T.C
DİCLE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

PI-PD DENETLEYİCİ İLE İKİZ ROTOR DENETİMİ

Cuma Anıl TAKEŞ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DİYARBAKIR
Temmuz-2019

T.C.

DİCLE ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ MÜDÜRLÜĞÜ

DİYARBAKIR

Cuma Anıl TAKEŞ tarafından yapılan "PI-PD Denetleyici ile İkiz Rotor Denetimi" konulu bu çalışma, jürimiz tarafından Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Başkan : Prof. Dr. Ali KIRÇAY

Üye : Prof. Dr. İbrahim KAYA

Üye : Dr. Öğrt. Üyesi M. Ali ARSERİM

Tez Savunma Sınavı Tarihi: 18/07/2019

Yukarıdaki bilgilerin doğruluğunu onaylarım.

.../...../.....

Prof. Dr. Sevtap SÜMER EKER

Enstitü Müdürü

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasının her aşamasında her türlü yardımını, bilimsel birikimlerini ve tecrübelerini paylaşan çok kıymetli hocam Prof. Dr. İbrahim KAYA'ya teşekkür ederim.

Tez çalışması süresince gerekli teknik desteğini esirgemeyen Dicle Üniversitesi Doktora Öğrencisi Fadi ALYOUSSEF'a ve Araştırma Görevlisi Fuat PEKER'e teşekkür ederim. Ayrıca, tez çalışması boyunca manevi desteğini eksik etmeyen annem Zehra TAKEŞ'e ve eşim Berfin TAKEŞ'e teşekkür ederim.

Bu tez çalışması, Dicle Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (DÜBAP) Koordinatörlüğü tarafından MÜHENDİSLİK.18.004 proje numarası ile desteklenmiştir.

İÇİNDEKİLER

		Sayfa
TEŞEKKÜR……		I
İÇİNDEKİLER…….....		II
ÖZET…….....		IV
ABSTRACT…….....		V
ÇİZELGE LİSTESİ……		VI
ŞEKİL LİSTESİ…….....		VII
KISALTMA VE SİMGELER……		X
1.	**GİRİŞ**…….....	1
1.1.	Genel Bilgi……...	1
1.2.	Tezin Amacı…….	5
1.3.	Tezin Yapısı…….	6
2.	**KAYNAK ÖZETLERİ**……..	7
3.	**MATERYAL VE METOT**……	13
3.1.	İkiz Rotor ÇGÇÇ Sistem……..	13
3.1.1.	TRMS Setinin Tanıtımı…..……...……...	13
3.2.	Sistemin Modellenmesi…….....	15
3.2.1	Matlab Sistem Tanımlama Aracı ile TRMS'nin Modellenmesi……..	15
3.3.	Optimizasyon……...……	29
3.3.1.	Parçacık Sürü Optimizasyonu.……	31
3.3.2.	İlk Parçacık Popülasyon Oluşturma…..…….....	33
3.3.3.	Bireysel ve Global En İyi Pozisyonlar ……	34
3.3.4.	Parçacıkların Hızları…….	36
3.3.5.	Parçacıkların Konumlarını Güncelleme……...	37
3.3.6.	Sonlandırma (Fesih) Kriteri…….	37
3.3.7.	Kullanıcı Tanımlı PSO Parametreleri……...……...	37
3.4.	Denetleyici Tasarımı……	38
3.4.1.	PID Denetleyici……	38

3.4.2. PI-PD Denetleyici…… 41
3.4.3. İntegral Performans İndeksi…… 43
3.4.4. PI-PD ve PID Denetleyici Ayar Parametrelerinin Hesaplanması…… 44
4. BULGULAR VE TARTIŞMA…….. 49
5. SONUÇ VE ÖNERİLER……..... 61
6. KAYNAKLAR……..... 63
ÖZGEÇMİŞ……... 67

ÖZET

PI-PD Denetleyici ile İkiz Rotor Denetimi

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Cuma Anıl TAKEŞ

DİCLE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

2019

İkiz Rotor Çok-Girişli Çok-Çıkışlı (ÇGÇÇ) Sistem (Twin Rotor Multi-Input Multi-Output System, TRMS), hava araçları ve kontrol alanında kullanılan temel sistemler arasında yer almaktadır. TRMS literatürde çok-girişli çok-çıkışlı sistemler içerisinde en yaygın kullanılan örneklerden bir tanesidir.

Bu çalışmada, helikopter sistemlerinin ve son zamanlarda üzerinde oldukça sık çalışılan drone sistemlerinin temeli olan TRMS'nin denetimi üzerinde çalışılmıştır. Öncelikle, Matlab/Simulink aracılığıyla TRMS'nin ana rotor, kuyruk rotor, çapraz kuyruk ve çapraz ana rotor transfer fonksiyon modelleri elde edilmiştir. Sonrasında parçacık sürü optimizasyonu (PSO) ile PI-PD ve PID denetleyiciler tasarlanarak TRMS'nin denetimi gerçekleştirilmiştir. Literatürde TRMS'nin denetimi çoğunlukla PID denetleyiciler kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Ancak PID denetleyiciler, genellikle, açık çevrim kararlı sistemler hariç yetersiz performans gösterebilmektedir. PI-PD denetleyicilerin ise, PID denetleyicilerin yetersiz kaldığı durumlarda, daha iyi bir performans gösterebildiği literatürde gösterilmiştir. Dolayısıyla, bu tez çalışmasında açık çevrim kararsız bir sistem olan TRMS'nin PI-PD denetleyici ile daha iyi kontrol edilebileceğinden hareketle PI-PD denetleyiciler ile TRMS'nin denetimi üzerinde durulmuştur.

PID ve PI-PD denetleyici kontrolü altında, basamak, sinüs, kare ve testere dişi gibi farklı referans girişleri takipteki kapalı çevrim performanslar karşılaştırılmıştır. Hem benzetimsel hem de gerçek zamanlı ortamda PI-PD ve PID denetleyiciler ile denetimi gerçekleştirilen TRMS'nin PI-PD denetleyiciler ile daha iyi kapalı çevrim performans sağladığı gösterilmiştir.

Anahtar Kelimeler: İkiz Rotor Çok-Girişli Çok-Çıkışlı Sistem, PID, PI-PD, Parçacık Sürü Optimizasyonu, Kararsız Sistemler, Sistem Modelleme ve Tanımlama.

ABSTRACT

TWIN ROTOR CONTROL WITH PI-PD CONTROLLER

MsC THESIS

Cuma Anıl TAKEŞ

DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERING
INSTITUTE OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES
UNIVERSITY OF DICLE

2019

Twin rotor MIMO system (TRMS) is one of the basic systems used in air vehicles and control. TRMS is one of the most common examples of multi-input multi-output systems in the literature.

In this thesis, the control of TRMS, which is the basis of helicopter systems and the drone systems, which have recently being worked thoroughly, has been studied. First, transfer functions of pitch rotor, yaw rotor, cross pitch and cross yaw transfer functions of the real TRMS system have been obtained. Then, Particle Swarm Optimisation (PSO) has been used to find optimum tuning parameters of PI-PD and PID controllers. In the literature, generally, PID controllers are used to control the TRMS. However, PID controllers may perform poorly except for open loop stable systems. On the other hand, PI-PD controllers have shown to perform much better in cases where PID controllers fail. Therefore, in this study, the control of TRMS, which is an open loop unstable system, with PI-PD controllers has been studied.

A step input, sinusoidal input, square input and saw-tooth input were used as the reference in order to compare closed loop performances obtained from PID and PI-PD controllers. It has been shown by both simulation and real time studies that PI-PD controllers can result in better closed loop responses in controlling the TRMS than PID controllers.

Keywords: Twin Rotor MIMO System, PID, PI-PD, TRMS, Particle Swarm Optimization, Unstable Systems, System Modelling and Identification.

ÇİZELGE LİSTESİ

Çizelge No		Sayfa
Çizelge 3.1.	Modelleme performans değerleri	29
Çizelge 3.2.	Parçacık Sürü Optimizasyonu Özellikleri (Haddad, Solgi ve Loáiciga 2017).	32
Çizelge 3.3.	PI-PD denetleyici ayar parametreleri	46
Çizelge 3.4.	PID denetleyici ayar parametreleri	47

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil No		Sayfa
Şekil 1.1.	Bytronic firması tarafından üretilen TRMS mekanik ünitesi	2
Şekil 1.2.	Quanser firması tarafından üretilen 3 serbestlik dereceli helikopter mekanik ünitesi	2
Şekil 1.3.	Quanser firması tarafından üretilen TRMS mekanik ünitesi	3
Şekil 1.4.	İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü'nde geliştirilen TRMS mekanik ünitesi	3
Şekil 1.5.	Feedback Inc. firması tarafından üretilen TRMS mekanik ünitesi	4
Şekil 3.1.	TRMS kontrol şeması	15
Şekil 3.2.	TRMS Simulink Models Programı ara yüzü	17
Şekil 3.3.	TRMS Simulink gerçek zaman model programı ara yüzü	17
Şekil 3.4.	TRMS Simulink gerçek zaman MainYaw_Ident blok diyagramı	18
Şekil 3.5.	TRMS Simulink gerçek zaman MainYaw_Ident tools sekmesi	18
Şekil 3.6.	Matlab komut penceresi	19
Şekil 3.7.	MainYaw_Ident ara yüzü	19
Şekil 3.8.	Ana rotor ve kuyruk rotor çıkış sinyalleri	20
Şekil 3.9.	System Identification Toolbox ara yüzü	21
Şekil 3.10.	System Identification Toolbox Transfer Function Models ara yüzü	22
Şekil 3.11.	System Identification Toolbox Transfer Function Models kutuplar ve sıfırlar ara yüzü	23
Şekil 3.12.	System Identification Toolbox Transfer Function Models Data/Model Info ara yüzü	23
Şekil 3.13.	TRMS kuyruk rotor için model transfer fonksiyonu ve gerçek sistem çıkış sinyallerinin karşılaştırılması	24
Şekil 3.14.	TRMS Ana rotor için model transfer fonksiyonu ve gerçek sistem çıkış sinyallerinin karşılaştırılması	24
Şekil 3.15.	TRMS Çapraz ana rotor için model transfer fonksiyonu ve gerçek sistem çıkış sinyallerinin karşılaştırılması	25
Şekil 3.16.	TRMS Çapraz kuyruk rotor için model transfer fonksiyonu ve gerçek sistem çıkış sinyallerinin karşılaştırılması	25
Şekil 3.17.	TRMS blok diyagramı	26

Şekil 3.18. Ana rotor model çıkıs sinyalinin benzetim ve gerçek zaman ortamında karşılaştırılması 26

Şekil 3.19. Kuyruk rotor model sinyalinin benzetim ve gerçek zaman ortamında karşılaştırılması 27

Şekil 3.20. Çapraz-kuyruk rotor model sinyalinin benzetim ve gerçek zaman ortamında karşılaştırılması 27

Şekil 3.21. Çapraz-ana rotor model sinyalinin benzetim ve gerçek zaman ortamında karşılaştırılması 27

Şekil 3.22. Ana rotor modelleme hata sinyali 28

Şekil 3.23. Kuyruk rotor modelleme hata sinyali 28

Şekil 3.24. Çapraz-kuyruk rotor modelleme hata sinyali 28

Şekil 3.25. Çapraz-ana rotor modelleme hata sinyali 29

Şekil 3.26. PSO Akış Şeması 33

Şekil 3.27. İki boyutlu bir optimizasyon probleminde en iyi bireysel pozisyon kavramları 35

Şekil 3.28. Bir maksimizasyon probleminde global en iyi pozisyon kavramı 35

Şekil 3.29. PID denetleyici ile yapılan bir kapalı çevrim kontrol sistemi 39

Şekil 3.30. $K_i = 0$ ve $K_d = 0$ için farklı K_p değerlerinde kapalı çevrim sistem çıkışları 40

Şekil 3.31. $K_p = 1$ ve $K_d = 0$ için farklı K_i değerlerinde kapalı çevrim sistem çıkışları 40

Şekil 3.32. $K_p = 15$ ve $K_i = 10$ için farklı K_d değerlerinde kapalı çevrim sistem çıkışları 41

Şekil 3.33. PI-PD denetleyici yapısı 42

Şekil 3.34. PSO ile TRMS'ye ait Denetleyici Tasarımı Matlab/Simulink Devresi 45

Şekil 3.35. PI-PD Uygunluk Fonksiyonu Değerleri 45

Şekil 3.36. PID Uygunluk Fonksiyonu Değerleri 47

Şekil 4.1. TRMS'ye ait basamak giriş için dikey ve yatay eksen rotor çıkışlarının benzetim ortamı uygulama sonuçları 49

Şekil 4.2. TRMS'ye ait basamak giriş için dikey ve yatay eksen rotor çıkışlarının gerçek zamanlı uygulama sonuçları 50

Şekil 4.3. TRMS'nin basamak giriş için gerçek zamanlı ana ve kuyruk denetim kontrol sinyalleri 51

Şekil 4.4. TRMS'ye ait genliği 0.4 radyan ve frekansı 0.01 Hertz olan sinüs referans giriş için dikey ve yatay eksen rotor çıkışlarının benzetim ortamı uygulama sonuçları 52

Şekil 4.5. TRMS'ye ait genliği 0.4 radyan ve frekansı 0.01 Hertz olan sinüs referans giriş için dikey ve yatay eksen rotor çıkışlarının gerçek zamanlı uygulama sonuçları 52

Şekil 4.6. TRMS'nin genliği 0.4 radyan ve frekansı 0.01 Hertz olan sinüs giriş için gerçek zamanlı kontrol sinyalleri 53

Şekil 4.7. TRMS'ye ait genliği 0.4 radyan ve frekansı 0.02 Hertz olan sinüs referans giriş için dikey ve yatay eksen rotor çıkışlarının gerçek zamanlı uygulama sonuçları 54

Şekil 4.8. TRMS'ye ait genliği 0.4 radyan ve frekansı 0.02 Hertz olan sinüs referans giriş için dikey ve yatay eksen rotor çıkışlarının gerçek zamanlı uygulama sonuçları 54

Şekil 4.9. TRMS'nin genliği 0.4 radyan ve frekansı 0.02 Hertz olan sinüs giriş için gerçek zamanlı kontrol sinyalleri 55

Şekil 4.10. TRMS'ye ait kare dalga giriş için dikey ve yatay eksen rotor çıkışlarının benzetim ortamı uygulama sonuçları 56

Şekil 4.11. TRMS'ye ait kare dalga giriş için dikey ve yatay eksen rotor çıkışlarının gerçek zamanlı uygulama sonuçları 56

Şekil 4.12. TRMS'nin kare dalga giriş için gerçek zamanlı kontrol sinyalleri 57

Şekil 4.13. TRMS'ye ait üçgen giriş için dikey ve yatay eksen rotor çıkışlarının benzetim ortamı uygulama sonuçları 58

Şekil 4.14. TRMS'ye ait üçgen dalga giriş için dikey ve yatay eksen rotor çıkışlarının gerçek zamanlı uygulama sonuçları 58

Şekil 4.15. TRMS'nin üçgen dalga giriş için gerçek zaman ortamı kontrol sinyalleri 59

KISALTMA VE SİMGELER

PID : Proportional Integral Derivative

PI-PD : Proportional Integral-Proportional-Derivative

MIMO : Multi-input multi-output

TRMS : Twin Rotor MIMO Sistem

ÇGÇÇ :Çok Girişli Çok Çıkışlı

PSO : Parçacık Sürü Optimizasyonu

ISE : Integral of Squared Error

ISTE : Integral of Squared Time Error

IST^2E : Integral of Squared $Time^2$ Error

IST^3E : Integral of Squared $Time^3$ Error

IAE : Integral of Absolute Error

ITAE : Integral of Time Absolute Error

TV :Integral Total Variation

Pbest : Bireysel En İyi Konum

Gbest : Global En İyi Konum

$v_{j,i}^{(yeni)}$: i.ninci boyuttaki j.ninci parçacığın yeni hızı

$v_{j,i}$: i.ninci boyuttaki j.ninci parçacığın önceki hızı

C_1 : Kavramsal Parametre

C_2 : Sosyal Parametre

$V_i^{(L)}$: i.ninci boyut boyunca hızın alt sınırı

$V_i^{(U)}$: i.ninci boyut boyunca hızın üst sınırı

ω : Atalet ağırlık parametresi

ω_0 : Başlangıç Atalet Ağırlığı

ω_t : Son yineleme için atalet ağırlığı

T : Toplam yineleme sayısı

$X_j^{(yeni)}$: j.ninci yeni çözümü

$x'_{j,i}$: j.ninci yeni çözümünün i.ninci karar değişkeninin yeni değerleri

u : Kontrol edilen sürecin girişi

y : Kontrol edilen sürecin çıkışı

r : referans girişi

e : Takip hatası

d : Bozucu sinyal

n : Ölçüm gürültüsü

K_p : Oransal Kazanç

K_i : İntegral Kazancı

K_d Türev Kazancı

T_i : İntegral Zaman Sabiti

T_d : Türev Zaman Sabiti

J_0 : Hatanın Karesinin İntegrali Kriterine Ait Performans İndeksi

J_1 : Zamanla Hatanın Karelerinin İntegrali Kriterine Ait Performans İndeksi

J_2 : Zamanın Karesiyle Hatanın Karelerinin İntegrali Kriterine Ait Performans İndeksi

J_3 : Zamanın Küpüyle Hatanın Karelerinin İntegrali Kriterine Ait Performans İndeksi

1. GİRİŞ

1.1. Genel Bilgi

Bu tez çalışmasında helikopter sistemleri ve son zamanlarda üzerinde oldukça sık çalışılan drone sisteminin temeli olan İkiz Rotor Çok-Girişli Çok-Çıkışlı (ÇGÇÇ) Sistem (Twin Rotor Multi-Input Multi-Output System, TRMS)'nin kontrolü üzerinde çalışılmıştır. TRMS kontrol alanında kullanılan temel sistemler arasında yer almaktadır. Günlük hayatta sağlık, askeri, ulaşım, yangına müdahale amacıyla kullanılan helikopterlerin bu amaçlarla kullanılırken bir yerden başka bir yere ulaşması anında havada belli bir irtifada iken ve kalkış ve iniş anında içerisinde bulunan bireylerin ve taşınan önemli ekipmanların zarar görmemesi için çok iyi kontrol edilmesi ve istenilen manevralara hızlı cevap vermesi gerekmektedir. Sistem cevabındaki aksaklıklar ve denetçinin istenilen şekilde çalışmaması hava aracının kaza yapmasına ve böylece can ve mal kayıplarına sebebiyet verebilir. Dolayısıyla TRMS'nin uygun bir şekilde kontrol edilmesi, kontrol mühendisliği alanında önemli bir çalışma alanı oluşturmaktadır.

Literatürde farklı firmaların ürettiği TRMS deney setleri bulunmaktadır. İngiliz firmaları olan Feedback Inc., Bytronic Educational Technology ve Kanada firması olan Quanser, helikopter mantığının basitleştirilmiş formu olan TRMS üreten firmalar arasındadır.

Literatürde bulunan farklı firmalar tarafından üretilen TRMS deney setleri Şekil 1.1., Şekil 1.2., Şekil 1.3., ve Şekil 1.4.'te verilmiştir. Bu deney setlerinin yapıları genelde birbirine benzer olsa da her birinin kendine has karakteristik fiziksel özellikleri bulunmaktadır. Şekillerden görüleceği gibi her bir TRMS'de iki adet rotor bulunmakla birlikte farklı karşı denge ağırlıklarına sahip oldukları görülmektedir. Bytronic firması tarafından üretilen sette iki adet karşı ağırlık mevcut iken Feedback Inc. tarafından üretilen TRMS'de bir adet karşı ağırlık bulunmaktadır. Quanser firmasının ürettiği 3 serbestlik dereceli helikopter deney setinde ise karşı denge ağırlığı rotorların karşı tarafına yerleştirilmiştir. Şekil 1.4.'te verilen ve Quanser firması tarafından üretilen TRMS deney setinde ise karşı ağırlık bulunmamaktadır.

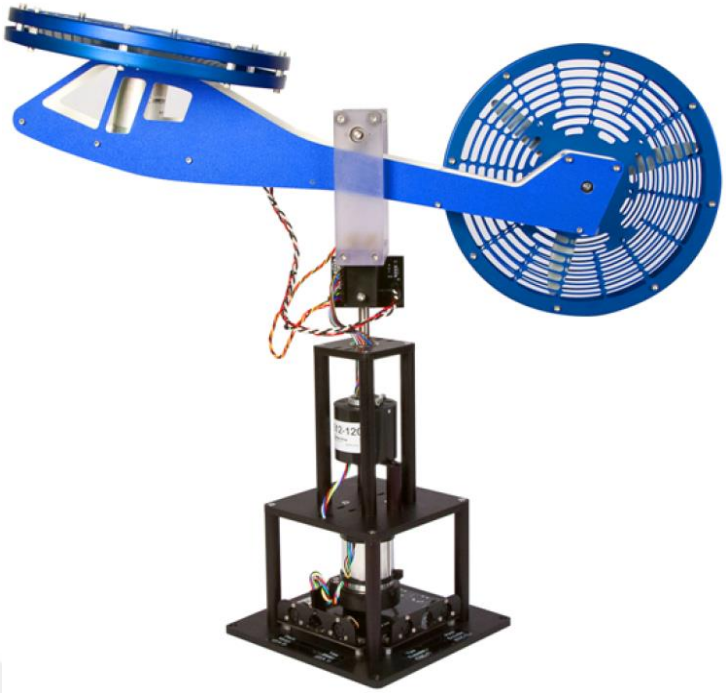
Ayrıca, farklı üniversitelerde araştırma grupları tarafından geliştirilen TRMS sistemleri de mevcuttur. Örneğin, İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü'nde geliştirilen TRMS sistemi Şekil 1.5.'te gösterilmiştir.



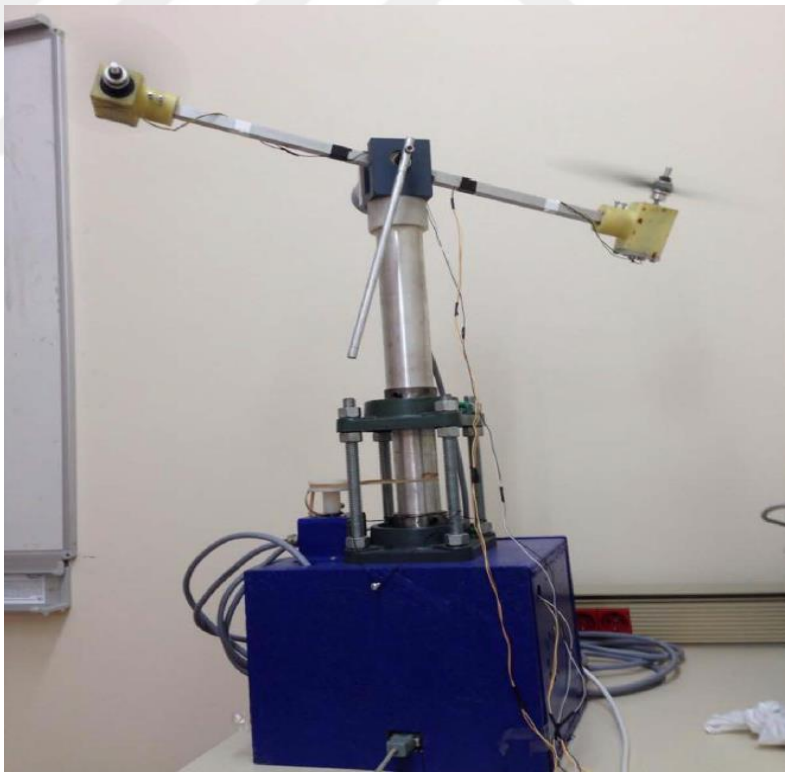
Şekil 1.1. Bytronic firması tarafından üretilen TRMS mekanik ünitesi



Şekil 1.2. Quanser firması tarafından üretilen 3 serbestlik dereceli helikopter mekanik ünitesi



Şekil 1.3. Quanser firması tarafından üretilen TRMS mekanik ünitesi



Şekil 1.4. İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü'nde geliştirilen TRMS mekanik ünitesi



Şekil 1.5. Feedback Inc. firması tarafından üretilen TRMS mekanik ünitesi

Yukarıda ifade edilen TRMS deney setlerini kullanarak farklı akademik çalışmalar gerçekleştirilmiştir.

Honsi ve Leonardi (2015) yaptıkları çalışmada Şekil 1.1.'de mekanik ünitesi verilen Bytronic firması tarafından üretilen TRMS'nin denetimini çalışmışlardır.

Rajappa ve ark. (2013) Şekil 1.2.'de verilen Quanser firmasının ürettiği 3 serbestlik dereceli helikopter'in modellenmesi ve dinamiklerinin tanımlanmasını gerçekleştirmiş ve PID ile denetimini çalışmışlardır. Ruf (2014) tarafından yapılan yüksek lisans tez çalışmasında Quanser firması tarafından üretilen 3 serbestlik dereceli helikopter'in modellenmesi, parametrelerin tanımlanması MPC (Model Predictive Control) ile denetimi çalışılmıştır. Jafri, Mansor ve Gunawan (2017) ise Quanser firması tarafından üretilen 3 serbestlik dereceli helikopter için bulanık mantık denetleyici tasarlayarak benzetim ortamında denetimini çalışmışlardır.

Patel ve ark. (2017), Taskin (2014), (Hernandez-Gonzalez, Alanis, Hernandez-Vargas (2012) Şekil 1.3.'te mekanik ünitesi verilen Quanser firması tarafından üretilen TRMS deney seti üzerinde çalışmalarını gerçekleştirmişlerdir.

Doğan (2014) ve Deniz ve ark. (2015) ve İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü'nde geliştirilen TRMS deney seti üzerinde çalışmalarını gerçekleştirmişlerdir.

Feedback Inc. Firması tarafından üretilen TRMS literatürde en yaygın kullanılan sistemdir. Mahmoud, Marhaban ve Hong (2008) bulanık mantık tabanlı kontrolör (FLC), Lui ve Juang (2009) tek nöron PID, Wen ve Li (2011) optimal kontrol, Pratap (2012) nöro kayma kipli kontrolör, Saha ve Chakraborty (2016) genetik algoritma tabanlı I-PD, Pandey, Dey ve Banerjee (2016) Kharitonow kararlılık teoremi kullanılarak tasarlanan PID kullanarak Feedback Inc. Firması tarafından üretilen TRMS seti üzerinde çalışan araştırmacılardan yalınızca birkaç tanesidir.

Literatürde en yaygın kullanılan deney seti olması nedeniyle bu tez çalışmasında da Feedback Inc. Firması tarafından üretilen TRMS seti kullanılmıştır. TRMS setinde yer alan hem yatay hem de dikey rotorların denetimleri klasik kontrol yöntemlerinden olan PI-PD denetleyiciler ile sağlanmıştır. PI-PD denetleyicilerin PID denetleyicilerin yetersiz kaldığı durumlarda çok daha iyi kapalı çevrim performans sergiledikleri gösterilmiştir Kaya ve Atherton (1999), Kaya (2003), Kaya, Tan ve Atherton (2006), Atherton ve Majhi (1999), Boz, Sari (2009). Bu tez çalışmasında PI-PD ile elde edilen kapalı çevrim performanslar PID denetleyiciler ile elde edilen kapalı çevrim performanslar ile hem benzetim hem de gerçek zamanlı uygulama ortamında karşılaştırılmış ve PI-PD denetleyicilerin genellikle daha sonuçlar verdiği ortaya konmuştur. PI-PD ve PID denetleyicilerin ayar parametreleri Kennedy ve Eberhart (1995) tarafından doğadaki çeşitli organizmaların kaynaşma stratejilerinden esinlenerek geliştirdikleri Parçacık Sürüsü Optimizasyonu (PSO) ile hesaplanmıştır.

1.2. Tezin Amacı

Bu tez çalışmasının amacı aşağıda maddeler halinde sıralanmıştır:

i. TRMS'nin yapısını tam olarak öğrenmek ve sistem davranışı hakkında gerekli bilgileri elde etmek
ii. Matlab "System Identification Toolbox" aracı kullanarak, TRMS'de bulunan rotorların açısal hızları ve ana rotor, kuyruk rotoru ve her iki rotorun çapraz yöndeki yolları tanımlayan transfer fonksiyonlarını hesaplamak
iii. Hesaplanan transfer fonksiyonlarından denetleyici tasarımına en uygun olanları tespit etmek

iv. TRMS'yi Oransal İntegral-Oransal Türev (Proportional Integral-Proportional Derivative, PI-PD) ve Oransal İntegral Türev (Proportional Integral Derivative, PID) denetleyiciler kullanarak gerçek zamanlı olarak kontrol etmek

v. PI-PD denetleyicinin TRMS denetiminde performanslarının PID denetleyiciden daha etkin bir yöntem olduğunu benzetim ortamı ve gerçek zamanlı uygulamaya dayalı sonuçlarla ortaya koymak

1.3. Tezin Yapısı

Bu tez; Giriş, Kaynak Özetleri, Materyal ve Metot, Bulgular ve Tartışma, Sonuç ve Öneriler ve Kaynaklar olmak üzere altı bölümden oluşmaktadır.

TRMS hakkında bilgiler ve farklı firmalar tarafından üretilen TRMS çeşitleri ve TRMS ile yapılan çalışmalar Giriş olarak verilen birinci bölümde verilmiştir.

TRMS ile ilgili yapılan literatür araştırması Kaynak özetleri olarak verilen ikinci kısımda yer almaktadır.

Bu tez çalışmasında kullanılan TRMS deney seti tanıtılması, TRMS'yi ifade eden transfer fonksiyonları Matlab sistem tanımlama aracı kullanılarak hesaplanması, TRMS sistem denetimi için tercih edilen PID ve PI-PD denetleyiciler tanıtılması ve denetleyicilerin tasarımında kullanılacak olan Parçacık Sürü Optimizasyonu hakkında bilgiler verilmiştir. Materyal ve metot olarak verilen üçüncü kısımda yer almaktadır.

TRMS denetiminde kullanılacak olan denetleyicilerin PSO yardımıyla tasarlanması, sisteme ait gerçek zamanlı uygulama sonuçları ve PI-PD ve PID denetleyicinin TRMS'nin denetimindeki performans karşılaştırılması Bulgular ve tartışma olarak adlandırılan dördüncü bölümde verilmiştir.

Yapılan çalışmaya ait sonuçlar ve değinilen öneriler Sonuç ve öneriler kısmında verilmiştir.

Tez içinde referans verilen kaynaklar, Kaynaklar olarak verilen altıncı bölümde sıralanmıştır.

2. KAYNAK ÖZETLERİ

Bu tez çalışmasında Feedback Inc. firmasına ait İkiz Rotor Çok-Girişli Çok-Çıkışlı (ÇGÇÇ) Sistem (Twin Rotor Multi-Input Multi-Output System, TRMS)'nin PSO ile tasarlanmış PI-PD denetleyiciler ile denetimi çalışılmıştır. Bu bölümde TRMS'nin denetimi ile ilgili yapılan literatürdeki çalışmaların bazılarının özeti aşağıda verilmiştir.

Wen ve Lu (2007), ayrıştırma yaklaşımı ile birlikte deadbeat kontrol tekniği ile TRMS'nin denetimini çalışmıştır. Sisteminin modelinin belirlenmesinden sonra ayrıştırma tekniği ile sistem iki ayrı tek-giriş tek-çıkış sisteme dönüştürülmüştür. Ardından, iki tek-giriş tek-çıkış sistem için deadbeat denetleyici tekniği ile denetleyici tasarlanmıştır. Önerilen tasarım metodu ile elde edilen sistem performansı PID denetleyiciler ile elde edilen performanslar ile karşılaştırılmış ve daha iyi sonuçlar elde edilmiştir.

Rahideh, Shaheed ve Huijberts (2008) hem deneysel hem de analitik yaklaşımlarla TRMS sisteminin modellenmesini çalışmışlardır. Analitik yaklaşımda sistemde yer alan parçalar ayrı ayrı modellendikten sonra bir araya getirilmiştir. Deneysel modellemede iki farklı yapay sinir ağları yaklaşımı (Levenberg–Marquardt (LM) ve Gradient Descent (GD)) kullanılmıştır. Analitik yaklaşım ile elde edilen model, deneysel yolla elde edilen modellerden daha iyi performans sağladığı ifade edilmiştir.

Mahmoud, Marhaban ve Hong (2008), TRMS'nin yörünge ve etkileşim problemlerini ANFIS (Uyarlamalı Sinirsel Çıkarım Sistemi) ve FSCM (Bulanık eksiltici Kümeleme) yöntemleriyle çözme üzerinde durmuşlardır. Dört adet FLC (Fuzzy Logic Controlor) ile TRMS'nin istenen kontrol hedeflerine ulaşması için çalışılmıştır. Ancak FLC'lerle kurulan sistemlerde yüksek hafıza ihtiyaç duyulmakta ve işlemlerin yerine getirilmesi için uzun zamana gereksinim bulunmaktadır. Mahmoud, Marhaban ve Hong (2008) tarafından geliştirilen denetleyiciler arzu edilen işlemleri daha az zaman ve daha az hafıza kullanarak gerçekleştirmektedir. Denetleyicilerin istenilen düzeydeki yanıtı ve işlemlerin basitliği MATLAB ortamında kanıtlamıştır. TRMS'nin Bulanık Mantık Kontrol denetlenmesinde yüksek belleğe ihtiyaç duyulurken, FSCM ve ANFIS'in kullanılması ile bu sıkıntının önüne geçilmiştir. Dört adet FLC tasarlanarak MATLAB/SIMULINK 'te kontrol edilen sistemi kurmuşlardır. Yapılan etki alanı

değişikliklerinde (ROI) zamandan %63, hafızadan ise %34 mertebesinde kazanımlar elde etmişlerdir. Verilen benzetim ortamı uygulama grafiklerinde çıkış sinyalinin referans değerlere yakın olduğu ancak tam olarak takip etmediğini gözlemlemişlerdir.

Lui ve Juang (2009) tek nöron PID denetleyici kullanarak TRMS'nin kontrolü üzerinde çalışmışlardır. Ana rotor açısı ve kuyruk açısı, dikey ve yatay yön hareketleri çapraz bağlı koşullar dikkate alınarak kontrol işlemleri gerçekleştirilmiştir. TRMS'nin doğrusal olmayan yapısı ve yatay ve dikey eksen hareketlerini sağlayan rotorların birbirleri üzerindeki etkileri nedeniyle, TRMS'nin uygun bir şekilde denetimini sağlamanın zor olduğunu ifade etmişlerdir. Dikey ve yatay yön hareketlerinin birbirleri üzerindeki etkisini azaltmak için ayrışma (decoupling) yaklaşımını kullanmışlardır. Bulanık sistemler, genetik algoritmalar ve yapay sinir ağlarının akıllı hesaplama teknikleri arasında popüler bir şekilde kullanıldığı üzerinde durmuşlardır. Yapay sinir ağlarının birçok avantajı olsa da, en büyük dezavantajının öğrenme süresinin oldukça uzun olmasından dolayı basit sinir ağ yapısının gerekli olduğunu ileri sürmüşler ve yaptıkları çalışmada tek nöron PID yaklaşımını tercih etmişlerdir. Benzetim ortamında yapılan karşılaştırmalarda normal PID ve bulanık mantık PID denetleyiciye göre tek nöron kullanılarak tasarlanan PID denetleyici ile dikey eksen hareketi kapalı çevrim hata oranlarının daha az olduğunu, ancak yatay eksen hareketinde sinüs sinyaline ait hata oranının diğer denetleyicilere göre daha fazla olduğunu gözlemlemişlerdir.

Subudhi ve Jena (2009) yapay sinir ağları yaklaşımıyla TRMS'nin doğrusal olmayan modellenmesini çalışmışlardır. Memetik algoritma tabanlı çok katmanlı eğitim için doğrusal olmayan TRMS sistemine perceptron (Algılayıcı) sinir ağı yaklaşımını uygulamışlardır. Subudhi ve Jena (2009) kendileri tarafından önerilen yaklaşımın literatürde var olan yaklaşımlara göre daha iyi sonuçlar verdiğini ifade etmişlerdir.

Toha ve Tokhi (2010), TRMS'nin doğrusal olmayan bir sistem olması sebebiyle geleneksel yaklaşımlar ile modellemenin oldukça zor ve yetersiz kaldığını belirtmişlerdir. Parçacık sürü optimizasyon (PSO) algoritması ile ayarlanan Uyarlanabilir Nöro-Bulanık Çıkarım Yöntemi (ANFIS) ile TRMS için parametrik olmayan model geliştirmişlerdir. Önerilen tekniğin yakınsama ve daha iyi performans açısından daha iyi sonuçlar verdiğini ifade etmişler. Elde edilen modelin doğruluğu hem zaman hem de frekans alanında verilen sonuçlar ile kanıtlanmıştır.

Wen ve Li (2011) TRMS'nin denetimi için yeni bir modelleme, ayrıştırma ve optimal denetleyici önermişlerdir. Bunun için öncelikle, TRMS iki ayrı tek-giriş tek çıkış sistem (SISO) olarak ayrıştırılmış ve her bir SISO sistem için ayrı denetleyiciler tasarlanıştır. SISO sistemde yer alan denetleyiciler (Dawes, 1994) tarafından önerilen yaklaşımla tasarlanmışlardır. Tasarlanan denetleyiciler %50'ye kadar parametre değişimlerine karşı gürbüz olduklarından, iki SISO sistem birleştirildiklerinde TRMS'nin kapalı performansının korunduğu görülmüş, verilen benzetim sonuçları ile yaklaşımın doğruluğu kanıtlanmaya çalışılmıştır.

Pratap (2012) nöro kayma kipli denetleyici ile TRMS'nin denetimini çalışmıştır. Çalışmada, modellemedeki belirsizlikler için yeni bir kayma yüzeyi tasarımı önerilmiştir. Önerilen tasarım metodunun kullanımı benzetim sonuçlarıyla gösterilmiştir.

Ramalakshmi ve Manoharan (2012) TRMS'nin kontrolü için PID denetleyicinin ayar parametrelerinin hesaplanmasını çalışmışlardır. Matlab/Simulink yardımıyla sistemin modeli edilmiştir. Sistem denetimi için basit ve çapraz bağlı PID denetleyiciler kullanılmış ve benzetim sonuçları basamak, sinüs ve kare dalga giriş sinyalleri için elde edilmiştir.

Allouani, Boukhetala, Boudjema (2012), TRMS'nin yörünge takibini kontrol etmek için FSMC (Fuzzy Sliding Mode Controller)'nin ayarlanmasına olanak veren PSO tabanlı bir metot sunmuşlardır. Bulanık mantık denetleyicilerin ve kayma yüzeyinin pozitif katsayıları PSO algoritması ile bulunmuştur. Çalışmada tasarlanan denetleyicinin sinüs girişi takip etmesi test edilmiş ve aynı yöntemle tasarlanan PID denetleyiciye göre PSO tabanlı FSMC'nin daha performans sağladığı ortaya konmuştur.

Silva ve ark. (2014), TRMS'nin gerçek zamanlı modellenmesi için Gelişen Sinirsel Bulanık Ağ (evolving Neural Fuzzy Network, eNFN) yaklaşımının kullanılmasını önermişlerdir. Deneysel sonuçlar eNFN'nin gerçek zamanlı kullanımının etkili ve uygulanabilir olduğunu göstermiştir. Daha az karmaşık olması, hızlı öğrenme ve adaptasyon prosedürü sayesinde, eNFN yaklaşımı hızlı ve zamanla-değişen sistem dinamiklerinin etkili ve doğru bir şekilde modellenmesine olanak vermiştir. eFNN yaklaşımının bir diğer avantajının da giriş verilerinde yansıtılan çalışma koşulları için de uygun bir modelleme elde etmeye uygun olduğu ifade edilmiştir.

Biswas ve ark. (2014), PSO tabanlı PID denetleyici tasarımı ile TRMS'nin denetimi üzerinde çalışmışlardır. Çalışmada PID denetleyicinin ayar kazanç değerlerinin otomatik hesaplanması ile geçici rejim hata miktarının minimum olması amaçlanmıştır. Tasarlanan denetleyicilerin performansları farklı giriş sinyalleri için benzetim sonuçları ile gösterilmiş ve tatmin edici cevaplar alındığı ifade edilmiştir.

Deniz vd. (2015), tasarımı ve yapımı İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü laboratuvarlarında geliştirilmiş olan TRMS'nin giriş ve çıkış ilişkisini yapay sinir ağlarıyla incelemişlerdir. Sistemi modellerken ileri beslemeli, tek katmanlı bir YSA (Yapay Sinir Ağı) kullanmışlardır. Çift rotorlu sistemin yatay eksen ve düşey eksen hareketini aynı YSA yapısı üzerinde modellemiş olması literatürde var olan diğer çalışmalara karşı olan üstünlüğünü oluşturmaktadır.

Saha ve Chakraborty (2016) TRMS'nin genetik algoritma tabanlı I-PD denetleyiciler ile denetlenmesini önermişlerdir. Tasarladıkları I-PD denetleyicilerin performansları PID denetleyiciler ile karşılaştırılmış ve I-PD denetleyicinin çok daha iyi performans sağladığı hem benzetim hem de gerçek zamanlı sonuçlar ile gösterilmiştir.

Huu ve Ismail (2016) TRMS 'yi modellemek için sistemi dikey eksen hareketi, yatay eksen hareketi ve çapraz yön hareketi olmak üzere üç parçaya ayırarak incelemişlerdir. Sistemi modellemek ve analiz etmek için optimal algoritma ve ilk prensip metodunun birleşiminden oluşan hibrit (melez) bir yöntem kullanmışlardır. Modelin bilinmeyen parametrelerini fiziksel deneyler ve genetik algoritma ile bulmuşlardır. Elde edilen modelin yatay ve dikey eksen çıkışları ile gerçek sisteme ait yatay ve dikey eksen çıkışları farklı giriş sinyalleri için karşılaştırılmıştır.

Pandey, Dey ve Banerjee (2016) Kharitonow kararlılık teoremini kullanılarak tasarladıkları PID denetleyiciler ile TRMS'yi denetlemişlerdir. Denetleyici tasarımı doğrusal olmayan modelin doğrusallaştırılmış modeline dayalı olarak gerçekleştirilmiştir. Tasarlanan kapalı çevrim sistemin performansı gerçek zamanlı olarak test edilmiş ve yatay ile dikey eksen rotorlara ait çıkış performanslarının yeterli olduğu gösterilmiştir.

Tastemirov, Visintini ve Viviescas (2017) Euler-Lagrange metodu ile TRMS sisteminin dinamik modelinin elde edilmesini çalışmışlardır. Çalışmada, daha literatürde verilen modellerde mevcut olan hatalara da işaret edilmiştir. Elde ettikleri

model hem üretici firmanın hem de literatürdeki modellerden daha iyi sonuçlar elde edilmiştir.

Bouarroudj ve ark. (2017) TRMS'nin kontrolü için merkezi olmayan bulanık mantık kayma kipli (DFLSM) kontrol ile hem ana rotor hem de kuyruk rotor denetimini çalışmışlardır. DFLSMC denetleyicinin parametreleri parçacık sürü optimizasyonu (PSO) algoritması ile hesaplanmıştır. PSO algoritma tabanlı DFLSMC'nin stabilizasyon ve yörünge izleme testlerinde optimize edilmemiş bir DFLSMC'den daha etkin sonuçlar verdiği benzetim sonuçlarıyla ortaya konmuştur.

Neeraj ve Seema (2018) çapraz PID denetleyiciler ile TRMS'nin denetimini çalışmışlardır. Performans değerlendirmesi için klasik PID yaklaşımını kullanmışladır. Her iki yaklaşımda da denetleyiciler üç farklı optimizasyon (PSO, Dinamik Yayılma Faktör PSO ve Nelder Mead Simplex PSO) ile ayarlanmışlardır. Benzetim sonuçları ile çapraz bağlı PID denetleyicinin klasik PID denetleyiciden daha iyi performans sağladığı görülmüştür. Nelder Mead Simplex PSO ile ayarlanan denetleyiciler diğer iki optimizasyon yaklaşımına göre daha iyi sonuçlar verdiği gözlenmiştir.

3. MATERYAL VE METOT

Bu kısımda, tez çalışmasında kullanılan TRMS'nin yapısı, sisteme ait transfer fonksiyonlarının deneysel olarak elde edilmesi ve denetleyicilerin tasarlanması anlatılmıştır.

3.1. İkiz Rotor ÇGÇÇ Sistem

Bu tez çalışmasında, Feedback Instruments firması tarafından üretilen TRMS deney seti kullanılmıştır (Feedback Instruments Ltd.). TRMS karmaşık bir sistem olan helikopter sistemlerinin basitleştirilmiş bir modelidir.

Sistemdeki rotorlar düşey ve yatay yönler doğrultusunda hareket edebilmekte ve rotorların bağlı bulunduğu mil serbestçe dönebilmektedir. TRMS deney seti, ana rotor ve kuyruk rotorların hareketini sağlayan iki adet DC motora sahiptir. Rotorların düşey ve yatay yöndeki hareketleri birbirleri üzerinde istenmeyen etkilere neden olmaktadır. Sistemde, olası aşırı yüksek gerilimlere karşı sistemin zarar görmesini engellemek amacıyla rotorların hareketlerini sınırlayan iki adet sınır anahtarı bulunmaktadır (Feedback Instruments Ltd.).

Helikopter sisteminin konumu ve hızının belirlenmesinde, rotorların kontrol edilmesi büyük önem arz etmektedir. Gerçek helikopterde rotor hızı TRMS'ye göre daha az ve sabittir ve tahrik rotor bıçakları açısı modifikasyonu ile değiştirilebilir.

Bir helikopterde bulunan en önemli dinamik özellikler TRMS modelinde de mevcuttur. Gerçek helikopterde olduğu gibi iki rotor arasında önemli bir çapraz bağlantı vardır. Dikey konumlu rotoru çalıştırıldığında, helikopter yatay düzlemde de dönecektir.

Sisteme uygulanan 2 giriş (rotorlara uygulanan gerilimler) ve çıkışlar (dikey ve yatay açılar ve açısal hızlar) TRMS setini laboratuvar çalışmaları için oldukça önemli çok giriş-çok çıkışlı bir sistem haline getirmektedir.

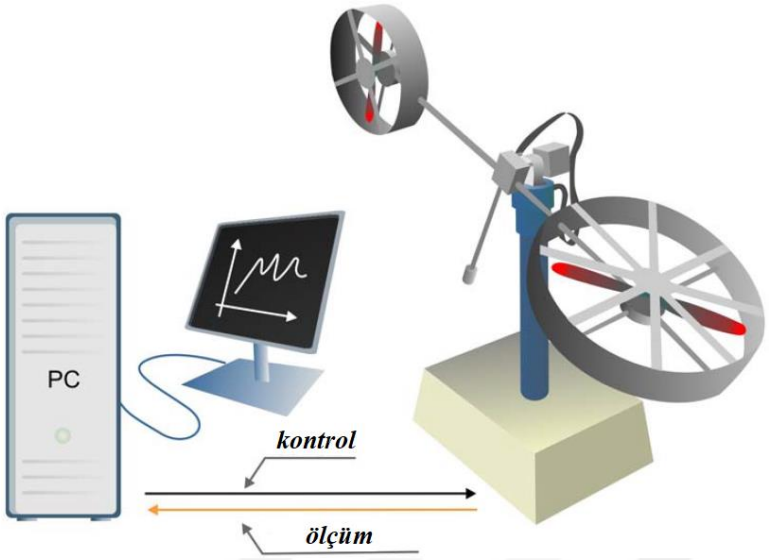
3.1.1. TRMS Setinin Tanıtımı

TRMS; helikopter sistemi çalışma prensiplerine benzer şekilde çalışmaktadır. Fakat helikopter ile mukayese edilince bazı önemli sadeleştirmelerin yapıldığı gözlemlenir.

Şekil 1.5.'te görüldüğü gibi İkiz Rotor deney seti dört ana kısımdan oluşmaktadır; bunlardan ilk ikisi aktif kısımları oluşturan ve yukarı-aşağı hareketi sağlayan ana rotor (pitch rotor) ile sağa-sola hareketi sağlayan kuyruk rotor (yaw rotor) parçalardır. Üçüncü ve dördüncü kısımlar ise, kontrol edilmesi gereken aktif kısımların hareketi sırasında sistemin dengede kalmasını sağlayan karşı ağırlık (counterbalance) ve rotorların düşey ve yatay yönde hareketini sağlayan mili tutan gövde kısmıdır. TRMS iki adet giriş (rotorlara uygulanan gerilimler) ve 2 adet çıkış (dikey ve yatay açılar ve açısal hızlar) ile kontrol edilir (Feedback Instruments Ltd.).

Rotorların açısal hızları ve konum değerleri DC motorlara uygulanan gerilim değeri ile ayarlanmaktadır. Dolayısıyla sistemdeki kontrol sinyali gerilimdir. Rotorların açısal hızlarını ve konumlarını belirlemek için deney setinde iki adet takometre kullanılmıştır. Rotorların açı ve konum verileri kullanılarak DC motorlara uygulanan kontrol geriliminin değeri ayarlanabilir ve böylece, sistem istenilen şekilde denetlenebilir (Feedback Instruments Ltd.).

TRMS deney setinin kontrol şeması Şekil 3.1.'de gösterilmektedir. TRMS'nin kontrolü şu şekilde gerçekleştirilmektedir: Bilgisayarda Matlab/Simulink ortamında oluşturulan kontrol algoritması sistem denetimi için gerekli olan kontrol geriliminin değerini PCI-1711 çok fonksiyonlu kart vasıtasıyla DC rotor modülüne (rotor sürücü) gönderir. Bu modül bilgisayardan gelen verilere göre rotorları hareket ettirir. Motor ve kirişlerin konumuna göre bir pozisyon sinyali sağlayan artımsal enkoder vasıtasıyla gerekli ölçümler yapıldıktan sonra PCI-1711 çok fonksiyonlu kart vasıtasıyla bilgisayara iletilir. Kuyruk ve ana rotorlardan gelen sinyaller kontrol algoritması tarafından değerlendirilir ve TRMS'ye uygulanması gereken gerilimin değeri hesaplanır. Elde edilen bu yeni değer DC rotor modülüne gönderilir. Bu işlem sürekli olarak tekrar edilir ve kapalı çevrim kontrol yöntemiyle sistemin gerçek zamanda denetimi sağlanır.



Şekil 3.1. TRMS kontrol şeması

3.2. Sistemin Modellenmesi

TRMS'nin PI-PD denetleyiciyle kontrolünün gerçekleştirilebilmesi için sistem modelinin bilinmesi gerekmektedir. Fiziksel kuralların kullanılması ile elde edilen matematiksel model her zaman sistemi tam olarak ifade etmeyebilir. Bu nedenle gerçek zamanlı sistemlerin matematiksel modellerinin deneysel yöntemlerle belirlenmesi önemlidir.

Bu tez çalışmasında, Matlab Sistem Tanımlama Aracının kullanılması ile TRMS'nin modellenmesi üzerinde durulacaktır.

3.2.1. Matlab Sistem Tanımlama Aracı ile TRMS'nin Modellenmesi

Yapılan literatür çalışmasında TRMS sisteminin matematiksel modelinin genellikle Matlab programının "Model Identification Toolbox" (Model Belirleme Aracı) kullanılarak belirlendiği tespit edilmiştir. Dolayısıyla bu tez çalışmasında da Matlab Model Identification Toolbox ile TRMS sisteminin modellenmesi gerçekleştirilmiştir. TRMS sisteminin transfer fonksiyonu yapısında modellenmesine karar verilmiştir. Elde edilen transfer fonksiyonlarının gerçek sistemi hangi doğrulukta ifade ettiğini bulmak için elde edilen transfer fonksiyonu modeli ile gerçek sisteme uygulanan çoklu sinüsoidal girişlere verdikleri cevaplar karşılaştırılmıştır.

TRMS deney seti içerisinde bulunan PCI 1711 kurulum CD'si içinde yer alan 33-949 TRMS "Sistem Simulink Models" programı yardımıyla sisteme ait modelleme işlemlerinde sisteme uygulanan giriş ve çıkış verileri alınmıştır. TRMS sistemi Matlab programıyla senkron çalışmaktadır. Böylece TRMS sistemine ait kontrol sinyalleri ve dış bozuculara karşı vermiş olduğu tepkiler Matlab vasıtasıyla gözlemlenmektedir. Matlab aracılığıyla TRMS sisteminin kontrol mekanizmasına müdahale edilebilmektedir. Dolayısıyla hava araçları kontrol sistemi sadeleştirilmiş örneği olan TRMS'nin değişik denetleyici yapılarına verdiği cevapların performans analizi edilebilmekte ve en uygun denetleyicinin tasarımı yapılabilmektedir (Ateş ve Yeroğlu, 2012).

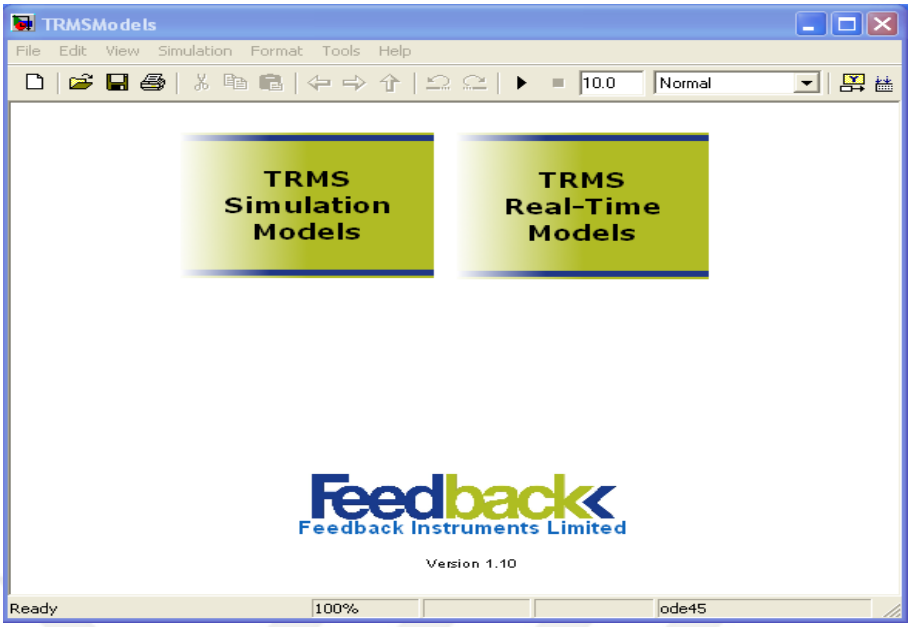
TRMS sistemine ait ana rotor, kuyruk rotor ve çapraz yönlere ait sistem transfer fonksiyonlarını bulmak için aşağıdaki adımlar izlenmiştir.

İkiz Rotor Laboratuar deney seti içerisinde bulunan PCI 1711 kurulum CD'si içinde yer alan 33-949 İkiz Rotor ÇGÇÇ Sistem Simulink Models Programı yardımıyla sisteme ait tanımlama işlemleri yapılmıştır. Öncelikle kuyruk rotora ait tarnsfer fonksiyonunu bulunması aşama aşama anlatılacaktır. Daha sonra ana rotor, çapraz ana rotor ve çapraz kuyruk rotorun tanımlama işlemleri kuyruk rotor tanımlama için yapılan işlemler tekrarlanarak gerçekleştirilmiştir.

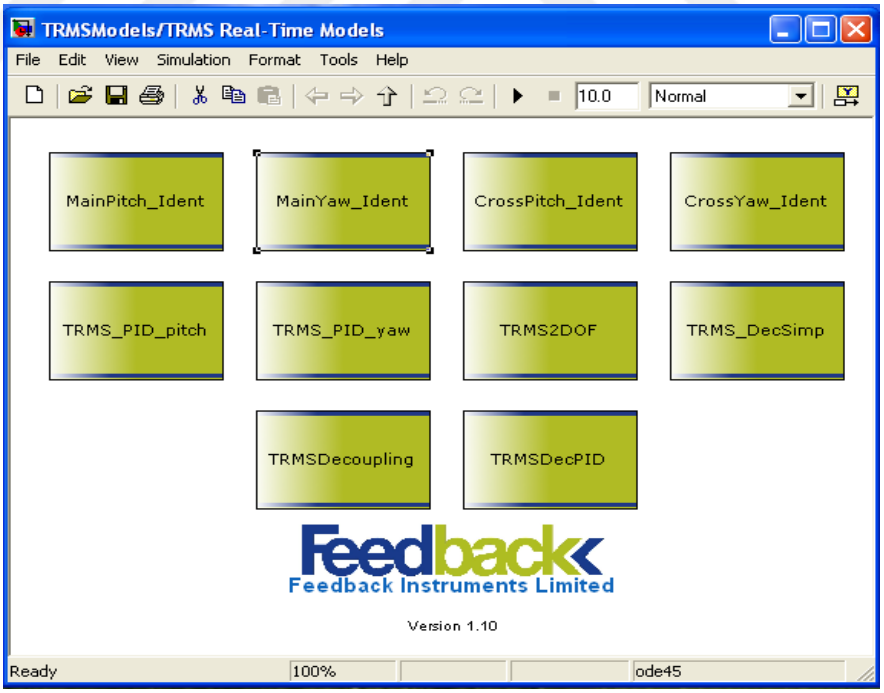
Tanımlama işlemi sırasında öncelikle 33-949 İkiz Rotor ÇGÇÇ Simulink Models Programını çalıştırılır. Sisteme ait transfer fonksiyonlarının elde edilmesi için Şekil 3.2'de gösterilen ara yüzde "TRMS Real-Time Models" sekmesi tıklandığında Şekil 3.3.'teki pencere açılır. Kuyruk rotora ait transfer fonksiyonu elde edileceği için, Şekil 3.3.'te verilen "MainYaw_Ident" sekmesi tıklanarak Şekil 3.4.'te gösterilen kuyruk rotor tanımlama penceresi açılır.

Şekil 3.4.'te üstte yer alan "Tools" menüsü altında bulunan "Real-Time Workshop" sekmesi ve daha sonra o sekme altında bulunan "Build Model" sekmesi ile model oluşturma komutu verilir (Şekil-3.5.).

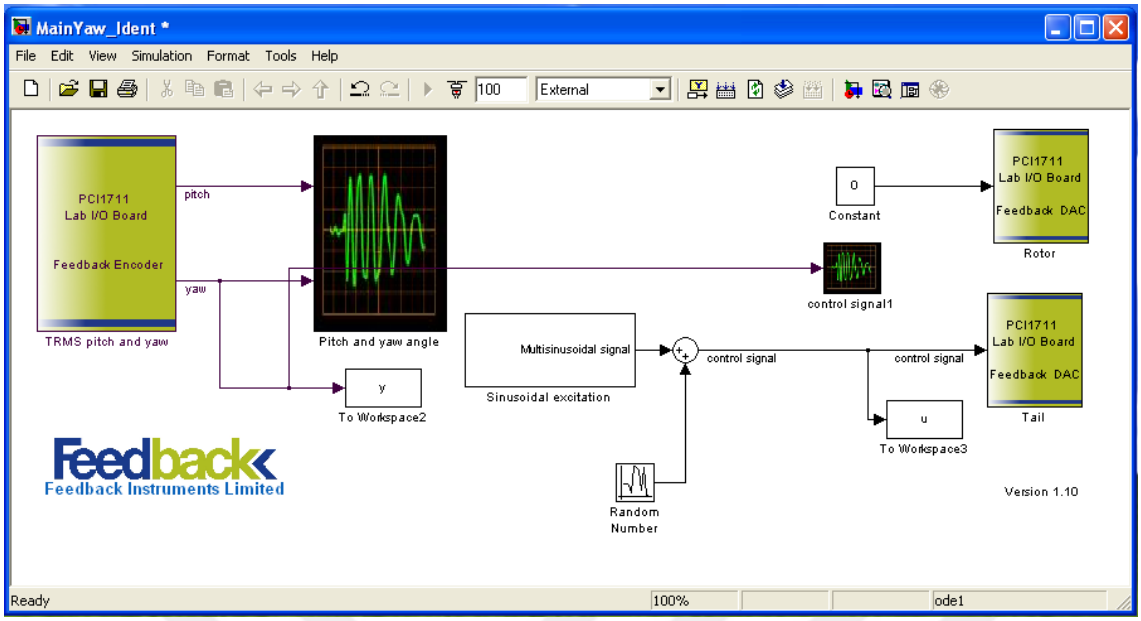
"Build Model" komutu verildikten sonra Matlab programı ile TRMS deney seti arasında veri alışverişini sağlayacak olan bir takım kodlama işlemleri Matlab tarafından gerçekleştirilir ve Şekil 3.6.'da gösterildiği gibi komut penceresinde "gerçek zamanlı model oluşturma başarılı bir şekilde tamamlandı" ibaresi gözleninceye kadar beklenilir.



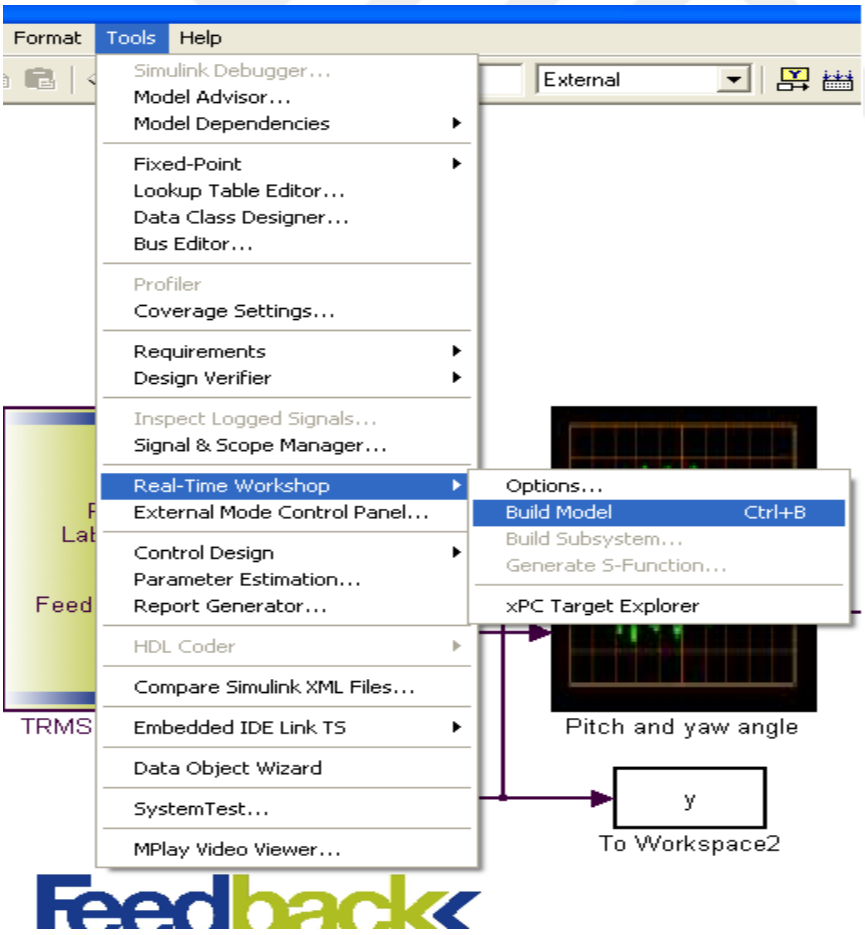
Şekil 3.2. TRMS Simulink Models Programı ara yüzü



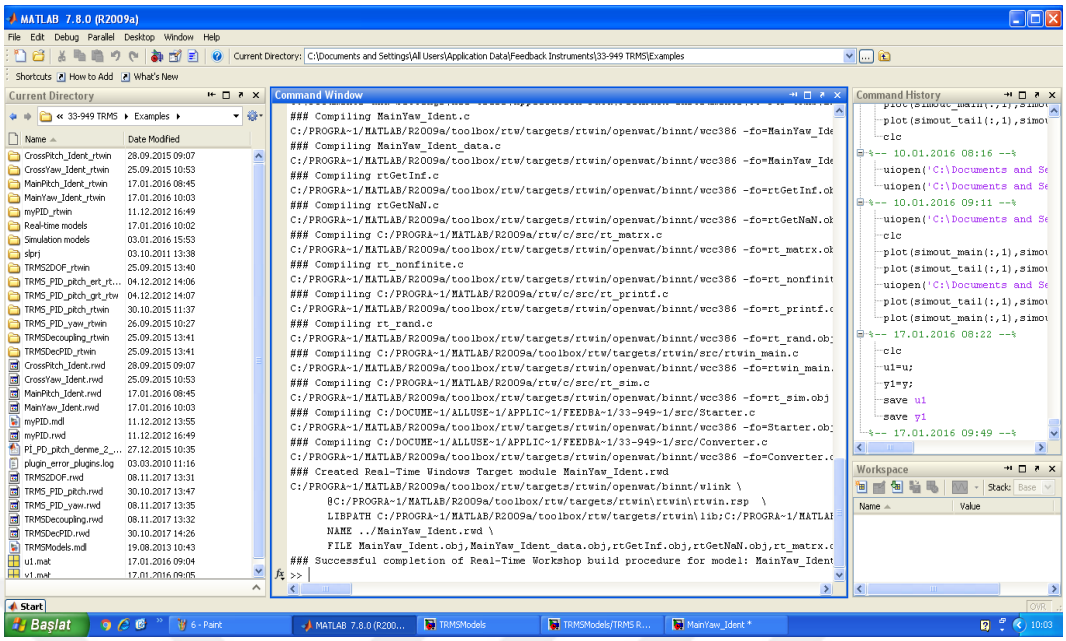
Şekil 3.3. TRMS Simulink gerçek zaman model programı ara yüzü



Şekil 3.4. TRMS Simulink gerçek zaman MainYaw_Ident blok diyagramı

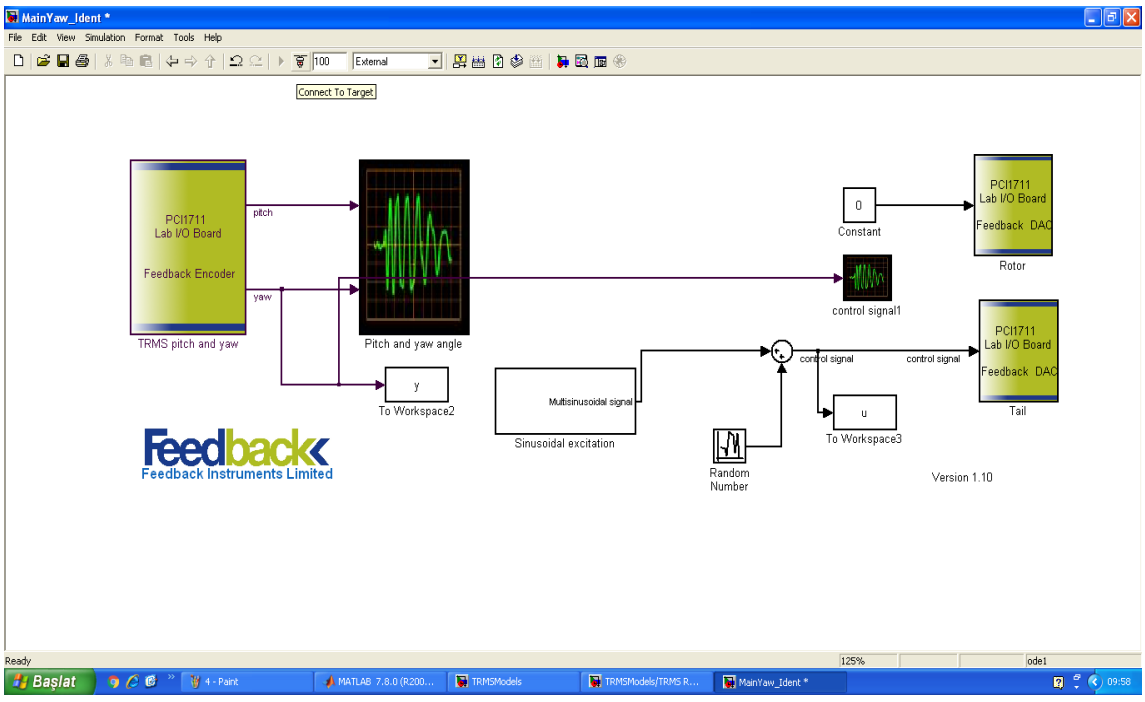


Şekil 3.5. TRMS Simulink gerçek zaman MainYaw_Ident tools sekmesi



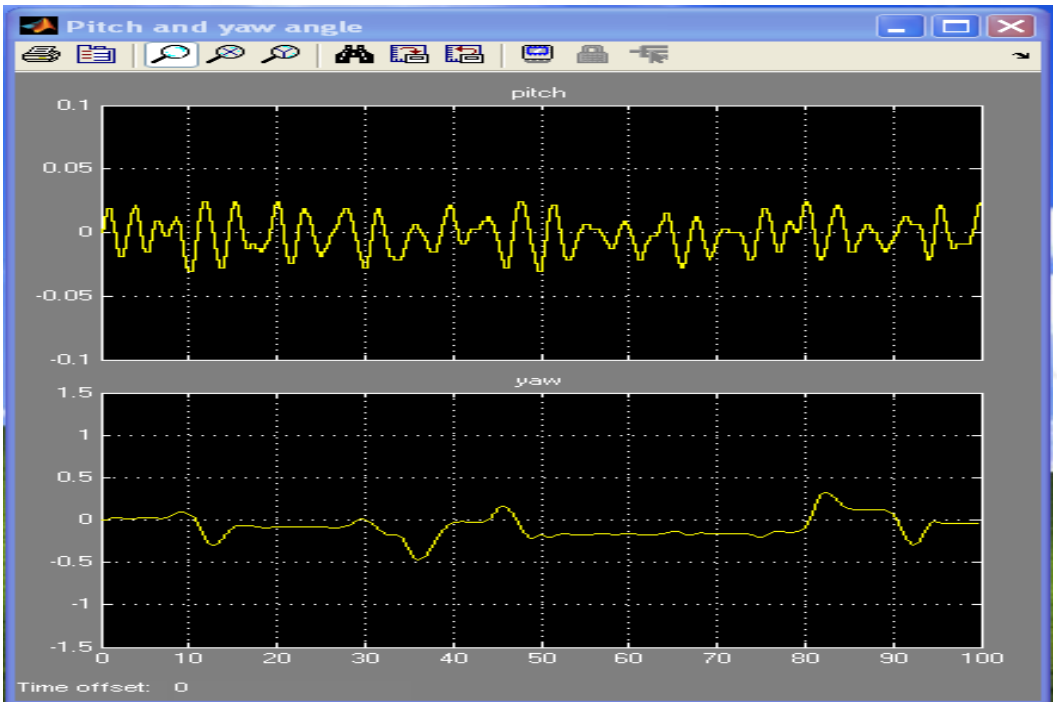
Şekil 3.6. Matlab komut penceresi

Şekil 3.6.'da gösterildiği gibi, "gerçek zamanlı model oluşturma başarılı bir şekilde tamamlandı" ibaresi görüldükten sonra, Şekil-3.7.'deki gibi "Connect to Target" butonuna basılarak bilgisayar ile deney seti arasında gerekli bağlantı işleminin yapılması sağlanır.



Şekil 3.7. MainYaw_Ident ara yüzü

Bu aşamadan sonra, Şekil 3.7.'de gösterilen ara yüzde "Connect to Target" sekmesinin bitişiğinde bulunan "Start Real Time Code" sekmesine basılarak TRMS sistemine çoklu sinüsoidal bir sinyal uygulanır. Bu çalışmada, TRMS deney seti bu çoklu sinüsoidal sinyal ile 100 sn. süreyle çalıştırılmıştır. Örnekleme periyodu 0.1 sn olarak alınmıştır. Sonuçta, Şekil 3.8.'de verilen ana rotor ve kuyruk rotor çıkış sinyalleri elde edilmiştir. Şekil 3.8.'de ana rotor için elde edilen çıkış sinyal genliğinin çok küçük olduğuna dikkate edilmelidir. Deney seti üzerinden alınan giriş ve çıkış değerleri PCI-1711 çok fonksiyonlu DAQ kartı vasıtasıyla giriş-çıkış verileri, aşağıda açıklanacağı gibi, oluşturulmaktadır.



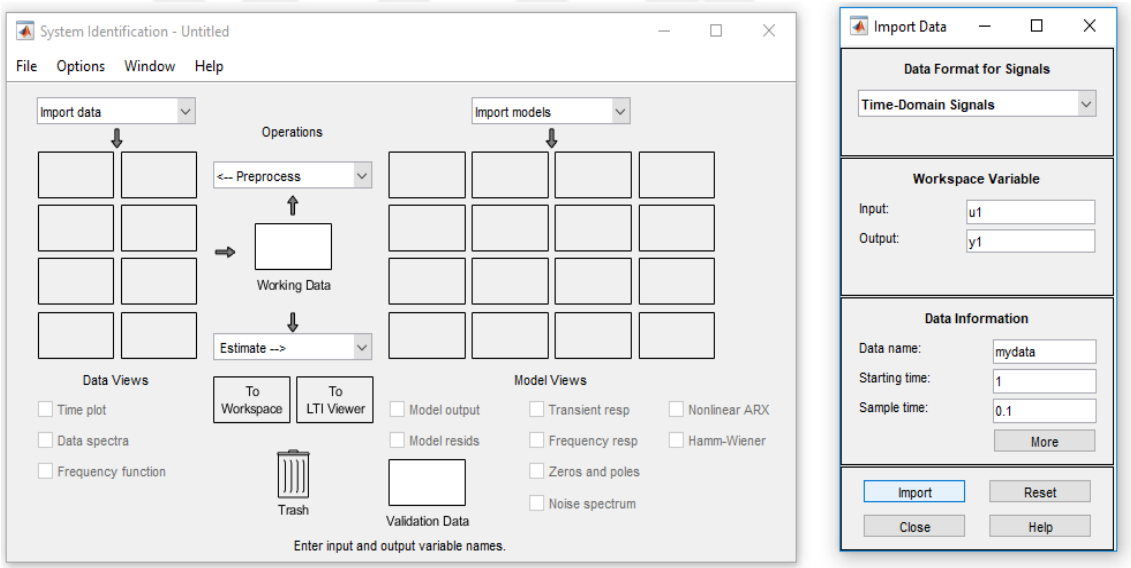
Şekil 3.8. Ana rotor ve kuyruk rotor çıkış sinyalleri

Bu aşamada, Şekil 3.7.'de giriş sinyaline atanan değişken ismi (u) ve kontrol değişkenine atanan değişken ismi (y), "save" komutuyla kaydedilebilir. Matlab komut penceresinde "ident" komutu çalıştırılarak "System Identification Toolbox" ara yüzü açılır.

Matlab programındaki "System Identification Toolbox" yardımıyla sisteme ait matematiksel modelin, parametreleri hiç bilinmeyen veya bir kısmı bilinen, fiziksel özellikleri bilinmeyen sistemlerin modellenmesinde kullanılmaktadır.

Matlab sistem tanımlama aracı dinamik sistemlerin matematiksel modellerinin ölçülen giriş-çıkış verilerini kullanılmasıyla oluşturulmasını sağlar. Modellenmesi zor olan dinamik sistemlerin kolay bir şekilde modellenmesi bu araç kutusu ile kolaylıkla gerçekleştirilebilmektedir. Sistemin sürekli zaman veya ayrık zaman transfer fonksiyonları, durum-uzay modelleri, süreç modelleri veya lineer olmayan modelleri, dinamik bir sistemin zaman tanım kümesindeki ya da frekans tanım kümesindeki giriş-çıkış verilerine göre elde edilebilmektedir (Ljung, 2015).

Ident komutundan sonra Şekil 3.9.'da gösterilen pencere açılır. Açılan pencerede "Import Data" komutundan "Time-Domain Signals" seçilir. Bu seçimden sonra, Şekil 3.9.'da sağda görülen küçük pencerede, Matlab komut penceresi üzerinde kaydedilen giriş sinyali *u* ve çıkış sinyali *y* değişkenleri penceredeki uygun yerlere (input ve output) girişleri yapılır. "Import" data tuşuyla çıkış ve giriş verileri araç kutusuna taşınmış olur.

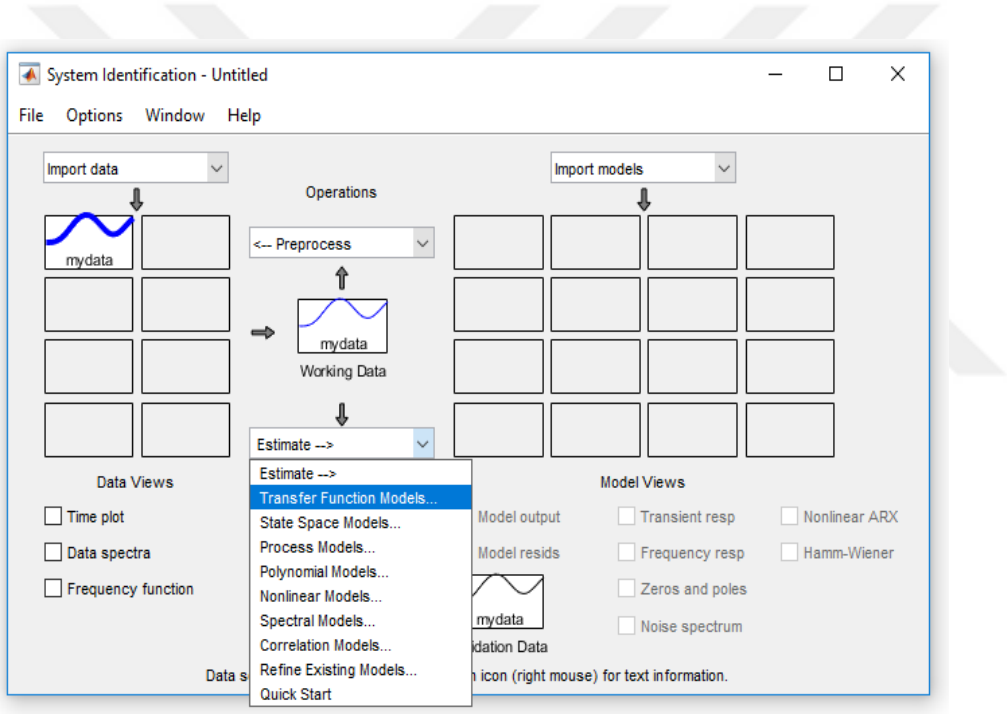


Şekil 3.9. System Identification Toolbox ara yüzü

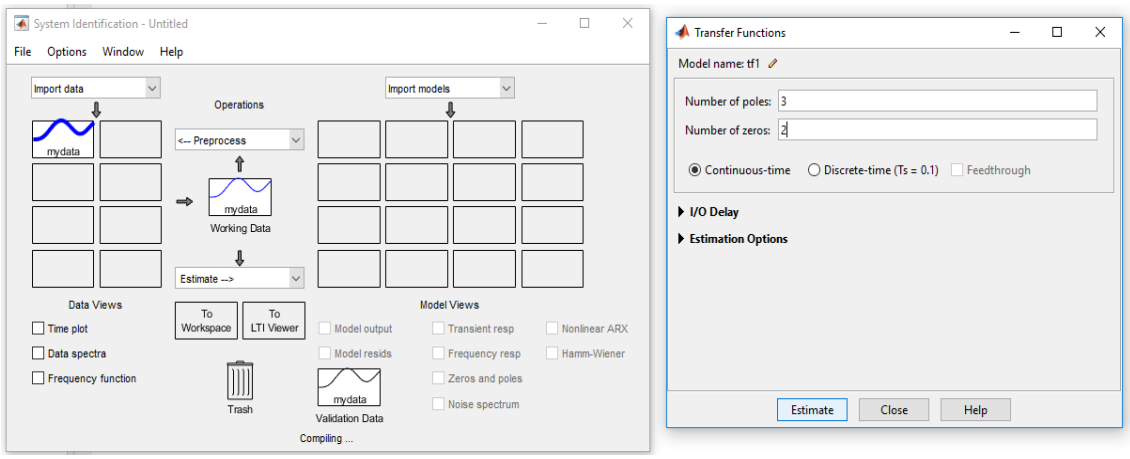
Giriş ve çıkış verileri "Import" komutu ile "Identification Toolbox" içerisine aktardıktan sonra, Şekil-3.10.'da gösterildiği gibi "Estimate" sekmesi altında bulunan "Transfer Function Models" komutu verilerek tahmini transfer fonksiyonu hesaplanır.

Hesaplama işlemi yapılırken araç kutusu transfer fonksiyonuna ait kutup ve sıfır sayılarının girilmesini ister ve girilen sıfır ve kutup sayısına göre tahmini transfer fonksiyonunu belirler. Yapılan literatür araştırmaları doğrultusunda TRMS sistem

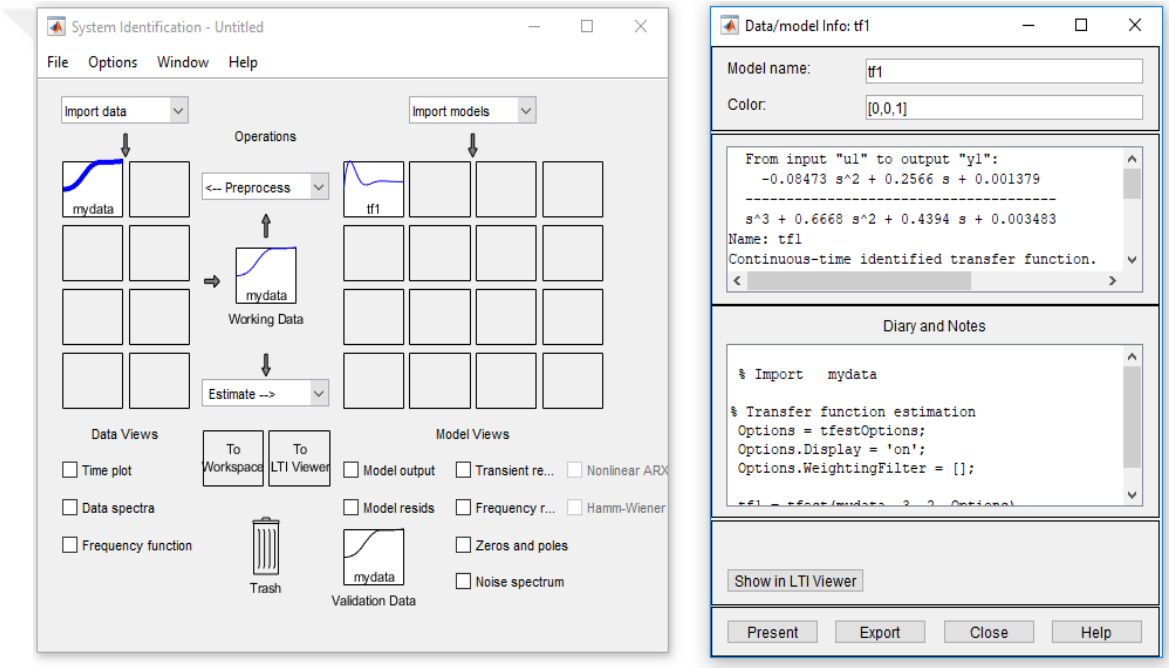
transfer fonksiyonlarının genellikle 2. veya 3. derece olarak modellendikleri görüldüğünden, bu tez çalışmasında da 2 sıfır ve 3 kutuplu ana yol transfer fonksiyon modelleri ve 1 sıfır ve 2 sıfırlı çapraz yol transfer fonksiyon modelleri kullanılmıştır. Şekil 3.11.'de görüldüğü gibi transfer fonksiyonuna ait kutup ve sıfır sayıları belirlenir. Kutup ve sıfır sayısı girildikten sonra "Estimate" komutu verilir ve sonrasında Data/Model Info penceresinde hesaplanan transfer fonksiyonu modeli görülebilir (Şekil 3.12.). Hesaplanan transfer fonksiyon modelinin gerçek sistem ile ne kadar uyuştuğu Şekil 3.9.'da "Model output" tıklanarak görülebilir. Eğer, iyi uygunlukta bir modelleme elde edilemediyse farklı kutup ve sıfır sayıları ile transfer fonksiyon modellemesi tekrarlanabilir.



Şekil 3.10. System Identification Toolbox Transfer Function Models ara yüzü

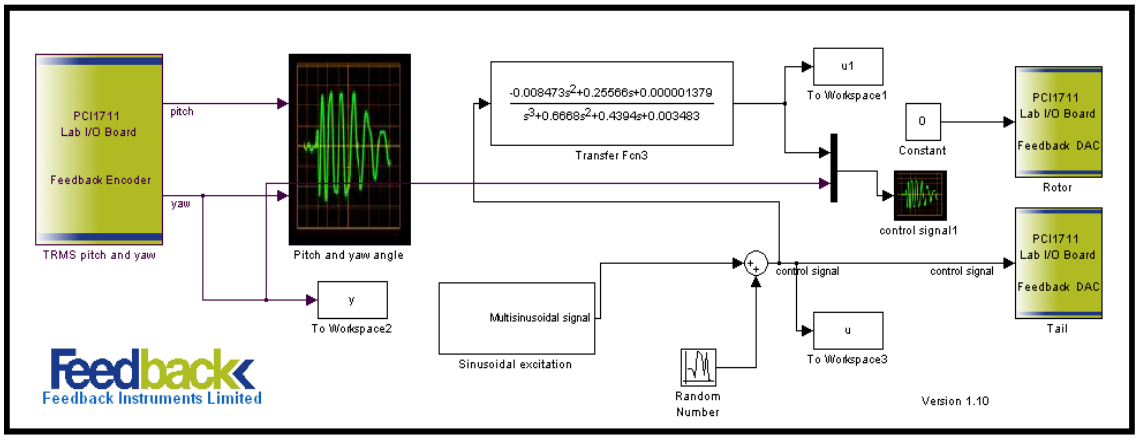


Şekil 3.11. System Identification Toolbox Transfer Function Models kutuplar ve sıfırlar ara yüzü



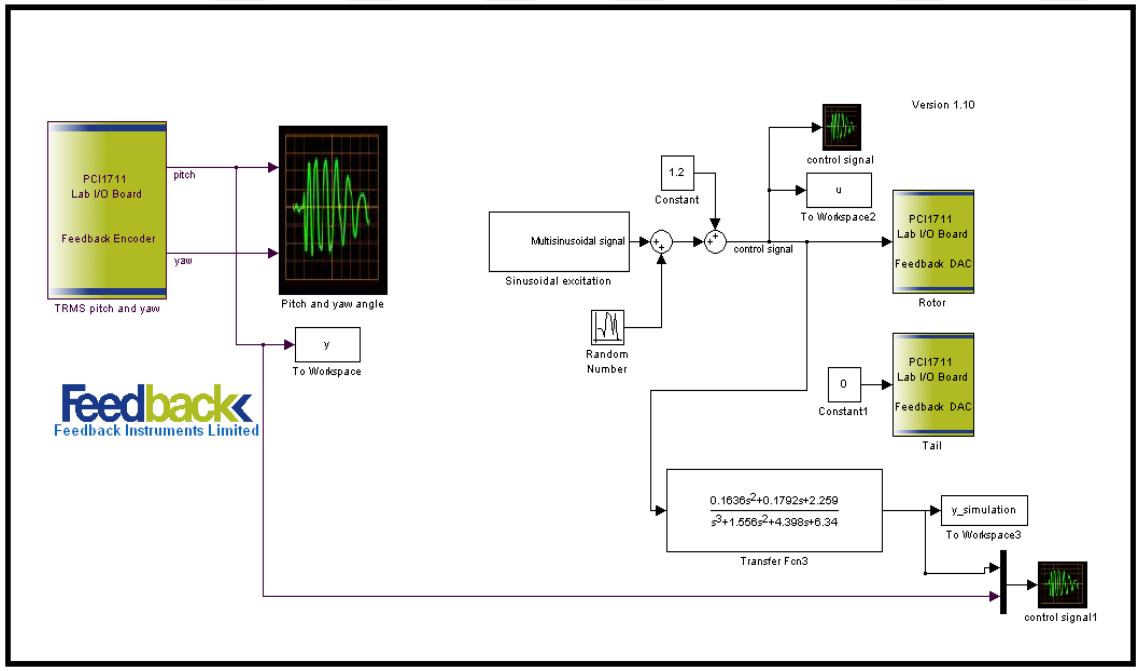
Şekil 3.12. System Identification Toolbox Transfer Function Models Data/Model Info ara yüzü

Bu tez çalışmasında, kuyruk rotor için hesaplanan transfer fonksiyonu ile gerçek sistem çıkışları Şekil 3.13'te gösterildiği karşılaştırılmıştır.

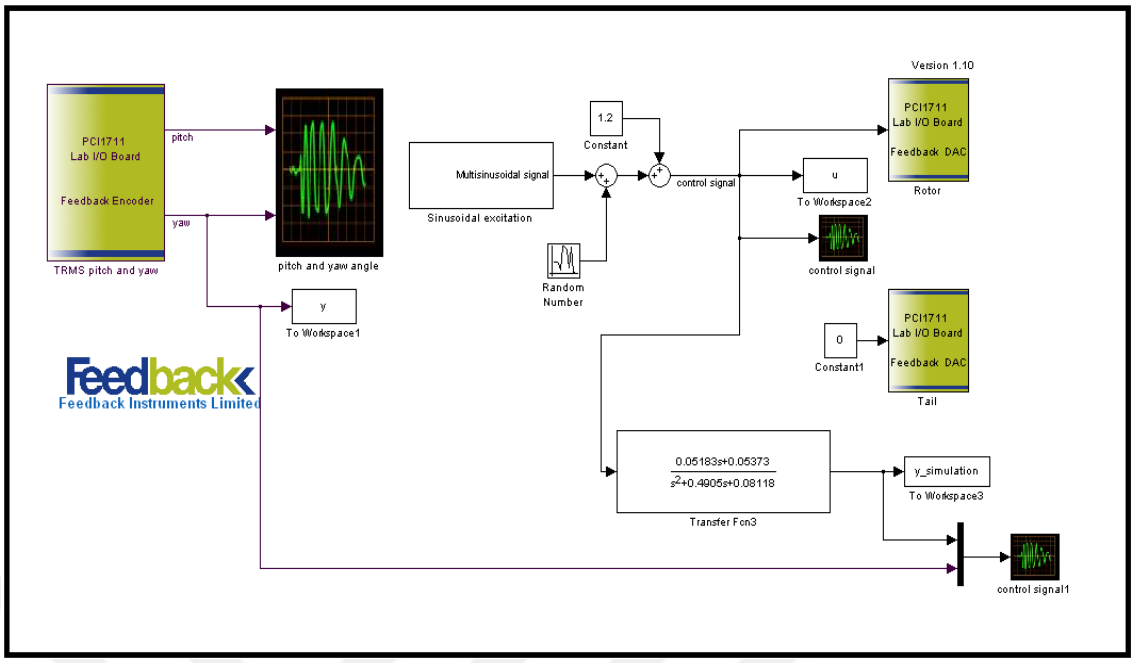


Şekil 3.13. TRMS kuyruk rotor için model transfer fonksiyonu ve gerçek sistem çıkış sinyallerinin karşılaştırılması

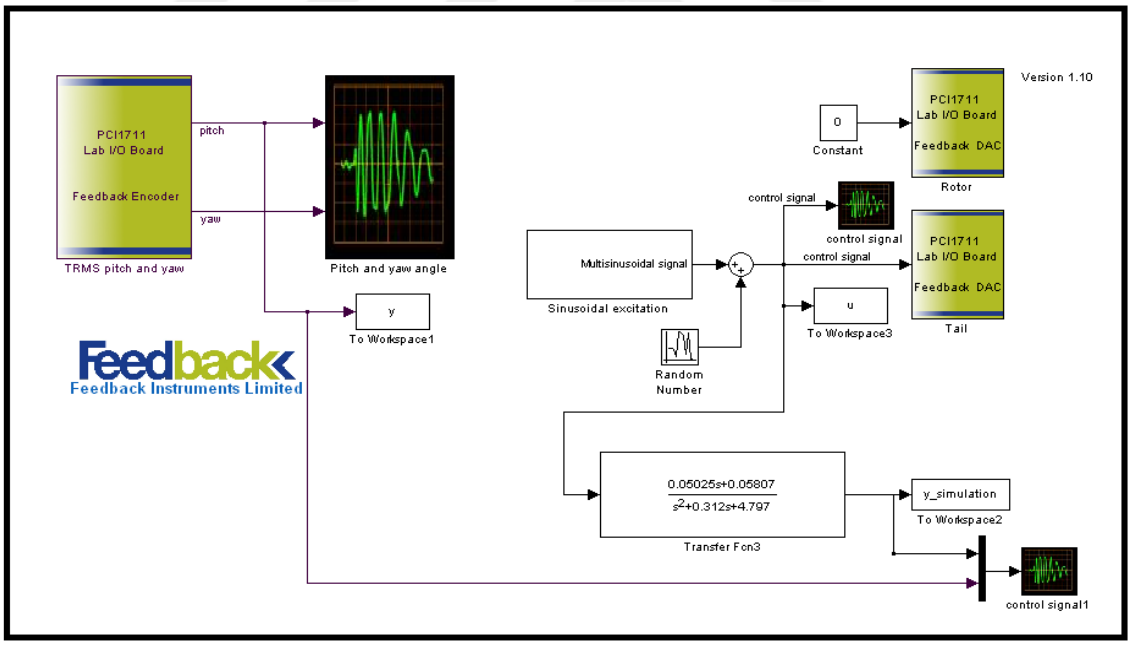
Yukarıda kuyruk rotor için detaylı olarak verilen transfer fonksiyon modelleme yaklaşımı, aynı prosedür takip edilerek ana rotor, çapraz ana rotor ve çapraz kuyruk rotor için tekrarlanmıştır. Bu durumlara ait blok diyagramlar Şekil 3.14, Şekil 3.15 ve Şekil 3.16.'da gösterilmektedir. Sonuçta, TRMS sistemine ait açık çevrim transfer fonksiyon yapısı Şekil 3.17.'de gösterilmiştir.



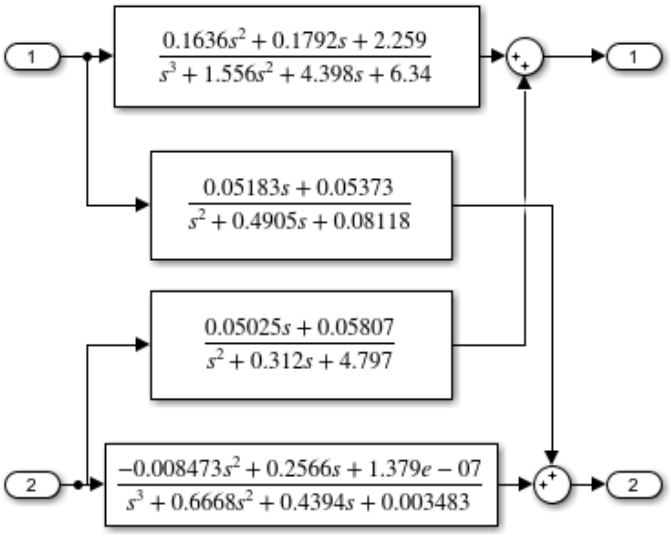
Şekil 3.14. TRMS Ana rotor için model transfer fonksiyonu ve gerçek sistem çıkış sinyallerinin karşılaştırılması



Şekil 3.15. TRMS Çapraz ana rotor için model transfer fonksiyonu ve gerçek sistem çıkış sinyallerinin karşılaştırılması

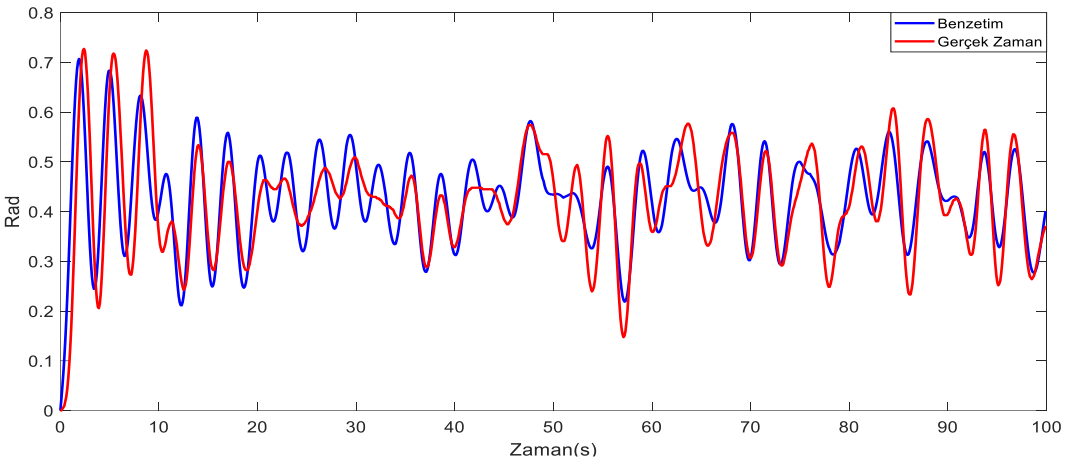


Şekil 3.16. TRMS Çapraz kuyruk rotor için model transfer fonksiyonu ve gerçek sistem çıkış sinyallerinin karşılaştırılması

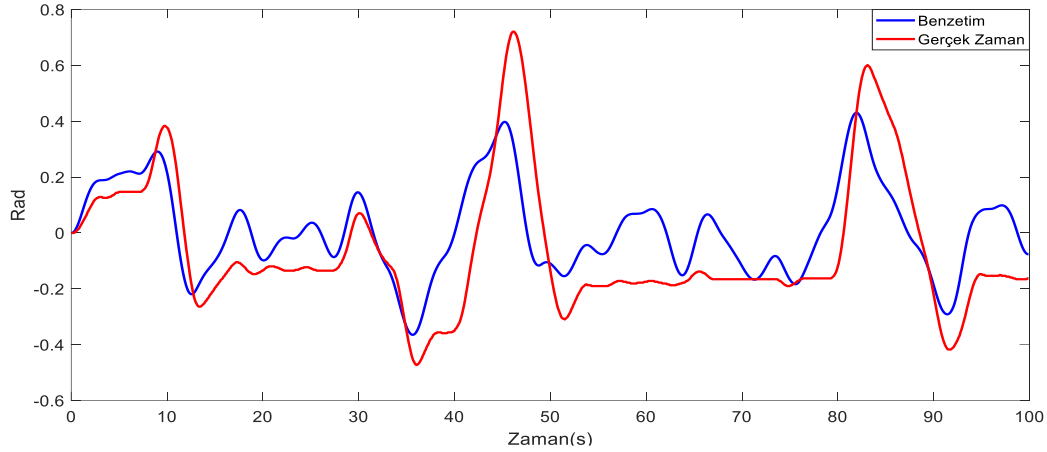


Şekil 3.17. TRMS blok diyagramı

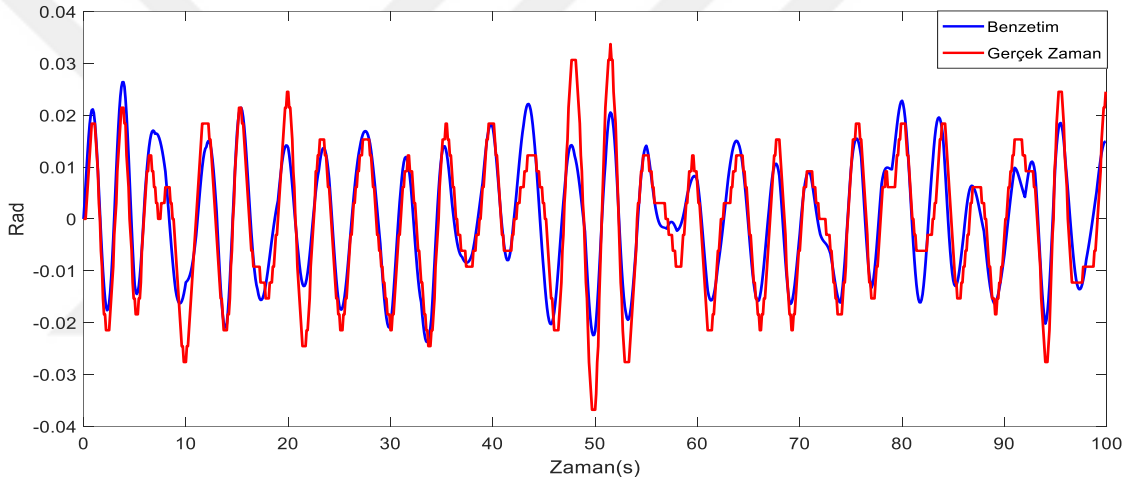
Şekil 3.17.'de elde edilen TRMS sistemine ait transfer fonksiyonlarının gerçek sistemi ne kadar ifade ettiklerine dair grafikler Şekil 3.18.'de ana rotor için, 3.19.'da kuyruk rotor için, 3.20.'de çapraz kuyruk rotor için ve Şekil 3.21.'de çapraz ana rotor için verilmiştir. Elde edilen her bir transfer fonksiyonu modeli ile gerçek sistem çıkışları arasındaki hatalar ise Şekil 3.22.'de ana rotor için, 3.23.'da kuyruk rotor için, 3.24.'de çapraz kuyruk rotor için ve Şekil 3.25.'de çapraz ana rotor için verilmiştir.



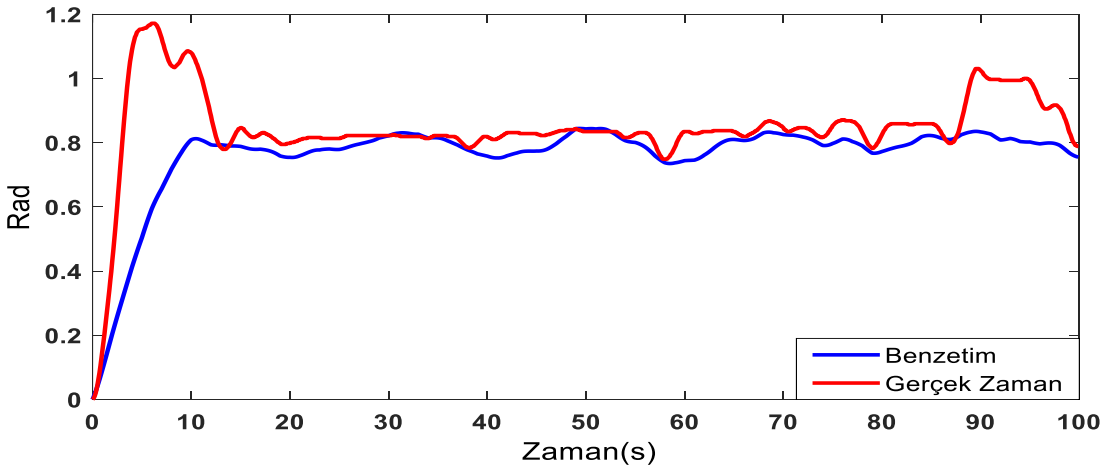
Şekil 3.18. Ana rotor model çıkış sinyalinin benzetim ve gerçek zaman ortamında karşılaştırılması



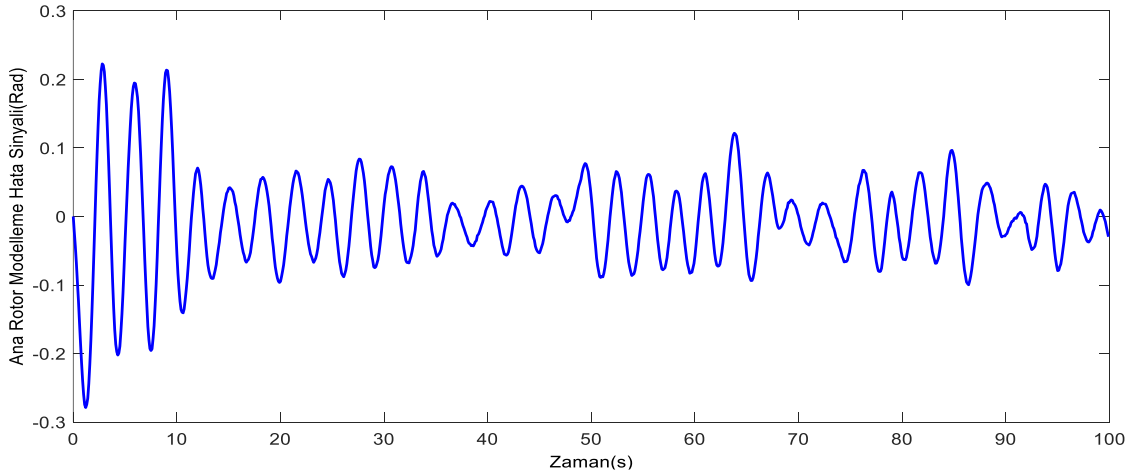
Şekil 3.19. Kuyruk rotor model sinyalinin benzetim ve gerçek zaman ortamında karşılaştırılması



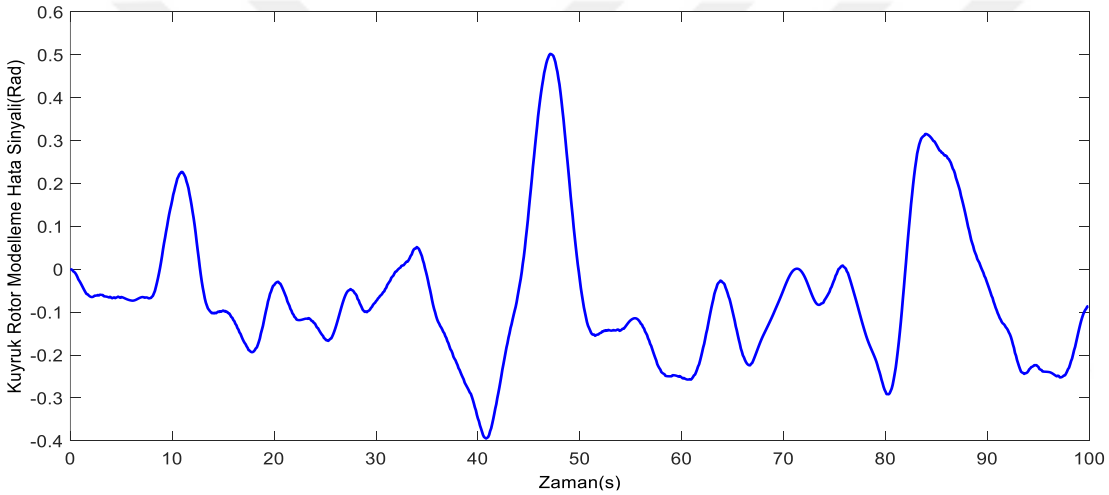
Şekil 3.20. Çapraz-kuyruk rotor model sinyalinin benzetim ve gerçek zaman ortamında karşılaştırılması



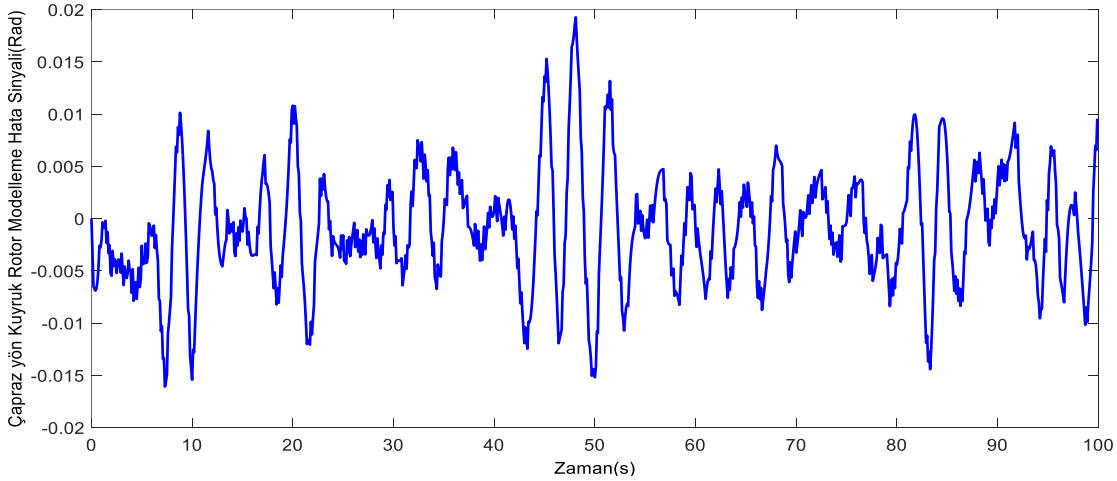
Şekil 3.21. Çapraz-ana rotor model sinyalinin benzetim ve gerçek zaman ortamında karşılaştırılması



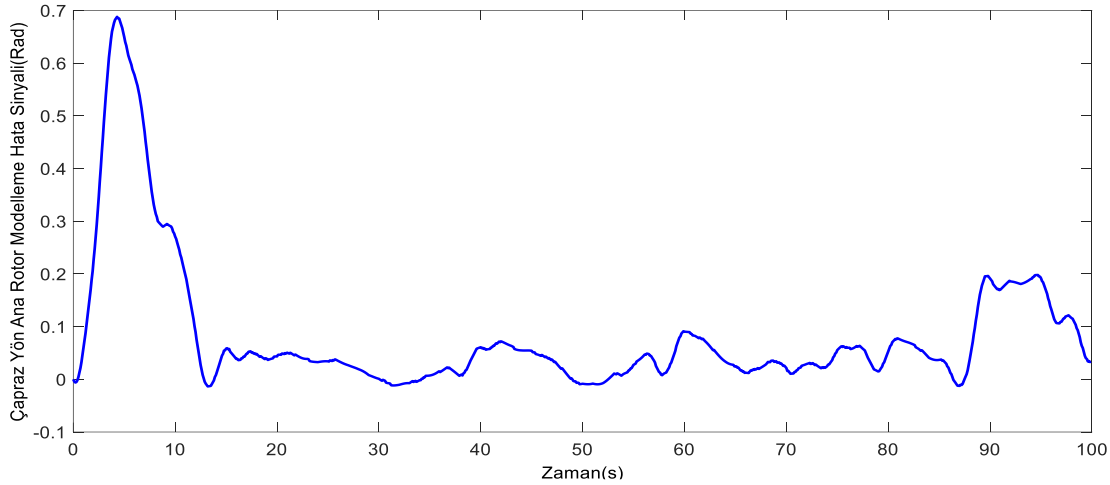
Şekil 3.22. Ana rotor modelleme hata sinyali



Şekil 3.23. Kuyruk rotor modelleme hata sinyali



Şekil 3.24. Çapraz-kuyruk rotor modelleme hata sinyali



Şekil 3.25. Çapraz-ana rotor modelleme hata sinyali

TRMS sistemi için elde edilen transfer fonksiyonları ile gerçek sistem çıkışları arasındaki hatalar ilişkin performans değerleri Çizelge 3.1.'de verilmiştir. Buna göre en başarılı modellemenin çapraz kuyruk rotor, sonrasında ise ana rotor için elde edildikleri görülmektedir. Bu durum, Şekil 3.23. ve 3.19 ile teyit edilmektedir.

Çizelge 3.1. Modelleme performans değerleri

	Ana Rotor	Kuyruk Rotor	Çapraz Kuyruk Rotor	Çapraz Ana Rotor
ISTE	664.64	12023	9.6604	2919.5
IAE	4.9340	14.3357	0.4385	8.5885
ISE	0.4446	3.0845	0.0031	2.4387

3.3. Optimizasyon

Optimizasyon uygulanabilir bir aralık veya arama uzayında tanımlanan değişkenlere karşılık gelen nesnel bir fonksiyonun en büyük veya en küçük değerlerini aramak demektir. Başka bir ifade ile, herhangi bir amaç için belirli işlemi uygulamak için en iyi çözümün elde edilme sürecine optimizasyon denir.

Optimizasyon, daha önceleri matematiksel bir denklem ile tanımlanıyordu. Ancak, matematiksel bir denkleme dayalı bu yöntemlerin dezavantajlarının olması ve esnek olmamaları nedeniyle doğadaki olaylar ve canlı davranışlarından yola çıkılarak yeni optimizasyon teknikleri geliştirilmiştir.

Doğadaki olayları ve canlı davranışlarını temel alarak geliştirilen ve Meta-Sezgisel ve Evrimsel Algoritmalar olarak da bilinen bu algoritmalardan bazıları aşağıda sıralanmıştır:

- Desen Arama (Pattern Search)
- Genetik Algoritma (Genetic Algorithm)
- Benzetimli Tavlama (Simulated Annealing)
- Tabu Arama (Tabu Search)
- Karınca Kolonisi Optimizasyonu (Ant Colony Optimization)
- Parçacık Sürü Optimizasyonu (Particle Swarm Optimization)
- Diferansiyel Gelişim Algoritması (Differential Evolution Algorithm)
- Uyum Arama (Harmony Search)
- Karışık Sıçrayan-Kurbağa Algoritması (Shuffled Frog-Leaping Algorithm)
- Bal Arısı Çiftleşme Optimizasyonu (Honey-Bee Mating Optimization)
- İstilacı Yabancı Ot Optimizasyonu (Invasive Weed Optimization)
- Merkez Kuvvet Optimizasyonu (Central Force Optimization)
- Biyo-coğrafya Tabanlı Optimizasyon (Biogeography-Based Optimization)
- Ateşböceği Algoritması (Firefly Algorithm)
- Yerçekimi Arama Algoritması (Gravity Search Algorithm)
- Yarasa Algoritması (Bat Algorithm)
- Bitki Yayılım Algoritması (Plant Propagation Algorithm)
- Su Döngüsü Algoritması (Water Cycle Algorithm)
- Simbiyotik Organizmalar Araması (Symbiotic Organisms Search)
- Kapsamlı Gelişimsel Algoritma (Comprehensive Evolutionary Algorithm)

Doğadaki olayları ve canlı davranışlarını temel alarak geliştirilen algoritmalardan en sık kullanılanı olması nedeniyle bu tez çalışmasında denetleyicilerin ayar parametrelerinin hesaplanmasında PSO kullanılmıştır.

3.3.1 Parçacık Sürü Optimizasyonu

Kennedy ve Eberhart (1995), doğadaki çeşitli organizmaların kaynaşma stratejilerinden esinlenerek parçacık sürüsü optimizasyonunu (PSO) geliştirmişlerdir. PSO, kuşlar veya balıklar gibi canlıların bir hedefe ulaşmak için sergiledikleri sosyal davranışa dayalı kavramsal bir algoritma olarak da tanımlanabilir.

PSO sürü mantığına dayalı bir algoritma olarak da bilinir. Sürü mantığı bireyler arasında ve bireyler ile çevreleri arasındaki yerel etkileşimlerden kaynaklanan kolektif davranışa odaklanır (Haddad, Solgi ve Loáiciga 2017).

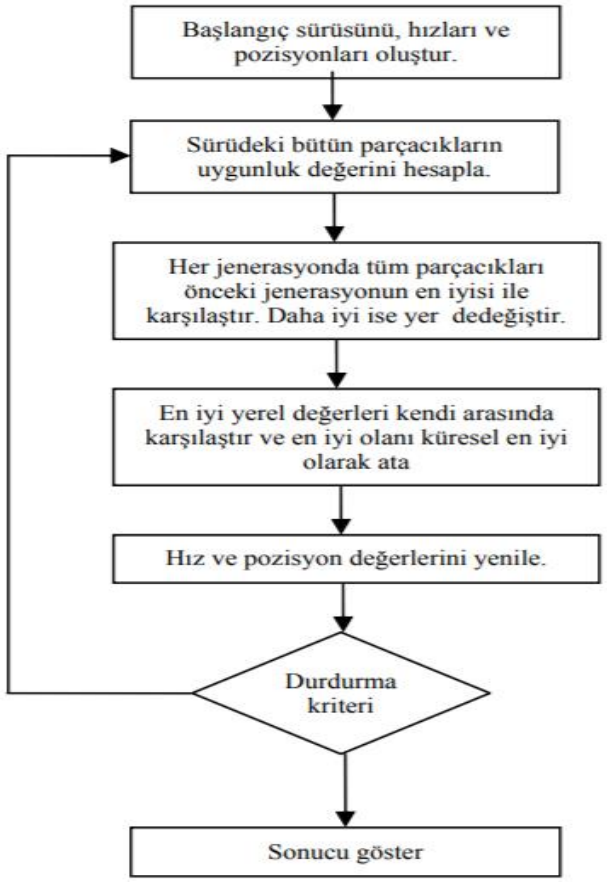
Arıkovanı, karınca kolonileri, balık sürüsü, kuş sürüleri ve hayvan toplulukları sürü mantığına sahip sistemlere örneklerdir. PSO, sürü mantığının en yaygın örneklerinden biridir. PSO algoritması, kuşların sosyal davranışlarına dayanmaktadır ve kuş sürülerinin davranışlarını simüle eder. Bir grup kuşun rastgele bir alanda yiyecek aradığı varsayılsın. Yiyecek arayan kuşlar yiyeceğin nerede olduğunu bilmediklerinden, yiyecek bulmak için en etkili stratejilerden biri, kuşların yiyeceğe en yakın olduğu bilinen kuşu takip etmesidir.

PSO, optimizasyon probleminin çözüm uzayındaki her bir çözümü bir kuş olarak belirler ve bir parçacık olarak adlandırılır. Tüm parçacıklar, optimize edilecek nesnel fonksiyon tarafından değerlendirilen ve yiyeceğe olan uzaklıklarını ölçen uygunluk değerine sahiptir. Her parçacık, parçacığın uçmasını yönlendiren bir hıza da sahiptir. En iyi konumdaki parçacık liderdir ve diğer parçacıklar lideri takip eder. Parçacıklar lideri takip ederek çözüm uzayının tamamında uçarlar. Her parçacık o ana kadar kullanılan en iyi bireysel pozisyonu ve grupta elde edilen en iyi pozisyonu temel alarak bir sonraki pozisyonunu belirler. Başka bir ifadeyle, her parçacık iki pozisyonla güncellenir. İlki, parçacığın şimdiye kadar bulunduğu mevcut en iyi konumdur. Diğeri, parçacıkların popülasyonundaki herhangi bir parçacık tarafından o ana kadar elde ettikleri en iyi konumdur. Bu en iyi konumlardan ilki en iyi bireysel konum, ikincisi ise en iyi küresel konumdur (Haddad, Solgi ve Loáiciga 2017). Çizelge 3.2. bir PSO algoritmasında bulunması gereken özellikleri listeler.

Çizelge 3.2. Parçacık Sürü Optimizasyonu Özellikleri (Haddad, Solgi ve Loáiciga 2017).

Genel Algoritma	**Parçacık Sürü Optimizasyonu**
Karar Değişkeni	Parçacığın her boyuttaki konumu
Çözüm	Parçacığın konumu
Eski Çözüm	Parçacığın eski konumu
Yeni Çözüm	Parçacığın yeni konumu
En İyi Çözüm	Parçacıkların lideri
Uygunluk Fonksiyonu	Parçacık ve yiyecek arasındaki mesafe
İlk Çözüm	Rastgele parçacık
Seçim	-
Yeni Çözüm Üretme Süreci	Belirli bir hızda ve yönde uçmak

PSO algoritması arama uzayı içinde rastgele başlatılan parçacıkların konumu ve hızı ile başlar. Parçacıkların uygunluk değerleri hesaplanır. Bu ilk uygunluk değerleri ve pozisyonlar, sırasıyla en iyi bireysel uygunluk değerleri ve en iyi bireysel pozisyonlarıdır. Tüm parçacıkların konumu ve hızı, bireysel ve küresel en iyi konumlarına dayalı yeni çözümler üretmek üzere güncellenir. Bir sonraki tekrar işleminde güncellenmiş parçacıkların uygunluk değerleri yeniden hesaplanır , bireysel ve küresel en iyi pozisyonlar güncellenir. Bu şekilde yeni parçacıkların konumları ve hızları belirlenir. PSO algoritması, bireysel ve global olarak en iyi pozisyonları güncellemeye ve sonlandırma kriterleri yerine getirilinceye kadar yeni pozisyonlar oluşturmaya devam eder (Kennedy ve Eberhart (1995)). Şekil 3.26. bir PSO algoritmasının akış şemasını göstermektedir.



Şekil 3.26. PSO Akış Şeması

3.3.2. İlk Parçacık Popülasyonunu Oluşturma

PSO, optimizasyon probleminin olası her bir çözümünü bir parçacık olarak belirler. Parçacıkların konumları, bir boyutlu optimizasyon problemindeki karar değişkenlerini temsil eder. Parçacıklar $1\times N$ boyutunda bir dizi olarak belirtilir. Bu dizi aşağıdaki gibi tanımlanır (Haddad, Solgi ve Loáiciga 2017):

$$Parçaçık = X = (x_1, x_2, ..., x_i, ..., x_N) \tag{3.1}$$

Burada, X : optimizasyon probleminin olası bir çözümünü, x_i : X çözümünün *i*.ninci karar değişkenini ve N : karar değişkenlerinin sayısını belirtir.

PSO algoritması $M\times N$ (M ve N, sırasıyla, çözüm popülasyonunun boyutunu ve karar değişkenlerinin sayısını belirtirler) boyutundaki parçacıkların bir matrisini rastgele üreterek başlar. Dolayısıyla, çözüm matrisi aşağıdaki gibidir (her biri N tane karar değişkeni içeren M tane çözüm satırı vardır) (Haddad, Solgi ve Loáiciga 2017):

$$Popülasyon = \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ \vdots \\ X_j \\ \vdots \\ X_M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{1,1} & x_{1,2} & \cdots & x_{1,i} & \cdots & x_{1,N} \\ x_{2,1} & x_{2,2} & \cdots & x_{2,i} & \cdots & x_{2,N} \\ & & & \vdots & & \\ x_{j,1} & x_{j,2} & \cdots & x_{j,i} & \cdots & x_{j,N} \\ & & & \vdots & & \\ x_{M,1} & x_{M,2} & \cdots & x_{M,i} & \cdots & x_{M,N} \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

Burada, X_j: j.ninci çözümü, $x_{j,i}$: j.ninci çözümün i.ninci karar değişkenini, M: popülasyon büyüklüğünü ifade etmektedir.

3.3.3. Bireysel ve Global En İyi Pozisyonlar

Her parçacık, bireysel ve küresel en iyi pozisyonlara dayalı çözüm uzayında hareket eder. Her bir parçacık, çözüm uzayında iki parametre türüyle (*Pbest* ve *Gbest*) en iyi veya en uygun pozisyonu elde etmeye çalışır. Burada, *Pbest* ve *Gbest*, sırasıyla, parçacık ve sürünün geçmişlerindeki en iyi konumlarıdır. Her *j* parçacığı için aşağıdaki gibi bir *Pbest* vardır (Haddad, Solgi ve Loáiciga 2017):

$$Pbest_j = (P_{j,1}, P_{j,2}, \cdots, P_{j,i}, \cdots, P_{j,N}) \quad j = 1,2,\cdots,M \quad (3.3)$$

Burada, $Pbest_j$ j.ninci parçacığının en iyi pozisyonunu, $p_{j,i}$ i.ninci boyutdaki j.ninci parçacığının en iyi konumunu ifade etmektedir.

Gbest, öğeleri sürüde elde edilen en iyi konumu tanımlayan bir $1 \times N$ dizisidir (Haddad, Solgi ve Loáiciga 2017):

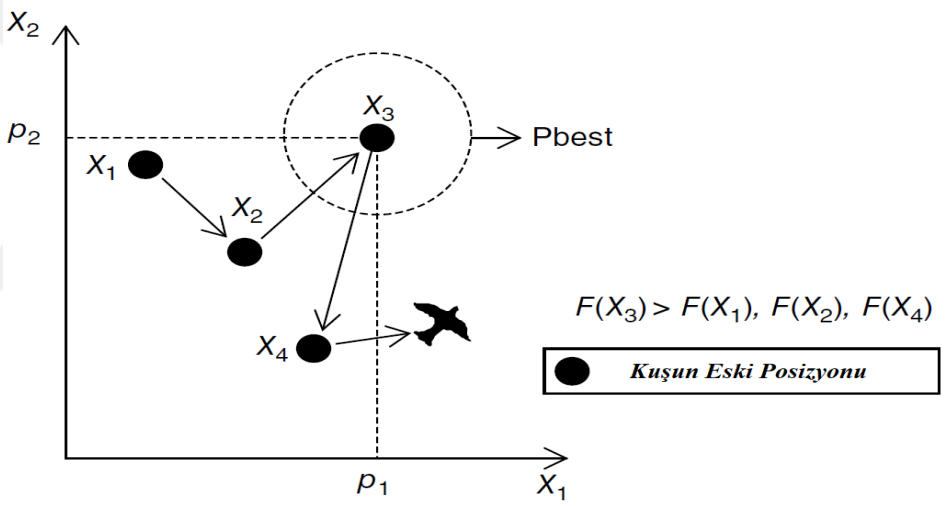
$$Gbest = (g_1, g_2, \cdots, g_i, \cdots g_N), \ tüm \ j \quad (3.4)$$

Burada, $Gbest$ sürünün tüm aramalar boyunca en iyi pozisyonunu, ve g_i i.ninci boyutdaki sürünün arama süresindeki en iyi pozisyonudur.

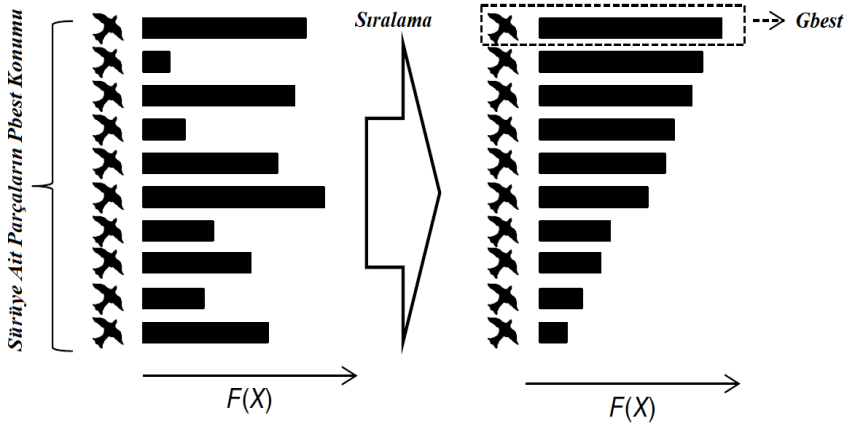
İlk parçacık popülasyonu rastgele üretilir ve uygunluk değerleri hesaplanır. Bu ilk uygunluk değerleri ve pozisyonlar en iyi bireysel uygunluk değerlerini ve en iyi bireysel pozisyonları ($Pbest$) oluşturur. Tüm parçacıklar arasındaki en iyi pozisyon küresel en iyi pozisyon ($Gbest$) olarak kabul edilir. Algoritmanın her tekrarında $Pbest$ ve $Gbest$ değerleri güncellenir. Her parçacığın en iyi bireysel konumu ($Pbest$), parçacığın yeni konumunun uygunluk değeri $Pbest$'ten daha iyi olduğunda güncellenir.

Şekil 3.27. bir optimizasyon probleminde en iyi bireysel konum kavramını göstermektedir. Şekil 3.27.'de iki boyutlu bir alanda uçan bir kuşun rotası tasvir edilmiştir (Haddad, Solgi ve Loáiciga 2017). Bu kuş X_1, X_2, X_3 ve X_4 pozisyonları dahil olmak üzere farklı pozisyonları test eder. Bu kuş her pozisyonda (konumda) farklı miktarda yiyecek $\left[F(x)\right]$ bulur ve X_3 pozisyonunu en iyi konum olarak hafızasına kaydeder. Daha fazla yiyecek içeren bir konuma ulaşana kadar bu X_3 konumunu en iyi konum olarak hafızasına kaydeder (Haddad, Solgi ve Loáiciga 2017).

Bir optimizasyon probleminde küresel en iyi konum kavramı Şekil 3.28.'de gösterilmiştir. *Gbest*, optimizasyon araması sırasında hesaplanan en iyi noktadır (Haddad, Solgi ve Loáiciga 2017).



Şekil 3.27. İki boyutlu bir optimizasyon probleminde en iyi bireysel pozisyon kavramları



Şekil 3.28. Bir maksimizasyon probleminde global en iyi pozisyon kavramı

3.3.4. Parçacıkların Hızları

Her parçacık, parçacığın konum değiştirmesini yönlendiren ve parçacığın bir sonraki konumunu belirleyen bir hıza sahiptir. Parçacıklar hızlarını bulundukları konumları değiştirmek için kullanırlar. Parçacıkların hızı *Pbest* ve *Gbest*'e göre hesaplanır. $1\times N$ dizisi ile temsil edilen *j*.ninci parçacığının hızı V_j aşağıdaki gibi ifade edilir (Haddad, Solgi ve Loáiciga 2017):

$$\mathrm{V}_j=(\mathrm{v}_{j,1},\mathrm{v}_{j,2},\ldots,\mathrm{v}_{j,i},\ldots,\mathrm{v}_{j,N}), \qquad j=1,2,...,M \tag{3.5}$$

Burada, V_j: *j*.ninci parçacığının hızıdır. $\mathrm{v}_{j,i}$ ise aşağıdaki gibi hesaplanan *i*.ninci boyutdaki *j*.ninci parçacığının hızıdır (Haddad, Solgi ve Loáiciga 2017):

$$\begin{aligned} &v_{j,i}^{(yeni)}=\omega\times v_{j,i}+C_1\times Rand\times\left(p_{j,i}-x_{j,i}\right)+C_2\times Rand\times\left(g_i-x_{j,i}\right)\\ &j=1,2,\ldots,M \qquad i=1,2,\ldots,N \end{aligned} \tag{3.6}$$

Denklem (3.6)'da, $v_{j,i}^{(yeni)}$ *i*.ninci boyutdaki *j*.ninci parçacığının yeni hızını, $\mathrm{v}_{j,i}$ *i*.ninci boyutdaki *j*.ninci parçacığının önceki hızını, ω atalet ağırlık parametresini, *Rand* [0,1] aralığında rastgele bir değeri, C_1 kavramsal parametreyi, C_2 sosyal parametreyi ifade etmektedir. C_1 ve C_2 parametreleri *Pbest* ve *Gbest* değerlerinin optimal bir noktaya doğru hareketini kontrol eder ve genellikle $C_1=C_2=2$ alınır (Haddad, Solgi ve Loáiciga 2017). C_1 ve C_2 birden büyükse farklı yönler boyunca *Pbest* ve *Gbest*'e doğru hareket etmek mümkün olmaktadır (Haddad, Solgi ve Loáiciga 2017).

Hızın alt ve üst sınırları, bir parçacığın hızının değişimini aşağıdaki gibi sınırlamaktadır (Haddad, Solgi ve Loáiciga 2017):

$$V_i^{(L)}\le v_{j,i}^{(yeni)}\le V_i^{(U)}, \qquad j=1,2,\ldots,M, \qquad i=1,2,\ldots,N \tag{3.7}$$

Burada, $V_i^{(L)}$ ve $V_i^{(U)}$, sırasıyla, *i*.ninci boyut boyunca hızın alt ve üst sınırlarıdır.

Atalet ağırlığı parametresi ω, sürünün yakınsamasında önemli bir role sahiptir ve mevcut hızın etkilerini kontrol eder. Büyük veya küçük ω değerleri, sırasıyla geniş ve dar uzayda arama yapmaya neden olur. Atalet ağırlığı parametresi, algoritma ilerledikçe aşağıdaki gibi değişebilir (Haddad, Solgi ve Loáiciga 2017):

$$\omega_t = \omega_0 - \left[\left(\omega_0 - \omega_t \right) \times \frac{t}{T} \right], \ t = 1,2,\ldots,T \tag{3.8}$$

(3.8) nolu denklemde, ω_0 başlangıç atalet ağırlığını, ω_T son yineleme için atalet ağırlığını, T toplam yineleme sayısını vermektedir. ω değeri algoritma tekrarlandıkça değişir (Haddad, Solgi ve Loáiciga 2017).

3.3.5. Parçacıkların Konumlarını Güncelleme

Parçacıklar yeni konumlar oluşturmak için eski konumundan yeni konumlarına hareket ederler. Bu parçacıkların hareketi, hızlara bağlı olarak gerçekleştirilir. Bir parçacığın konumu aşağıdaki şekilde güncellenir (Haddad, Solgi ve Loáiciga 2017):

$$X_j^{(yeni)} = (x'_{j,1}, x'_{j,2}, \ldots, x'_{j,i}, \ldots, x'_{j,N}), \ j = 1,2,\ldots,M \tag{3.9}$$

$$x'_{j,i} = x_{j,i} + v_{j,i}^{(yeni)}, \ i = 1,2,\ldots,N \tag{3.10}$$

Burada, $X_j^{(yeni)}$ j.ninci yeni çözümü, $x'_{j,i}$ j.ninci yeni çözümünün i.ninci karar değişkeninin yeni değerini ifade etmektedir. Yeni oluşturulan M tane çözüm tüm eski çözümler ile yer değiştirilir (Haddad, Solgi ve Loáiciga 2017).

3.3.6. Sonlandırma Kriteri

Sonlandırma kriteri algoritmanın ne zaman sonlandıracağını belirler. İyi bir sonlandırma kriteri seçmek, algoritmanın en iyi şekilde yakınsaması için önemli bir role sahiptir. Tekrarlama sayısı, çalışma süresi ve ardışık yinelemeler arasındaki iyileştirmeler bir PSO algoritması için ortak sonlandırma kriteridir (Haddad, Solgi ve Loáiciga 2017).

3.3.7. Kullanıcı Tanımlı PSO Parametreleri

Çözümlerin popülasyon büyüklüğü (M), başlangıç atalet ağırlığının değeri (ω_0), atalet ağırlığının nihai değeri (ω_T) ve sonlandırma kriteri PSO'nun kullanıcı tanımlı parametreleridir. Parametrelerin iyi bir seçimi, belirli bir problemin çözüm uzayı ile ilgilidir ve genellikle bir problem için optimum parametre ayarı, diğer problemler için sınırlı fayda sağlar. Sonuç olarak, iyi bir parametre ayarının belirlenmesi genellikle

çok zaman alıcı deneylerin yapılmasını gerektirir. Derinlemesine uygulama ve deneyim, uygun parametrelerin seçilmesinin anahtarıdır. (Haddad, Solgi ve Loáiciga 2017).

3.4. Denetleyici Tasarımı

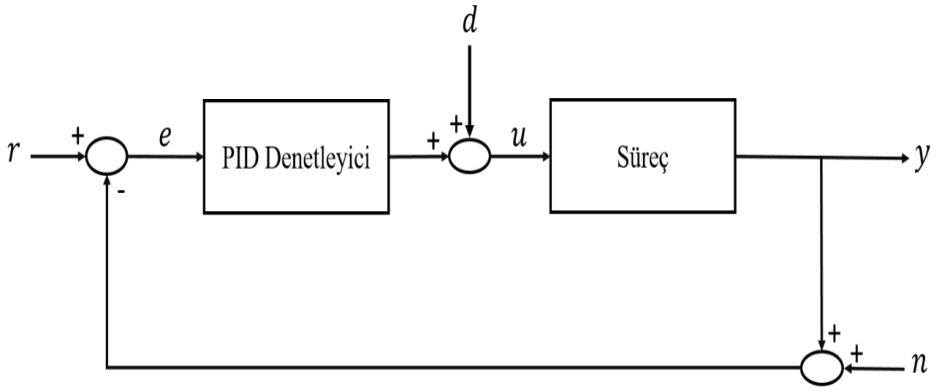
Bir sistemin arzu edilen hedefler doğrultusunda davranmasını sağlayan denetleyicilerin analizi ve tasarımı kontrol teorisinin çalışma alanlarındandır. Bu alanda, farklı özellik ve yapılarda denetleyicileri literatürde bulmak mümkündür. Bu denetleyicilerin endüstriyel uygulamalarda en yaygın kullanılanı PID denetleyicilerdir (Åström ve Hägglund 1995). Son zamanlarda literatürde yaygın olarak araştırılan ve PID denetleyicilere göre çok daha iyi kapalı çevrim performans sağlayan bir diğer denetleyici de PI-PD denetleyicilerdir.

Bu kısmında, Matlab sistem tanımlama aracı ile elde edilen TRMS sistemine ait ana rotor, kuyruk rotor ve çapraz yollar transfer fonksiyonlarının kullanılması ile TRMS'nin denetlenmesinde kullanılacak olan PI-PD ve PID denetleyicilerin Parçacık Sürü Optimizasyonu ile tasarımları verilmiştir. Öncelikle PID ve PI-PD denetleyiciler hakkında kısa bilgiler verilecektir.

3.4.1. PID Denetleyici

Kontrol mühendisliği alanında her geçen gün yeni teknikler geliştirilmesine rağmen, PID denetleyiciler kontrol alanındaki problemlerin çözümünde halen yaygın olarak kullanılmaktadır. PID denetleyiciler, farklı sistemlerin kontrolünde iyi performans sunmaları, farklı çalışma şartlarında kararlı bir şekilde çalışmaları, ayarlaması gereken birkaç parametreye sahip olması ve bu parametrelerin hesaplanmalarının kolay olması, PID denetleyicilerin kontrol sanayinde kullanılmasını cazip hale getirmektedir.

PID denetleyici ile kontrol edilen bir sistemin kapalı çevrim kontrol blok diyagramı Şekil 3.29.'da gösterilmiştir.



Şekil 3.29. PID denetleyici ile yapılan bir kapalı çevrim kontrol sistemi

Şekil 3.29.'da verilen kapalı çevrim kontrol sisteminde *u* kontrol sinyalini, *y* kontrol edilen değişkeni, *r* referans girişi, *e* takip hatasını, *d* bozucu girişi ve *n* ölçüm gürültüsünü ifade etmektedir.

PID denetleyici; oransal, integral ve türev olmak üzere üç adet bileşenden oluşmakta olup girişi ve çıkışı arasındaki ilişki aşağıdaki denklem ile verilmektedir.

$$G_c(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s \tag{3.11}$$

Denklem (3.11), PID denetleyicinin 3 adet ayar parametresine sahip olduğunu göstermektedir: K_p oransal kazanç, K_i integral kazancı, K_d türev kazancı.

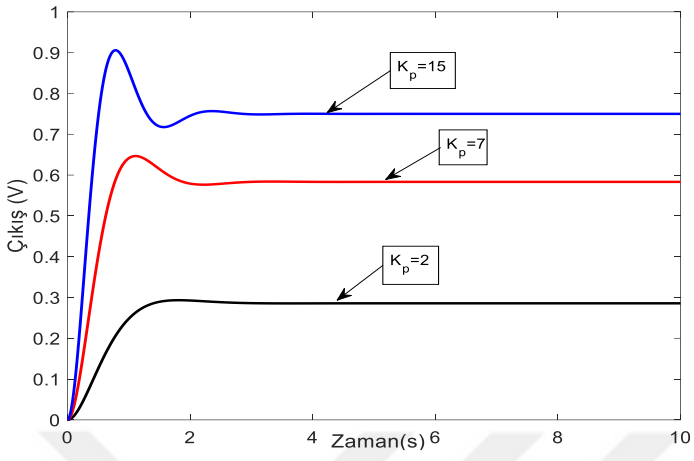
PID denetleyicinin ayar parametrelerinin sistem çıkışı üzerindeki etkisi, açık çevrim transfer fonksiyonu

$$\frac{1}{s^2 + 4s + 5}$$

ile verilen bir sürecin kapalı çevrim cevapları ile analiz edilecektir. Denklem (3.11) ile verilen PID ve yukarıda verilen süreç transfer fonksiyonlarının Şekil 3.29.'da verilen kapalı çevrim blok yapısına yerleştirildiğini ve sisteme birim basamak fonksiyon uygulandığı farz edilsin. Sistemin cevabı incelenirken kontrol edilen sistemin gerilim cinsinden bir çıkışa sahip olduğu, bozucu sinyal ve ölçüm gürültüsünün olmadığı kabul edilsin.

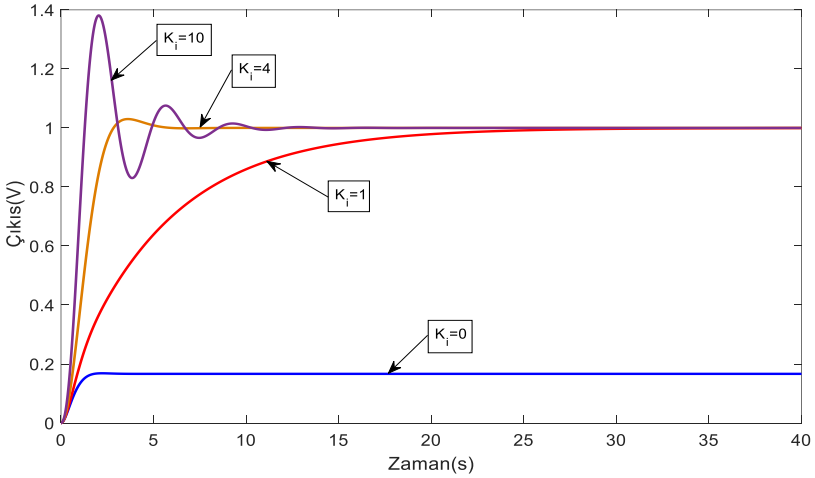
Şekil 3.30.'te benzetim ortamında PID denetleyicinin integral ve türev kazanç

(K_i ve K_d) değerleri sıfır alınarak farklı oransal kazanç (K_p) değerlerine göre sistem çıkışları verilmiştir.



Şekil 3.30. $K_i = 0$ ve $K_d = 0$ için farklı K_p değerlerinde kapalı çevrim sistem çıkışları

Şekil 3.30.'da artan K_p değeri ile sistemin daha hızlı cevap verdiği görülmektedir. K_p değerindeki artış, sistemdeki kalıcı durum hatasını azaltmakta ancak tamamen yok etmemektedir. Ayrıca, K_p değerinin artması ile sistem cevabındaki aşmaların da arttığı görülmektedir.



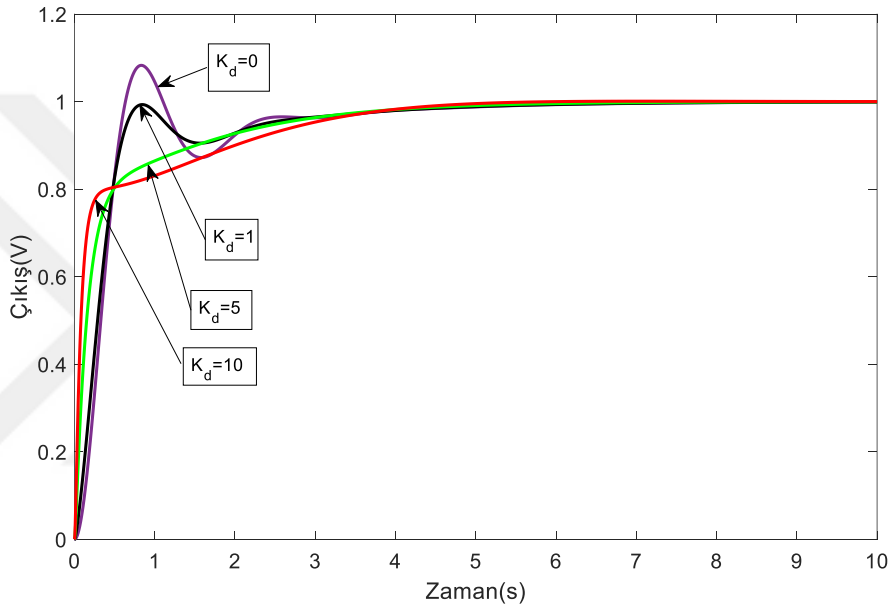
Şekil 3.31. $K_p = 1$ ve $K_d = 0$ için farklı K_i değerlerinde kapalı çevrim sistem çıkışları

Şekil 3.31.'de benzetim ortamında PID denetleyicinin oransal kazancı $K_p = 1$ ve türev kazancı ise $K_d = 0$ olarak alındığında, integral kazanç (K_i) değerinin sistem çıkışı

üzerindeki etkisi farklı K_i için verilmiştir.

Şekil 3.31.'deki kapalı çevrim sistem çıkış cevapları incelendiğinde, K_i değerindeki artışın kalıcı durum hatasını ortadan kaldırıldığı ve sistemin cevap hızının arttığı ancak oluşan aşma miktarının arttırdığı görülmektedir.

Şekil 3.32.'de, PID denetleyicinin oransal kazancının $K_p = 15$ ve integral kazancının $K_i = 10$ olarak alınması ile farklı K_d değerleri için elde edilen kapalı çevrim çıkış cevapları gösterilmektedir.



Şekil 3.32. $K_p = 15$ ve $K_i = 10$ için farklı K_d değerlerinde kapalı çevrim sistem çıkışları

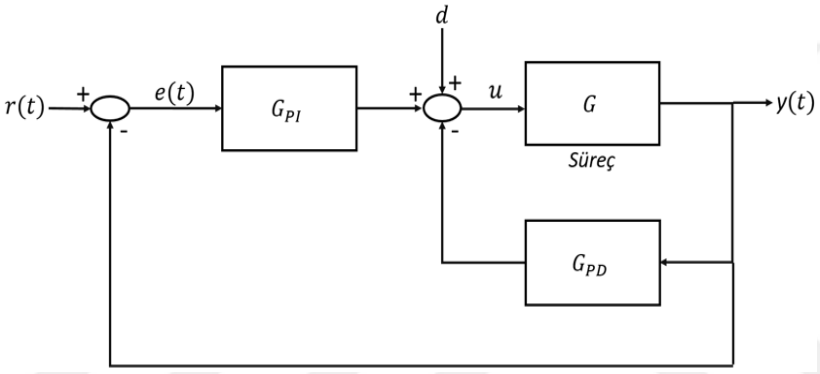
Şekil 3.32.'de verilen kapalı çevrim cevaplar incelendiğinde, türev kazanç değerinin artması ile sistem cevabındaki aşma miktarının azaldığı ve sistem cevabının yavaşladığı görülmektedir.

3.4.2. PI-PD Denetleyici

PI-PD denetleyici, açık çevrim kararsız, integratörlü, ve karmaşık kutupları sanal eksene yakın olan yerleştirilmiş artı zaman gecikmeli sistemlerin denetiminde PID denetleyicilere göre oldukça daha iyi sonuçlar vermektedir (Kaya 2003).

PID denetleyici yapısında ileri yol üzerinde türev, integral ve oransal bileşenler bulunur ve bu bileşenler sistem çıkışıyla kapalı çevirim kontrol sisteminin referans girişi arasındaki hatayı etkilerler. PID denetleyiciler ile denetimde, sistemde meydana gelebilecek ani bir sinyal değişiminde, türev teriminden dolayı, türev vurması olarak adlandırılan istenmeyen bir durum oluşabilir.

Literatürde, özellikle kararsız ve integratörlü süreçlerin kontrolünde daha iyi kapalı çevrim cevapları elde etmek için, PD kısmının iç döngüye alındığı ve PI kısmının ileri yol üzerine yer aldığı PI-PD denetleyicinin (Şekil 3.33.) kullanılması önerilmiştir (Kaya, 2003;Kaya, Tan ve Atherton 2006).



Şekil 3.33. PI-PD denetleyici yapısı

Şekil 3.33.'te verilen PI-PD denetleyici yapısında *u* kontrol sinyalini, *y* kontrol edilen değişkeni, *r* referans girişi, *e* takip hatasını ve *d* bozucu girişi ifade etmektedir. Şekil 3.33.'te PI ve PD denetleyicilere ait ideal transfer fonksiyonları aşağıda verilmiştir:

$$G_{PI}(s) = K_c + \frac{K_i}{s} \tag{3.12}$$

$$G_{PD}(s) = K_f + K_d s \tag{3.13}$$

PI-PD denetleyici yapısı ile açık çevrim kararsız veya integratörlü süreçler iç döngüde yer alan PD denetleyici sayesinde kararlı hale getirilebilmekte ve dolayısıyla ileri yol üzerindeki PI denetleyici ile daha iyi bir denetim sağlanabilmektedir. Ayrıca, iç döngüye taşınan türev terimi ile türev vurması olayı da engellenmiş olmaktadır.

3.4.3. İntegral Performans İndeksi

Kapalı çevrim geri beslemeli bir sistem, zamanın bir fonksiyonu olarak hatayı en düşük hale getirir. Bu işlemi yapmak için geri beslemeli bir sistemin zaman cevabını belirleyen uygun bir kıstas aşağıdaki bağıntı ile gösterilebilir:

$$J = \int_0^\infty \phi\left[e(t), t\right] dt \tag{3.14}$$

Denklem (3.14) ile verilen bağıntı integral performans kriteri olarak adlandırılır. Bir sistemin en uygun dinamik performansı (3.14)'de verilen bağıntıda J 'nin değerini en az yapan denetleyici parametreleri ile elde edilebilir. İntegral performans kriteri farklı bağıntılar ile verilebilir. Elde edilen en uygun kontrolör parametreleri doğrudan kullanılan kriter formuna bağlıdır (Kaya, 1999).

En sık kullanılan integral performans kriterlerinden ikisi hatanın karesinin integrali (Integral of Squared Error, ISE) ve hatanın mutlak değerinin integralidir (Integral of Absolute Error, IAE). ISE ve IAE kriterlerine ait performans indeksleri, sırasıyla, aşağıda verilmiştir.

$$J_{ISE} = \int_0^\infty e^2(t)\, dt \tag{3.15}$$

$$J_{IAE} = \int_0^\infty \left|e(t)\right| dt \tag{3.16}$$

Zhuang (1992) ISE'nin zaman ağırlıklı yapısını, Graham ve Lathrop (1953) ise IAE'nin zaman ağırlıklı yapısını ortaya koymuşlardır (Kaya 1999).

Aşağıda, sırasıyla, zaman ağırlıklı hatanın karesinin integrali ve zaman ağırlıklı hatanın mutlak değerinin integrali kriterlerine ait genel biçimleri verilmiştir.

$$J_i(\delta) = \int_0^\infty [t^i\, e(\delta, t)]^2\, dt \tag{3.17}$$

$$J_i'(\delta) = \int_0^\infty t^i \left|e(\delta, t)\right| dt \tag{3.18}$$

Yukarıda verilen (3.17) ve (3.18) nolu denklemlerde, δ denetleyici ayar parametrelerini temsil etmektedir (Kaya 1999). Denklem (3.17)'de i'nin 0, 1, 2 ve 3 olarak seçilmesine göre, integral performans indeksi, ISE, ISTE, IST^{2}E, IST^{3}E kriteri olarak adlandırılmaktadır. Denklem (3.18)'de i'nin 0 ve 1 seçilmesi durumunda, integral performans indeksi, IAE ve ITAE kriterleri olarak adlandırılır.

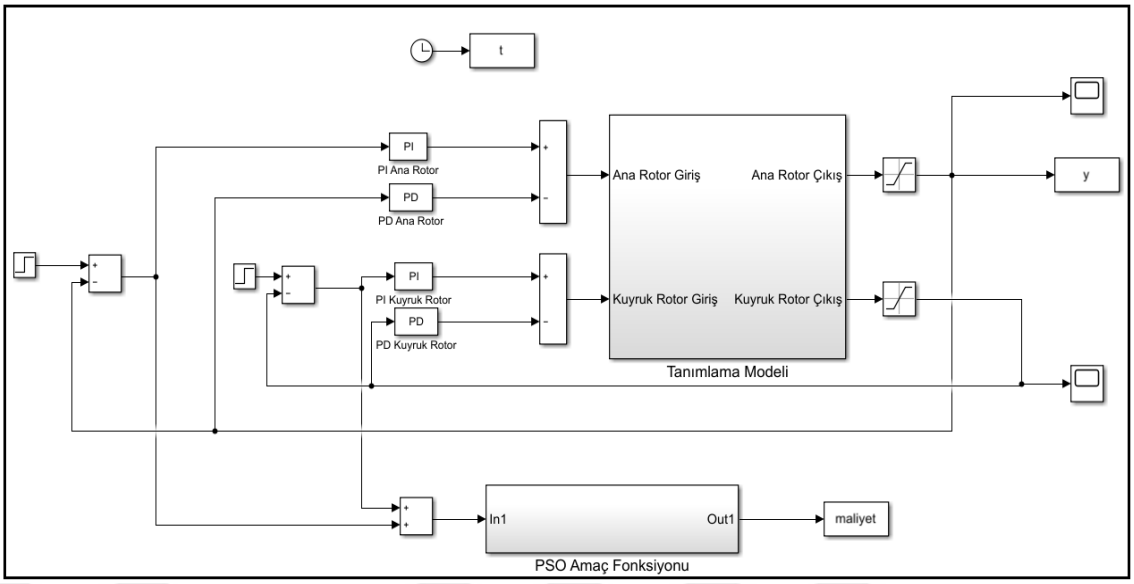
TRMS'ye ait ana ve çapraz yollardaki transfer fonksiyonları, sistemi mümkün olan en iyi derecede modelleyebilmek için, yüksek dereceden olmaktadır. Bu durum PI-PD denetleyicinin ayar parametrelerinin analitik olarak hesaplanmasını oldukça karmaşık hale getirmektedir. Dolayısıyla bu tez çalışmasında, PI-PD ve PID denetleyicilerin ayar parametreleri PSO yardımıyla hesaplanmıştır. ISE kriteri ile tasarımda kapalı çevrim performans genellikle osilasyonlu olmaktadır. IST^{2}E veya IST^{3}E kriterleri ile tasarımda ise kapalı çevrim performanslar göreceli olarak yavaş olmaktadır. Dolayısıyla bu tez çalışmasında, PSO algoritmasında amaç fonksiyonu olarak ISTE (Integral Squared Time Error) kriteri kullanılmıştır.

3.4.4. PI-PD ve PID Denetleyici Ayar Parametrelerinin Hesaplanması

Sistem tanımlama işlemlerinden sonra PI-PD ayar parametrelerinin PSO yardımıyla bulunması üzerinde çalışılmıştır. Bu ayar parametreleri bulunurken sürü içerindeki canlı sayısı 120 alınmıştır. Bu sürü içerisinde bulunan her bir canlının maksimum atacağı adım sayısı 550 olarak kullanılmıştır. PSO algoritmasında amaç fonksiyonu olarak ISTE (Integral Squared Time Error) kriteri kullanılmıştır:

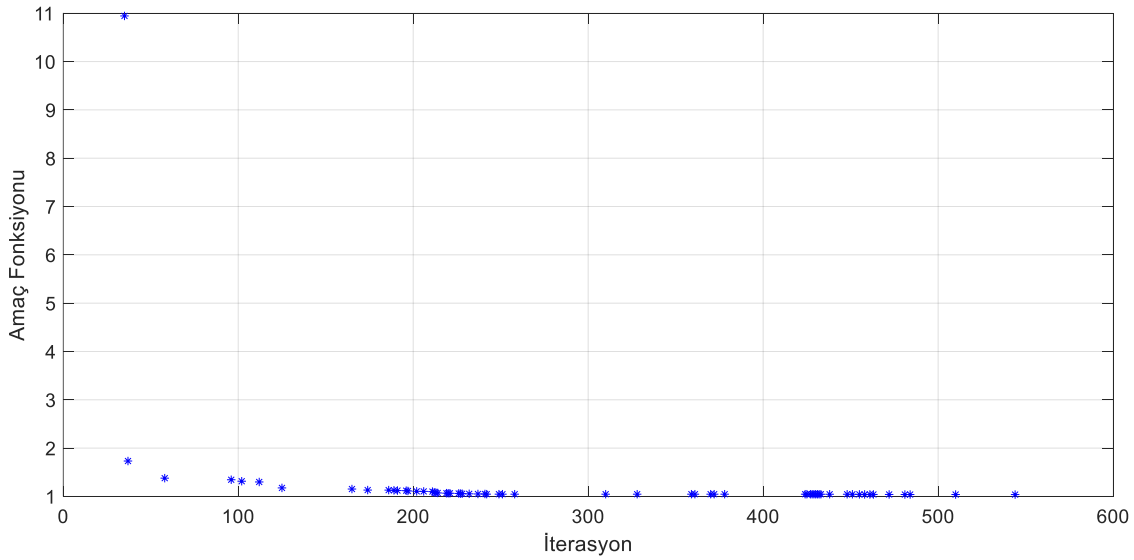
$$ISTE = \int_0^\infty t^2 e(t)^2 dt \tag{3.19}$$

Ana rotor ve kuyruk rotorun denetimini sağlayacak 2 adet PI-PD denetleyicinin ayar parametreleri olan K_{c1}, T_{i1}, K_{f1}, T_{f1}, K_{c2}, T_{i2}, K_{f2}, T_{f2} için 8 adet bilinmeyen sayısı kullanılarak PSO algoritması Matlab üzerinde çalıştırılmıştır.



Şekil 3.34. PSO ile TRMS'ye ait Denetleyici Tasarımı Matlab/Simulink Devresi

Şekil 3.34.'te verilen Matlab/Simulink devresi ve Matlab üzerinde PSO algoritması sekron şekilde çalıştırılınca Şekil 3.35.'te PSO amaç fonksiyonunun iterasyona göre değişim grafiği elde edilmiştir. PI-PD denetleyiciye ait uygunluk fonksiyonunun en iyi olduğu aralık verilmiştir.



Şekil 3.35. PI-PD Uygunluk Fonksiyonu Değerleri

Optimizasyon sonucu bulunan her iki PI-PD denetleyiciye ait ayar parametreleri Çizelge 3.3.'de verilmiştir. Tabloda, PSO algoritmasının denetleyicilere ait ayar parametrelerini arama uzayı da verilmiştir.

Çizelge 3.3. PI-PD denetleyici ayar parametreleri

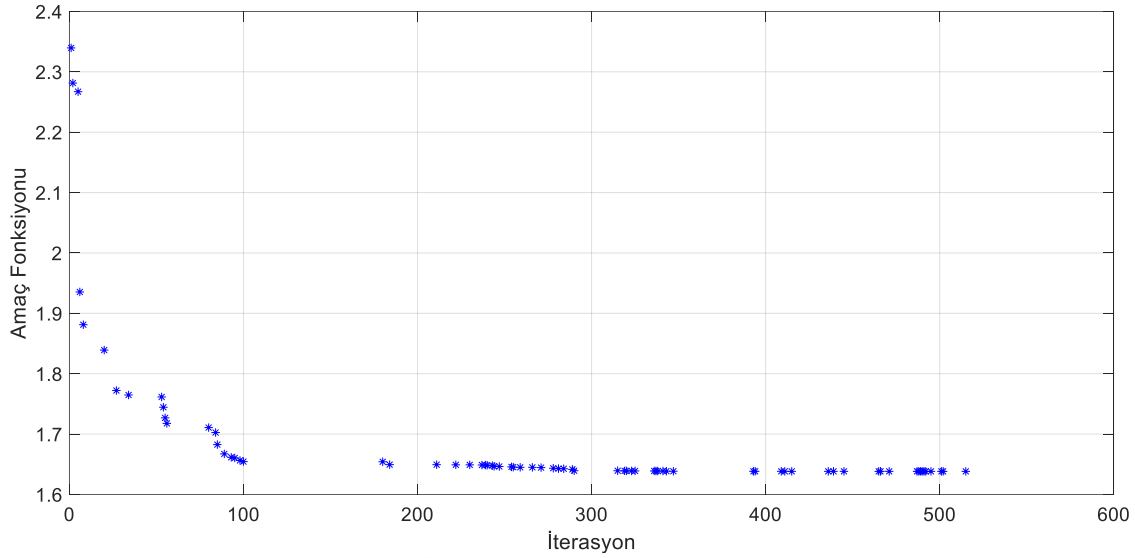
Parametreler		*En İyi Değer*	*Alt Sınır*	*Üst Sınır*
Dikey Rotor	K_{c1}	1.7496	0	5.0
	K_{i1}	2.5424	0	5.0
	K_{f1}	0.8499	0	5.0
	K_{d1}	4.0016	3.0	5.0
Yatay Rotor	K_{c2}	2.9136	0	5.0
	K_{i2}	4.0350	0	5.0
	K_{f2}	3.4994	0	5.0
	K_{d2}	4.0002	3.0	5.0

Tasarlanan PI-PD denetleyicilerin performansı, hem ana rotor hem de kuyruk rotor denetiminde kullanılan ve transfer fonksiyonu

$$G_c(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s \tag{3.20}$$

ile verilen PID denetleyiciler ile karşılaştırılmıştır. Adil bir karşılaştırma için, canlı sayısı 120, her bir canlının atacağı maksimum adım sayısı 550 alınmıştır. Ana rotor ve kuyruk rotorun denetimini sağlayacak 2 adet PID denetleyicinin ayar parametreleri olan K_{p1}, K_{i1}, K_{d1}, K_{p2}, K_{i2}, K_{d2} için 6 adet bilinmeyen sayısı kullanılarak PSO algoritması Matlab üzerinde çalıştırılmıştır.

Yukarıda verilen PSO parametreleri ile hesaplanan PID ayar parametreleri Çizelge 3.4.'te özetlenmiştir. Tablo, yanı zamanda PID için seçilen ayar parametrelerinin arama uzayını da vermektedir.



Şekil 3.36. PID Uygunluk Fonksiyonu Değerleri

Çizelge 3.4. PID denetleyici ayar parametreleri

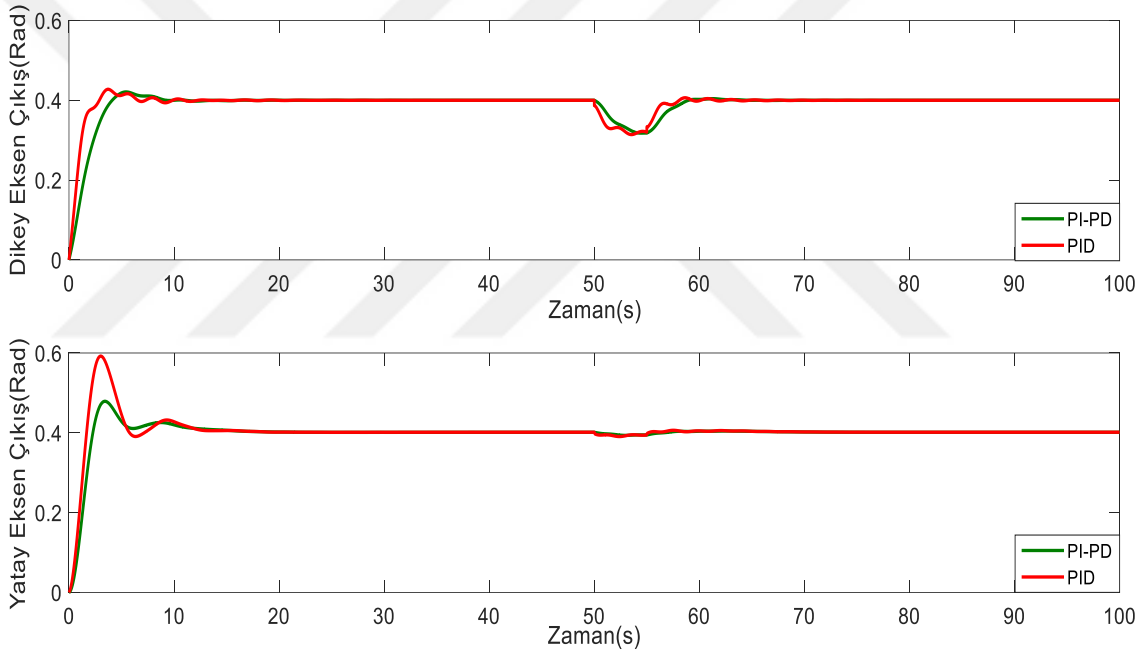
Parametreler		*En İyi Değer*	*Alt Sınır*	*Üst Sınır*
Dikey Rotor	K_{p1}	2.3998	0	5.0
	K_{i1}	4.0237	0	5.0
	K_{d1}	3.0000	3.0	5.0
Yatay Rotor	K_{p2}	5.0000	0	5.0
	K_{i2}	3.4711	0	5.0
	K_{d2}	3.7640	3.0	5.0

Denetleyici tasarımı işlemlerinden elde edilen sonuçlar doğrultusunda TRMS'nin PI-PD ve PID denetleyiciler ile hem benzetim hem de gerçek zamanlı kontrolü bir sonraki bölümde verilecektir.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu kısımda, daha önce tasarlanan PID ve PI-PD denetleyicilerle yapılan TRMS sisteminin kontrolüne ait benzetim uygulama sonuçları ve gerçek zamanlı uygulama sonuçları ele alınmıştır. TRMS sisteminin farklı referans girişleri takip performansları hem PID hem de PI-PD denetleyiciler için incelenmiştir. Gerçek zamanlı uygulama çalışmasında basamak referans giriş gerilimi sistemin zarar görmesini engellemek için 0.4 V olarak uygulanmıştır.

PSO yardımıyla hesaplanan denetleyici ayar parametrelerinin kullanılmasıyla, basamak referans giriş için TRMS sisteminin hem dikey eksen hem de yatay eksen rotor denetim performansları benzetim ortamı sonuçları Şekil 4.1.'de gösterilmektedir.

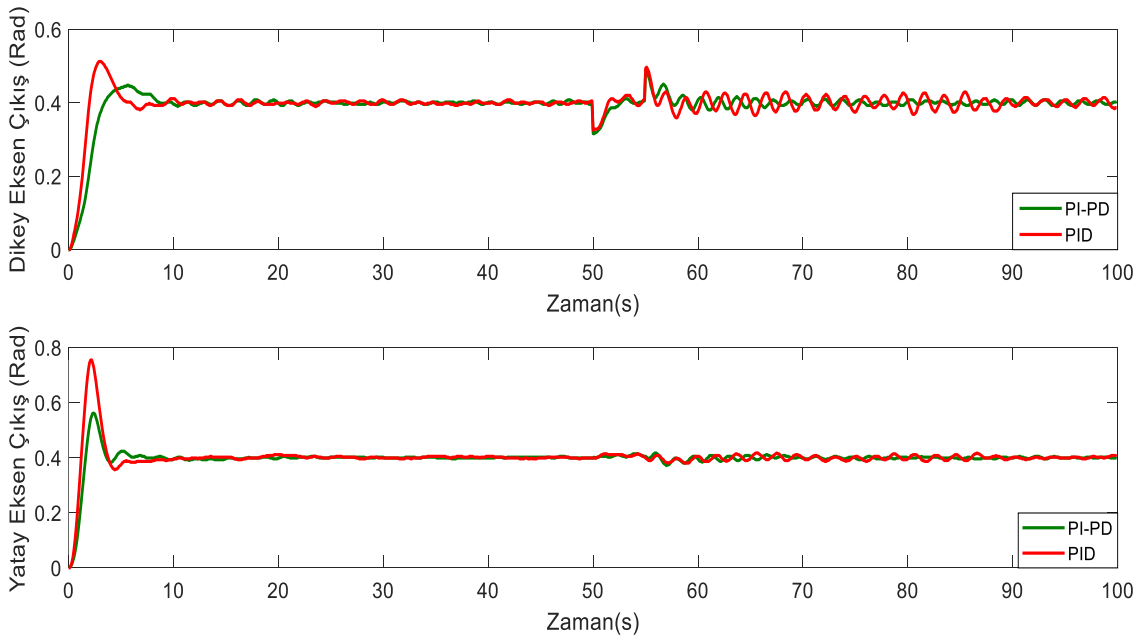


Şekil 4.1. TRMS'ye ait basamak giriş için dikey ve yatay eksen rotor çıkışlarının benzetim ortamı uygulama sonuçları

Dikey eksen rotor çıkış sinyali incelendiğinde, PI-PD denetleyicinin PID denetleyiciye göre daha az aşım verdiği görülmektedir. 100 saniyelik kontrol sırasında PI-PD denetleyicinin PID denetleyiciye nazaran düşük genlikte ve daha az salınım yaptığı görülmektedir. *t=50* s'de ana rotora 0.08 radyanlık bir bozucu sinyalin uygulanması sonucu PI-PD ve PID denetleyiciler ile elde edilen bozucuları bastırma performanslarının birbirlerine oldukça yakın oldukları gözlemlenmektir. Yatay eksen rotor çıkış sinyali incelendiğinde, PI-PD denetleyicinin PID denetleyiciye göre çok daha

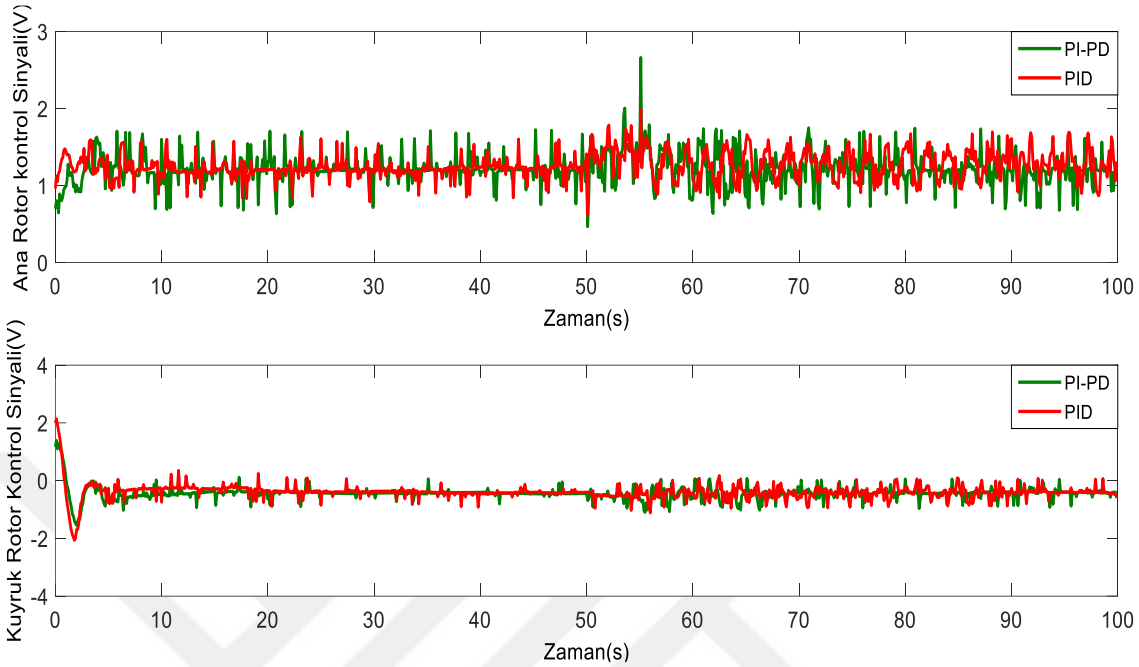
iyi bir performans sergilediği görülmektedir. 100 saniyelik kontrol sırasında, yine PI-PD denetleyicinin PID denetleyiciye göre düşük genlikte ve daha az salınım yaptığı görülmektedir. *t=50* s'de ana rotora uygulanan bozucu sinyalin kuyruk rotoruna etkisinin yok denecek kadar az olduğu görülmektedir.

0.4 V basamak referans girişe karşılık PID ve PI-PD denetleyiciler ile elde edilen gerçek zaman performansları Şekil 4.2.'de gösterilmektedir. Gerçek zaman performansları (Şekil 4.2.) ve benzetim ortamı performansları (Şekil 4.1.) karşılaştırıldıklarında, her iki durumda elde edilen performanslar birbirleriyle paralel olmaktadır. Yani, PI-PD denetleyici ile daha başarılı ana rotor (dikey eksen) ve kuyruk rotor (yatay eksen) performansları sağlanmaktadır. Bu durum referans girişi takip için çok daha aşikar olmaktadır. Sisteme gelen bozucuları bastırmada ise PI-PD ve PID denetleyicilerin performansları benzetim ortamında olduğu gibi birbirlerine oldukça yakın olmakla birlikte, PID denetleyici ile daha salınımlı bir cevap elde edilmektedir. Hem benzetim hem de gerçek zamanlı uygulamada, bozucu sinyal genliğinin 0.08 radyan seçilmesinde, sistemin giriş geriliminin -2.5 V ve +2.5 V sınırlarında çalışma şartları göz önüne alınmış ve deney setinin çalışma şartlarından daha yüksek gerilim oluşmasıyla zarar görmesinin önüne geçilmiştir.



Şekil 4.2. TRMS'ye ait basamak giriş için dikey ve yatay eksen rotor çıkışlarının gerçek zamanlı uygulama sonuçları

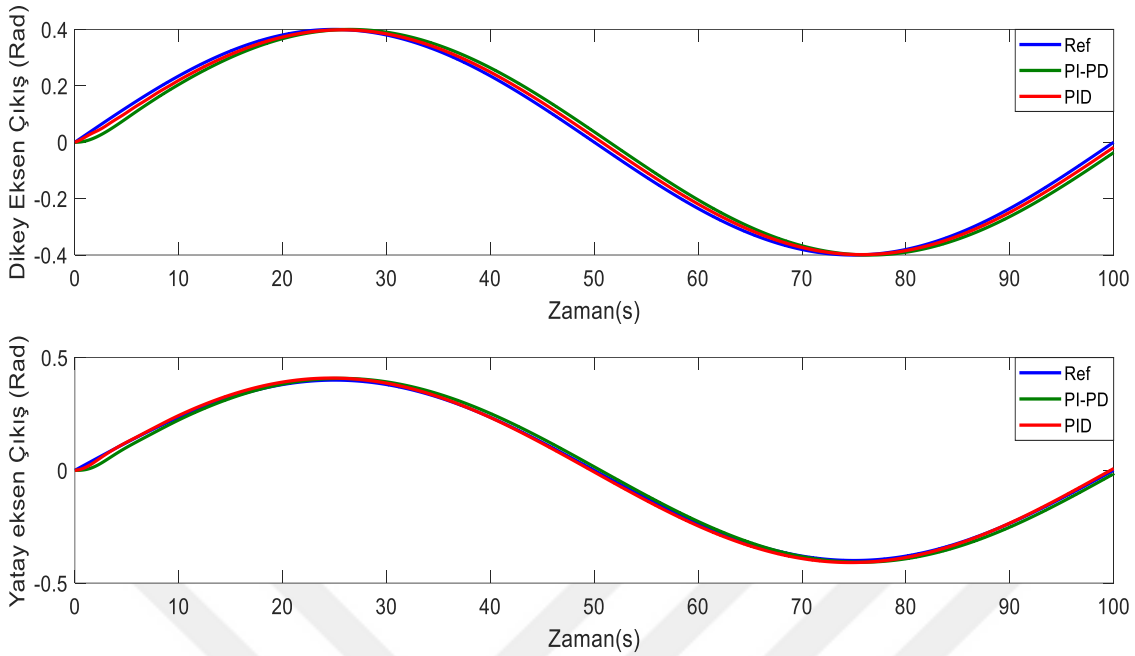
Şekil 4.3.'te gerçek zamanlı denetimde PID ve PI-PD denetleyiciler ile elde edilen kontrol sinyalleri verilmiştir.



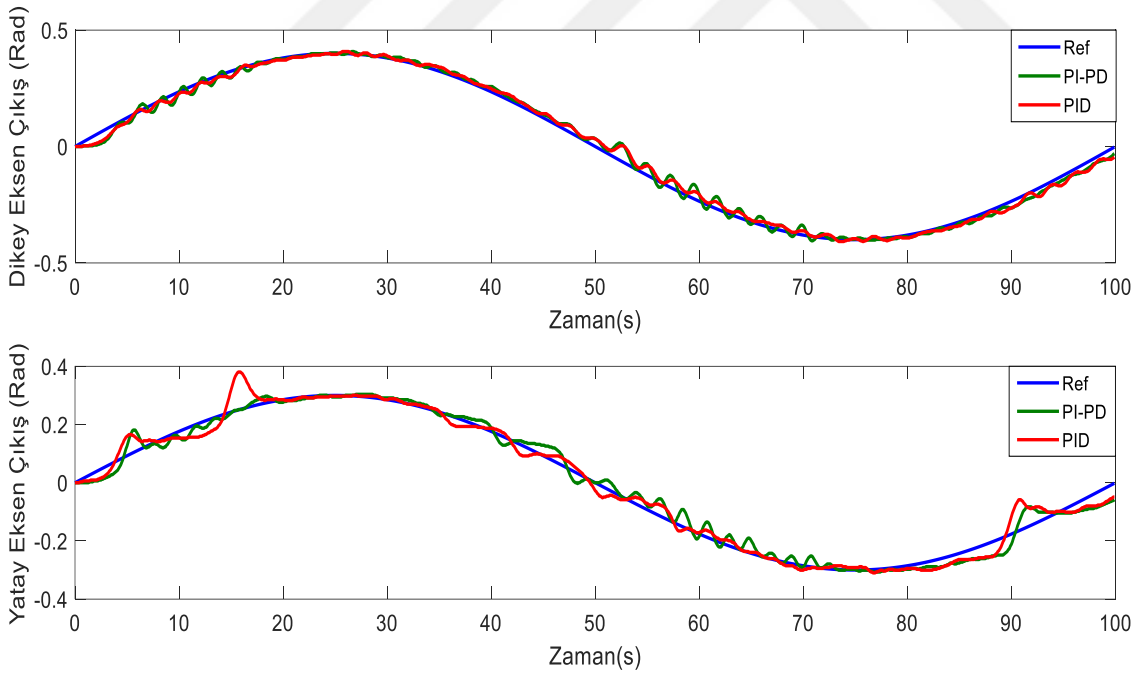
Şekil 4.3. TRMS'nin basamak giriş için gerçek zamanlı ana ve kuyruk denetim kontrol sinyalleri

PID ve PI-PD denetleyicilerin farklı referans girişlerdeki kapalı çevrim performanslarının karşılaştırılması bundan sonraki kısımlarda verilecektir. Öncelikle, referans girişe genliği 0.4 radyan ve frekansı 0.01 Hertz olan bir sinüsün uygulanması ele alınmıştır. Bu durum için, PID ve PI-PD denetleyicilerin kapalı çevrim performanslarının benzetim sonuçları için Şekil 4.4.'te gösterilmektedir.

Şekil 4.5.'te ise genliği 0.4 radyan ve frekansı 0.01 Hertz olan bir sinüs referans giriş için PID ve PI-PD denetleyiciler ile elde edilen kapalı çevrim performansları gerçek zaman ortamı için sergilenmektedir. Hem benzetim (Şekil 4.4.) hem de gerçek zamanlı (Şekil 4.5.) uygulama sonuçlarında, PID denetleyici ile PI-PD denetleyicinin, hem dikey eksen hem de yatay eksen için, birbirlerine çok yakın sinüs girişi takip performansı sergiledikleri görülmektedir.

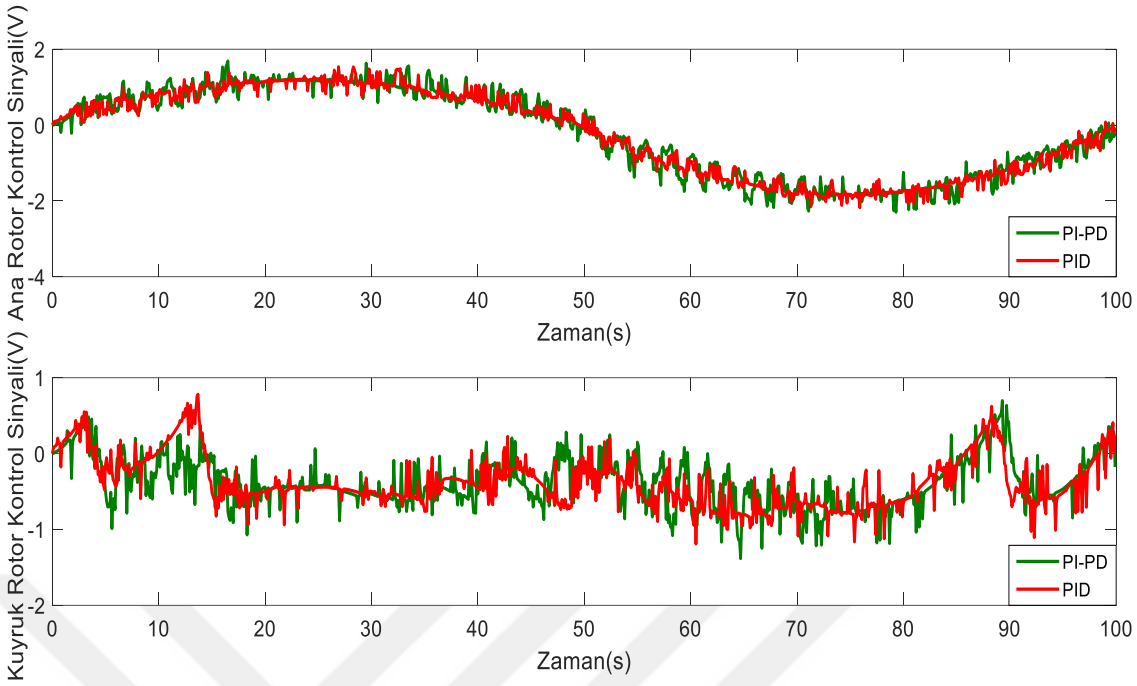


Şekil 4.4. TRMS'ye ait genliği 0.4 radyan ve frekansı 0.01 Hertz olan sinüs referans giriş için dikey ve yatay eksen rotor çıkışlarının benzetim ortamı uygulama sonuçları



Şekil 4.5. TRMS'ye ait genliği 0.4 radyan ve frekansı 0.01 Hertz olan sinüs referans giriş için dikey ve yatay eksen rotor çıkışlarının gerçek zamanlı uygulama sonuçları

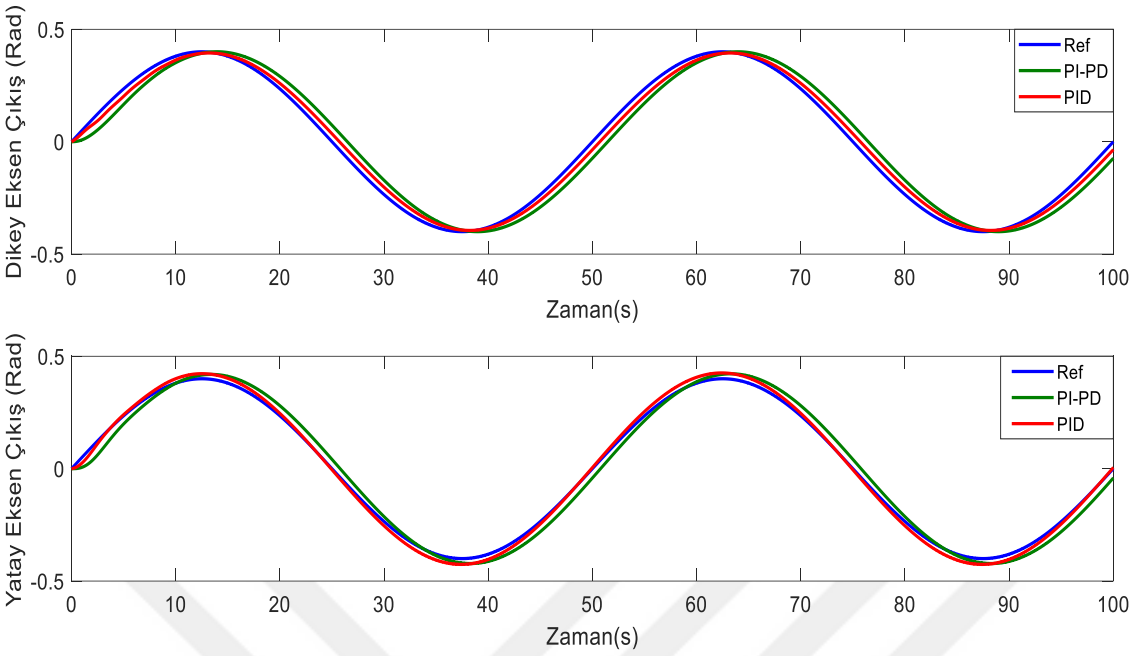
Şekil 4.6.'da genliği 0.4 radyan ve frekansı 0.01 Hertz olan sinüs giriş için gerçek zamanlı denetimde PID ve PI-PD denetleyiciler ile yapılan denetimdeki kontrol sinyalleri verilmiştir.



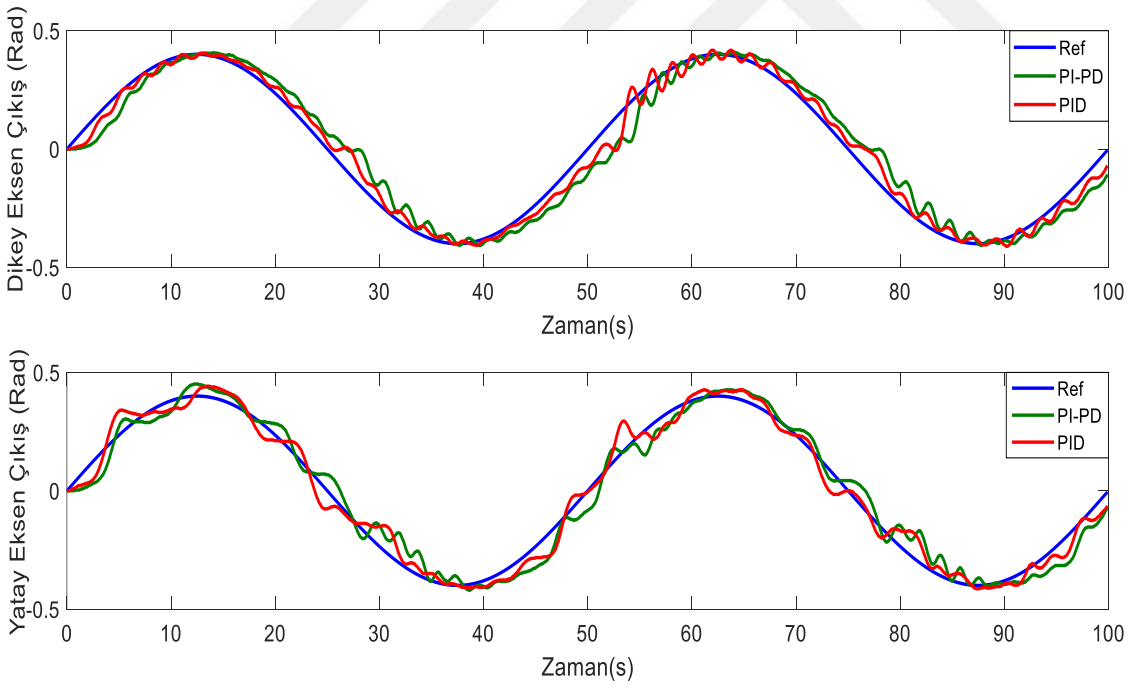
Şekil 4.6. TRMS'nin genliği 0.4 radyan ve frekansı 0.01 Hertz olan sinüs giriş için gerçek zamanlı kontrol sinyalleri

Aynı genlik ama farklı bir frekans değerine sahip sinüs referans giriş için PID ve PI-PD denetleyiciler ile elde edilen dikey ve yatay rotor çıkış cevapları benzetim ortamı için Şekil 4.7.'de, gerçek zamanlı uygulama için Şekil 4.8.'de gösterilmektedirler. Bu durumda referans girişe uygulanan sinüsün frekansı ise 0.02 Hertz olarak alınmıştır. Bir önceki durum ile karşılaştırıldığında, sinüsün frekansının arttırılmasının PID ve PI-PD denetleyicilerin performanslarında anlamlı bir fark oluşturmadığı, ancak PID denetleyicinin PI-PD denetleyiciye göre çok az olsa da daha iyi bir takip, hem dikey rotor hem de yatay rotor için, sağladığı gözlenmektedir.

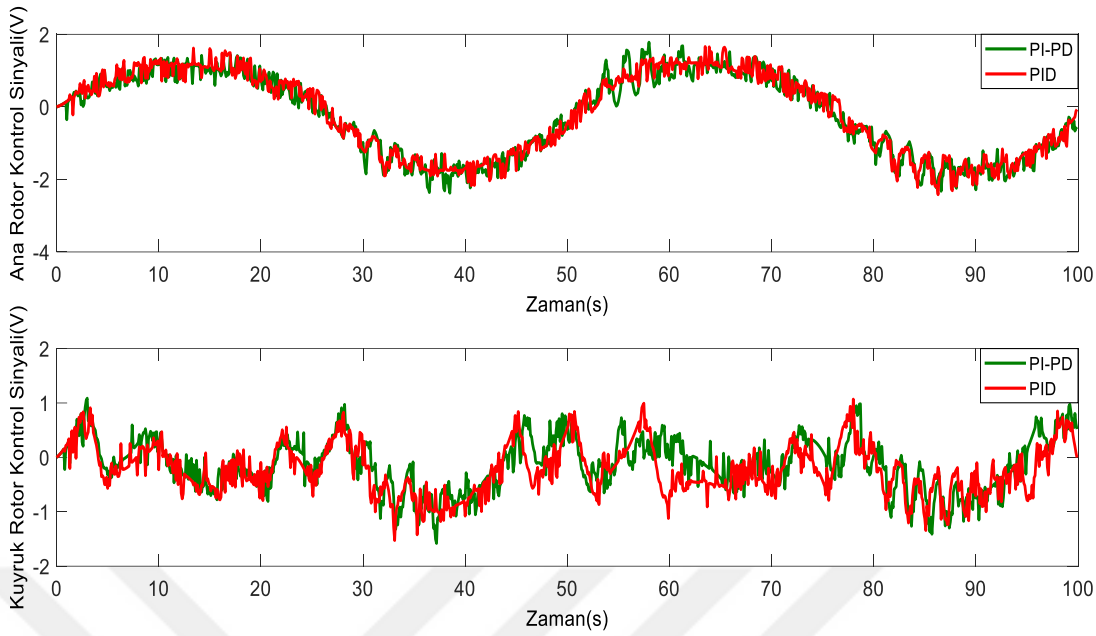
Genliği 0.4 radyan ve frekansı 0.02 Hertz olan sinüs giriş için gerçek zamanlı denetimde PID ve PI-PD denetleyiciler ile elde edilen kontrol sinyalleri Şekil 4.9.'da verilmektedir.



Şekil 4.7. TRMS'ye ait genliği 0.4 radyan ve frekansı 0.02 Hertz olan sinüs referans giriş için dikey ve yatay eksen rotor çıkışlarının gerçek zamanlı uygulama sonuçları



Şekil 4.8. TRMS'ye ait genliği 0.4 radyan ve frekansı 0.02 Hertz olan sinüs referans giriş için dikey ve yatay eksen rotor çıkışlarının gerçek zamanlı uygulama sonuçları

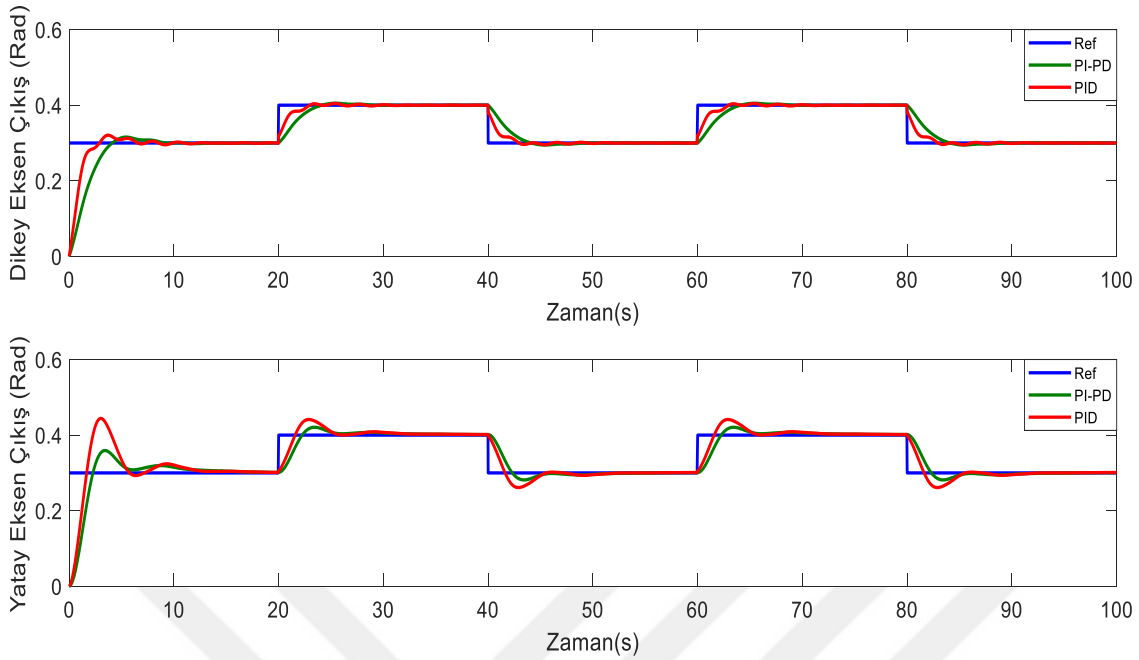


Şekil 4.9. TRMS'nin genliği 0.4 radyan ve frekansı 0.02 Hertz olan sinüs giriş için gerçek zamanlı kontrol sinyalleri

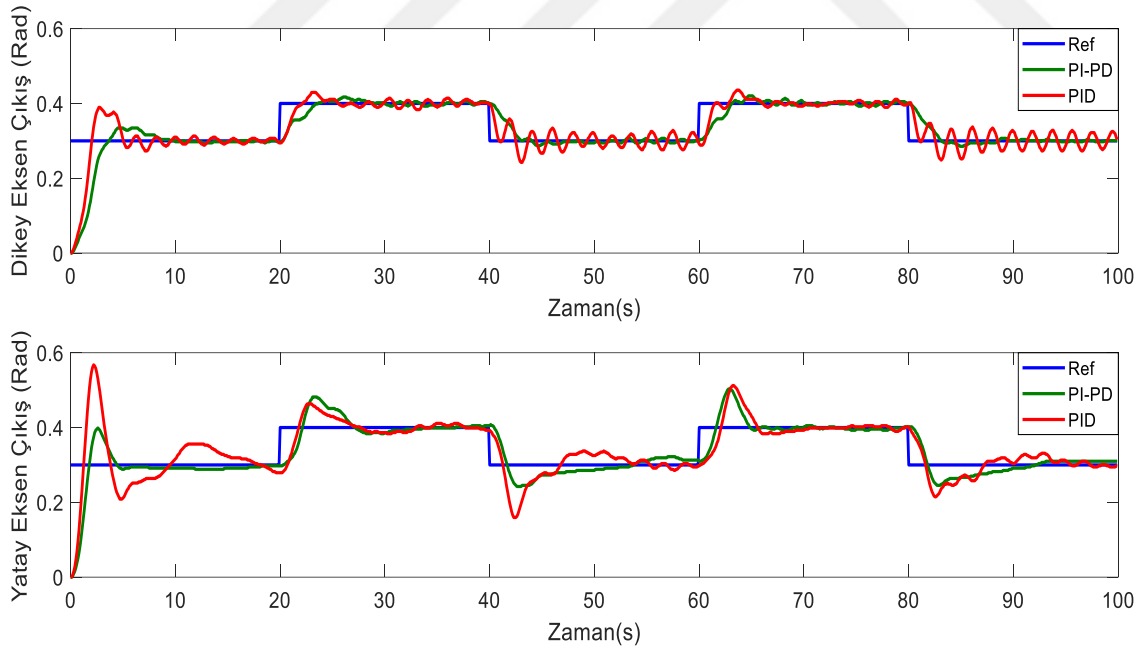
Şimdi, TRMS sisteminin PID ve PI-PD denetleyiciler ile denetiminde kare dalga şeklinde bir referans girişi takip performansları hem benzetim hem de gerçek zamanlı uygulama için verilecektir. Şekil 4.10.'da benzetim ortamında, PI-PD ve PID denetleyiciler ile yapılan denetimde TRMS sistemine ait ana rotor ve kuyruk rotor çıkışları verilmiştir. PI-PD denetleyici ile PID denetleyiciye göre, özellikle maksimum aşım açısından, çok daha iyi bir takibin sağlandığı açıkça görülmektedir. Ayrıca, PI-PD denetleyici ile daha az salınımlı bir performans hem dikey hem de yatay rotor çıkışları için elde edilmektedir.

Şekil 4.11.'de gerçek zamanlı uygulamada, kare dalga şeklindeki referans girişi takipte PI-PD ve PID denetleyiciler ile yapılan denetimde TRMS sistemine ait ana rotor ve kuyruk rotor çıkışları verilmiştir. Benzetim ortamındaki sonuçlara benzer şekilde, PI-PD denetleyici ile PID denetleyiciye göre çok daha iyi bir takip elde edildiği açıkça görülmektedir. PID denetleyici ile elde edilen cevapta salınımların fazla oldukları gözlenmektedir.

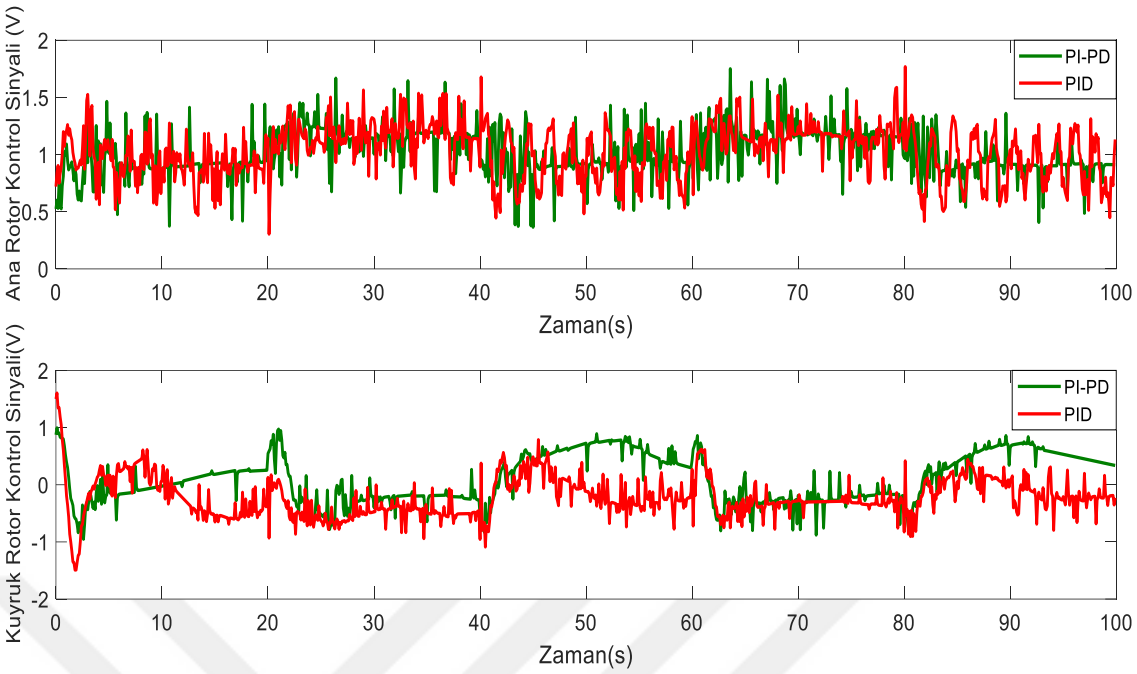
Kare dalga girişin TRMS sistemine uygulandığı duruma ait kontrol sinyalleri Şekil 4.12.'de gösterilmektedir.



Şekil 4.10. TRMS'ye ait kare dalga giriş için dikey ve yatay eksen rotor çıkışlarının benzetim ortamı uygulama sonuçları



Şekil 4.11. TRMS'ye ait kare dalga giriş için dikey ve yatay eksen rotor çıkışlarının gerçek zamanlı uygulama sonuçları

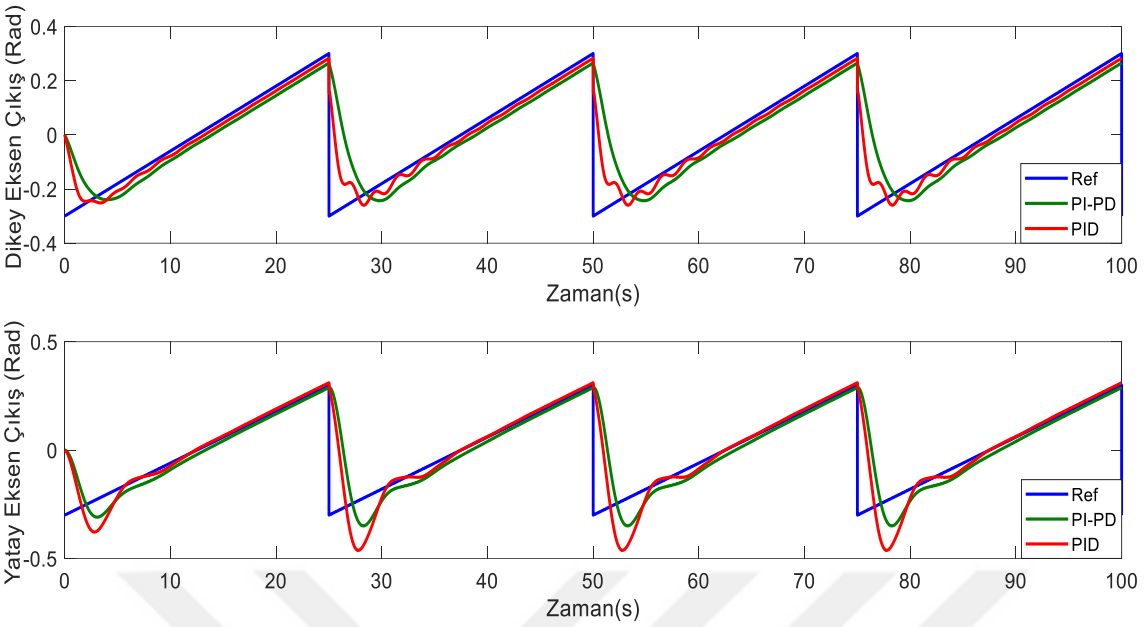


Şekil 4.12. TRMS'nin kare dalga giriş için gerçek zamanlı kontrol sinyalleri

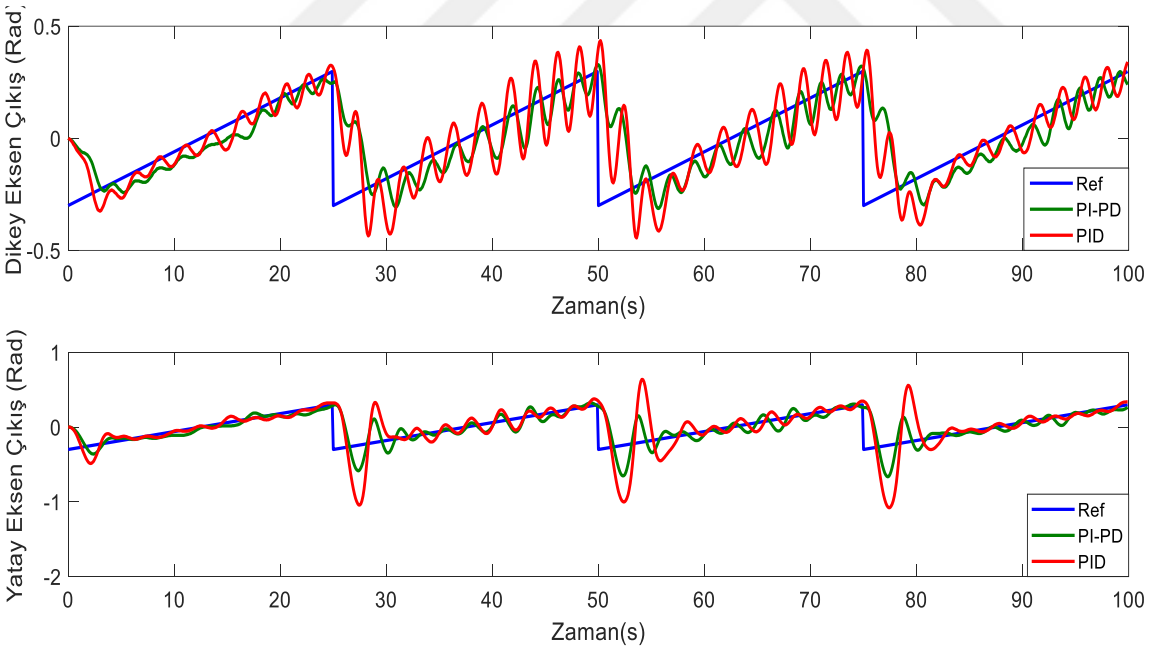
Son olarak, TRMS sistemini denetlemede PID ve PI-PD denetleyicilerin testere dişi şeklindeki referans girişi takipteki performansları ele alınmıştır. Bu duruma ait benzetim ortamı sonuçları Şekil 4.13.'te sergilenmiştir. PI-PD denetleyicinin PID denetleyiciye göre, hem dikey hem de yatay eksen rotorların denetiminde, daha üstün bir takip sergilediği görülmektedir. PI-PD denetleyici ile daha az aşımlı ve düzgün cevaplar elde edilirken, PID denetleyici ile daha salınımlı ve aşımı fazla cevaplar elde edilmektedir.

TRMS sistemini denetlemede PID ve PI-PD denetleyicilerin testere dişi şeklindeki referans giriş takip performansları gerçek zamanlı uygulama için Şekil 4.14.'te gösterilmiştir. Yine, benzetim ortamı ile paralel olacak şekilde, PI-PD denetleyicinin PID denetleyiciye göre çok daha mükemmel olan takip performansı aşikar olarak gözlenmektedir. Özellikle, dikey eksen rotor çıkışı cevaplarında, PID denetleyici ile gerçekleştirilen denetimde TRMS sistemin çok salınımlı şekilde çalıştığı gözlenmektedir.

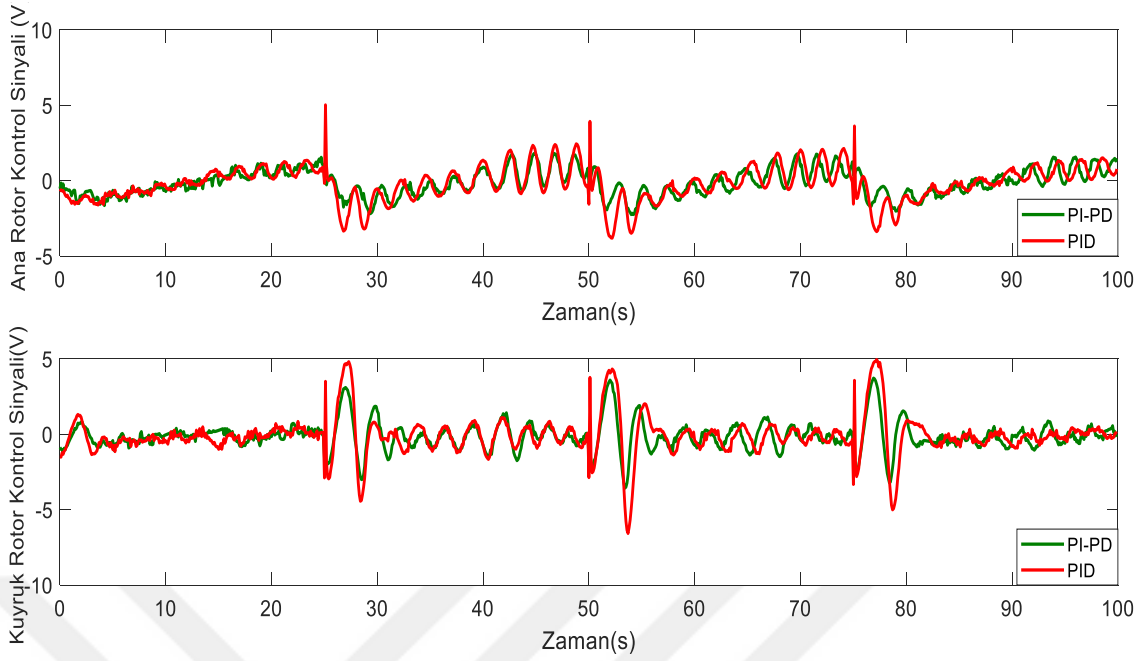
Şekil 4.15.'te testere dişi giriş için gerçek zamanlı denetimde PID ve PI-PD denetleyiciler ile elde edilen kontrol sinyalleri gösterilmektedir.



Şekil 4.13. TRMS'ye ait testere dişi giriş için dikey ve yatay eksen rotor çıkışlarının benzetim ortamı uygulama sonuçları



Şekil 4.14. TRMS'ye ait testere dişi giriş için dikey ve yatay eksen rotor çıkışlarının gerçek zamanlı uygulama sonuçları



Şekil 4.15. TRMS'nin testere dişi giriş için gerçek zaman ortamı kontrol sinyalleri

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında TRMS'nin parçacık sürü optimizasyonu tabanlı PI-PD denetleyici ile benzetim ortamı ve gerçek zamanlı olarak denetimi üzerinde çalışılmıştır. Sistemin denetlenebilmesi için öncelikle TRMS'nin sistem modellenmesi aşamasında kullanılacak olan tüm giriş ve çıkış verileri PCI-1711 kartı kullanılarak Matlab aracılığı ile alınmıştır. Matlab "System Identification Toolbox" aracı vasıtasıyla, alınan bu giriş-çıkış parametreleri ile tasarlanan transfer fonksiyonları kullanılarak TRMS'yi istenilen konumda dengede tutmak ve denetlemek için ikişer adet PID ve ikişer adet PI-PD denetleyici tasarımı gerçekleştirilmiştir.

Tasarımı gerçekleştirilen iki adet PID ve iki adet PI-PD denetleyicilerden biri ana rotorun denetimi, diğeri ise kuyruk rotorun denetimi için kullanılmıştır. PI-PD denetleyicilerin ayar parametrelerinin elde edilmesi aşamasında parçacık sürü optimizasyon yöntemi tercih edilmiştir. PSO yardımıyla gerekli optimizasyon işlemleri gerçekleştirilirken integral performans kriterlerinden ISTE kullanılmıştır. PID denetleyicilere ait ayar parametreleri elde edilirken, PI-PD denetleyicilerin elde edilmesi aşamasında kullanılan yöntemlerin aynısı tercih edilerek adil bir karşılaştırma sağlanmıştır.

Tasarlanan PID ve PI-PD denetleyicilerle, TRMS'ye ait rotorların denetimi aynı anda gerçekleştirilmiştir. Sistem girişine sırasıyla basamak sinyali, frekansı farklı iki adet sinüzoidal sinyal, kare dalga sinyali ve üçgen dalga sinyali verilmiştir.

Gerçek zamanlı ve benzetim ortamı uygulama sonuçlarında, basamak, kare ve üçgen dalga girişlerde, beklenildiği üzere, PI-PD denetleyiciler ile yapılan denetimlerde daha iyi performans elde edildiği gözlenmiştir. Çünkü, TRMS açık çevrim kararsız bir sistemdir ve teoride PI-PD denetleyicilerin kararsız sistemlerin denetiminde Sinüs girişlerde ise, çok az da olsa, PID denetleyiciler ile daha iyi kapalı çevrim cevaplar elde edilmiştir.

Genel olarak, doğrusal olmayan sistemleri denetlemek için doğrusal denetim teknikleri yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak, bu durum sistemin denetiminde performans kayıplarına neden olabilir. TRMS de doğrusal olmayan sistem olduğundan, TRMS'nin denetiminde doğrusal olmayan kontrol yaklaşımlarının kullanılması ile daha iyi kapalı çevrim performans elde edilebilir. Bununla birlikte, geniş çalışma aralıkları

gerekli olduğunda ve sistemin doğrusal olmayışının sistem davranışı üzerinde özel bir etkisi olduğunda, doğrusal olmayan denetim yaklaşımlarının kullanılması elzem olmaktadır. Dolayısıyla, geri-adımlama, kayma kipli kontrol, ve adaptif kontrol gibi kontrol teknikleri ile TRMS'nin denetiminde daha iyi sonuçlar elde edilebilir. Ayrıca, bulanık mantık ve yapay sinir ağları gibi akıllı kontrol teknikleri doğrusal olmayan sistemlerle başa çıkmak için kullanılabilecek güçlü araçlar olabilirler. İleriki çalışmalarda, TRMS'nin doğrusal olmayan kontrol ve akıllı kontrol algoritmalarının kullanılmasıyla performansı incelenebilir.

Doğrusal kontrol teknikleri ile TRMS'nin kapalı çevrim performansının arttırılabilmesi için, ana ve kuyruk rotor etkileşimlerinin azaltacak dekuplaj (decoupling) tekniğinin kullanılması ayrı bir çalışma konusu olabilir.

6. KAYNAKLAR

Allouani, F., Boukhetala, D., & Boudjema, F. (2012). Particle swarm optimization based fuzzy sliding mode controller for the Twin Rotor MIMO system. ***Proceedings of the Mediterranean Electrotechnical Conference - MELECON***, 1063–1066.

Åström, K. J., & Hägglund, T. (1995). PID Controllers - ***Theory, Design, and Tuning (2nd ed.).*** Instrument Society of America, Research Triangle Park, NC, USA.

Ateş, A., & Yeroğlu, C. (2012). *TRMS için Referans Modele Dayalı Optimal Kesir Dereceli PID Tasarımı*, ***Otomatik Kontrol Ulusal Toplantısı, TOK12,*** Niğde.

Atherton, D. P., & Majhi, S. (1999). Limitations of pid controllers, ***Proceedings of the 1999 American Control Conference***, 3843–3847.

Biswas, P., Maiti, R., Kolay, A., Das Sharma, K., & Sarkar, G. (2014). PSO based PID controller design for twin rotor MIMO system. ***International Conference on Control, Instrumentation, Energy and Communication, CIEC 2014,*** 56–60.

Bouarroudj, N., Djari, A., Boukhetala, D., & Boudjema, F. (2017). Tuning of decentralized fuzzy logic sliding mode controller using PSO algorithm for nonlinear Twin Rotor Mimo System. ***6th International Conference on Systems and Control, ICSC 2017***, 45–50.

Boz, A. F., & Sari, Y. (2009). Standard Forms with Two Zeros and Optimal PID-PD Controller Design. ***5. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu (IATS'09)***, 13–15.

Bozorg-Haddad, O., Solgi, M., & Loáiciga, H. A. (2017). ***Meta-Heuristic and Evolutionary Algorithms for Engineering Optimization,*** John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, USA.

Dang Huu, T., & Ismail, I. B. (2016). Modelling of Twin Rotor MIMO system. ***2nd IEEE International Symposium on Robotics and Manufacturing Automation (ROMA)***, 1–6.

Deniz, M., Bidikli, B., Bayrak, A., Ozdemirel, B., & Tatlicioglu, E. (2015). Modelling twin rotor system with artificial neural networks | Cift Rotorlu Sistemin Yapay Sinir Aglar İle Modellenmesi. ***23rd Signal Processing and Communications Applications Conference, SIU 2015***, 1162-1165.

Doğan, F. (2014). *Design, Development and Control of a Twin Rotor System. Yükseklisans Tezi,* ***İzmir İleri Teknoloji Enstitüsü, Fen Bilimleri Enstitüsü***.

Feedback Instruments Ltd. 2013. ***Twin Rotor MIMO System Control Experiments***. Kullanma klavuzu, 33-949S, Ed02-1, Crowborough, UK.

Graham, D., & Lathrop, R. C. (2013). The synthesis of "optimum" transient response: Criteria and standard forms. ***Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, Part II: Applications and Industry***, 72(5), 273–288.

Hernandez-Gonzalez, M., Alanis, A. Y., & Hernandez-Vargas, E. A. (2012). Decentralized discrete-time neural control for a Quanser 2-DOF helicopter. ***Applied Soft Computing Journal***, 12(8), 2462–2469.

Honsi, R. D., & Leonardi, F. (2015). Avaliação Experimental do Modelo e do Sistema de Controle de um Simulador de Helicóptero tipo Twin Rotor. ***Fundação Educacional Inaciana Padre Sabóia de Medeiros, Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico***, 1.

Jafri, M. H., Mansor, H., & Gunawan, T. S. (2017). Development of Fuzzy Logic Controller for Quanser Bench-Top Helicopter. ***IOP Conference Series: Materials Science and Engineering***, 260(1), 1-10.

Kaya, I. (2003). A PI-PD controller design for control of unstable and integrating processes. ***ISA Transactions***, 42(1), 111–121.

Kaya, I., & Atherton, D. P. (1999). *A PI-PD Controller Design for Integrating Processes*. ***Proceedings of the 1999 American Control Conference***, 258–262.

Kaya, I., Tan, N., & Atherton, D. P. (2006). A refinement procedure for PID controllers. ***Electrical Engineering***, 215-221.

Kennedy, J., & Eberhart, R. (1995). Particle Swarm Optimization, ***Proceedings of IEEE International Conference on Neural Networks*** Vol. IV: 1942–1948.

Liu, T. K., & Juang, J. G. (2009). A single neuron PID control for twin rotor MIMO system. ***IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, AIM***, 186–191.

Ljung, L. (2015). ***System Identification Toolbox^{TM} Getting Started Guide***. Natick: The MathWorks, Inc.

Mahmoud, T. S., Marhaban, M. H., Hong, T. S., & Ng, S. (2009). ANFIS controller with fuzzy subtractive clustering method to reduce coupling effects in Twin Rotor MIMO system (TRMS) with less memory and time usage. ***Proceedings - International Conference on Advanced Computer Control, ICACC 2009,*** 19–23.

Neeraj, P. J., & Seema, P. N. (2018). Control of Twin Rotor MIMO System Using Cross PID Control Technique. ***Proceedings of IEEE International Conference on Communication and Signal Processing, ICCSP 2018,*** 744-750.

Pandey, S. K., Dey, J., & Banerjee, S. (2017). Design and real-time implementation of robust PID controller for Twin Rotor MIMO System (TRMS) based on Kharitonov's theorem. ***1st IEEE International Conference on Power Electronics, Intelligent Control and Energy Systems, ICPEICES 2016,*** 1–6.

Patel, R., Deb, D., Modi, H., & Shah, S. (2017). Adaptive backstepping control scheme with integral action for quanser 2-DOF helicopter. ***International Conference on Advances in Computing, Communications and Informatics, ICACCI 2017, 2017-Janua(August),*** 571–577.

Pratap, B. (2012). Neuro sliding mode controller for twin rotor control system. ***Students Conference on Engineering and Systems, SCES 2012,*** 9–13.

Rahideh, A., Shaheed, M. H., & Huijberts, H. J. C. (2008). Dynamic modelling of a TRMS using analytical and empirical approaches. ***Control Engineering Practice,*** 241-259.

Rajappa, S., Chriette, A., Chandra, R., & Khalil, W. (2013). Modelling and Dynamic Identification of 3 DOF Quanser Helicopter. ***16th International Conference on Advanced Robotics, ICAR 2013.*** 1-6.

Ramalakshmil, S., & Manoharan, S. (2012). Non-linear Modeling and PID Control of Twin Rotor MIMO System of Electrical & Electronics Engineering , Thiagarajar College of Engineering, Madurai. ***IEEE International Conference on Advanced Communication Control and Computing Technologies (ICACCCT),*** **(978),** 366–369.

Ruf, M., Wikstrom, O., & Bayer, F. (2014). Model Predictive Control of a Quanser

3DOF Helicopter. *Doktora Tezi*, ***University of Stuttgart***. Munich, Germany.

Saha, A., & Chakraborty, S. (2016). Genetic algorithm based I-PD controller design for Twin Rotor MIMO system. ***2nd International Conference on Control, Instrumentation, Energy and Communication, CIEC 2016,*** 15-19.

Silva, A., Caminhas, W., Lemos, A., & Gomide, F. (2014). Real-time nonlinear modeling of a twin rotor MIMO system using evolving neuro-fuzzy network. ***IEEE Symposium on Computational Intelligence in Control and Automation, Proceedings, CICA 2014,*** 1-8.

Subudhi, B., & Jena, D. (2009). Nonlinear system identification of a twin rotor MIMO system. ***IEEE Region 10 Annual International Conference, Proceedings/TENCON,*** 1–6.

Taskin, Y. (2014). Improving pitch and yaw motion control of twin rotor MIMO system. ***Journal of Vibroengineering,*** *16(4),* 1650-1660.

Tastemirov, A., Lecchini-Visintini, A., & Morales-Viviescas, R. M. (2017). Complete dynamic model of the Twin Rotor MIMO System (TRMS) with experimental validation. ***Control Engineering Practice,*** *(66),* ***September 2017,*** 89-98.

Toha, S. F., & Tokhi, M. O. (2010). ANFIS modelling of a twin rotor system using particle swarm optimisation and RLS. ***IEEE 9th International Conference on Cybernetic Intelligent Systems, CIS 2010.*** 19-23.

Wen, P., & Li, Y. (2011). Twin rotor system modeling, de-coupling and optimal control. ***IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, ICMA 2011,*** 1839–1842.

Zhuang, M. (1992). Computer aided PID controller design. Doktora tezi, ***University of Sussex School of Engineering***, Brighton, UK.

ÖZGEÇMİŞ

Adı ve Soyadı: Cuma Anıl TAKEŞ
Doğum Yeri: Diyarbakır
Doğum Tarihi: 09.06.1987
Medeni Hali: Evli
Yabancı Dili: İngilizce

Eğitim Durumu (Kurum ve Yıl):

Lise: Diyarbakır Fatih Lisesi(Yabancı Dil Ağırlıklı)/ Diyarbakır,2005

Lisans: Dicle Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği / Diyarbakır, 2011

Çalıştığı Kurum/Kurumlar ve Yıl:

Diyarbakır Dicle Barajı, Elektrik Elektronik Mühendisi (2013-2014) Diyarbakır
Diyarbakır Sosyal Güvenlik İl Müdürlüğü, Elektrik Elektronik Mühendisi (2014-Halen), Diyarbakır

DİCLE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
TEZ İNTİHAL FORMU

ÖĞRENCİ BİLGİLERİ	
ADI VE SOYADI	Cuma Anıl TAKEŞ
ÖĞRENCİ NO	12805005
EĞİTİM – ÖĞRETİM YILI	2018-2019
YARIYIL	☐ Güz ☒ Bahar
ANABİLİM DALI	Elektrik-Elektronik Mühendisliği
PROGRAM	Yüksek Lisans
TEZ KONUSU	PI-PD DENETLEYİCİ İLE İKİZ ROTOR DENETİMİ
İNTİHAL RAPORU BİLGİLERİ	
RAPOR TÜRÜ	Tez Savunma Sınavı Sonrası
SAYFA SAYISI	81
BENZERLİK ORANI	%19
RAPORLAMA TARİHİ	30/07/2019

Yukarıda başlığı/konusu gösterilen tez çalışmamın kapak sayfası, giriş, ana bölümler, sonuç ve tartışma kısımlarından oluşan toplam 81 sayfalık kısmına ilişkin, 30/07/2019 tarihinde tez danışmanım tarafından *Turnitin* adlı intihal tespit programından aşağıda belirtilen filtrelemeler uygulanarak alınmış olan intihal raporuna göre, tezimin benzerlik oranı %19'dür.

Uygulanan filtrelemeler:

☐ Kabul/Onay sayfaları hariç,
☐ Kaynakça hariç
☐ Alıntılar hariç/dâhil
☐ Diğer

Dicle Üniversitesi Fen Enstitüsü Lisansüstü Programlarda Tez Çalışması İntihal Raporu Uygulama Esaslarını inceledim ve bu Uygulama Esaslarında belirtilen azami benzerlik oranlarına göre tez çalışmamın herhangi bir intihal içermediğini; aksinin tespit edilmesi durumunda doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi ve vermiş olduğum bilgilerin doğru olduğunu beyan ederim.

Gereğini saygılarımla arz ederim.

Öğrencinin
Adı ve Soyadı: Cuma Anıl TAKEŞ
Tarih: 30/07/2019
İmza:

Tez Danışmanı	**Anabilim Dalı Başkanı V.**
Adı ve Soyadı: Prof. Dr. İbrahim KAYA	Adı ve Soyadı:Dr.Öğr.Üyesi M. Ali ARSERİM
Tarih: 30/07/2019	Tarih: 30/07/2019
İmza:	İmza:

Formdaki bilgiler, bilgisayar ortamında doldurulmalıdır. El yazısı ile doldurulan formlar geçersizdir.

KGK-FRM-340/00