveti konum hatalarını ortadan kaldırmada uygun olduğu görülmüştür. Türetilen kontrol kuvvetleri yalpa açısı referansa yerleşinceye kadar değişmekte ve yalpa açısının referansa yerleşmesinden sonra sabit bir değerde olması optimal kontrol kuralının doğru olarak çalıştığını göstermektedir (Şekil 4.23).

#### 4.4.3 Bir Serbestlik Dereceli Konteyner Gemisi Yalpa Hareketinin Model Referans Adaptif Kontrolü

Bu kısımda konteyner gemi lineer yalpa modelinin basamak girişe olan cevabı model referans adaptif kontrol metodu ile incelenmiştir. Yalpa açısının yalpa kanat sistemi ile kontrol edildiği uygulamada kontrol parametrelerinin performans üzerindeki etkilerini gidermek için model referans adaptif kontrol kullanılmıştır. Bu kontrol metodunun kullanıldığı yalpa hareketi kontrol diyagramı Şekil 4.24'de verilmektedir.



$$\frac{dy}{dt} = -a y + b u \quad (4.36)$$

Burada,  $y = [\phi \ \dot{\phi}]^T$  yalpa açısı ve hız değişimi,  $u = \alpha$  ise yalpa kanat açısıdır. Referans model olarak lineer, ikinci dereceden zamanla değişmeyen bir sistem gözönüne alınmıştır. Referans modelin durum uzayı formu,

$$\dot{y}_m = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\omega_n^2 & -2\xi\omega_n \end{bmatrix} y_m + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{K}{T} \end{bmatrix} u_c = -a_m y_m + b_m u_c \quad (4.37)$$

şeklinde ifade edilir. Burada  $y_m = [\phi_m \ \dot{\phi}_m]^T$  modelin yalpa açısı ve hız değişimi,  $u_c = \alpha_c$  ise modelin yalpa dengeleme kanat sapmasıdır.  $\omega_n$ ,  $\xi$  sırasıyla referans model doğal frekansı ve sönüm oranıdır. Kontrolcü parametreleri,

$$t_0 = \frac{b_m}{b}, \quad s_0 = \frac{a_m - a}{b} \quad (4.38)$$

ve hata miktarı aşağıdaki gibi ifade edilirse,

$$e = y - y_m \quad (4.39)$$

kontrolcü hız ve açısı parametreleri,

$$\frac{dt_0}{dt} = -\gamma \left( \frac{1}{p + a_m} u_c \right) e \quad (4.40)$$

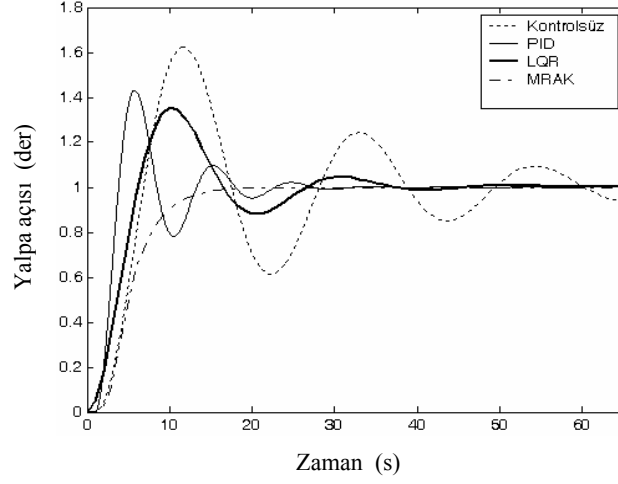
$$\frac{ds_0}{dt} = \gamma \left( \frac{1}{p + a_m} y \right) e \quad (4.41)$$

elde edilir. Burada  $p = \frac{d}{dt}$  ve  $\gamma$  adaptasyon kazancıdır. İstenen modelin takip edilmesi için kontrol kazancı aşağıdaki gibi olmalıdır.

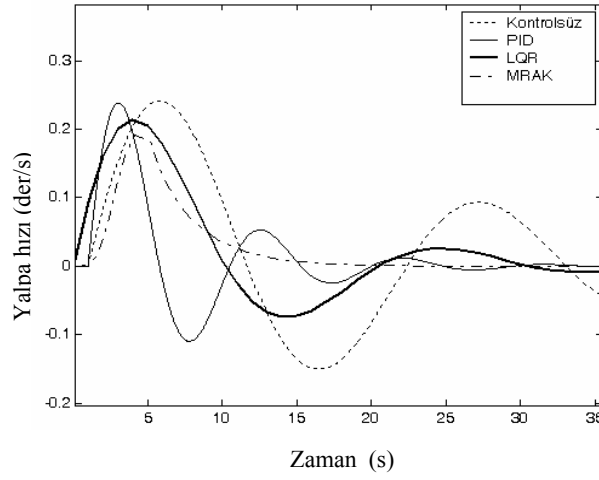
$$u(t) = t_0 u_c(t) - s_0 y(t) \quad (4.42)$$

Konteyner gemisinin yalpa açısının sönüm oranı 0.8 ve doğal frekans 0.5 olan sabit katsayılı doğrusal bir ikinci derece sistemin çıkışı gibi değişmesi öngörülmüştür. Referans model, kontrolcü ve uyarılama kazançları için aşağıda verilen parametre değerleri gözönüne alınarak tasarıma ilişkin simülasyonlar yapılmıştır.

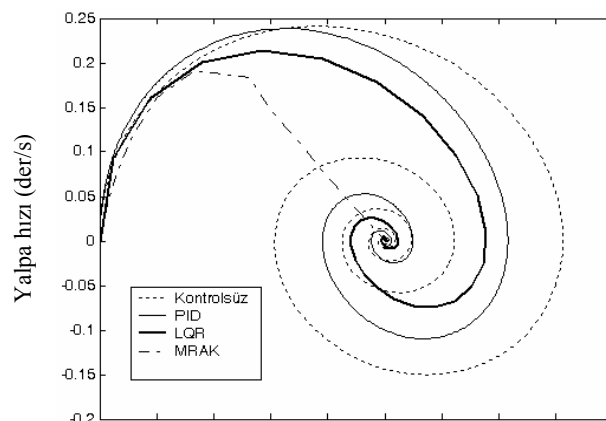
Model referans adaptif kontrol yöntemi konteyner gemisi yalpa dengeleme sistemine uygulanmış ve elde edilen simülasyon sonuçları Şekil 4.25, Şekil 4.26 ve Şekil 4.27’de verilmiştir.



Şekil 4.25 MRAK kontrollü bir serbestlik dereceli konteyner gemi yalpa açısı mukayesesi

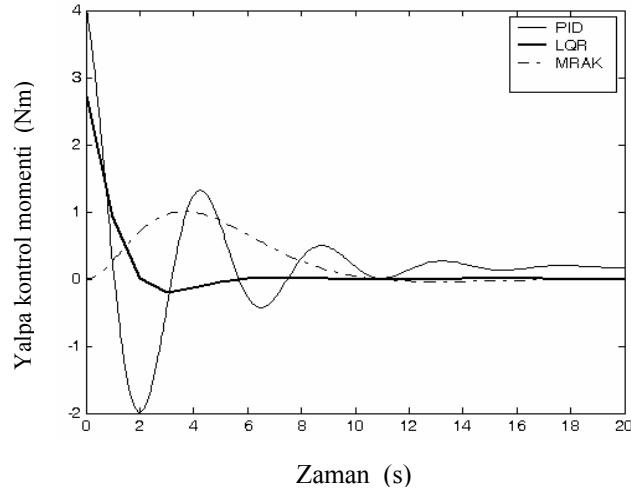


Şekil 4.26 MRAK kontrollü bir serbestlik dereceli konteyner gemi yalpa hız mukayesesi



Şekil 4.27 MRAK kontrollü bir serbestlik dereceli konteyner gemi yalpa faz mukayesesi

MRAK modellemede giriş sinyali basamak fonksiyonu olup modelin, sistemin bu girişlere karşı verdiği çıkış değerleri takip etmesi beklenir. Şekil 4.27’de MRAK kontrol uygulanmış yalpa hareketi faz diyagramı görülmektedir. Ek 8’de ifade edildiği gibi bu kontrol metodu ile elde edilen kararlılık değeri diğer metotlara göre daha iyidir.



Şekil 4.28 MRAK kontrollü konteyner gemi yalpa kontrol işareti

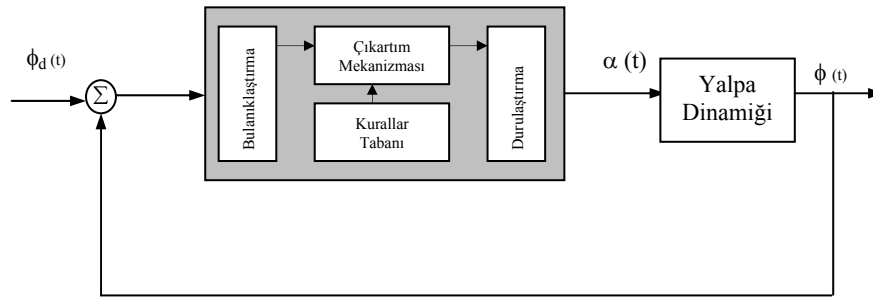
Bu kontrol yöntemi ile gemi yalpa açısı 20 saniyede aşmsız ve 0.19 der./s. hız değişimi ile referansa yaklaşmaktadır. Model referans adaptif kontrol kuralı ile elde edilen kontrol işareti Şekil 4.28’den de görüldüğü üzere konum hatasını gidermek için yaklaşık 4 saniyeye kadar artış göstermektedir. Tüm bu uygulamalardan da anlaşıldığı gibi MRAK kontrol yaygın klasik kontrolden çok daha ileri düzeyde bir uygulamadır.

#### 4.4.4 Bir Serbestlik Dereceli Konteyner Gemi Yalpa Hareketinin Bulanık Kontrolü

PID, modern kontrol teorisinin ortaya çıkışından bu yana en çok kullanılan kontrol algoritmalarının başında gelmiştir. Ancak bu algoritma ayar noktasının değişimi, sistemin

durdurulup tekrar çalıştırılması ve dış etkilerin olması durumunda hareketin optimum kontrol edilmesine engel oluşturabilmektedir. Bu kısımda inceleyeceğimiz bulanık kontrol algoritması ile yalpa açısı kontrolü PID ve diğer kontrol algoritmaları için iyi bir alternatiftir.

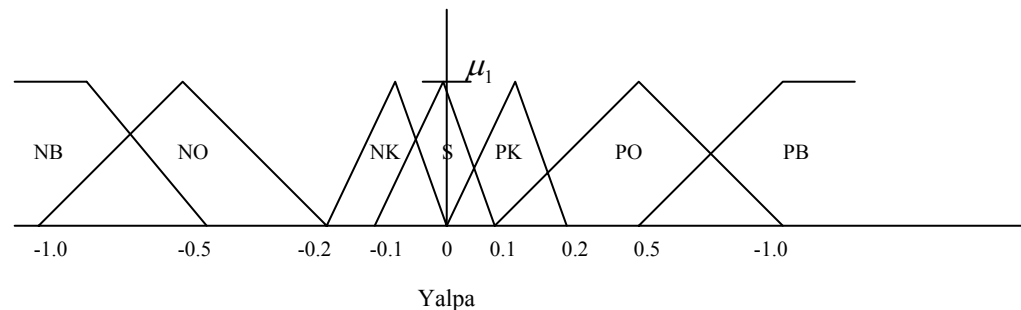
Bulanık kontrolcü, giriş ve çıkış parametrelerinden bir kısmı veya tamamen bulanık üyelik fonksiyonları tarafından tanımlanan kural tabanlı bir kontrol sistemidir. Böyle bir kontrol sisteminin önemli özellikleri, kuralların sözel değişkenlerle ifade edilebilir olması, uzman bilgisinin tam olarak kontrol kuralına yansıtılması ve kesin olmayan bilgiler üzerinden çıkarım yapabilme yeteneğine sahip olmasıdır. Bu şekilde oluşturulan bir bulanık yalpa kontrolcü modeli Şekil 4.29'da görülmektedir.

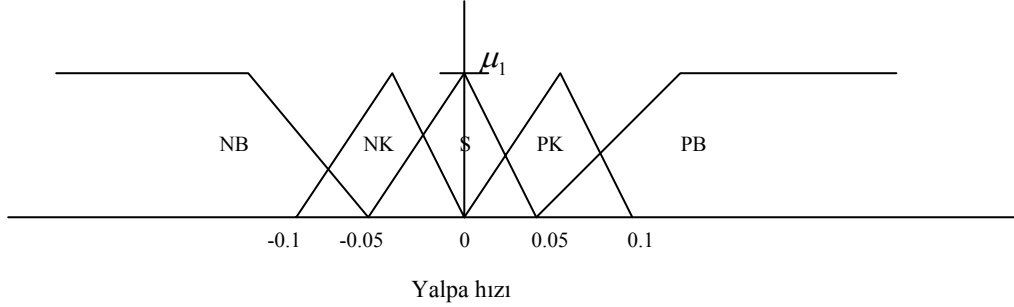


Şekil 4.29 Bulanık mantık ile yalpa dengeleme kontrolü blok diyagramı

Bu bulanık kural tabanlı sistemde, Mamdani çözümleme yöntemi kabul edilmiştir. Bu çalışmada, yalpa açısı sensörü ve yalpa hız sensörü olmak üzere iki kontrol değişkeni bulunmaktadır.

Kontrol amacı, konteyner gemisinin yalpa hareketini minimize etmektir. Sensörler vasıtasıyla yalpa açısı ve hız bilgileri elde edilir. Böylece yalpa açısı ( $\phi$ ), yalpa hızı ( $\dot{\phi}$ ) ve kanat açısı ( $\alpha$ ) tanımlanır. Rota tutuşunda kullanılan bulanık otopilotta iki kontrol girişi mevcuttur, yalpa açısı  $\phi$  ve yalpa hızı  $p = \frac{d\phi}{dt}$  kontrolcü tarafından oluşturulan kontrol etkisi, kanat açısı ' $\alpha$ ' ile yapılmaktadır. Bulanıklaştırılmış giriş ve kontrol değişkenlerine ait üyelik fonksiyonları Şekil 4.30'da görülmektedir.





Şekil 4.30 Bulanık mantık yalpa dengeleme üyelik fonksiyonları

NB: Negatif büyük, NO: Negatif orta, NK: Negatif küçük, SI: Sıfır  
 PB: Pozitif büyük, PO: Pozitif orta, PK: Pozitif küçük,

Bulanık kontrolde bulanık giriş ve çıkış parametrelerinin sayısı, üyelik fonksiyonların tipi ve adedi, kural tabanını oluşturan kurallar belirlenmesi gereken en önemli parametrelerdir. Çizelge 4.3'de bu çalışmada kullanılan kural tabanı görülmektedir. Kontrolcü tasarımında hata, hatanın türevi ve üyelik fonksiyonları ayrı ayrı tanımlanmıştır.

Çizelge 4.3 Kontrol kural çizelgesi

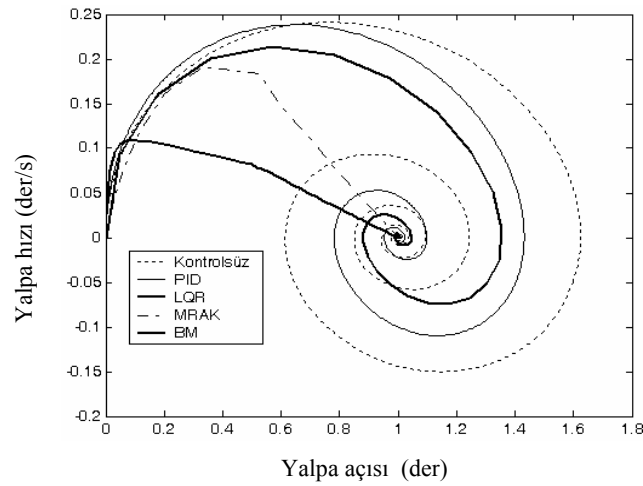
$\frac{de}{dt}$ \ e	NB	NO	NK	SI	PK	PO	PB
NB	NB	NB	NB	NB	NO	NK	SI
NO	NB	NB	NB	NO	NK	SI	PK
NK	NB	NB	NO	NK	SI	PB	PO
SI	NB	NO	NK	SI	PK	PO	PB
PK	NO	NK	SI	PK	PO	PB	PB
PO	NK	SI	PK	PO	PB	PB	PB
PB	SI	PK	PO	PB	PB	PB	PB

Bu çalışmada  $[-1 \ 1]$  değişken aralığı için 7 sözel değişken tanımlanmıştır. Sözel değişkenler üçgen üyelik fonksiyonları ile ifade edilmiştir. Böylece  $[-1 \ 1]$  aralığında tanımlanan  $e$ ,  $de/dt$  ve  $u$  değerleri sözel değişkenlere dönüştürülmüştür. Kontrol giriş parametreleri hata ( $e$ ) ve hatanın türevi ( $de/dt$ )'dir. Örneğin, yalpa negatif küçük olsa ve yalpa oranı pozitif büyük olsa yalpa durumu pozitif orta olur. Üyelik dereceleri hesaplanan bulanık değişkenler karar verme



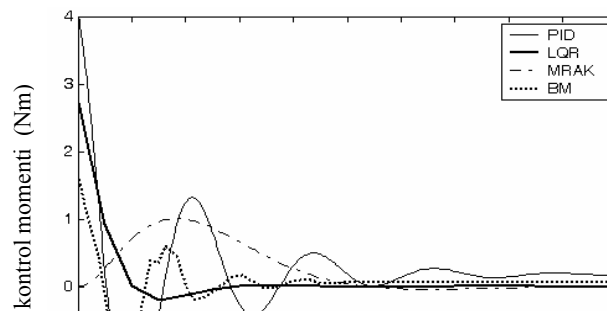
Şekil 4.33 BMK ile bir serbestlik dereceli konteyner gemi yalpa hız mukayesesi

Bulanık mantık ile kontrol kazançları deniz durumuna bağlı otomatik ayarlanır. Bu metod uzun periyotlu dalgalarda yalpa dengeleme sisteminin yalpa sönüm performansını arttırabilir.



Şekil 4.34 BM kontrollü bir serbestlik dereceli konteyner gemi yalpa faz mukayesesi

Şekil 4.32 ve Şekil 4.33'den görüldüğü gibi yalpa açısı 10 s. altında ortalama 0.1 der/s. hızla aşırı referansa yerleşmiştir. Burada yalpa hareketinin referansa kısa sürede yerleşmesinin sebebi bulanık uyarılma kurallarının tablodan okuma şeklinde yapıldığından fazla zaman kaybının olmamasından kaynaklanmaktadır. Sonuç olarak, bulanık sistemler kullanılarak, özellikle klasik kontrolcülerin yetersiz kaldığı olağan dışı durumlarda kullanılacak bir kontrol sistemi tasarımı gerçekleştirilmiştir. Kullanılan PID kontrol metodu yalpa sönüm performansını yeterince iyileştiremezken bulanık kontrol bütün durumlarda performans artımı sağlamıştır (Şekil 4.34).

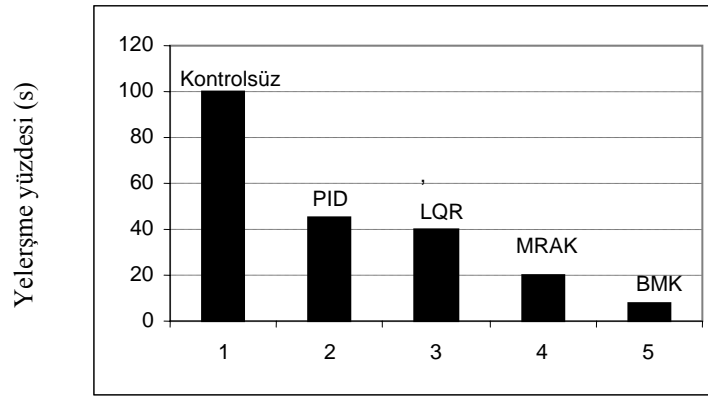


Şekil 4.35 BM kontrollü konteyner gemi yalpa kontrol işareti

Kontrol işareti, yalpa açısını diğer kontrol metotlarına göre daha uygun bir biçimde sönümleyerek sıfıra gitmektedir (Şekil 4.35). Çizelge 4.4 'de bakıldığında bulanık mantık kontrolcü performansının diğer yöntemlerden daha iyi olduğu'te gösterilmiştir.

Çizelge 4.4 Bir serbestlik dereceli modelde yalpa hareketi kontrol sonuçları

	% Ortalama Aşım	Yerleşme süresi (s.)	Ort. hız değişimi (der/s)
Kontrolsüz z	52	100	0.25
PID	23	45	0.22
LQR	20	40	0.20
MRAK	0	20	0.19
BMK	0	8	0.1



Şekil 4.36 Kontrolcü performanslarının mukayesesi

Çizelge 4.4 verilerinden faydalanarak Şekil 4.36 grafiği elde edilmiştir. Bu grafikten görüldüğü gibi yerleşme süresi azaldıkça aşım yüzdesi de azalmaktadır. Bu durum yerleşme süresi azaldıkça kontrolcü performansının arttığını göstermektedir. Performans değerlendirilmesinde aşım yüzdesi ve yerleşme süresinin önemli kriterler olduğu görülmüştür.

#### 4.5 Üç Serbestlik Dereceli Konteyner Gemi Yalpa Hareketi

Bu kısımda, incelenen kontrol yöntemlerinin konteyner gemisi yalpa dengeleme sisteminin gerçek fiziksel boyut ve özellikleri göz önüne alınarak üç serbestlik dereceli dinamik model elde edilmiştir. En genel halde altı serbestlik dereceli lineer hareket eşitliği aşağıdaki gibidir.

$$M \dot{\nu} + D(\nu)\nu + G(\eta) = \tau \quad (4.43)$$

$[M]$  kütle matrisi,  $[D]$  sönüm matrisi,  $[G]$  doğrultucu kuvvet matrisidir.

$$(m - Y_{\dot{v}}) \dot{v} = Y_v v + Y_\phi \phi + Y_p p + Y_{\dot{p}} \dot{p} + Y_r r + Y_{\dot{r}} \dot{r} + Y_\alpha \alpha \quad (4.44a)$$

$$(I_x - K_{\dot{p}}) \dot{p} + WGM\phi = K_p p + K_v v + K_{\dot{v}} \dot{v} + K_r r + K_{\dot{r}} \dot{r} + K_\alpha \alpha \quad (4.44b)$$

$$(I_z - N_{\dot{r}}) \dot{r} = N_r r + N_\phi \phi + N_p p + N_{\dot{p}} \dot{p} + N_v v + N_{\dot{v}} \dot{v} + N_\alpha \alpha \quad (4.44c)$$

(4.44) eşitliklerinden faydalanılarak üç serbestlik dereceli model matris formunda yazıldığında rijid gemi gövde kütle matrisi,

$$M = M_{RB} + M_A \quad (4.45)$$

$$M = \begin{bmatrix} m - Y_{\dot{v}} & -Y_{\dot{p}} & -Y_{\dot{r}} \\ -K_{\dot{v}} & I_x - K_{\dot{p}} & -K_{\dot{r}} \\ -N_{\dot{v}} & -N_{\dot{p}} & I_z - N_{\dot{r}} \end{bmatrix}, \quad \dot{\nu} = \begin{bmatrix} \dot{v} \\ \dot{p} \\ \dot{r} \end{bmatrix} \quad (4.46)$$

sönüm matrisi,

$$D = \begin{bmatrix} -Y_v & -Y_p & -Y_r \\ -K_v & -K_p & -K_r \\ -N_v & -N_p & -N_r \end{bmatrix}, \quad \nu = \begin{bmatrix} v \\ p \\ r \end{bmatrix} \quad (4.47)$$

doğrultucu kuvvet matrisi,

$$G = \begin{bmatrix} 0 & -Y_\phi & 0 \\ 0 & WGM & 0 \\ 0 & -N_\phi & 0 \end{bmatrix}, \quad \eta = \begin{bmatrix} x \\ \phi \\ \psi \end{bmatrix} \quad (4.48)$$

Kanat kuvvet vektörü elde edilir.

$$\tau = \begin{bmatrix} Y_\alpha \\ K_\alpha \\ N_\alpha \end{bmatrix} \alpha \quad (4.49)$$

Her bir kanatın ek kütlesi aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$M_k = \frac{b}{2} \bar{C} \frac{2\pi}{4} \rho \quad (4.50)$$

Burada,  $\bar{C}$  kanatın ortalama kiriş uzunluğu,  $\frac{b}{2}$  'de ortalama açıklık olarak gösterilir.

Kanatların kütle matrisine etkileri aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$A_{42k} = (-2)M_k R_{vk} \quad (4.51)$$

$$A_{44k} = (-2)M_k R_{vk}^2 \quad (4.52)$$

$$A_{46k} = (-2)M_k \ell_k R_{vk} \quad (4.53)$$

$$A_k = \begin{bmatrix} A_{42k} & 0 & 0 \\ 0 & A_{44k} & 0 \\ 0 & 0 & A_{46k} \end{bmatrix}, \quad \dot{v} = \begin{bmatrix} \dot{v} \\ \dot{p} \\ \dot{r} \end{bmatrix} \quad (4.54)$$

Yalpa dengeleme kanatlarının kütle matrisine etkileri aşağıdaki gibidir.

$$M_T = M + A_k \quad (4.55)$$

Yalpa kanadının sönüm matrisine etkileri,

$$D_{42k} = (-\rho) A_k V C_l \cos 38^\circ R_{vk} \quad (4.56)$$

$$D_{44k} = (-\rho) A_k V C_\ell R_{vk}^2 \quad (4.57)$$

$$D_{46k} = (-\rho) A_k V C_\ell \cos 38^\circ R_{vk} \ell_k \quad (4.58)$$

$$D_k = \begin{bmatrix} D_{42k} & 0 & 0 \\ 0 & D_{44k} & 0 \\ 0 & 0 & D_{46k} \end{bmatrix}, \quad v = \begin{bmatrix} v \\ p \\ r \end{bmatrix} \quad (4.59)$$

$$D_T = D + D_k \quad (4.60)$$

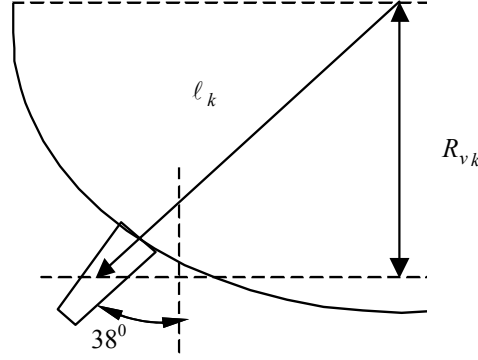
biçiminde ifade edilir. Burada,  $R_{vk}$  yalpa yüzeyi basınç merkezi ile gemi yalpa merkezi arasındaki düşey mesafedir. Kaldırma kolu  $\ell_k$  yalpa yüzeyi basınç merkezi ile gemi orta noktası arasındaki mesafedir. Yalpa kanadında oluşan kuvvet ve momentler aşağıdaki gibidir.

$$Y_\alpha = \rho A_k V^2 C_\ell \cos 38^\circ \quad (4.61)$$

$$K_{\alpha} = \rho A_k V^2 C_{\ell} R_{vk} \quad (4.62)$$

$$N_{\alpha} = \rho A_k V^2 C_{\ell} \ell_k \cos 38^{\circ} \quad (4.63)$$

Simülasyon çalışmalarında kullanılacak konteyner gemi yalpa dengeleme sistemlerinin yerleşimi Şekil 4.37’de gösterilmektedir.



Şekil 4.37 Yalpa dengeleme sistemi yerleşimi

Aktif kanat dengeleme sistemi, etkilerinin kütle ve sönüm matrisine ilave edildiği, üç serbestlik dereceli model kullanılarak tasarlanmıştır. Bütün simülasyon uygulamalarında kontrol girişi olarak basamak giriş fonksiyonu ve MATLAB simulink kontrol programı esas alınmıştır. Üç serbestlik dereceli modeli durum uzayı formunda Ek 9’daki gibi,

$$x^T = [v \ p \ r \ \phi \ \psi]^T, \quad u = \alpha \quad (4.64)$$

ifade edilir. Konteyner gemisinin durum uzayı modeli sayısal olarak aşağıdaki gibidir.

$$A = \begin{bmatrix} -0.0374 & -8.1620 & -0.0186 & 0.0122 & 0 \\ -0.0011 & -0.2534 & -0.0699 & -0.0009 & 0 \\ 0.0033 & 0.0489 & -0.0939 & -0.0651 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad v = \begin{bmatrix} v \\ p \\ r \\ \phi \\ \psi \end{bmatrix} \quad (4.65)$$

$$B = \begin{bmatrix} -0.1631 \\ 0.0062 \\ 0.0108 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4.66)$$

#### 4.5.1 Üç Serbestlik Dereceli Konteyner Gemisi Yalpa Hareketinin PID Kontrolü

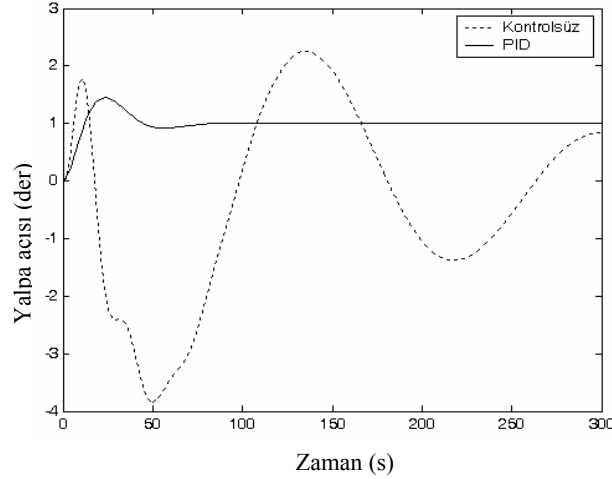
Üç serbestlik dereceli konteyner gemisi yalpa açısı için tasarlanan PID kontrolcü kazançları bir serbestlik dereceli model uygulamasında kullanılan kazançlar kullanılmıştır. Kontrolcü performanslarının serbestlik derecesi ile değişimini görmek için kontrolcü kazanç değerleri aynı seçilmiştir. Durum hatası,

$$\phi_e(t) = \phi_m(t) - \phi(t) \quad (4.67)$$

kontrol kuralı frekans düzleminde,

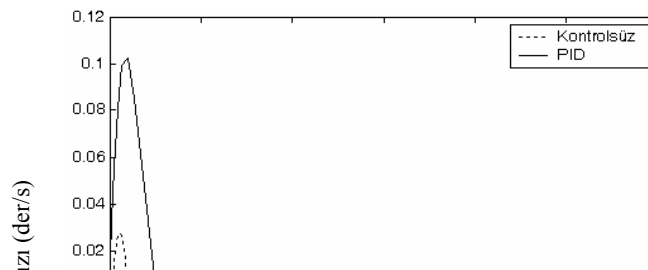
$$\alpha(s) = \left( K_p + K_d s + \frac{1}{s} K_i \right) e(s) \quad (4.68)$$

ifade edilir. Simülasyon sonucu elde edilen üç serbestlik dereceli yalpa hareketi ile ilgili grafikler Şekil 4.38 ve Şekil 4.39’da verilmiştir.

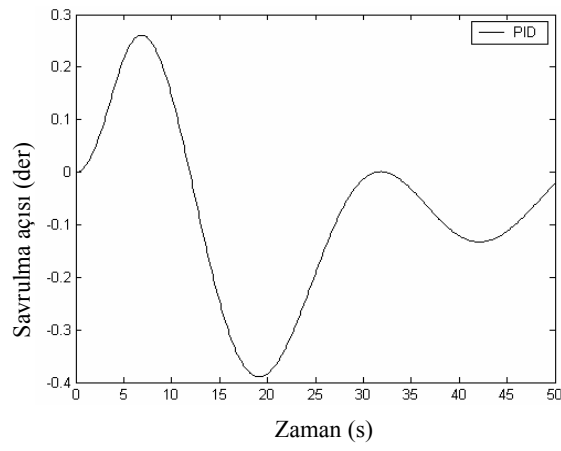


Şekil 4.38 PID kontrollü üç serbestlik dereceli konteyner gemi yalpa açısı mukayesesi

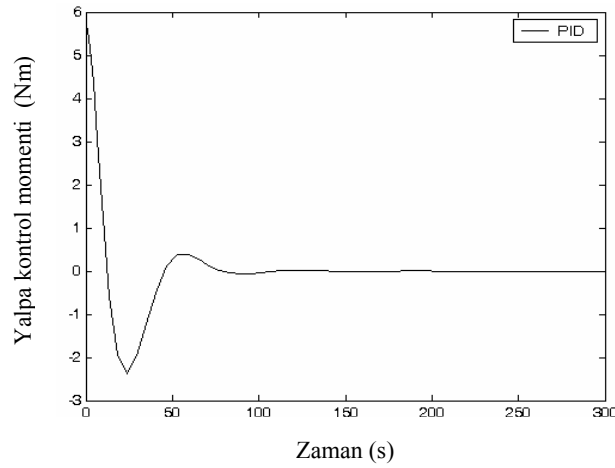
Üç serbestlik dereceli konteyner gemisi yalpa hareketinin PID kontrolle yapılan simülasyon sonuçlarından da görüldüğü gibi 100 saniyede %50 aşım yaparak referansa yerleşmektedir. Elde edilen grafiklerden de görüldüğü üzere serbestlik derecesinin artışı yalpa hareketinde istenen başarıyı sağlayamamaktadır. Bunun ana nedenlerinden birisi hareket sırasında en çok belirsizliklerin yalpa hareketinde meydana gelmesinden kaynaklanmaktadır.



Şekil 4.39 PID kontrollü üç serbestlik dereceli konteyner gemi yalpa hız mukayesesi



Şekil 4.40 Üç serbestlik dereceli konteyner gemi savrulma açısı mukayesesi



Şekil 4.41 PID kontrollü konteyner gemi yalpa kontrol işareti

Yalpa hareketi kontrol edilirken savrulma hareketinde herhangi bir kontrolcü etkisi yoktur. Savrulma açısının değişimi Şekil 4.40'da görölmektedir. Savrulma hareketi ortalama 0.356 der./s. hızla 0.02 derecelik hata ile dengelenmiştir. Bu çalışma sonunda, gövde yalpa sönüm performansı, ilgili aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

1. Dalga kuvvetleri yalpa sönüm performansını önemli miktarda düşürmektedir. Bu nedenle, performans artışı sağlamak için optimum kanat alanı seçilmelidir.
2. Kullanılan PID kontrol metodu ile uzun periyodlu dalgalı denizde seyir yapan gemide yeterli sönüm performansı elde edilememektedir.

#### 4.5.2 Üç Serbestlik Dereceli Konteyner Gemisi Yalpa Hareketinin LQR Kontrolü

Daha öncede belirtildiği gibi, optimal hareket kontrolünde sistemin matematiksel modeli oldukça önemlidir. Bu amaçla bu kısımda, üç serbestlik dereceli modelde LQR kontrol için gerekli ifadeler çıkarılacaktır. Yalpa dengeleme sisteminin ilave edildiği, üç serbestlik dereceli konteyner gemisinin durum uzay modeli sayısal olarak 4.65 ve 4.66 eşitlikleri ile gösterilmiştir.

Bu kısımda hidrodinamik kütle ve ve kanat sönüm terimleri hareket denklemine ilave edilmiş ve simülasyonlarda  $Q$  ve  $R$  ağırlık matrisleri iki farklı serbestlik derecesi için aynı kabul edilmiştir. Bu çalışmada kullanılacak olan performans ölçütü  $Q$  ve  $R$  kontrol kazancına bağlı olarak ' $J$ ' ile gösterilir.

$$J = \int_0^{\infty} (x^T Q x + u^T R u) dt \quad (4.69)$$

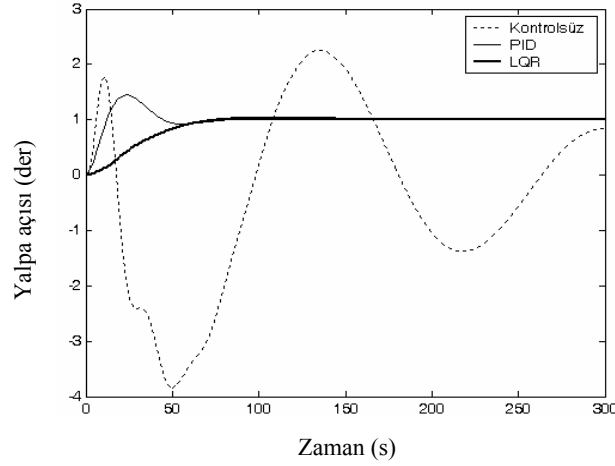
Yalpa dengeleme dinamiği ilave edilmiş üç serbestlik dereceli modelde optimal kontrol kazanç matrisleri aşağıdaki gibidir.

$$Q = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 10 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad [R] = [1] \quad (4.70)$$

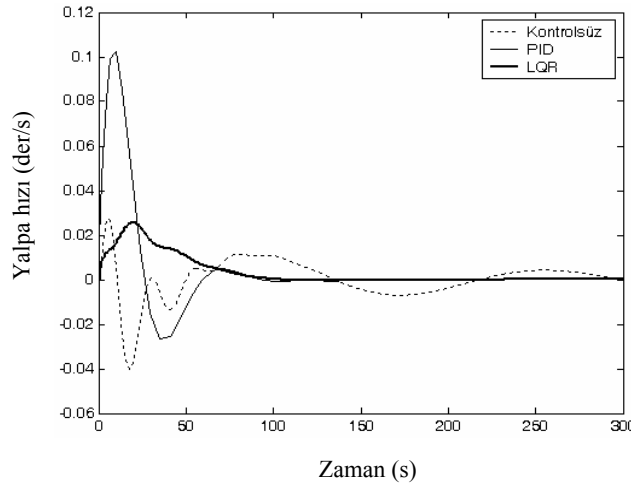
Hata miktarını en aza indiren geribesleme kazancı aşağıdaki gibidir.

$$K = R^{-1} B^T P \quad (4.71)$$

Burada  $P$  Riccati denkleminin pozitif çözümdür (Holzhüter, 1997). Bu bölüm kapsamında, PID ve LQR kontrolü tasarımı ele alınarak üç serbestlik dereceli modelde yalpa cevabı incelenmiştir. Şekil 4.42 ve Şekil 4.43'de görüldüğü gibi iki farklı kontrol metodunun üç serbestlik dereceli modeldeki cevabı sunulmaktadır. Optimal kontrol uygulaması ile gövde yalpa genliğinde ve hız değişimindeki iyileşme açık olarak gözlenmektedir.

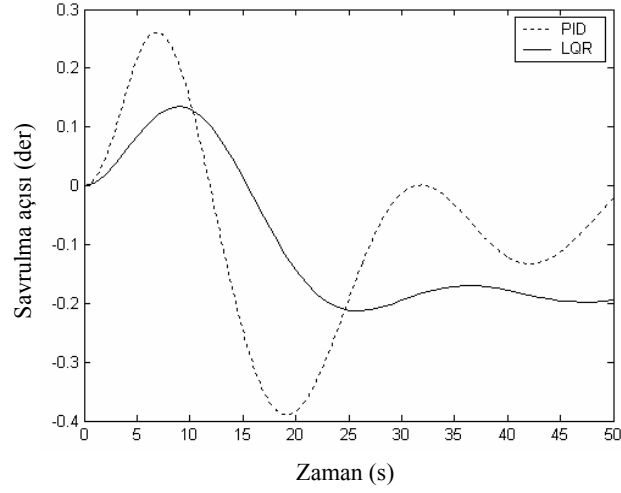


Şekil 4.42 LQR ile üç serbestlik dereceli konteyner gemi yalpa açısı mukayesesi

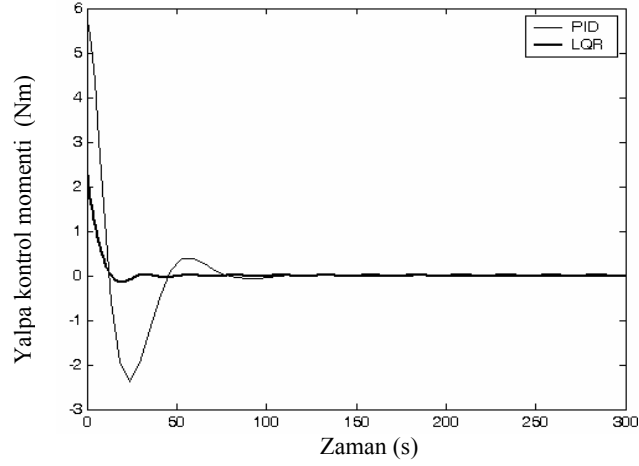


Şekil 4.43 LQR ile üç serbestlik dereceli konteyner gemi yalpa hızı mukayesesi

Yalpa açısı PID kontrol ile referansa yaklaşık 100 saniyede aşım yaparak yerleşirken LQR 80 saniye gibi bir sürede aşımsız referansa yerleşmektedir. Bu çalışmada elde edilen simülasyon sonuçları basit optimal yalpa dengeleme sistem kontrolü uygulamasıyla geminin yalpa dengelemesi ve seyir güvenliği gibi özelliklerinde önemli ölçüde gelişmeler sağlanabileceğini göstermektedir.



Şekil 4.44 Üç serbestlik dereceli konteyner gemi savrulma açısı mukayesesi



Şekil 4.45 LQR kontrollü konteyner gemi yalpa kontrol işareti

Savrulma açısı değişimi Şekil 4.44'de görülmektedir. Savrulma hareketi ortalama 0.0108 der./s. hızla 0.19 derecelik hata ile dengelenmiştir. Üç serbestlik dereceli modelde LQR kontrol kuralı ile elde edilen kontrol işaretinin uygun işaretler olduğu görülmektedir (Şekil 4.45).

### 4.5.3 Üç Serbestlik Dereceli Konteyner Gemiisi Yalpa Hareketinin MRAK Kontrolü

Üç serbestlik dereceli konteyner gemi modeli için kontrol girişi yalpa dengeleme sistemi kabul edilen MRAK yalpa kontrolcüsü geliştirilmiştir. Gerçeğe yakın kontrolcü dizaynı için yüksek dereceli referans model kabul edilmiş ve kontrol girişinin yalpa açısına etkileri gösterilmiştir. (4.43) ifadesinden yalpa ile kanat açısı arasındaki transfer fonksiyonu,

$$\frac{\phi(s)}{\alpha(s)} = \frac{[(I_z - N_{\dot{\gamma}})s^2 - N_r s]K_\alpha + (K_{\dot{\gamma}}s^2 + K_r s)N_\alpha}{[(I_x - K_{\dot{\beta}})s^2 + WGM - K_p s][(I_z - N_{\dot{\gamma}})s^2 - N_r s] - (K_{\dot{\gamma}}s^2 + K_r s)(N_{\dot{\beta}}s^2 + N_p s + N_\phi)}$$
(4.72)

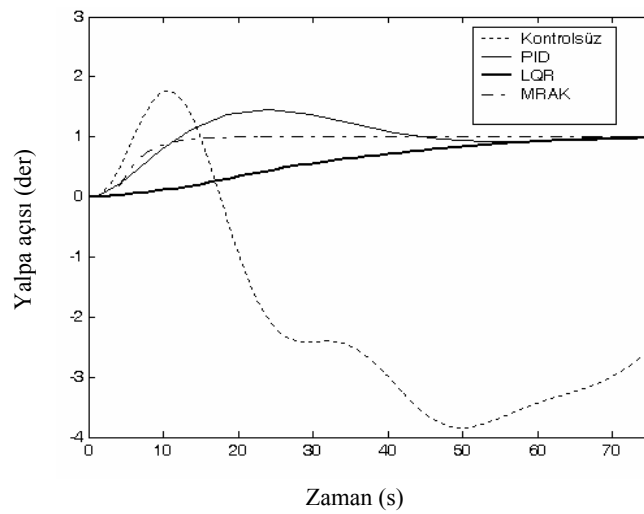
şeklinde gösterilir (Ek 10). Çizelge 4.2'deki değerler kullanılarak transfer fonksiyonunun sayısal değeri elde edilir.

$$\frac{\phi(s)}{\alpha(s)} = \frac{2.4s^2 + 13.5s}{s^4 + 5.4s^3 + 3058.5s^2 + 12085s}$$
(4.73)

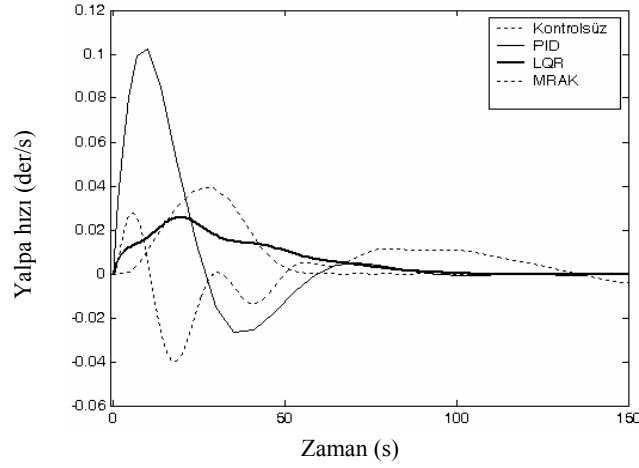
Transfer fonksiyonunun özdeğerlerine bakıldığında,

$$s_1 = 0, s_2 = -3.958, s_3 = -7.206 - 55.247i, s_4 = -7.206 + 55.247i$$
(4.74)

görüldüğü gibi sistemimizin özdeğerleri sol yarı düzlem üzerinde olduğu için kararlı bir sistemdir. Bu uygulamada kontrol amacımız sistemimizin her zaman referans modele benzemesini sağlamaktır. Referans model olarak lineer zamanla değişmeyen bir sistem göz önüne alınmıştır. Yapılan simülasyon çalışmaları sonucunda yalpa açısı ve hız değişimleri aşağıdaki gibidir.

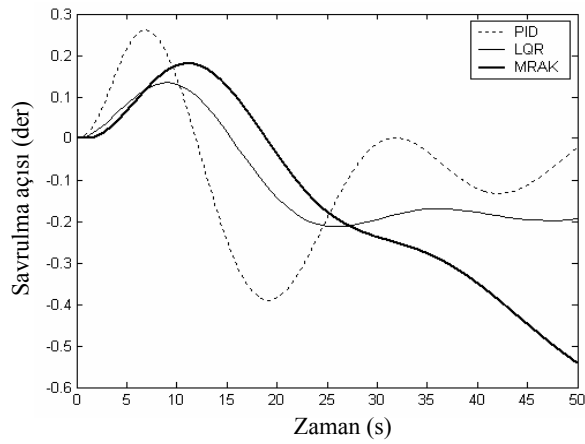


Şekil 4.46 MRAK ile üç serbestlik dereceli konteyner gemi yalpa açısı mukayesesi

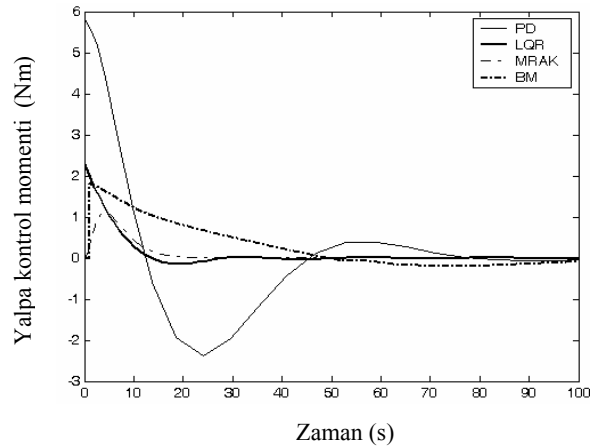


Şekil 4.47 MRAK ile üç serbestlik dereceli konteyner gemi yalpa hız mukayesesi

Şekil 4.46 ve 4.47'de üç serbestlik dereceli PID, LQR ve MRAK yalpa kontrolcü sonuçları gösterilmektedir. MRAK yöntemi ile yalpa açısı 20 saniyede aşırı referansa yerleşmektedir. Kontrol işaretleri sonuçlarından da görüldüğü üzere MRAK yönteminin sonuçları bir serbestlik dereceli modeldeki gibi başarımlıdır (Şekil 4.49).



Şekil 4.48 Üç serbestlik dereceli konteyner gemi savrulma açısı mukayesesi



Şekil 4.49 LQR kontrollü konteyner gemi yalpa kontrol işareti

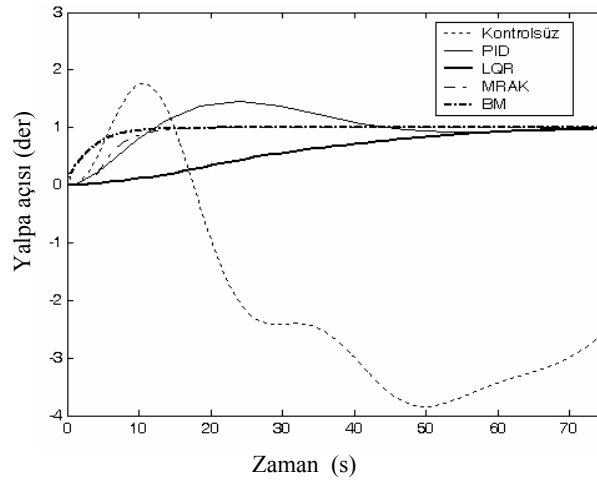
#### 4.5.4 Üç Serbestlik Dereceli Konteyner Gemisi Yalpa Hareketinin BM Kontrolü

Bu kısımda, dilsel kontrol algoritması kullanılarak elde edilen bulanık kontrolcü üç serbestlik dereceli konteyner gemi yalpa açısına uygulanmıştır. Elde edilen simülasyon sonucu Şekil 4.49'da verilmiştir. Yapılan simülasyonlarda bir serbestlik dereceli modelde kullanılan bulanık kontrol kazançları kullanılmıştır. Simülasyon çalışmalarında kullanılan kural çizelgesi aşağıdaki gibi seçilmiştir.

Çizelge 4.5 Karar çizelgesi

Dilsel değişken	Bulanık küme
NB	[-1 -0,7 -0,3]
NM	[-0,7 -0,3 ]
NS	[-0,3 -0,1 0]
ZE	[-0,1 0 0,1]
PS	[0 0,1 0,3]
PM	[0,3 0,7]
PB	[0,3 0,7 1 1]

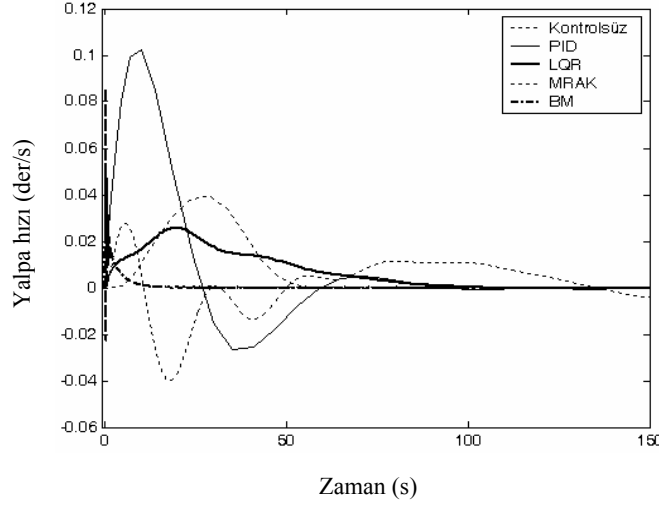
Bu kural çizelgesi yardımıyla yapılan simülasyon sonucu Şekil 4.50'de görülmektedir.



Şekil 4.50 BMK ile üç serbestlik dereceli konteyner gemi yalpa açısı mukayesesi

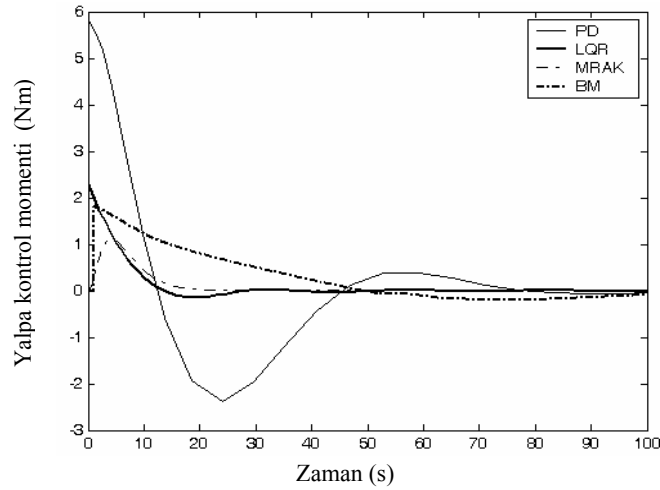
Şekilden görüldüğü gibi, yalpa açısı referansa 5 s. civarında yerleşmiştir. Bunun nedeni kontrol sırasında zaman kaybının söz konusu olmamasıdır. Bu bölüm kapsamında modelleme PID, LQR, MRAK ve BMK tipi kontrolcü tasarımı ele alınmıştır. İlk kısımda bir konteyner gemi yalpa dengeleme sistemine PID kontrolcü tasarlanmış ve sistem cevapları irdelenmiştir. Daha sonra, sırasıyla PID, LQR, MRAK ve BM kontrolcüler hakkında detaylı teorik bilgiler verilmiş ve elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Elde edilen bir serbestlik dereceli

simülasyon sonuçlarından da görüldüğü gibi bulanık kontrolcüyle sistemin çok hızlı olarak aşırı referans değere ulaştığı ve PID kontrolcünde ise daha yavaş ve aşım miktarı fazla durumda referansa yaklaşmasına rağmen, LQR ve MRAK ile performansın daha da iyileştiği söylenebilir. Şekildeki üç serbestlik dereceli simülasyon sonucundan da görüldüğü üzere bulanık kontrolcü ile diğerlerine göre aşımli olmasına karşın daha hızlı referansa ulaşılmıştır.



Şekil 4.51 Üç serbestlik dereceli konteyner gemi yalpa hızı mukayesesi

Yalpa hareketi bulanık mantık ile kontrol edilirken savrulma hareketinde herhangi bir kontrolcü etkisi yoktur. Bu durumda savrulma açısının değişimi Şekil 4.51'de görülmektedir.

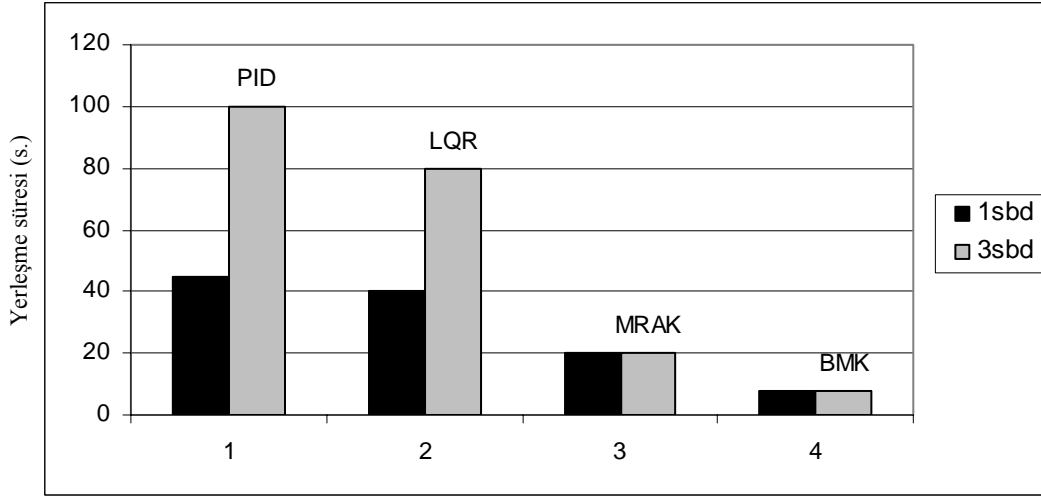


Şekil 4.52 BM kontrollü konteyner gemi yalpa kontrol işareti

Her iki modelden elde edilen sonuçlara bakıldığında yalpa açısı bulanık mantık kontrolcü performansının diğer yöntemlerinkinden daha iyi olduğu Çizelge 4.6'da gösterilmiştir.

Çizelge 4.6 Üç serbestlik dereceli modelde yalpa açısı kontrol sonuçları

	% Ortalama Aşım	Yerleşme süresi (s.)
PID	50	100
LQR	0	80
MRAK	0	20
BMK	0	8



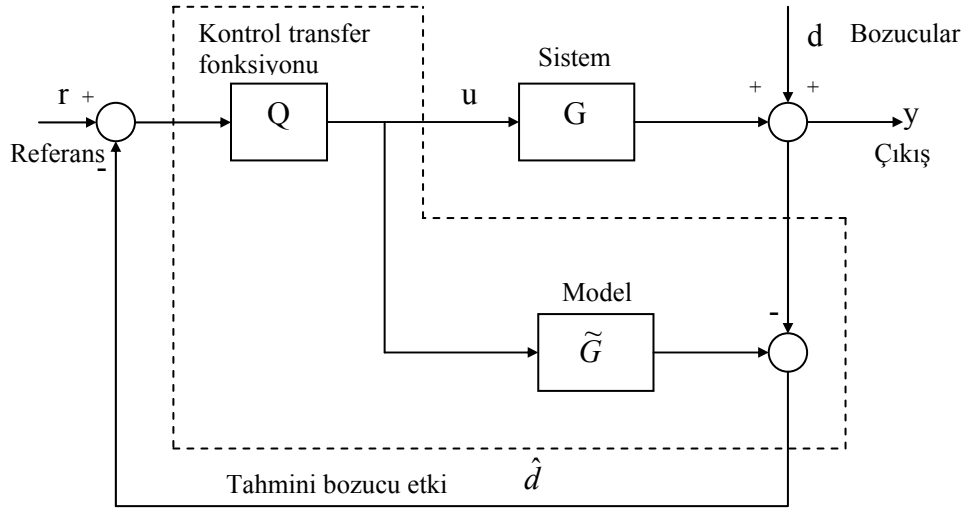
Şekil 4.53 Kontrolcü performanslarının mukayesesi

Çizelge 4.4 ve 4.6 verilerinden faydalanarak Şekil 4.53 grafiği elde edilmiştir. Serbestlik derecesinin artması ile yalpa hareketindeki belirsizliklere artmaktadır. Bu durum üç serbestlik dereceli model kontrolcü performansını bir serbestlik dereceli model performansına göre kötüleştirmiştir.

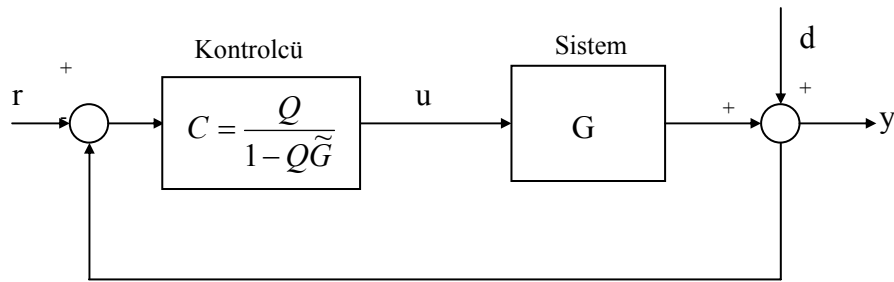
## 5. SAVRULMA VE YALPA HAREKETLERİNİN DÜMEN VE YALPA DENGELEME

## SİSTEMLERİ KULLANILARAK KONTROLÜ

Çok değişkenli sistemlerin kontrol tasarımları için ilk önce sistemin statik ve dinamik özelliklerinin belirlenmesi ve bunlara ilişkin sistemin modellenmesi yapılmıştır. Daha sonra matematiksel ifadelerden yararlanarak transfer fonksiyonu matrisi oluşturulmuştur. Son olarak ta, Dahili Model Kontrol'ün (DMK) üç serbestlik dereceli konteyner gemisine uygulamaları MATLAB/Simulink ortamında yapılan simülasyonlar ile birlikte sunulmuştur. Dahili model kontrol yapısı blok diyagramı Şekil 5.1 (a)'da gösterilmektedir. DMK ve klasik geribesleme yapısı Şekil 5.1 b'de görüldüğü gibi eşitlenebilir.



(a)



(b)

Şekil 5.1 (a) DMK yapısı (b) Klasik geribesleme yapısı

Kararlı sistemler için kontrolcüler aşağıdaki gibi tasarlanır.

$$C = \frac{Q}{1 - Q\tilde{G}} \quad (5.1)$$

Bu şekilde, kontrolcü 'C', kontrol edilen sistem 'G', referans giriş 'r', çıkış 'y', bozucu girişleri 'd' ile gösterilir. Kontrol transfer fonksiyonu 'Q(s)' ve sistem modeli 'G̃(s)' olmak üzere kontrolcü sistemi iki kısımdan oluşmaktadır. Sistem modeli ne kadar iyi olursa sistem çıkışı ile model çıkışı arasındaki fark değişimlerden etkilenmemektedir. Şekil 5.1A'da gösterilen sisteme etkileyen bilinmeyen bozucular ve modelin çıkışının frekans düzleminde toplamı aşağıdaki gibidir.

$$\hat{d}(s) = (G(s) - \tilde{G}(s))U(s) + d(s) \quad (5.2)$$

$d(s)$  sıfır olursa,  $\hat{d}(s)$  ifadesi sistem ile model arasındaki durum farklılığını ölçer. Eğer,  $G(s) = \tilde{G}(s)$  eşit olursa,  $\hat{d}(s)$  bilinmeyen bozucuya eşittir. Böylece,  $\tilde{G}(s)$  model kayıpları hakkında bilgilere dikkat edilmeli ve modern kontrolcü kullanılmalıdır. Son durumda, kontrol sinyali,

$$U(s) = (R(s) - \hat{d}(s))C(s) = \{R(s) - (G(s) - \tilde{G}(s))U(s) - d(s)\}C(s) \quad (5.3)$$

böylece,

$$U(s) = \frac{(R(s) - d(s))C(s)}{1 + (G(s) - \tilde{G}(s))C(s)} \quad (5.4)$$

elde edilir. Sistem çıkışı,

$$Y(s) = G(s)U(s) + d(s) \quad (5.5)$$

olduğundan dolayı dahili model kontrol için kapalı çevrim transfer fonksiyonu,

$$Y(s) = \frac{(R(s) - d(s))C(s)G(s)}{1 + (G(s) - \tilde{G}(s))C(s)} + d(s) \quad (5.6)$$

elde edilir. Son durumda kapalı çevrim aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$Y(s) = \frac{C(s)G(s)R(s) + (1 - C(s)\tilde{G}(s))d(s)}{1 + (G(s) - \tilde{G}(s))C(s)} \quad (5.7)$$

Bu kapalı çevrim ifadesinden  $C(s) = \tilde{G}(s)^{-1}$  ve  $G(s) = \tilde{G}(s)$  ise bozucu etkilerinin engellendiği görülür. Teorik olarak dikkat edildiğinde  $G(s) \neq \tilde{G}(s)$  olsa bile bozucu etkilerinin engellendiği kabul edilir.

Bu ifadeye ek olarak dayanıklılığın artırılması isteniyorsa, sistem model uyumsuzluğunun minimuma indirilmesi gerekir. Sistem ve model arasındaki davranış farklılığı yüksek frekanslarda meydana gelir. Bu uyumsuzluğu gidermek için alçak geçişli filtre  $F(s)$  sisteme ilave edilir. Böylece alçak geçişli filtreli dahili model kontrol tasarlanır.

$$G(s) = C(s)F(s) \quad (5.8)$$

Filtrenin derecesi aşırı diferansiyel kontrol etkilerini önlemek için  $C(s)F(s)$ 'e uygun seçilir.

Filtre transfer fonksiyonu,

$$F = \frac{1}{(\beta s + 1)^n} \quad (5.9)$$

şeklinde. ' $\beta$ ' kapalı çevrimli sistemin cevap hızını tanımlayan dizayn parametresidir. Değişken yapısını korumak için birinci veya ikinci dereceden diagonal basit yapıli filtre önerilir (Morari ve Zafiriou, 1984). Açık çevrimli karasız sistemlerde filtre  $F(s)$  aşağıdaki gereksinimleri sağlayacak şekilde seçilir.

(a) Kontrolcü filtre uygunluğu olmalıdır ( $Q = \tilde{Q}F$ ).

(b) Dahili kararlılık olmalıdır.

### 5.1 Savrulma ve Yalpa Birleşik Hareketi

Şekil 5.2'deki gibi konumu belirtilen dinamik geminin simetrik olduğu; geminin kütle merkezi ile sabit eksen takımı 'O' merkezinin çakışık olduğu; dalıp çıkma, baş kış vurma ve ilerleme modları ile birleşik hareketlerin etkisinin ihmal edildiği kabul edilerek sabit eksen takımına göre altı serbestlik dereceli denklem üç serbestlik dereceli denklem haline indirgenir.

$$(m - Y_v) \dot{v} = Y_v v + Y_\phi \phi + Y_p p + Y_r r + Y_\delta \delta + Y_\alpha \alpha \quad (5.10a)$$

$$(I_x - K_p) \ddot{\phi} = -mg GM \phi + K_p p + K_r r + K_\delta \delta + K_\alpha \alpha \quad (5.10b)$$



$$Y(s) = C X(s) + D U(s) \quad (5.14)$$

elde edilir. Son halde durum değişkenleri,

$$X(s) = s(I - A)^{-1} B U(s) \quad (5.15)$$

ve çıkış değişkenleri,

$$\begin{aligned} Y(s) &= (C s(I - A)^{-1} B + D) U(s) \\ &= H(s) U(s) \end{aligned} \quad (5.16)$$

frekans düzleminde ifade edilir. Son olarak transfer fonksiyonu matrisi,

$$H(s) = C s(I - A)^{-1} B + D \quad (5.17)$$

$A, B, C$  ve  $D$  matrislerine bağlı olarak gösterilir. (5.18-5.19)'daki transfer fonksiyonları,

$$\frac{r(s)}{\alpha(s)} = \frac{b_1 s^2 + b_2 s + b_3}{a_1 s^3 + a_2 s^2 + a_3 s + a_4} \quad (5.18a)$$

$$\frac{r(s)}{\delta(s)} = \frac{c_1 s^2 + c_2 s + c_3}{a_1 s^3 + a_2 s^2 + a_3 s + a_4} \quad (5.18b)$$

$$\frac{\phi(s)}{\alpha(s)} = \frac{d_1 s + d_2}{a_1 s^3 + a_2 s^2 + a_3 s + a_4} \quad (5.19a)$$

$$\frac{\phi(s)}{\delta(s)} = \frac{e_1 s + e_2}{a_1 s^3 + a_2 s^2 + a_3 s + a_4} \quad (5.19b)$$

Çizelge 5.1'deki sabitlere bağlı olarak ifade edilir.

Çizelge 5.1 Transfer fonksiyonu sabitleri

$a_1 = (I_z - N_{\dot{r}})(I_x - K_{\dot{p}})$	$c_1 = N_{\delta}(I_x - K_{\dot{p}})$
$a_2 = (I_z - N_{\dot{r}})K_p$	$c_2 = -N_{\delta}K_p$
$a_3 = (I_z - N_{\dot{r}})mgGM$	$c_3 = N_{\delta}mgGM$
$a_4 = [K_r N_{\phi} - mgGMN_r]$	$d_1 = (I_z - N_{\dot{r}})K_{\alpha}$
$b_1 = N_{\alpha}(I_x - K_{\dot{p}})$	$d_2 = (-N_r K_{\alpha} + N_{\alpha} K_r)$
$b_2 = [-N_{\alpha} + K_p + N_p K_{\alpha}]$	$e_1 = (I_z - N_{\dot{r}})K_{\delta}$
$b_3 = [mgGMN_{\alpha} - N_{\phi} K_{\alpha}]$	$e_2 = (N_r K_{\delta} + N_{\delta} K_r)$

(5.18) ve (5.19) eşitlikleri ile ifade edilen transfer fonksiyonları Çizelge 2.3'deki gemi boyutları Çizelge 2.5'deki hidrodinamik katsayıları kullanılarak aşağıdaki gibi elde edilir.

Dümen giriş sinyaline bağlı,

savrulma hızının transfer fonksiyonu,

$$G_{11}(s) = \frac{r}{\delta} = \frac{0.0046s^3 - 0.0009955s^2 + 0.0003102s + 2.446e-5}{s^4 - 0.0581s^3 + 0.02891s^2 + 0.02057s + 0.0005034} \quad (5.20)$$

yalpa açısının transfer fonksiyonu,

$$G_{21}(s) = \frac{\phi}{\delta} = \frac{0.0142s^3 + 0.01145s^2 + 0.002446s}{s^4 - 0.0581s^3 + 0.02891s^2 + 0.02057s + 0.0005034} \quad (5.21)$$

kanat giriş sinyaline bağlı,

gemi savrulma hızının transfer fonksiyonu,

$$G_{22}(s) = \frac{r}{\alpha} = \frac{0.0516s^3 - 0.01524s^2 + 0.0003642s + 1.535e-6}{s^4 - 0.0581s^3 + 0.02891s^2 + 0.02057s + 0.0005034} \quad (5.22)$$

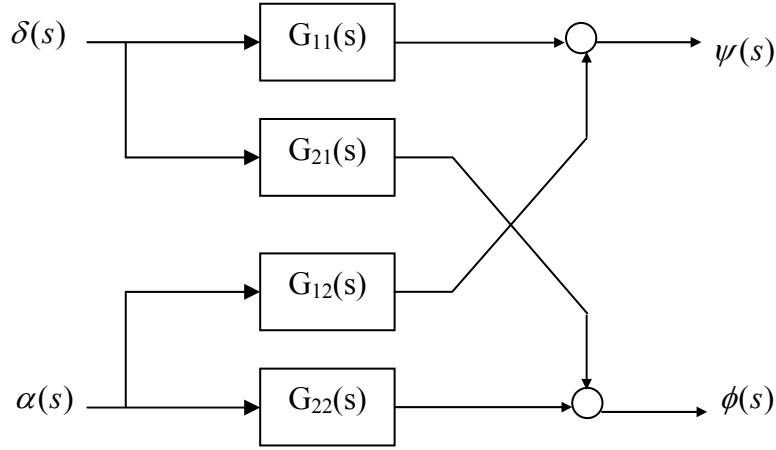
yalpa açısının transfer fonksiyonu sayısal olarak aşağıdaki gibidir.

$$G_{22}(s) = \frac{\phi}{\alpha} = \frac{4.448s^3 + 1.007s^2 + 0.02022s}{s^4 - 0.0581s^3 + 0.02891s^2 + 0.02057s + 0.0005034} \quad (5.23)$$

Burada ' $\phi$ ' yalpa açısı, ' $r$ ' savrulma hızı, ' $\delta$ ' dümen açısı ve ' $\alpha$ ' yalpa kanat açısıdır.

## 5.2 Konteyner Gemi Savrulma ve Yalpa Hareketlerinin DMK Metodu ile Kontrolü

Sistemin kontrolü için öncelikle değişkenlerin tanımlanmaları, sistem dinamiklerinin etkin bir şekilde ifade edebilecek bir sistem modelinin bulunması ve uygun performansı sağlayacak bir kontrolcünün tasarlanması gerekmektedir. Çok değişkenli bir sistemde, diğer bütün girişlerin sıfıra eşitlenmesi halinde, giriş ve çıkış arasındaki ilişkiyi belirlemek üzere diferansiyel denklemden yararlanılır. Doğrusal sistemlerde süper pozisyon prensibi geçerli olduğundan tüm girişlerin etkili olduğu bir duruma ilişkin sistem yanıtı, her biri tek başına etkili olduğu giriş yanıtlarının toplamından oluşur. Her bir giriş değişkenine diğerlerini sabit tutmak koşulu ile giriş fonksiyonlarını uygulamak ve her bir çıkışın değerini ayrı ayrı gözlemleyerek giriş değişkeni ile çıkış değerleri arasındaki ilişkiyi belirlemek gerekmektedir. Bu ilişkiler belirlendikten sonra, iki girişli iki çıkışlı bir sistem Şekil 5.3'deki gibi tanımlanır.



Şekil 5.3 İki giriş ve iki çıkışlı sistemin transfer fonksiyonu gösterimi

Bu gösterimde başlangıçta, savrulma ve yalpa açıları sıfır alınmıştır.

$$\begin{bmatrix} \psi(s) \\ \phi(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{11}(s) & G_{12}(s) \\ G_{21}(s) & G_{22}(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta(s) \\ \alpha(s) \end{bmatrix} \quad (5.24)$$

$$H(s) = \begin{bmatrix} G_{11}(s) & G_{12}(s) \\ G_{21}(s) & G_{22}(s) \end{bmatrix} \quad (5.25)$$

' $\alpha$ ' yalpa sönümü için kullanılırken, ' $\delta$ ' gemi rota tutuşunda kullanılır.

$$\delta = C_{11} \psi + C_{12} (\psi - \psi_{ref}) \quad (5.26)$$

$$\alpha = C_{22} (\phi - \phi_{ref.}) + C_{21} \psi \quad (5.27)$$

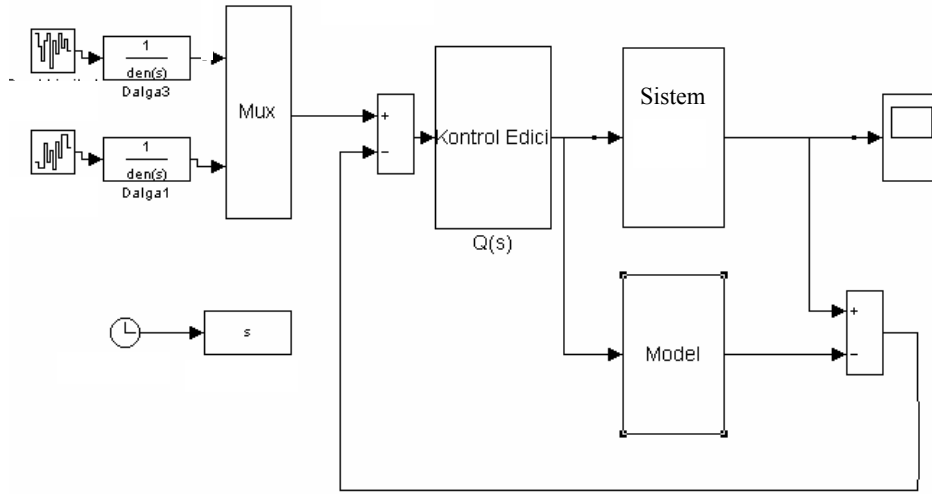
Burada  $C_i$  ( $i=1...4$ ) kontrol kazançlarıdır. Sistemin kontrolü için öncelikle sistemin modelinin bulunması ve bu model üzerinde çeşitli simülasyonlar ile sistemin istenilen çıkış değerlerine ulaştığının gözlemlenmesinin ardından asıl sisteme uygulanır. Dahili model kontrolde modelin çıkış değerleri ile sistemin çıkış değerleri karşılaştırılarak aralarında ki farkın minimum olması istenir. Sistemin iç dinamiklerinin değişimi sonucu model ile sistem arasındaki farkın artması durumunda kontrol edici sistem bu farkı azaltmak için sisteme uygulanması gereken sinyali uygun seviyeye çeker.

Sistemin iç dinamikleri verildikten sonra, öncelikle sistemin kontrol edilebilmesi için en temel yapılması gereken sistemdeki iç ilişkilerin ortadan kaldırılması ve birinci girişin sadece birinci çıkışa etkisinin, ikinci girişin sadece ikinci çıkışa etkisinin olması sağlanmalıdır.

Bu bölümde aşağıdaki amaçlar göz önünde tutularak ikinci dereceden dalga fonksiyonu etkisi ile dengesi bozulan konteyner gemisinin savrulma ve yalpa açıları sırasıyla dümen ve yalpa dengeleme sistemi ile kontrolü gerçekleştirilmiştir.

Kontrol amaçları,

1. Yalpadaki doğal frekansı ve sönüm oranını arttırmak,
2. Geminin savrulma açısını kontrol etmektir.

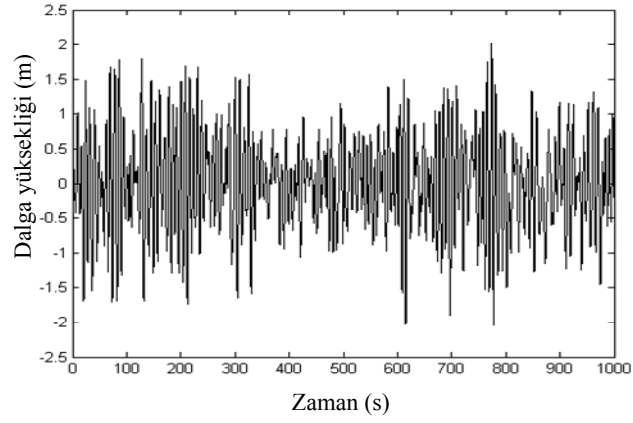


Şekil 5.4 Dahili model kontrol MATLAB/Simulink blok diyagramı

Simülasyonlarda bozucu olarak aşağıdaki ikinci dereceden dalga fonksiyonu kabul edilmiştir (Sgobbo ve Parsons, 1999).

$$h(s) = \frac{K_{\omega} s}{s^2 + 2\xi\omega_e s + \omega_e^2} \quad (5.28)$$

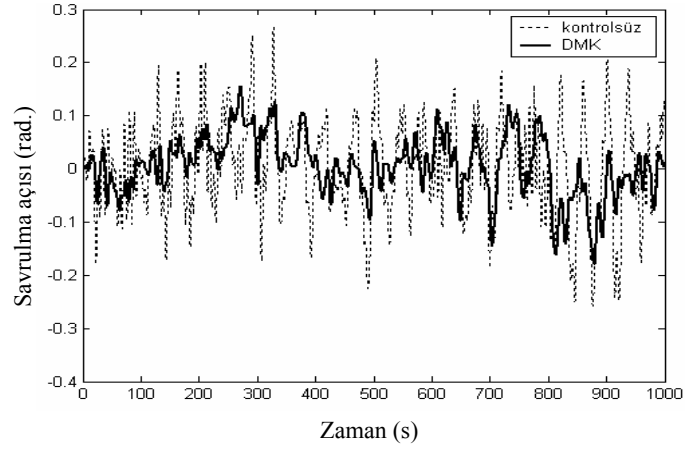
Burada, ' $K_{\omega}$ ' dalga şiddetine bağlı katsayı, ' $\xi$ ' sönüm sabiti, ' $\omega_e$ ' karşılaşma frekansıdır. Uygulamalarda sönüm sabiti  $\xi = 0.05 - 0.1$ , karşılaşma frekansı  $\omega_e = 0.3 - 1.3$  rad/s değerleri arasında seçilir (Şekil 5.5), (Lauvdal ve Fossen, 1994).



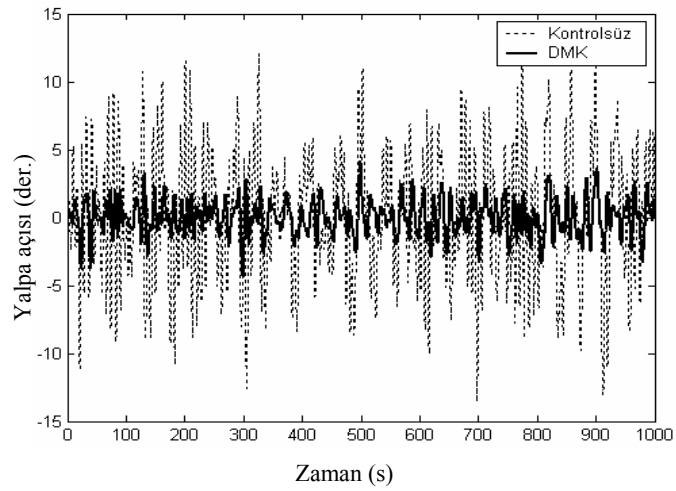
Şekil 5.5 Dalga

giriş fonksiyonu

Bu bölümde, Şekil 5.4'deki dahili model kontrol yöntemi esas alınarak konteyner gemi savrulma ve yalpa hareketlerine uygulanmış, sonuçlar Şekil 5.6 ve Şekil 5.7'de verilmiştir.



Şekil 5.6 DMK ile savrulma açısı kontrolü



Şekil 5.7 DMK ile yalpa açısı kontrolü

Dahili model kontrol ile yapılan simülasyon sonuçlarından da görüldüğü gibi konteyner gemisi savrulma ve yalpa açıları önemli miktarda azalmıştır. Şekil 5.6 ve Şekil 5.7’de savrulma açı dengesi sağlanmakla birlikte yalpa açısı  $10^0$ ’den  $2^0$ ’ye % 66’lık bir azalma elde edilmiştir.

Savrulma ve yalpa azalma yüzdeleri aşağıdaki gibi hesaplanır (Ohtsu ve Park, 1998)

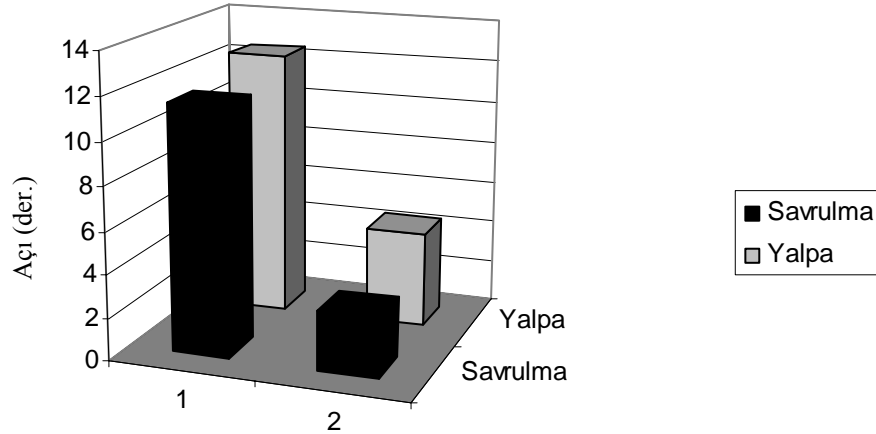
$$\text{Savrulma sönümü \%} = \frac{\text{Kontrollü ortalama değ.} - \text{Kontrolsüz ortalama değ.}}{\text{Kontrollü ortalama değ.}} \quad (5.29)$$

$$\text{Yalpa sönümü \%} = \frac{\text{Kontrollü ortalama değ.} - \text{Kontrolsüz ortalama değ.}}{\text{Kontrollü ortalama değ.}} \quad (5.30)$$

Çizelge 5.3’de savrulma ve yalpa sönüm sonuçlarının özetleri gösterilmektedir.

Çizelge 5.2 DMK savrulma ve yalpa hareketi kontrol sonuçlarının özetleri

	Kontrolsüz	DMK kontrollü	Sönüm yüzdesi
Savrulma açısı	$11,5^0$	$2,8^0$	% 76
Yalpa açısı	$12,5^0$	$4,5^0$	% 66



Şekil 5.8 Savrulma ve yalpa hareketi kontrol performans mukayesesi

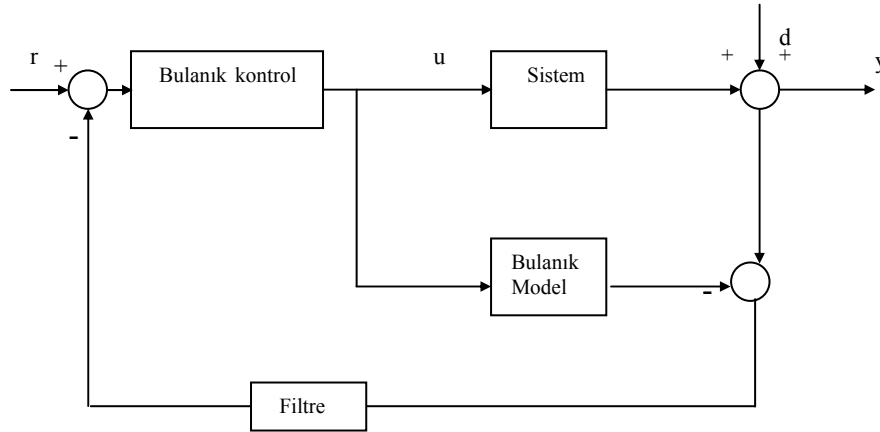
Çizelge 5.2’den faydalanarak Şekil 5.8 grafiği elde edilmiştir. Üç serbestlik dereceli modelde dahili model kontrolcü performansının savrulma ve yalpa hareket genliklerinin düşürdüğü gözlemlenmiştir. Genliklerin rahatsızlığa sebep olmayacak şekilde sönümlenmek için dahili model kontrolcü kazançlarının bulanık mantık kontrol yöntemi ile ayarlanması uygun görülmüştür.

### 5.3 Konteyner Gemi Savrulma ve Yalpa Hareketlerinin Bulanık DMK ile Kontrolü

Bu kısımda, 5. bölümün ilk kısmında uygulanan dahili model kontrol yönteminin özelliklerini daha etkin bir yapıya sokabilmek için bulanık dahili model kontrol yöntemi uygulanmıştır. Bu yöntemin getirdiği avantajlar incelendikten sonra konteyner gemisi dümen ve yalpa dengeleme sistemlerine uygulanabilirliği gösterilmiştir.

Literatürde genellikle kontrol edilecek sistemlerin kontrolcü tasarımında bulanık kontrolcüler ya tek başlarına bir kontrolcü ya da yapay sinir ağları, kayan kipli kontrol, dahili model kontrol, klasik PID ve adaptif kontrol algoritmalarının birçoğu ile birlikte ele alınarak incelenmiştir (Watanabe ve Muramatsu, 2003).

Bu kısımda önerilen yöntem ise, geminin kapalı çevrim kontrolü, geri besleme esasına dayanan dahili model kontrol ile yapılırken kontrolcü parametrelerinin ayarlanması bulanık mantıkla yapılmıştır. Burada amaç gemi savrulma ve yalpa hareketlerini kontrolünü ne yalnızca dahili model kontrol ile yapmak nede yalnızca bulanık mantık kontrolcülerle kontrol etmek değil, bunun yerine, konteyner gemisi hareketlerinin dahili model kontrol kazançlarının değişen çevre şartlarına göre kararlılığı bozmayacak şekilde, bulanık mantık ile ayarlamaktır. Bulanık dahili model kontrol algoritması olarak önerilen sistemin blok şeması Şekil 5.9'daki gibidir. Burada bulanık mantık ile dahili model kontrol yöntemine ayarlama özelliğinin kazandırılması sağlanmıştır.



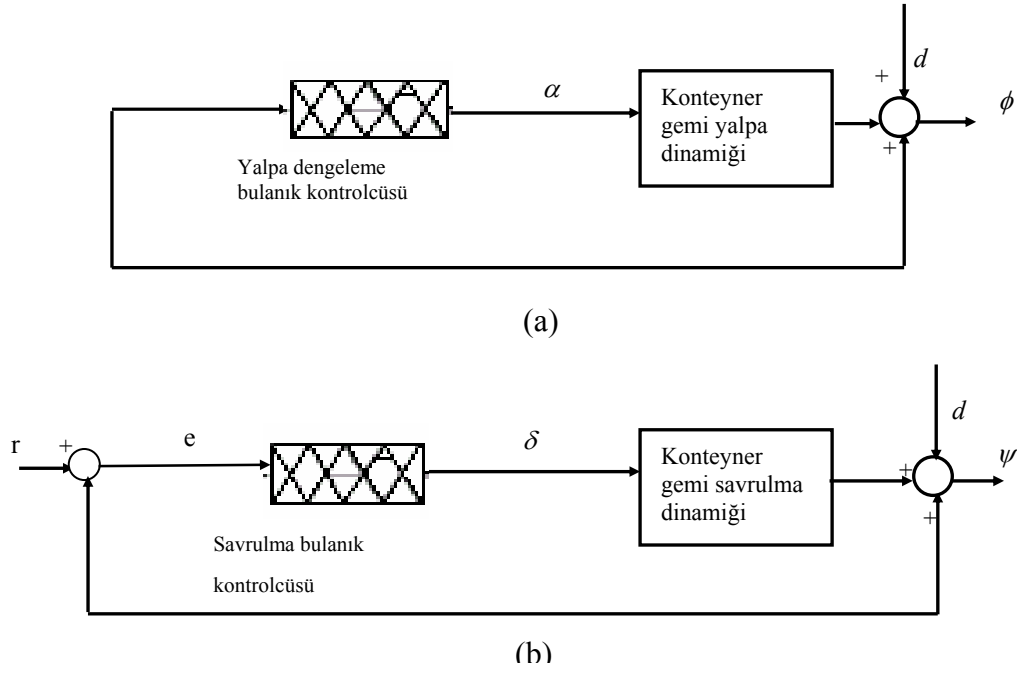
Şekil 5.9 Bulanık dahili model kontrol blok şeması

Bulanık dahili model kontrol yöntemi üç kısımdan oluşmaktadır. Bunlar,

1. İleri beslemeli bulanık kontrolcü ayar etkisi,
2. Model,
3. Model uyumsuzluğu ve bozuculara karşı dayanıklılığı arttırmak için filtrelemedir.

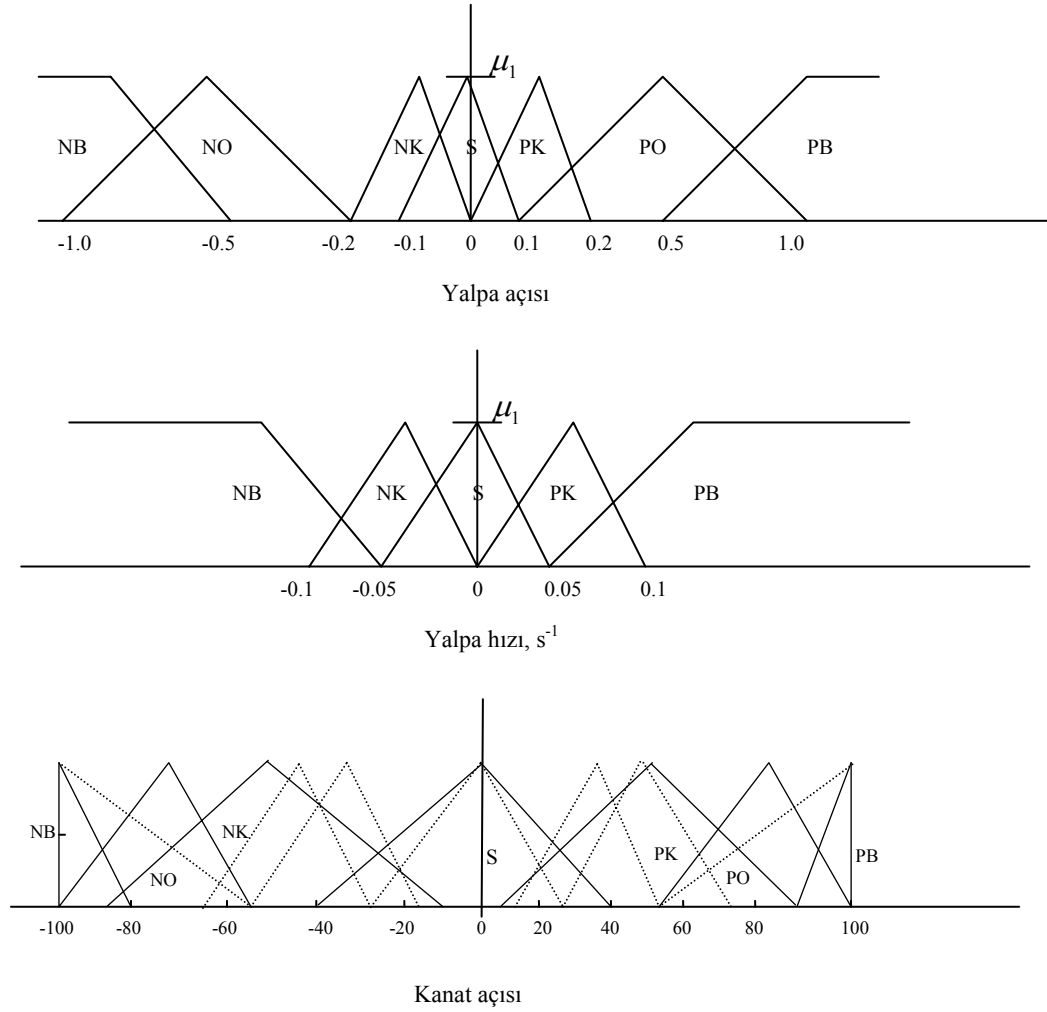
Sistem ve model arasındaki davranış farklılığı, model hataları ve modellenmemiş bozuculardan kaynaklanmaktadır. Bu fark bulanık kontrolcüye filtreden geri beslenerek ortadan kaldırılır.

Bu kısımda, bulanık mantığın temel yapısı kontrol kazançlarının ayarlanması anlamak bakımından kısaca verilmiştir. Bulanık mantık kontrolde bulanık sistemin dinamik davranışını uzman bilgisi tabanına dayalı, dilsel tanımlama kurallarının bir kümesi ile karakterize edilir.



Şekil 5.10 Konteyner gemisi yalpa ve savrulma bulanık mantık kontrolcü diyagramı  
(a) Yalpa kontrolcüsü (b) Savrulma kontrolcüsü

Yalpa kontrolünde kullanılan bulanık kontrolcüde iki kontrol girişi mevcuttur, yalpa açısı  $\phi$  ve yalpa hızı  $p = \frac{d\phi}{dt}$  kontrolcü tarafından oluşturulan kontrol etkisi, kanat açısı ' $\alpha$ ' ile yapılmaktadır (Şekil 5.10). Yalpa kontrol üyelik fonksiyonları Şekil 5.11'de gösterilmiştir.



Şekil 5.11 Bulanık mantık yalpa dengeleme üyelik fonksiyonları (Sutton ve Roberts, 1989)

NB: Negatif büyük, NO: Negatif orta, NK: Negatif küçük, S: Sıfır  
 PB: Pozitif büyük, PO: Pozitif orta, PK: Pozitif küçük,

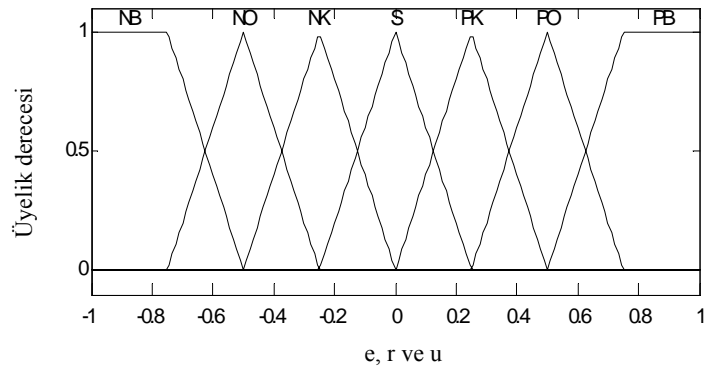
Bulanık kontrolde bulanık giriş ve çıkış parametrelerinin sayısı, üyelik fonksiyonların tipi ve adedi, kural tabanını oluşturan kurallar belirlenmesi gereken en önemli parametrelerdir. Çizelge 5.3'de bu çalışmada kullanılan kural tabanı görülmektedir. Kontrolcü tasarımında hata, hatanın türevi ve üyelik fonksiyonları ayrı ayrı tanımlanmıştır. Bu çalışmada  $[-1 \ 1]$  değişken aralığı için 7 sözel değişken tanımlanmıştır. Kontrolcü giriş parametreleri hata ( $e$ ) ve hatanın türevi ( $de$ )'dir.

Savrulma kontrolünde kullanılan bulanık kontrolçüde iki kontrol girişi mevcuttur, savrulma açısı ' $\psi$ ' ve savrulma hızı  $r = \frac{d\psi}{dt}$  kontrolcü tarafından oluşturulan kontrol etkisi, dümen açısı ' $\delta$ ' ile yapılmaktadır.

Çizelge 5.3 Yalpa hareketi kontrol kural çizelgesi

Yalpa hızı	Yalpa Açısı						
	NB	NO	NK	S	PK	PO	PB
NB	PB	PB	PM	PO	NK	NK	NO
NK	PB	PB	PM	S	NK	NO	NB
S	PB	PO	PS	S	NK	NO	NB
PK	PB	PO	PS	S	NO	NB	NB
PB	PO	PK	PS	NO	NO	NB	NB

Örneğin, yalpa açısı negatif orta, yalpa hızı pozitif büyük olursa yalpa kanat açısı pozitif küçük olur. Savrulma hareketi üyelik fonksiyonları en yaygın olarak kullanılan iç içe geçmiş üçgen formda oluşturulmuştur (Şekil 5.12). Üyelik dereceleri belirlenen bulanık kontrol giriş değişkenleri kural motoruna gönderilir. Burada bulanık değişkenler oluşturulan kural çizelgesine göre değerlendirilir.



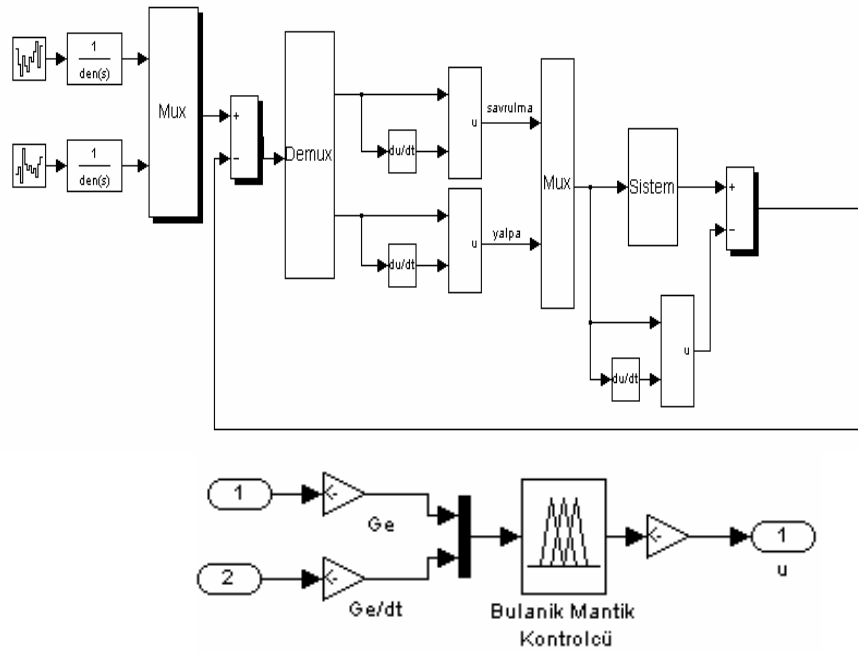
Şekil 5.12 Savrulma açısı bulanık kontrol üyelik fonksiyonları

Üyelik dereceleri hesaplanan bulanık değişkenler karar verme işleminde kullanılmaktadır. Toplam 49 kural Çizelge 5.4'de gösterildiği gibi tanımlanmıştır. Bu kural çizelgesi yardımıyla hata ve hata değişimi belirlenmiştir.

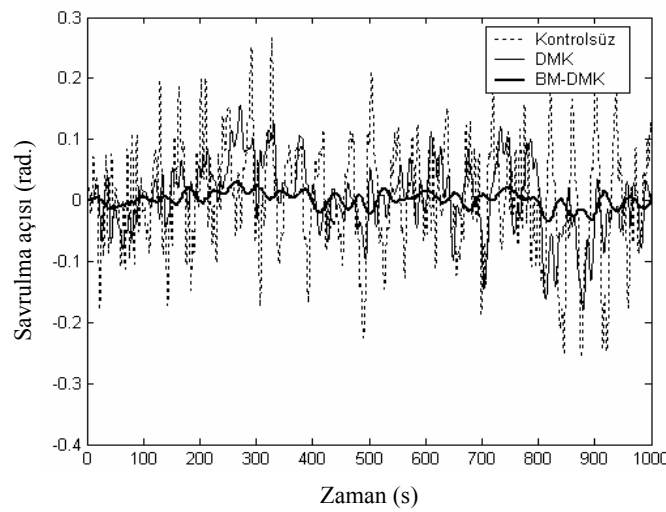
Çizelge 5.4 Savrulma hareket kontrol kural çizelgesi

e de	NB	NO	NK	SI	PK	PO	PB
NB	NB	NB	NB	NB	NO	NK	S
NO	NB	NB	NB	NO	NK	S	PK
NK	NB	NB	NO	NK	S	PB	PO
SI	NB	NO	NK	S	PK	PO	PB
PK	NO	NK	S	PK	PO	PB	PB
PO	NK	S	PK	PO	PB	PB	PB
PB	S	PK	PO	PB	PB	PB	PB

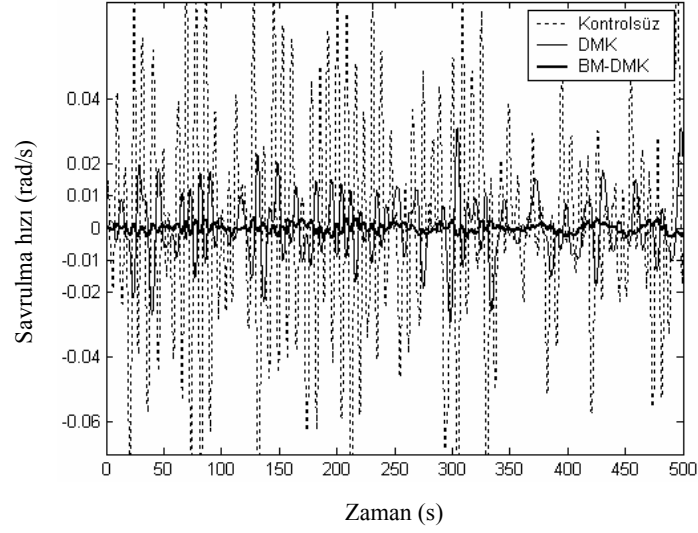
Konteyner gemisi için yapılan simülasyonlarda ikinci dereceden dalga fonksiyonu seçilmiştir. Bu gemiye ait parametreler önceki bölümlerde verildiği için burada verilmemiştir. Tezde geliştirilen Bulanık Dahili Model Kontrol yöntemi konteyner gemisi savrulma-yalpa hareketine uygulanarak elde edilen simülasyon sonuçları sırasıyla ikinci derece dalga girişli savrulma açısı değişimi Şekil 5.14 ve Şekil 5.15, basamak girişli savrulma açısı değişimi Şekil 5.16'da; ikinci derece dalga girişli yalpa açısı değişimi Şekil 5.17, Şekil 5.18'de basamak girişli yalpa açısı değişimi Şekil 5.19'da verilmiştir.



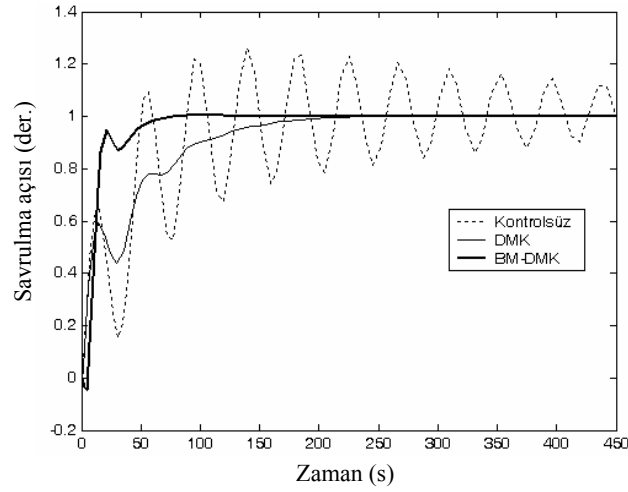
Şekil 5.13 Bulanık Dahili model kontrol MATLAB/Simulink blok diyagramı



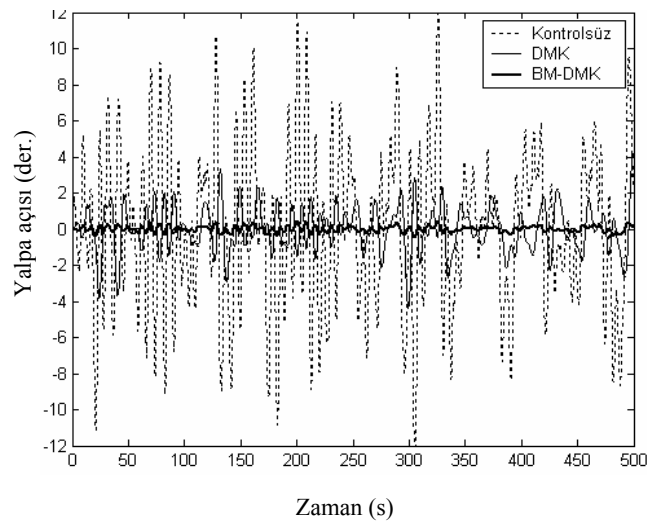
Şekil 5.14 BM-DMK ile savrulma açısı kontrolü



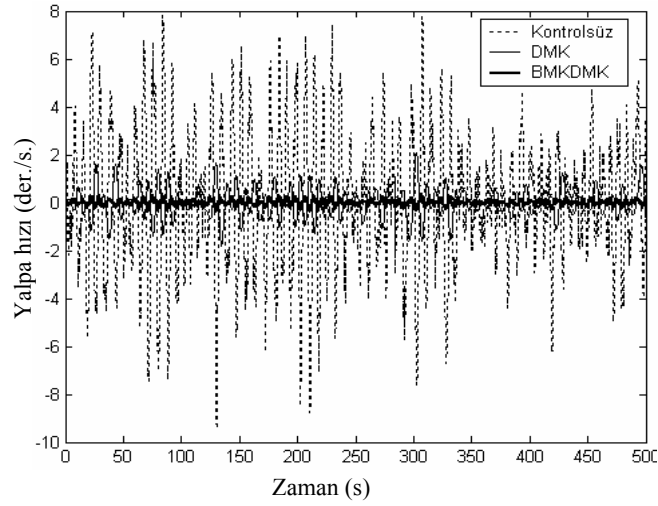
Şekil 5.15 BM-DMK ile savrulma hız kontrolü



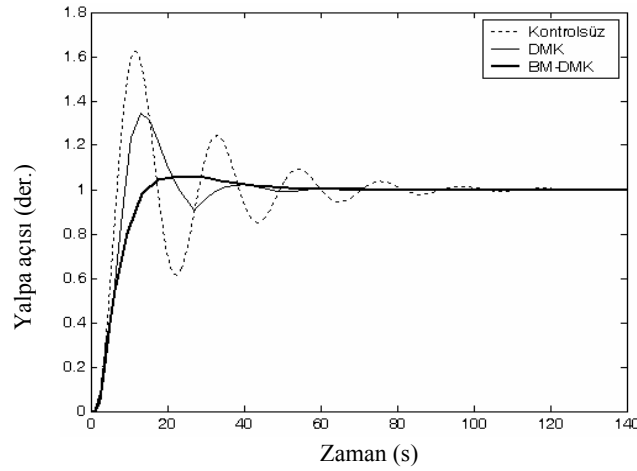
Şekil 5.16 Basamak girişli BM-DMK ile savrulma açısı kontrolü



Şekil 5.17 BM-DMK ile yalpa açısı kontrolü



Şekil 5.18 BM-DMK ile yalpa hız kontrolü



Şekil 5.19 Basamak girişli BM-DMK ile yalpa açısı kontrolü

Elde edilen sonuçlara göre, savrulma açısı 11.5 dereceden 1.7 dereceye ortalama 0.009 der./s. hızla %85 sönümlenirken, yalpa açısı 9.4 dereceden 0.8 dereceye ortalama 0.08 der./s. hızla %91'lik yalpa sönümü elde edilmiştir.

Çizelge 5.5 BM-DMK savrulma ve yalpa kontrol sonuçları

	Savrulma açısı		Yalpa açısı	
Kontrolsüz	11,5 <sup>0</sup>		9,4 <sup>0</sup>	
DMK kontrollü	2,8 <sup>0</sup>	% 76	4,5 <sup>0</sup>	% 66
BM-DMK kontrollü	1,7 <sup>0</sup>	% 85	0,8 <sup>0</sup>	% 91

## 6. SONUÇLAR

Bu tezde yapılan çalışmalar, giriş bölümünde belirtilen amaçlar doğrultusunda gerçekleştirilmiştir. Bu amaçlar, adaptif ve adaptif olmayan kontrol metotları ile kontrol edilen dümen ve yalpa kanat dengeleme sisteminin sırasıyla savrulma ve yalpa sönümü üzerindeki performansını incelemek şeklinde özetlenebilir. Konteyner gemi savrulma ve yalpa hareketlerinin kontrolüne yönelik çalışmaları konu edinen bu tez beş bölümde sunulmuştur.

Birinci bölümde, literatürde yapılan çalışmalar, uygulanacak kontrol yöntemleri, konteyner gemi yapısı ve kontrolcüler hakkında temel bilgiler sunulmuştur.

İkinci bölümde, gemi kinematiği ve dinamiği ele alınarak dinamik ve hidrodinamik denklem takımlarının elde edilmesi gösterilmiştir. Son olarak ta sabit dümen açısıyla dönmekte olan üç serbestlik dereceli konteyner gemisi hareket analizi yapılmıştır.

Üçüncü bölümde, PID, Lineer Quadratik Regülatör, Model Referans Adaptif Kontrol ve Bulanık Mantık yöntemleri bir ve üç serbestlik dereceli konteyner gemi modeli kullanılarak savrulma açısı kontrol simülasyon sonuçları sunulmuştur.

Dördüncü bölümde, bir önceki bölümde uygulanan kontrol metotları kullanılarak yalpa dengeleme sistemi ile bir ve üç serbestlik dereceli konteyner gemi yalpa hareketinin kontrolü incelenmiştir.

Beşinci bölümde, hem savrulma hem de yalpa hareketi aynı anda sırasıyla dümen ve yalpa dengeleme sistemleri geri besleme esasına dayanan dahili model kontrol ve kontrol kazançları bulanık mantık ile ayar edilmiş dahili model kontrol metotları ile kontrol edilmiştir.

Konteyner gemisi hareket analizinde ikinci bölümde ayrıntılı olarak açıklanan gemi dinamiği esas alınarak 5 derecelik sabit dümen açısı değişimi ile konteyner gemisinin dairesel bir yörünge üzerindeki hareketi incelenmiştir. Bu incelemede konteyner gemisi 80 saniyeye kadar savrulma ve yalpa hız değişimleri sırasıyla 0.16 der./s. ve 0.11 der./s. olurken bu süreden sonra sabit hızla harekete devam etmiştir. Bu durumda, denge hali kurulmuş olduğundan gemi hızı ve yarıçapı sabit kalan sürekli, bir dairesel dönme hareketi yapar. Yan öteleme hızı ve savrulma hızları sıfırdan farklı değerler de olup ivmeleri sıfırdır.

Gemi hareketleri incelenirken savrulma ve yalpa dengelemesi ayrıntılı olarak incelenmiş ve kararsız olan bu davranışların klasik ve modern kontrol metotları ile nasıl kararlı davranış

gösterileceği belirtilmiştir. Bu metotları kullanılmadaki amaç, konteyner gemi savrulma ve yalpa açısına uygulandığında dengeleme performansını arttırabileceğini göstermektir. Çizelge 6.1’de bir ve üç serbestlik dereceli konteyner gemi savrulma kontrol sonuçları gösterilmiştir.

Çizelge 6.1 Dümen ile savrulma açısı kontrol sistemi sonuçları

	Bir giriş bir çıkışlı sistem								İki giriş iki çıkışlı sistem
	1 PID		2 LQR		3 MRAK		4 BM		5 BM-DMK
	1 sbd	3 sbd	1 sbd	3 sbd	3 sbd	1 sbd	3 sbd	1 sbd	3 sbd
Maksimum aşma	%10	%40	0	0	0	0	%5	%5	0
Yerleşme Süresi (s)	130	100	120	130	50	60	20	25	50

Konteyner gemi savrulma açısının kontrolünde uygulanan PD ve PID kontrol yöntemleri ile belirli şartlarda uygun sonuçlar elde edilmiştir. Bu uygulamada savrulma açısı PD kontrolcü etkisi ile %18 aşım ve 130 s.’de referansa yerleşerek PID kontrolcüyeye göre daha iyi olduğu görülmüştür.

Lineer quadratik kontrol yöntemi konteyner gemi savrulma açısına uygulanmış Çizelge 6.1’den de görüldüğü gibi sönüm ve kararlılık değerini arttırmıştır. Bu yöntemde uygun kazanç değerinin bulunması söz konusudur. Elde edilen sonuçlardan da görüldüğü gibi referans yerleşme performansı PD kontrol yönteminkinden daha iyi olurken sürekli hal hataları mevcut değildir.

Tez çalışmasında öngörülen bir diğer yeni uygulama model referans adaptif kontrolüdür. Bu uygulamada, konteyner gemi parametreleri göz önüne alınarak savrulma hareketinin referans model gibi davranması öngörülmüştür. Elde edilen simülasyon sonuçları ise LQR sonuçlarına benzer olmasına karşın cevap hızının daha yavaş olduğu görülmüştür.

Bulanık mantık kontrol yöntemi aşma miktarını azaltmak ve cevap süresini hızlandırmak üzere geliştirilmiştir. Simülasyon sonuçlarından görüldüğü gibi konum izleme hatası 15 saniye sonra ortadan kalkmaktadır. Bulanık kontrolcünün, diğer kontrol sonuçlarına benzer şekilde referansı yakalama zamanında herhangi bir gecikme olmaksızın savrulma hareketini sönümlediği görülmüştür. Bu yöntemin PID kadar basit yapıya sahip olması nedeniyle uygulama bakımından diğer bütün yöntemlerden daha uygun bir yöntem olduğu görülmüştür.

Bu sonuçlara göre, adaptif kontrol metotlarının savrulma otopilot performansını arttırdığı şekilde yorumlamak mümkündür. Bütün yöntemler arasında en kısa yakalama zamanının elde edilmesi bulanık mantık özelliğinin arzulan sonuca verdiği gözlemlenmiştir.

Konteyner gemi savrulma kontrol yöntemleri incelenirken yük ve personel açısından önemli yalpa hareketi ve sönümü ayrıntılı olarak incelenmiş ve bu sönümlemenin yalpa dengeleme kanatları kullanılarak daha iyi yapılacağı kanaatine varılmıştır.

Yalpa dengeleme sistemi kontrol kanatları ile yüksek seyir hızlarında oldukça iyi yalpa sönümü sağlanmaktadır. Bunun yanında daha az yer işgal etmesi, hafif oluşu nedenleriyle tercih sebebidir. Çizelge 6.2’de yalpa dengeleme sisteminin kontrol sonuçları gösterilmektedir.

Çizelge 6.2 Yalpa dengeleme sistemi ile yalpa açılı kontrol sistemi sonuçları

	Bir giriş bir çıkışlı sistem								İki giriş iki çıkışlı sistem
	1 PID		2 LQR		3 MRAK		4 BM		5 BM-DMK
	1 sbd	3 sbd	1 sbd	3 sbd	3 sbd	1 sbd	3 sbd	1 sbd	3 sbd
Maksimum aşma	%23	%50	%20	0	0	0	0	0	0
Yerleşme Süresi (s)	45	100	40	80	80	20	20	8	10

Yalpa hareketin sönümü, ilk olarak, basit bir yapıya sahip olması nedeniyle yalpa kanat açıları ve hızları PID kontrol metotları ile düzenlenmiştir. Simülasyon sonuçlarından da görüldüğü gibi bir serbestlik dereceli yalpa genliği 45 sn. civarında ortalama 0,35 der/s hızla, referansa yerleşmiştir.

Linear kvadratik regülatör kuralı ile yapılan simülasyonlardan da görüldüğü gibi yalpa açısı 40 saniyede 0.21 der/s ortalama hız referansa yerleşmiştir. Yalpa hareketi, PID kontrol uygulamasına göre daha düşük genliklerde ve daha kısa sürede sönümlenmiştir. Linear kvadratik regülatör metodu, özellikle klasik kontrolcülerin yetersiz kaldığı olağan dışı durumlarda kullanılabilecek bir kontrol sistemi olduğu görülmüştür.

Sabit katsayılı kontrolcülerle özel şartlarda oldukça uygun yalpa sönümü elde edilirken dalga, rüzgâr ve akıntı hızının değişimi kontrol performansını düşürdüğü bilinmektedir. Çevre şartları nasıl olursa olsun yalpa hareketi tanımlanan referans model gibi davranması kontrol kazançlarının güncellenmesi ile mümkündür. Elde edilen sonuçlardan görüldüğü gibi

yalpa hareketi 0,19 der/s. hızla 20 saniyede referansa yerleşmiştir. Faz diyagramına bakıldığında model referans adaptif kontrol uygulaması ile elde edilen kararlılık diğer metotlara göre daha iyi olduğu görülmüştür. Bunun nedeni Lyapunov kararlılık kriterinin kontrol edilen sistemin genel kararlılığını sağlamasıdır.

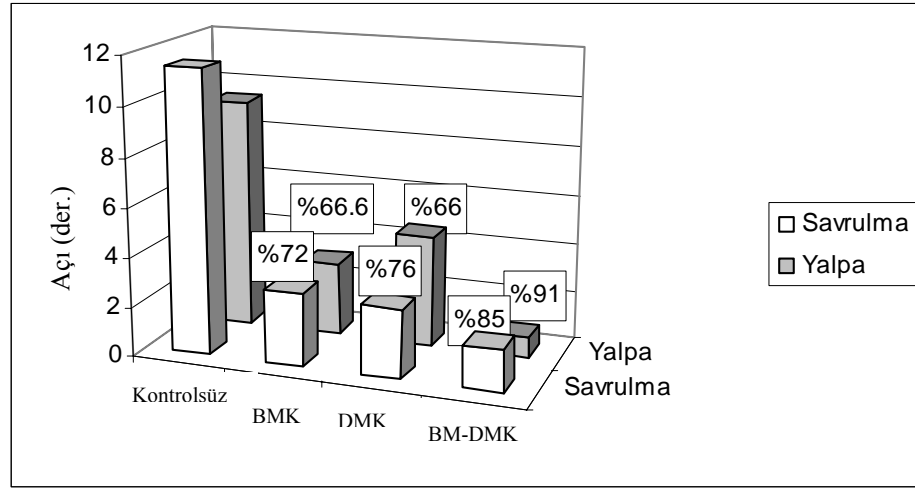
Sığ ve dar denizlerde yalpa hareketinin kontrolü oldukça büyük öneme sahiptir. Bu nedenle hareketlerin daha kısa sürede ve aşısız referans değere yerleşmesi öngörülmüştür. Uygulanan bulanık mantık kontrol yöntemi ile yalpa açısı 10 saniye civarında sönümlenmiştir. Sonuç olarak bulanık sistemler kullanılarak, olağan dışı durumlarda kullanılabilecek bir kontrol sistemi tasarımı gerçekleştirilmiştir.

Tezde buraya kadar yapılan çalışmalar sonucunda, gerek savrulma gerekse yalpa hareketi kontrolünde gösterdiği başarılı performans nedeniyle, bulanık mantık kullanımı önerilmektedir.

Oluşturulan kontrol metotları, öncelikle savrulma ve yalpa hareketleri ayrı ayrı dikkate alınarak bir ve üç serbestlik dereceli model dikkate alınarak uygulanmıştır. Ancak, konteyner gemi modeli oluşturulurken gerçek modele yakınlığı sağlamak açısından savrulma ve yalpa açıları birlikte kontrol edilmiştir. Simülasyon çalışmalarındaki diğer bir uygulama, hem savrulma hem de yalpa dengeleme sistemlerinin kullanıldığı geri besleme esasına dayanan dahili model kontrol uygulamasıdır. Dahili model kontrolün dinamik gemi hareketlerinde denenmesi sonucunda ayrı ayrı uygulanmış kontrol sonuçlarına benzer şekilde genliklerin istenilen değerlerde ve gecikmeye neden olmaksızın hareketleri sönümlendiği görülmüştür.

Son bölümde, çevre etkilerine ve modellenmemiş belirsizliklere karşı kontrol kazançlarının ayarlanmasına olanak veren, bulanık mantıklı yeni bir Bulanık Dahili Model Kontrol yöntemi geliştirilmiştir. Burada amaç otopilot kontrol sisteminin bozucu ve diğer etkenlere karşı ayarlamasını yaparak yeni duruma göre savrulma ve yalpa hareketlerinin arzu edilen şekilde dengelenmesini sağlamaktır. Elde edilen Şekil 6.1'deki sonuçlardan da görüleceği gibi bu yöntem hareketleri sönümleyerek kontrol performansını arttırmıştır.

Sonuç olarak dümen ve yalpa dengeleme sistem performansının, Çizelge 6.1 ve Çizelge 6.2 esas alınarak Şekil 6.1'de görüldüğü gibi, etkin bir şekilde iyi olduğu sonucuna ulaşılmıştır.



Şekil 6.1 BM-DMK savrulma ve yalpa kontrol performans mukayesesi

Bu tezde ele alınan kontrol yöntemleri bir ve üç serbestlik dereceli gerçek bir konteyner gemi modeline uygulanmış ve bu yöntemlerin performansları incelenerek birbirlerine göre üstünlükleri tartışılmıştır.

Tezde önerilen çalışmalar bir gelişim süreci ile sunulurken kazanımları da ayrıca vurgulanmıştır. Burada şunu da belirtmek gerekir ki önerilen bulanık mantık uyarlama mekanizması ele alınan çözüm yöntemi bakımından uygun bir yaklaşım olduğu gözlemlenmiştir.

Bu konularda daha çok çalışmanın yapılabileceği aşikârdır. Bu çalışmalar, mevcut kontrol algoritmalarının baş-kıç vurma, dalıp çıkma ve yalpa hareketleri dikkate alınarak ya da altı serbestlik dereceli hareket dikkate alınarak uygulanması olarak sıralanabilir. Ayrıca elde edilen sonuçların başarımını arttırmak maksadıyla, mevcut ayarlama algoritması yapay sinir ağları ile oluşturularak iyileşmeler yapılabilir veya bunlara ilave olarak değişik ayarlama mekanizmaları geliştirilebilir.

**KAYNAKLAR**

- Abkowitz, M.A., (1975), "System Identification Techniques for Ship Maneuvering Trials", Proceeding of Symposium on Control Theory and Navy Applications, Monterey, 337-393.
- Amerongen, J. ve Cate, U., (1975), "Model Reference Adaptive Autopilots for Ships", *Automatica*, 11, 441-449.
- Amerongen, J. ve Lemke, V.N., (1978), "Optimum Steering of Ships with an Adaptive Autopilot", Fifth Ship Control Systems Symposium, 30 October 1978, Annapolis, USA.
- Amerongen, J., (1980), "Criteria for Optimum Steering of Ships", Symposium on Ship Steering Automatic Control, 25-27 June 1980, Genova, Italy.
- Amerongen, J., (1981), "Model Reference Adaptive Systems", *Journal A*, 22.
- Aström, K.J. ve Wittenmark, B., (1989), "Adaptive Control", Addison-Wesley Publishing Company.
- Athans, M., Falb, P.L., (1966), "Optimal Control", McGraw-Hill Book Company, New York.
- Berge, S.P. ve Fossen, T.I., (2000), "On the Properties of the Nonlinear Ship Equations of Motion", *Mathematical and Computer Modeling of Dynamical Systems*, , 365-381.
- Brayson, C.E., (1999), "Structurally stable output regulation of nonlinear systems", *Automatica*, 33, 369-385.
- Chislett, M.S. ve Strom-Tejsen, J., (1965), "Planar Motion Tests and Full-Scale Steering and Maneuvering Predictions for a Mariner Class Vessel", Technical Report, Hydro and Aerodynamics Laboratory, Denmark.
- Dalzell, J.F., (1978), "A Note on the Form of Ship Roll Damping", *Journal of Ship Research*, 22, 178-185.
- Dubowsky, S., ve DesForges, D. T., (1979), "The application of model reference adaptive control to robotic manipulators.", *ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 101(3),193-200.
- Erkal, M., (1998), "Adaptive and Nonadaptive Control Schemes for Ship Steering", Y.Lisans Tezi, Boğaziçi Üniversitesi.
- Faltinsen, O.M., (1990), "Sea loads on Ships and Offshore Structures, Cambridge University Press.
- Fan, S. ve Xia, J., (2002), "Simulations of Ship Motions Coupled Heave, Pitch and Roll", Technical Report, The University of Western Australia.
- Fossen, T.I. ve Lauvdal T., (1994), "Nonlinear Stability Analysis of Ship Autopilots in Sway, Roll and Yaw", MCMC'94, Southampton, UK.
- Fossen, T.I., (1994), "Guidance and Control of Ocean Vehicles", John Wiley&Sons.
- Fossen, T.I. ve Fjellstad, O.E., (1995), "Nonlinear Modelling of Marine Vehicles in 6 Degrees of Freedom", *Journal of Mathematical Modelling of Systems*, 17-28.
- Garcia, C. E., ve Morari, M. (1982), "Internal model control. 1. A unifying review and some new results", *Ind. Eng. Chem. Proc. Des. Dev.* 21: 308-323

- Gill, A.D., (1979), "Mathematical Modelling of Ship Maneuvering", National Maritime Ins.
- Gürleyen F., Güzelkaya M., Eksin İ., (1999): "A new rule-based control algorithm", Proceedings of IASTED Conference CONTROL AND APPLICATIONS, 321-325, Banff, Canada.
- Haddara, M., (1984), "A Note on the Effect of Damping Moment Form on Rolling Response", International Shipbuilding Progress, 31, 285-290.
- Haddara, M. ve Wang, Y., (1999), "Parametric Identification of Maneuvering Models for Ships", Int. Shipbuild. Programs, 445, 5-27.
- Harris, C.J. ve Billings, S.A., (1981), "Self-Tuning and Adaptive Control Theory and Applications", Peter Peregrinus Ltd., London.
- Hasegawa, (1987), "Automatic Collision Avoidance System for Ships Using Fuzzy Control", KSNAJ Journal, 205.
- Holz Hüter, T., (1997), "LQG Approach for the High-Precision Track Control of Ships", IEE, Proc.-Control Theory Appl., 144.
- 15<sup>th</sup> ITTC, (1978), "Report of the Seakeeping Committee", Proceedings of the 15<sup>th</sup> International Towing Tank Conference, 55-70.
- IMO, (1983), "In accepting the Convention on the International Maritime Organization", the Socialist Republic.
- Implay, F.H., (1961), The Complete Expressions for Added Mass of a Rigid Body Moving in an Ideal Fluid, Technical Report DTMB 1528, David Taylor Model Basin, Washington D.C.
- Jordan, D.W. ve Smith, P., (1979), "Nonlinear Ordinary Differential Equations", Oxford University Press.
- Journee, J.M.J., ve Beukelman, W. (2001), "Hydrodynamic Transverse Loads on Ships in Deep and Swallow Water", HADMAR'2001 Conference, Varna, Bulgaria.
- Kalström, C.G., (2000), "Autopilot and Track-Keeping Algorithm for High-Speed Craft", Control Engineering Practice, 185-190.
- Kalström, C.G., Aström, K.J., Thorell, N.E., (1979), "Adaptive Autopilots for Tankers", Automatica, 15, 254-284.
- Kawazoe, T., Nishikido, S. ve Wada, Y., (1994), "Effect of Fin Area and Control Methods on Reduction of Roll Motion with Fin Stabilizers", Journal of the MESJ, 28.
- Katebi, M.R., Wong, D.K. ve Grimble, M.J., (1987), "LQG autopilot and Rudder Roll Stabilization Control System Design", Proceeding 8<sup>th</sup> Ship Control Systems Symposium, 69-84.
- Kim., J.K. ve Rhee, K.P., (1998), "A Reduced-Order Maneuvering Equation of a Surface Ship", Int. Shipbuilt. Programs, 442, 135-146.
- Koyoma, T., (1967), "On the Optimum Automatic Steering System of Sea", J.S.N.A., 122.
- Lamb, H., (1932), "Hydrodynamics", Cambridge University Press, London.

Lauvdal, T. ve Fossen, T.I., (1994) "A Globally Stable Adaptive Ship Autopilot with Wave Filter Using Only Yaw Angle Measurements",

Lauvdal, T. ve Fossen, T. I., (1998), "Rudder Roll Stabilization of Ships Subject to Input Rate Saturations Using a Gain Scheduled Control Law", Proc. of the IFAC Conference on Control Applications in Marine Systems, Fukuoka, Japan, 121-127.

Lee, S. ve Cho, H.S., (2003) "A Fuzzy Controller for an Electro-Hydraulic Fin Actuator Using Phase Plane Method", Control Engineering Practice, 697-708.

Lewis, F.M., (1967), "The Motion of Ships in Waves", Principles of Naval Architecture, The Society of Naval Architects and Marine Engineering, 669-692.

Linkens, D.A. ve Nyongesa, H.O., (1996), "Learning systems in intelligent control: an appraisal of fuzzy, neural and genetic algorithm control applications", IEE Proc. of Control Theory Appl., 143(4), 367-386.

Lloyd, A.E.J.M., (1975), "Roll Stabilization by Rudder", Proceedings of the 4<sup>th</sup> International Ship Control Systems Symposium, The Netherlands.

Lypunov, A.M., (1892), "The General Problem of the Stability of motion", Princeton Univ. Press.

Mamdani, E.H., (1975), "An Experiment in Linguistic Synthesis with a Fuzzy Logic Controller", International Journal of Man-Machine Studies, 7, 1-13.

Minorsky, N., (1922), "Directional Stability of Automatically Steered Bodies, Journal of American Society of Naval Engineers.

Morawski, L. ve Pomirski, J., (1998), "Ship Track-Keeping Experiments with a Physical Tanker Model", Control Engineering Practice, 6, 763-769.

Morari, M. ve Zafirio, E., (1989), "Robust Process Control, Englewood cliffs" NJ. Prentice-Hall

Mort, A., (1957), "Shipwrecks of the Pacific Coast. Port-land, Oreg.", Binford.

Motora, S., (1922), "Effect of Fin Area and Control Methods on Reduction of Roll Motion with Fin Stabilizers", Bulletin of the M.E.S.J., Vo1. 22, No.1

Nejim, S., (1998), "Design of Limited Authority Adaptive Ship Steering Autopilots", IFAC Control App. in Marine Systems, Japan.

Newman, J.N., (1977), "Marine Hydrodynamics", MIT Press, Cambridge, MA.

Nomoto, K., Taguchi, T., Honda, K. ve Hirano, S., (1957), "On the Steering Qualities of Ships", Technical Report, International Shipbuilding Progress, 4.

Norrbin, N.H., (1963), "On the Design and Analyses of the Zig-Zag Test on Base of Quasi Linear Frequency Response", Technical Report, Gothenburg, Sweden.

Ogata, K., (1990), "Modern Control Engineering", New Jersey, Prentice-Hall.

Ogawara, Y. ve Iwamoto, S. (1998), "Studies on the Control System Design of Ship Maneuvering Motion with Decoupling Control" IFAC control App. In Marine Systems, Japan.

- Ohtsu, K., ve Park, J.S. (1998), "Batch Adaptive Yaw-Roll Controllable Autopilot", IFAC Control App. In Marine Systems, Japan.
- Omerdic, E., Koroman, V., Kuljica, Lj., (1997), "Improved Fuzzy Autopilot for Track-keeping.", Proceedings of the IFAC Conference on Control Applications in Marine Systems, 135-140, Japan.
- Özkan, R., (1977), "Lyapunov Direkt Yöntemi İle Gemilerin Stabilite Teorisi", Doktora Tezi, İTÜ.
- Perez, T. ve Blanke, M., (1998), "Mathematical Ship Modeling for Control Applications", Technical Report.
- Perez, T., Goodwin, G., ve Skelton, R., (2000), "Analysis of Performance and Applicability of Rudder-Based Stabilizers", Technical report, University of California, USA.
- Pierson, W.J. ve Moskowitz, L., (1964), "A Proposed Spectral Form for Fully Developed Wind Seas Based on the Similarity Theory of S.A., U.S. Naval Oceanographic Office Contract 62306-1042.
- Posthethwaite, B., Brown, M. ve Sing, C.H., (1997), "A New Identification Algorithm for Fuzzy Relational Models and its Applications in Model-based Control", Trans IChemE, 75, 453-458
- Sabuncu, T., (1985), "Gemi Manevraları ve Kontrolü", İTÜ Gemi İnşaatı ve Deniz Bilimleri.
- Saelid, S., Jenssen, N.A., ve Balchen, J.G., (1983), "Design and Analysis of a Dynamic Positioning System Based on Kalman Filtering and Optimal Control", IEEE Transaction on Automatic Control, 331-339.
- Sellars, F., ve Martin, J.P., (1992), "Selection and Evaluation of Ship Roll Stabilization Systems", Marine Technology, 29, 84-101.
- Sgobbo, J.N. ve Parsons, M., (1999), "Rudder/Fin Roll Stabilization of the USCG WMEC 901 Class Vessel", Marine Technology, 36, 157-170.
- Skjetne, R., (2001) "Autopilot Design Proposal for a Large Ship", Technical Report.
- Skjetne, R. ve T. I. Fossen, (2001), "Nonlinear Maneuvering and Control of Ships", Proc. of Oceans 2001 MTS/IEEE conference, 1808 -1815, November.
- Skogestad, S. ve Postlethwaite, I., (2000), "Multivariable Feedback Control-Analysis and Design", John Wiley&Sons.
- Sorensen, A. ve Strand, J.P., (2000), "Positioning of Small-Waterplane-Area Marine Constructions with Roll and Pitch Damping", Control Engineering Practice, 205-213.
- Sugeno, M., (1980), "Fuzzy Identification of Systems and its Application to Modeling and Control", IEEE Trans. Syst., Man, Cybern, 15, 116-132.
- Sugimoto, A. ve Kojima, T., (1978), "A new autopilot system with condition adaptively", Proceedings 5th Ship Control Systems Symposium, Annapolis Md., USA.
- Sutton, R. ve Roberts, G.N., (1989), "Design study of a Fuzzy Controller for Ship Roll Stabilization", Electronics Communication Engineering Journal, 159-166.

- Sutton, R. ve Craven, P.J., (2001), "A Fuzzy Autopilot Design Approach That Utilizes Non-linear Consequent Terms", *Journal of Marine Science and Technology*, 9, 47-53.
- Şuhubi, E., (1981), "Rijid Cisimler Dinamiği", *Fatih Yayın Evi Matbaası*, Sayı 1175.
- The society of Naval Architects and Marine Engineers, (1950), "Nomenclature for Treating the Motion of a Submerged Body Through Fluid", *Technical and Research Bulletin*, 1-15.
- Tzeng, C., Goodwin, G., ve Crisafulli, S., (1999), "Feedback Linearization Design of a Ship Steering Autopilot with Saturating and Slew Rate Limiting Actuator", *Int. J. Adapt. Control Signal Process*, 13, 23-30.
- Tzeng, C., (1999), "An Internal Model Control Approach to the Design of Yaw-Rate-Control Ship-Steering Autopilot", *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 24.
- Tzeng, C., Chen, K.S., (1999), "A Dynamic Learning for Remote Sensing Applications", *IEEE. Trans. On Remote Sensing*, 32, 1096-1102.
- Tzeng, C. ve Wu, C., (2000), "On the Design and Analysis of Ship Stabilizing Fin Controller", *Journal of Marine Science and Technology*, 8, 117-124.
- Tzeng, C. ve Lin, K.F., (2000), "Adaptive Ship Steering Autopilot Design with Saturating and Slew Rate Limiting Actuator" *Int.J. Adapt. Control Signal Process*, 14, 411-426.
- Tzeng, C. ve Wu, C., (2001), "A Sensitivity Function Approach to the Design of Rudder Roll Stabilization Controller" *Journal of Marine Science and Technology*, 9, 100-112.
- Velagic, J, Vukic, Z. ve Omerdic, E, (2003), "Adaptive Fuzzy Ship Autopilot for Track-Keeping", *Control Engineering Practice*, 11, 433-443.
- Vetus, (2003), "Marintek, Deniz ve Yat Malzemeleri Tic. A.Ş."
- Vinagre, B.M., Petras, I., Podlubny, I. ve Chen, Y.Q., (2002), "Using Fractional Order Adjustment Rules and Fractional Order Reference Models in Model-Reference Adaptive Control", *Nonlinear Dynamics*, 29, 269-279.
- Watanabe, K., Izuta, G., vd., (2002), "Relation Between IMC Parameterization and Generalized Stabilizer", *The 4<sup>th</sup> Asian Control Conference*, Singapore.
- Watanabe, K. ve Muramatsu, E., (2003), "Adaptive Internal Model Control of SISO systems", *SICE Annual Conference in Fukui, Japan*.
- Whitaker, H.P., Yamron, J., Kezer, A., (1958), "Design of Model Reference Adaptive Control Systems for Aircraft", *Report R-164, Instrumentation Laboratory, Massachusetts Institute of Technology*.
- Witt, Sutton, R., Miller, N., (1994), "The use of Artificial Neural Networks in the Design of Fuzzy Autopilots for Ships", *UKACC International Conference on Control*, No: 427.
- Woo, P., (1998) "An Adaptive Fuzzy Sliding Mode Controller for Robotic Manipulators" *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics (A)*, 149-159.
- Yang, Y., Zhou, C., ve Jia, X., (2002), "Robust Adaptive Fuzzy Control and its Application to Ship Roll Stabilization", *Information Sciences*, 142, 177-194.

Zadeh, L.A., (1965), "The Concept of a Linguistic Variable and its Application to Approximate Reasoning ", Information Science, 9, 43-80.

Zhang, R., Sun, Z. ve Xu, H., (1996), "On the Application of a Novel Control Scheme to Ship Steering", Int. Shipbuilt. Prof., 43, 167-184.

Zuidweg, J.K., (1970), "Automatic Guidance of Ships as a Control Problem", PhD thesis, Delft University of Technology, The Netherlands.

## **EKLER**

Ek 1 Yan öteleme, yalpa ve savrulma hareketlerinin transfer fonksiyonlarının bulunması

- Ek 2 Konteyner gemi manevra simülasyon matlab dosyası
- Ek 3 Nomoto modelinin basitleştirilmesi
- Ek 4 Optimal kontrol kazanç hesabı
- Ek 5 Lyapunov teoremi ile savrulma hareketinin kararlılığı
- Ek 6 Üç serbestlik dereceli savrulma hareketi durum uzay matrislerinin bulunması
- Ek 7 Üç serbestlik dereceli PD kontrol Matlab programı
- Ek 8 Lyapunov teoremi ile yalpa hareketinin kararlılığı
- Ek 9 Üç serbestlik dereceli yalpa hareketi durum uzay matrislerinin bulunması
- Ek 10 Yalpa açısı yalpa dengeleme sistemi transfer fonksiyonu
- Ek 11 Hız dönüşümleri
- Ek 12 Normalleştirme değişkenleri

Yan öteleme, yalpa ve savrulma hareketlerinin transfer fonksiyonlarının bulunması

Yan öteleme, yalpa, savrulma hareketlerinin dümen açısına bağlı eşitlikleri aşağıdaki gibidir.

$$[(m - Y_v)s - Y_v]V(s) = (Y_\phi + Y_p s + Y_p s^2)\phi(s) + (Y_r s + Y_r s^2)\psi(s) + (Y_\delta)\delta(s)$$

$$[(I_x - K_p)s^2 - K_p s + WGM]\phi(s) = (K_v + K_v s)V(s) + (K_r s + K_r s^2)\psi(s) + (K_\delta)\delta(s)$$

$$[(I_z - N_r)s^2 - N_r s]r(s) = (N_\phi + N_p s + N_p s^2)\phi(s) + (N_v + N_v s)V(s) + (N_\delta)\delta(s)$$

Hesaplamlarda kolaylık sağlanması için yukarıdaki eşitlik sabitlere bağlı olarak gösterilir.

$$a_1 V(s) = a_2 \phi(s) + a_3 \psi(s) + a_4 \delta(s)$$

$$b_1 \phi(s) = b_2 V(s) + b_3 \psi(s) + b_4 \delta(s)$$

$$c_1 \psi(s) = c_2 V(s) + c_3 \phi(s) + c_4 \delta(s)$$

Bu ifadeyi matris formunda yazarak herbir değişkenin dümen sapmasına bağlı transfer fonksiyonu elde edilir.

$$Ax = b\delta$$

$$\text{Burada } x = [v \quad \phi \quad \psi]^T,$$

$$A = \begin{bmatrix} a_1 & -a_2 & -a_3 \\ -b_2 & b_1 & -b_3 \\ -c_2 & -c_3 & c_1 \end{bmatrix}, \quad b = \begin{bmatrix} a_4 \\ b_4 \\ c_4 \end{bmatrix}$$

ile ifade edilir. Transfer fonksiyonları aşağıdaki gibidir.

$$x = A^{-1} b\delta$$

$$\text{Yan öteleme : } G_1 = \frac{V(s)}{\delta(s)} = \frac{a_4 \cdot (b_1 \cdot c_1 - b_3 \cdot c_3) + b_4 \cdot (a_2 \cdot c_1 + a_3 \cdot c_3) + c_4 \cdot (a_2 \cdot b_3 + a_3 \cdot b_1)}{(a_1 \cdot b_1 \cdot c_1 - a_1 \cdot b_3 \cdot c_3 - a_2 \cdot b_2 \cdot c_1 - a_3 \cdot b_2 \cdot c_1 - a_2 \cdot b_3 \cdot c_2 - a_3 \cdot b_1 \cdot c_2)}$$

$$\text{Yalpa : } G_2 = \frac{\phi(s)}{\delta(s)} = \frac{a_4 \cdot (b_2 \cdot c_1 + b_3 \cdot c_2) + b_4 \cdot (a_1 \cdot c_1 - a_3 \cdot c_2) + c_4 \cdot (a_1 \cdot b_3 + a_3 \cdot b_2)}{(a_1 \cdot b_1 \cdot c_1 - a_1 \cdot b_3 \cdot c_3 - a_2 \cdot b_2 \cdot c_1 - a_3 \cdot b_2 \cdot c_1 - a_2 \cdot b_3 \cdot c_2 - a_3 \cdot b_1 \cdot c_2)}$$

$$\text{Savrulma : } G_3 = \frac{\psi(s)}{\delta(s)} = \frac{a_4 \cdot (b_2 \cdot c_3 + b_1 \cdot c_2) + b_4 \cdot (a_1 \cdot c_3 + a_2 \cdot c_2) + c_4 \cdot (a_1 \cdot b_1 - a_2 \cdot b_2)}{(a_1 \cdot b_1 \cdot c_1 - a_1 \cdot b_3 \cdot c_3 - a_2 \cdot b_2 \cdot c_1 - a_3 \cdot b_2 \cdot c_1 - a_2 \cdot b_3 \cdot c_2 - a_3 \cdot b_1 \cdot c_2)}$$

Çizelge 2.3'deki sabitler yerleştirildiğinde yan öteleme hızı ( $V$ ), yalpa açısı ( $\phi$ ) ve savrulma açısının ( $\psi$ ) dümen açısına ( $\delta$ ) bağlı transfer fonksiyonları son durumda aşağıdaki gibidir.

$$\frac{V(s)}{\delta(s)} = \frac{\begin{aligned} & [(m - Y_v)(I_x - K_\beta)(I_z - N_r)]s^5 + [(m - Y_v)(-N_r(I_x - K_\beta) - K_p(I_z - N_r) + K_r N_\beta)]s^4 \\ & [-Y_v(I_x - K_\beta)(I_z - N_r)]s^4 + [(m - Y_v)(K_p N_r + WGM(I_z - N_r) + K_r N_p + K_r N_\beta)]s^3 \\ & [-Y_v(-N_r(I_x - K_\beta) - K_p(I_z - N_r) + K_r N_\beta)]s^3 + [(m - Y_v)(-N_r WGM + K_r N_\phi)]s^2 \\ & [(K_r N_p) - Y_v(-K_p N_r + WGM(I_z - N_r) + K_r N_p + K_r N_\beta)]s^2 + [(m - Y_v)K_r N_\phi]s \\ & [-Y_v(-N_r WGM + K_r N_\phi + K_r N_p)]s - Y_v K_r N_\phi \end{aligned}}{\begin{aligned} & [Y_v(I_z - N_r)(I_x + K_\beta) - m(I_x N_r + K_\beta(I_z - N_r)) - Y_p K_v(I_z - N_r)]s^5 \\ & [Y_v(I_z - N_r)(I_x + K_\beta) - Y_v(K_p N_r + K_r N_\beta) - K_p(m - Y_v)]s^4 \\ & [-(I_z - N_r)(Y_\beta K_v + Y_p K_v) - Y_\beta(K_v N_r + K_r N_v) - Y_r(I_x N_r + K_v N_\beta + K_\beta N_v)]s^4 \\ & [Y_v(K_p(1 - N_r) - K_r N_\beta) + m(K_p N_r + WGM(I_z - N_r) + K_r N_p + K_r N_\beta)]s^3 \\ & [Y_v(N_r(I_x - K_\beta) - WGM(I_z - N_r) - (K_r N_p + K_r N_\beta)) - m I_x N_r - Y_\beta(K_v N_r - K_r N_v)]s^3 \\ & [Y_p(-K_v N_r + K_v I_z - K_r N_v + K_v N_r) - Y_\phi K_v(I_z - N_r) - Y_r(K_v N_\beta - K_\beta N_v)]s^3 \\ & [-Y_r(I_x N_v - K_\beta N_v - K_p N_v + K_v N_p + I_x N_v)]s^3 + [Y_v(N_r(I_x - K_\beta) - WGM(I_z - N_r))]s^2 \\ & [Y_v(-K_r N_p - K_r N_\beta) + (m - Y_v)(K_p N_r + K_r N_\phi + K_r N_p) - Y_p K_r N_v]s^2 \\ & [-Y_\phi(K_r N_v + K_v I_z - K_v N_r - K_v N_r) + Y_p(K_v N_r + K_r N_v) - Y_r(N_v(I_x - K_\beta))]s^2 \\ & [(-Y_r(K_p N_v - K_v N_\beta) + K_v N_\beta) + Y_r(K_p N_v - WGMN_v) - (K_v N_\phi + K_v N_p)]s^2 \\ & [(m - Y_v)(K_r N_\phi - WGMN_r) - Y_v((K_v N_\phi + K_p N_r) + K_r N_p) - Y_\phi(K_r N_v - K_v N_r)]s \\ & Y_p K_r N_v + Y_r((K_p N_v - WGMN_v) - (K_v N_\phi + K_v N_p) - Y_r(K_v N_\phi - WGMN_v))s \\ & [Y_v(-K_r N_\phi + WGMN_r) - Y_\phi K_r N_v - Y_r(WGMN_v + K_v N_\phi)] \end{aligned}}$$

$$\begin{aligned}
& [K_\delta I_z (m - Y_\dot{v}) + Y_\dot{v} K_\delta^2 + Y_\delta K_\dot{v} (I_z - N_\dot{r})] s^3 + [(N_\delta K_\dot{r} - K_\delta N_r) (m - Y_\dot{v})] s^2 \\
& [Y_\dot{v} K_\delta (I_z - K_\delta) + Y_\dot{r} (K_\dot{v} N_\delta - K_\delta N_\dot{v}) + Y_\delta (K_\dot{v} (I_z - N_\dot{r}) - K_\dot{v} N_\dot{r} + N_\dot{v} K_\dot{r})] s^2 \\
& [N_\delta K_r (m - Y_\dot{v}) + Y_\dot{v} (K_\delta N_r - N_\delta K_\dot{r}) + Y_\dot{r} (K_\dot{v} N_\delta - N_\dot{v} K_\delta) + Y_r (K_\dot{v} N_\delta - Y_r K_\delta)] s \\
\frac{\phi(s)}{\delta(s)} = & \frac{[Y_\delta (-K_\dot{v} N_r + N_\dot{v} K_r + N_\dot{v} K_\dot{r})] s + [-Y_\dot{v} N_\delta K_r + Y_r (K_\dot{v} N_\delta - N_\dot{v} K_\delta) + N_\dot{v} K_r Y_\delta]}{[Y_\dot{v} (I_z - N_\dot{r}) (I_x + K_\dot{p}) - m (I_x N_\dot{r} + K_\dot{p} (I_z - N_\dot{r})) - Y_\dot{p} K_\dot{v} (I_z - N_\dot{r})] s^5} \\
& [Y_\dot{v} (I_z - N_\dot{r}) (I_x + K_\dot{p}) - Y_\dot{v} (K_\dot{p} N_\dot{r} + K_\dot{r} N_\dot{p}) - K_\dot{p} (m - Y_\dot{v})] s^4 \\
& [-(I_z - N_\dot{r}) (Y_\dot{p} K_\dot{v} + Y_\dot{p} K_\dot{v}) - Y_\dot{p} (K_\dot{v} N_\dot{r} + K_\dot{r} N_\dot{v}) - Y_\dot{r} (I_x N_\dot{r} + K_\dot{v} N_\dot{p} + K_\dot{p} N_\dot{v})] s^4 \\
& [Y_\dot{v} (K_\dot{p} (1 - N_\dot{r}) - K_\dot{r} N_\dot{p}) + m (K_\dot{p} N_r + WGM(I_z - N_\dot{r}) + K_\dot{r} N_\dot{p} + K_r N_\dot{p})] s^3 \\
& [Y_\dot{v} (N_r (I_x - K_\dot{p}) - WGM(I_z - N_\dot{r}) - (K_\dot{r} N_\dot{p} + K_r N_\dot{p})) - m I_x N_r - Y_\dot{p} (K_\dot{v} N_r - K_r N_\dot{v})] s^3 \\
& [Y_\dot{p} (-K_\dot{v} N_r + K_\dot{v} I_z - K_\dot{r} N_\dot{v} + K_\dot{v} N_\dot{r}) - Y_\dot{p} K_\dot{v} (I_z - N_\dot{r}) - Y_r (K_\dot{v} N_\dot{p} - K_\dot{p} N_\dot{v})] s^3 \\
& [-Y_\dot{r} (I_x N_\dot{v} - K_\dot{p} N_\dot{v} - K_\dot{p} N_\dot{v} + K_\dot{v} N_\dot{p} + I_x N_\dot{v})] s^3 + [Y_\dot{v} (N_r (I_x - K_\dot{p}) - WGM(I_z - N_\dot{r}))] s^2 \\
& [Y_\dot{v} (-K_\dot{r} N_\dot{p} - K_r N_\dot{p}) + (m - Y_\dot{v}) (K_\dot{p} N_r + K_\dot{r} N_\dot{p} + K_r N_\dot{p}) - Y_\dot{p} K_r N_\dot{v}] s^2 \\
& [-Y_\dot{p} (K_\dot{r} N_\dot{v} + K_\dot{v} I_z - K_\dot{v} N_r - K_\dot{v} N_r) + Y_\dot{p} (K_\dot{v} N_r + K_r N_\dot{v}) - Y_r (N_\dot{v} (I_x - K_\dot{p}))] s^2 \\
& [(-Y_r (K_\dot{p} N_\dot{v} - K_\dot{v} N_\dot{p}) + K_\dot{v} N_\dot{p}) + Y_\dot{r} (K_\dot{p} N_\dot{v} - WGMN_\dot{v}) - (K_\dot{v} N_\dot{p} + K_\dot{v} N_\dot{p})] s^2 \\
& [(m - Y_\dot{v}) (K_r N_\dot{p} - WGMN_r) - Y_\dot{v} ((K_\dot{v} N_\dot{p} + K_\dot{p} N_r) + K_r N_\dot{p}) - Y_\dot{p} (K_r N_\dot{v} - K_\dot{v} N_r)] s \\
& Y_\dot{p} K_r N_\dot{v} + Y_r ((K_\dot{p} N_\dot{v} - WGMN_\dot{v}) - (K_\dot{v} N_\dot{p} + K_\dot{v} N_\dot{p}) - Y_\dot{r} (K_\dot{v} N_\dot{p} - WGMN_\dot{v})) s \\
& [Y_\dot{v} (-K_r N_\dot{p} + WGMN_r) - Y_\dot{p} K_r N_\dot{v} - Y_r (WGMN_\dot{v} + K_\dot{v} N_\dot{p})]
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& [(m - Y_{\dot{v}})((I_x - K_{\dot{p}})N_{\delta} + K_{\delta}N_{\dot{p}}) + Y_{\dot{p}}(K_{\delta}N_{\dot{v}} - N_{\delta}K_{\dot{v}}) + Y((I_x + K_{\dot{p}})N_{\dot{v}} + K_{\dot{v}}N_{\dot{p}})_{\delta}]s^3 \\
& [(m - Y_{\dot{v}})(-K_pN_{\delta} + K_{\delta}N_p) - Y_v((I_x - K_{\dot{p}})N_{\delta} + K_{\delta}N_{\dot{p}}) + Y_{\dot{p}}(K_{\delta}N_v - N_{\delta}K_v)]s^2 \\
& [Y_p(K_{\delta}N_{\dot{v}} - N_{\delta}K_{\dot{v}}) + (I_x - K_{\dot{p}})N_v + K_{\dot{v}}N_p + K_vN_{\dot{p}}]s^2 \\
& [(m - Y_{\dot{v}})(WGMN_{\delta} + K_{\delta}N_{\phi}) - Y_v(-K_pN_{\delta} - K_{\delta}N_p) + Y_p(K_{\delta}N_v - K_vN_{\delta})]s \\
& [Y_{\phi}(N_{\dot{v}}K_{\delta} - K_{\dot{v}}N_{\delta}) + (K_{\dot{v}}N_{\phi} + K_vN_p - K_pN_v + WGMN_{\dot{v}})]s \\
\frac{\psi(s)}{\delta(s)} = & \frac{[Y_v(WGMN_{\delta} + K_{\delta}N_{\phi}) + Y_{\phi}(N_vK_{\delta} - K_vN_{\delta}) + WGMN_v + K_vN_{\phi}]}{[Y_v(I_z - N_{\dot{r}})(I_x + K_{\dot{p}}) - m(I_xN_{\dot{r}} + K_{\dot{p}}(I_z - N_{\dot{r}})) - Y_{\dot{p}}K_{\dot{v}}(I_z - N_{\dot{r}})]s^5} \\
& [Y_v(I_z - N_{\dot{r}})(I_x + K_{\dot{p}}) - Y_{\dot{v}}(K_pN_{\dot{r}} + K_{\dot{r}}N_{\dot{p}}) - K_p(m - Y_{\dot{v}})]s^4 \\
& [-(I_z - N_{\dot{r}})(Y_{\dot{p}}K_{\dot{v}} + Y_pK_v) - Y_{\dot{p}}(K_vN_{\dot{r}} + K_{\dot{r}}N_{\dot{v}}) - Y_{\dot{r}}(I_xN_{\dot{r}} + K_{\dot{v}}N_{\dot{p}} + K_{\dot{p}}N_{\dot{v}})]s^4 \\
& [Y_v(K_p(1 - N_{\dot{r}}) - K_{\dot{r}}N_{\dot{p}}) + m(K_{\dot{p}}N_r + WGM(I_z - N_{\dot{r}}) + K_{\dot{r}}N_p + K_rN_{\dot{p}})]s^3 \\
& [Y_{\dot{v}}(N_r(I_x - K_{\dot{p}}) - WGM(I_z - N_{\dot{r}}) - (K_{\dot{r}}N_p + K_rN_{\dot{p}})) - mI_xN_r - Y_{\dot{p}}(K_vN_r - K_rN_{\dot{v}})]s^3 \\
& [Y_p(-K_{\dot{v}}N_r + K_vI_z - K_{\dot{r}}N_{\dot{v}} + K_vN_{\dot{r}}) - Y_{\phi}K_{\dot{v}}(I_z - N_{\dot{r}}) - Y_r(K_{\dot{v}}N_{\dot{p}} - K_{\dot{p}}N_{\dot{v}})]s^3 \\
& [-Y_{\dot{r}}(I_xN_v - K_{\dot{p}}N_v - K_pN_{\dot{v}} + K_{\dot{v}}N_p + I_xN_{\dot{v}})]s^3 + [Y_v(N_r(I_x - K_{\dot{p}}) - WGM(I_z - N_{\dot{r}}))]s^2 \\
& [Y_v(-K_{\dot{r}}N_p - K_rN_p) + (m - Y_{\dot{v}})(K_pN_r + K_{\dot{r}}N_{\phi} + K_rN_p) - Y_{\dot{p}}K_rN_v]s^2 \\
& [-Y_{\phi}(K_{\dot{r}}N_{\dot{v}} + K_vI_z - K_{\dot{v}}N_r - K_vN_r) + Y_p(K_vN_r + K_rN_{\dot{v}}) - Y_r(N_v(I_x - K_{\dot{p}}))]s^2 \\
& [(-Y_r(K_pN_{\dot{v}} - K_{\dot{v}}N_p) + K_vN_{\dot{p}}) + Y_{\dot{r}}(K_pN_v - WGMN_{\dot{v}}) - (K_{\dot{v}}N_{\phi} + K_vN_p)]s^2 \\
& [(m - Y_{\dot{v}})(K_rN_{\phi} - WGMN_r) - Y_v((K_{\dot{v}}N_{\phi} + K_pN_r) + K_rN_p) - Y_{\phi}(K_rN_{\dot{v}} - K_vN_r)]s \\
& Y_pK_rN_v + Y_r((K_pN_v - WGMN_{\dot{v}}) - (K_{\dot{v}}N_{\phi} + K_vN_p) - Y_{\dot{r}}(K_vN_{\phi} - WGMN_v))s \\
& [Y_v(-K_rN_{\phi} + WGMN_r) - Y_{\phi}K_rN_v - Y_r(WGMN_v + K_vN_{\phi})]
\end{aligned}$$

**Ek 2****Konteyner gemi manevra simülasyon matlab dosyası**

```

t_f = 150; % bitiş süresi (s)
h = 0.1; % örnekleme zamanı (s)

% Başlangıç değerleri:
x = [12.7 0 0 0 0 0 0 0 0];
N = round(t_f/h); % örnekleme sayısı
xout = zeros(N+1,length(x)+2); % sakla
for i=1:N+1,
    time = (i-1)*h;
    r = x(3);
    psi = x(6);
    delta_c = 10*pi/180;
    % Konteyner modeli
    [xdot,U] = Lkontainer01(x,delta_c);
    xout(i,:) = [time,x',U];
    % Nümerik İntegrasyon
    x = euler2(xdot,x,h);
end
t = xout(:,1);
u = xout(:,2);
v = xout(:,3);
r = xout(:,4)*180/pi;
x = xout(:,5);
y = xout(:,6);
psi = xout(:,7)*180/pi;
p = xout(:,8)*180/pi;
phi = xout(:,9)*180/pi;;
delta = xout(:,10)*180/pi;;
U = xout(:,11);

plots
figure(1)
plot(y,x,'r') xlabel('Doğu'),ylabel('Kuzey'),title('Gemi Konumu')
figure(2)
subplot(221),plot(t,psi,'b'), xlabel('Zaman (sn)'),title('Baş açısı \psi (der)')
figure(3)
subplot(222),plot(t,r,'b'),xlabel('Zaman (sn)'),title('Baş oranı r (der/s)')
figure(4)
subplot(321),plot(t,phi,'r'),xlabel('Zaman (sn)'),title('Yalpa açısı \phi (der/s)')
figure(5)
subplot(322),plot(t,p,'r'),xlabel('Zaman (sn)'),title('Yalpa oranı r (der/s)')
figure(6)
subplot(511),plot(t,delta,'r'),xlabel('Zaman (sn)'),title('Dümen açısı \delta (der)')
figure(7)
subplot(512),plot(t,u,'r'),xlabel('Zaman (sn)'),title('İlerleme hızı \u (der/s)')
figure(8)
plot(t,v,'r'),xlabel('Zaman (sn)'),title('Yan hızı \v (der/s)')

```

```

figure(9)
plot(t,U,'r'),xlabel('Zaman (sn)'),title('toplam hız \U (der/s)')
function [xdot,U] = Lkontainer01 (x,ui,U0)
if (length(x) ~= 9),error('x-vektörü 9.derece olmalı !'); end
if nargin==2, U0=12.7; end
if U0 <=0,error('Gemi hızı sıfırdan büyük olmalı'); end
L = 230.66; % Gemi boyu (m)
U = sqrt(U0^2 - x(2)^2); % Gemi hızı (m/s)
delta_max = 35; % max dümen açısı (der)
Ddelta_max = 2.3; % max dümen oranı (der/s)
delta_c = ui;
v = x(2); y = x(5);
r = x(3); psi = x(6);
p = x(7); phi = x(8);
nu = [v r p]';
eta = [y psi phi]';
delta = x(9);
T = diag([ 1 1/L 1/L]);
M = [ 0.0105 0 -0.000009
0 0.00063 0
-0.000009 0 0.0000176 ];

D = [ 0.00725 0.0067561 0
0.003 0.00290 0.0008
-0.00025 -0.0000214 0.00003 ];

G = [ 0 0 -0.000377
0 0 0.000179
0 0 0.000378 ];

b = [-0.002481 0.001289 0.000065 ]';
if abs(delta_c) >= delta_max*pi/180,
delta_c = sign(delta_c)*delta_max*pi/180;
end
delta_dot = delta_c - delta;
if abs(delta_dot) >= Ddelta_max*pi/180,
delta_dot = sign(delta_dot)*Ddelta_max*pi/180;
end
nudot = inv(T*M*Tinv)*((U^2/L)*T*b*delta-(U/L)*T*D*Tinv*nu-(U/L)^2*T*G*Tinv*eta ;
% Durum değişkenleri xdot = [ u v r x y psi p phi delta ]'
xdot = [ 0
nudot(1)
nudot(2)
cos(psi)*U0-sin(psi)*cos(phi)*v
sin(psi)*U0+cos(psi)*cos(phi)*v
cos(phi)*r
nudot(3)p
delta_dot];

```

**Ek 3****Nomoto modelinin basitleştirilmesi**

Yan öteleme, savrulma hareketlerinin dümen açısına bağlı eşitlikleri aşağıdaki gibidir.

$$(m - Y_{\dot{v}})\dot{v} = Y_v v + Y_r r + Y_{\delta} \delta$$

$$(I_z - N_{\dot{r}})\dot{r} = N_r r + N_v v + N_{\delta} \delta$$

Bu eşitliğe Laplace dönüşümü uygulandığında,

$$R(s) [(I_z - N_{\dot{r}})(m - Y_{\dot{v}})s^2 - (Y_v(I_z - N_{\dot{r}}) + N_r(m - Y_{\dot{v}}))s + N_r Y_v - N_v Y_r] = \\ \delta(s) [N_{\delta}(m - Y_{\dot{v}}) - N_{\delta} Y_v + N_v Y_{\delta}]$$

elde edilir. Bu eşitlik zaman düzleminde ifade edilirse,

$$\frac{(I_z - N_{\dot{r}})(m - Y_{\dot{v}})}{N_r Y_v - N_v Y_r} \ddot{r} - \frac{Y_v(I_z - N_{\dot{r}}) + N_r(m - Y_{\dot{v}})}{N_r Y_v - N_v Y_r} \dot{r} + r = \frac{-(N_{\delta} Y_v - N_v Y_{\delta})}{N_r Y_v - N_v Y_r} \left[ \frac{N_{\delta}(m - Y_{\dot{v}})}{-N_{\delta} Y_v + N_v Y_{\delta}} \dot{\delta} + \delta \right]$$

savrulma açısına bağlı eşitlik elde edilir.

$$T_1 T_2 = \frac{(I_z - N_{\dot{r}})(m - Y_{\dot{v}})}{N_r Y_v - N_v Y_r} \quad T_1 + T_2 = -\frac{Y_v(I_z - N_{\dot{r}}) + N_r(m - Y_{\dot{v}})}{N_r Y_v - N_v Y_r}$$

$$K = \frac{-(N_{\delta} Y_v - N_v Y_{\delta})}{N_r Y_v - N_v Y_r} \quad K T_3 = \frac{N_{\delta}(m - Y_{\dot{v}})}{-N_{\delta} Y_v + N_v Y_{\delta}}$$

$$T_1 T_2 \ddot{r} + (T_1 + T_2) \dot{r} + r = K(T_3 \dot{\delta} + \delta)$$

$T_1, T_2$  ve  $T_3$  zaman sabitleri, K ise dümen kazancıdır. Yukarıdaki eşitliğe Laplace dönüşümü

$$R(s) (T_1 T_2 s^2 + (T_1 + T_2)s + 1) = K(T_3 s + 1)\delta(s)$$

$$\frac{R(s)}{\delta(s)} = \frac{K(T_3 s + 1)}{(1 + T_1 s)(1 + T_2 s)}$$

uygulandığında transfer fonksiyonu elde edilir. Burada,  $T_3$  pozitif dümen tanımı seçilerek ihmal edilirken kutuplardan biride çıkarılır. Böylece Nomoto modelinin son hali elde edilir.

$$\frac{R(s)}{\delta(s)} = \frac{K}{Ts + 1}$$

Burada,  $T = T_1 + T_2 - T_3$  'dür.

**Ek 4****Optimal Kontrol Kazanç Hesabı**

Durum denklemleri,

$$\dot{x}(t) = A(t)x(t) + B(t)u(t)$$

eşitliği ile verilen bir sistemde istenen davranış ölçütü,

$$J(t_0, T) = \frac{1}{2} \int_{t_0}^T [x^T(t) Q x(t) + u^T(t) R u(t)] dt$$

seçildi. Burada  $Q(t)$  reel simetrik yarı kesin pozitif,  $R(t)$  ise reel simetrik kesin pozitif tanımlı matrislerdir. Hamiltonian bağıntısını kullanarak gerekli koşulları yazarsak,

$$H_a = \frac{1}{2} x^T(t) Q(t) x(t) + \frac{1}{2} u^T(t) R(t) u(t) + \lambda^T (A(t) x(t) + B(t) u(t))$$

$$\dot{x}(t) = -\frac{\partial H_a}{\partial \lambda} = A(t) x(t) + B(t) u(t)$$

$$\dot{\lambda}(t) = -\frac{\partial H_a}{\partial x} = -Q(t) x(t) - A^T(t) \lambda(t)$$

$$\frac{\partial H_a}{\partial u} = 0 = R(t) u(t) + B^T(t) \lambda(t) = 0$$

eşitliğinden,

$$u^*(t) = -(R(t))^{-1} B^T(t) \lambda(t)$$

$R(t)$  matrisi daha önce kesin pozitif olarak tanımlandığı için her zaman tersi alınabilir.  $u^*(t)$  için bulduğumuz ifadeyi yukarıdaki eşitlikte yerine koyduğunda,

$$\dot{x}(t) = A(t) x(t) - B(t) (R(t))^{-1} B^T(t) \lambda(t)$$

$$\lambda(t) = P(t) x(t)$$

elde edilir. Kalman her zaman  $P(t)$  gibi bir matrisin var olduğunu kanıtlamıştır. Eğer, yukarıdaki eşitlikte  $u^*(t)$  için bulduğumuz ifade de yerine koyarsak,

$$u^*(t) = -(R(t))^{-1} B^T(t) P(t) x(t)$$

$$\begin{aligned}\dot{\lambda}(t) &= -Q(t)x(t) - A^T(t)\lambda(t) \\ &= \dot{P}(t)x(t) + P(t)(A(t)x(t) + B(t)u(t))\end{aligned}$$

ifadesi elde edilir.  $u^*(t)$  ve  $\lambda(t)$  için bulduğumuz ifadeleri yukarıdaki eşitlikte yerine koyarsak Kalman denklemleri elde edilir.

$$\dot{P}(t) = P(t)A(t) - A^T(t)P(t) + P(t)B(t)(R(t))^{-1}B^T(t) - Q(t)$$

Bu ifade lineer olmayan matris Riccati diferansiyel denklemi adı ile de anılır. Analitik çözümü zor olan bu denklem için değişik nümerik çözüm yöntemleri geliştirilmiştir.

Lineer regülâtör problemi bir sonsuz zaman problemine dönüştüğünde, diferansiyel denklemler cebirsel denklemler dönüşür. Sonsuz zamanda  $P(t)$  sabit bir matris olacağından

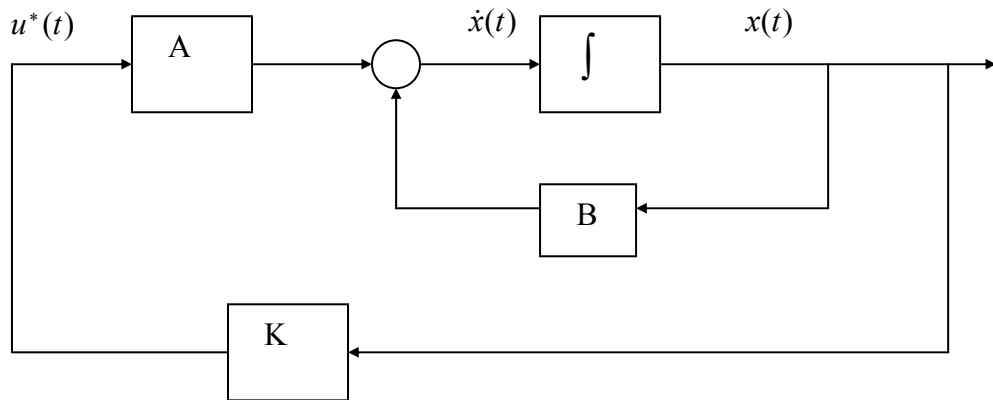
$$-P(t)A(t) - A^T(t)P(t) + P(t)B(t)(R(t))^{-1}B^T(t) = Q(t)$$

halini alır. Kalman problemin sonsuz zaman problemi gibi düşünülmesi için sağlanması gereken koşulları şöyle sıralamıştır.

1. Sistem kontrol edilebilir olmalı,
2.  $H=0$  olmalı ve
3.  $A$ ,  $B$ ,  $R$  ve  $Q$  zamanla değişmeyen matrisler olmalıdır.

$$u^*(t) = K(t)x(t)$$

gibi düşündüğümüzde optimal durum geri besleme kazanç matrisleri ile birlikte sistemin blok diyagramı şekildeki gibidir.



Şekil Optimal geri beslemeli sistemin kapalı çevrim blok diyagramı

## Ek 5

### Lyapunov Teoremi ile Savrulma Hareketinin Kararlılığı

Bir kontrol sisteminin tasarımında en önemli ihtiyaç sistemin kararlı olmasıdır. Model referans adaptif sistemlerde ise ilk aranacak özellik tüm sistemin kararlılığıdır. Bundan dolayı, model referans adaptif sistem tasarım problemini bir kararlılık problemi düşünmek daha uygundur. Bu nedenle, Lyapunov fonksiyonları kararlı model referans adaptif sistem tasarımında kullanılabilir.

Lyapunov kararlılığı üzerine sistemin içinde biriktirilen enerji ile sistemin dinamiği arasında bağıntı kuracak bir fonksiyon tanımlamıştır. Bu fonksiyon enerji kavramı göz önüne alınarak verilmiştir. Bilindiği gibi bir sistemin enerjisi, durum değişkenleri ile ilişkilidir. Eğer sistemin toplam enerjisi, sistem denge durumuna ulaşıncaya kadar sürekli azalır, bu sistem kararlıdır. Toplam enerjisi sürekli olarak azalan bir sistemde ise enerji fonksiyonunun zamana göre türevi negatif olur. Diferansiyel denklemin kararlı olması için, oluşturulan Lyapunov fonksiyonunun aşağıdaki kurallara uygun olmalı (Jordan ve Smith, 1979).

Teorem 1:

Bir kontrol sistem denkleminin,

$$\dot{x} = f(x, t) \quad f(0, t) = 0 \quad \text{bütün } t \text{ 'ler için verildiğini varsayalım. Eğer } V(x, t) \text{ gibi}$$

1.  $t \in R$  için  $V(0, t) = 0$
2.  $V$  pozitif tanımlı ve fonksiyonunun zamana göre türevi alınabilir olmalı
3.  $\dot{V} \leq 0$  olmalı,

bir fonksiyon bulunabilirse, bu sistemin başlangıç noktasında düzgün asimptotik kararlı olduğu söylenebilir (Özkan, 1977). Lyapunov kararlılık teoremi adaptif sistemlerde parametrelerin ayarlanması için oluşturulan algoritmalarda kullanılabilir. Bunun için öncelikle,

$$e = y - y_m$$

hata için diferansiyel bir eşitlik türetilmelidir. Bu diferansiyel eşitlik ayarlanabilen parametreleri de içermelidir. Hata ifadesinin türevi alınıp elde edilen ifadeye (3.35) eşitliği yerleştirilirse,

$$\frac{de}{dt} = -a_m e + (a_m - a - bs_0)y + (bt_0 - b_m)u_c$$

hata değişimi elde edilir. Bu durumda Lyapunov fonksiyonu ve hatayı sıfıra götürecekle ayar mekanizmasının bulunması için çalışılmalıdır. Bu amaç için Lyapunov fonksiyonu,

$$V(e, t_0, s_0) = \frac{1}{2} \left( e^2 + \frac{1}{b\gamma} (bs_0 + a - a_m)^2 + \frac{1}{b\gamma} (bt_0 - b_m)^2 \right)$$

kontrolcü parametrelere bağlı olarak ifade edilir. Lyapunov fonksiyonunun türevi,

$$\frac{dV}{dt} = -a_m e^2$$

elde edilir (Aström ve Wittenmark, 1989). Böylece sisteme ait Lyapunov fonksiyonu negatif tanımlı ve modelimiz asimptotik kararlı olduğu görülür.

**Ek 6****Üç serbestlik dereceli savrulma hareketi durum uzay matrislerinin bulunması**

Durum değişkenleri yan öteleme, yalpa ve savrulma açlarına bağlı olarak gösterilir.

$$\ddot{x} = \begin{bmatrix} \dot{v} \\ \dot{p} \\ \dot{r} \end{bmatrix}$$

(3.42) eşitliği esas alınarak durum değişkenleri ifade edilir.

$$\ddot{x} = M^{-1}(-D\dot{x} - Gx + \tau\delta)$$

Kütle matrisinin inversi,

$$M^{-1} = \frac{adjM}{\det M}$$

$$invM = \begin{bmatrix} (I_x - K_{\dot{p}})(N_{\dot{r}} - I_z) + K_{\dot{r}}N_{\dot{p}} & Y_{\dot{p}}(N_{\dot{r}} - I_z) - Y_{\dot{r}}N_{\dot{p}} & -Y_{\dot{r}}(I_x - K_{\dot{p}}) - Y_{\dot{p}}K_{\dot{r}} \\ K_{\dot{v}}(N_{\dot{r}} - I_z) - K_{\dot{r}}N_{\dot{v}} & (m - Y_{\dot{v}})(N_{\dot{r}} - I_z) + Y_{\dot{r}}N_{\dot{v}} & -K_{\dot{r}}(m - Y_{\dot{v}}) - Y_{\dot{r}}K_{\dot{v}} \\ N_{\dot{v}}(K_{\dot{p}} - I_x) - K_{\dot{v}}N_{\dot{p}} & -N_{\dot{p}}(m - Y_{\dot{v}}) - Y_{\dot{p}}N_{\dot{v}} & (m - Y_{\dot{v}})(K_{\dot{p}} - I_x) - Y_{\dot{p}}K_{\dot{v}} \end{bmatrix}$$

$$\det|M| = -mI_x I_z + mI_x N_{\dot{r}} + mK_{\dot{p}} I_z - mK_{\dot{p}} N_{\dot{r}} + mK_{\dot{r}} N_{\dot{p}} + Y_{\dot{v}} I_x I_z - Y_{\dot{v}} I_x N_{\dot{r}} - Y_{\dot{v}} K_{\dot{p}} I_z + Y_{\dot{v}} K_{\dot{p}} N_{\dot{r}} \\ - Y_{\dot{v}} N_{\dot{p}} K_{\dot{r}} + K_{\dot{v}} Y_{\dot{p}} I_z - K_{\dot{v}} Y_{\dot{p}} N_{\dot{r}} + K_{\dot{v}} Y_{\dot{r}} N_{\dot{p}} + N_{\dot{v}} Y_{\dot{p}} K_{\dot{r}} + N_{\dot{v}} Y_{\dot{r}} I_x - N_{\dot{v}} Y_{\dot{r}} K_{\dot{p}}$$

şeklinde bulunur. Sönüm kuvvet ve moment matrisleri,

$$D = \begin{bmatrix} -Y_v & -Y_p & -Y_r \\ -K_v & -K_p & -K_r \\ -N_v & -N_p & -N_r \end{bmatrix}$$

ve doğrultucu kuvvet ve moment matrisleri,

$$G = \begin{bmatrix} 0 & -Y_\phi & 0 \\ 0 & WGM & 0 \\ 0 & -N_\phi & 0 \end{bmatrix}, \quad \eta = \begin{bmatrix} x \\ \phi \\ \psi \end{bmatrix}$$

elde edilir. Üç serbestlik dereceli bu eşitliğin durum uzayı formunda aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$\dot{x} = Ax + Bu$$

$$x^T = [v \quad p \quad r \quad \phi \quad \psi]^T$$

$$A = \frac{I}{\det M} \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{13} & A_{14} & A_{15} \\ A_{21} & A_{22} & A_{23} & A_{24} & A_{25} \\ A_{31} & A_{32} & A_{33} & A_{34} & A_{35} \\ A_{41} & A_{42} & A_{43} & A_{44} & A_{45} \\ A_{51} & A_{52} & A_{53} & A_{54} & A_{55} \end{bmatrix}, \quad B = \frac{I}{\det M} \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ B_3 \\ B_4 \\ B_5 \end{bmatrix}$$

$$A_{11} = [[N_{\dot{v}}(K_{\dot{p}} - I_x) - K_{\dot{v}}N_{\dot{p}}](-Y_v) + (K_v)[Y_{\dot{p}}(N_{\dot{r}} - I_z) - Y_{\dot{r}}N_{\dot{p}}]] - N_v[-Y_{\dot{r}}(I_x - K_{\dot{p}}) - Y_{\dot{p}}K_{\dot{r}}]$$

$$A_{12} = [[[I_x - K_{\dot{p}}](N_{\dot{r}} - I_z) + K_{\dot{r}}N_{\dot{p}}](-Y_p) + Y_{\dot{p}}K_p(N_{\dot{r}} - I_z)] + (K_p - Y_{\dot{r}}N_{\dot{p}}) + N_p[Y_{\dot{r}}(I_x - K_{\dot{p}}) + Y_{\dot{p}}K_{\dot{r}}]$$

$$A_{13} = [(I_x - K_{\dot{p}})(N_{\dot{r}} - I_z) + K_{\dot{r}}N_{\dot{p}}](-Y_r) - K_r[Y_{\dot{p}}(N_{\dot{r}} - I_z) - Y_{\dot{r}}N_{\dot{p}}] + (N_p + N_r)[Y_{\dot{r}}(I_x - K_{\dot{p}}) + Y_{\dot{p}}K_{\dot{r}}]$$

$$A_{14} = WGM[Y_{\dot{p}}(N_{\dot{r}} - I_z) - Y_{\dot{r}}N_{\dot{p}}] - N_{\phi}[-Y_{\dot{r}}(I_x - K_{\dot{p}}) - Y_{\dot{p}}K_{\dot{r}}]$$

$$A_{15} = 0$$

$$A_{21} = -Y_v[K_{\dot{v}}(N_{\dot{r}} - I_z) - K_{\dot{r}}N_{\dot{v}}] + K_v[(m - Y_{\dot{v}})(N_{\dot{r}} - I_z) + Y_{\dot{r}}N_{\dot{v}}] + N_v[K_{\dot{r}}(m - Y_{\dot{v}}) + Y_{\dot{r}}K_{\dot{v}}]$$

$$A_{22} = -Y_p[K_{\dot{v}}(N_{\dot{r}} - I_z) - K_{\dot{r}}N_{\dot{v}}] + Y_{\dot{p}}[(m - Y_{\dot{v}})(N_{\dot{r}} - I_z) + Y_{\dot{r}}N_{\dot{v}}] + N_p[K_{\dot{r}}(m - Y_{\dot{v}}) + Y_{\dot{r}}K_{\dot{v}}]$$

$$A_{23} = -Y_r[K_{\dot{v}}(N_{\dot{r}} - I_z) - K_{\dot{r}}N_{\dot{v}}] - K_r[(m - Y_{\dot{v}})(N_{\dot{r}} - I_z) + Y_{\dot{r}}N_{\dot{v}}] + (N_p + N_r)[K_{\dot{r}}(m - Y_{\dot{v}}) + Y_{\dot{r}}K_{\dot{v}}]$$

$$A_{24} = WGM[(m - Y_{\dot{v}})(N_{\dot{r}} - I_z) + Y_{\dot{r}}N_{\dot{v}}] - N_{\phi}[-K_{\dot{r}}(m - Y_{\dot{v}}) - Y_{\dot{r}}K_{\dot{v}}]$$

$$A_{25} = 0$$

$$A_{31} = -Y_v[N_{\dot{v}}(K_{\dot{p}} - I_x) - K_{\dot{v}}N_{\dot{p}}] + K_v[-N_{\dot{p}}(m - Y_{\dot{v}}) - Y_{\dot{p}}N_{\dot{v}}] - N_v[(m - Y_{\dot{v}})(K_{\dot{p}} - I_x) - Y_{\dot{p}}K_{\dot{v}}]$$

$$A_{32} = [-Y_p[N_{\dot{v}}(K_{\dot{p}} - I_x) - K_{\dot{v}}N_{\dot{p}}] - Y_{\dot{p}}[N_{\dot{p}}(m - Y_{\dot{v}}) + Y_{\dot{p}}N_{\dot{v}}]] - N_p[(m - Y_{\dot{v}})(K_{\dot{p}} - I_x) - Y_{\dot{p}}K_{\dot{v}}]$$

$$A_{33} = [-Y_r[N_{\dot{v}}(K_{\dot{p}} - I_x) - K_{\dot{v}}N_{\dot{p}}] + K_r[N_{\dot{p}}(m - Y_{\dot{v}}) + Y_{\dot{p}}N_{\dot{v}}]] - (N_p + N_r)[(m - Y_{\dot{v}})(K_{\dot{p}} - I_x) - Y_{\dot{p}}K_{\dot{v}}]$$

$$A_{34} = WGM[-N_{\dot{p}}(m - Y_{\dot{v}}) - Y_{\dot{p}}N_{\dot{v}}] - N_{\phi}[(m - Y_{\dot{v}})(K_{\dot{p}} - I_x) - Y_{\dot{p}}K_{\dot{v}}]$$

$$A_{35} = 0$$

$$A_{41} = 0, A_{42} = I, A_{43} = 0, A_{44} = 0, A_{45} = 0$$

$$A_{51} = 0, A_{52} = 0, A_{53} = I, A_{54} = 0, A_{55} = 0$$

$$B_1 = Y_\alpha (N_{\dot{v}}(K_{\dot{p}} - I_x) - K_{\dot{v}}N_{\dot{p}}) + K_\alpha [Y_{\dot{p}}(N_{\dot{r}} - I_z) - Y_{\dot{r}}N_{\dot{p}}] - N_\alpha [Y_{\dot{r}}(I_x - K_{\dot{p}}) + Y_{\dot{p}}K_{\dot{r}}]$$

$$B_2 = Y_\alpha (K_{\dot{v}}(N_{\dot{r}} - I_z) - K_{\dot{r}}N_{\dot{v}}) + K_\alpha [(m - Y_{\dot{v}})(N_{\dot{r}} - I_z) + Y_{\dot{r}}N_{\dot{v}}] - N_\alpha [-K_{\dot{r}}(m - Y_{\dot{v}}) - Y_{\dot{r}}K_{\dot{v}}]$$

$$B_3 = Y_\alpha [N_{\dot{v}}(K_{\dot{p}} - I_x) - K_{\dot{v}}N_{\dot{p}}] - K_\alpha [N_{\dot{p}}(m - Y_{\dot{v}}) + Y_{\dot{p}}N_{\dot{v}}] - N_\alpha [(m - Y_{\dot{v}})(K_{\dot{p}} - I_x) - Y_{\dot{p}}K_{\dot{v}}]$$

$$B_4 = 0, B_5 = 0$$

**Ek 7****Üç serbestlik dereceli PD kontrol Matlab programı**

```

t_f = 250; % simülasyon zamanı(s)
h = 0.1; % örnekleme zamanı (s)

Kp = 1.2; % Oransal kontrol kazancı
Kd = 31.8; % Türev kontrol kazancı
% Başlangıç değerleri
x = [12.7 0 0 0 0 0 0 0]';

N = round(t_f/h); % örnekleme sayısı
xout = zeros(N+1,length(x)+2);

for i=1:N+1,
    time = (i-1)*h;

    r = x(3);
    psi = x(6);

    % PD kontrol
    psi_ref = 1*(pi/180); % Basamak referans
    delta_c = Kp*(psi_ref-psi)-Kd*r; % PD-kontrolcü

    % gemi modeli
    [xdot,U] = Lkontainer01(x,delta_c);

    xout(i,:) = [time,x',U];

    x = euler2(xdot,x,h);
end
plot(t,psi),xlabel('Zaman (sn)'),title('Savrulma açısı \psi (der)')

```

**Ek 8**

### Lyapunov Teoremi ile Yalpa Hareketinin Kararlılığı

Sakin suda bir denge konumunda yüzmekte olan bir geminin dış etkiler sonucu yaptığı yalpa hareketi (4.11) eşitliği ile ifade edilmişti. Hareket söz konusu olduğu için,

$$(I_x + K_{\dot{p}}) \neq 0$$

kabul edilir. Denklemin her iki tarafı  $(I_x + K_{\dot{p}})$  ile bölüldüğünde ve  $\phi = x$  dönüşümü yapılırsa,

$$\ddot{x} + \frac{1}{(I_x + K_{\dot{p}})} D \dot{x} + \frac{1}{(I_x + K_{\dot{p}})} G x = 0$$

$$\ddot{x} + D_1 \dot{x} + G_1 x = 0$$

elde edilir. Bu ifade faz uzayında,

$$x = x_1, \quad \dot{x} = x_2$$

$$\dot{x}_2 = -D_1 x_2 + G_1 x_1$$

şeklinde gösterilir. Bu ifade durum uzayı formunda aşağıdaki gibidir.

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix}$$

Lyapunov fonksiyonunun türevi alındığında,

$$\frac{dV}{dt} = [(a_{11}x_1 + a_{12}x_2) \quad (a_{21}x_1 + a_{22}x_2)] \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix}$$

elde edilir.  $\dot{x}_1$  ve  $\dot{x}_2$  faz ifadeleri durum uzayı eşitliğinde yerine koyulur,

$$\frac{dV}{dt} = [(a_{11}x_1 + a_{12}x_2) \quad (a_{21}x_1 + a_{22}x_2)] \begin{bmatrix} x_2 \\ -D x_2 - G x_1 \end{bmatrix}$$

ve düzenlenirse,

$$\frac{dV}{dt} = \alpha_{11} x_1 x_2 + \alpha_{12} x_2^2 - \alpha_{21} G x_1^2 - D \alpha_{21} x_1 x_2 - G \alpha_{22} x_1 x_2 - D \alpha_{22} x_2^2$$

elde edilir.

$\frac{dV}{dt} < 0$  olmasını istiyoruz, bunun için belirsiz terimlerden kurtulalım. Bu nedenle

$\alpha_{21} = \alpha_{12} = 0$  kabul edilir,

$$\frac{dV}{dt} = \alpha_{11} x_1 x_2 - \alpha_{22} G x_1 x_2 - D \alpha_{22} x_2^2$$

ve  $\alpha_{11} = G \alpha_{22}$  seçilirse Lyapunov fonksiyonu,

$$V(\vec{x}) = \alpha_{22} G \frac{x_1^2}{2} + \alpha_{22} G \frac{x_2^2}{2}$$

bulunur. Burada  $\alpha_{22} = 2$  seçildiğinde Lyapunov fonksiyonun son hali aşağıdaki gibidir.

$$V(\vec{x}) = G(x_1^2 + x_2^2)$$

$$\dot{V} = \frac{dV}{dt} = -Gx_2^2$$

Böylece Teorem 1'den faydalanarak sistemimizin asimptotik kararlı olduğu söylenebilir.

### Üç serbestlik dereceli yalpa hareketi durum uzay matrislerinin bulunması

$$\ddot{x} = M_T^{-1}(-D\dot{x} - Gx + \tau\delta)$$

Kütle matrisinin inversi

$$\text{inv}M_T = \begin{bmatrix} (I_x - K_{\dot{p}})(N_{\dot{r}} - A_{46k} - I_z) + K_{\dot{r}}N_{\dot{p}} & Y_{\dot{p}}(N_{\dot{r}} - A_{46k} - I_z) - Y_{\dot{r}}N_{\dot{p}} \\ K_{\dot{v}}(N_{\dot{r}} - A_{46k} - I_z) - K_{\dot{r}}N_{\dot{v}} & (m - Y_{\dot{v}} - A_{42k})(N_{\dot{r}} - A_{46k} - I_z) + Y_{\dot{r}}N_{\dot{v}} \\ N_{\dot{v}}(K_{\dot{p}} - A_{44k} - I_x) - K_{\dot{v}}N_{\dot{p}} & -N_{\dot{p}}(m - Y_{\dot{v}} - A_{42k}) - Y_{\dot{p}}N_{\dot{v}} \\ & -Y_{\dot{r}}(I_x - K_{\dot{p}} + A_{44k}) - Y_{\dot{p}}K_{\dot{r}} \\ & -K_{\dot{r}}(m - Y_{\dot{v}} - A_{42k}) - Y_{\dot{r}}K_{\dot{v}} \\ & (m - Y_{\dot{v}} - A_{42k})(K_{\dot{p}} - A_{44k} - I_x) - Y_{\dot{p}}K_{\dot{v}} \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned} \det|M_T| &= Y_{\dot{v}}A_{44k}I_z - Y_{\dot{v}}K_{\dot{p}}A_{46k} + Y_{\dot{v}}K_{\dot{p}}N_{\dot{r}} - Y_{\dot{v}}K_{\dot{p}}I_z + Y_{\dot{v}}I_xA_{46k} - Y_{\dot{v}}I_xN_{\dot{r}} + Y_{\dot{v}}I_xI_z + mK_{\dot{r}}N_{\dot{p}} \\ &- m A_{44k}A_{46k} + m A_{44k}N_{\dot{r}} - m A_{44k}I_z + m K_{\dot{p}}A_{46k} - m K_{\dot{p}}N_{\dot{r}} + m K_{\dot{p}}I_z - m A_{46k}I_x + m I_xN_{\dot{r}} \\ &N_{\dot{v}}Y_{\dot{p}}K_{\dot{r}} + K_{\dot{v}}Y_{\dot{r}}N_{\dot{p}} + K_{\dot{v}}Y_{\dot{p}}A_{46k} - K_{\dot{v}}N_{\dot{r}}Y_{\dot{p}} + K_{\dot{v}}Y_{\dot{p}}I_z + A_{42k}K_{\dot{r}}N_{\dot{p}} - A_{42k}A_{44k}A_{46k} \\ &+ A_{42k}A_{44k}N_{\dot{r}} - A_{42k}A_{44k}I_z + A_{42k}A_{46k}K_{\dot{p}} - A_{42k}K_{\dot{p}}N_{\dot{r}} + A_{42k}K_{\dot{p}}I_z - A_{42k}I_xA_{46k} + A_{42k}I_xN_{\dot{r}} \\ &- A_{42k}I_xI_z - Y_{\dot{v}}K_{\dot{r}}N_{\dot{p}} + Y_{\dot{v}}A_{44k}A_{46k} - Y_{\dot{v}}A_{44k}N_{\dot{r}} - mI_xI_z + N_{\dot{v}}Y_{\dot{r}}A_{44k} - N_{\dot{v}}Y_{\dot{r}}K_{\dot{p}} + N_{\dot{v}}Y_{\dot{r}}I_x \end{aligned}$$

şeklinde bulunur. Sönüm kuvvet ve moment matrisleri,

$$D_T = \begin{bmatrix} -Y_v + D_{42k} & -Y_p & -Y_r \\ -K_v & -K_p + D_{44k} & -K_r \\ -N_v & -N_p & -N_r + D_{46k} \end{bmatrix}$$

ve doğrultucu kuvvet ve moment matrisleri,

$$G = \begin{bmatrix} 0 & -Y_\phi & 0 \\ 0 & WGM & 0 \\ 0 & -N_\phi & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ \phi \\ \psi \end{bmatrix}$$

elde edilir. Üç serbestlik dereceli bu eşitliğin durum uzayı formunda aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$\dot{x} = Ax + Bu$$

$$x^T = [v \quad p \quad r \quad \phi \quad \psi]$$

$$A = \frac{I}{\det M} \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{13} & A_{14} & A_{15} \\ A_{21} & A_{22} & A_{23} & A_{24} & A_{25} \\ A_{31} & A_{32} & A_{33} & A_{34} & A_{35} \\ A_{41} & A_{42} & A_{43} & A_{44} & A_{45} \\ A_{51} & A_{52} & A_{53} & A_{54} & A_{55} \end{bmatrix}, \quad B = \frac{I}{\det M} \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ B_3 \\ B_4 \\ B_5 \end{bmatrix}$$

$$A_{11} = \left[ \left[ N_{\dot{v}} (K_{\dot{p}} - A_{44k} - I_x) - K_{\dot{v}} N_{\dot{p}} \right] (-Y_v + D_{42k}) + (K_v) \left[ Y_{\dot{p}} (N_{\dot{r}} - A_{46k} - I_z) - Y_{\dot{r}} N_{\dot{p}} \right] \right] \\ - N_v \left[ -Y_{\dot{r}} (I_x - K_{\dot{p}} + A_{44k}) - Y_{\dot{p}} K_{\dot{r}} \right]$$

$$A_{12} = \left[ \left[ (I_x - K_{\dot{p}}) (N_{\dot{r}} - A_{46k} - I_z) + K_{\dot{r}} N_{\dot{p}} \right] (-Y_p) + Y_{\dot{p}} (K_p + D_{44k}) (N_{\dot{r}} - A_{46k} - I_z) \right] \\ \left[ (K_p + D_{44k}) (-Y_{\dot{r}} N_{\dot{p}}) \right] - (N_p) \left[ -Y_{\dot{r}} (I_x - K_{\dot{p}} + A_{44k}) - Y_{\dot{p}} K_{\dot{r}} \right]$$

$$A_{13} = \left[ \left[ (I_x - K_{\dot{p}}) (N_{\dot{r}} - A_{46k} - I_z) + K_{\dot{r}} N_{\dot{p}} \right] (-Y_r) - K_r \left[ Y_{\dot{p}} (N_{\dot{r}} - A_{46k} - I_z) - Y_{\dot{r}} N_{\dot{p}} \right] \right] \\ (-N_p - N_r + D_{46k}) \left[ -Y_{\dot{r}} (I_x - K_{\dot{p}} + A_{44k}) - Y_{\dot{p}} K_{\dot{r}} \right]$$

$$A_{14} = WGM \left[ Y_{\dot{p}} (N_{\dot{r}} - A_{46k} - I_z) - Y_{\dot{r}} N_{\dot{p}} \right] - N_{\phi} \left[ -Y_{\dot{r}} (I_x - K_{\dot{p}} + A_{44k}) - Y_{\dot{p}} K_{\dot{r}} \right]$$

$$A_{15} = 0$$

$$A_{21} = \left[ \left[ K_{\dot{v}} (N_{\dot{r}} - A_{46k} - I_z) - K_{\dot{r}} N_{\dot{v}} \right] (-Y_v + D_{42k}) + (K_v) \left[ (m - Y_{\dot{v}} - A_{42k}) (N_{\dot{r}} - A_{46k} - I_z) + Y_{\dot{r}} N_{\dot{v}} \right] \right] \\ - N_v \left[ -K_{\dot{r}} (m - Y_{\dot{v}} - A_{42k}) - Y_{\dot{r}} K_{\dot{v}} \right]$$

$$A_{22} = \left[ \left[ K_{\dot{v}} (N_{\dot{r}} - A_{46k} - I_z) - K_{\dot{r}} N_{\dot{v}} \right] (-Y_p) + Y_{\dot{p}} \left[ (m - Y_{\dot{v}} - A_{42k}) (N_{\dot{r}} - A_{46k} - I_z) + Y_{\dot{r}} N_{\dot{v}} \right] \right] \\ - (N_p) \left[ -K_{\dot{r}} (m - Y_{\dot{v}} - A_{42k}) - Y_{\dot{r}} K_{\dot{v}} \right]$$

$$A_{23} = \left[ \left[ K_{\dot{v}} (N_{\dot{r}} - A_{46k} - I_z) - K_{\dot{r}} N_{\dot{v}} \right] (-Y_r) - K_r \left[ (m - Y_{\dot{v}} - A_{42k}) (N_{\dot{r}} - A_{46k} - I_z) + Y_{\dot{r}} N_{\dot{v}} \right] \right] \\ (-N_p - N_r + D_{46k}) \left[ -K_{\dot{r}} (m - Y_{\dot{v}} - A_{42k}) - Y_{\dot{r}} K_{\dot{v}} \right]$$

$$A_{24} = WGM \left[ (m - Y_{\dot{v}} - A_{42k}) (N_{\dot{r}} - A_{46k} - I_z) + Y_{\dot{r}} N_{\dot{v}} \right] - N_{\phi} \left[ -K_{\dot{r}} (m - Y_{\dot{v}} - A_{42k}) - Y_{\dot{r}} K_{\dot{v}} \right]$$

$$A_{25} = 0$$

$$A_{31} = \left[ \left[ N_{\dot{v}} (K_{\dot{p}} - A_{44k} - I_x) - K_{\dot{v}} N_{\dot{p}} \right] (-Y_v + D_{42k}) + (K_v) \left[ -N_{\dot{p}} (m - Y_{\dot{v}} - A_{42k}) - Y_{\dot{p}} N_{\dot{v}} \right] \right] \\ - N_v \left[ (m - Y_{\dot{v}} - A_{42k}) (K_{\dot{p}} - A_{44k} - I_x) - Y_{\dot{p}} K_{\dot{v}} \right]$$

$$A_{32} = \left[ \left[ N_{\dot{v}} (K_{\dot{p}} - A_{44k} - I_x) - K_{\dot{v}} N_{\dot{p}} \right] (-Y_p) + Y_{\dot{p}} \left[ -N_{\dot{p}} (m - Y_{\dot{v}} - A_{42k}) - Y_{\dot{p}} N_{\dot{v}} \right] \right] \\ - (N_p) \left[ (m - Y_{\dot{v}} - A_{42k}) (K_{\dot{p}} - A_{44k} - I_x) - Y_{\dot{p}} K_{\dot{v}} \right]$$

$$A_{33} = \left[ \left[ N_{\dot{v}} (K_{\dot{p}} - A_{44k} - I_x) - K_{\dot{v}} N_{\dot{p}} \right] (-Y_r) - K_r \left[ -N_{\dot{p}} (m - Y_{\dot{v}} - A_{42k}) - Y_{\dot{p}} N_{\dot{v}} \right] \right] \\ \left( -N_p - N_r + D_{46k} \right) \left[ (m - Y_{\dot{v}} - A_{42k}) (K_{\dot{p}} - A_{44k} - I_x) - Y_{\dot{p}} K_{\dot{v}} \right]$$

$$A_{34} = WGM \left[ -N_{\dot{p}} (m - Y_{\dot{v}} - A_{42k}) - Y_{\dot{p}} N_{\dot{v}} \right] - N_{\phi} \left[ (m - Y_{\dot{v}} - A_{42k}) (K_{\dot{p}} - A_{44k} - I_x) - Y_{\dot{p}} K_{\dot{v}} \right]$$

$$A_{35} = 0$$

$$A_{41} = 0, A_{42} = I, A_{43} = 0, A_{44} = 0, A_{45} = 0$$

$$A_{51} = 0, A_{52} = 0, A_{53} = I, A_{54} = 0, A_{55} = 0$$

$$B_1 = Y_{\alpha} \left( N_{\dot{v}} (K_{\dot{p}} - A_{44k} - I_x) - K_{\dot{v}} N_{\dot{p}} \right) + K_{\alpha} \left[ Y_{\dot{p}} (N_{\dot{r}} - A_{46k} - I_z) - Y_{\dot{r}} N_{\dot{p}} \right] \\ - N_{\alpha} \left[ Y_{\dot{r}} (I_x - K_{\dot{p}} + A_{44k}) + Y_{\dot{p}} K_{\dot{r}} \right]$$

$$B_2 = Y_{\alpha} \left( K_{\dot{v}} (N_{\dot{r}} - A_{46k} - I_z) - K_{\dot{r}} N_{\dot{v}} \right) + K_{\alpha} \left[ (m - Y_{\dot{v}} - A_{42k}) (N_{\dot{r}} - A_{46k} - I_z) + Y_{\dot{r}} N_{\dot{v}} \right] \\ - N_{\alpha} \left[ -K_{\dot{r}} (m - Y_{\dot{v}} - A_{42k}) - Y_{\dot{r}} K_{\dot{v}} \right]$$

$$B_3 = Y_{\alpha} \left[ N_{\dot{v}} (K_{\dot{p}} - A_{44k} - I_x) - K_{\dot{v}} N_{\dot{p}} \right] + K_{\alpha} \left[ -N_{\dot{p}} (m - Y_{\dot{v}} - A_{42k}) - Y_{\dot{p}} N_{\dot{v}} \right] \\ - N_{\alpha} \left[ (m - Y_{\dot{v}} - A_{42k}) (K_{\dot{p}} - A_{44k} - I_x) - Y_{\dot{p}} K_{\dot{v}} \right]$$

$$B_4 = 0, B_5 = 0$$

**Ek 10**

### Yalpa açısı yalpa dengeleme sistemi transfer fonksiyonu

Yalpa hareketi ve savrulma hareketinin frekans düzlemindeki ifadesi aşağıdaki gibidir.

$$[(I_x - K_p)s^2 - K_r s + WGM]\phi(s) = (K_r s + K_f s^2)\psi(s) + (K_\alpha)\alpha(s)$$

$$[(I_z - N_f)s^2 - N_r s]\psi(s) = (N_\phi + N_p s + N_{\dot{p}} s^2)\phi(s) + (N_v + N_{\dot{v}} s)V(s) + (N_\alpha)\alpha(s)$$

Her bir değişkenin yanındaki ifade sabitlere bağlı olarak,

$$a_1 = [(I_x - K_p)s^2 - K_r s + WGM], \quad a_2 = (K_r s + K_f s^2), \quad a_3 = K_\alpha$$

$$b_1 = [(I_z - N_f)s^2 - N_r s], \quad b_2 = (N_\phi + N_p s + N_{\dot{p}} s^2), \quad b_3 = N_\alpha$$

gösterilirse

$$a_1 \phi(s) = a_2 \psi(s) + a_3 \alpha(s)$$

$$b_1 \psi(s) = b_2 \phi(s) + b_3 \alpha(s)$$

yalpa açısı ile yalpa dengeleme sistemi arasındaki ilişki elde edilir.

$$\frac{\phi(s)}{\alpha(s)} = \frac{[(I_z - N_f)s^2 - N_r s]K_\alpha + (K_r s^2 + K_f s)N_\alpha}{[(I_x - K_p)s^2 + WGM - K_p s][(I_z - N_f)s^2 - N_r s] - (K_r s^2 + K_f s)(N_{\dot{p}} s^2 + N_p s + N_\phi)}$$

**Hız dönüşümleri**

Çizelge Hız dönüşümleri

	knots	m/s
Knots	1.0	0.5145
m/s	1.9438	1.0

**Ek 12****Normalleştirme değişkenleri**

Çizelge Normalleştirme değişkenleri

Birim	Birincil sistem
Kütle	$\frac{\rho}{2} L^3$
Atalet momenti	$\frac{\rho}{2} L^5$
Kuvvet	$\frac{\rho}{2} U^2 L^2$
Moment	$\frac{\rho}{2} U^2 L^3$
Zaman	$\frac{L}{U}$
Referans Alan	$L^2$
Uzunluk	$L$
Açı	1
Lineer hız	$U$
Açısal hız	$\frac{U}{L}$
Lineer ivmelenme	$\frac{U^2}{L}$
Açısal ivmelenme	$\frac{U^2}{L^2}$

**ÖZGEÇMİŞ**

Doğum tarihi 08.08.1974

Doğum yeri İstanbul

Lise 1989–1991 İstanbul Denizcilik ve Meslek Lisesi

Lisans 1992–1996 Yıldız Üniversitesi Mühendislik Fak.  
Makine Mühendisliği Bölümü

Yüksek Lisans 1997–1999 Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü  
Makine Müh. Anabilim Dalı, Konstrüksiyon Prog.

Doktora 1999–2005 Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü  
Makine Müh. Anabilim Dalı, Konstrüksiyon Prog

**Çalıştığı kurum**

1998-Devam ediyor YTÜ Gemi İnşaatı Bölümü Araştırma Görevlisi