

T.C.
VAN YÜZÜNCÜ YIL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**TRMS’NİN KONTROLÜ İÇİN KULLANILAN PID VE I-PD KONTROLCÜ
PARAMETRELERİNİN GÜÇ KÜŞÜ ALGORİTMASI KULLANILARAK
TAHMİNLENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Eren İZCİER
Danışman: Prof. Dr. M. Nuri ALMALI

VAN-2023

T.C.
VAN YÜZÜNCÜ YIL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**TRMS’NİN KONTROLÜ İÇİN KULLANILAN PID VE I-PD KONTROLCÜ
PARAMETRELERİNİN GUGUK KUŞU ALGORİTMASI KULLANILARAK
TAHMİNLENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Eren İZCİER

VAN – 2023

KABUL VE ONAY SAYFASI

Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Prof. Dr. M. Nuri ALMALI danışmanlığında, Eren İZCİER tarafından sunulan “TRMS’ nin Kontrolü için Kullanılan PID ve I-PD Kontrolcü Parametrelerinin Guguk Kuşu Algoritması Kullanılarak Tahminlenmesi” başlıklı bu çalışma Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği’nin ilgili hükümleri gereğince 25/05/2023 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile başarılı bulunmuş ve Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan: Prof. Dr. Sabir RÜSTEMLİ

İmza:

Üye: Prof. Dr. Mehmet Nuri ALMALI

İmza:

Üye: Dr. Öğr. Üyesi İshak PARLAR

İmza:

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun /.... /..... tarih ve sayılı kararı ile onaylanmıştır.

İmza

Enstitü Müdürü

ETİK BEYAN

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

İmza

Eren İZCİER



ÖZET

TRMS’NİN KONTROLÜ İÇİN KULLANILAN PID VE I-PD KONTROLÇÜ PARAMETRELERİNİN GUGUK KUŞU ALGORİTMASI KULLANILARAK TAHMİNLENMESİ

İZCİER, Eren

Yüksek Lisans Tezi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. M. Nuri ALMALI

Mayıs 2023, 38 sayfa

İki pervaneli bir helikopteri modellemek için çok girişli çok çıkışlı ikiz pervaneli sistem (TRMS) kullanılır. TRMS, helikopterin dinamiklerini temsil eden bir sistemdir. TRMS sistemi, bir giriş ile birbirlerine bağlantılı olan ana ve kuyruk pervanesinden oluşmaktadır. TRMS sisteminin dengesinin sağlanması için her iki pervane açıları, pervanelerin bağlı bulunduğu DC motorların hızları değiştirilerek ayarlanır. DC motorların hız kontrolünü yapmak için birçok kontrol yöntemi bulunmaktadır. Yapılan çalışmada TRMS’ de ana ve kuyruk pervane açılarını ayarlamak için PID ve modifiye edilmiş PID (I-PD) yöntemleri kullanılmıştır. Çalışmada, kontrolcü parametreleri meta sezgisel optimizasyon algoritmalarından olan guguk kuşu algoritması kullanılarak elde edilmiştir. Parametrelerin belirlenmesi ve sistemin çıkış değerlerinin elde edilmesi için benzetim çalışmaları, MATLAB/Simulink programında yapılmıştır. Benzetim çalışmalarında ana ve kuyruk pervanelerini referans açı değerine en uygun şekilde yaklaştıran kontrolcü parametreleri bulunduktan sonra deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir.

Benzetim ve deneysel çalışmalarda elde edilen pervane açılarına ait çıkış grafiklerinden, ana pervane açısı için deneysel çalışmada yükselme ve aşma zamanlarının, benzetim çalışmasında ise aşma miktarında iyi olduğu belirlenmiştir. Kuyruk pervane açısı için deneysel çalışmada yükselme zamanının, benzetim çalışmasında ise yerleşme zamanı ve aşma miktarında daha iyi olduğu gözlenmiştir. Ana pervane açısı için yapılan deneysel çalışmada hata değerlerinin benzetim çalışmalarına göre, kuyruk pervanesi açısı için yapılan çalışmada benzetim sonuçlarının deneysel çalışmaya göre daha iyi olduğu belirlenmiştir.

Anahtar kelimeler: Guguk kuşu algoritması, I-PD, PID, TRMS

ABSTRACT

ESTIMATING OF PID AND I-PD CONTROLLER PARAMETERS USED FOR CONTROL OF TRMS USING THE CUCKOO ALGORITHM

İZCİER, Eren

M.Sc. Thesis, Department of Electrical and Electronics Engineering

Supervisor: Prof. Dr. M. Nuri ALMALI

May 2023, 38 pages

A twin-rotor multi-input multi-output system (TRMS) is used to model a two-rotor helicopter. TRMS is a system that represents the dynamics of the helicopter. The TRMS system consists of the main and tail rotors connected by a beam. To balance the TRMS system, both rotor angles are adjusted by changing the speeds of the DC motors to which the rotors are connected. There are many control methods for speed control of DC motors. The study used PID and modified PID (I-PD) methods to adjust the main and tail rotor angles in TRMS. In the study, the controller parameters were obtained using the cuckoo algorithm, which is one of the metaheuristic optimization algorithms. Simulation studies were carried out in MATLAB/Simulink packet program to determine the parameters and obtain the output responses of the system. Experimental studies were carried out after finding the controller parameters that approximate the main and tail rotors to the reference angle value in the most appropriate way in the simulation studies.

The output figures of the propeller angles obtained in the simulation and experimental studies determined that the rise and overshoot times for the main rotor angle were good in the experimental study and the amount of overshoot in the simulation study. For the tail rotor angle, it was observed that the rise time was better in the experimental study, and the settling time and the overshoot amount were in the simulation study. In the experimental study for the main rotor angle, it was determined that the error values were better than the experimental study in the study for the tail rotor angle, compared to the simulation studies.

Keywords: The cuckoo algorithm, I-PD, PID, TRMS



TEŞEKKÜR

“TRMS’nin Kontrolü İçin Kullanılan PID ve I-PD Kontrolcü Parametrelerinin Gukuk Kuşu Algoritması Kullanılarak Tahminlenmesi” adlı yüksek lisans tezimin hazırlanmasında her türlü ilgi ve yardımlarıyla danışmanlığımı üstlenmiş bulunan Prof. Dr. Mehmet Nuri ALMALI ’ya teşekkürlerimi sunuyorum.

Ayrıca bu çalışma esnasında desteklerini esirgemeyen aileme ve arkadaşlarıma da teşekkür ederim.

2023

Eren İZCİER



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET	i
ABSTRACT	iii
TEŞEKKÜR	v
İÇİNDEKİLER.....	vii
ÇİZELGELER LİSTESİ	ix
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	xi
SİMGELER VE KISALTMALAR	xiii
1. GİRİŞ.....	1
2. KAYNAK BİLDİRİŞLERİ	5
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	13
3.1 Materyal.....	13
3.1.1 İkiz Pervaneli Çoklu Girişli Çoklu Çıkışlı Sistem (TRMS)	13
3.2 Yöntem	22
3.2.1 Oransal-İntegral-Türev (PID) Kontrol Yöntemi	22
3.2.2 Modifiye Edilmiş PID (I-PD) Kontrol Yöntemi	23
3.2.3 Guguk Kuşu Algoritması (Cuckoo Algorithm)	24
3.2.4 Birleşik I-PD - PID Kontrol Yöntemi	27
3.2.5 Kontrol Yöntemlerinde Çıkış Dalgalarının Hata Analiz Denklemleri..	28
4. BULGULAR.....	29
4.1 Benzetim ve Deneysel Çalışmalara ait Sonuçlar	29
5. TARTIŞMA VE SONUÇ	33
KAYNAKLAR.....	35
ÖZ GEÇMİŞ.....	39



ÇİZELGELER LİSTESİ

Çizelge 3.1 TRMS'nin doğrusal olmayan model parametreleri.....	19
Çizelge 4.1 Guguk kuşu optimizasyon algoritması kullanılarak belirlenen kontrolcü parametre değerleri	30
Çizelge 4.2 Ana ve kuyruk pervane açıları için elde edilen çıktılarına ait yükselme zamanları, yerleşme zamanları ve maksimum aşma zamanları.....	31
Çizelge 4.3 Ana ve kuyruk pervane açıları için elde edilen çıktılarına ait ISE, IAE ve ITSE değerleri.....	32



ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 3.1 TRMS' nin fiziksel yapısı	13
Şekil 3.2 TRMS mekanik görünümü.....	15
Şekil 3.3 TRMS sistem şeması.....	16
Şekil 3.4 TRMS elektro-mekanik yapısı.....	17
Şekil 3.5 PID kontrolcü blok şeması.....	23
Şekil 3.6 I-PD kontrolcü Matlab programı benzetim şeması.....	24
Şekil 3.7 Guguk kuşu algoritması akış diyagramı.....	27
Şekil 4.1 Birleşik I-PD – PID sistemi Matlab programı benzetim şeması.....	29
Şekil 4.2 Ana pervane açısı (pitch) deneysel ve benzetim grafiği.....	30
Şekil 4.3 Kuyruk pervane açısı (yaw) deneysel ve benzetim grafiği.....	30



SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış bazı simgeler ve kısaltmalar, açıklamalarıyla aşağıda sunulmuştur.

Simgeler

Açıklama

K_d	Diferansiyel kazanç
K_i	İntegral kazanç
K_p	Oransal kazanç
P_a	Guguk kuşu yumurtasının fark edilme olasılığı
λ	Lévy uçuş katsayısı

Kısaltmalar

Açıklama

ACO	Karınca Kolonisi Optimizasyonu
AFC	Etkin Güç Kontrolü
ARBFNNGFDTSMC	Dinamik Terminal Kayan Mod Kontrolü
BFPSO	Kelebek Tabanlı PSO
COA	Guguk Kuşu Optimizasyon Algoritması
CS	Guguk Kuşu Arama
DA	Yusufçuk Algoritması
DC	Doğru Akım
DEsPA	Başarıya Dayalı Uyarılama ile Türevsel Açılım
DFSMC	Dağıtılmış Bulanık Kayan Mod Kontrol
FLC	Bulanık Mantık Denetleyici
FOSTSMC	Kesir Dereceli Süper Bükümlü Kayan Kip
GA	Genetik Algoritma
IAE	Mutlak Hatalar Toplamı
ISE	Hata Kareler Toplamı
ITSE	Toplam Zamana Bağlı Hata Kareler Toplamı
I-PD	Modifiye Edilmiş PID

Kısaltmalar

Açıklama

KDPID	Kesir Dereceli PID
KDSBM	Kesir Dereceli Serbest Bükümlü Kayan Mod
LFT	Doğrusal Kesir Dönüşümü
LPV	Doğrusal Katsayı Değişkeni
MIMO	Çoklu Girişli-Çoklu Çıkışlı Sistemi
NARLA-L2	Otoregresif Hareketli Ortalama Denetleyici
NNFOPID	Nöro Tabanlı KDPID
OMFBC	Geri Adımlı Kontrolör
PI	Oransal İntegral
PID	Oransal İntegral Türev
PSO	Parçacık Sürü Optimizasyonu
PSOFOPID	Parçacık Sürüsü Tabanlı KDPID
RBFNN	Radyal Tabanlı İşlev Sinir Ağı
SISO	Tek Girişli-Tek Çıkışlı
SMC	Kayan Kipli Denetleyici
STSMC	Süper Bükümlü Kayan Kip
TID	Eğim-İntegral-Türev
TRAS	İkiz Pervane Aerodinamik Sistem
TRMS	İkiz Pervaneli MIMO Sistemi
T2FNN	Tip-II Bulanık Sinir Ağı

1. GİRİŞ

Günümüzde pek çok farklı türde helikopter mevcuttur ve en popüler olanı bir ana ve bir kuyruk pervaneli tiptir. Bu tip helikopterlerde yükselme, ileri ve yan hareket için ana pervane kanatlarının yaklaşma açısı değiştirilir. Kuyruk pervanesi, dikey eksen etrafında dönüş ve ana pervane hareketi ile oluşan dikey eksen etrafındaki tork dengesi için kullanılır. Bir helikopterin özel avantajı, pistlere ihtiyaç duymadan dikey olarak iniş ve kalkış yapabilmesi ve havada tek bir nokta üzerinde sabit bir şekilde süzülmeyi sürdürmesidir. Bu dengenin sağlanabilmesi ve ideal şartlarda pervane açıları elde edilerek helikopterin dengelenmesi için uygun kontrol yöntemi şarttır.

İki pervaneli bir helikopteri modellemek için çok girişli çok çıkışlı ikiz pervaneli sistem (TRMS) kullanılır. TRMS, helikopterin dinamiklerini temsil eden bir sistemdir. TRMS sistemi, bir kiriş ile birbirlerine bağlantılı olan ana ve kuyruk pervanesinden oluşmaktadır. Bu sistem doğrusal olmayan karmaşık bir sistemdir. TRMS sisteminin dengesinin sağlanması için her iki pervane açıları, pervanelerin bağlı bulunduğu DC motorların hızları değiştirilerek ayarlanır. DC motorların hız kontrolünü yapmak için birçok kontrol yöntemi bulunmaktadır. TRMS yardımıyla laboratuvar şartlarında kontrol deneyleri gerçekleştirilebilmektedir.

Günümüzde birçok hava aracının aktif olarak kullanılmasıyla birlikte hem küçük ölçekli hava araçlarında hem de helikopter ve türevi niteliğindeki hava araçlarındaki mekanik sistemlere yönelik çalışmalar ve bu yöndeki teknik kısımların geliştirilmesine yönelik incelemeler gün geçtikçe artış göstermektedir. Pervaneler arasındaki önemli bağlantı etkisi ve bazı sistem durumlarının bulunamaması nedeniyle hava araçlarının dinamik sistemlerinin modellenmesi zordur. Model parametrelerinin belirsizliği ve yük bozuklukları ile başa çıkmada uygun bir dayanıklılık elde edebilmek için sağlam bir kontrol yöntemi şarttır. Özellikle pervaneler arası denge, helikopterin var olmasını ve uçuş güvenliğini sağlayan en önemli etkidir.

Tasarlamış olduğu iki farklı TRMS modeline PID ve model referans kayan kip kontrolcülerini uygulamış ve benzetim sonuçlarını karşılaştırmıştır. TRMS sistemi açı kontrolü için tasarlanan PID kontrolörün lineer modelde daha iyi çalıştığı, model referans kayan kip kontrolörün ise iki model için de sistemin kontrolünü sağladığını göstermiştir (Mucuk, 2018).

Optimizasyon, genel anlamıyla, bir sistemi belirli kısıtlamalar çerçevesinde mümkün olduğunca en az maliyetle en verimli hale getirmek için uygulanması gereken, işlem veya metotların tümüne denir. Kısaca, bir problemi en uygun şekilde çözmek veya bir sistemi mümkün olan en iyi duruma getirme işlemidir.

TRMS'nin dikey ve yatay hareketleri için matematiksel model laboratuvar ortamında MATLAB üzerinde elde edilmiştir. Bode'nin kontrol döngüsü referans alınarak kesir dereceli denetleyicilerin tasarımı parametre vektör optimizasyon yöntemiyle yapılmıştır. Böylece önceki optimizasyon algoritmalarından farklı bir şekilde kesir dereceli sistem tasarımı yapılabileceği, kesir dereceli sistemin tasarlanması için de yeni optimizasyon yöntemlerinin geliştirilebileceği ve online çalışan optimizasyon algoritması geliştirilebileceği sonuçlarına varılmıştır (Ateş, 2013).

Parçacık sürü optimizasyonu kullanarak oransal-integral (PI), oransal-integral-türev (PID) denetleyicisi ile gerçek zamanlı denetim üzerine yapılan çalışmada PI-PID denetleyicisi ile belirgin derecede yüksek performans gözlemi yapılmıştır (Takeş, 2019).

Yapılan çalışmada TRMS' de ana ve kuyruk pervane açılarını ayarlamak için PID ve modifiye edilmiş PID (I-PD) yöntemleri kullanılmıştır. PID ve I-PD yöntemlerinde kullanılan kontrolcü parametrelerinin belirlenmesi, sistemin çalışmasını etkilemektedir.

Kontrolcü parametrelerinin belirlenmesi için birçok yöntem kullanılmaktadır. Bu yöntemlerin başlıcaları Ziegler-Nichols, Cohen-Coon Ayarlama Yöntemi, deneme yanılma vb. yöntemleridir.

Yapılan çalışmada, kontrolcü parametreleri meta sezgisel optimizasyon algoritmalarından olan guguk kuşu algoritması kullanılarak belirlenmiştir.

Parametrelerin belirlenmesi ve sistemin çıkış değerlerinin elde edilmesi için benzetim çalışmaları, MATLAB/Simulink programında yapılmıştır. Benzetim çalışmalarında ana ve kuyruk pervanelerini referans açısı değerine en uygun şekilde yaklaştıran kontrolcü parametreleri bulunduktan sonra deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir.

Yapılan tez çalışmasında öncelikle çalışılan konu ile ilgili yapılmış olan çalışmalar sunulmuştur, çalışmada kullanmış olduğumuz sistemin teknik özellikleri ve çalışmada kullanılan yöntemler ile algoritmalar detaylı olarak açıklanmıştır. Çalışmada

elde etmiş olduğumuz bulgular sunulmuş, bu bulgular yorumlanarak elde edilen sonuçlar verilmiştir.





2. KAYNAK BİLDİRİŞLERİ

TRMS sistemini hem dikey hem de yatay düzlemde kontrol etmeye yönelik kontrolör tasarımı yapılmıştır. KDPID denetleyici ile çalışmanın, tek kesir dereceli ve iki kesir dereceli PID denetleyicilere kıyasla geçici yanıt ve hata yanıtı için daha iyi tepki verdiği sonucuna varılmıştır (Chaudhary ve Kumar, 2019).

Bulanık mantık kontrolü yöntemiyle diğer kontrol yöntemleri karşılaştırılmıştır. Tasarlanan bulanık kontrolör, sadece girdilerin kararlı takibini elde etmek için sistemi kontrol etme amacını karşılamakla beraber, geleneksel kontrolcülerle karşılaştırıldığında performansta üstün olduğu sonucuna varılmıştır (Islam, 2003).

TRMS sistemi kontrol sorunu için kullanılan uyarlanabilir kontrolörler (PID), daha önce başkaları tarafından yerine getirilmeyen, küresel kararlılığı, yüksek derecede sağlamlığı ve mükemmel izleme performansını aynı anda sürdürmenin üç gereksinimini de karşılamıştır. Yaklaşık Uyarlanabilir PID, sistem için ayrıştırıcılar tasarlamaya gerek kalmadan aynı anda çalışırken ana pervaneyi stabilize edebilmiş ve kuyruk pervanesi ile ana pervane arasındaki çapraz kuplajın etkisini iptal edebilmiştir. Böylece ana pervanenin, Yaklaşık Uyarlanabilir PID kullanılarak kuyruk pervanesinin durumundan bağımsız hale getirilebileceği sonucuna varmışlardır (Netto vd., 2019).

TRMS sistemleri için önerilen bir sezgisel bulanık kontrolcü ile optimal PID yöntemi karşılaştırılmış, önerilen sezgisel bulanık kontrol yönteminin sistem belirsizlikleri altında optimal PID yöntemine bir alternatif sunduğu gösterilmiştir. Benzetim sonuçları, sezgisel bulanık kontrolün referans sinyalinin izleme performansını PID sistemine göre tatmin edici düzeyde iyileştirdiğini göstermiştir. Önerilen sistemin sezgisel bulanıklaştırılması ve tanımlanması iyi yapılmalıdır sonucuna varılmıştır (Castillo vd., 2015).

TRMS' de durum stabilizasyonunu sağlamak için tip-II bulanık mantık PID kontrolcü yaklaşımı önerilmiştir. Bu yaklaşım, tip-II bulanık mantık denetleyicisine dayanmaktadır. Önerilen yaklaşım, parametrik belirsizlikler ve gürültü ölçümü varlığında iki serbestlik dereceli helikopterin kontrolüne başarıyla uygulanmıştır (Samir vd., 2014).

Helikopter gibi doğrusal olmayan sistemlerin asimptotik şekilde kararlı olmasını sağlamasındaki kolaylıktan dolayı TRMS sisteminde kullanılan yaygın kontrolcülere ek

olarak kesirli mod kullanılmıştır. Çalışmada önerilmiş olan birleşik KDPID-KDSBKM kontrol yönteminin TRMS sisteminin kontrolü için kolaylıkla kullanılabileceği sonucuna varılmıştır (Abukan, 2021).

Hava araçlarının modellenmesi, yüksek doğrusal olmayan davranış ve pervaneler arasındaki önemli kuplaj etkisi nedeniyle zorlu bir iştir. Parametrik belirsizlik altında TRMS' nin ana ve kuyruk pervanesinin eğim ve sapma açısı kontrolü için kayan kipli kontrol (SMC) ve geri adımli kontrolör tasarımı ve analizi yapılmıştır. SMC ve geri adımlama ile önerilen kontrol stratejisi, TRMS' nin belirtilen tüm sınırlamalarına ulaşmıştır. SMC ve geri adım kontrol şemalarının sonuç analizi, geri adımın ikiz pervane sistemi için parametrik belirsizlik ile verimli davranış sağladığını göstermiştir. SMC'nin çatırtı ve salınım davranışları, TRMS için eğim ve sapma açısı dikkate alınarak geri adımli kontrol şeması ile ortadan kaldırılmıştır (İlyas vd., 2016).

Metasezgisel algoritma kullanarak TRMS' yi önemli ölçüde çapraz bağlantılarla eşzamanlı olarak stabilize edebilen ve istenen bir konuma ulaşmak için tatmin edici izleme performansı sağlayabilen tahmini olarak optimal/optimuma yakın bir kontrol yasası tasarlanmıştır. TRMS deney düzeneğinin parametreleri, PSO tabanlı bir metodoloji ile tahmin edilmiştir. Önerilen yöntem, tasarım sürecinde yüksek derecede otomasyon ile eş zamanlı olarak iyi izleme performansı sağlayabildiğini başarıyla göstermiştir (Maiti vd., 2018).

Döner kanatlı bir insansız hava aracının itme-tork oranını iyileştirmek için bir ABC algoritması kullanma amacıyla yapılan çalışma, bal arılarının doğal davranışlarının modellenmesine dayanmaktadır. Optimizasyon sırasında elde edilen sonuçlar göstermektedir ki, ABC algoritması çok başarılı bir performans göstermiştir. İtme-tork oranı hesabında maksimum değerler için optimum giriş parametrelerinin elde edilmesi sonuçlarına göre; çalışmada önerilen yaklaşımın etkili olacağı gösterilmiştir. Döner kanatlı İHA tasarımında tasarımcılara kolaylık sağlamak amaçlanmıştır (Konar vd., 2020).

Karınca kolonisi optimizasyonu (ACO) algoritması, kayan kipli denetleyici (SMC), bulanık mantık denetleyicisi (FLC) ve ACO aracılığıyla TRMS konumlarının kontrolü için yeni bir yaklaşım araştırmışlardır. Sonuç olarak, ACO kullanılarak tasarlanan DFSMC, aynı yöntemle ayarlanan PID denetleyiciye kıyasla yörünge izleme

açısından iyi bir doğruluk elde edebilir. TRMS yörünge kontrolünde daha iyi kontrol performansına sahip olduğu doğrulanmıştır (Allouani vd., 2011).

İkiz pervane Aerodinamik Sisteminin (TRAS) eğim kontrolü için nöro tabanlı FOPID (NNFOPID) ve parçacık sürüsü tabanlı FOPID (PSOFOPID) olarak adlandırılan kesirli sıralı orantılı-integral-diferansiyel (FOPID) kontrolünün ayarlanmasında iki yaklaşım incelenmiştir. FOPID kontrolleri enerji tüketimini önemli ölçüde azaltırken, sistemin izleme performansını sürdürmüş ve neredeyse benzer değerlendirme süresi tüketmiştir. FOPID kontrolünün esnekliğini artırarak istenen bozulmayı reddetme kabiliyeti elde edilmiştir ve yüksek bir kontrolör kazancının önemli bir kontrol sinyali ürettiğine dair sonuç elde edilmiştir (Norsahperi ve Danapalasingam, 2019).

Dragonfly (yusufoçuk) Algoritması (DA) değiştirilmiş ve hibrit versiyonlar olarak sınıflandırılan yeni varyantlarının kapsamlı bir incelemesini sunmuştur. Çok çeşitli optimizasyon problemlerinin etkili bir şekilde çözülebilmesi ve parametrelerini ayarlamak için DA ile değiştirilmiş sürümlere ihtiyaç olduğu sonucuna varılmıştır (Meraihi ve Ramdane-Cherif, 2020).

Arı algoritması (Bee Algorithm) kullanılarak bir kablosuz sensör ağındaki kapsama alanını optimize etmek için bir yöntem tanıtılmıştır. Önerilen yöntem MATLAB ortamında simüle edilmiş ve sonuçları genetik algoritma ile karşılaştırılmıştır. Buna göre, arı algoritmasının genetik algoritmaya göre optimum kapsama yüzdesini verdiğini ve sistem kaynaklarını kullanmanın ve algoritmanın uygulanmasının daha az zaman aldığını ve ayrıca daha az sayıda sensör gerektirdiğini göstermiştir. Böylece elde edilen sonuçlara göre arı algoritması, genetik algoritmaya göre kablosuz sensör ağının daha iyi kapsanmasını sağlamıştır (Khalaf ve Abdulsahib, 2020).

Bir helikopter sisteminin harici girdilere (bozukluklar, gürültüler ve parametrik belirsizlikler) karşı LFT tabanlı LPV tekniği ile sağlam stabilizasyonunu araştırmıştır. LPV tutum modelini kurarak, sistem için LPV sağlam kontrolörü tasarlanmıştır. Ağırlıklandırma işlevleri, bir meta-sezgisel optimizasyon algoritması olan Cuckoo Search tarafından hesaplanmıştır. Benzetim sonuçları, sistemin sağlam olduğunu, dış girdilere ve belirsizliklere karşı dayanıklı olduğunu göstermiştir (Hasseni ve Abdou, 2020).

Bir helikopter sisteminin istenen yörüngelerini izlemek için tip-II bulanık sinir ağına (T2FNN) dayalı uyarlanabilir ve sağlam bir uyarlanabilir kontrol stratejisi önermiştir. Ayrıca kayma yüzeylerinin kazanımlarını içeren parametreler guguk kuşu optimizasyon algoritması (COA) ile optimize edilmiş ve sonuçlar genetik algoritma (GA), parçacık sürüsü optimizasyonu (PSO), karınca kolonisi optimizasyonu (ACO) ile elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Kapsamlı benzetimler, önerilen COA tabanlı ESMC-AT2FNN yaklaşımının, geliştirilmiş geçici ve kararlı durum yörünge izleme performansı açısından test edilen diğer tekniklere (yani GA, PSO ve ACO) kıyasla etkinliğini göstermiştir (Shirzadeh vd., 2020).

Tek pervaneli orta ölçekli bir taşıtın uçuş kontrol sisteminin parametre optimizasyonu sunulmuştur. Endüstride kurulan PID kontrolörlerin çoğu zayıf bir şekilde ayarlandığından, uçuş kontrolörü parametrelerinin parçacık sürüsü optimizasyonu (PSO), genetik algoritma (GA), karınca kolonisi optimizasyonu (ACO) ve guguk kuşu algoritması kullanılarak optimize edilmiş ayarının bir karşılaştırmasını, belirtilen amaç fonksiyonunu en aza indiren en iyi PID parametrelerini bulmak için yapmışlardır (Mpanza ve Pedro, 2021).

Çok döngülü kesir dereceli bir PID denetleyici tasarlanmış ve etkileşimli iki konik tank prosesi üzerinde çok amaçlı optimizasyon, Cuckoo algoritması kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Önerilen kontrolör servo, düzenleyici ve servo düzenleyici problemler için doğrulanmıştır ve yanıtındaki değişiklik için manipüle edilen değişken de sunulmuştur. İstenilen performansı elde etmek için kontrolörlerin çevrimiçi ayarlanması yoluyla kontrolör parametrelerinin karmaşık matematiksel tasarımına bir alternatif sağlamıştır (V. Aparna vd., 2017).

Büyük ölçekli doğrusal zamanla değişmeyen sistemlerin merteye indirilmesi için Cuckoo Search (CS) algoritmasına dayalı yeni bir yöntem araştırılmıştır. Basamak cevabının karşılaştırılması, azaltılmış dereceli modellerin orijinal model için mükemmel bir yaklaşım sağladığını göstermiştir. SISO sistemde uygulanan yöntem geliştirilerek MIMO sistemler de dahil edilmiştir. Önerilen yöntemin etkinliği ve üstünlüğü önerilen yöntemle elde edilen indirgenmiş mertebeli modelin ve diğer yöntemlerle elde edilen indirgenmiş mertebeli modelin IAE ve ITAE gibi diğer performans indeksleri ile de değerlendirilmiş ve önerilen yöntemle elde edilen indirgenmiş mertebeli modelin daha iyi performans sergilediği gözlenmiştir ve neredeyse tüm temel özellikler korunmuştur.

Orijinal model kararlıysa, azaltılmış dereceli model kesinlikle kararlıdır sonucuna varılmıştır (Sikanderab ve Prasada, 2015).

Bulanık mantık denetleyicisinin performansını iyileştirmek ve parametrelerini optimize etmek için Cuckoo optimizasyon algoritması önerilmiştir. Sıradan bulanık mantık denetleyicisi ve PID denetleyicisi ile karşılaştırılmıştır. Benzetim sonuçları, çevrimiçi optimize edilmiş bulanık mantık denetleyicisinin, çevrimdışı denetleyicilere kıyasla daha üstün bir kontrol performansı ile sonuçlandığını göstermiştir (Fard vd., 2016).

Dinamikleri bir helikoptere benzeyen dört pervaneli sisteme uygulanmak üzere modelden bağımsız bir geri adımlı kontrolör (OMFBC) geliştirilmiştir. Bir çoklu giriş-çok çıkışlı (MIMO) doğrusal olmayan sistem sınıfı için doğrudan optimal kontrol tasarımı önerilmiştir. Bilinmeyen sistem dinamikleri ve dış parazitlerle başa çıkmak için optimal bir kontrol yasası geliştirmek için modelden bağımsız geri adım atma yaklaşımı ve guguk kuşu arama algoritması kullanılmıştır. Ayrıca, önerilen denetleyicinin parametreleri bir maliyet fonksiyonuna göre guguk kuşu arama algoritması tarafından optimize edilmiştir. Helikopter sistemine uygulanan sayısal benzetimlerin sonuçları, önerilen kontrol stratejisinin sağlamlığını ve etkinliğini göstermiştir (Glida vd., 2020).

TRMS' yi gerçek zamanlı olarak kontrol etmek için bir AFC geliştirilmiştir. Kapalı döngüdeki sistem kararlılığı, sert rüzgarlara, dış etkenlere ve belirsizliklere karşı sağlamlığı artırmak için tüm uyarlamalı yasaların üretildiği Lyapunov yöntemiyle gösterilmiştir. Önerilen kontrolörlerin performansı, istenilen farklı sinyallerle test edilmiş ve TRMS' nin referans yörüngeleri iyi performanslarla takip edebildiği gösterilmiştir. Deneysel sonuçlara göre önerilen kontrol stratejisi dış etkenler, belirsizlikler ve rüzgâr varlığında iyi izleme performansını kanıtlamaktadır (Zeghlache vd., 2020).

Ana ve kuyruk alt sistemleri arasında yüksek bir doğrusal olmama durumu ve çapraz bağlantı etkisi ile karakterize edilen TRMS' nin küresel hızlı dinamik terminal kayan mod kontrolü (ARBFNNGFDTSMC) 'nün deneysel bir doğrulaması yapılmıştır. TRMS' nin bilinmeyen doğrusal olmayan dinamiklerini belirlemek için önerilen kontrol tasarımında uyarlanabilir radyal tabanlı işlev sinir ağı (RBFNN) kullanılmıştır. Ek olarak, sert rüzgarları, dış bozulma etkilerini azaltmak ve uyarlanabilir radyal tabanlı

işlev sinir ağı (RBFNN) 'nın tahmin hatalarını telafi etmek için başka bir uyarlanabilir kontrol ifadesi eklenmiştir (Ghellab vd., 2021).

Yüksek doğrulukta, doğrusal olmayan bir modele dayalı TRMS' nin kontrol yönelimli bir analizi yapılmıştır. Hem benzetimde hem de fiziksel TRMS sisteminde iyi izleme yanıtları elde edilmiştir. Benzetimde tahminlemesi yapılan tepkilerin, gerçek fiziksel sistemde gözlemlenen tepkiler ile çok yüksek oranda benzerlik gösterdiği sonucuna ulaşılmıştır (Prempain ve Visintini, 2018).

TRMS' nin doğrusal zamanla değişmeyen modellemesi için bir kara kutu sistem tanımlaması gerçekleştirilmiştir. Model parametresinde deneysel ve model çıktısı arasındaki sapmayı en aza indirmek amaçlanmıştır. Deneysel veriler, açık çevrim çalışma modunda gerçek zamanlı sistemden elde edilmiştir. Benzetim ve deneysel sonuçlar, diğer modellere göre DEsPA algoritması kullanılarak elde edilen daha yüksek modelleme doğruluğunu açıkça göstermiştir. Doğruluğun daha da geliştirilmesi için TRMS için kesir dereceli modelleme çalışması planlanmıştır (China vd., 2020).

TRMS' de uygulanan doğrusal olmayan bir otoregresif hareketli ortalama denetleyicinin (NARLA-L2) tasarımı sunulmuştur. Bu yöntemin, bu tür karmaşık doğrusal olmayan sistemlerin kontrolü için çok yararlı ve uygulanabilir olduğuna fakat NARMA-L2' nin bu tür sistemler için en iyi kontrolü sağlamadığı sonucuna varılmıştır (Abderrahmene vd., 2019).

TRMS' nin dengede çalışması için oransal-integral-türev (PID), kesir dereceli PID (FOPID), kayan kip (SMC), Süper bükümlü kayan kip (STSMC) ve Kesirli dereceli süper bükümlü kayan kip (FOSTSMC) kontrol yöntemleri kullanılmıştır. Pervaneler için ayrı kontrolcüler kullanılmadan ana pervane için FOPID, kuyruk pervanesi için de FOSTSMC yöntemleri ile bir tümleşik yöntem oluşturulmuştur. Çalışmada önerilen FOPID & FOSTSMC tümleşik yönteminin TRMS MIMO sistem kontrolünde kolaylıkla kullanılabileceği sonucuna varılmıştır (Abukan ve Almalı, 2022).

TRMS' nin sapma ve eğim açısı kontrol parametreleri klasik ve kelebek tabanlı parçacık sürü optimizasyonu (BPSO) yöntemi kullanılarak bulunmuştur. Deneysel çalışmalarda, TRMS' de ana pervane ve kuyruk pervane açılarının referans değerlerine FOPID, PID ve TID kontrolörleri ile ulaşılmaya çalışılmıştır. Yerçekimine karşı en başarılı tepkinin PID denetleyici ile elde edildiği görülmüştür. Kelebek tabanlı parçacık

sürüsü optimizasyonu, klasik parçacık sürüsü optimizasyonuna göre daha iyi sonuçlar vermiştir (Çabuker vd., 2023)





3. MATERYAL VE YÖNTEM

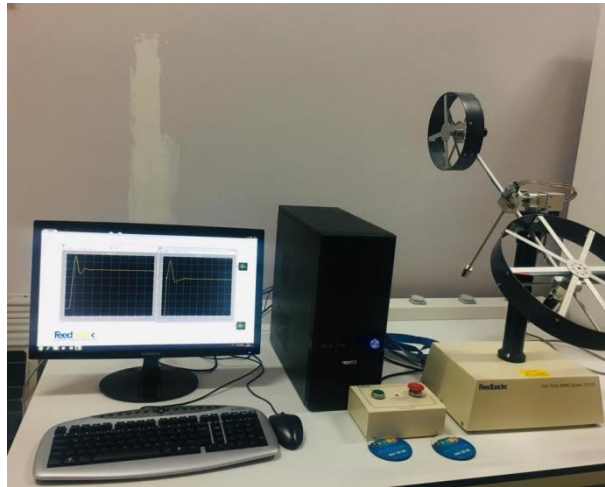
Yapılan çalışmada bölümümüz laboratuvarında bulunan TRMS deney seti kullanılmıştır. TRMS' nin ana ve kuyruk pervane açılarının kontrolü için PID ve I-PD kontrolcüler kullanılmıştır. Kontrolcü parametreleri guguk kuşu algoritması kullanılarak belirlenmiştir. Çalışmanın bu bölümünde kullanılan materyal ve yöntemler anlatılmıştır.

3.1 Materyal

3.1.1 İkiz Pervaneli Çoklu Girişli Çoklu Çıkışlı Sistem (TRMS)

Günümüz teknolojinin ilerlemesiyle birlikte hava araçlarının geliştirilerek çeşitlendirilmesi ile hava sanayisinde kullanılan helikopter vb. hava araçlarının kontrol edilmesi konusu da büyük önem arz etmektedir. Güvenlik, görüntü alma, sağlık sektörü, orman yangınlarına müdahale, taşımacılık vb. alanlarda özellikle savunma sanayi kapsamında askeri, emniyet güçleri ve türevlerince sıklıkla kullanılan helikopterlerin uçuş esnasındaki kontrolü üzerine çalışılarak geliştirme sağlayabilmek için Feedback Instruments firmasının geliştirdiği ve helikopter prototipi şeklinde tasarlanmış olan bu sistemde her iki pervane (ana ve kuyruk) üzerinde perçinlenmiş olan DC motor bulunur. Ana ve kuyruk pervane açıları olmak üzere iki açığa sahiptir.

Çalışmada kullanılan TRMS' nin fiziksel yapısı Şekil 3.1'de verilmiştir.



Şekil 3.1 TRMS' nin fiziksel yapısı

TRMS' de dört temel donanım vardır: bu donanımlardan iki tanesi aktif kısım diye adlandırılan yapıyı oluşturur ve sistemin aşağı-yukarı hareketini sağlayan ana pervane (pitch) ile sistemin sola-sağa hareket etmesini sağlayan kuyruk pervane (yaw) parçalarıdır. Üçüncü ve dördüncü kısımlar ise, aktif kısımların hareketi esnasında sistemin dengede olmasını sağlayan karşı ağırlık (counterbalance) ve pervanelerin düşey-yatay yönde hareketini sağlayan mili tutan gövde kısmıdır (Takeş vd., 2019).

TRMS, her biri bir pervaneye bağlanmış iki DC motor tarafından tahrik edilmektedir. Gerçek bir helikopterde olduğu gibi, iki pervane birbirine diktir. İki motor arasındaki bağlantı hem yatay hem de dikey düzlemlerde serbestçe hareket edebilen, tabanı üzerinde döndürülen bir kiriş tarafından kurulur. Ayrıca ana kirişe dik olarak sabitlenmiş başka bir kirişe monte edilmiş bir karşı ağırlık vardır. Kiriş, pervanelerin dönüş hızını etkilemek için motorların giriş voltajlarını değiştirerek hareket ettirilebilir. Helikopterin laboratuvar modeli orijinalinden oldukça farklı olsa da bir kontrolcü tasarlarken üzerinde durmamız gereken ana pervane ile kuyruk pervanesi arasındaki güçlü çapraz bağlantının, gerçek helikopter sistemindeki davranışına en yakın şekilde veriler elde edilmesine olanak sağlamaktadır.

TRMS, biri ana pervane ve diğeri kuyruk pervanesi için olmak üzere iki sabit mıknatıslı DC motora sahiptir. Bu iki motor teknik kapsam ve şekil olarak aynı özelliktedir. Pervaneler eşit olmayan boyutlarda olduğundan dolayı motorlar farklı yüklerle çalışır. TRMS sisteminde pervaneler motorlara sıkı bir şekilde bağlantılıdır, böylece hem pervanenin hem de motorun atalet momentlerinden oluşan bileşik bir atalet momenti elde edilir. Bir cismin atalet momenti, onun bir eksen etrafındaki açısal hareketinin etkileri ile ortaya çıkan sürtünme torku ve açısal hız ile orantılıdır. DC motorun girişlerine voltaj bağlanarak, armatür voltajına ve dolayısıyla giriş akımına bağlı bir tork oluşturulur. Pervanenin hareketi birinci dereceden lineer olmayan bir diferansiyel denklem olarak tanımlanabilir. Yerçekimi Kuvveti her zaman kütleyi dünyanın yüzeyine dik olarak etkilediğinden, ortaya çıkan tork yalnızca dikey açıyı etkiler.

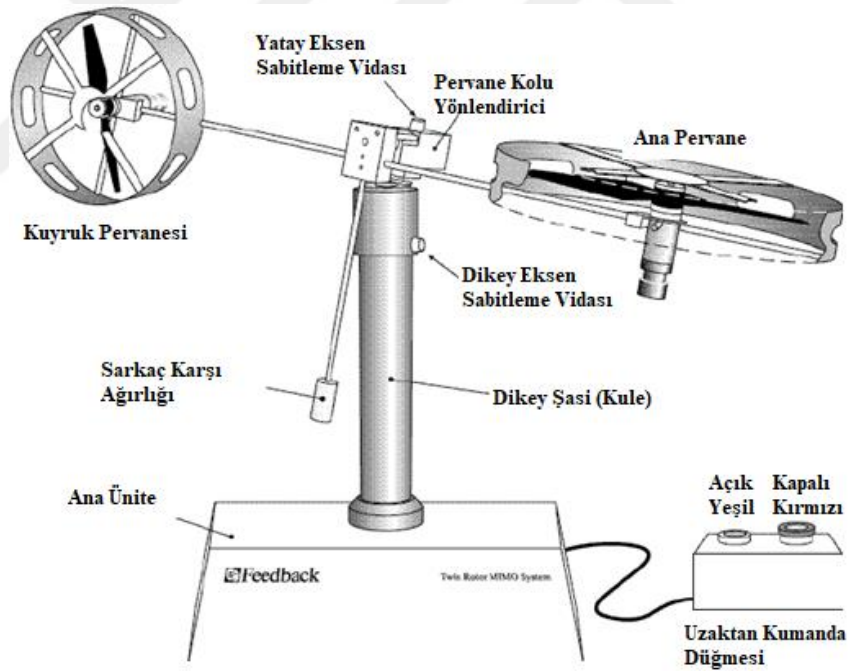
Bir helikopter, yükselme kuvvetini döner bir basınç farkı yaratarak üretir. Newton yasasıyla ilgili olarak, havayı aşağı iten kuvvetin tersi yönde bir kuvvet vardır. Pervanenin yüzü, dönme hızı ve çevreleyen ortamın yoğunluğu, yükselme kuvvetini belirleyen ana unsurlardır.

Yatak sürtünme olayında motorlar için bağlantı kabloları çok hafif olursa ve serbestçe sarksa dahi, yatay ekseninde dikkate alınması gereken bir burulma kuvveti vardır.

Newton yasasına göre, her kuvvetin zıt yönde tamamlayıcı bir kuvveti vardır. Bu, DC motorlar tarafından oluşturulan momenti işaret etmektedir. Motorlar sırasıyla diğer eksenini etkileyen bir tork oluşturur.

Merkezkaç Kuvveti, dönme ile ilgili iki farklı kuvveti ifade eden bir terimdir. Her ikisi de dönme ekseninden uzağa yönlendirilmiştir. Eksene doğru yönlendirilen kuvvete merkezci kuvvet denir.

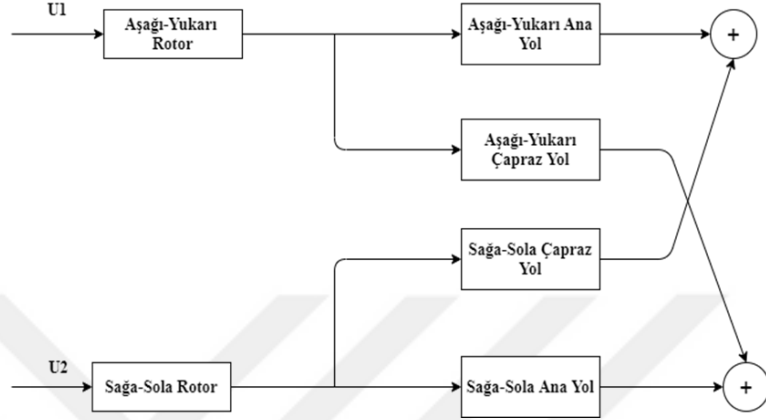
Yapılan çalışmada kullandığımız TRMS mekanik görünümü Şekil 3.2’de gösterilmiştir. Matlab programı üzerinden kontrol edilebilen bu sistem sayesinde kuyruk ve pervaneler arasındaki gerekli açısal ayarlamalar yapılarak sistem en ideal denge haline getirilerek tahminleme işlemleri gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.2 TRMS mekanik görünümü

Şekil 3.1 ve Şekil 3.2’de gösterilen sistem, TRMS sistemi üzerinde kontrol deneyi yapabilmek için geliştirilmiş olan çift giriş çift çıkışa sahip bir platformdur. Sistemin kontrolü, iki adet giriş (pervanelere verilen gerilim) ve 2 adet çıkış (açısal hız

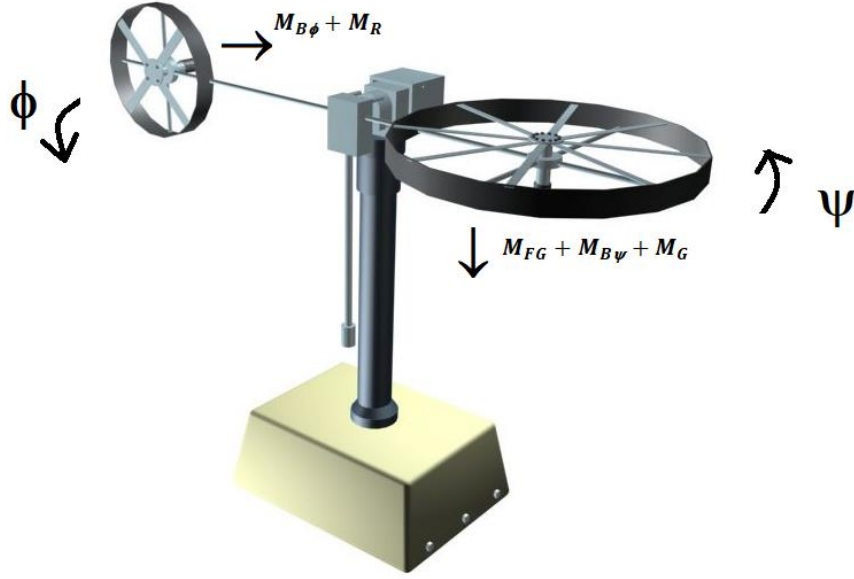
ve dikey-yatay aç) ile sağlanır (Feedback Ins. Ltd.). Bu sistem üzerinde bulunan serbest çubuğun uçlarındaki, birbirlerine dik konumda olan pervaneler sayesinde yatay ve dikey olarak hareket edebilme kabiliyetine sahiptir. TRMS' nin yatay ve dikey hareket durumları Şekil 3.3'te gösterilmiştir.



Şekil 3.3 TRMS sistem şeması

Pervanelerin döndürölmesi DC motorlar yoluyla gerçekleşir. Pervanelerin dönme yoluyla ürettiği kuvvet ile sistemin yatay eksen ve dikey eksenle yaptığı açılar kontrol edilmektedir. Sistemdeki pervanelerin (kanatların) çevresi koruyucu ekipman ile kapatılarak pervanelerin herhangi bir yere çarpmasına ve laboratuvar çalışması esnasında meydana gelebilecek kazalara karşı önlem alınmıştır. Bu sistemin kararlı halde tutulması için sisteme serbest çubuğa dik bir şekilde denge çubuğu ve denge ağırlığı eklenmiştir. Denge çubuğu üzerinde bulunan denge ağırlığının konumu değiştirilebilmekte fakat bu konum değişimi sistemin dinamiğinin etkilenmesine sebep olmaktadır.

TRMS sisteminin elektro-mekanik yapısı Şekil 3.4’te verilmiştir.



Şekil 3.4 TRMS elektro-mekanik yapısı

Şekil 3.4’te verilen TRMS’ nin elektro-mekanik yapısı kullanılarak sisteme ait doğrusal olmayan model denklemleri aşağıdaki gibi elde edilir.

Ana pervane için dikey düzlemin eylemsizlik momenti Eş. 3.1’de verilmiştir.

$$J_1 = M_{FG} + M_{B\psi} + M_G \quad (3.1)$$

Eş. 3.1 de verilen M_{FG} yerçekimi momentumu, $M_{B\psi}$ dikey sürtünme momentum fonksiyonu, M_G jiroskopik momentumunu göstermektedir.

Kuyruk pervanesi için ise yatay düzlemin eylemsizlik momenti Eş. 3.2’ de verilmiştir.

$$J_2 = M_{B\phi} + M_R \quad (3.2)$$

Eş. 3.2’de verilen $M_{B\phi}$ yatay sürtünme momentum fonksiyonu, M_R reaksiyon momentumu ifade etmektedir.

Eş. 3.1 ve Eş. 3.2 verilen TRMS modeline ait moment denklemlerine göre, sistemin doğrusal olmayan matematiksel modeline ait eşitlikler ana pervane için Eş. 3.3, kuyruk pervanesi için de Eş. 3.5’te verilmiştir.

Ana pervane için, sistemin doğrusal olmayan matematiksel modeline ait eşitlikler;

$$\begin{aligned}
I_1 \ddot{\psi} &= M_1 - M_{FG} - M_{B\psi} - M_G \\
M_1 &= a_1 \tau_1^2 + b_1 \tau_1 \\
M_{FG} &= M_g + \sin \psi \\
M_{B\psi} &= B_{1\psi} \dot{\psi} + B_{2\psi} \text{sign}(\dot{\psi}) \\
M_G &= K_{gy} M_1 \dot{\psi} \cos(\psi)
\end{aligned} \tag{3.3}$$

Eş. 3.3'te M_1 doğrusal olmayan durum karakteristiğidir. M_G jiroskopik momentumdur ve M_{FG} yerçekimi momentumudur. Ana pervane momentumu τ_1 Eş. 3.4'te tanımlanmıştır;

$$\tau_1 = \frac{k_1}{T_{11}s + T_{10}} u_1 \tag{3.4}$$

Kuyruk pervane için, sistemin doğrusal olmayan matematiksel modeline ait eşitlikler;

$$\begin{aligned}
I_2 \ddot{\phi} &= M_2 - M_{B\phi} - M_R \\
M_2 &= a_2 \tau_2^2 + b_2 \tau_2 \\
M_{B\phi} &= B_{1\phi} \dot{\phi} + B_{2\phi} \text{sign}(\dot{\phi}) \\
M_R &= \frac{k_c(T_0s + 1)}{(T_p s + 1)} \tau_1
\end{aligned} \tag{3.5}$$

Eş. 3.5'te M_R reaksiyon momentumudur ve kuyruk pervane momentumu τ_2 Eş. 3.6'daki gibi verilir;

$$\tau_2 = \frac{k_2}{T_{21}s + T_{20}} u_2 \tag{3.6}$$

TRMS'nin doğrusal olmayan matematiksel modeline ait parametreler Çizelge 3.1'de verilmiştir.

Çizelge 3.1 TRMS'nin doğrusal olmayan model parametreleri

Parametre	Değer
I_1 -Ana pervanesi atalet momenti	$6.8 \cdot 10^{-2} kg \cdot m^2$
I_2 -Kuyruk pervanesi atalet momenti	$2 \cdot 10^{-2} kg \cdot m^2$
a_1 -Statik karakteristik parametresi	0.0135
b_1 -Statik karakteristik parametresi	0.0924
a_2 -Statik karakteristik parametresi	0.02
b_2 -Statik karakteristik parametresi	0.09
M_G -Jiroskop momentumu	0.32 Nm
$B_{1\psi}$ -Sürtünme momentum fonksiyon parametresi	$6 \cdot 10^{-3} Nm/rad$
$B_{2\psi}$ -Sürtünme momentum fonksiyon parametresi	$1 \cdot 10^{-3} Nm/rad$
$B_{1\phi}$ -Sürtünme momentum fonksiyon parametresi	$1 \cdot 10^{-1} Nm/rad$
$B_{2\phi}$ -Sürtünme momentum fonksiyon parametresi	$1 \cdot 10^{-2} Nm/rad$
K_{gy} -jiroskop momentum parametresi	0.05 rad/s
k_1 - 1. motor kazancı	1.1
k_2 - 2. motor kazancı	0.8
T_{11} - 1. Motor payda parametresi	1.1
T_{10} - 1. Motor payda parametresi	1
T_{21} - 2. Motor payda parametresi	1
T_{20} - 2. Motor payda parametresi	1
T_p -Çapraz reaksiyon momentum parametresi	2
T_0 -Çapraz reaksiyon momentum parametresi	3.5
k_c -Çapraz reaksiyon momentum kazancı	-0.2

Dinamik denklemler kullanılarak doğrusallaştırılmış sistemin durum uzay modeli şu şekilde verilir:

$$\begin{aligned}\dot{x} &= Ax + Bu \\ y &= Cx + Du\end{aligned}\tag{3.7}$$

Durum vektörü:

$$x = [\psi \ \dot{\psi} \ \phi \ \dot{\phi} \ M_R \ \tau_1 \ \tau_2]^T \quad (3.8)$$

Giriş vektörü:

$$u = [u_1 \ u_2]^T \quad (3.9)$$

Çıkış vektörü:

$$y = [\psi \ \phi]^T \quad (3.10)$$

Eş. 3.7 de verilen A sistem matrisi, B giriş matrisi, C çıkış matrisi ve D ileri besleme matrisi aşağıda verilmiştir.

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-M_g}{I_1} & \frac{-B_{1\psi}}{I_1} & 0 & 0 & 0 & \frac{b_1}{I_1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{-B_{1\phi}}{I_2} & \frac{-1}{I_2} & 0 & \frac{b_2}{I_2} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{-1}{T_p} & \frac{k_c}{T_p} \left(\frac{-T_{10}}{T_{11}} T_0 + 1 \right) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{-T_{10}}{T_{11}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{-T_{20}}{T_{11}} \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ \frac{k_1 k_c T_0}{T_{11} T_p} & 0 \\ \frac{k_1}{T_{11}} & 0 \\ 0 & \frac{k_2}{T_{21}} \end{bmatrix}$$

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$D = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

A, B, C ve D matrisleri için tabloda verilen değerleri yerine koyarak aşağıda verilen değerleri elde ederiz:

Durum Geçiş Matrisi:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -4.7059 & -0.088 & 0 & 0 & 0 & 1.359 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -5 & 50 & 0 & 4.5 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -0.5 & 0.22 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -0.909 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}$$

Girdi matrisi:

$$B = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ -0.35 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 0.8 \end{bmatrix}$$

Çıkış matrisi:

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

TRMS' nin transfer fonksiyon modeli, durum-uzay modelinin Matlab komutları kullanılarak eşdeğer transfer fonksiyonuna dönüştürülmesiyle elde edilir. Böylece, aşağıda verildiği gibi ana ve kuyruk pervane açıları (pitch ve yaw) için elde edilen transfer fonksiyonları sırasıyla Eş. 3.11 ve Eş. 3.12'de verilmiştir.

Ana pervane açısı transfer fonksiyonu:

$$G_{anapervane} = \frac{1.359}{s^3 + 0.997s^2 + 4.786s + 4.278} \quad (3.11)$$

Kuyruk pervane açısı transfer fonksiyonu:

$$G_{kuyrukpervanesi} = \frac{3.6}{s^3 + 6s^2 + 5s} \quad (3.12)$$

şeklinde elde edilir.

3.2 Yöntem

3.2.1 Oransal-İntegral-Türev (PID) Kontrol Yöntemi

PID yöntemi oransal, türevsel ve integral yöntemlerin birleşmesiyle oluşur. PID kontrolör 3-modlu kontrolör olarak da bilinir. İntegral bileşeni büyük yük değişimleri nedeniyle oluşan oransal ofseti azaltmak ve yok etmek için kullanılır. Türev yöntemi de osilasyon eğilimini azaltır ve hata sinyalini önceden sezen bir etki sağlar. Türev yöntemi özellikle ani yük değişimlerinin olduğu proseslerde çok kullanışlıdır. Diğer bir ifadeyle PID yöntemi bir veya iki denetim yönteminin hatayı kabul edilebilir limitler içerisinde tutamadığı hızlı ve büyük yük değişimleri olan proseslerde kullanılır.

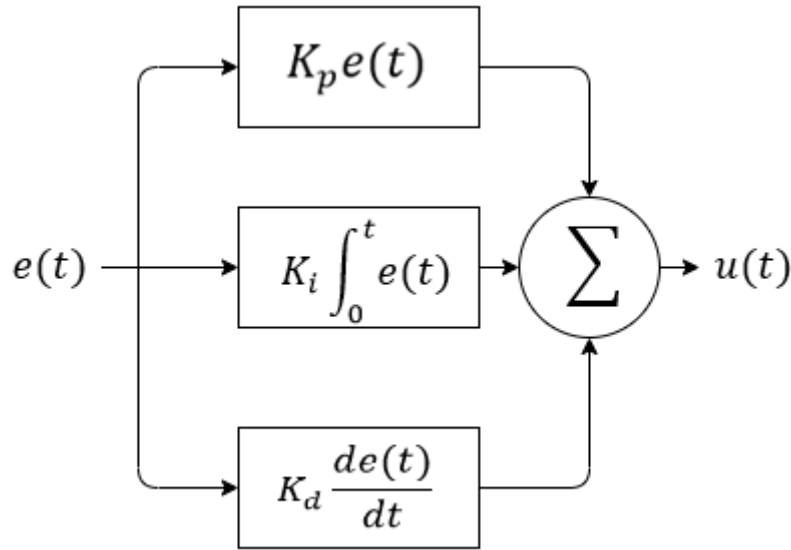
PID denetimde set değeri ile ölçülen değer arasındaki fark sinyalinin türevi ve integrali alınır. Hata sinyali oransal denetleyiciden geçer ve toplayıcı devresinde türev sinyali, integral sinyali, oransal sinyal ve dengeleme gerilimi toplanır. Bu şekilde dengeleme gerilimi taban alınarak düzeltme yapılmış olur. Türevsel etkinin fonksiyonu üst aşım (overshoot) ve alt aşım (undershoot) değerlerini azaltmaktadır. İntegral etki ise kalıcı durum hatasını sıfırlar. Türev yöntemi sayesinde daha yüksek kazanç değerleri elde edilebilir.

PID denetim yönteminin günümüzde birçok kullanım alanı mevcuttur. Sıvı seviye denetiminde, motor kontrolünde, sıcaklık kontrol sistemlerinde ve daha birçok benzer kapalı çevrim denetim sisteminde kullanılmaktadır. Bu sistemler özellikle sıcaklık kontrolünün önemli olduğu tıp elektroniği uygulamalarında, nükleer santrallerde, kimyasal işlemlerle ürün oluşturulan fabrikalarda, sebze ve meyve üreten seralarda, fabrikalarda ham maddenin bulunduğu depo seviyelerinin kontrolünde çok

yaygın biçimde kullanılmaktadır. Günümüzde tüm bu alanlarda kullanılmak üzere tasarlanmış birçok PID kontrolör cihazı bulunmaktadır.

PID denetleyici üç parametreden oluşur ve bu parametreler Oransal (K_p), Diferansiyel (K_d) ve integral (K_i) kazancıdır. PID kontrolcü eşitliği denklem 3.13 'deki gibi yazılır:

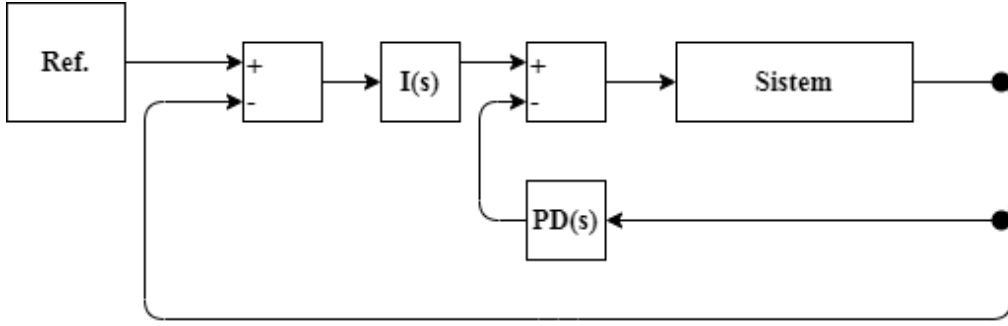
$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (3.13)$$



Şekil 3.5 PID kontrolcü blok şeması

3.2.2 Modifiye Edilmiş PID (I-PD) Kontrol Yöntemi

PID kontrolcünün modifiye edilmiş haline I-PD kontrolcü denir. PID kontrolcünün modifiye edilmesi ile ortaya çıktığından dolayı I-PD kontrolcünde tasarım farklılığı bulunmaktadır. I-PD kontrolcünün kullanımı şematik olarak Şekil 3.6 'de verilmiştir.



Şekil 3.6 I-PD kontrolcü (Sain, 2016)

I-PD kontrolcünde geri besleme fonksiyonu PID kontrolcüye göre farklı bir matematiksel denklem yoluyla yazılmaktadır. Bu ve buna benzer farklılıkları ya da eklemelerinden dolayı modifiye edilmiş PID adlandırılması yapılmaktadır. I-PD kontrolcü geri besleme fonksiyonu Eş. 3.14'te verilmiştir.

$$1 + G_p(s)(G_I(s) - G_{PD}(s)) = 0 \quad (3.14)$$

3.2.3 Guguk Kuşu Algoritması (Cuckoo Algorithm)

Guguk kuşu algoritması guguk kuşlarının çoğalma stratejilerinden esinlenerek tasarlanmış ve geliştirilmiştir. Guguk kuşları yaşadığı ortamdaki diğer kuşların yuvalarını kullanarak yavrularını bu strateji ile dünyaya getirir. Kendisi yuva yapmaktan kaçınır. Yuva sahibi olan kuş eğer guguk kuşunun kendi yuvasına bırakmış olduğu yumurtaları fark ederse ya onları yuvadan atar ya da bunu bir tehdit olarak algılayarak kendi yuvasını terk edip yeni bir yuva yapar. Bu yaşamsal davranışından dolayı yaptığı hareket, kaynaklarda kuluçka parazitliği olarak tanımlanmıştır (Rajabioun ve Al-Abaji, 2011; 2020).

Algoritmanın ilham kaynağı kuluçka parazitliğidir. Guguk kuşu algoritması Xin-She Yang ve Suash Deb tarafından 2009 yılında geliştirilen bir algoritmadır. Algoritmanın temeli; bazı guguk kuşu türlerinin Lévy uçuşu (Levy flights) adı verilen rastgele uçuşlarına ve kuluçka parazitliğine dayanır (Yang ve Deb, 2009).

Guguk kuşu algoritması uygulama aşamaları

Guguk kuşu algoritmasında üç temel kural kullanılır (Çınar, 2020). Bu kurallar;

1) Her guguk kuşu rastgele seçilen yabancı bir kuşun yuvasına sadece bir yumurta bırakır.

2) Yuvaların uygunluğu amaç fonksiyonları kullanılarak belirlenir ve gelecek nesillere yuvada var olan kaliteli yumurta aktarılır.

3) Yuva sahibi kuş tarafından Guguk kuşu yumurtasının fark edilmesi olasılığı $P_a \in [0,1]$ ile ifade edilir. Yumurtası yuva sahibi kuş tarafından fark edilirse yumurta yuvadan atılır veya yuva terk edilir.

Guguk kuşları için yeni yuva oluşturan Guguk Kuşu Arama Algoritmasına göre, aşağıda verilen Lévy uçuşları kanunu kullanılarak küresel rastgele yürüyüş gerçekleştirilir:

Guguk Kuşu Arama Algoritmasına göre Guguk kuşlarına yeni yuva oluşturmak için Lévy uçuşları adı verilen bir kanun kullanılarak küresel rastgele yürüyüş gerçekleştirilir. Bu yürüyüşün matematiksel ifadesi Eş. 3.15'te verilmiştir.

$$X_i(n + 1) = X_i(n) + \alpha \otimes \text{levy}(\lambda) \quad (3.15)$$

Burada $n=1, 2, 3, \dots, N$ N'nin önceden belirlenmiş maksimum yinleme sayısını ifade ettiği mevcut yinlemeleri gösterir. $\alpha > 0$ ilgilenilen problemin ölçeklerine ilişkin adım büyüklüğüdür. Lévy (λ) hem yerel hem de küresel arama için Lévy uçuşunu temsil eder. Lévy uçuş süreci temel olarak Eş.3.16'da verilen sonsuz varyanslı ve sonsuz ortalamalı Lévy dağılımından türetilen rastgele bir yürüyüştür.

$$\text{levy}(\lambda) = t^{-\lambda}, \quad (1 < \lambda \leq 3) \quad (3.16)$$

Eş. 3.16' da verilen t geçerli yinleme sayısıdır.

Algoritma, her yuvanın birden fazla yumurta (bir dizi çözüm) içerdiği daha karmaşık durumlara da genişletilebilir (Yang ve Deb., 2009). Bu durumda, yeni yuva Eş.3.17 kullanılarak rastgele oluşturulur:

$$X_i^{yeni} = \begin{cases} X_i + adım\ sayısı . randn, & randn_i > P_a \\ X_i, & \text{değilse} \end{cases}$$

$$adım\ sayısı = 0.01 \cdot \left(\frac{\sigma(\beta) \cdot randn}{randn} \right)^{\frac{1}{\beta}} \cdot (X_i - X_{eniyi}) \quad (3.17)$$

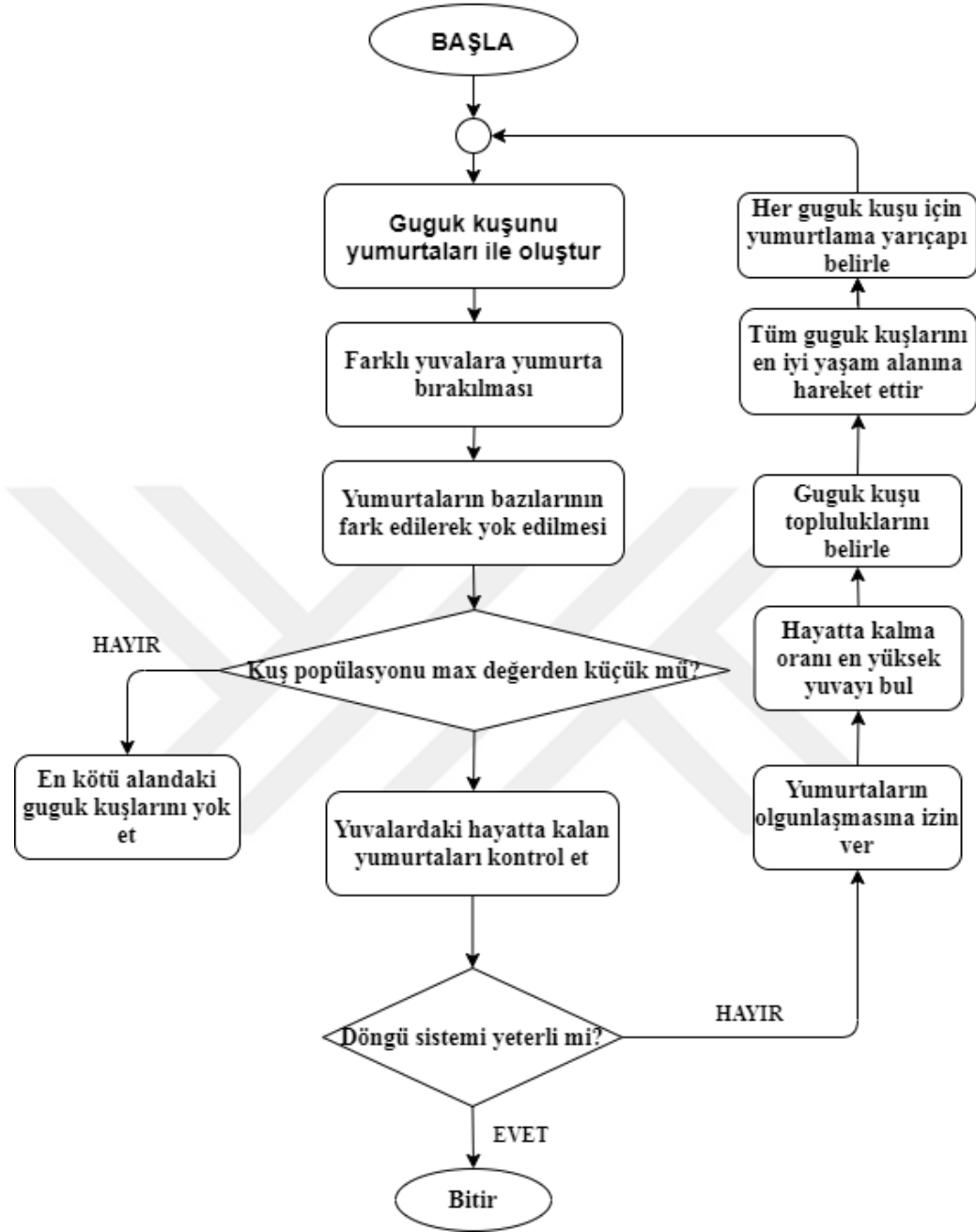
Eş.3.17’de $randn$, $[0,1]$ arasında rastgele bir değerdir, β ise $1 \leq \beta \leq 3$ aralığında bir sabittir ve standart sapma fonksiyonu $\sigma(\beta)$ ise Eş.3.18’deki gibidir.

$$\sigma(\beta) = \left(\frac{\Gamma(1 + \beta) \cdot \sin(\pi \cdot \beta/2)}{\Gamma\left(\left(\frac{1+\beta}{2}\right) \cdot \beta \cdot 2^{\left(\frac{\beta-1}{2}\right)}\right)} \right)^{\frac{1}{\beta}} \quad (3.18)$$

Guguk kuşu optimizasyonu algoritması aşağıdaki adımları içerir:

1. Adım: Rastgele yeni bir ev sahibi yuva popülasyonu olan X_i tanımlanır.
2. Adım: Lévy uçuşu Eş. 3.15’i kullanarak yeni bir X_i^{yeni} hesaplanır.
3. Adım: Amaç fonksiyonu $J(X_i^{yeni})$ hesaplanır.
4. Adım: Ev sahibi yuvalar arasından rastgele bir X_j yuva seçilir ve amaç fonksiyonu $J(X_j)$ hesaplanır.
5. Adım: Eğer $J(X_i^{yeni}) < J(X_j)$ ise X_j yeni çözüm X_i^{yeni} ile değiştirilir.
6. Adım: Lévy uçuşu kullanarak yeni konumlarda yeni yuvalar inşa ederek en kötü olasılığa sahip yuva ayrılır.
7. Adım: Geçerli optimum yuvayı tutarak maksimum yineleme sayısına ulaşılmamış ise 2. Adıma git.
8. Adım: Optimum çözümü bul.

Guguk kuşu algoritmasının akış şeması Şekil 3.7'de verilmiştir.



Şekil 3.7 Guguk kuşu algoritması akış diyagramı (Shadkam vd., 2014)

3.2.4 Birleşik I-PD - PID Kontrol Yöntemi

Yapılan çalışmada, Modifiye edilmiş PID (I-PD) kontrolcüsü için ana pervane ve PID kontrolcüsü için ise kuyruk pervane açıları kullanılmıştır. Sistemin kararlı şekilde çalışması için kontrolcülere ait parametreler guguk kuşu algoritması

kullanılarak, benzetim çalışması ise MATLAB programı ve MATLAB/Simulink kullanılarak belirlenmiştir. Belirlenen kontrolcü parametreleri kullanılarak laboratuvar ortamında deneysel çalışma gerçekleştirilmiştir.

Çalışmada kontrolcü parametrelerinin elde edilmesi için kullanılan guguk kuşu optimizasyonu algoritması aşağıdaki adımları içerir:

1. Adım: Rastgele kontrolcü parametreleri X_i tanımlanır.
2. Adım: Eş. 3.15’de verilen Lévy uçuşu kullanarak yeni $X(n + 1)$ hesaplanır.
3. Adım: Amaç fonksiyonunu her iki çıkışa ait hata kareleri toplamı hesaplanır.
4. Adım: Rastgele bir X_j seçilir ve amaç fonksiyonu hesaplanır.
5. Adım: Eğer $X(n + 1)$ için hesaplanan amaç fonksiyonu X_j için hesaplanan amaç fonksiyonundan küçükse, X_j yeni çözüm $X(n + 1)$ ile değiştirin.
6. Adım: Rastgele belirlenen yeni parametreler ile hatalar hesaplanarak, hesaplanan en kötü amaç fonksiyonu değerini veren parametreler elenir.
7. Adım: Geçerli optimum parametreler en iyi parametreler olarak tutulurlar ve maksimum yinleme sayısına ulaşılmamış ise 2. Adıma gidilir.
8. Adım: Optimum çözümü bul.

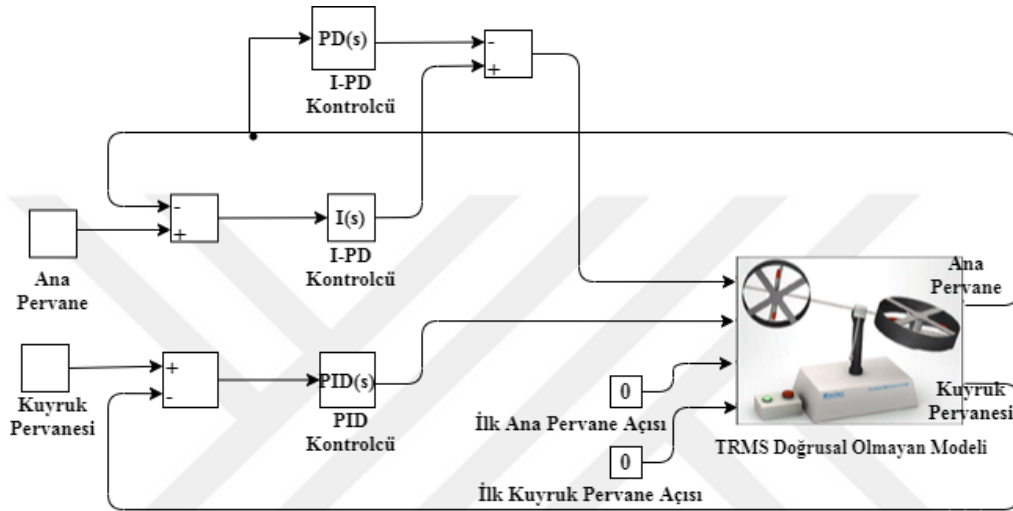
3.2.5 Kontrol Yöntemlerinde Çıkış Dalgalarının Hata Analiz Denklemleri

TRMS’nin performansını incelemek ve analiz edebilmek için farklı hata değerleri hesaplanır. Bu hata değerleri, hata kareler toplamı (ISE), mutlak hatalar toplamı (IAE), ve toplam zamana bağlı hata kareler toplamı (ITSE)’dir. Hata performans kriterlerinin matematiksel ifadeleri ISE, IAE ve ITSE hata değerleri için matematiksel ifadeler Eş. 3.19’da verilmiştir.

$$\begin{aligned} ISE &= \int_0^{\infty} e^2(t)dt \\ IAE &= \int_0^{\infty} |e(t)|dt \\ ITSE &= \int_0^{\infty} e^2(t)tdt \end{aligned} \tag{3.19}$$

4. BULGULAR

Bu tez araştırmasında deneysel çalışma ve benzetim çalışması olmak üzere iki farklı analiz yapılmıştır. Matlab/Simulink ortamında I-PD, PID kontrol yöntemlerine ait sistem gereksinimleri ile oluşturulan kontrolcü blokları TRMS benzetimine ait kontrol bloğuyla bir arada çalıştırılmıştır. Benzetim blok şeması Şekil 4.1’ de verilmiştir.



Şekil 4.1 Birleşik I-PD – PID sistemi Matlab programı benzetim şeması

Deneysel çalışmada TRMS-MIMO 33-220 deney seti kullanılarak ve program arayüzü vasıtasıyla kontrolcü giriş çıkışlarının TRMS-MIMO 33-220 deney seti ile arasında bağlantı kurulmuştur. Benzetim çalışmasında ise MATLAB/Simulink programı kullanılarak sonuçlar elde edilmiştir.

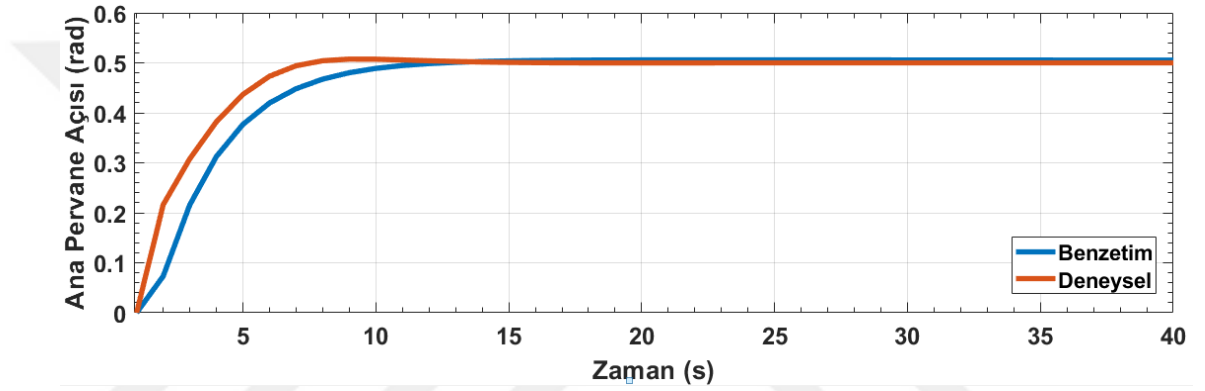
4.1 Benzetim ve Deneysel Çalışmalara ait Sonuçlar

Yapılan çalışmada öncelikle ana pervane açısını kontrol etmek amacıyla kullanılan I-PD kontrolcü ve kuyruk pervane açısını kontrol etmek için kullanılan PID kontrolcü parametreleri 3.2.3 başlığı altında verilen guguk kuşu optimizasyonu algoritması kullanılarak belirlenmiştir. Algoritmada yineleme sayısı 20 olarak belirlenmiş ve yapılan optimizasyon sonucunda hesaplanan kontrolcü parametreleri Çizelge 4.1’de verilmiştir.

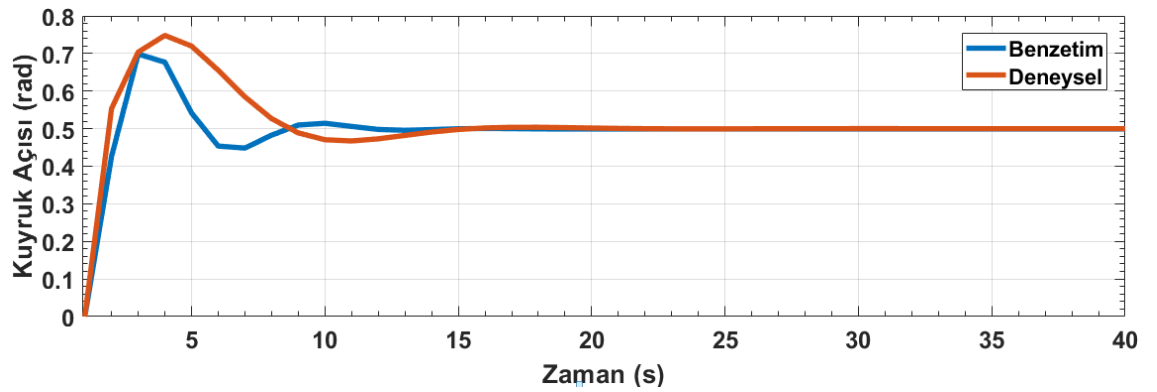
Çizelge 4.1 Guguk kuşu optimizasyon algoritması kullanılarak belirlenen kontrolcü parametre değerleri

Kontrolcü	Kp	Ki	Kd
I-PD	7.4	8.4	20.9
PID	2	0.5	5

Çizelge 4.1’de verilen kontrolcü parametreleri kullanılarak yapılan benzetim ve deneysel çalışmalara ait ana pervane açısı için çıkış grafiği referans açısı 0.5 radian (TRMS sistemi için 90°) için Şekil 4.2’de, kuyruk pervanesi için çıkış grafiği ise Şekil 4.3’de verilmiştir.



Şekil 4.2 Ana pervane açısı (pitch) deneysel ve benzetim grafiği



Şekil 4.3 Kuyruk pervane açısı (yaw) deneysel ve benzetim grafiği

Şekil 4.2 incelendiğinde ana pervane açısı için deneysel çalışma sonucunda elde edilen çıktının benzetim çalışmasına göre daha iyi olduğu, şekil 4.3 incelendiğinde ise kuyruk pervane açısı için benzetim çalışması sonucunda elde edilen çıktının deneysel çalışma sonucunda elde edilen çıktıdan daha iyi olduğu gözlenmiştir.

Şekil 4.2 ve Şekil 4.3'te verilen ana ve kuyruk pervane açıları için çıkış grafikleri incelendiğinde grafiklere ait yükselme zamanları, yerleşme zamanları ve maksimum aşma zamanları Çizelge 4.2'de verilmiştir.

Çizelge 4.2 Ana ve kuyruk pervane açıları için elde edilen çıktılara ait yükselme zamanları, yerleşme zamanları ve maksimum aşma zamanları

Pervane Açısı	Özellik	Benzetim	Deneyssel
Ana pervane açısı	Yükselme Zamanı	5.6350 sn.	4.1318 sn.
	Yerleşme Zamanı	11.0491 sn.	6.8012 sn.
	Maksimum Aşma Miktarı	0.1895 %	1.4860 %
Kuyruk pervane açısı	Yükselme Zamanı	0.9698 sn.	0.7228 sn.
	Yerleşme Zamanı	10.5817 sn.	13.8819 sn.
	Maksimum Aşma Miktarı	39.8623 %	49.6357 %

Çizelge 4.2'de ana pervane için deneysel çalışmada elde edilen yükselme ve yerleşme zamanlarının benzetim çalışmasında elde edilen sonuçlardan daha iyi olduğu ancak maksimum aşma miktarının ise benzetim çalışmasında daha iyi olduğu, kuyruk pervanesi için deneysel çalışmada elde edilen yükselme zamanının benzetim çalışmasında elde edilen sonuçtan daha iyi olduğu ancak yerleşme zamanı ve maksimum aşma miktarının ise benzetim çalışmasında daha iyi olduğu gözlenmiştir.

Şekil 4.2 ve Şekil 4.3'te verilen ana ve kuyruk pervane açıları için elde edilen çıktılara ait hata kareleri toplamı (integral square error -ISE), hataların mutlak değerleri toplamı (integral absolute error-IAE), toplam zamana bağlı hata (integral time squared error-ITSE) değerleri Çizelge 4.3'te gösterilmiştir.

Çizelge 4.3 Ana ve kuyruk pervane açıları için elde edilen çıktılarına ait ISE, IAE ve ITSE değerleri

Pervane Açısı		ISE	IAE	ITSE
Ana pervane açısı	Benzetim	0.7583	1.3884	1.0860
	Deneysel	0.6215	1.1067	0.7771
Kuyruk pervane açısı	Benzetim	0.5775	1.0830	0.7426
	Deneysel	2.0228	1.2798	1.0514

Çizelge 4.3 incelendiğinde ana pervane açısı için elde edilen hata değerlerinin deneysel çalışmada daha iyi olduğu, kuyruk pervane açısı için de benzetim çalışmasında daha iyi olduğu görülmüştür.

5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Yapılan çalışmada TRMS’de pervane açıları ve helikopter siteminin dengesinin kararlı bir şekilde kontrolünü sağlayabilmek için oransal-integral-türev (PID) ve modifiye edilmiş PID (I-PD) kontrolcöleri kullanılmıştır.

MATLAB/Simulink programında guguk kuşu algoritması kullanılarak benzetim çalışmaları yapılarak ana ve kuyruk pervanelerinin açılış değerlerine ait hata değerleri kullanılarak amaç fonksiyonunu en iyi yapan I-PD ve PID kontrolcöleri için ana pervane ve kuyruk pervanesinin dengede çalışması sağlayacak en iyi kontrolcü parametre değerleri belirlenmiştir. Belirlenen kontrolcü parametreleri kullanılarak deneysel çalışma gerçekleştirilerek elde edilen benzetim ve deneysel çalışmalara ait hata değerleri ile grafiklerdeki yükselme zamanları, yerleşme zamanları, maksimum aşma değerleri elde edilmiştir.

Çalışmamızın önceden çalışılmış olan literatür çalışmalarından farkı ise kontrolcü parametrelerinin guguk kuşu algoritması kullanılarak belirlenmiş olmasıdır.

Çizelge 4.1 incelendiğinde I-PD ve PID kontrolcöleri için ana pervane ve kuyruk pervanesinin dengede çalışması için gerekli olan ideal parametre değerleri görülmektedir. Çizelge 4.2’de ana pervane açısı için deneysel çalışmada yükselme ve yerleşme zamanlarının, benzetim çalışmasında ise aşma miktarında iyi olduğu sonucuna varılmıştır. Çizelge 4.2’de kuyruk pervanesinin yükselme zamanının deneysel sonuçlarda daha iyi olduğu ancak yerleşme zamanı ve aşma miktarında ise benzetim sonuçlarının daha iyi olduğu görülmektedir. Çizelge 4.3’te ise ana pervane için hata değerlerinde deneysel sonuçların daha iyi olduğu, kuyruk pervanesinde ise benzetim sonuçlarının daha iyi olduğu görülmektedir.

İleride yapılacak çalışmalarda I-PD ve PID kontrolcölerinden farklı kontrolcöleri kullanılarak guguk kuşu optimizasyon algoritması veya başka bir optimizasyon algoritması üzerinden de parametre belirleme işlemi yapılabilir. Böylece sistemin pervane açılarındaki meydana gelen bozunmaların da önüne geçilerek daha ideal parametre değeri ve pervane açıları sağlanabilir.



KAYNAKLAR

- Abderrahmene, S., Mohammed, C., Abderrahmane, K., Rachida, H. (2019). Neural network NARMA-L2 control of a Twin Rotor MIMO System. **In 2019 International Conference on Advanced Electrical Engineering (ICAEE)** (pp. 1-6). IEEE.
- Abukan, Y., Almalı, M. N. (2023). Control of 2-Dof TRMS MIMO system using FOPID & FOSTSMC method. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 38(1), 605-615.
- Abukan, Y. (2021). *İkiz rotorlu sistemin farklı yöntemler ile kontrolü*, Yüksek lisans tezi. Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Van, Türkiye.
- Al-Abaji, M. A. (2020). A literature review of cuckoo search algorithm. *Journal of Education and Practice*, 11(8), 1-8.
- Allouani, F., Boukhetala, D., Boudjema, F. (2011). Ant colony optimization based fuzzy sliding mode controller for the twin rotor MIMO system. *International Journal on Sciences and Techniques of Automatic Control and Computer Engineering*, 5(2), 1604-1615.
- Ateş, A. (2013). *Prototip helikopter sisteminin matematiksel modelinin deneysel belirlenmesi ve denetçi tasarımı*, Yüksek lisans tezi. İnönü Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Malatya Türkiye.
- Castillo, O., Kutlu, F., Atan, Ö. (2020). Intuitionistic fuzzy control of twin rotor multiple input multiple output systems. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, 38(1), 821-833.
- Chaudhary, S., Kumar, A. (2019). Control of twin rotor mimo system using 1-degree-of-freedom PID, 2-degree-of-freedom PID and fractional order PID controller. **In 2019 3rd International conference on Electronics, Communication and Aerospace Technology (ICECA)** (pp. 746-751). IEEE.
- China, P., Dutta, D., Kumar, M. R. (2020). Modelling of twin rotor MIMO system using differential evolution with success-based parameter adaptation. **In 2020 First International Conference on Power, Control and Computing Technologies (ICPC2T)** (pp. 223-228). IEEE.
- ÇABUKER, A. C., ALMALI, M. N., Parlar, İ. (2023). Evaluation of controller parameters on the twin rotor multiple input multiple output system using butterfly-based particle swarm optimization. *Journal of Scientific Reports-A*, (052), 174-189.
- Çınar, M. (2020). *Akıllı şebekelerde kullanılan oto-optimizasyon algoritmaları ve güncel bir sisteme uygulanması*, Doktora tezi. İnönü Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Malatya Türkiye.
- Fard, A. N., Shahbazian, M., Hadian, M. (2016). Adaptive fuzzy controller based on cuckoo optimization algorithm for a distillation column. **In 2016 international conference on computational intelligence and applications (ICCIA)** (pp. 93-97). IEEE.
- Ghellab, M. Z., Zeghlache, S., Djerioui, A., Benyettou, L. (2021). Experimental validation of adaptive RBFNN global fast dynamic terminal sliding mode control for twin rotor MIMO system against wind effects. *Measurement*, 168, 108472.
- Glida, H. E., Abdou, L., Chelihi, A., Sentouh, C., Hasseni, S. E. I. (2020). Optimal model-free backstepping control for a quadrotor helicopter. *Nonlinear*

- Dynamics*, 100, 3449-3468.
- Seif-El-Islam, H., Abdou, L. (2020). Robust LPV control for attitude stabilization of a quadrotor helicopter under input saturations. *Advances in Technology Innovation*, 5(2), 98.
- Hu, H., Wu, Y., Xu, J., Sun, Q. (2019). Cuckoo search-based method for trajectory planning of quadrotor in an urban environment. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering*, 233(12), 4571-4582.
- Islam, B. U., Ahmed, N., Bhatti, D. L., Khan, S. (2003). Controller design using fuzzy logic for a twin rotor MIMO system. **In 7th International Multi Topic Conference, 2003 (INMIC 2003)** (pp. 264-268). IEEE.
- Ilyas, M., Abbas, N., UbaidUllah, M., Imtiaz, W. A., Shah, M. A. Q., Mahmood, K. (2016). Control law design for twin rotor MIMO system with nonlinear control strategy. *Discrete Dynamics in Nature and Society*, 2016.
- Khalaf, O. I., Abdulsahib, G. M., Sabbar, B. M. (2020). Optimization of wireless sensor network coverage using the Bee Algorithm. *Journal of Information Science and Engineering*, 36(2), 377-386.
- Konar, M., Turkmen, A., Oktay, T. (2020). Improvement of the thrust-torque ratio of an unmanned helicopter by using the ABC algorithm. *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*, 92(8), 1133-1139.
- Meraih, Y., Ramdane-Cherif, A., Acheli, D., Mahseur, M. (2020). Dragonfly algorithm: a comprehensive review and applications. *Neural Computing and Applications*, 32, 16625-16646.
- Mpanza, L. J., Pedro, J. O. (2021). Optimised tuning of a PID-Based flight controller for a medium-scale rotorcraft. *Algorithms*, 14(6), 178.
- Mucuk, İ. (2018). *Ayrık zaman model referans kayan kip kontrol ve uygulaması*, Yüksek lisans tezi. Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, Türkiye.
- Netto, W., Lakhani, R., Sundaram, S. M. (2019). Design and performance comparison of different adaptive control schemes for pitch angle control in a Twin-Rotor-MIMO-System. *International Journal of Electrical & Computer Engineering* (2088-8708), 9(5).
- Norsahperi, N. M. H., Danapalasingam, K. A. (2020). Particle swarm-based and neuro-based FOPID controllers for a Twin Rotor System with improved tracking performance and energy reduction. *ISA transactions*, 102, 230-244.
- Ozdemir, A., Mucuk, I., Ilhan, S. (2020). Çift pervaneli çok girişli çok çıkışlı (TRMS) sistemin kontrolü için ayrık zaman PID kontrolör tasarımı ve gerçek zaman uygulaması. *Academic Perspective Procedia*, 3(1), 597-608.
- Prempain, E., Lecchini-Visintini, A. (2018). Dynamic analysis of a twin rotor MIMO system and control design. **In 2018 UKACC 12th International Conference on Control (CONTROL)** (pp. 87-92). IEEE.
- Rajabioun, R. (2011). Cuckoo optimization algorithm. *Applied Soft Computing*, 11(8), 5508-5518.
- Maiti, R., Sharma, K. D., Sarkar, G. (2018). PSO based parameter estimation and PID controller tuning for 2-DOF nonlinear twin rotor MIMO system. *International Journal of Automation and Control*, 12(4), 582-609.
- Shirzadeh, M., Amirkhani, A., Tork, N., Taghavifar, H. (2021). Trajectory tracking of a quadrotor using a robust adaptive type-2 fuzzy neural controller optimized by

- cuckoo algorithm. *ISA transactions*, 114, 171-190.
- Sikander, A. A., Prasad, B. R. (2015). A novel order reduction method using cuckoo search algorithm. *IETE Journal of Research*, 61(2), 83-90.
- Takeş, A. C. (2019). *PI-PD denetleyici ile ikiz rotor denetimi*, Yüksek lisans tezi. Dicle Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Diyarbakır, Türkiye.
- KAYA, İ., TAKEŞ, C. A., ALYOUSSEF, F. (2019). Parçacık Sürü Optimizasyonu Tabanlı PI-PD ile Twin Rotor Denetimi. *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi*, 10(2), 523-530.
- Hussain, M., Apama, V., Banu, U. S., Lakshmanaprabu, S. K. (2017). Automation of two interacting conical tank process with multiobjective optimization of fractional PID controller with a metaheuristic optimizer, the cuckoo search algorithm. **In 2017 Trends in Industrial Measurement and Automation (TIMA)** (pp. 1-6). IEEE.
- Yang, X. S., Deb, S. (2009). Cuckoo search via Lévy flights. **In 2009 World congress on nature & biologically inspired computing (NaBIC)** (pp. 210-214). Ieee.
- Zeghlache, S., Benyettou, L., Djerioui, A., Ghellab, M. Z. (2020). Twin rotor MIMO system experimental validation of robust adaptive fuzzy control against wind effects. *IEEE Systems Journal*, 16(1), 409-419.
- Zeghlache, S., Kara, K., Saigaa, D. (2014). Type-2 fuzzy logic control of a 2-DOF helicopter (TRMS system). *Open Engineering*, 4(3), 303-315.



ÖZ GEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Adı Soyadı : Eren İZCİER

Eğitim Bilgileri (Lisans)

Üniversite : Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi
Fakülte : Mühendislik Fakültesi
Bölüm : Elektrik-Elektronik Mühendisliği
Mezuniyet Yılı : 2020

Yüksek Lisans

Üniversite : Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi
Enstitü : Fen Bilimleri Enstitüsü
Anabilim Dalı : Elektrik-Elektronik Mühendisliği
Mezuniyet Yılı : 2023

VAN YÜZÜNCÜ YIL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
LİSANSÜSTÜ TEZ ORJİNALLİK RAPORU

Tarih/...../.....

Tez Başlığı:

Yukarıda başlığı belirtilen tez çalışmamın, kapak sayfası, giriş, ana bölümler ve sonuç bölümlerinden oluşan toplam (.....) sayfalık kısmına ilişkin,/...../..... tarihinde şahsım/tez danışmanım tarafından adlı intihal tespit programından aşağıda belirtilen filtrelemeler uygulanarak alınmış olan orijinallik raporuna göre tezimin benzerlik oranı %..... (.....) dır.

Uygulanan filtreler aşağıda verilmiştir:

- Kabul ve onay sayfası hariç,
- Teşekkür hariç,
- İçindekiler hariç,
- Simge ve kısaltmalar hariç,
- Gereç ve yöntemler hariç,
- Kaynakça hariç,
- Alıntılar hariç,
- Tezden çıkan yayınlar hariç,
- 7 kelimedenden daha az örtüşme içeren metin kısımları hariç (Limit match size to 7 words)

Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi Lisansüstü Tez Orijinallik Raporu Alınması ve Kullanılmasına İlişkin Yönergeyi inceledim ve bu yönergede belirtilen azami benzerlik oranlarına göre tez çalışmamın herhangi bir intihal içermediğini; aksinin tespit edileceği muhtemel durumda doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi ve yukarıda vermiş olduğum bilgilerin doğru olduğunu beyan ederim.

Gereğini bilgilerinize arz ederim.

Tarih ve İmza

Adı Soyadı:

Öğrenci No:

Anabilim Dalı:

Programı:

Statüsü: () Yüksek lisans () Doktora

DANIŞMAN

ENSTİTÜ ONAYI

UYGUNDUR

UYGUNDUR

