

T.C.
MANİSA CELAL BAYAR ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ



YÜKSEK LİSANS
MAKİNE VE İMALAT ANABİLİM DALI
MAKİNE TEORİSİ VE DİNAMIĞI BİLİM DALI
OTONOM KARGO İHA TASARIMI, ANALİZİ VE KONTROLÜ

Kaan Atahan CEYLAN

Danışman
Dr. Öğr. Üyesi Serkan ÇAŞKA

MANİSA-2024

KAAN ATAHAN
CEYLAN

OTONOM KARGO İHA TASARIMI, ANALİZİ VE KONTROLÜ

2024

TAAHHÜTNAME

Bu tezin Manisa Celal Bayar Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Makine ve İmalat Ana Bilim Dalında akademik ve etik kurallara uygun olarak yazıldığını ve kullanılan tüm literatür bilgilerinin referans gösterilerek tezde yer aldığını, tamamen kendi çalışmam olduğunu, her alıntıya kaynak gösterdiğimi, tezin yazımında akademik ve etik kurallara aykırı herhangi bir yapay zeka kullanmadığımı beyan ederim. Çalışmada modelleme ve hesaplamaların yapılabilmesi için SolidWorks ve Matlab programları kullanılmıştır.

Kaan Atahan CEYLAN



ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

Kaan Atahan CEYLAN

Manisa Celal Bayar Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Makine ve İmalat Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Serkan ÇAŞKA

Son yıllarda dört rotorlu insansız hava araçları (İHA), 6 serbestlik derecesinde hareket kabiliyeti, basit yapısı ve maliyet avantajı nedeniyle birçok uygulamada kullanılmaktadır. Bu çalışmada bir kargo teslimat dört rotorlu İHA tasarımı, analizi ve kontrolü gerçekleştirilmiştir. Tasarlanan hava aracı, kargo kutusunu algılama, taşıma ve teslim etme adımlarını otonom olarak yürütebilmektedir. Dört rotorlu İHA, Solidworks yazılımı kullanılarak tasarlanmıştır. Tasarım, XML dosyalarına dönüştürülerek MATLAB/Simulink ortamına Multibody model olarak aktarılmıştır. Oransal-integral-türev (PID) kontrolörleri kullanılarak dört rotorlunun yatay konum ve irtifa kontrolü gerçekleştirilmiştir. Tasarımın statik analizi SolidWorks yazılımında, dinamik analizi ise MATLAB/Simulink programında gerçekleştirilmiştir. PID analizi için Puma Optimizasyoncusu, Afrika Akbabaları Optimizasyonu ve Ateş Şahini Optimizasyoncusu algoritmalarının performansları; yunuslama, yuvarlanma, dönme ve yükseklik açılarından karşılaştırılmıştır. Puma optimizasyonunun diğerlerinden daha yüksek performansa sahip olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Anahtar Kelimeler: İHA, Puma Optimizasyoncusu, Ateş Şahini Optimizasyoncusu, Afrika Akbabaları Optimizasyonu, PID

2024, 135 Sayfa

ABSTRACT

M.Sc. Thesis

Kaan Atahan CEYLAN

Manisa Celal Bayar University

Graduate School of Education

Department of Machine and Manufacturing

Supervisor: Asst. Prof. Dr.Serkan ÇAŞKA

In recent years, quad rotor unmanned aerial vehicles (UAVs) have been used in many applications due to their 6 degrees of freedom mobility, simple structure and cost advantage. In this study, a cargo delivery quad rotor UAV is designed, analyzed and controlled. The designed UAV is capable of autonomously detecting, transporting and delivering the cargo box. The quad rotor UAV is designed using Solidworks software. The design was converted into XML files and transferred to MATLAB/Simulink environment as a Multibody model. Proportional-integral-derivative (PID) controllers are used to control the horizontal position and altitude of the quadrotor. Static analysis of the design was performed in SolidWorks software and dynamic analysis was performed in MATLAB/Simulink program. For the PID analysis, the performances of the Puma Optimizer, African Vulture Optimizer and Fire Hawk Optimizer algorithms were compared in terms of pitch, roll, roll and pitch and altitude. It is concluded that the Puma optimization has higher performance than the others.

Keywords: UAV, Puma Optimizer, Fire Hawk Optimizer, African Vulture Optimization, PID

2024, 135 Pages

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasında bir kargo İHA'sının tasarlanması, analizi ve kontrolü araştırılmıştır. Kapsamlı bir literatür araştırması gerçekleştirilmiştir. Araştırmadan elde edilen bulgular doğrultusunda daha önceki çalışmalarda İHA ve/veya PID kontrolünde kullanılmamış üç farklı meta sezgisel optimizasyon algoritması belirlenmiştir. Uygulama kısmında ek bir aparata ihtiyaç duymadan kargo yükünü kavrama kabiliyetine sahip bir İHA tasarlanarak statik analizleri yapılmıştır. Seçilen üç meta sezgisel algoritmanın PID kontrolüne yönelik dinamik analizleri Matlab'da yapılarak performansları karşılaştırılmıştır.

Bu zorlu süreçte desteğini ve rehberliğini benden asla esirgemeyen danışmanın Sayın Dr. Öğr. Üyesi Serkan Çaşka'ya içtenlikle teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca yoğun çalışmalarım sırasında bana sabırla yaklaşan, sevgisini, desteğini ve rehberliğini hiçbir zaman esirgemeyen kıymetli babam Ramazan Ceylan'a, annem Belgin Ceylan'a, ablam Fadime Ayca Ceylan'a ve nişanlım Pırıl Benli'ye sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Kaan Atahan CEYLAN

Manisa,2024

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

AA:	Alternatif Akım
AAA:	Akım Arama Algoritması
AAO:	Afrika Akbabaları Optimizasyonu
ABA:	Ateş böceği Algoritması
ABYA :	Akıllı Bakteriyel Yemleme Algoritması
AŞO:	Ateş Şahini Optimizasyoncusu
BOA:	Balina Optimizasyon Algoritması
BTO:	Biyocoğrafya Tabanlı Optimizasyon
BYA:	Bakteriyel Yemleme Algoritması
ÇTA:	Çiçek Tozlaştırma Algoritması
DA:	Doğru Akım
DE:	Diferansiyel Evrim
DKM:	Doğrudan Kosinüs Matrisi
EHKC:	Elektronik Hız Kontrol Cihazı
EPSY:	Eşzamanlı Pertürbasyon Stokastik Yaklaşımı
ERA:	Emperyalist Rekabetçi Algoritma
Ess(%):	Referansla Kalıcı Durum Hatasının Oranı
EYA:	Evrime Yaratma Algoritması
EYH :	Eşzamanlı Yerelleştirme ve Haritalama
FOS:	Güvenlik Faktörü
GA:	Genetik Algoritma
GBYA :	Geliştirilmiş Bakteriyel Yemleme Algoritması
GKA:	Gri Kurt Algoritması
GKA:	Guguk Kuşu Araması
GNSS:	Küresel Uydu Seyrüsefer Sistemi
GP:	Genetik Programlama
GPS:	Küresel Konumlandırma Sistemi
IMU:	Atalet Ölçüm Biriminin
ITSE:	Zaman Ağırlıklı Hata Karesinin İntegrali
İHA :	İnsansız Hava Aracı
İKA:	İnsansız Kara Aracı
İOO:	İstilacı Ot Optimizasyonu
JAO:	Jaya Optimizasyon Algoritması

Kd:	Türevsel
Kg:	Kilogram
Ki:	İntegral
KKA:	Karınca Kolonisi Algoritması
Kp:	Oransal Katsayı
LiPo:	Lityum-iyon pil
LQI:	Doğrusal Kuadratik İntegral
LQR:	Doğrusal İkinci Dereceden Regülatörden
LQT:	Doğrusal Kuadratik İzleme
m :	Metre
Mp(%):	Referans Değerini Maksimum Aşma Oranı
MS :	Meta Sezgisel
PD:	Oransal Türev
PI:	Oransal İntegral
PID:	Oransal İntegral Türev
PO:	Puma Optimizasyoncusu
PSO:	Parçacık Sürü Optimizasyonu
QR kod:	Kare Kod
SAA:	Sanal Arı Algoritması
SÖO:	Sosyal Örümcek Optimizasyonu
TBA:	Arılar Algoritması
Tp(s):	Maksimum Salınım Değerine Ulaşma Süresi
Tr(s):	Referans Değerine Ulaşma Süresi
Ts(s):	Sistemin Stabilizasyona Ulaşma Süresi
USS:	Uçan Sinek Segmentasyonu
VRML:	Sanal Gerçeklik Modelleme Dili
XML :	Genişletilebilir İşaretleme Dili
YA:	Yarasa Algoritması
YAA:	Yerçekimi Arama Algoritması
YAKO :	Yapay Arı Kolonisi Optimizasyonu
YBSA :	Yapay Bağışıklık Sistemi
YBSA:	Yapay Balık Sürüsü Algoritması
YSA:	Yük Sistemi Arama
YYABA:	Yin-Yang Ateş Böceği Algoritması

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. İnsansız Hava Aracı Örnekleri.....	5
Şekil 1.2. Paralel tip PID Kontrol Şeması	28
Şekil 1.3. Meta-Sezgisel Algoritmaların Sınıflandırması [168]	32
Şekil 1.4. PID Kontrol Tekniği ve MS Algoritmalar.....	38
Şekil 2.1. İHA Kolu	60
Şekil 2.2. Gövde Ekipmanları.....	61
Şekil 2.3. Bağlantı Elemanları	61
Şekil 2.4. Montajı Tamamlanmış İHA Görseli.....	62
Şekil 2.5. Matlab, Simulink Yükseklik ve Pozisyon Kontrolcüsü ve Motor Karıştırıcı Blok gösterim.....	63
Şekil 2.6. File Solid Fonksiyon Görseli.....	64
Şekil 2.7. İHA Ayak ve Kol Bağlantı Görseli	65
Şekil 2.8. İHA’ın Gövde Montajı Tamamlanmış Simulink Görseli	65
Şekil 2.9. Alt Bağlantıların Oluşturulması.....	66
Şekil 2.10. İHA’nın Simscape Uzayında Görünümü.....	67
Şekil 2.11. Uzaysal Temas Kuvvet Bağlantısı.....	67
Şekil 2.12. Kutu Bağlantı Şematiği.....	68
Şekil 2.13. Simscapede Oluşturulan Kutu Görseli	68
Şekil 2.14. Simulink Zemin Bağlantı Şekli	69
Şekil 2.15. Simscape’de İHA Simülasyon Ortamı.....	70
Şekil 2.16. Görev Kontrol Sistemi	70
Şekil 2.17. Pozisyon Kontrolcüsü ve PID Blokları	71
Şekil 2.18. Görev Kontrol Algoritması Görseli	72
Şekil 2.19. Filtreli PID	72
Şekil 2.20. MATLAB PID Arayüzü	73
Şekil 2.21. Matlab Simulink Motor Karıştırıcı Blok İç Gösterimi	74
Şekil 2.22. Motor Kuvvet Bloğu.....	75
Şekil 2.23. Matlab Simulink Vr To Video Blogu	76
Şekil 2.24. Matlab VRML Düzenleyici Görseli	76
Şekil 2.25. Matlab VRML Parametre Sayfası	77
Şekil 2.26. Bakış Açısı Kamerası Çıktısı ve VRML uzayında İHA-Kutu Görseli....	78

Şekil 2.27. QR Kod Çözücü.....	78
Şekil 2.28 QR Kod.....	79
Şekil 2.29. Matlab Alan ve Merkez Hesaplama Fonksiyonu	80
Şekil 2.30. Görüntü İşleme Sonrası Sonuç	80
Şekil 2.31. Optimizasyon Sistemin Görseli	81
Şekil 2.32. Afrika Akbabalar Optimizasyonu Akış şeması	82
Şekil 2.33. Puma Optimizasyoncusu Akış Şeması	83
Şekil 2.34. Ateş Şahini Optimizasyonu Akış Şeması	84
Şekil 2.35. Doğrulama Fonksiyonu	84
Şekil 3.1. İHA Statik Analiz Görseli	85
Şekil 3.2. Ayak Statik Analiz Görseli.....	86
Şekil 3.3. Ayak FOS Analizi	87
Şekil 4.1. İHA'nın Kutu Alma-Bırakma Süreçlerinin Görüntüleri.....	98

TABLULAR DİZİNİ

Tablo 1.1. İHA Tiplerinin Karşılaştırılması.....	6
Tablo 1.2. İHA Tiplerinin Özelliklerinin Karşılaştırılması.....	6
Tablo 1.3. Optimizasyon Problemlerinin Sınıflandırılması	34
Tablo 1.4. Optimizasyonda kullanılan bazı MS Algoritmalar ve Örnek Çalışmalar .	57
Tablo 3.1 Ayak Yük/Stres Tablosu.....	86
Tablo 3.2. Optimizasyon Sonrası PID Performans Analiz Tablosu.....	96



GRAFİKLER DİZİNİ

Grafik 3.1. Yükseklik/ Alan Grafiği	88
Grafik 3.2. Hesaplana/Gerçek Yükseklik Grafiği	89
Grafik 3.3. RefX ve RefY	89
Grafik 3.4. Etken Faktör/ Yükseklik Grafiği	90
Grafik 3.5. Kutunun Görüntü Analizi İle Elde Edilen Pozisyon Verisi.....	91
Grafik 3.6. PID Fonksiyonunun AŞO-PO-AAO Verileri: Yunuslama Eksenini.....	92
Grafik 3.7. PID Fonksiyonunun AŞO-PO-AAO Verileri: Yuvarlanma	93
Grafik 3.8. PID Fonksiyonunun AŞO-PO-AAO Verileri: Dönme	94
Grafik 3.9. PID Fonksiyonunun AŞO-PO-AAO Verileri: Yükseklik	95

DENKLEMLER DİZİNİ

Denklem 1.1. Paralel Tip PID Kontrol Denklemi.....	28
Denklem 1.2. Seri Tip PID Kontrol Denklemi	28
Denklem 1.3. İntegral mutlak hatası	30
Denklem 1.4. İntegral kare hatası	30
Denklem 1.5. İntegral zaman mutlak hatası.....	30
Denklem 1.6. Ortalama kare hatası	30
Denklem 1.7. İntegral Hatası	30
Denklem 1.8. Optimizasyon Denklemi Örneği.....	34
Denklem 2.1. Uzaklık Hesaplama Denklemi.....	79
Denklem 3.1. Belirleme Katsayısı Denklemi.....	88
Denklem 3.2. İHA ile Kutu Arasındaki Uzaklık Denklemi.....	90

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	I
ABSTRACT.....	II
ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR.....	III
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	IV
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	VI
TABLolar DİZİNİ.....	VIII
GRAFİKLER DİZİNİ.....	IX
DENKLEMLER DİZİNİ.....	X
İÇİNDEKİLER.....	XI
GİRİŞ.....	1
1. LİTERATÜR ÖZETİ.....	4
1.1.İHA'ların Gelişimi ve Türleri.....	4
1.2. İHA'ların Kullanım Alanları.....	7
1.3. İHA'ların Genel Mimari Özellikleri.....	9
1.4.İHA'larda Kontrol Tasarımı.....	11
1.4.1.Uçuş Kontrol Tasarımı.....	11
1.4.2. Hassas İniş Kontrol Tasarımı.....	17
1.4.3. Yük Taşıma Kontrol Tasarımı.....	24
1.5. PID Kontrolcüsü.....	26
1.5.1. PID Parametre Ayarlanmasında Kullanılan MS Yöntemler.....	30
1.6. İHA'larda Optimizasyon.....	32
1.7 İHA'larda Kontrol Optimizasyonu ve MS Algoritmalar.....	37
1.7.1. Evrimsel Algoritmalar.....	38
1.7.2. Biyo-esinli MS Algoritmalar.....	42
1.7.3. Doğadan Esinlenen MS Algoritmalar.....	44

1.7.4. Sürü Tabanlı MS Algoritmalar	49
1.7.5. Fizik Temelli MS Algoritmalar.....	55
2. MATERYAL VE METOD	60
2.1. İHA Montajı.....	60
2.2. Matlab, Simulink ve Simscape.....	62
2.2.1. İHA'nın Simscape Ortamına Aktarılması.....	64
2.2. Kargo Kutusunun Simscape Ortamına Aktarılması.....	67
2.3. Görev Kontrol Sistemi	70
2.3.1. Uçuş Kontrol Algoritması	71
2.3.2. Görüntü Analizi.....	78
2.3.3. PID Optimizasyonu.....	80
3. BULGULAR.....	85
3.1. Statik Analiz Bulguları.....	85
3.2. Görüntü Analizinde Ulaşılan Bulgular.....	87
4.3. PID Optimizasyonunda Elde Edilen Bulgular	91
SONUÇ ve ÖNERİLER.....	97
KAYNAKLAR	101

GİRİŞ

İnsansız hava aracı (İHA) genel manada içinde veya üzerinde insan operatörü bulunmayan, uzaktan kontrol edilebilen ya da otonom olarak kendini yönlendirebilen ve önceden tanımlanmış görevleri yürüten hava platformlarıdır. İHA'lar genelde insanlı araçlar için icra edilmesi zor ve tehlikeli görevlerde kullanılmaktadır. Günümüzde askeri alanda, terörle mücadelede, tesis ve bina güvenliğinin sağlanmasında, uzay araştırmalarında, bilimsel çalışmalarda vb. alanlarda insansız araçları ihtiyacı gün geçtikçe artmaktadır. Günümüzde İHA'ların manevra kabiliyeti, görece basitliği ve düşük maliyeti kullanım alanlarının da yaygınlaşmasını sağlamaktadır.

Literatürde çeşitli boyut ve fonksiyonlarda geliştirilmiş İHA'lar bulunmaktadır. Özbek ve ark. [1] yaptıkları çalışmada İHA'nın tasarımını, üretimini ve testlerini gerçekleştirmişlerdir. Araştırmacıların üzerinde çalıştığı hava aracının yüksüz ağırlığı 600 gram, faydalı yük taşıma kapasitesi 1400 gramdır. Özgün tasarıma sahip bu İHA'nın ABS polimer kanatları ve bağlantı parçaları 3D baskı ile üretilmiştir. Tasarlanan İHA elden atılarak uçurulmaya uygun bir yapıdadır. Demiryürek [2] yaptığı çalışmada bir İHA'nın tasarımını ve kontrolünü gerçekleştirmiştir. İHA'nın kontrolü için PID ve Doğrusal Karesel Denetleyici (LQR) metodlarını ele almıştır. PI, PID, PD, LQR metotları arasında karşılaştırma gerçekleştirmiştir. Sonuç olarak LQR metodunun İHA ile gerçekleştirilen senaryolara daha hızlı uyum sağladığı sonucuna ulaşmıştır. Kaçar ve ark. [3] yaptıkları çalışmada üç döner rotorlu İHA'nın tasarım özelliklerini incelemiş ve bu tasarıma ait denklemler elde etmişlerdir. Yapısal tasarımda İHA'nın titreşimine karşı önlem almak için öncesinde titreşim analizi ve statik yük analizi yapmışlardır. İnsansız hava aracının imalatında karbon elyaf malzeme kullanmışlardır. Matlab/Simulink ortamında benzetim modeli oluşturmuşlardır. PD kontrolörünü İHA'nın konum kontrolü için kullanmışlardır.

D'antonio ve ark. [4]'nin çalışmasında yük kavramak ve taşımak tasarlanan kataner dört rotoru, kablonun ucuna bağlanan iki adet dört rotordan oluşmaktadır. Katener eğrisini beş serbestlik derecesi, 3 boyutlu konum, z ekseninde yönlendirme ve açıklık ile tanımlayarak, iki dört rotoru belirli bir yörüngeyi takip edecek şekilde çalıştırmışlardır. Yöntemin dört farklı deney senaryosundan elde edilen sonuçlar, geliştirilen sayısal çözümün hesaplama açısından hızlı ve gerçek zamanlı yürütülebilir

olduğunu göstermiştir. Şahin ve ark. [5] dört rotorlu hava aracının otonom performansını (yani hem boylamasına hem de yanal) ve dayanıklılığını, otopilot kazanç katsayıları ve batarya ağırlığına bağlı olarak eş zamanlı olarak optimize etmişlerdir. Bunun için eşzamanlı pertürbasyon stokastik yaklaşımı (EPSY) olarak adlandırılan stokastik optimizasyon yöntemi kullanılarak uygun otopilot kazanç katsayıları ve batarya ağırlığı elde edilmiştir. EPSY ile elde edilen optimum performans değerleri otonom uçuş simülasyonlarında kullanılmıştır. Idrissi ve ark. [6] performansı artırmak ve uçuş süresini iyileştirmek için gövde çerçevesinden yatay eksenler boyunca hareket eden uzatılabilir plakalardan oluşan yeni bir quadrotor yapısı önermiştir. Bu doğrultuda Euler dinamik modeli, çok rotorlu hareket denklemini temsil edecek şekilde türetilmiştir. Yapı değişikliğinin araç davranışı üzerindeki etkilerini analiz etmek için PID kontrolörleri uygulanmıştır. Son olarak, Simulink ile elde edilen sonuçlar ADAMS ile karşılaştırılmış ve nihai konuma doğru daha hızlı bir yakınsama olduğu tespit edilmiştir. Zhao ve ark. [7] konuşlandırılabilir mafsallı mekanizma özellikli hava tutucu sistemi geliştirmişlerdir. Geliştirilen sistem, uçuş sırasında konuşlandırılabilir bir dört-rotor ve konuşlandırılabilir mekanizma tarafından doğrudan kolaylaştırılan gövde içi tutucudan oluşmaktadır. Kavrama için ekstra manipülatöre ihtiyaç duymayan kompakt bir tasarıma sahiptir. Çalışmada, dört rotorun gövde çerçevesini daraltarak bir nesneyi kavraması, dört rotorun daha genişlemiş bir durumu uçuş bozukluklarının üstesinden gelmek için daha yüksek torka izin vermektedir. Torktan kaynaklı uçuş stabilitesinin bozulmasını engellenmesi için, ek bir ters makas benzeri bağlantı tabanlı adaptör dahil edilmiştir.

Yaşanan teknolojik gelişmelerin ve İHA kullanım alanlarının farklılaşarak yaygınlaşması daha önce basit düzeylerde ele alınan kontrol optimizasyonunun önem kazanmasına neden olmuştur. Havalanma, uçuş, iniş ve yük kavrama fonksiyonları çeşitli zorluklara neden olmaktadır. Bu doğrultuda yaşanan zorlukların aşılabilmesi için çeşitli optimizasyon yaklaşımları geliştirilmektedir. Geliştirilen bu yaklaşımlar çoğunlukla İHA'ların yapı ve sistem bileşenleri üzerine yoğunlaşmaktadır.

Literatür incelendiğinde İHA'ların yük alışı, yön ve kenetlenme konusunda da çeşitli sorunlarla karşılaşıldığı görülmüştür. Bu sorunun aşılması için İHA üzerine çeşitli aparatların ve mekanizmaların entegre edilmesi genel çözüm olarak sunulmuştur. Ancak entegre edilen aparatların enerji sarfiyatında artışa neden olarak uçuş süresi ve verimliliğinde düşüşe neden olduğu görülmektedir. Bu çalışma

kapsamında İHA optimizasyonunun sağlanması için ek bir aparata ihtiyaç duymadan yük kavrama kabiliyetine sahip bir dört rotorlu hava aracının geometrik tasarımı gerçekleştirilmiştir. Tasarlanan dört rotorlu aracın, uçuş-iniş-kavrama gibi fonksiyonlarının yerine getirilmesi için kullanılabilir üç farklı meta-sezgisel (MS) algoritmanın kontrol optimizasyonu performans karşılaştırması yapılmıştır.

Bu çalışmada öncelikle İHA'lara ilişkin kısa tarihçe, genel mimari tasarım, uçuş kontrol tasarımı, hassas iniş yaklaşımları ve yük taşıma yaklaşımları incelenmiştir. Çalışmanın temel konusu bir İHA'nın kontrol optimizasyonunun sağlanmasıdır. Bu doğrultuda kontrolör olarak kullanılan PID incelenmiştir. PID'nin teorik yapısı, formülasyonu ve parametre ayarlamasında kullanılan yöntemler tartışılmıştır. Genel kontrol literatüründe PID kontrolörlerinin kullanımında MS algoritmaların daha yüksek performansa sahip olduğu görülmüştür. Bu doğrultuda öncelikle MS algoritmalar tanımlanmış ve sınıflandırılmıştır.

Optimizasyon kavramı en basit haliyle mevcut sınırlı kaynakların en iyi şekilde kullanılması olarak tanımlanmaktadır [8]. Dolayısıyla kaynak kullanım performansını en üst düzeye çıkarmak için çeşitli problemler tanımlanmakta ve bu problemlerin çözüm yolları araştırılmaktadır. Bu doğrultuda İHA optimizasyonu için de çeşitli yaklaşımlar geliştirilmiştir. Ortaya çıkan sorunların çözümüne yönelik yol, topoloji, enerji ve hız, tasarım ve kontrol gibi çeşitli alanlarda çalışmalar yapılmaktadır.

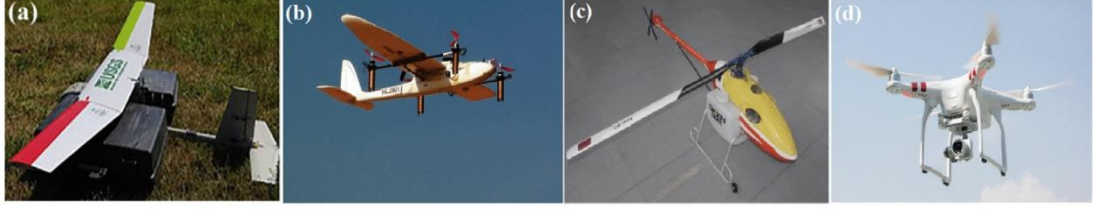
Bu tez çalışmasında, kontrol optimizasyonunun incelenmesinden dolayı PID optimizasyonunda kullanılan çeşitli MS optimizasyon algoritmaları incelenmiştir. Bu algoritmalar evrimsel, biyo-esinli, doğadan esinlenen, sürü tabanlı ve fizik tabanlı olarak sınıflandırılmış ve en az bir çalışma ile örneklendirilmiştir. Literatür incelendiğinde doğadan esinlenen MS algoritmaların kontrol problemleri üzerinde daha yüksek performans sergiledikleri görülmektedir. Bu doğrultuda çalışmada kullanılmak üzere doğadan esinlenen ve yakın dönemde tanıtılan Puma Optimizasyoncusu, Afrika Akbaba Optimizasyonu ve Ateş Şahini Optimizasyoncusu seçilmiştir. Adı geçen optimizasyon algoritmaları henüz yaygın bir araştırmaya konu olmamışlardır. Seçilen optimizasyon algoritmalarının hiçbiri daha önce İHA kontrolünde test edilmemiştir. Ayrıca Puma Optimizasyoncusu ve Ateş Şahini Optimizasyoncusu hakkında PID ve DA motor kontrolüne yönelik de bir çalışma bulunmamaktadır.

1. LİTERATÜR ÖZETİ

1.1.İHA'ların Gelişimi ve Türleri

İnsansız hava aracı (İHA) Türk Hava Kurumu tarafından “içinde pilotu ve yolcusu olmayan, sadece amaca uygun ekipman (video kamera, fotoğraf makinesi, GNSS, lazer tarama cihazı, vb.) taşıyan, uzaktan kumandalı ve/veya otomatik olarak görevini icra edebilen bir çeşit uçak” olarak tanımlanmıştır [9]. Genel anlamda İHA'ların, içinde veya üzerinde insan operatörü bulunmayan, uzaktan kontrol edilebilen ya da otonom olarak kendini yönlendirebilen ve önceden tanımlanmış görevleri yürüten hava platformları olarak da tanımlanmaları mümkündür.

Tarihsel açıdan insansız hava araçlarının gelişimi, Elmer Sperry'nin uçuş halindeki uçakların dengesini sağlamak amacıyla cayroskopik cihazlar geliştirmesiyle başlamıştır. Bu aletler aynı zamanda günümüz ataletsel seyrüsefer sistemlerinin de temelini oluşturmuştur. Bu teknolojik gelişimin ardından Amerikan donanmasının pilota ihtiyaç duyulmaksızın stabil uçuşların yapılabilme olanağının mümkün olduğunu belirlemesiyle bu alandaki çalışmalar hız kazanmıştır. Western Electric tarafında geliştirilen radyo kontrol sisteminin de eklenmesiyle, Aralık 1917'de ilk uçuşu gerçekleştirilen Curtiss-Sperry uçan torpidosu alanın öncüsü olarak kabul edilebilir. Önceden ayarlanmış bir cayroskop ve barometre ile donatılmış olan “Kettering Bug” torpido modeli ilk uçuşunu 1918'de gerçekleştirmiştir. İlk İHA sistemi ise A. M. Low tarafından geliştirilmiş olan “Aerial Target” ismi verilen platformdur. Bu gelişmeleri 1930 yılında İngiliz Kraliyet Donanmasının geliştirdiği ve telsizle kontrol edilebilen “Queen Bee”; 1939 yılında uzaktan kumanda ile kontrol edilen ve ABD'nin geliştirdiği Radioplan OQ-2; 1950'de Amerikan ordusunda keşif yapması için geliştirilen MQM-33 takip etmiştir. Modern anlamda ise 1995'de General Atomics ve Pentagon ortaklığıyla geliştirilen MQ-1 Predator örnek verilebilir [10].



Şekil 1.1. İnsansız Hava Aracı Örnekleri

İHA'lar çeşitli spesifikasyonlara, ekipmanlara, boyutlara, aralıklara ve biçimlere sahiptir. Literatürde İHA'lar “sabit kanatlı”(Şekil 1.1(a)), “sabit kanatlı hibrit” (Şekil 1.1(b)), “tek rotorlu” (Şekil 1.1(c)) ve “çok rotorlu” (Şekil 1.1(d)) olarak sınıflandırılmıştır. Sabit kanatlı İHA'lar ana gövde, kanatlar, pervane ve motordan oluşmaktadır. Bu tarz İHA'ların kontrol edilebilmesi için operatörlere özel eğitim verilmesi gerekmektedir. Ayrıca havada sabit kalma ve uçuş yönünü değiştirme gibi özelliklere sahip olmadıkları için gözetleme gibi görevlerde kullanışsızdırlar. Bu nedenle kullanım alanları genellikle havadan haritalandırma ve enerji hatlarının incelenmesi gibi alanlarla sınırlıdır [11]. Tek rotorlu İHA'ların üretim maliyetleri yüksektir ve uçuşun gerçekleştirilmesi için, sabit kanatlı İHA'larda olduğu gibi operatörün eğitilmesi gerekmektedir. Ayrıca mekanik zorluklarının yanında titreşim gibi engellere karşı hassas olması bu araçların kullanımını sınırlandırmaktadır. Bunlara karşın Şekil 1.1(d)'de örneği yer alan çok rotorlu İHA'lar en uygun maliyetli ve inşa edilmesi en kolay nitelikte olan İHA'dır. Dikey iniş, hızlı manevra kabiliyeti, düşük maliyeti ve kompakt boyutları nedeniyle en çok kullanılan İHA türüdür.

Yukarıda kısaca değinilen İHA tiplerinin daha detaylı karşılaştırılması, aşağıdaki tabloda yer almaktadır. Bu çalışmanın konusu olan çok rotorlu İHA'ların öne çıkan avantajları; hareket kabiliyeti, kullanılabilirlik ve düşük fiyat olarak belirlenmiştir. Dezavantajlarının ise uçuş süresindeki sınırlılık ve yük taşıma kapasitesinin diğer İHA'larla karşılaştırıldığında oldukça düşük olmasıdır [12].

Tablo 1.1. İHA Tiplerinin Karşılaştırılması [13]

İHA Tipi	ABD Doları Cinsinden Fiyat	Yoğun Kullanım Alanları	Avantajları	Dezavantajları
Sabit Kanatlılar	20-150 bin	Yapısal inceleme, alan araştırması	Geniş alan kapsama alanı, uzun dayanıklılık, yüksek hız	Fırlatma, iniş, yüksek fiyat
Tek Rotorlu	20-150 bin	Tedarik kesintileri inceleme	Havada asılı, büyük yük	Yüksek fiyat
Çok Rotorlu	3-50 bin	Fotoğrafçılık, filmografi, inceleme	Gezinme, kullanılabilirlik, düşük fiyat	Kısa uçuş süresi, düşük taşıma kapasitesi

İHA tiplerinin karşılaştırılması için kullanılan bir diğer nitelik ise taşıdıkları özelliklerdir. Bu doğrultuda sınıflandırma yapılması için kullanılan parametreler ise enerji verimliliği, uçuş sistemi, iniş, özerklik, gezinme, güç kaynağı, dayanıklılık, yük ve ağırlık değerleridir.

Tablo 1.2. İHA Tiplerinin Özelliklerinin Karşılaştırılması [14]

Özellikler	Sabit Kanatlı	Rotorlu	Hibrit
Enerji Verimliliği	Yüksek	Düşük	Yüksek
Uçuş Sistemi	Karmaşık	Basit	Karmaşık
İniş	Geleneksel	Dikey	Dikey
Özerklik	Hayır	Evet	Evet
Gezinme	Hayır	Evet	Evet
Güç Kaynağı	Pil, Yakıt	Pil	Pil, Yakıt
Dayanıklılık	60-3000 m	6-180 m	180-480 m
Yük	1000 Kg	50 kg	10 Kg
Ağırlık	0,1-400.000 Kg	0,01-100 kg	1,5-65 Kg

İHA'ların uçuş hızları ve süreleri boyutlarına göre değişiklik göstermektedir. Küçük boyutlu olanlar genellikle 15 m/s veya daha düşük hızlarda 20-30 dakikaya

kadar uçuş süresine sahipken, büyük boyutlu olanların hızı 100m/s'ye kadar ulaşabilmektedir ve daha uzun uçuş sürelerine sahiptirler.

1.2. İHA'ların Kullanım Alanları

İHA'ların kullanım alanları ve şekilleri genellikle ihtiyaçlar doğrultusunda şekillenmektedir. Kamera sistemlerinin gelişmesiyle beraber ulaşılması maliyetli, zor veya tehlikeli sektörlerde kullanımı hızla yaygınlaşmıştır. Mohsan ve ark. [15] İHA'ların kullanım alanlarını ekonomik, ticari, eğlence, askeri ve akademik amaçlar olarak sınıflandırmıştır.

Askeri alanda İHA'lar navigasyon, iletişim ve keşif görevlerinde sıklıkla kullanılmaktadır. İHA'ların çevresel izlemeyi kolaylaştıran kameraları sayesinde sınırlı erişimli, dinamik, zorlu ve karmaşık ortamlardaki kısıtlamaları ortadan kaldırdıkları için izleme konusunda sıklıkla kullanılmaktadır. Ayrıca, arazide araştırma, inceleme ve numune alma için gereken emek ve zamanı azaltır, çarpışmadan kaçınmayı ve hedeflere ulaşmak için hızlı yaklaşmayı sağlar ve amaçlanan yönetim operasyonları için daha fazla zaman sunar [16]. Ayrıca mobil bilişim, hücreli iletişim, paket teslimatı, akıllı sağlık hizmetleri, akıllı ulaşım sistemleri, video gözetim görevleri, hassas tarım, enerji hattı denetimi, uzaktan algılama, arama kurtarma ve afet ortamlarında yardım operasyonlarının gerçekleştirilmesinde kullanılmaktadır [17].

İHA'lar terörist saldırıları, tsunamiler ve su baskını gibi insan kaynaklı ya da çevresel felaketler durumlarında, insanlar için güvenli olmayan bölgelerde sıklıkla kullanılmaktadır. Enerji, telekomünikasyon altyapısı, su hizmetleri ve ulaşımın tümü bu tarz olaylara karşı en hassas durumda olanlardır. Bu doğrultuda İHA'lar gerçek zamanlı felaket değerlendirme, önleyici tedbirlerin alınması ve arama kurtarma gibi alanlarda çeşitli avantajlar sağlamaktadır.

İHA'ların görüntüleme teknikleri sayesinde uygulama halindeki haritalar, alan projelerinin takibi ve araştırma görevleri daha verimli ve basit hale gelmiştir. Bu doğrultuda altyapı projeleri, inşaat ve mimari alanında kullanımı giderek yaygınlaşmaktadır. Örneğin coğrafi ve araştırma verilerini elde etmek için kırmızı, yeşil ve mavi (RGB) renkli görüntüler, tek renkli Lidar nokta bulutları ve termal görüntüler gibi farklı türde görüntüleme ve algılama teknolojileri uygulanmıştır [18],

[19]. Molina ve ark. [20] yaptıkları literatür taraması doğrultusunda İHA teknolojisinin inşaat sektöründeki kullanım alanlarını denetleme ve ölçme olarak sınıflandırmıştır.

İHA'lar aynı zamanda hassas tarım uygulamalarında da kullanılmaktadır. Toprak sensörleri (su kalitesi, toprak bileşimi, nem vb.) aracılığıyla belirli bilgiler elde etmek, böcek ilaçlarını püskürtmek, hastalıkları teşhis etmek, sulama planlamak, yabancı otları tespit etmek ve mahsulleri izlemek ve yönetmek gibi çeşitli işlevleri yerine getirebilmektedir. Reinecke ve Prinsloo [21] yaprak alanı, yabancı kirleticiler, klorofil içeriği ve sıcaklıklar da dahil olmak üzere çeşitli parametreleri İHA ile elde ederek mahsulün sağlık durumunu analiz etmişlerdir. Maes ve Steppe [22] de İHA'lar aracılığıyla yapılan büyüme gücü değerlendirmesi, beslenme durumu, hastalık ve yabancı otların tanımlanması ve kuraklık stresi konularındaki ilerlemeleri değerlendirmişlerdir. Tarım uygulamalarına benzer bir şekilde otomatik orman restorasyonunda da kullanılmaktadır. İHA'lar, saha altyapısı, saha denetimi, restorasyon planı, fide temini, saha bakımı (örneğin çimlendirme ve yabancı otların temizlenmesi) ve restorasyon müdahalelerinden sonra biyolojik çeşitlilik araştırması gibi yeniden bitkilendirme faaliyetlerinin gerçekleştirilmesinde kullanılmaktadır [23].

Tarımsal alanda kullanımına benzer bir şekilde su ürünleri alanında da kullanılmaktadır. Sensörler ve yapay zeka yaklaşımları aracılığıyla izleme ve denetlemeye yönelik otomasyon ve gerekli bilgilerin toplanması sağlanmaktadır. Günümüzde İHA'lar su altı türlerinin gerçek zamanlı görüntülerini yakalamak, balık davranışlarını gözlemlemek, uzaktan algılama, saha gözetimi, balık besleme yönetimi ve türlerin değerlendirilmesi için kullanılmaktadır [24].

Önümüzdeki yıllarda İHA'ların karayolları izleme sistemleri ile entegre edilmesiyle, karayolu trafik izleme sistemleri aracılığıyla ulaşım sektörünün %100 otomasyonunun gerçekleşeceği tahmin edilmektedir [25]. Karayollarında İHA teknolojisinin bir diğer kullanım alanı ise haritalandırmadır. Tükenmez ve Yakar, İHA'ların karayolu projelerinde kullanım pratiğine yönelik bir araştırma yapmışlardır. Çalışmada İHA aracılığıyla toplanan verilerin, otoyol projelerine temel teşkil eden güzergah haritalarının oluşturulmasındaki etkinliği incelenmiştir. Hacim hesaplaması, çalışma alanının yersel yöntemle üretilen yüksek doğruluklu 1/1000 ölçekli esas haritaları ile İHA fotogrametri yöntemiyle üretilen esas hat haritaları arasında oluşturulan ortak alanda örnek bir otoyol projesi kullanılarak gerçekleştirilmiştir [26].

Geleneksel prosedürlerin pahalı maliyetleri ve tehlikeleri nedeniyle enerji hatlarının izlenmesi alanında İHA'ların kullanım alanı hızla yaygınlaşmaktadır. Zhang ve ark. [27] güç hattı koridorlarının denetimi için İHA üzerine kurulmuş bir dijital kamera kullanmışlardır. Foudeh ve ark. [28] tarafından yapılan bir diğer çalışmada ise havai enerji iletim hatlarındaki kusurları tespit etmek ve izlemek için İHA'lardan yararlanılmıştır. Bu denetim görevleri İHA'lar tarafından helikoptere göre daha ucuz maliyetle ve geleneksel yaya devriyeye göre daha düşük riskle gerçekleştirilebilmektedir.

İHA'ların kullanımının yaygınlaşması beklenen bir diğer alan ise uzay araştırmalarıdır. Araştırmacılar otonom ve yarı otonom İHA'lar aracılığıyla güneş enerjisi aramaya odaklanmıştır. Ayrıca gelecek dönemde İHA'ların Mars atmosferinde de uçabileceği tahmin edilmektedir. Sharma ve ark. [29] göre havada asılı kalma, VTOL ve düşük hızda ileri uçuşun potansiyel özellikleri sayesinde İHA'lar mevcut yörünge araçlarına nazaran daha geniş bir kullanım alanı sunabilecektir.

İHA'ların bir diğer yenilikçi kullanım alanı ise deniz iletişimi ve gözetimine yöneliktir. Alqurashi ve ark. [30]'nın çalışması yüksek irtifa platformları aracılığıyla deniz yüzeyinden birkaç yüz metre yüksekte uçabilme kapasitesine sahip İHA'ların mümkün olduğunu göstermiştir. Bu teknoloji, havada belirli mesafe ve irtifalarda kolaylıkla kontrol edilebilmesi ve dolayısıyla farklı hız ve konumda iletişim kurabilmesi nedeniyle su üstü ve sualtı araçlarının tamamlayıcısı olarak nitelendirilmektedir. Denizcilik ortamında sensör düğümlerinden veri toplamak için en uygun yolun bulunmasına ihtiyaç vardır. Bu zorluğun aşılması için şamadra gibi deniz yüzeyindeki çeşitli platformlara sabitlenebilen İHA'lara yönelik çeşitli çalışmalar yapılmaktadır [31].

1.3. İHA'ların Genel Mimari Özellikleri

İHA'ların yerleşik donanım bileşenleri, İHA'nın havada asılı kalması sırasında yol planlama, çarpışmayı önleme ve inceleme vb. gibi farklı uygulama alanlarını kapsar. LIDAR ve kızılötesi cihazlar esas olarak çarpışmayı önlemek ve harita oluşturmak için kullanılırken, kamera ve GPS, İHA'nın belirli bir alanını veya yolunu ön ve arka yönde gözetlemek için kullanılır. Ayrıca Elektronik Hız Kontrol Cihazı

(EHKC), Kamera & Gimbal, Uçuş kontrol cihazı ve Lityum-iyon pil (LiPo) vb. çeşitli bileşenlerle donatılmışlardır.

İHA'ların fiziksel yapılarının oluşturulabilmesi için çeşitli bileşenlere ihtiyaç duyulmaktadır. İHA'ların ana bileşenlerinden biri Elektronik Hız Kontrol Cihazları(EHK)dir. EHK'ler İHA motorlarına güç ve yüksek frekans sunmak için kullanılmaktadır. Temel işlevleri DA 3 fazlı AA'ya dönüştürmesidir ve aynı zamanda motor hızını değiştirmek için de kullanılmaktadırlar. Bir diğer temel bileşen ise hem yerleşik bileşenlere hem de sensörlere güç sağlamak için kullanılan LiPodur.

İHA'lar üzerinde çeşitli yerleşik sensörler bulunmaktadır. Bulunan sensörlerden biri de algılama sensörleridir. İHA tasarımında bu sensörlerin seçimi genellikle kullanım alanlarına ve amaca bağlı olarak değişmektedir ve çeşitli avantaj ve dezavantajlara sahiptirler. Örneğin, termal kızılötesi sensörler adalar ve tehlikeli alan takibi, hidrotermal çalışmalar, kentsel ısı izleme, yangınların tespiti ve volkanların izlenmesi gibi durumlarda kullanılmaktadır. Kolay kurulumuna sahip yapısı, küçük boyutları, düşük güç tüketimi ve karanlıkta kullanılabilirliği, amaca yönelik çeşitli avantajlar sağlamaktadır. Buna karşın mesafe ve parazitten etkilenmesi, düşük hassasiyeti, güneş ışığı paraziti ve yalnızca iç mekan veya gece kullanılabilmesi kullanım alanlarını daraltmaktadır [32]. Hiperspektral sensörler ise daha çok alan değerlendirme, felaket hasarı dahil olmak üzere tespitlerin yapılması, tarım ve bitki örtüsü hastalıklarının belirlenmesi, biyofiziksel, fizyolojik veya biyokimyasal parametrelerin tahmin edilmesinde kullanılmaktadır [33]. Sıklıkla kullanılan bir diğer yerleşik sensör olan LİDAR ise bina bilgileri, kültürel mirasın haritalandırılması, orman karbonunun tahmini ve bitki örtüsü gölgelik analizi gibi alanlarda kullanılmaktadır. Sağladığı yüksek çözünürlük ve doğruluk, mekânsal sınıflandırma için uygun bir sensör olmasını sağlamaktadır. Buna karşın araç hareketliliğinin atmosferik koşullardan, kalibrasyon hatalarından ve sensör gürültüsünden etkilenmesi LİDAR'ın dezavantajlarıdır [34]. Sıklıkla kullanılan bir diğer sensör tipi ise GPS'tir. Zamanlama, haritalama, takip, navigasyon ve yerleştirme gibi uygulamalarda kullanılmaktadır. Düşük güç tüketimi, düşük satın alma maliyeti ve küçük boyutlara sahip olması İHA'larda yaygın olarak kullanılmasını sağlamaktadır. Ancak alıcı saat hataları, yörünge hataları, gecikmeler ve hassas manyetik yapısı GPS kullanımında çeşitli sorunlara yol açabilmektedir [35].

Navigasyon sistemlerinin İHA uçuş kontrolü üzerinde güçlü bir etkisi bulunmaktadır. İHA'lar için temel navigasyon sistemleri, yüksek irtifa, uzun ömürlü navigasyon sistemleri ve taktik veya orta menzilli navigasyon sistemleridir. Droppler, entegre, geometrik, uydu ve eylemsiz navigasyon gibi çeşitli navigasyon teknolojileri birden fazla işlevi yerine getirmektedir. Günümüzde normal İHA uçuşunu garanti altına almak için uçuş durumunun belirlenmesinde veri füzyonlu yüksek performanslı navigasyon; hacim ve ağırlığın birleştirilerek uçuş esnekliğinin iyileştirilmesi için yeni ataletsel navigasyon sistemleri ve navigasyon ve İHA teknolojisinin geliştirilmesi için bilgi teknolojilerini kullanan akıllı navigasyon sistemleri kullanılmaktadır [36].

İHA'ların uçuş ve havada asılı kalma işlevini yerine getirebilmesi için uçuş kontrolörüne ihtiyaç duyulmaktadır. Kontrolörlerin yanlış kalibrasyonu uçuş sırasında çeşitli kazalara veya dengesizliklere yol açabilmektedir. Literatürde çeşitli uçuş kontrolörleri kullanılmıştır. Lim ve ark. [37] yaptıkları anket çalışmasında en çok Arducopter, Aeroquad, Pixhawk, Multiwii, Arduino ve Raspberry pi açık kaynaklı uçuş kontrolörlerinin kullanıldığını tespit etmişlerdir. Wood ve ark. [38] ise çalışmalarında İHA'larda yerleşik birimlerden bir diğeri olan kamera kullanımını araştırmışlardır. Mohanta ve ark. [39] İHA'larda sıklıkla kullanılan fiziki bileşenlerin kamera ve gimball, sensörler, iletişim sistemi, pil, ESC, fırçasız DA motor, GPS/GNSS, pervaneler, vericiler, alıcılar ve yerleşik kontrolörler olduğunu belirtmişlerdir. Bu tez çalışmasının konusu olması nedeniyle uçuş kontrol sistemlerinin tasarlanmasının detaylı bir literatür taraması gerçekleştirilmiştir.

1.4.İHA'larda Kontrol Tasarımı

İHA'ların kontrollerinde karşılaşılan problemlerin çözümü için çeşitli tasarımlar ve yöntemler geliştirilmiştir. Geliştirilen tasarımlar bu tez çalışmasında uçuş, hassas iniş ve yük taşıma olmak üzere üç başlık halinde incelenmiştir.

1.4.1.Uçuş Kontrol Tasarımı

İHA üretimi ve kullanımında önem arz eden bir diğeri husus kontrol tasarımıdır. Kontrolörler, etkin mühendislik uygulamaları üretmek amacıyla dinamik sistemlerin performansını yönetmek için geliştirilen mekanizmalardır. Temel amacı dinamik sistemin geri beslemesinde kararlılığın sağlanmasıdır. Genel kontrolör ayarlama

zorluğu, belirlenen parametreleri (performans kriterleri) karşılayan tanımlanmış bir performans koşulu altında dinamik sistem reaktivitesini stabilize eden bir kontrolör değişkenleri koleksiyonunun tanımlanmasını gerektirmektedir. Bu doğrultuda literatürde uçuş kontrol tasarımı ve mimarisinde çeşitli yaklaşımlar gelişmiştir. Bunlar; “Lineer Kontrol”, “Lineer olmayan Kontrol”, “LQR, LQI ve LQT”, “Adaptif ve optimal kontrol” ve “Akıllı Kontrol” olarak sınıflandırılabilen yaklaşımlardır.

Bucki ve ark. [40] aktüatörlere ihtiyaç duymadan şekil değiştirebilen ve ilave serbestlik derecelerine rağmen enerji tüketimini azaltmayı hedefleyen bir tasarım geliştirmişlerdir. Tutum kontrolünün sağlanması için lineer Kuadratik Regülatör(LQR) yaklaşımı kullanılmıştır. Tasarımda her bir konfigürasyon için kontrol yasalarını sentezlemek üzere, katlanmamış ve katlanmış durumu dikkate alan basit bir yöntem de açıklanmıştır. Zhao ve ark. [41] tekil formlar problemini çözmek için itme yönünü uygun şekilde değiştirerek tekil formların üstesinden gelmek için ek bir 1 Serbestlik Derecesi (DoF) vektörel pervane kullanılmıştır. Çalışmada yeni bir Vektörleştirme Açılımları için Optimizasyon Yöntemi (OMVA) geliştirilmiştir. Kontrol edilebilirliği en üst düzeye çıkarmak için geliştirilen yöntemde, kontrol şeması basamaklı kontrol formuna dayanmaktadır ve basitleştirilmiş matematiksel modeli uygulanmıştır. Zhao ve ark. [42]’a ait alışmada z yüksekliğini ve tutumu düzenlemek için Doğrusal Kuadratik İntegralin (LQI) kullanıldığı bir hava manipülasyon robotu tasarlamışlardır. Aynı zamanda düzlemsel konumların kontrolü için konumlarını kontrol etmek için genel bir PID kullanılmıştır. Su ve ark. [43] kontrol döngüsündeki bozulma hataları azaltmak amacıyla aşırı harekete geçirilmiş bir İHA tutumunun telafisi için bir kontrolör eklemişlerdir. Nominal kontrol döngüsündeki izleme ve bozucu-reddetme hatalarını azaltmak için yardımcı girişlerden yararlanan bir eklenti tutum dengeleme kontrolü tasarlanmıştır. Simülasyonlar ve deney testleri, LQR yaklaşımının performans artırıcı olduğunu göstermiştir. Marques ve ark. [44] konum kontrolü ve tutum arasındaki bağlantı sorunlarını aşmak için, itme vektörleme mekanizmalarını içeren yeni çok rotorlu konfigürasyonlar üzerinde çalışmışlardır. Çalışmada iki farklı kontrol formülasyonu önerilmiştir. İlki, sabit ve eğimli rotorlu konfigürasyonları dikkate alarak bir referans sinyalinin izlemek için kullanılan Doğrusal Kuadratik İzleme(LQT) tekniğine dayanmaktadır. İkinci aşamada kontrolör, eğim sapmaları, aktüatör dinamikleri ve yatay yer değiştirme ile tutum arasındaki kontrol ayarımındaki sınırlamalar dikkate alınarak konum takibi için Model Tahminli

Kontrol (MPC) anlayışına dayalı olarak tasarlanmıştır. Deneysel sonuçlar MPC dinamik ayırıştırma kontrol stratejisinin, eğim-sapma kısıtlamalarını LQT kontrol cihazından daha düzgün bir şekilde idare ettiği tespit edilmiştir.

Mughees ve Ahmad [45] yeni bir koşullandırılmış uyarlanabilir bariyer fonksiyonu entegre terminal kayar modlu kontrolör (CABFIT-SMC), İHA'nın yörünge izleme problemini çözmek için tasarlanmıştır ve karşılaştırmalı analiz için bir kayan mod kontrolü (SMC) uygulanmıştır. Çalışmada kontrol yasalarının optimize edilebilmesi için Karınca Kolonisi Optimizasyonu, Yapay Arı Kolonisi, Parçacık Sürü Optimizasyonu ve Genetik Algoritma kullanılmıştır. Doğrusal olmayan modeli, jiroskopik momentleri ve aerodinamik etkileri birleştiren MATLAB ODE-45'teki Lagrange formalizmi yoluyla formüle edilmiştir. Deney sonuçları hassas tutum, yükseklik, yön ve konum takibi için CABFIT-SMC'in yüksek bir performansa sahip olduğunu göstermiştir. Belmouhoub ve ark. [46] dış etkenlere maruz kalan yeniden yapılandırılabilir bir dört rotorun yörünge takibini ve kontrolünü sağlamak için kullandıkları kontrol yasası bozucu gözlemciyle bütünleştirilmiştir ve sonlu zamanlı Lyapunov kararlılık teorisine dayanmaktadır. Derrouaoui ve ark. [47] belirsiz ve değişken parametrelerin varlığında bir İHA'yı kontrol etmek ve stabilize etmek için doğrusal olmayan sağlam bir Hızlı Terminal Kayan Modlu Denetleyici (FTSMC) tasarlamışlardır. Önerilen tasarım FTSMC, geleneksel kayma modundan farklı olarak istenen durumlara sonlu bir zamanda ulaşma, belirsiz ve bilinmeyen parametrelere karşı sağlamlık, kayma yüzeyine hızlı yakınsama, yüksek doğruluk ve çatlama olayını azaltma gibi çeşitli avantajlara sahiptir. İHA kollarını döndürmek ve uzatmak için kullanılan sekiz aktüatör, basit PID kontrolörleri tarafından kontrol edilmektedir. Yu ve ark. [48] doğrusal SMC'nin yalnızca sistem durumlarının sonsuz bir süre sonra dengeye yaklaşmasını garanti etmesi nedeniyle, sonlu zamanlı yakınsamayı sağlamak için uçbirim kayan kipli kontrol (TSMC) önermişlerdir. Geliştirilen tekil olmayan, sürekli, hızlı ve sabit zamanlı TSMC şeması simülasyon ve deneylerle doğrulanmıştır. Gu ve ark. [49] İHA tutum ve irtifa kanallarının asimptotik takip kontrolünü sağlamak için yeni bir modelden bağımsız uyarlanabilir kontrolör tasarlamışlardır. Sistemin sağlamlığını arttırmak için geliştirilen Integral Kayan Mod(ISM) algoritması birleştirilmiş ve tutum kontrol tasarımıyla ilişkili tekilliği önlemek için kuaterniyon geri bildirimini kullanılmıştır. Wang ve ark. [50] çeşitli arızaların uçuş sırasında tutum hareketlerinin gerçekleştirilmesinde yarattığı

sorunların aşılması için Artımlı Adaptif Kayar Mod(I-ASM) adında yeni bir kontrol tekniği geliştirmişlerdir. Önerilen yöntem hesaplamalı akışkanlar dinamiği (CFD) aerodinamik modelleri ile yüksek doğruluklu bir simülasyon platformunda doğrulanmıştır. Geliştirilen aerodinamik model belirsizliklerine ve rotor hatalarına karşı dayanıklılığı aynı zamanda doğrusal ikinci dereceden regülatörden (LQR) ve artımlı doğrusal olmayan dinamik ters çevirmeden (INDI) daha iyi sonuçlar üretmiştir. Yi ve ark. [51] doğrusal olmayan kontrolör olan süper-bükümlü kayan kipli kontrolörün tasarım prosedürlerini ve uygulamasını gerçekleştirmişlerdir. Kapalı çevrim sistemin kararlılığının Lyapunov kararlılık teorisinden yararlanılarak kanıtlan çalışmada eğimli rotora sahip bir manipülatör dronun kontrolünü sağlamak için doğrusal olmayan sağlam bir Süper Bükümlü Kayar Mod Denetleyici (STSMC) tasarlamışlardır.

Belmouhoub ve ark. [52] katlanır bir dronun doğrusal olmayan kontrolünü sağlamak için atalet merkezleri ve kontrol matrisinin değişimini göz önünde bulundukları yeni bir model geliştirmişlerdir. Kontrol işlemlerinin sağlanması için sonlu zamanlı Lyapunov kararlılık teorisine dayanan ve bir süper bükme algoritması ile geliştirilen geri adımlama algoritmasının teorik temellerini oluşturmuşlardır. Liang ve ark. [53] İHA'ların dış bozucular ve aktüatör arızalarından kaynaklanan Hata Toleranslı Kontrol (FTC) problemini incelemişlerdir. Yakın döngü sisteminin kararlılığını kontrolörler aracılığıyla sağlamışlardır. Rotor arızası ve bozucuların durumlarını tahmin etmek için doğrusal olmayan Backstepping'e dayalı sabit zamanlı bir gözlemci oluşturulmuştur. Geri adımlama yönteminin "karmaşıklık patlaması"nın etkilerini ortadan kaldırmak ve sanal yasaların türevlerini hesaplamak için değiştirilmiş bir dinamik yüzey kullanılmış, sayısal simülasyonlarla önerilen kontrol yaklaşımı test edilmiştir. Derrouaoui ve ark. [54] dinamikleri, yerçekimi merkezinin değişimini, ataletin değişimini, tahsis matrisinin değişimini ve uçuş sırasındaki aerodinamik etkileri hesaba katan ayrıntılı bir jenerik model ve geri adımlama kontrol stratejisi geliştirmişlerdir. Madanı ve Benallugue [55] birbirine bağlı üç alt sistemin koordinat düzleminde çalışmasını kontrol etmek için, tasarım metodolojisi Lyapunov kararlılık teorisine dayanan geri adım kontrolü geliştirmişlerdir. Basri ve ark. [56] yüksek bağlantı derecesi ve bilinmeyen doğrusal olmayan durumlar gibi doğrusal olmayan dinamik davranışlara sahip, eksik çalıştırılan çok girişli ve çok çıkışlı (MIMO) bir sistemi üzerinde çalışmışlardır. Öncelikle aracın dinamik modeli

matematiksel olarak formüle edilmiştir. Kontrolün sağlanması için bir geri adımlama ve oransal türev (PD) kontrolörü oluşturulmuştur. Nominal model sisteminin kararlılığını garanti edebilen Lyapunov teoremini kullanan yinelemeli bir tasarım metodolojisi olan geriye adım atma ve sistem belirsizliklerinin neden olduğu etkileri azaltmak için de PD kontrolü kullanılmıştır. Parametrelerin belirlenmesi için parçacık sürü optimizasyonu, performans karşılaştırması için ise genetik algoritma kullanılmıştır. Geliştirilen tasarım simülasyon ortamında test edilmiştir.

Tal ve Karaman [57] konum referansının takibini, bunun türevleri olan hız, ivme ve sarsıntının yanı sıra sapma referansı ve sapma hızıyla birlikte düzlük dönüşümü kullanan bir kontrolör önermişlerdir. Kontrolör, kapsamlı aerodinamik modellemeye bağlı değildir; bunun yerine, yalnızca yerel giriş-çıkış ilişkisine dayalı kontrol güncellemelerini hesaplamak için artımlı doğrusal olmayan dinamik ters çevirme kullanır; bu, basitleştirilmiş aerodinamik denklemlerdeki tutarsızlıklara karşı sağlamlık sağlanmıştır. Kontrol sinyallerini güncellemek için Artımlı Doğrusal Olmayan Dinamik İncersiyon (INDI) ve PD kullanılmıştır. Bulgular, özellikle geçiş adımında doğru bir yörünge takibi sergilemiştir. Delleman ve Wagter [58] hibrit konseptli İHA'larda dikey kalkış ve inişleri (VTOL) verimli uzun ömürlü ileri uçuşlarla birleştirme üzerine çalışmışlardır. Bu doğrultuda, eğim-büküm probleminin üstesinden gelmek için Artımlı Doğrusal Olmayan Dinamik İncersiyona (INDI) dayalı bir eğim-büküm kontrolörü önerilmiştir. Simülasyonlar ve test uçuşu testleri, artan performans göstermek için NederDrone hibrit kuyruk oturtucusu ile gerçekleştirilmiştir. Hamandi ve ark [59] eğilebilir pervanelere sahip çok rotorlu hava araçlarının (MRAV'ler) farklı yönlerde statik havada asılı kalmayı sağlama ve sürdürme yeteneği üzerine çalışmışlardır. Platformun kontrol girdilerini dış momentler ve kuvvetlerle ilişkilendiren yeni bir doğrusal harita geliştirmişlerdir. Bulguları test etmek ve doğrulamak ve önerilen sayısal ölçümün platformun dinamikleri üzerindeki etkisini göstermek için kapsamlı simülasyonlar gerçekleştirilmiştir.

Chen ve ark. [60] eğimli rotorlu insansız hava aracı için daldırma ve değişmezlik tabanlı uyarlanabilir durum kontrolörü önermişlerdir. Sönüm katsayılarının belirsizliklerini telafi etmek için özel olarak uyarlanabilir bir güncelleme yasası tasarlanmıştır. Kapalı döngü koaksiyel eğimli rotorlu insansız hava aracının (CTRUAV) sistem kararlılığı, Lyapunov metodolojisi ve LaSalle'nin değişmezlik teorisi ile kanıtlanarak, stratejik etkinliğin doğrulanması için simülasyonlar ve

deneyler gerçekleştirilmiştir. Marshall ve ark. [61] kuyrukta oturan İHA'ların aerodinamik katsayılarının tüm uçuş rejimlerinde ölçülebilmesi için referans modeli değiştirmeden veya tahmin edicileri kullanmadan, kullanıcının hem yörünge izleme hatasına hem de izleme hatasının yakınsama oranına önceden sınır koymasına olanak tanıyan, model referans uyarlamalı kontrolü (MRAC) önermişlerdir. Sayısal simülasyonlar, önerilen kontrol stratejisinin uygulanabilirliğini ve klasik MRAC'a göre avantajlı olduğunu göstermiştir. Derrouaoui ve ark. [62] uçuş sırasında konfigürasyonunu değiştirebilen İHA, geometrik parametrelerin değişmesinden kaynaklanan sorunları ele almışlardır. Önerilen, doğrusal olmayan uyarlamalı integral geri adımlı kontrol mimarisi; Kontrol mimarisi, ağırlık merkezini ve karışım matrisini hesaplamak için bir atalet tahmincisi ve diğer spesifik blokları içermektedir. Önerilen mimari yapı, bozucuların olduğu ve olmadığı durumlar ayrı ayrı ele alınarak, geleneksel geri adımlı kontrolörle karşılaştırılmıştır. Klasik backstepping ile karşılaştırıldığında, sayısal simülasyonlardan önerilen çözümün morfoloji ve dinamik değişimine karşı en iyi performansı sunduğu görülmektedir. Klasik backstepping ile karşılaştırıldığında, sayısal simülasyonlardan önerilen çözümün morfoloji ve dinamik değişimine karşı en iyi performansı sunduğu görülmektedir. He ve ark. [63] aktüatör hatalarını ve model belirsizliklerini aynı anda telafi etmek amacıyla hibrit dikey kalkış ve iniş (VTOL) insansız hava aracı (İHA) için uyarlanabilir, hataya dayanıklı bir kontrol stratejisi önermişlerdir. Aktüatör arızaları ve model belirsizlikleri, Uyarlanabilir Hata Toleranslı Kontrol (AFTC) şema sayesinde arıza bilgisi ve belirsizlik sınırlar olmadan çözülmüştür. Cihaz, hem hatalı hem de belirsiz koşullarda genel sistem izleme performansını korumak için kullanılan uyarlanabilir kayan modlu kontrol cihazı ile yapılandırılmıştır.

Papadimitriou ve ark. [64] uçuş sırasında geometri morfolojisini değiştirme yeteneği olan dronlar için çevre girişlerinin geometrik şekline dayalı olarak bir dört rotorun morfolojisini değiştiren yeni bir Doğrusal Olmayan Model Tahminli Kontrol (NMPC) yapısı önerilmiştir. Önerilen yöntem, kısıtlı girişleri NMPC'de bir kısıtlama olarak kabul eder ve MAV'ın kol konfigürasyonunu, girişten geçerken başlangıç konumundan istenen hedefe çarpışmasız bir yol sağlayacak şekilde değiştirmektedir. Çoklu simülasyonlar yöntemin, bir dört rotorlu dar girişlerden geçme komutunun verildiği senaryolarda performansını ve verimliliğini ortaya koymuştur. Song ve Scaramuzza [65] politika arama ve model tahminli kontrol (MPC)ünü birlikte

kullanılarak elde edilebilecek olan optimum kontrolü araştırmışlardır. Spesifik olarak, MPC'yi, optimize edilmesi zor karar değişkenlerinin üst düzey politikalar olarak temsil edildiği parametrelili bir denetleyici olarak formüle edilmiştir. Deneyler, kontrolörün hem simülasyonda hem de gerçek dünyada sağlam ve gerçek zamanlı kontrol performansı elde ettiğini göstermiştir. Zhou ve ark. [66] tarafından, dönüştürülebilir kuyruk takılı Dikey Kalkış ve İniş (VTOL) dronunun pozisyonlarını kontrol etmek amacıyla gelişmiş Model Öngörülü Kontrolörler (MPC'ler) önerilmiştir. Ayrıca havada asılı kalma kontrolü için ardışık bir doğrusallaştırma MPC (SLMPC) denetleyicisi tasarlanmıştır. SLMPC denetleyicisi, istikrarlı ve tatmin edici bir performans elde edilinceye kadar döngü içi yazılım (SIL) koşulu altında test edilerek gerekli ayarlamalar yapılmıştır. Önerilen SLMPC kontrol yönteminin, geleneksel doğrusal MPC (LMPC) kontrol cihazıyla karşılaştırıldığında, düzgün olmayan rüzgarlı koşullar altında hassas ve kararlı bir şekilde konumun sabitlenmesini sağladığı tespit edilmiştir. Zahn ve ark. [67] tarafından bir böcek drone uçuş kontrolünün ters problemini çözmek için kombine bir MPC ve Derin Sinir Ağları (DNN) önerilmiştir. Seyrek bağlantılı DNN'lerin kullanımının istenilen yörüngeyi izlenmesini sağladığı tespit edilmiştir. Lee ve ark. [68] multirotorların manevra kabiliyetini artırmak için dört rotorlu araçlarda takviyeli öğrenme üzerinde çalışmışlardır. Bu doğrultuda güç verimliliğini hesaba katan bir sinir ağı modeli için yeni bir ödül fonksiyonu önerilmiştir. Bu amaca ulaşmak için Ödül Fonksiyonuna (NNM-RF) dayalı bir Sinir Ağı Modeli geliştirilmiştir. Önerilen Takviyeli Öğrenme tabanlı Yöntemi (RL-M), çoklu rotorların eğilmesinin karmaşık dinamiklerinin üstesinden gelerek sağlam bir kontrol edilebilirlik göstermiştir.

1.4.2. Hassas İniş Kontrol Tasarımı

İHA'larda bir uçuş sürecinde kalkış, yükselme, eksenler doğrultusunda hareket, alçalma ve iniş gibi çeşitli süreçleri içermektedir. Geliştirilmiş olan İHA otonom pilotlarının büyük çoğunluğunda otonom kalkış kabiliyeti mevcuttur. Ancak çeşitli dik mesafe ve konum gibi güvenilirlik sorunları ve riskler İHA'ların otonom iniş kabiliyetini sınırlandırmaktadır. Başarılı bir iniş operasyonu için rüzgar, arazi tipi, görüş alanı gibi pek çok faktörün değerlendirilmesi gerekmektedir.

İniş sürecinde iki temel işlem vardır. Bunlar; algılama ve kontrol olarak sınıflandırılmaktadır. Kamera aracılığıyla görüntü analizi yöntemi iki temel işlemi bir

arada yerine getirme kapasitesine sahiptir. Kamerayla elde edilen görüntü verilerinin kontrolöre iletilmesiyle İHA'nın yönelim ve pozisyonunun tahmini sıklıkla kullanılan bir algılama tekniğidir. Kontrol tekniklerinde ise PID, Fuzzy logic bulanık mantık ve LQR gibi farklı yöntemler kullanılmaktadır.

İHA'nın konum ve rotasyonunun belirlenmesi için sensörler/navigasyon sistemi kullanılmaktadır. Navigasyon sisteminden elde edilen veriler, istenilen yörünge için hız ve ivme gibi rehber hareket komutlarının üretilmesi için yönlendirme kontrolörüyle birleştirilmektedir. Son aşamada ise üretilmiş yönlendirme komutları uçuş kontrolörü tarafından İHA tipine uygun çalışma komutlarının uygulanmasından oluşmaktadır.

Hedef tespiti ve iniş proseslerinde kullanılan görüntü işleme yöntemi, Matlab, Opencv ve labview gibi programlar aracılığıyla yapılan görüntünün sayısallaştırılması ve bu doğrultuda nesnenin tanımlanmasına dayanmaktadır. Bu yöntem nesnenin lokasyonunun belirlenmesinde kullanışlı olmasına karşın, aracın kendi üzerindeki kuvvetleri algılamasını sağlayamadığı için geleneksel kontrol teknikleri entegre edilerek geliştirilmiştir [69].

Geliştirilen ilk teknikler görsel verilerden konumlandırma bilgisinin elde edilmesi üzerine yoğunlaşmıştır. Gelişen yeni tekniklerle görsel verilerin kullanıldığı yöntemlerin, basit renk takibinden, görüş tabanlı eş zamanlı konumlandırma ve haritalandırma yaklaşımlarının geliştirilmesine olanak sağlamıştır. Bu doğrultuda yapılan en önemli çalışmalardan biri Shakernia ve ark. [70]'ye aittir. Çalışmada algoritmanın farklı seviyelerde görüntü ölçüm gürültüsü ve iniş pistine göre kamera hareketleri altında bir performans değerlendirmesini sunulmuştur. Önerilen modelde diferansiyel düzlüğe dayalı olmayan kontrolörün kullanımı tartışılmıştır. Yöntemsel olarak mevcut kamera pozisyon tahmin algoritmaları, düzlemsel noktalarla çalışmak üzere genişletilmiştir. Saripalli ve ark. [71] ise geleneksel olarak birincil navigasyon sensörü olarak tercih edilen atalet ölçüm biriminin (IMU) yerine navigasyon sensörü olarak yalnızca Küresel Konumlandırma Sisteminin (GPS) kullanmışlardır. Ataletsel ölçümleri, sayısal entegrasyon, Kalman filtreleme algoritması ve düşük seviyeli araç kontrolü olarak basit PID kontrolü çalıştıran yerleşik bilgisayar tarafından gerçekleştirilmiştir. Tribou ve ark. [72] monoküler kamera ile donatılmış bir dört rotorun, mevcut dört rotor kontrol girişinin tümünü kullanarak bilinmeyen hareketli bir hedef nesneye göre dört Serbestlik Derecesi (DOF) göreceli yörüngesini

izleyebildiği bir Konum Tabanlı Görsel Servo (PBVS) kontrol şeması geliştirmişlerdir.

Ling [73], yaygın olarak kullanılan pahalı atalet ölçüm sensörleri ve RTK/diferansiyel GPS sistemlerine alternatif olarak, düşük maliyetli sensörlerin kullanımıyla hareketli hedefler üzerine hassas iniş gerçekleştirilmesi için yeni bir çerçeve önermiştir. Çalışmasında, dört rotorluda aşağıya bakan bir kameradan alınan görüntü, iniş platformunda yer alan hedefi izlemek ve pozisyon tahminleri oluşturmak için kullanılmıştır.

Shen ve ark. [74] GPS'in kullanımının yasak olduğu bölgelerde uygulanmak üzere lazer tabanlı otonom uçuş yaklaşımlarının geliştirilmesi gerektiğini belirtmiştir. Bu durum artırılmış hareket hesaplamalarını mümkün kılmak için kısmen yapısal bir ortam veya önemli bir yük kütlesi ekleyen mekanize kaydırma lazer tarayıcıları gerektirdiği belirtilmektedir. Shen vd. aynı çalışmada görme tabanlı yaklaşımların monoküler, stereo ve RGB-D kamera tabanlı olarak sınıflandırmıştır. Kullanılan yaklaşımlar tam 6-DOF durum tahmini sağlamasına rağmen hesaplama karmaşıklığı ve sınırlı yerleşik işleme kapasitesine sahiptirler. Bu doğrultuda öncelikle doğrusal hızı yakalayabilecek görüş-atalet (VINS) durum tahmincisi geliştirmişlerdir. Geliştirilen sistem sınırlı bir hesaplama yükü gerektirirken ölçekte bir sapmayı önlemek için monoküler ve stereo kamera alt sistemlerinden gelen bilgileri uyarlamalı olarak birleştirmektedir. VINS tahminci, doğrusal olmayan bir izleme kontrolörü ile entegre edilmiş ve aşırı açısal hızların neden olduğu görüntü titremesini en aza indiren pürüzsüz polinom yörüngeler oluşturarak denenmiştir.

Sani ve ark [75], GPS'in kullanımının yasak olduğu bölgelerde monoküler görüş sistemi kullanarak dronun doğru ve sürekli konum tahminine ve atalet ölçüm ünitesi ve ultrasonik sensör verilerinin birleşimine odaklanarak otomatik iniş sürecini incelemişlerdir. İniş alanı olarak ARUCO işaretçisi kullanmışlardır ve bilgiler Wi-Fi bağlantısı aracılığıyla işlenmiştir. Kapalı döngü kararsızlığının etkisini azaltmak için hareket dilimleme yöntemi kullanılmıştır. Benzer sıkıntıların aşılması için Briod ve ark. [76] de atalet ve optik akış sensörleriyle donatılmış, bir mikrodenetleyici üzerinde gerçek zamanlı olarak çalışan ve otonom uçuşa olanak tanıyan havada asılı duran robotlar için yeni bir ego-hareket tahmin algoritması geliştirmişlerdir. Atalet ve optik akış sensörleriyle donatılmış, bir mikrodenetleyici üzerinde gerçek zamanlı olarak çalışan ve otonom uçuşa olanak tanıyan havada asılı duran robotlar için yeni bir ego-

hareket tahmin algoritması kullanılmıştır. Wenzel ve ark. [77] sabit sensörler olmadan yerleşik mikrodenetleyici kullanmışlardır ve görüntü izleme yaklaşımları literatürde yer alan diğer çalışmalardan farklı olarak ticari tüketici donanımı kullanılmıştır.

Monoküler görüş sensörlerinin ölçek belirsizliği sorununu aşmak için kullanılan farklı yöntemler bulunmaktadır. Bunlardan en yaygın olarak kullanılan Corke ve ark. [78]'nin geliştirdiği eylemsiz EYH'dır(Eşzamanlı yerelleştirme ve haritalama). Kelly ve Sukhatme [79] (EYH örn) kamera ile bir eylemsiz ölçüm birimi (IMU) arasındaki dönüşümün kendi kendine kalibrasyonu için Kalman filtresini temel alan bir algoritmayı açıklamışlardır. Geliştirilen formülasyon, kameranın (IMU sistemi) gözlemlenebilirliğinin diferansiyel geometrik analizine dayanmaktadır. Yapılan analizler sensörden sensöre dönüşümün, IMU jiroskop ve ivmeölçer sapmalarının, yerel yerçekimi vektörünün ve metrik sahne yapısının yalnızca kamera ve IMU ölçümlerinden kurtarılabilceğini göstermektedir.

Jones ve Soatto [80] (EYH örn)ise, yeterli sayıda hareket dizisinin varlığında yerçekimi vektörü ve kamera koordinat çerçevesi ile IMU(Eylemsiz ölçü birimi) arasındaki durumun ve parametrelerin tahminini gerçekleştirmişlerdir. Martinelli [81]'de (EYH örn) çalışmasında kamera, üç ortogonal ivmeölçer ve üç ortogonal jiroskoptan oluşan bir sensör düzeneğini kullanarak çok kısa bir zaman aralığında toplanan görsel ve ataletsel ölçümler açısından yukarıda bahsedilen tüm gözlemlenebilir modları analitik olarak ifade eden kapalı form çözümlerinin analitik olarak türetilmesini sağlamıştır. Önerilen yaklaşım Monte Carlo simülasyonları ve gerçek deneylerle değerlendirilmiştir. Blösch ve ark. [82]'de EYH algoritmasını kullanarak çevredeki bölgenin haritasını oluşturmuşlardır. Oluşturulan harita üzerindeki poz tahminlerine dayanılarak, aracı istenilen ayar noktasında sabit tutarak kalkış, havada asılı kalma ve ayar noktası gibi manevralar PID tabanlı bir kontrol cihazı aracılığıyla sağlanmıştır.

EYH algoritmalarının nispeten yüksek işlem gücü ve bellek gerektirmektedir. Bu nedenle daha basit yaklaşım olan atalet verilerinin doğrudan çoklu kamera geometrisinin temel ilişkilerinden biri olan epipolar kısıtlamayla birleştirilmesi alternatif bir yöntem olarak geliştirilmiştir. İki farklı görüntüdeki özelliklerin konumunu kullanarak bu kısıtlamayı doğrudan uygulamak, yapının yeniden yapılandırılması ihtiyacını atlar ve dolayısıyla gereken işlem ve bellek miktarını önemli ölçüde azaltmaktadır [83]. Ayrıca, Diel ve ark. [84]'nin ve Mourikis ve

Roumeliotis [85]'in çalışmaları sürüklenmeyi en aza indirmek için birden çok kare ayrı ayrı izlenen özelliklerin ölçümlerini ilişkilendirilmesinin mümkün olduğunu göstermiştir. Ancak hareketin ölçeği epipolar kısıtlama güncellemeleri tarafından sağlanamaması ve göreceli ölçek korunamaması nedeniyle genellikle büyük tahmin hatalarına ortaya çıkmaktadır [86]. Weis ve ark. [87] bu sorunun aşılabilmesi için kameranın bir metrik sensör olarak kullanılabilmesi için, izlenen özelliklerin ortalama derinliğinin tahmin edilmesini önermektedir.

EYH ve epipolar yaklaşımlar özellik çıkarma ve eşleştirme algoritmaları için yeterince yüksek çözünürlüğe ve yeterli hesaplama gücüne sahip kameralar gerektiren özellik izlemeye dayanmaktadır. Broid ve ark. [88] optik akış çıkarımında bu yöntemlere alternatif olarak daha basit yöntem ve sensörlerin kullanıldığını belirtmektedirler. Optik akış çıkarımı yönteminde Lucas ve Kanade [89] piksel yoğunluğunun zaman içindeki değişiminden yararlanmıştır. Sirinivasan [90] ise desenlerin yer değiştirmesine odaklanmıştır. Floreano ve ark. [91]'nin çalışması bulanık dokular veya tekrarlayan desenler gibi tanımlanabilir özellikler sunmayan bir alanda ve hatta karanlıkta dahi kullanılabileceğini göstermiştir. Ayrıca optik akış yöntemi Zufferey ve Floreano [92] tarafından engellerden kaçınma ve Barrows ve ark. [93] tarafından hız düzenlemesi için kullanılmıştır. Optik akış yönteminde ölçek belirsizliği bulunmaktadır. Bu problemi çözmeye olanak tanıyan başarılı bir yöntem, optik akış sensörlerini sürekli olarak mutlak ölçek sağlayan mesafe sensörleriyle birleştirilmesidir. Örneğin Bristeau ve ark. [94] veya Honegger ve ark. [95] aşağıya bakan bir kamera ile birlikte bir ultrasonik mesafe sensörü kullanılmakta, bu da çok iyi bir hız tahmini ve dolayısıyla düşük konum sapması ile sonuçlanmaktadır. Broid ve ark. [96] de benzer bir şekilde konum tahmini sapmasını en aza indirmek için salınımların aktif olarak kontrol edilmesini önermektedirler.

İHA'nın iniş yapacağı alanın özellikleri kullanılacak yöntemler konusunda belirleyici nitelik taşımaktadır. Görünürlük ve mesafe gibi bozucu faktörlerin engellenerek hedefin belirlenmesinde kullanılan nesne algılama ve örüntü tanıma teknikleri görsel tabanlı iniş tekniklerinin temelini oluşturmaktadır.

Wenzel ve ark. [97] kızılötesi kamera kullanarak iniş bölgesini tespit etmişlerdir. İHA üzerine sabitlenen kamera aşağıya bakacak şekilde konumlandırılmıştır ve geliştirilen örüntü algoritmasıyla kızıl ötesi ışık kaynağının tespiti gerçekleştirilmiştir. Örüntü konumu piksel olarak hesaplanmış, ardından da cm

cinsinden konum verisine dönüştürülmüştür. Aracın hareketlerinin kontrolü için de çeşitli PID döngüleri kullanılmıştır.

Gui ve ark. [98] ise İHA üzerine Dijital Sinyal İşleme(DSP) işlemcisi entegre edilmiş görünür ışıklı bir kamera yerleştirmişlerdir. Ayrıca kamera merceğinin önüne 940 nm optik filtre sabitlenmiştir. Pistteki ideal iniş alanının arasına optik filtreyle aynı dalga boyuna sahip dört adet diyot(LED) lambalar yerleştirilmiş ve görüntü arka planı karmaşık olsa dahi iniş bölgesinde yer alan ışıkların konumu, iniş noktasının belirlenmesini sağlamıştır. Lamba bölgelerinin belirlenmesi için maksimum sınıflar arası varyans algoritması ve bölge büyütme algoritması; lambaların merkezlerini tespit etmek ve takip etmek için Gaussian Negatif Laplace (NLOG) operatörü uygulanmıştır.

Yang ve ark [99]'nin geliştirdikleri sistemde görüş ölçümü, IMU tarafından SRUKF(Square Root Unscented Kalman Filter) tabanlı sensör füzyon yöntemiyle gerçekleştirilmiştir. dört rotor yerleşik bilgi işlem platformu, kamera ile iniş işaretleyicisini gözlemlemekte ve iniş pistinin konumunu tahmin etmek için SRUKF kullanılmaktadır. Yapılan deneyler 1,5 kg üstü dört rotorlu hava aracı için hem X hem de Y eksenlerinde 5 cm'nin altında sapmaya sahip yüksek hassasiyetli bir sistem olduğunu göstermektedir.

Gautam ve ark. [100] GPS tabanlı inişten görüş tabanlı iniş tekniklerine kadar değişen iniş tekniklerinin bir incelemesini sunmaktadır; temel doğrusal olmayan kontrolden akıllı, hibrit ve sağlam kontrole kadar. İniş kontrol probleminin durumu ve kontrolör tasarımı hakkında geniş bir bakış açısı sağlanması amaçlanmaktadır. Makale, aracın tipi, problem tasarımında yapılan varsayımlar, kullanılan teknikler ve algoritmanın gerçek dünya koşullarındaki etkinliği gibi parametrelere dayalı bir karşılaştırma sunmuştur.

Gautam ve ark. [101] saf takip (pure pursuit) algoritmasını, kapalı döngü hız kontrolörü ile birlikte uygulamışlardır. Bu sayede İHA'nın hem simülasyonda hemde alanda yapılan deneylerinde zorlu durumlarda dahi hedefe tam iniş gerçekleşmesini sağlamışlardır. Patruno ve ark. [102] noktadan çizgiye uzaklık yöntemini temel alan bir yaklaşım geliştirmiştir. Monoküler kamera kullanımı ve H şeklinde işaretçi kullanılmıştır. Kontur bilgisinin analiz edilmesi sayesinde, karmaşık senaryolarda dahi hedefin tanınmasını sağlamışlardır. Önerilen yaklaşım, hedefin görüntü görüş alanından kaybolması gibi anormal durumları tespit edebildiği ve İHA'nın hassas bir

şekilde değerlendirilebildiği için İHA'ya kalkış ve hedefe iniş sırasında tam olarak yardımcı olmasına olanak sağlamıştır.

Zhang ve ark. [103] doğruluk ve sağlamlığı kaybetmeden işaretleyici tespit hızını artırmak için ROI (ilgi bölgesi- region of interest) tabanlı çekirdekleştirilmiş korelasyon filtresi (KCF- kernelized correlation filter) izleme stratejisi ve mevcut Apriltag2 algoritmasının birlikte entegre edildiği yeni, geliştirilmiş bir referans işaretleyici tespit-izleme algoritması kullanılmıştır. Durum tahminini elde etmek için göreceli poz ve IMU ölçümleri Genişletilmiş Kalman Filtresinde (EKF) birleştirilmiştir. Ayrıca planlanan hassas iniş görevinin gerçekleştirilmesi için doğrusal olmayan kademeli bir P-PID(Kaskad PID) denetleyici kullanılmıştır. Sun ve ark. [104] ise bulanık tanıma, Kalman Filtresi ve oransal integral kontrolör kullanılan otomatik iniş sistemi önermişlerdir. Hedefe yaklaşma sırasında uyarlamalı geri besleme (adaptive backstepping) tekniği kullanılmıştır. Dikey iniş için ise yükseklik-konum kontrolörü kullanılmıştır. Badakis ve ark. [105] de farklı arıza senaryolarında dahi İHA'nın görevine devam edebilmesi için özel görsel işaretleyicileri algılayan görüş tabanlı bir sensörü, kızılötesi işareti izleyen bir sensörle birleştirmişlerdir. Bunun için kızıl ötesi işaretçi ve ArUco işaretçi birlikte konumlandırılmıştır. İniş alanının tespiti için RG kamera, AÖB sensör, mesafe sensörü ve barometre kullanılmıştır.

Wang ve ark. [106] hassas iniş problemlerinin çözümüne ilişkin Aerostack yazılım çerçevesine dayanan görsel bir servo kontrol yöntemi önermektedir. Yöntem, gerçek zamanlı yerleşik kamera görüntüsünü girdi olarak alır ve yerdeki etiket özelliklerini çıkartılmasına dayanmaktadır. Ayrıca hız kontrol sinyallerinin elde edilmesi için otonom iniş görsel servo yasası daha sonra oluşturulmuştur. Gazebo simülasyon ortamında elde edilen sonuçlarda mesafe sapması 0,1 metreden ve sapma sapması 0,1 radyandan az olduğu gösterilmiştir. Li ve ark. [107] aynı problemin çözümü için AprilTags'in monoküler kameraya dayalı görsel konumlandırma algoritması ve PID kontrol algoritmasını birlikte kullanmışlardır. İHA inişinde kullanılan platform, İHA'nın farklı yüksekliklerde iyi konumlandırma doğruluğu elde edebilmesi için farklı boyutlarda etiketlerle etiketlenmiştir. Bu sayede dinamik izleme performansının artırılmasını sağlamışlardır.

1.4.3. Yük Taşıma Kontrol Tasarımı

Literatürde, farklı yüzeylerden yük alımına ilişkin çeşitli yöntemler geliştirilmiştir. En yaygın kullanılan yöntem İHA üzerine eklenen bir aparat aracılığıyla yük kavramasının sağlanması üzerinedir. Bu doğrultuda nesnenin /yükün doğrudan bir alet ile İHA'ya bağlanması veya çeşitli bağlanma mekanizmalarıyla yükün alınması üzerine çeşitli araştırmalar vardır. Nedungadi ve Saska [108]'nın çalışmasında drone ile yüzeye iniş gerçekleştirilmeden yük alımının gerçekleştirilmesi için çeşitli sensörlerin kombinasyonu ile birlikte elektromıknatısların kombine kullanımını içermektedir. Shijie ve ark. [109] ağırlık merkezi için yer değiştirme telafisi ile rotasyonel kavrama için 3DoF robotik kola sahip vizyona dayalı otonom bir sistem geliştirerek, drone üzerine robotik kol entegre etmişlerdir. Fiaz, Toumi, Shamma [110] pasif bir manyetik alıcı ve dürtü tabanlı bir düşürme mekanizması kullanarak demirli nesnelerin havadan kavranması için yeni bir yaklaşım geliştirmişlerdir. Yapılan tasarım ile tutucunun hem görsel hem de alma ve bırakma geri bildirimini tekli ve çoklu tutma pedleri kullanarak demirli nesnelere kavramasını sağlamışlardır. Geliştirilen tutucunun düzlemsel veya pürüzsüz bir yüzeyi olmayan nesnelere için kullanılma imkanı bulunmamaktadır.

Pounds ve Dollar [111] bir nesne ve / veya yer ile temas halinde olan uyumlu bir tutucuya sahip küçük bir helikopterin uçuş stabilitesini incelemek için bir elastik kısıtlı temas modeli geliştirmişlerdir. Mellinger ve ark. [112] tarafından geliştirilen modelde İHA tarafından alınacak olan yük üzerinde sabit olarak bulunan kancalar bulunmaktadır. İHA'nın yükü kavrayabilmesi için esnek kollarda bulunan klipslerin serbest bırakılarak İHA'nın kendi etrafında dört kez dönerek bağlantı noktası oluşturması sağlanmıştır. Yüzeyden ayrılmanın gerçekleştirilmesi için ise bir servo mekanizma ile İHA'nın dört düzlemsel mekanizmasının her birinde bir kilidi serbest bırakması sağlanmıştır.

Literatürde, İHA'lar için geliştirilen tutucu çalışmaları ayrıca iç ve dış mekan kullanımları açısından da araştırılmıştır. Pounds ve ark. [113], Ghadiok ve ark [114] ve Pounds ve ark. [115] dış mekanda kullanımı araştırmışlardır. Mellinger ve ark. [116] ise İHA'ların tutucu kullanımının iç mekanda kullanımını araştırmaktadır. İHA'nın kalkış ve serbest uçuş aşamalarında karşılaşılan zorluklar ise uçuş kontrolü ve stabilize sınırları açısından Pounds ve ark. [117], [118] tarafından incelenmiştir. Ayrıca, Nguyen ve Lee [119] tarafından da İHA'ya takılan sert bir alet için hibrit bir kuvvet /

hareket kontrol çerçevesi tasarlanmıştır. Benzer şekilde literatürün geneli de Bellens ve ark. [120] ve Mersha ve ark. [121] örneklerinde olduğu gibi çevre ile etkileşen sert bir araca sahip birçok cihazı dahil etme eğilimindedir. Farklı bir yöntem olarak kablolarla taşıma alternatifi geliştirilmiştir. İHA'ya bağlı bir kablo ile yerden yük kaldırma problemi Palunko ve Fierro [122], [123] tarafından incelenmiştir. Kablolu taşıma sistemlerinde yörünge optimizasyonu problemi ise Foehn ve ark.[124]'de ele alınmıştır. Kablolar ve / veya çubuklarla bir (hareketli) platforma bağlanan İHA'lar için gelişen benzer problemler de Sandino ve ark. [125], Tognon ve ark. [126] ve Tognon ve Franchi [127] tarafından incelenmiştir.

Bir nesneyi taşıyan çok sayıda İHA problemi ise Bernard ve ark. [128], Michael ve ark. [129], Fink ve ark [130] ve Sreenath ve Kumar [131] tarafından ele alınmıştır. Wang ve ark. [132] yaptığı çalışmada İHA'yı kargo taşımacılığı gerçekleştirmek üzere tasarlamıştır. İki hareketli platform arasında kargonun taşınmasını hedef almıştır. Gps ve ataletsel navigasyon sistemi (İNS) ile birlikte iki hareketli platform arasında gerekli konumu saptamıştır. Kornatowski ve ark. [133] yaptıkları çalışmada ise bir İHA'nın kargo taşımacılığındaki dış etkenlere karşı korunmasını hedef almışlardır. Dış etkenlere karşı korunmada origamiden ilham almışlardır. Origamiden yola çıkılarak İHA için elle katlanabilen kafes sistemi geliştirmişlerdir. Kargonun manuel olarak İHA'nın üstüne entegre edilmesini sağlamışlardır.

Çaşka ve ark. [134] gerçekleştirdikleri çalışmada dört rotorlu bir küçük İHA tasarımının sonlu elemanlar yöntemiyle statik analizini ve imalatını yapmışlardır. Statik analizde, dört rotorlunun kendi ağırlığını yük olarak kabul etmiş ve tabanı sabitlemişlerdir. Tasarlanan dört rotorlunun her bir parçası Poliaktik Asit (PLA) malzemesinden i3 Prusa yazıcı ile 0.05 mm katman kalınlığında üretmişlerdir. Literatürde İHA'ların iniş yapmalarını kolaylaştıran ve bataryalarının değiştirilmesini sağlayan mekanizmalarını öneren çeşitli sistemler mevcuttur. Yapılan çalışmalarda, mini taktik İHA'ların enerji kısıtlarına bir çözüm olarak tek bir İHA'nın bataryasının değiştirilmesi ya da şarj edilmesi üzerinde durulmuştur ve önerilen sistemlerin belli hava şartlarında pil değişimi ve pil şarj etme işlemlerini belli sürelerde başarıyla gerçekleştirdiği görülmüştür. İstihbarat, gözlem ve keşif türündeki çalışmalar izlenen bölgeye ait bilgilerin bir insan operatörüne uzaktan aktarılması üzerinedir.

Saska ve ark. [135], tarafından yapılan çalışmada bir adet dört rotorlu (quad-copter) İHA ve bir adet İKA'nın işbirliği ile bir gözlem faaliyeti yürütülmüştür.

İKA'nın önceden belirlenen noktaları gezmesi sağlanmış ve bu noktalardan görüntü alınmıştır. İHA ise İKA'nın ulaşamadığı noktaları havadan gözetlemek için kullanılmıştır. Yapılan çalışmada İHA'nın İKA üzerine otonom olarak iniş yapması sağlanmıştır. Bu çalışma kapsamında İHA'nın enerji kısıtları dikkate alınmamıştır.

Cantelli ve ark. [136], bir İHA'nın kamerasından alınan görüntü yardımıyla bir İKA'yı takip etmesini sağlamıştır. Bu çalışmada İKA sınırlı bir hızda hareket ettirilmiş ve İHA kamerasının görüntü alanında kalması sağlanmıştır. Bu çalışma, belli bir bölgede bir kara aracının hareket edebileceği noktaların ve güzergahların İHA yardımıyla elde edilmesi amacıyla gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışmada, İKA belirlenen güzergahta ilerlerken İHA'nın İKA'yı takip etmesi sağlanmıştır. Giakoumidis ve ark. [137], yapay bir şehir prototipinin bir İHA yardımıyla havadan gözlenmesi sağlanmıştır. İHA'nın üzerindeki kamera yardımıyla deney ortamı olarak hazırlanan bir şehir maketinin sokaklarının tespit edilmesine yarayan bir algoritma ile sistem desteklenmiştir. Sokakları tespit edildikten sonra bir en kısa yol algoritması yardımıyla İKA için şehrin herhangi iki noktası arasındaki en kısa yol bulunmuştur. Yapılan çalışmada İKA yapay şehrin sokaklarında gözlem faaliyetini yürütürken aynı zamanda İHA için de bir taşıma ve şarj istasyonu olarak kullanılmıştır. İHA'nın enerji kısıtları ise dikkate alınmamıştır.

1.5. PID Kontrolcüsü

Literatürde en sık kullanılan kontrol yöntemi [138] ve bu çalışmanın da konusu olan PID'dir. Yapısının basitliği ve kolay uygulanabilirliğinden dolayı özellikle endüstriyel alanda sıklıkla tercih edilmektedir [139]. PID kontrolörleri üzerine yapılan araştırmalar, proses endüstrilerinin yaklaşık yüzde doksanın (%90) kontrolör olarak PID kullandığını göstermektedir [140]. Bu popülerlik, sağlamlıklarının, basitliklerinin ve kontrol parametrelerini yeniden ayarlama kolaylığının bir sonucudur [141]. PID kontrolörü, temel süreç bilgisinin yokluğunda geleneksel olarak en iyi kontrolör olarak kabul edilmiştir [142].

Kontrolör değişkenleri, kapalı döngü kontrol sistemini stabilize etmek ve kararlılık, dayanıklılık, performans takibi, performans ölçümü, gürültü azaltma, bozulma reddi ve çevresel belirsizliklere karşı sağlamlık ile ilgili hedeflere ulaşmak için ayarlanır. PID uygulama ve teorik çalışmalarda yaygın olarak kullanılan geri

beslemeli bir kontrol yöntemidir. Temel çalışma prensibi amaçlanan sistem durumu ile mevcut sistem durumu arasındaki farkın hesaplanmasıdır. Denetleyici devamlı hesaplama yaparak hatayı en aza indirmeye çalışır. Bu hesaplama mevcut hataya bağlı oransal(P), geçmiş hataların toplamını ifade eden integral(I) ve gelecekteki hataların tahminini veren türev(D) değerlerinin kontrolü ile sağlanmaktadır. Bu üç değer ağırlıklı toplama yöntemiyle kontrol edilmesi, istenilen değerleri ayarlamak için kullanılmaktadır.

Johnson ve Moradi [143] PID ayarlama stratejilerini bir proses modelinin mevcudiyetine ve model tipine göre sınıflandırmıştır. Bu sınıflandırmalar dört (4) alt grupta toplanmıştır:

i. Model içermeyen yöntemler: Bu yöntemlerde, tanımlanmış bir model veya sürecin belirli noktaları yoktur. Bu nedenle, önemli model noktalarını veya parametrik modeli açık bir şekilde tanımlamazlar.

ii. Parametrik olmayan model yöntemleri: Bu yöntemler normalde sadece kısmi modelleme bilgisi, kararlı durum gösterimi ve kritik frekans konumları kullanır. Bu teknikler en çok çevrimiçi uygulama için uygundur. Genellikle kapsamlı bir önsel tesis bilgisine ihtiyaç duymadan kullanılırlar.

iii. Derinlemesine veri yöntemleri: Bu teknikler parametrik ve parametrik olmayan stratejilerin ortasında yer alır. Alt uzay stratejisinde veya bulanık mantık sistemlerindeki gri bilgide kullanıldığı gibi ayarlama için süreç verilerini kullanırlar.

iv. Parametrik model yöntemleri: Bu yöntemler model verilerinin mevcut olmasını gerektirir ve standart çevrimdışı veya çevrimiçi tanımlama süreci kullanılarak elde edilebilir. Sistemin doğrusal bir modeline ve transfer fonksiyonu matrisine/uzay modeline ihtiyaç duyarlar. Bu teknikler çevrimdışı PID ayarlama için daha uygundur. Parametrik stratejiler Optimal Olmayan Parametrik, optimal (Kısıtlı Yapı kontrolü) ve optimal (kontrol sinyali eşleştirme) Yöntemler olarak sınıflandırılabilir.

Borase ve ark. [144] PID kontrolcülerinin yapısını paralel ve seri olarak sınıflandırmıştır. Paralel tip formunda Oransal P, integral I veya türev D eylemi ayrı denklem terimlerinde gerçekleşir ve bunların birleşik etkisi ile toplam üretilir. Bu tipte her parametre diğerlerinden bağımsızdır ve ilgili kontrol kanunu şu şekilde gösterilir:

$$u(t) = K_c(e(t) + \frac{1}{T_i} \int e(t)dt + T_d \frac{de(t)}{dt})$$

Denklem 1.1. Paralel Tip PID Kontrol Denklemi

Oransal kazanç $K_p = K_c$, integral zamanı T_i ve $k_i = K_c / T_i$, türev zamanı T_d ve $k_d = K_c T_d$ 'dir. Bu aynı zamanda ideal gösterim olarak da bilinir.

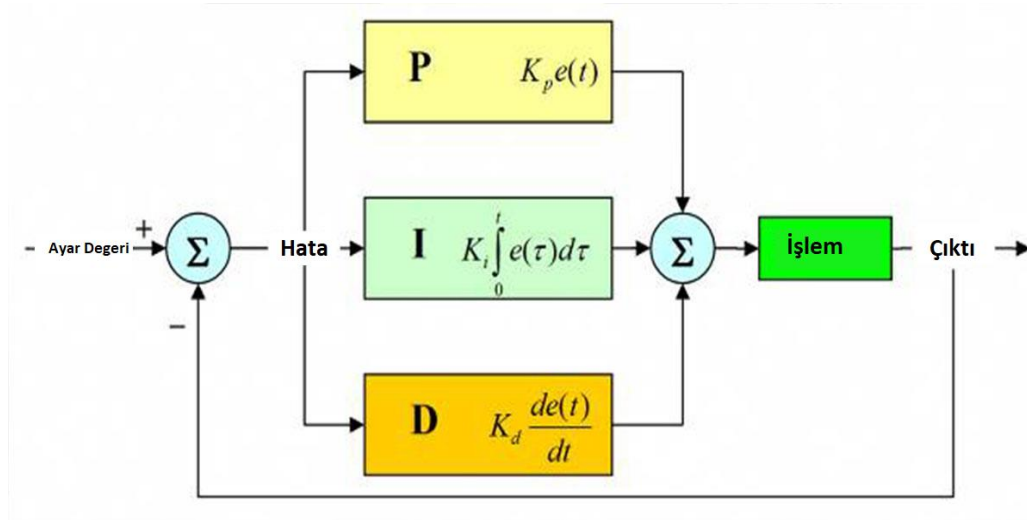
Seri Tip formunda ideal bir PID denkleminde olduğu gibi, K_c 'deki değişim üç eylemi de etkiler, ancak hem türev hem de integral sabitleri oransal eylem üzerinde etkiye sahiptir. Bu tip aşağıdaki kontrol yasasına sahiptir:

$$e_1(t) = e(t) + T_d \frac{de(t)}{dt}$$

$$u(t) = K_c(e(t) + \frac{1}{T_i} \int e(t)dt)$$

Denklem 1.2. Seri Tip PID Kontrol Denklemi

Burada, K_c kazancı PID yapısının her üç bölümünü de etkiler. Öte yandan, integral ve türev ayarlama parametreleri T_d ve T_i 'nin değerleri de oransal terimi etkiler. Bu nedenle T_d 'nin değiştirilmesi D ve P eylemlerini, T_i 'nin değiştirilmesi hem I hem de P eylemlerini ve K_c 'nin değiştirilmesi ise her üç eylemi etkileme eğilimindedir.



Şekil 1.2. Paralel tip PID Kontrol Şeması

Literatürde PID kontrolörlerinin ayarlanması için çeşitli metodolojiler geliştirilmiştir. Joseph ve ark. [145] PID kontrol metotlarını klasik yöntemler, frekans cevabı yöntemleri, analitik yöntemler, uyarlanabilir ayar yöntemleri, modelsiz yöntemler, parametrik olmayan yöntemler, parametrik yöntemler, veri yoğun yöntemler ve optimizasyon/bilgisayarlı teknikler olarak sınıflandırmışlardır. Bir diğer sınıflandırma ise klasik yöntemler, akıllı yöntemler ve MS yöntemler olarak geliştirilebilir.

Karmaşık sistemler ve kontrol tasarımcılarının performans ihtiyaçları günümüzde akıllı yöntemler olarak tanımlanabilen kontrol ayarlama tekniklerinin gelişmesini sağlamıştır. İlk dönemler klasik ayarlama yöntemleri yalnızca Birinci Derece Artı Ölü Zaman (FOPDT) ve ikinci derece artı ölü zaman (SOPDT) modellerine uygulanabilmiştir. 1988 yılında ise Fong-Chwee ve ark. [146] kutup atama tekniği ile kendi kendini ayarlayan PID kontrolörlerini tanıtmışlardır. Bu çalışmada, farklı doğalara sahip ölü zaman süreçleri üzerinde daha iyi kontrol sağlayabilen üç tip kendinden ayarlı PID kontrolör tartışılmıştır. Benzer şekilde, A. Besharati Rad ve ark. [147]'de yeni bir kendi kendini ayarlama yöntemi (Otomatik ayarlama için ZN tekniğine bir seçenek) önermişlerdir Bu ayarlama yöntemi daha hızlıdır ve otomatik ayarlama modu olmayan PID denetleyicilerini ayarlamak için kullanılmaktadır. Ayrıca, A. Besharati ve arkadaşları, kolay bulunan ve karakteristik denklemin karmaşık kök çözme prosedürlerini ortadan kaldıran bir Newton-Raphson arama yöntemi önermiştir.

Brian Porter ve AH Jones [148]'de dijital PID kontrolörlerini ayarlamının alternatif bir yolu olarak genetik algoritma tekniklerini önermişlerdir. Bu genetik algoritma oldukça caziptir, çünkü yüksek etkileşimli dinamiklere sahip karmaşık çok değişkenli tesisler için dijital PID kontrolörleri için bile aynı temel yaklaşım kolayca kullanılabilir. Ayrıca, J. C. Shen [149]'te genetik algoritmaya dayalı yeni bir ayarlama yöntemi ve performans değerlendirme formülü önermiştir. Ruano ve ark. [150]'da PID otomatik ayarlama için sinir ağlarına girdi olarak adım yanıtının integral ölçümlerinin kullanılmasıyla gerekli PID parametre değerlerini belirleyen bağlantıcı bir yaklaşım önermişlerdir.

Yirminci yüzyılın başında G. Mann [151]'te, Visioli ve Antonio [152]'da sırasıyla zaman alanı tabanlı tasarım analizi ve bulanık mantık ayarlama kuralları gibi yeni PID ayarlama kuralları önermişlerdir. Haung ve ark. [153] tarafından PID

kontrolörlerinin on-line ayarlanması ile SISO sistemine uygulanabilir bir adaptif kontrol şeması önerilmiştir. Önerilen kontrol yapısında [154] iki adaptif döngü dikkate alınmıştır. Sistemin sağlam kararlılığını garanti etmek için ilk döngü, nominal tasarım performansına karşı bahis oynamadan kontrolörü on-line olarak değerlendirir ve ayarlar. İkinci döngü, modelleme hataları oluştuğunda periyodik çevrimiçi algılama gerçekleştirir ve denetleyiciyi yeniden ayarlar. Bundan sonra, sistem doğrudan etkili kontrol performansı sağlamak için yeni yapılandırılmış bir sistem olarak ele alınmıştır.

Yukarıda gelişimi kısaca ele alınmış olan bu teknikler, PID parametrelerini ayarlamak için veri modelleme ve bir maliyet fonksiyonu stratejilerinin optimizasyonunun kullanılmasını içerir. Bu kontrolör parametreleri yöntemleri, minimize etmeye çalıştıkları bir maliyet fonksiyonuna bağlıdır. PID kontrolör parametrelerinin ayarlanması için genel olarak kullanılan altı (6) maliyet fonksiyonu vardır. Yaygın olarak kullanılan bu maliyet fonksiyonları şunlardır:

$$IMH = \int_0^r |e(t)|$$

Denklem 1.3. İntegral mutlak hatası

$$IKH = \int_0^r |e(t)|^2$$

Denklem 1.4. İntegral kare hatası

$$IZMH = \int_0^r t|e(t)|$$

Denklem 1.5. İntegral zaman mutlak hatası

$$OKH = \frac{\int_0^r e(t)^2}{t}$$

Denklem 1.6. Ortalama kare hatası

$$IH = \int_0^r e(t)$$

Denklem 1.7. İntegral Hatası

1.5.1. PID Parametre Ayarlanmasında Kullanılan MS Yöntemler

Makul bir süre içinde optimuma yakın çözümler sunan MS algoritmalar, geniş ve karmaşık sorunların çözümündeki etkinliği ve verimliliği sayesinde son yıllarda

popülerlik kazanmıştır. Genel olarak yerel ve küresel arama algoritmalarının karışımını kullanan MS algoritmalarında sonuçlar rastgeleleştirme yoluyla elde edilmektedir. Tanım olarak üzerinde mutabakata varılamamış olsa da mevcut gelişmeler doğrultusunda, rastgeleleştirme ve küresel keşif kullanan tüm stokastik algoritmalar metasezgisel olarak kabul edilmektedir [155]. MS algoritmalar rastgeleliği yerel arama ile dengelemeye çalışmaktadır [156].

Metasezgisel algoritmalar dört ana faktörden dolayı optimizasyon problemlerinin çözümünde diğer yöntemlere göre daha fazla önerilmiştir [157]. Birincisi, MS algoritmalar, doğadaki basit kavramlardan esinlenerek bunların uygulanmasını kolaylaştırmaktadır. Basitlik, bilgisayar bilimcilerinin MS yöntemleri geliştirmelerine veya melezleştirmelerine ve bir sürü sorunu hızlı bir şekilde çözmelerine yardımcı olur. Bu algoritmaların öğrenilmesini de kolaylaştırır. İkincisi, bu algoritmaların esnekliği, algoritmanın yapısını değiştirmeden çeşitli optimizasyon problemlerinin çözümünde onları faydalı kılmıştır. Üçüncüsü, çoğu MS yöntem türetme gerektirmez çünkü bu algoritmalar optimizasyon problemine rastgele çözümler üretmeye başlar. Bu nedenle optimal çözümü bulmak için arama uzayı türevini hesaplamamıza gerek yoktur. Son olarak, MS algoritmalar geleneksel yöntemlere kıyasla yerel optimaliteden kaçmaktadır [158].

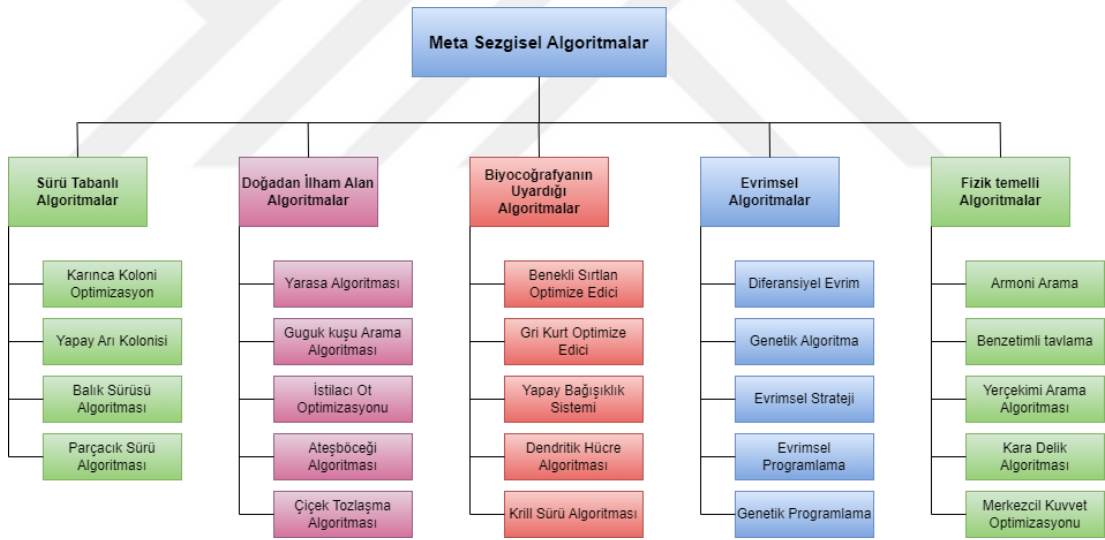
MS algoritmalar ağırlıklı olarak hayvanların/böceklerin, insanların, evrim teorilerinin ve doğa olaylarının farklı biçimlerinden esinlenilerek oluşturulmaktadır [159]. Algoritmanın seçilen özelliklerine veya ayırt edici farklılıklarına bağlı olarak çeşitli şekillerde kategorize edilmektedir. Yapılan sınıflandırmalar aynı zamanda araştırmanın hedef veya amaçlarına bağlı olarak da gerçekleştirilmektedir. Blum ve Roli [160] bu sınıflandırmayı doğadan esinlenen ve esinlenmeyen şeklinde yapmıştır. Mirjalili ve Lewis [161] ise insan tabanlı, sürü tabanlı, fizik tabanlı ve evrimsel algoritmalar olarak sınıflandırmıştır. Beheshti ve Shamsuddin [162] ise doğadan ilham alan ve doğadan ilham almayan, popülasyon tabanlı, tek nokta arama, dinamik ve statik amaç fonksiyonu, çeşitli mahalle yapılarına karşı tek mahalle ve hafızasız yöntemlere karşı hafıza kullanımı şeklinde bir sınıflandırma yapmışlardır.

Shaheen ve ark. [163] ise sürü temelli, evrim temelli ve hibrit algoritmalar olarak üçlü bir sınıflandırma yapmışlardır. Hussien ve ark. [164] görece daha detaylı bir sınıflandırma yapmışlardır. Bu doğrultuda MS algoritmalar insan temelli, fiziksel

temelli, kimya temelli, matematik temelli, evrimsel, müzik temelli, spor temelli, bitki temelli ve sürü temelli olarak sınıflandırma geliştirilmiştir.

En geniş ve kapsamlı sınıflandırmalardan biri Joseph ve ark. [165] tarafından geliştirilmiştir. Aynı zamanda literatür özetinin de çıkarıldığı çalışmada operasyonel prosedüre dayalı MS algoritmalar stokastik temelli, böcek temelli, bakteri temelli, kuş temelli, amfibi temelli, vahşi hayvan temelli, fizik temelli, evrimsel temelli ve sinir ağı temelli olarak sınıflandırma gerçekleştirilmiştir. Rastgele arama, uyarlanabilir rastgele arama, stokastik tepe tırmanışı, yinelenen yerel arama, rehberli yerel arama, değişken komşu araması, tabu araması, dağılım araması ve reaktif arama algoritmaları stokastik temelli algoritmalar olarak sınıflandırılmıştır.

Jackson ve ark. [166] ise MS algoritmaları tek çözümlü ve çok çözümlü problemler olarak sınıflandırmışlardır. Kumar ve Bawa [167] ise sürü temelli, doğadan ilham alan, evrimsel, fizik temelli ve biyocoğrafik şeklinde bir sınıflandırma yapmışlardır.



Şekil 1.3. Meta-Sezgisel Algoritmaların Sınıflandırması [168]

1.6. İHA'larda Optimizasyon

Klasik ve analitik PID ayarlama teknikleri sıklıkla kullanılmasına rağmen zaman zaman performanslar istenilen seviyeye ulaşmamaktadır [169]. Klasik olarak tanımlanabilecek yöntemlerin eksikliklerine karşın, kontrolörleri ayarlamak için bir optimizasyon yaklaşımı kullanılması ile mümkün olduğunca hızlı yanıtlara ulaşılması ve hatta bu kararlı durum rejiminde sifıra yakın hata elde edilmesi mümkündür [169].

Amaç fonksiyonlarına ulaşılmasını, daha yakın sonuç elde edilmesini sağlayan yaklaşımlar optimizasyon yöntemleri olarak adlandırılmaktadır [172]. Bu doğrultuda çalışmanın sıradaki kısmında öncelikle optimizasyon kavramı, İHA’larda optimizasyona yönelik genel yaklaşımlar ve bu çalışmanın konusu olması sebebiyle İHA’larda kontrol optimizasyonu incelenmiştir.

İHA’lar veri işleme ve problem çözme konularında önemli rol oynamaktadır. Planlanan işlevlerin yerine getirilmesi için optimizasyon, özerklik ve yol planlama için çeşitli algoritmalar kullanılmaktadır. Örneğin görüntü bozulmasını azaltmak için geometrik bir düzenleme algoritması, uzaktan algılama veya kameradan gelen görüntülerin işlenmesi için görüntü işleme algoritmaları kullanılabilir.

İHA'ların uçuş optimizasyonunun sağlanması, planlanan görevlerin yerine getirilmesi için kritik bir öneme sahiptir. En basit haliyle optimizasyon, mevcut sınırlı kaynakların en iyi şekilde kullanılması olarak tanımlanabilir. Belirli hedeflere (maliyet azaltma, kar maksimizasyonu, kapasite kullanımı ve verimlilik maksimizasyonu) ulaşmak için bir programda mevcut kaynakların (işgücü, zaman, sermaye, süreçler, hammaddeler, kapasite, ekipman) mümkün olan en verimli şekilde kullanımını belirleyen bir teknolojidir. Modelleme ve analiz, optimizasyonun iki ana bileşeni olarak kabul edilir. Modelleme gerçek hayat problemlerinin matematiksel bir ifadesi iken, analiz bu modeli sağlayan en iyi çözümü bulmayı amaçlar.

Optimizasyon modelleri, sistemin işleyişini ve özelliklerini yansıtan, sistem içindeki ve çevresindeki diğer sistemlerle etkileşimini de içeren matematiksel ifadelerdir. Optimizasyonun çalışma mantığı şu şekildedir:

$$\text{Max } z = f(x,y)$$

$$k.s.g(x,y)=0$$

$$h(x,y) \leq 0$$

$$x \in \mathbb{R}^n$$

$$x \in \{0,1,2,\dots,m\}$$

Denklemler 1.8. Optimizasyon Denklemi Örneği

Yukarıda verilen edilen $z = f(x, y)$ ifadesi amaç fonksiyonunu, x ve y karar değişkenlerini, n ise uzay boyutunu ifade etmektedir. Optimizasyon problemlerinde $z = f(x, y)$ fonksiyonunu maksimize edecek x ve y değerlerinin bulunması amaçlanır. Sistem özellikleri ise $g(x, y)$ ve $h(x, y)$ kısıtları ile belirlenir [171].

Optimizasyon problemlerinin sınıflandırılması, hedef fonksiyonun matematiksel özelliklerine, kontrol değerşkenlerine, arama yöntemine ve kısıtlarına dayanmaktadır. Bu doğrultuda çeşitli optimizasyon yaklaşımları mevcuttur. Aşağıdaki tabloda yukarıda ifade edilen parametreler çerçevesinde geliştirilmiş olan yaklaşımlar ve bu yaklaşımların kapsamaları yer almaktadır.

Tablo 1.3. Optimizasyon Problemlerinin Sınıflandırılması [172]

Optimizasyon Çeşidi	Optimizasyonun işleyişı
Deneme-yanılma optimizasyonu	Çok fazla bilgi olmadan verileri etkileyen parametrelerin ayarlanmasıdır. Deneysel çalışma ve keşif yapılmasını sağlayan yöntemdir. Bu yöntemin tam tersi ise sürecin matematiksel formülle tanımlandığı fonksiyonel yaklaşımdır.
Tek ve çok parametrelili optimizasyon	Optimizasyonda yer alan parametre sayısına göre sınıflandırma yapılır.
Statik ve Dinamik Optimizasyon	Statik optimizasyon zamandan bağımsızdır; dinamik optimizasyon ise zamana bağılı olarak veri sağlar.
Sürekli ve ayrık parametre optimizasyonu	Sürekli parametreler sonsuz sayıda değer alabilirken, ayrık parametreler sınırlı sayıda değer alabilir. Örneğin liste halinde verilen görevler birbirinden bağımsız olduğu için ayrık parametrelili optimizasyon sınıfındadır. Sürekli optimizasyon, bir fonksiyonun en yüksek veya en düşük değerini bulmaktır.
Sınırlı ve sınırsız Optimizasyon	Sınırlı optimizasyon, amaç fonksiyonuna kısıtlamaları tanımlayan denklemler ve eşitsizlikler ekler. Sınırsız optimizasyon yönteminde parametreler herhangi bir değer alabilir. Sınır parametreleri, parametrelerin sınırları kaldırılarak sınırsız parametrelere dönüştürülebilir.
Rastgele ve minimum arama algoritmaları	Parametrenin başlangıç değerini ayarlayarak uygun değerini minimuma yaklaştırmaya çalışılması.

İHA'ların kullanım amacına bağlı olarak farklı şekil ve özelliklerde üretilmektedirler. Bu durum farklı optimizasyon sorunlarının ortaya çıkmasına neden olmuştur. Ortaya çıkan sorunların çözümüne yönelik yol, topoloji, enerji ve hız, tasarım ve kontrol gibi çeşitli alanlarda çalışmalar yapılmaktadır.

Leon ve ark. [173] İHA gövdelerinin geliştirilmesi sorununu ele almışlardır. Bu doğrultuda optimum çözümü sağlaması için mekanik-yapısal tasarım analizi yapılmıştır. Uygulanan yapısal optimizasyon süreci, topolojik optimizasyon yoluyla geometri seçimini, sonlu elemanlar yöntemiyle malzeme seçimini ve bir İHA'nın ana yapılarıyla ilgili süreçlerin incelenmesini içermektedir. Çalışmada İHA gövdesinin malzeme seçim süreci, yapısal optimizasyon süreci sırasında fonksiyon, hedefler, kısıtlamalar, serbest değişkenler ve diğer hususlar dikkate alınarak CES Edupack veritabanı aracılığıyla gerçekleştirildi. İHA gövdesinin yapısal-mekanik optimizasyonu, SolidWorks topoloji optimizasyon yöntemi aracılığıyla üretken bir tasarım algoritması kullanılarak gerçekleştirildi. Ayrıca İHA gövdesinin taşıma kapasitesinin analitik olarak tahmini gerçekleştirilmiştir.

Yap ve ark. [174] topoloji optimizasyonu ve 3D baskı teknolojisinin İHA'lar üzerinde kullanımını araştırmışlardır. Seçici Lazer Sinterleme(SLS) kullanılarak Naylon 12(PA12) malzemeler öncelikle mekanik ve ultrasonik araçlarla karakterize edilmiştir. Ortaya çıkan tasarımın özellikleri, 3 noktalı ve 4 noktalı bükme testlerinin mekanik tepkisine karşılık gelen sonlu elemanlar simülasyonu yoluyla doğrulanmıştır. İkinci aşamada Z-bölünmüş yapılandırılmış hafif bir bir mikro dört rotorlunun optimize edilmiş yapısını üretmek için topoloji optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Optimize edilmiş olan tasarım 3D olarak bastırılmış ve optimize edilmiş sonlu elemanlar simülasyon tabanlı tasarıma göre doğrulama için yük testleri gerçekleştirilmiştir. Çalışma sonucunda sayısal ve deneysel veriler arasında elde edilen yakın korelasyon uygulanan yöntemin hızlı prototiplendirme için güvenilir olduğunu ortaya koymaktadır.

Magnussen ve ark. [175] çok rotorlu bir İHA'nın düşük maliyetle ve kullanıma hazır standart RC hobi parçalarıyla yaptıkları tasarım optimizasyonu üzerine çalışmışlardır. Çalışmada problem belirli bir donanımla sınırlandırılarak, donanımın bulunabilirliği ve tasarımın uygulanması sağlanmıştır. Veri kümesinden seçim yapılırken, kullanılan denklemlerin doğrusal kalması sağlanmıştır. Problem, karma katsayılı doğrusal program(MILP) olarak tanımlanmıştır ve Cplex çözücü

kullanılmıştır. Çalışmada 4,6 ve 8 rotor için karşılaştırma yapılmıştır ve amaç fonksiyonu en düşük değere sahip olan tasarımın optimal tasarım olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Çalışmada, İHA tasarımının belirli bir donanım ve yük seti için optimize edilmesinin, yalnızca en büyük pervane, motor veya pilin kullanımından 11 dakika daha uzun uçuş süresi elde edildiğini gösterilmiştir.

Cheng ve ark. [176] İHA'larda yörünge optimizasyonu üzerine çalışmışlardır. Hücresel veri aktarımında tüm mobil kullanıcıların hız gereksinimlerinin karşılanmasının yanında kenar kullanıcılarının toplam oranının en üst seviyeye çıkarılması için optimizasyon kullanılmıştır. Bu doğrultuda, konveks olmayan bu problemin çözümü için öncelikle iki konveks alt probleme dönüşüm gerçekleştirilerek yeni bir algoritma geliştirilmiştir.

Xu ve ark. [177] hem yörünge hem de enerji optimizasyon sorunlarını bir arada incelemiştir. Bunun için İHA'ya monte edilmiş bir mobil enerji vericisinin, yerdeki bilinen konumlardaki bir dizi enerji alıcısına (ER'ler) kablosuz enerji iletmek üzere gönderildiği, yeni bir insansız hava aracı (İHA) özellikli kablosuz güç aktarım sistemi üzerinde çalışılmıştır. Sonlu bir şarj süresi boyunca tüm ER'lere aktarılan enerji miktarını en üst düzeye çıkarmak için İHA'nın yörünge tasarımı yoluyla hareketliliğini en iyi şekilde nasıl kullanması gerektiği araştırılmıştır. İlk olarak dış bükey bir problem olan İHA'nın yörüngesini maksimum hız sınırlamasına göre optimize ederek tüm ER'ler tarafından alınan toplam enerjinin maksimuma çıkarılması ele alınmıştır. Bu problem çerçevesinde İHA'nın tüm şarj süresi boyunca tek bir sabit konumda durması gerektiğini gösteren optimal çözüme ulaşılmıştır. İHA'nın optimal havada asılı kalma konumuna olan mesafelerine göre önemli ölçüde değiştiği bir "yakın-uzak" adalet sorununun çözümü için öncelikle İHA'nın maksimum hız kısıtını göz ardı ederek ideal bir durumu ele alınmış ve gevşetilmiş problemin Lagrange ikili yöntemiyle en iyi şekilde çözülebileceğini gösterilmiştir. Elde edilen yörünge çözümü, İHA'nın, aralarında optimal havada kalma süresi tahsisi bulunan bir dizi sabit konum üzerinde durması gerektiği sonucunu göstermiştir. Sonraki aşamada, İHA'nın maksimum hız kısıtının dikkate alındığı genel durum için, ideal durumda optimal yörünge tarafından motive edilen yeni bir ardışık havada dur ve uç yörüngesi önerilmiş ve ardışık dışbükey programlama optimizasyon tekniğini uygulanarak verimli yörünge tasarımları elde edilmiştir.

İHA'ların optimizasyonu konularında sıklıkla karşılaşılan bir diğer problem ise yönlendirmedir. Chowdury ve ark. [178] bu sorunu afetten etkilenen bölgelerde kullanılan İHA'lar kapsamında ele almışlardır. Bu doğrultuda Heterojen Sabit Filo Drone Yönlendirme problemi (HFFDRP) için, bir dizi drone yörüngesine özgü faktörü dikkate alarak afetten etkilenen bir bölgenin afet sonrası inceleme maliyetini en aza indiren bir karma tamsayılı doğrusal programlama modeli önermişlerdir. Çalışmada geliştirilen optimizasyon modeliyle, Büyük Mahalle Arama (ALNS) algoritması ve Değiştirilmiş Geri İzleme Uyarlanabilir Eşik Kabul Etme (MBATA) algoritması olmak üzere iki sezgisel algoritma önerilmiştir.

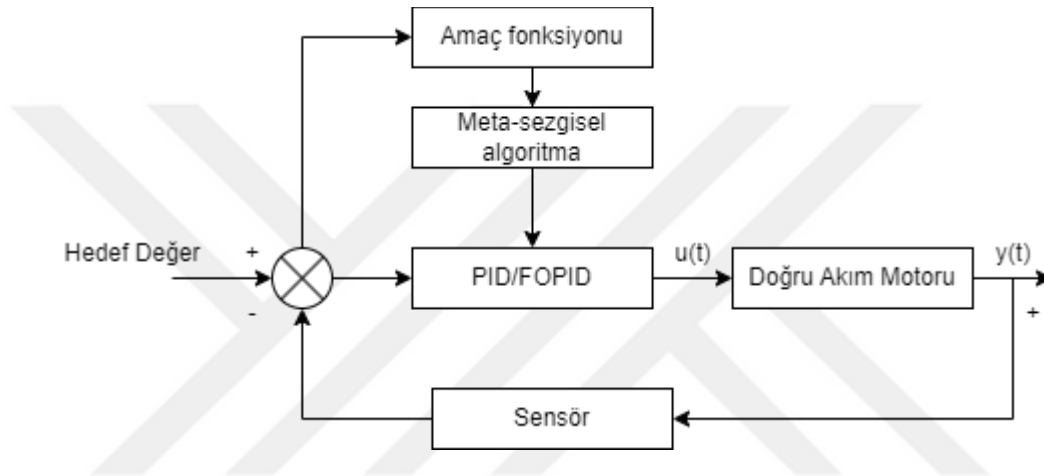
Bu tez çalışmasının konusu olması nedeniyle kontrol optimizasyonu sorununun incelesi daha geniş kapsamlı gerçekleştirilmiştir.

1.7 İHA'larda Kontrol Optimizasyonu ve MS Algoritmalar

Kontrolörlerin ayarlanması için optimizasyon yöntemlerinin kullanımı sayesinde çeşitli kazanımlar elde edilebilmektedir. Optimizasyonun sağlanması için kullanılan algoritmalar sezgisel algoritmalar olarak adlandırılmaktadır. Güncel literatür de sezgisel algoritma tabanlı optimizasyon stratejilerinin çeşitli kontrol mühendisliği zorluklarının çözülmesi için güçlü bir araç olarak ortaya çıktığını göstermektedir [179]. Geliştirilen algoritmaların mükemmel sonuçlara ulaşmasalar dahi kabul edilebilir sonuçlar elde ettikleri ifade edilebilir.

Farklı çözümler arasında en iyi sonucu veren çözümün bulunması olarak ifade edilebilen optimizasyon sürecinde kullanılan optimizasyon algoritmaları genel olarak matematiksel ve sezgisel algoritmalar olarak ikiye ayrılmaktadır. Çözüm kümesinin tamamını tarayarak çözüme ulaşmayı hedefleyen algoritmalar matematiksel algoritma; çözüm kümesine sezgisel olarak yaklaşan ve en iyi çözüme ya da en yakın çözüme ulaşmaya çalışan algoritmalara ise sezgisel algoritmalar adı verilmektedir. Günümüzde çözüm kümesi geniş olan problemlerin çözümünü kolaylaştırmak için temel sezgisel metotların birleştirilerek etkili kullanımı sonucu MS olarak tanımlanan çeşitli algoritmalar geliştirilmiştir. Bu algoritmalar yüksek seviyeli çalışma ortamlarında verimli arama işlemleri kullanarak çözüm uzayındaki optimum çözüme daha hızlı ulaşılmasını sağlamaktadır [180].

MS algoritmalar mimari basitlikleri, iyi optimizasyon yetenekleri ve hızlı yanıt vermeleri nedeniyle süreç kontrolünde sıklıkla kullanılmaktadır. Geleneksel optimizasyon yöntemleri ile kıyaslandığında yüksek boyutlu optimizasyon sorunlarının çözümünde daha etkili olduğu görülmektedir. Ayrıca esneklikleri nedeniyle klasik kontrolör tasarım metodolojilerine de kolaylıkla adapte edilebilmektedirler [181]. Problemin kapsamlı ayrıntılarına ihtiyaç duymadan problem üzerinde çalışabilme ve optimuma yakın çözümler sunma kapasiteleri, bir çok geleneksel tekniğe göre avantaj sağlamaktadır. Aşağıda yer alan Şekil 1.4. MS algoritmaların PID kontrol sürecindeki konumunu göstermektedir.



Şekil 1.4. PID Kontrol Tekniği ve MS Algoritmalar

Çalışmanın bu kısmında MS algoritmalar Evrimsel, Biyo-esinli, Doğadan Esinlenen, Sürü Tabanlı ve Fizik Temelli olarak sınıflandırılmıştır. Her sınıflandırma kendi içinde çeşitli algoritmaları ve bu algoritmalarla ilgili yapılan en az bir çalışma örneğini barındırmaktadır.

1.7.1. Evrimsel Algoritmalar

Evrimsel algoritmalar, türlerin evrimine odaklanmaktadır. Dolayısıyla Charles Darwin'in evrim teorisine dayandığı ifade edilebilmektedir. Evrimsel tüm yapıların temeli aynı olsa dahi, işleyiş şekillerinde önemli farklılıklar meydana gelebilmektedir. Evrimsel algoritmalar, çevresel baskılar altında bireysel bir popülasyonun varlığı ile tipiktir, en uygun olanın hayatta kalmasına ve bunun yanı sıra popülasyonun ortama uygunluğunda bir iyileşmeye neden olmaktadır [182]. Evrimsel algoritmalar üreme

mutasyonu, rekombinasyon ve seçim gibi evrim süreçlerini temel almaktadır [183]. İdeal olarak insan, çevre ve fiziki uygunluk şartları aranmadığı için belirli problemlerde optimal çözüme ulaşabilmektedirler.

Evrimsel algoritmalar Genetik Algoritmaların bazı örnekleri Genetik Algoritma (GA) [184], DiferansiyelEvrım (DE) [185] ve Genetik Programlama (GP) [186]ve diğerleridir.

Genetik Algoritma olarak isimlendirilen algoritmalar, Darwin'im evrim teorisine dayanmaktadır ve rastgele klasik evrimsel algoritmalarından oluşmaktadır. Yeni çözümlere ulaşmak için mevcut çözümlere rastgele değişiklikler uygulayarak optimizasyon problemine çözüm bulma mantığı temelinde çalışmaktadır. Aynı zamanda global arama sezgiselleri olarak bilinir ve mutasyon, çaprazlama, seçim ve kalıtım gibi evrimsel biyolojiden esinlenen stratejileri kullanan özel bir evrimsel algoritma kategorisidir [187].

Diferansiyel Evrim algoritması Storn ve Price tarafından önerilmiştir [188]. Biyolojik evrimden esinlenilmiştir ve EA sınıfına aittir [189]. DE, popülasyon tabanlı temel, verimli ve sağlam bir optimizasyon algoritmasıdır. Bu algoritmalar, dört ana aşamada çalışmaktadır. Bunlar: başlatma, mutasyon, rekombinasyon ve popülasyon seçimi olarak adlandırılmaktadır. Diferansiyel evrim algoritmaları, optimum çözüme ulaşılması için mutasyon çaprazlama ve seçim gibi evrimsel operatörleri kullanması nedeniyle Genetik Algoritmalar ile benzerlik taşımaktadır.

Syafah ve ark. [190] PID parametrelerine ince ayar yapmak için DE kullanarak DA motor hızının dinamik kararlılığını artırmak için PID denetleyicisinin tasarımını önermiştir. Önerilen DE algoritması, çeşitli hız ayar noktası değerlerinde yapılan simülasyon ve deneyler sırasında PSO tabanlı PID ile karşılaştırılmıştır. Simülasyon ve deney sonuçları, DE-PID'nin PSO-PID ve geleneksel PID kontrolörlerine göre daha hızlı tepki vererek ve daha istikrarlı olarak ani hız değişiminin altında daha iyi çıktı sağladığını ortaya koymuştur. Bosco ve ark. [191] sürekli mıknatıslı DA motor için PI parametrelerinin tahmini ve optimizasyonunda DE algoritmasının uygulanmasını araştırmıştır. İlk aşamada PMDC motor için atalet momenti, sabit tork, sürtünme katsayısı, armatür direnci ve armatür endüktansını tahmin etmek için diferansiye evrim algoritması kullanılmıştır. İkinci aşamada motor hızı yüksüz ve yük değişimli durumlarda PI kontrolün optimizasyonu ile kontrol edilmiştir. Simülasyon ile deneysel analiz arasında gerçekleştirilen karşılaştırma yapılmıştır. Radriguez-Molina ve ark.

[192] çevrim içi dinamik optimizasyon problemini araştırdıkları çalışmada DA motor hız yönetim işlemi için yeni bir uyarlanabilir kontrol tekniği önermişlerdir. Programda kullanılacak en etkili varyantın belirlenmesi için on farklı diferansiyel evrim algoritmasının karşılaştırması yapılmıştır. Çalışmada ayrıca Model Referans Uyarlamalı kontrol ve PI kontrol ile yeni geliştirilen strateji karşılaştırılarak, farklı DE varyantlarının adaptif kontrolündeki hesaplamalı analiz sonuçları, önerilen hız kontrol optimizasyon tekniğinin diğer varyantlara kıyasla üstün olduğunu ortaya koymuştur. Jigang, Hui ve Jie [193] BLDC motorun hızını düzenlemek için fitness tabanlı bir adaptasyon şeması formülasyon faktörü uygulamışlardır. Düzeltilmiş DE algoritması, uyarlanabilir mutasyon faktörüne, çok değişkenli uygunluk fonksiyonuna ve başlangıç kuralına odaklanarak PI kontrolörün kazançlarını değiştirmek için kullanılmıştır.

Biyocoğrafya Tabanlı Optimizasyon (BTO- Biogeography Based Optimization) diğer evrim tabanlı optimizasyon algoritmalarına benzemekle beraber göç üzerindeki habitatlar arası mesafe, doğrusal olmayan göç ilişkileri, göç üzerindeki üreme oranları, popülasyon boyutlarının etkisi gibi bazı ayırt edici özellikleri vardır [194]. Mo ve Xu [195], BTO'nun ayırt edici göç modelini kullanmış ve mevcut diğer yöntemlerle karşılaştırmasını yapmışlardır. Deney ve simülasyon sonuçları, önerilen BTO'nun yerel bir komşuluk uzayında optimum çözümleri keşfetme konusunda etkili olduğunu göstermiştir. Benzer şekilde Waley [196] PI kontrolörünü BTO algoritması ile optimize etmiştir. Araştırmada DA motorun hız tepkisi PI, GA-PI ve BTO-PI denetleyicilerle yönetilmiş, Zaman Ağırlıklı Hata Karesinin İntegrali(ITSE) uygunluk fonksiyonuna göre karşılaştırma yapılmıştır.

Stokastik Fraktal Arama(SFS) algoritması da doğal büyüme modelini taklit eden ve fraktal difüzyon sürecini kullanan yeni bir algoritmadır [198]. Khanam ve Parmar [198] DA motorun hızını düzenlemek için SFS algoritmasının kullanımını incelemişlerdir. PID kontrolörün kazançları önerilen SFS algoritması ile ayarlanmış ve performans indeksi olarak ITAE benimsenmiştir. Araştırma çalışmasının sonuçları, ITAE maliyet fonksiyonu ile önerilen SFS-PID şemasının, diğer mevcut tekniklere kıyasla daha az yükselme süresi, ayarlama süresi ve aşma ile daha iyi bir performans verdiğini göstermektedir. Çalışmada geliştirilen SFS algoritmasının, İstilacı ot optimizasyonu(IWO) ve PSO algoritmalarından daha iyi performans gösterdiği bildirilmiştir. Çelik ve Gör [199] ise bu algoritmayı geliştirilen kontrolörlerin parametrelerini (oransal, integral, türev ve filtre kazançları) performans artışı için

ayarlamak üzere kullanmışlardır. Çalışmanın simülasyon ve deney sonuçları SFS-PI+DF'nin PSO-PI+DF'ye kıyasla kararlılık ve doğruluk açısından en iyi hız yanıtı sonucunu verdiğini göstermiştir.

Bir problemin çözümünün en iyi çözüme taşınması ve en kötü çözümün elenmesi gerektiği temeline dayanan Jaya Optimizasyon Algoritması(JOA), Rao [200]'nun kısıtlı ve kısıtsız optimizasyon problemlerini çözmek için önerdiği bir MS algoritmadır. Toplam nesil sayısı ve popülasyon büyüklüğünün yalnızca birkaç kontrol parametresi ve herhangi bir algoritma için tipik olan düzen değişkenleri ile hesaplanabilir olması sağladığı avantajlardan biridir [201]. Algoritmanın bu avantajlarını göz önüne alarak Achanta ve Pamula [202] algoritmayı PID denetleyicilerin parametrelerini geliştirmek için kullanmışlardır. Çalışmanın ilk aşamasında PSO, DE ve Guguk Kuşu(GKA) algoritmaları karşılaştırılmıştır. Karşılaştırmanın sonuçları PSO algoritmasının diğerlerinden daha iyi performansa sahip olduğunu göstermiştir. Ardından, DA motor hızını kontrol ederken PID kazançlarını artırmada önerilen algoritmanın doğruluğunu daha da ortaya çıkarmak için PSO ile önerilen JOA'nın ek bir karşılaştırmalı analizi yapılmıştır. Pratik doğrulama LabVIEW kullanılarak QNET 2.0 DA motor üzerinde gerçekleştirilmiştir.

Evrimsel algoritmalar sınıfında olan bir diğer algoritma ise Atashpaz-Gargari ve Lucas [203] tarafından geliştirilen Emperyalist Rekabetçi Algoritma(Imperialist CompetitiveAlgorithm (ERA))'dır. Algoritma gerçek dünyadaki sosyal-politik sürecin emperyalist rekabetinden esinlenmektedir. Ghalehpardaz ve Shafiee [204] geliştirilen bu algoritmayı genetik algoritmayla birlikte DA motorun hızını düzenlemek için kullanmışlardır. Çalışmada, ERA ve GA, FLC kontrolörünün Üyelik Fonksiyonlarını (MF'ler) ve kazanç faktörlerini optimize ederek PI benzeri FLC kontrolörünü ayarlamak için kullanılmıştır. Afra, ve ark. [205], ERA ve ZN yöntemlerini kullanarak ve uygun PID parametrelerini seçerek DA motorun konum kontrolünü incelemiştir.

Yapılan çalışmalar ERA algoritmasının bazı optimizasyon problemlerinde çözüm bulmada başarılı olsa da, yüksek boyutlu ve çok modelli sayısal optimizasyon problemlerinin çözümünde yerel minimumda takıldığı bildirilmiştir. Bu sorunun çözümü için Sharifiand ve Mojallali [206] modifiye edilmiş bir ERA önermişlerdir. Önerilen algoritma, ülkeleri en iyi emperyalist yönünde kaydırmaya odaklanmakta ve tek amaçlı algoritmayı çok amaçlı modele genişletmek için çeşitli yöntemler içermektedir. Algoritma daha sonra verimliliği artırmak, toplam ağırlığı azaltmak ve

BLDC motorun tasarım değişkenlerindeki altı eşitsizlik sınırlamasını eşzamanlı olarak karşılamak için kullanılmıştır.

Evrimsel programlama ilk olarak Fogel ve ark. [207] tarafından önerilmiştir. Algoritmanın temel mantığı mutasyon, rekabet ve evrime dayanmaktadır. Global optimumu bulmak için tek bir noktadan ziyade bir nokta popülasyonu üzerinde arama yapmak, uygunluk veya amaç fonksiyonlarının doğrudan arama sırasında kullanılması ve nesiller seçilirken olasılıksal dönüşüm kurallarının uygulanması EP'yi diğer evrimsel algoritmalarından ayıran yönleridir [208]. Chang ve ark. [209] EP ile sabit mıknatıslı DA motorun konumunu düzenlemek için PID kontrolörünün optimum tasarımı üzerinde çalışmışlardır. Çalışmada EP algoritması, Entegre-Mutlak Hata (IAE) performans endeksini en aza indirerek sabit mıknatıslı DA motorun konumlandırma kontrol sorununu ele almak için PID kontrolörüne dahil edilmiştir.

Evrimsel Strateji 1960'larda Rechenberg ve Schwefel tarafından geliştirilmiştir [210]. Genellikle gerçek değerlerin kullanılmaktadır ve evrimsel süreci ilerletmek için ağırlıklı olarak seçim ve mutasyona bağlıdır. Birçok ES sistemi, algoritma geri bildirim yanıt olarak optimizasyon süreci sırasında çeşitlilik üretme seviyesini ayarladığı için kendi kendini uyarlamayı içermektedir [211]. Evrimsel strateji kendini uyarlayabilen bir evrimsel algoritma niteliği taşımaktadır. Bu doğrultuda dinamik çok amaçlı model tasarım problemi, karmaşık olmayan ve zarif bir köprü kurma yöntemi sunan bir Evrim Yaratma Algoritması (EYA) Chun-Liang ve Horn-Yong [212] tarafında geliştirilip, tanıtılmıştır. Geliştirilen algoritma, çok amaçlı PID kontrolünün parametrelerinin optimize edilerek doğrusal bir BLDC motorunun hızının ayarlanmasında kullanılmıştır.

1.7.2. Biyo-esinli MS Algoritmalar

Biyoloji tabanlı hesaplama algoritmaları, doğanın biyolojik evrimini temel alan yenilikçi yöntemlerdir. Bu algoritmalar doğa, insan faaliyetleri, hayvan davranışları vb. etkilenmektedirler. Bu algoritmaların özellikle bilim ve teknolojideki doğrusal olmayan ve karmaşık sorunları ele alma yeteneği, gerçek dünyadaki optimizasyon problemlerini çözmek için çok etkili ve güvenilir olmalarını sağlamaktadır [213].

Biyo-esinli algoritmalar, yeni ve başarılı işlevsel teknikler geliştirmek için biyolojik evrim kavramlarına odaklanan yenilikçi yaklaşımlardır. Özellikle ortaya

çıkan bilim ve mühendislik sorunlarını etkili bir şekilde ele almak için son birkaç yıldır makine öğreniminde kurulmuştur [214]. Bu algoritmaların bazıları Bakteriyel Yemleme Algoritması (BYA) [215], Gri Kurt Algoritması (GKA) [216], Yapay Bağışıklık Sistemi (YBSA) [217] ve Sosyal Örümcek[218] algoritmasıdır.

Bakteri Yemleme Algoritması(Bacteria Foraging Algorithm (BYA)) BYA, Escherichia coli'nin sosyal yiyecek arama özelliklerinden esinlenmiştir [219]. Abed [220] bağımsız uyarılmış DA motorun (SEDM) hızını düzenlemek için BYA tabanlı bir MS algoritma geliştirmiştir. PID parametre optimizasyonu bakterinin yiyecek arama sosyal davranışı modellenerek gerçekleştirilmiştir. Geliştirilen matematiksel model MATLAB'da formüle ve simüle edilmiştir. Benzer şekilde, Oshaba ve Ali [221] de DA seri motorun hızını kontrol etmek için BYA'yı önermiştir. DA motorun hızı, PI kontrolörün kazançlarının optimum değerlerini aramak ve bu şekilde amaç fonksiyonunun zaman alanını azaltmak için önerilen BYA uygulanarak kontrol edilmiştir. Alzuabi de BYA optimizasyon yaklaşımını, DA motor sisteminin işlevini ve tepkisini geliştirmek amacıyla PID kontrolörünün optimum kazançlarını aramak için kullanılmıştır. Sistem MATLAB ile uygulanmış ve simüle edilmiştir [222].

Standart BYA'da başlıca dezavantajı, optimum konuma yakın konumda bulunan bir bakterinin, uzakta olan başka bir bakteri tarafından geçilebilmesi ve dolayısıyla yakınsama oranının düşmesidir. Bu sorunun aşılabilmesi için Daryabeigi ve Dehkordi [223] geliştirilmiş bir BYA algoritması önermişlerdir. Yeni algoritma Akıllı Bakteriyel Yemleme Algoritması(Smart Bacterial foraging algorithm-ABYA) geliştirilmiştir. Bu algoritma, geleneksel BYA'ya uyarlanabilir sosyal ve bireysel yiyecek arama davranışlarının eklenmesiyle geliştirilmiştir. Bu teknik, optimizasyon için E.Coli bakterisinin kemotaktik davranışını taklit etmektedir. Bu yöntem, SRM için standart PI hız kontrolörünün kazanımlarını ayarlamak için, tork piklerindeki azalmayı dikkate alarak araştırılmıştır. Diao ve ark. [224] fırçasız DA motorun hareketi ve ivmesini izlemek için Geliştirilmiş Bakteriyel Yemleme Algoritması(Improved Bacterial Foraging Algorithm-GBYA) önermişlerdir. Geliştirilen algoritma standart BYA'da ortaya çıkan başlatma süresi ve düşük doğruluktaki gecikme sorununu çözmeyi amaçlamaktadır. Önerilen GBYA'nın simülasyon sonuçları hız, tepe aşımı, torkipile ve rotor konumu salınımlarında azalma olduğunu göstermiştir.

Yapay Bağışıklık Sistemi(The Artificial Immune System-YBSA)) biyolojik bağışıklık sisteminin üstün özelliklerini kopyalayarak bilişsel hesaplama ve sistem

geliştirme için etkili bir yaklaşım sağlar [225]. Hadi ve Zaidi [226] DA Servo Motor (DCSM) hız kontrol problemlerini ele almak için bir YBSA algoritmasının uygulanmasını önermiştir. Amaç fonksiyonu minimize edilerek PID kontrolü hedeflenmiştir. Klasik yöntemlerle karşılaştırmasının yapılabilmesi için ZN ayarlama tekniği kullanılarak tekrarlı deneyler oluşturulmuştur. Deneylerin sonuçları, YBSA tabanlı PID kontrolörün yükselme zamanı, yerleşme zamanı, aşım ve kararlı durum hatası açısından ZN yöntemine göre üstün olduğunu göstermiştir.

Gri kurt sürülerindeki liderlik ve avlanma davranışlarını taklit eden yenilikçi bir MS algoritma olan Gri Kurt Optimizasyoncusu (Grey Wolf Optimizer- GKA) algoritması Mirjalili ve ark. [227] tarafından önerilmiştir. Bhatnagar ve Gupta [228] ve Potnuru ve Tummala [229] çalışmalarında DA motorun hızını kontrol etmek için PID kontrolörün optimum kazançlarını değerlendirmek üzere GKA algoritmasının kullanılmasını önermiştir.

Sosyal Örümcek Optimizasyonu (Social Spider Optimization-SÖO) 2013 yılında, sosyal örümceğin işbirliği özelliklerini taklit eden popülasyon tabanlı bir algoritma olarak Cuevas ve ark. [230] tarafından tanıtılmıştır. Yaacob ve ark. [231] Sosyal Örümcek Optimizasyonunun (SÖO) seçildiği çevrimdışı ayarlı bir PID denetleyici tasarım şeması önermişlerdir. Kontrolörün adım tepkisi, sistem tepe aşımı, kararlı durum hatası, yükselme süresi ve yerleşme süresinin en aza indirilmesi açısından analiz edilmiştir. Ayrıca elde edilen sonuçlar Ateş Böceği algoritması (firefly algorithm) ile karşılaştırılmıştır. Geliştirilen algoritmanın hızlı yakınsama oranı ve gerçek dünyadaki problemlere yapısal çözümler sağlama olasılığı, karmaşık matematiksel problemlere, özellikle optimizasyon problemlerine kesin bir çözüm sağlayabileceği değerlendirilmektedir.

1.7.3. Doğadan Esinlenen MS Algoritmalar

Yakın dönemde yapılan çalışmalar, doğanın akıllı sistemler geliştirmek ve karmaşık sorunlara çözümler sunmak için elverişli bir kaynak olduğunu ortaya koymuştur [232]. Fister ve ark. [233] da bu görüşü destekler şekilde yeni geliştirilen algoritmaların çoğunun doğadan esinlendiğini bildirmişlerdir. Bu algoritmaların başlıcaları olarak Ateşböceği Algoritması (Firefly Algorithm-ABA) [234], Çiçek Tozlaştırma Algoritması (ÇTA) [235], Yarasa Algoritması (BA) [236], İstilacı Ot

Optimizasyonu (IWO) [237], Guguk Kuşu Araması (GKA) [238], Puma Optimizasyoncusu(PO) [239], Ateş Şahini Optimizasyoncusu(AŞO) [240] ve Afrika Akbabaları Optimizasyonu(AAO) [241] sayılabilir.

Ateşböceği algoritması (ABA), ateşböceklerinin yanıp sönmeye desenlerine ve davranışlarına dayanan ve Yang [242], [243] tarafından geliştirilmiş bir sürü zekası algoritmasıdır. Ancak yapılan çalışmalar algoritmada erken yakınsama ve çözüm kalitesinde düşük kararlılık sorunları olduğunun tespit edilmesini sağlamıştır. Bu doğrultuda Wang ve ark. [244] ABA performansının iyileştirilmesi için boyutsal Cauchy mutasyonuna dayalı bir Yin-Yang ateşböceği algoritması (YYABA) önermişlerdir. Ayrıca ABA'nın yedi açıdan geliştirilebileceğini belirtmişlerdir. Bunlar: uyarlanabilir parametreler, yeni hareket modu, yeni çekim modu, elitizm stratejisi, çoklu gruplar, hibrit algoritma ve disiplinlerarası uygulamadır.

Vashistha ve Ganguli [245], PI denetleyicisi kullanarak DA motorun gelişmiş bir modelini kontrol etmek için Ateşböceği Algoritması (ABA) uygulamasını önermişlerdir. Algoritmanın optimizasyon problemlerindeki yeterliliğini belirlemek için yaygın doğrusal kıyaslama fonksiyonları ile değerlendirme yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar ABA algoritmasının kıyaslama fonksiyonları altında makul bir performans sergilediği, bu doğrultuda da DA motorun hızlı yükselme, kısa yerleşme süresi ve daha az aşım ile düzenlendiği tespit edilmiştir. Pal ve Dey [246] ayrı olarak uyarılan bir DA motor için optimum PID kontrolör parametrelerini belirlemek amacıyla Firefly optimizasyon tekniği uygulanmışlardır. Önerilen ABA tabanlı hız kontrol tasarımı, farklı çalışma ve bozucu koşullar altında GA tabanlı PI (GA-PI) ve ZN tabanlı PI (ZN-PI) kontrolörleri ile karşılaştırılmıştır. Zaman alanı analizi ve farklı performans indeksleri altında, simülasyon sonuçları ABA-PI'nin GA-PI ve ZN-PI kontrolörlerine göre üstünlüğünü göstermektedir. MATLAB simülasyon sonuçları, önerilen algoritmanın, LQR tekniğiyle karşılaştırıldığında yükselme süresi, yerleşme süresi ve tepe zamanının azaltılmasıyla sistemin geçici performansını iyileştirdiğini göstermiştir.

Jaber [247]'de Ateş Böceği Algoritmasının yeni bir modifikasyonu olan Uçan Sinek Segmentasyonu (Firefly-Segmentation-USS) yi tanıtmıştır. Algoritmanın geliştirilme amacı, PID parametrelerini optimize etmek ve DA motorun daha iyi düzenlenmiş bir hız tepkisi vermesinin sağlanmasıdır. Bu doğrultuda algoritma ABA'nın bir karışımından ve arama işleminin her segmentin ayrı ayrı ele alınmasından

oluşmaktadır. Klempka ve Filipowicz [248] de denklemlerin sonraki iterasyonlarında her bir ateş böceğinin konumunu nasıl değiştirdiğine göre ayarlanmasını içeren bir modifikasyon geliştirmişlerdir. Bu değişiklik DA motoru kontrol etmek için ABA'nın özelliklerini geliştirmiştir.

Bir diğer MS algoritma olan Çiçek Tozlaşma Algoritması, Yang [249] tarafından optimizasyon problemlerini çözmek için önerilmiştir. Algoritma çiçeklerin polenleşme/tozlaşma özelliklerinden esinlenmiştir. Dwi ve ark. [250] Çiçek Tozlaşma Algoritması (ÇTA) kullanarak DA motorun hızını izlemek için PID kontrolörünün optimum tasarımını sunmuştur. Önerilen algoritmanın performansını değerlendirmek ve PID denetleyicisini güçlendirmek için GKA ve YAKO algoritmaları olmak üzere diğer iki meta sezgisel algoritma kullanılmışlardır.

İstilacı Ot Algoritması(Invasive Weed Optimisation-IWO), Mebrabian ve Lucas [251] tarafından geliştirilen sayısal bir stokastik optimizasyon algoritmasıdır. Algoritmanın oluşturulmasında istilacı büyüme alışkanlığı ve güçlü yapıları olan, aynı zamanda da yetiştirilen bitkilere ciddi zararlar veren yabancı otların kolonileşmesinden ilham alınmıştır. Bu doğrultuda kolonileşen yabancı otların sağlamlığı, adaptasyonu ve rastgeleliği taklit edilmeye çalışılmıştır. IWO'nun fizibilitesi, verimliliği ve etkililiği, küresel ve yerel minimumları bilinen bir dizi çok boyutlu kıyaslama fonksiyonu aracılığıyla ayrıntılı olarak test edilmiştir. Elde edilen sonuçlar diğer güncel evrim tabanlı algoritmalarından olan genetik algoritmalar, memetik algoritmalar, parçacık sürüsü optimizasyonu ve karşılaştırılmış kurbağa sıçramasından elde edilen diğer sonuçlarla ve simpleks simüle edilmiş tavlama ve doğrudan arama simüle edilmiş tavlama algoritmalarından elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Deneysel sonuçlar, IWO'dan elde edilen sonuçların diğer yöntemlerden elde edilen sonuçlardan daha iyi olduğunu, dolayısıyla performansının tüm test fonksiyonları için makul bir performansa sahip olduğunu göstermiştir.

Khalilpour ve ark. [252] da DA motorun hızını düzenlemek için IWO algoritmasını, PID parametrelerini ayarlamak için ise yumuşak hesaplama kontrol stratejisi önermiştir. Önerilen yaklaşım PSO, GA ve Memetic Algorithms (MAs) gibi diğer algoritmalarla paralellik göstermiştir. IWO-PID'nin diğer yöntemlere kıyasla uzaysal dağılım, üreme ve rekabetçi dışlama konusunda ayırt edici bir özelliğe sahip olduğunu tespit etmişlerdir. Çalışmada önerilen sistem: bir popülasyonun başlatılması, üreme, uzamsal dağılım ve rekabetçi dışlama adımlarını içermektedir. Misagi ve

Yaghoobi [253] ise standart sapma parametrelerinin yanlış seçiminden kaynaklanabilecek dezavantajın üstesinden gelmek için kaos teorisine dayanan geliştirilmiş bir IWO algoritması önermişlerdir. Önerilen geliştirilmiş IWO, kaotik eşlemeleri önce ön popülasyona ve oradan da standart sapma algoritmasına (sigma) uygulamıştır. Daha sonra performansını değerlendirmek için beş ortak kıyaslama fonksiyonu altında değerlendirilmiş ve ardından DA motoru sürmek için PID denetleyicisi için doğru parametreleri ayarlamak için kullanılmıştır.

Bazı kuşların ve meyve sineklerinin Levy uçuş özellikleri ile birlikte guguk kuşu gruplarının zorunlu kuluçka paraziti faaliyetine dayanan [254] Guguk Kuşu Algoritması(Cuckoo Search Algorithm-GKAA) Yang ve Deb [255] tarafından geliştirilmiştir. Vishal ve ark. [256] Guguk Kuşu Algoritmasının performansını DA motorun hızını düzenlemek için PI denetleyicisi kapsamında ve ITAE amaç fonksiyonu altında DE, GA ve Hızlandırılmış PSO (APSO) gibi diğer algoritmalarla birlikte test etmişlerdir. Sing ve ark. [257] DA servo motor hız regülasyonu için PID kontrolör parametrelerinin ayarlanmasında GKA algoritmasının ve ZN ayar kurallarının performansını incelemiştir. Yapılan çalışma GKA'nin yavaş bir yakınsama oranıyla optimum arama sonuçlarını ayarlamakta ve elde etmekte zorluk çekmekte ve karmaşık sorunları ele almakta yetersiz kaldığını ortaya koymuştur. Algoritmanın bu eksikliğini giderilmesi için Jagindar ve ark. [258] DA servo motorun hızını denetlemek için geliştirilmiş bir GKA (ICS) algoritması önermişlerdir. DA Servo Motorun performansını artırmak için guguk kuşu arama (GKA) algoritması ve geliştirilmiş guguk kuşu arama (ICS) algoritmasının yanı sıra dört uygunluk fonksiyonu incelenmiştir. ICS tarafından optimize edilen PID şeması, dört uygunluk fonksiyonu için genel GKA'ye kıyasla daha iyi sonuçlar vermiştir.

Bir diğer doğadan esinlenen MS algoritma ise Abdollahzadeh ve ark. [259] tarafından tanımlanan Afrika Akbabaları Optimizasyon Algoritması(African Vultures Optimization Algorithm-AAO)'dır. Afrika akbabalarının yiyecek arama rekabeti ve gezinme davranışının simüle edildiği algortmada en iyi iki çözümün optimal kullanımı nedeniyle, iki akbabanın diğer akbabalara göre daha güçlü olan gruplarını temsil etmesi nedeniyle çeşitlilik ve rezonans arasında bir denge yaratılarak önerilen modelin performansı artırılmıştır. Ayrıca SO, DE ve BTO, TFO, SSA ve GKA, BOA, MFO, FFA gibi diğer güçlü metasezgisel algoritmalarla karşılaştırılmıştır. Algoritmanın performansının değerlendirilmesi için standart kıyaslama fonksiyonları

üzerinden testler gerçekleştirilmiştir. Deneysel sonuçlara göre AAO, 36 kıyaslama fonksiyonundan 30'unda en iyi algoritmadır ve mühendislik vaka çalışmalarının çoğunda üstün performans sağlamıştır. İstatistiksel değerlendirme için kullanılan Wilcoxon sıra toplamı testinde elde edilen %95 güven aralığında AAO algoritmasının anlamlı üstünlüğünü göstermiştir.

Salah ve ark. [260] kademeli çift döngü kontrolü konseptini kullanarak PI denetleyicileriyle DA motor veri yolunun kararlılığını korumaya odaklanmışlardır. MATLAB/Simulink'de gerçekleştirilen simülasyonda güneş ışınımı, sıcaklık ve ani yük değişikliklerine ilişkin gerçek verileri dikkate alınmıştır. Sonuçların PSO ile de karşılaştırıldığı çalışmada AVOA tabanlı PI denetleyicinin voltaj regülasyonunda PSO tabanlı PI denetleyiciden daha iyi performans gösterdiği sonucu elde edilmiştir. Swain ve ark. [261], AAO tekniği ile optimize edilmiş benzersiz bir iki serbestlik dereceli PID (2DOFPID) kontrolörü kullanarak sanal atalet ve sönümü simüle etmek için bir teknik önermişlerdir. Sönümlenme kontrol döngüsünün sönümlenme kazancı ve ataleti ve sanal atalet, 2DOFPID denetleyicisindeki iyileştirmelerle birlikte AVOA tarafından ayarlanmışlardır. Önerilen yöntem GKA, BOA, SSA ve HHA yöntemleriyle karşılaştırılmıştır. Çalışmanın sonuçları, AVOA'nın verimlilik ve yakınsama hızı açısından diğer optimizasyon stratejilerine göre üstün sonuçlar verdiğini göstermiştir.

Tripatisi ve ark. [262] ise BLDC motorun geometrik boyutlarını optimizasyon parametreleri olarak kabul ederek maliyet etkinliğini, hacmini ve toplam kaybını iyileştirmek için Balina Optimizasyon Algoritması (BOA), Gri Kurt Optimizasyonu (GKA), Guguk Kuşu Arama Algoritması (COA), Genetik Algoritma (GA), Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO) ve Afrika Akbaba Optimizasyon algoritmasını karşılaştırmışlardır. Optimum çözümü bulmanın kararlılığını ve tutarlılığını değerlendirmek amacıyla her optimizasyon tekniği için standart sapma da hesaplanmıştır. Sonuçlar AAO'nın, BLDC motor tasarımında diğer tüm optimizasyon algoritmalarından daha iyi performansa sahip olduğunu göstermiştir.

Abdollahzadeh ve ark. [263] tarafından tanıtılan Puma Optimizasyoncusu(Puma optimizer-PO) keşif ve sömürünün her aşamasında önerdiği yeni mekanizmalarla optimizasyonun artmasını sağlamaktadır. Pumaların davranışlarının yiyecek arama ve saklama davranışlarının simüle edildiği algoritmanın diğer algoritmalarından temel farklılığı, keşif ve kullanım aşamalarının değiştirilebilmesidir. Faz değiştirme işlemini problemin doğasına göre otomatik ve

akıllı bir şekilde gerçekleştirir. Faz değişimi, algoritmanın problemlerle akıllıca başa çıkmasını sağlar ve gelecek vaat eden faz optimizasyon işlemine öncelik vermesini sağlamaktadır. Çalışmada algoritmanın kullanım ve keşif aşamalarındaki yeteneklerini veya denge yaratma kapasitesini araştırmak için standart kompozisyon modeli(CM), çok modlu(MM) ve tek modlu(UM) kıyaslamalar kullanılmıştır. Önerilen algoritmayı değerlendirmek için 23 standart fonksiyon ve CEC2019 fonksiyonu kullanılmış ve farklı tipteki optimizasyon algoritmalarıyla karşılaştırılmıştır. Ayrıca istatistiksel test T-testinin kullanılması ve problemin çözümü için yürütme süresi tartışılmıştır. Son olarak dört makine öğrenmesi ve veri madenciliği problemi kullanılarak test edilmiş ve tüm analizlerden elde edilen sonuçlar, bu algoritmanın diğer optimize edicilere kıyasla her türlü probleme karşı daha iyi performans gösterdiği görülmüştür. Algoritma 2024 yılında geliştirilmiştir. Bu nedenle henüz literatürde PID, DA motor veya İHA'lara yönelik bu algoritmanın kullanıldığı bir çalışma bulunmamaktadır.

Ateş Şahini Optimizasyoncusu(AŞO- // Fire Hawk Optimizer-FHO) Azizi ve ark. [264] tarafından tanıtılmıştır. Çeşitli şahin türlerinin doğada avlanma sırasında kullandıkları ateş yakma yoluyla sergiledikleri davranışlardan esinlenilmiştir. Algoritma geliştirme sürecinde istatistiksel ölçümler 100 bağımsız optimizasyon çalışmasının en iyi, ortalama, medyan ve standart sapmasını içerirken; Kolmogorov-Smirnov, Wilcoxon, Mann-Whitney, Kruskal-Wallis ve Post-Hoc analizi gibi iyi bilinen istatistiksel analizler de çalışmaya dahil edilmiştir. Ayrıca performans değerlendirmesi için sınırlı kısıtlama problemlerini konu alan CEC 2020 ve gerçek dünya optimizasyon problemlerini konu alan CEC 2020 gibi Evrimsel Hesaplama (CEC)da dikkate alınmıştır. Karşılaştırma amacıyla on farklı MS algoritma kullanılmıştır. Algoritmanın performansını değerlendirmek için boyutları 2 ile 100 arasında değişen toplam 233 matematiksel fonksiyon test fonksiyonu olarak kullanılmış, optimizasyon sürecinde ise maksimum 150.000 fonksiyon değerlendirmesi ve 100 optimizasyon çalışması dikkate alınmıştır. 2023 yılında tanıtılan algoritmaya ilişkin literatürde PID, DA motor veya İHA'lara yönelik bir çalışma bulunmamaktadır.

1.7.4. Sürü Tabanlı MS Algoritmalar

Sürü tabanlı algoritmalar karşılıklı farkındalık, sürülerin birbirleri ve çevreleriyle etkileşimleri örneklerinde olduğu gibi canlıların kolektif davranışlarından

esinlenmektedir. Bonabeau ve ark., sürü zekasını “...sosyal böcek kolonilerinin ve diğer hayvan topluluklarının kolektif davranışlarından ilham alan algoritmalar veya dağıtılmış problem çözme cihazları tasarlamaya yönelik herhangi bir girişim...” [265] olarak tanımlamıştır. Sürü kavramı etkileşim halindeki ajanların veya bireylerin herhangi bir koleksiyonu olarak düşünülebilir. Sürü zekası algoritmaları ise kolektif zeka uyarımlı hesaplama sistemlerinin incelenmesi olarak tanımlanabilir [266]. Sürü tabanlı algoritmaların esnekliği, kendi kendine öğrenme yeteneği ve harici aksaklıklara uyum sağlama kabiliyeti en büyük avantajlarını oluşturmaktadır [267]. Sürü zekası algoritmalarının temelini oluşturan kolektif zeka, çevrede birlikte çalışan çok sayıda homojen ajan aracılığıyla meydana gelmektedir [268]. Bu zeka dağılmakta, kendi kendini organize etmekte ve bir ortamda yayılmaktadır.

Bir karınca kolonisi, bireysel ajanları karınca olan bir sürü olarak düşünülebilir; kuş sürüsü kuş sürüsüdür. Bir bağışıklık sistemi, bir hücre ve molekül sürüsü olarak düşünülebileceği gibi, bir kalabalık da bir insan sürüsü olarak da düşünülebilir. Yapay Arı kolonisi optimizasyonu (Artificial Bee Colony optimization-YAKO) ve Parçacık sürü optimizasyonu(Particle Swarm Optimization-PSO) en yaygın kullanılan sürü tabanlı algoritmalarıdır.

Literatürde bal arısı sürüsünün akıllı davranışlarını temel alan çeşitli arı algoritmaları önerilmiştir. Bunlardan bazıları Yang [269]’ın önerdiği Sanal Arı Algoritması(Virtual Bee Algorithms-SAA), Pham ve ark. [270]’ın önerdiği Arılar Algoritması(The Bees Algorithm) ve Karboğa [271]’nin tanımladığı Yapay Arı Kolonisi(YAKO) Algoritmalarıdır.

Bal arılarının davranışlarının modellenmesi için çeşitli yaklaşımlar önerilmiş ve bunlar kombinatroyal tip problemlerin çözümü için uygulanmıştır [272]. Tereshko [273], arı kolonisini çevreden bilgi toplayan ve davranışlarını buna göre ayarlayan dinamik bir sistem olarak tanımlamıştır. Sistem reaksiyon-difüzyon denklemlerine dayalı olarak bir bal arısı kolonisinin yiyecek arama davranışına ilişkin bir model olarak düşünülmüştür. Tereshko ve Loengarov [274], arıların yiyecek arama davranışlarına ilişkin bir robot fikrini geliştirmişlerdir. Bu doğrultuda kolektif zekanın ortaya çıkmasına yol açan minimal bir yem seçimi modeli geliştirmişlerdir. Bu model: yiyecek kaynaklarını, çalışan toplayıcıları ve işsiz toplayıcıları ve nektar kaynağına işe alım ve bir kaynağın terk edilmesi olarak sınıflandırılan iki temel davranış modunu tanımlamışlardır.

Arılar Algoritması 2006 yılında Pham ve ark. [275] tarafından tanıtılmıştır. Optimizasyon mantığı bal arısı kolonilerinin yiyecek arama ve kovana taşıma sürecinden esinlenmiştir. Geliştirilen algoritmayla, N boyutlu çok modlu fonksiyonlar üzerinde yapılan deneyler, önerilen algoritmanın dikkate değer bir sağlamlığa sahip olduğunu ve her durumda %100 başarı oranı ürettiğini göstermiştir. Algoritma yerel optimuma takılmadan maksimum veya minimuma yakınsama sağlamıştır. Çalışmada geliştirilen algoritmanın genel olarak optimizasyon hızı ve elde edilen sonuçların doğruluğu açısından kendisiyle karşılaştırılan diğer tekniklerden daha iyi performans gösterdiğini belirtmişlerdir.

Yang [276] mühendislik problemlerindeki uygulamayla fonksiyon optimizasyonlarını çözmek için kullanılabilecek Sanal Arı Algoritmasını tanıtmıştır. Öncelikle iki parametrelili fonksiyonlar için sanal arı sürüsü oluşturulmuş ve faz uzayında rastgele hareketleri sağlanmıştır. Arılar, fonksiyonun kodlanmış değerlerine karşılık gelen bazı hedef nektarı bulduklarında etkileşime girmektedirler. Optimizasyon probleminin çözümü arı etkileşimlerinin yoğunluğundan elde edilmiştir. Çalışmada, De Jong'un test fonksiyonunun ve Keane'nin çok tepeli inişli çıkışlı fonksiyonunun optimizasyonunun simülasyonları, tek aracılı SAA'nın genellikle genetik algoritmalar kadar etkili olduğunu ve çoklu aracılı uygulamanın, çoklu araçların paralelliği nedeniyle geleneksel algoritmalarından daha verimli bir şekilde optimizasyon yaptığını göstermiştir.

Karaboğa [277] çok değişkenli ve çok modlu sayısal fonksiyonları optimize etmek için Yapay Arı Kolonisini(YAKO) tanımlamıştır. Modelde yapay arı kolonisi üç grup arıdan oluşmaktadır: işçi arılar, gözlemci ve izciler. Koloninin ilk yarısı çalışan yapay arılardan, ikinci yarısı ise gözlemcilerden oluşur. Her yiyecek kaynağı için yalnızca bir görevli arı vardır. Başka bir deyişle işçi arıların sayısı kovan çevresindeki yiyecek kaynaklarının sayısına eşittir. Besin kaynağı arılar tarafından tüketilen işçi arı, izci olarak tanımlanmıştır. Aramanın her döngüsü üç adımdan oluşur: Görevli ve gözcü arıların yiyecek kaynaklarına taşınması ve nektar miktarlarının hesaplanması; kâşif arıların belirlenerek olası besin kaynaklarına yönlendirilmesidir. Bir yiyecek kaynağı konumu, optimize edilecek problemin olası bir çözümünü temsil etmektedir. Geliştirilen algoritmanın performansının Genetik Algoritma [278], PSO ve PS-EA [279] gibi çeşitli optimizasyon yöntemleriyle karşılaştıran çalışmalar mevcuttur. Örneğin Karaboğa ve Akay [280]'ın çalışmasında da YAKO'nin performansının, daha

az kontrol parametresi kullanma avantajıyla birlikte diğer popülasyon tabanlı algoritmalarından daha iyi veya bunlara benzer olduğunu göstermiştir. Çalışmada YAKO, geniş bir sayısal test fonksiyonları kümesini optimize etmek için kullanılmış ve YAKO algoritması tarafından üretilen sonuçlar, genetik algoritma, parçacık sürüsü optimizasyon algoritması, diferansiyel evrim algoritması ve evrim stratejileri ile elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Başlangıçta kısıtlamasız kıyaslama optimizasyon fonksiyonlarını ele almak için tasarlanan YAKO, sömürücü komşuluk aramasını rastgele keşifsel arama ile birleştirme kapasitesi nedeniyle farklı çok amaçlı optimizasyon problemlerini ele almada kullanışlı olduğu bulunmuştur [281]. Huang ve Wang [282], standart YAKO algoritmasının sömürü yeterliliğini iyileştirmek için, bu arama şemasına toz yeri eleme mekanizması ekleyerek geliştirilmiş bir versiyon önermiştir. Bu, yeni çözümler aramak için koloni arıları tarafından rastgele seçilen daha düşük seçenekli çözümleri azaltır ve yerel sömürü kapasitesini ve yakınsama hızını artırmak için arama aralığını yavaşça azaltır. Ayrıca kısıtlı optimizasyon problemlerinin üstesinden gelinmesi için geliştirilmiş bir versiyonu da tanıtmıştır [283].

Mishra ve ark. [284] geliştirilmiş YAKO'nin kontrol sistemleri üzerinde nasıl işlediğini araştırmışlardır. Liao ve ark. [285] ise DA motorun hızını izlemek üzere PID kontrolörünü değiştirmek için YAKO optimizasyon yöntemini önermiştir. Önerilen YAKO-PID, minimum hata ile daha iyi bir dinamik ve statik çıktı elde etmek için tasarlanmıştır.. Sonuçların klasik optimizasyon yöntemlerinden de elde edilen sonuçlarla karşılaştırıldığı çalışmada en kısa yükselme zamanı, yerleşme zamanı ve tepe aşımı ile önerilen YAKO-PID denetleyici diğer ayarlama tekniklerinden daha iyi performans göstermiştir. Araştırmanın bulguları, önerilen algoritmanın yüksek dereceli sistemlerdeki hataları kontrol etmede etkili olabileceğini göstermektedir. Geng ve ark. [286] YAKO algoritması üzerine kurulu çift kapalı çevrimli bir PID hız ayarlama sistemi kullanarak DA motorun hızını yönetmek için bir kontrol tekniği sunmuştur. Çalışmanın temel amacı, ayarlama döngüsü sırasında ortaya çıkan ayarlama zorluklarının üstesinden gelmek ve YAKO algoritmasının Nektar Toplama özelliklerini kullanarak DA Çift kapalı döngü PID denetleyicisini optimize etmektir.

Sürü tabanlı MS algoritma olarak sınıflandırılan bir diğer yöntem Yarasa Algoritması(Bat Algorithm-BA)dır. Algoritma yarasaların ekolokasyon davranışlarından esinlenmiş ve Xin-She Yang [287] tarafından geliştirilmiştir. Yang,

geliştirdiği algoritmayı tanıttığı çalışmada önerilen algoritmayı genetik algoritmalar ve parçacık sürüsü optimizasyonu da dahil olmak üzere mevcut diğer algoritmalarla karşılaştırmıştır. Simülasyonlar, önerilen algoritmanın diğer algoritmalara göre çok daha üstün görüldüğünü göstermiştir. Singh ve ark. [288] PID kontrolörünün kazançlarını optimize etmek için Yarasa Algoritmasını kullanmışlardır. Parçacık Sürüsü Optimizasyonu ile karşılaştırmanın yapıldığı çalışmada, BA'nın daha iyi bir yükselme ve yerleşme sağladığını tespit etmişlerdir. Genel olarak bakıldığında, servo motor optimizasyonunda BA'nın genel performansının, PSO'dan daha yüksek olduğu değerlendirilmiştir. Benzer şekilde Merugumalla ve Navuri [289] PSO ve YAAlgortmalarının klasik teknikler, özellikle de Ziegler- Nichols ve Tyreus-Luyben teknikleri üzerindeki etkinliğini incelemiştir. Çalışmanın sonuçları YAAve PSO algoritmalarının geleneksel yöntemlerden daha iyi performans gösterdiğini ortaya koymuştur.

Sürü tabanlı optimizasyon yöntemleri arasında en sık kullanılan yöntem Parçacık Sürüsü Optimizasyonu (Particle Swarm Optimization- PSO)'dur. Algoritma Eberhart ve Kennedy [290] tarafından tanıtılmıştır. Algoritma sürü halinde hareket eden hayvanların hareketlerinden esinlenmektedir. Sürü üyelerinin basitleştirilmiş bir sosyal uyum modelinin simüle edilmesine dayanmaktadır. PSO algoritmalarının, yalnızca sürüdeki parçacık yer değiştirme hızını kontrol ederek etki alanı kısıtlamalarını ele alması veya bunu, mümkün olmayan her parçacığı rastgele sıfırlayarak verimsiz bir şekilde yapması nedeniyle gerçek hayat problemlerinde optimize etmeyi olanaksız hale getirebilmektedir. Bu sorunun aşılabilmesi için Kohler ve ark. [291], doğrusal ve doğrusal olmayan kısıtlamalara sahip problemleri çözebilen PSO+ adı verilen yeni bir algoritma önermişlerdir. Önerilen algoritma, parçacıkları her kısıtlamaya tam olarak uyan bir sürünün her zaman olmasını sağlamak için bir fizibilite onarım operatörü ve iki sürü kullanmaktadır. Çalışmada sürüye çeşitlilik eklemek ve arama alanı kapsamını geliştirmek için yeni bir parçacık güncelleme yöntemi; başlatma mekanizmasını hızlandırmak ve optimizasyon sürecinin başlangıç noktasında çeşitliliği sağlamak amacıyla uygun bir sürüyü başlatmak için iki buluşsal yöntem ve erken yakınsamayı en aza indirmek için bir komşu topolojisi önerilmiştir.

Bayumi ve Soliman [292] PI ve PID kontrolörlerinin parametrelerini optimize ederek sabit mıknatıslı BLDC motorun akımını ve hızını kontrol etmek için klasik PSO tabanlı bir PI/PID kontrolörü önermiştir. Önerilen PSO tabanlı PI/PID ve ZN tabanlı

PI/PID arasındaki karşılaştırmalı inceleme, önerilen tekniğin ZN tabanlı PI/PID'den daha fazla kontrol yetkinliği sergilediğini göstermiştir. Payakkawan ve ark. [293] ise DA motorların hızını kontrol etmek için PSO algoritmasına dayalı çift hatlı bir PID kontrolör önermişlerdir. İlk aşamada hızın zaman tepkileri çok seviyeli adım giriş gerilimleri tarafından belirlenmiştir. İkinci aşamada ise zaman yanıtlarının gürültüleri dalgacık yumuşak eşikleme yoluyla azaltılmıştır. Son olarak gürültüsüz zaman yanıtları PSO ile tanımlanmış ve ayarlar PID kontrol cihazı parametreleri uygulaması, orantısal, integral ve türev kazançları hem çevrimdışı hem de çevrimiçi ayarlamayla belirlenmiştir. Çevrimdışı ayarlama için PID kazançları PSO tarafından optimize edilmiştir. Önerilen PSO-PID kontrolörünün gücünü belirlemek için, ITAE amaç fonksiyonu altında tepe aşımı, yükselme süresi ve yerleşme süresi olmak üzere üç performans endeksi benimsenmiştir. Simülasyon sonuçları, PSO'nun sistem tanımlama ve PID denetleyicinin parametrelerini ayarlama için verimli bir şekilde kullanılabileceğini göstermiştir.

El-Gammal ve El-Samahy [294] Pareto-set optimizasyon çözümü olarak adlandırılan takas optimal çözüm kümesini bulmak için PID kontrolör parametrelerini aynı anda ayarlayabilen Çok Amaçlı Parçacık Sürü optimizasyonu(multi-objective PSO-MOPSO)'na dayalı bir kontrol şeması önermişlerdir. Önerilen yaklaşımın temel amacı maksimum hız aşımı, yükselme hızı, hız izleme hatası, kararlı durum hatası ve yerleşme süresinde iyileştirmeler geliştirmektir.

Roy ve Srivastava [295] FOPID kontrolörünü optimize ederek PMDC motorunun hızını izlemek için Kısıtlı PSO(Constrained PSO-CPSO) ve ZM ayarlama kurallarını önermişlerdir. Hu ve ark. [296] bu geliştirilen algoritmada, parçacıkların başlatılması tekrarlayan bir düzende yürütüldüğü ve yalnızca kısıtlamaların gerekliliklerini yerine getiren parçacıklar, parçacığın en iyi uygunluk fonksiyonunun ve en iyi küresel uygunluk değerinin tahminine dahil edildiğini belirtmişlerdir.

Karınca Kolonisi Algoritması(Ant Colony Optimization-KKA) Dorigo ve Gambardella [297] tarafından geliştirilmiştir. Optimizasyon sorunlarına uygulanışı ise Dorigo ve ark. [298] tarafından gerçekleştirilmiştir. İlk uygulamaların başarısı, algoritmaya yönelik daha fazla çalışma yapılmasını teşvik etmiştir. Karınca kolonisi optimizasyonunun ilham verici kaynağı, gerçek karınca kolonilerinin yiyecek arama davranışdır. Bu davranış, yapay karınca kolonilerinde, ayrık optimizasyon problemlerine, sürekli optimizasyon problemlerine ve telekomünikasyondaki

yönlendirme ve yük dengeleme gibi önemli problemlere yaklaşık çözümlerin aranması için kullanılmaktadır [299].

Ibrahim [300] geliştirilmiş bir KKA önemiştir. Yöntem yerel minimum tuzağından kurtulma ve yakınsama oranının hızlandırılmasına odaklanmıştır. DA motor, performans değerlendirmesi ve testi için bir referans noktası olarak kullanılmış DA motorun matematiksel modeli MATLAB/SIMULINK ortamında oluşturulmuştur. Çalışma, DA motor Kontrolü için PID kontrol cihazının parametre optimizasyonuna KKA'nun verimli sonuçlar sağladığını göstermektedir. Simülasyon sonuçları, KKA'nun yerel minimum tuzağından başarılı bir şekilde kurtulmak ve en iyi çözümleri elde etmek için kendi kendini uyarlama ve pozitif geri besleme sürecine sahip olduğunu göstermiştir. Önerilen KKA-PID, yükselme zamanı, yerleşme zamanı ve tepe aşımı açısından ZN-PID'yi geride bırakmıştır.

Yapay Balık Sürüsü Algoritması (Artificial Fıdh Swarm Algorithm-YBSA), Sürü Zekası (SI) kümesine aittir ve popülasyon ve stokastik arama temelinde çalışır. Algoritma, yüksek yakınsama hızı, esneklik, hata toleransı ve yüksek doğruluk gibi önemli avantajlara sahip olan Sürü zekası yönteminin en iyi yaklaşımlarından biridir. Algoritma ilk olarak Li ve ark. [301] tarafından tanıtılmıştır. Algoritma amaç fonksiyonunun gradyan bilgisinden bağımsızlık, karmaşık doğrusal olmayan yüksek boyutlu problemleri çözme yeteneği gibi çeşitli avantajlara sahiptir. Sistem ilk olarak rastgele oluşturulmuş bir dizi potansiyel çözümle başlatılır ve daha sonra optimum olanı aramayı iteratif olarak gerçekleştirir [302].

Zhu ve ark. [303], BLDC motorun hızını kontrol ederken PID kontrolörü için optimum kazançları bulmak için YBSA'yı kullanmıştır. Amaç fonksiyonu olarak yeterli bir uygunluk indeksi seçilmiş ve PID parametrelerini optimize etmek için YBSA'nın temel prensibinin değerlendirilmesi araştırılmıştır. Deneysel sonuçlar, PID optimizasyonlu YBSA'nın BLDC motor kontrol sistemi yanıtının tatmin edici bir şekilde kontrol edilmesini sağladığını ortaya koymuştur.

1.7.5. Fizik Temelli MS Algoritmalar

Fizik temelli algoritmalar eylemsizlik, yer çekimi ve elektromanyetik gibi çeşitli fizik yasalarından ilham almaktadırlar. Bu sınıfta sayılan algoritmaların çoğu Newton yasalarına ve kuantum hesaplama dayanmaktadır [304]. Bu tür

algoritmalarından bazıları Yerçekimi Arama Algoritması(Gravitational Search Algorithm - YAA), Yük Sistemi Arama (Charged System Search -YSA) ve Akım Arama Algoritması (Current Search Algorithms - AAA)'dır.

Newton'un yerçekimi kuvveti ve kütle etkileşimi ilkesine odaklanan Yerçekimsel Arama Algoritması(Gravitational Search Algorithm-YAA) Rashedi ve ark. [305] tarafından tanıtılmıştır. Önerilen algoritma teorisi, iki parçacık arasındaki çekim kuvvetlerinin kütlelerinin büyüklüğü ile orantılı, ancak aralarındaki mesafenin karesi ile ters orantılı olduğu ilkesine dayanmaktadır. Yerçekimi etkisi sayesinde tüm ajanlar birbirini çeker ve bu kuvvet tüm ajanların küresel olarak ağır ajanlar yönünde hareket etmesini sağlar [306].

Duman ve ark. [307] yerçekimsel Arama algoritmasını DA motor kontrolünde en uygun PID parametrelerinin belirlenmesi için kullanmışlardır. DA motor ikinci ve üçüncü dereceden sistem olarak kabul edilmiş ve amaç fonksiyonu olarak ortalama hata karesi(MSE) yöntemi kullanılmıştır. YAA'nın performansı ZN yöntemi ile karşılaştırılmıştır. Simülasyon sonuçları, önerilen kontrolörlerin DA motorun hız ve konum kontrolünü sağlamadaki etkin ve sağlam olduğunu göstermiştir.

Yüklü Sistem Araması (Charged System Search-YSA) algoritması Kaveh ve Talatahari [308] tarafından tanıtılmıştır. Algoritmada elektrostatikteki geçerli Coulomb yasasını ve Newton mekaniği yasaları kullanılmıştır. Kullanılan her bir aracının yüklü parçacık(CP) olduğu çok aracı bir yaklaşımdır ve CP'ler uygunluk değerlerine ve ayrılma mesafelerine göre birbirlerini etkileyebilmektedirler. Ortaya çıkan kuvvetin miktarı elektrostatik kanunları kullanılarak, hareketin kalitesi ise Newton mekaniği kanunları kullanılarak belirlenmektedir. Yapılan çalışmanın sonuçları doğrusal veya dış bükey olmayan optimizasyon problemlerine uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlar evrimsel algoritmalarla karşılaştırılmış ve önerilen algoritmanın rakiplerinden daha iyi performans gösterdiği belirtilmiştir.

Precup ve ark. [309] Takagi-Sugeno oransal-integral bulanık kontrolörlerin (T-S PI-FC'ler) en uygun şekilde ayarlanması için yeni bir Uyarlanabilir Yüklü Sistem Arama (AYSA) algoritması önermişlerdir. Algoritmanın beş aşamadan oluşmaktadır. Bunlar: etkileşim, keşif, açıklama, detaylandırma ve değerlendirmedir ACSS algoritması, mutlak kontrol hatası artı kareli çıkış hassasiyet fonksiyonunun toplamı olarak ifade edilen amaç fonksiyonlarını en aza indirmeyi amaçlayan optimizasyon problemlerini çözme amacıyla geliştirilmiştir. ACSS algoritması, üç YSA

parametresinin yineleme indeksine uyum sağlmasına izin vererek, azaltılmış süreç kazanım hassasiyeti ile optimal bulanık kontrol sistemleri için etkili bir ayarlama yöntemi sunmuştur. Sonuçlar azaltılmış parametrik hassasiyete sahip optimal bulanık kontrol sistemlerinde yüksek performansa sahip olduğunu göstermiştir.

Elektrik şebekelerinden akan elektrik akımından esinlenen Akım Arama(Current Search-CS) Algoritması, Sakulin ve Puangdownreong [310] tarafından tanıtılmıştır. CS algoritması, açık ve kısa devrelerden akan elektrik akımının akıllı davranışına dayanan bir optimizasyon algoritmasıdır. Algoritma, etkinliği ve sağlamlığını göstermek için çok değişkenli test fonksiyonlarıyla test edilmiştir. Elde edilen sonuçlar Genetik Algoritma, Parçacık Sürü Optimizasyonu ve Tabu Arama Algoritması sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, geliştirilen algoritmanın tüketilen makul süre içinde diğerlerinden üstün olduğunu göstermiştir.

Algoritma, Puangdownreong [311] tarafından DA motorun hız takibi için kullanılmıştır. Algoritmanın keşif ve sömürü özellikleri PID denetçisinin parametrelerinin ayarlanma sürecinde küresel optimumun araştırılması için kullanılmıştır. Önerilen algoritma genetik algoritma, parçacık sürü optimizasyonu ve adaptif tabu arama yöntemleri ile karşılaştırılmıştır. Sonuçlar CS algoritmasının diğer algoritmalarından daha iyi performansa sahip olduğunu göstermiştir.

Tablo 1.4. Optimizasyonda kullanılan bazı MS Algoritmalar ve Örnek Çalışmalar

MS Algoritma	Tanıtladığı Makale	Tanıtladığı Yıl	Uygulama Örneği
Jaya Optimizasyon Algoritması - Jaya Optimization Algorithm-JOA	R. Rao, Jaya: A simple and new optimization algorithm for solving constrained and unconstrained optimization problems, Int. J. Ind. Eng. Comput., vol. 7, no. 1, pp. 19–34, 2016.	2016	R. K. Achanta and V. K. Pamula, DC motor speed control using PID controller tuned by jaya optimization algorithm, in IEEE International Conference on Power, Control, Signals and Instrumentation Engineering, ICPSI 2017, Chennai, 2018, pp. 983-987.
Emperyalist Rekabetçi Algoritma – Imperialist Competitive Algorithm-ERA	E. Atashpaz-Gargari and C. Lucas, Imperialist competitive algorithm: An algorithm for optimization inspired by imperialistic competition, in 2007 IEEE Congress on Evolutionary Computation, CEC 2007,	2007	L. Ghalehpardaz and M. Shafiee, Speed control of DC motor using imperialist competitive algorithm based on PI-like FLC, in Proceedings - CIMSIm 2011: 3rd International Conference on Computational Intelligence,

	Singapore, 2007, pp. 4661–4667.		Modelling and Simulation, Langkawi, 2011, pp. 28–33
Geliştirilmiş Bakteriyel Yemleme Algoritması – Improved Bacterial Foraging Algorithm-GBYA	X. Diao, H. Zhu, and D. Zhang, Speed and Displacement Control System of Bearingless Brushless DC Motor Based on Improved Bacterial Foraging Algorithm, in MATEC Web of Conferences, 2016, vol. 75, pp. 1–5.	2016	X. Diao, H. Zhu, and D. Zhang, Speed and Displacement Control System of Bearingless Brushless DC Motor Based on Improved Bacterial Foraging Algorithm, in MATEC Web of Conferences, 2016, vol. 75, pp. 1–5.
Gri Kurt Optimizasyoncusu – Grey Wolf Optimizer- GKA	S. Mirjalili, S. M. Mirjalili, and A. Lewis, Grey Wolf Optimizer, Adv. Eng. Softw., vol. 69, pp. 46–61, Mar. 2014.	2014	U. Bhatnagar and A. Gupta, Application of Grey Wolf Optimization in Optimal Control of DC Motor and Robustness Analysis, Ski. Res. J., vol. 8, no. 1, pp. 19–25, 2018
İstilacı Ot Algoritması – Invasive Weed Optimisation-IWO	A. R. Mehrabian and C. Lucas, A novel numerical optimization algorithm inspired from weed colonization, Ecol. Inform., vol. 1, no. 4, pp. 355–366, Dec. 2006.	2006	M. Khalilpour, H. H. Razmjoo, N., and P. Moallem, Optimal Control of DC motor using Invasive Weed Optimization (IWO) Algorithm, in Majlesi Conference on Electrical Engineering, Isfahan, Iran, 2011, pp. 1–7.
Guguk Kuşu Algoritması – Cuckoo Search Algorithm-GKA	X. S. Yang and S. Deb, Cuckoo search via Lévy flights, in 2009 World Congress on Nature and Biologically Inspired Computing, NABIC 2009 - Proceedings, Coimbatore, 2009, pp. 210–214.	2009	V. Vishal, V. Kumar, K. P. S. Rana, and P. Mishra, Comparative study of some optimization techniques applied to DC motor control, in Souvenir of the 2014 IEEE International Advance Computing Conference, IACC 2014, Gurgaon, 2014, pp. 13421347
Çiçek Tozlaşma Algoritması – Flower Pollination Algorithm-ÇTA	X. S. Yang, Flower pollination algorithm for global optimization, in Unconventional Computation and Natural Computation. UCNC 2012, 2012, vol. 7445, pp. 240–249	2012	L. Dwi, R. D. Muhammad, W. Widodo, and R. Imam, Optimization of PID Controller Design for DC Motor Based on Flower Pollination Algorithm, in The 2015 International Conference on Electrical, Telecommunication and Computer Engineering (ELTICOM 2015), Medan, 2016, pp. 1–5.
Yapay Arı Kolonisini – Artificial Bee Colony Algorithm-YAKO	D. Karaboga, An idea based on honeybee swarm for numerical optimization, Technical Report TR06, Erciyes University, Engineering Faculty,	2005	L. Huang and Y. Wang, Design for motor speed fractional order controller based on improved artificial bee colony algorithm, in 2016 Chinese Control and Decision Conference (CCDC),

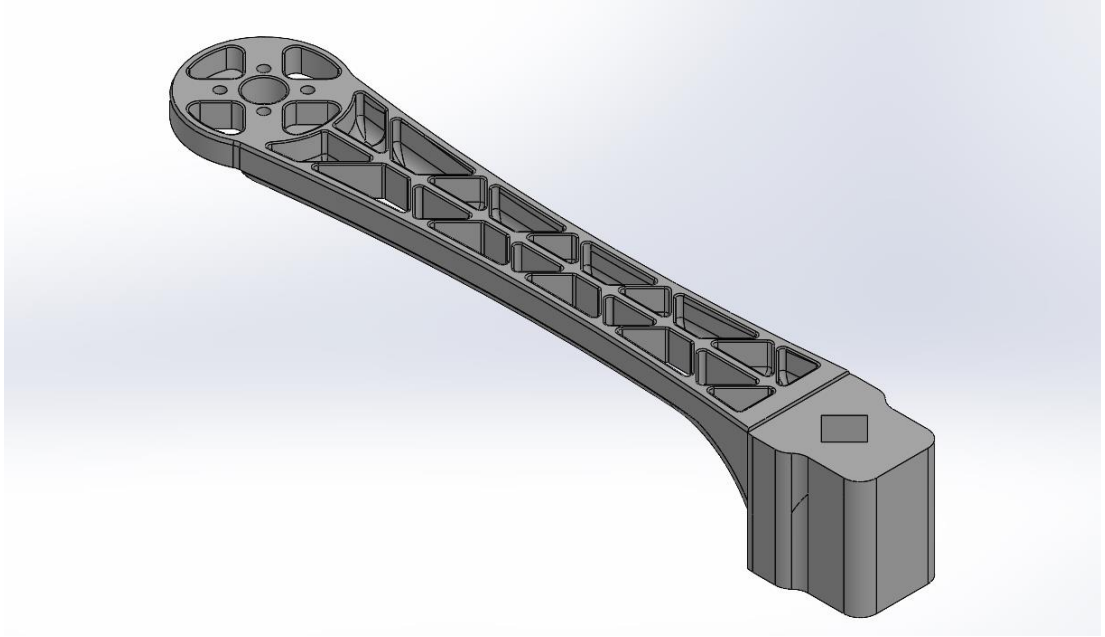
	Computer Engineering Department, 2005		Yinchuan, 2016, pp. 3244–3249.
Yarasa Algoritması – Bat Algorithm-BA	X. S. Yang, A new metaheuristic Bat-inspired Algorithm, in <i>Studies in Computational Intelligence</i> , 2010, vol. 284, pp. 65–74	2010	K. Singh, P. Vasant, I. Elamvazuthi, and R. Kannan, PID tuning of servo motor using bat algorithm, in <i>Procedia Computer Science</i> , 2015, vol. 60, no. 1, pp. 1798–1808
Yüklü Sistem Araması – Charged System Search-YSA	Kaveh and S. Talatahari, A novel heuristic optimization method: Charged system search, <i>Acta Mech.</i> , vol. 213, no. 3–4, pp. 267289, 2010.	2010	Precup, R. E., David, R. C., Petriu, E. M., Preitl, S., & Rădac, M. B. (2014). Novel adaptive charged system search algorithm for optimal tuning of fuzzy controllers. <i>Expert Systems with Applications</i> , 41(4), 1168-1175.
Akım Arama Algoritması – Current Search-CS	A. Sakulin and D. Puangdownreong, A Novel Meta-Heuristic Optimization Algorithm: Current Search, in <i>Proceedings of the 11th WSEAS international conference on Artificial Intelligence, Knowledge Engineering and Data Bases</i> , Wisconsin, USA, 2012, pp. 125–130	2012	D. Puangdownreong, Current Search: Performance Evaluation and Application to DC Motor Speed Control System Design <i>Intell. Control Autom.</i> , vol. 04, no. 01, pp. 42–54, 2013

2. MATERYAL VE METOD

2.1. İHA Montajı

Bu tez çalışmasında, İHA tasarım aşamasında tasarlanan insansız hava aracının minimum şekilde metal parça kullanılması ve imalatının 3B yazıcılar ile imal edilebilir şekilde tasarlanması planlanmıştır. Tasarımda kullanılmak üzere SolidWorks programı tercih edilmiştir. Tercih edilme sebepleri dahili olarak sunulan simülasyon sistemi ve kullanılabilir malzeme kütüphane sistemidir.

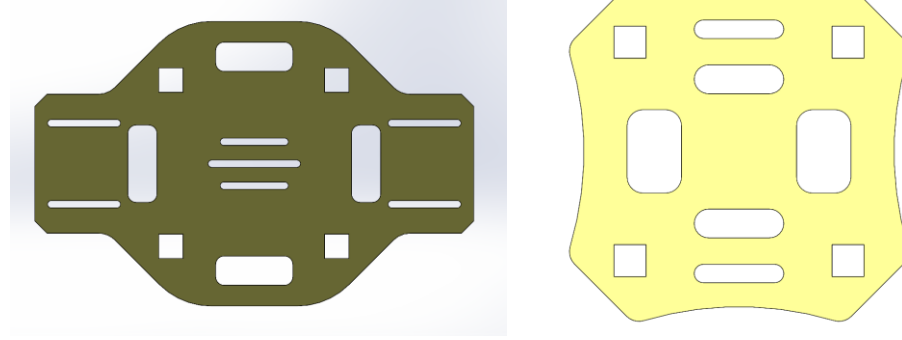
İHA kollarının tasarımı gerçekleştirilirken F450 gövde ve kol geometrisi referans alınarak bağlantı şekli değiştirilerek somun ve civata gibi metal ekipmanlar kullanılmadan gövde bağlantı şekli oluşturulmuş ve Şekil 2.1’de gösterilmiştir.



Şekil 2.1. İHA Kolu

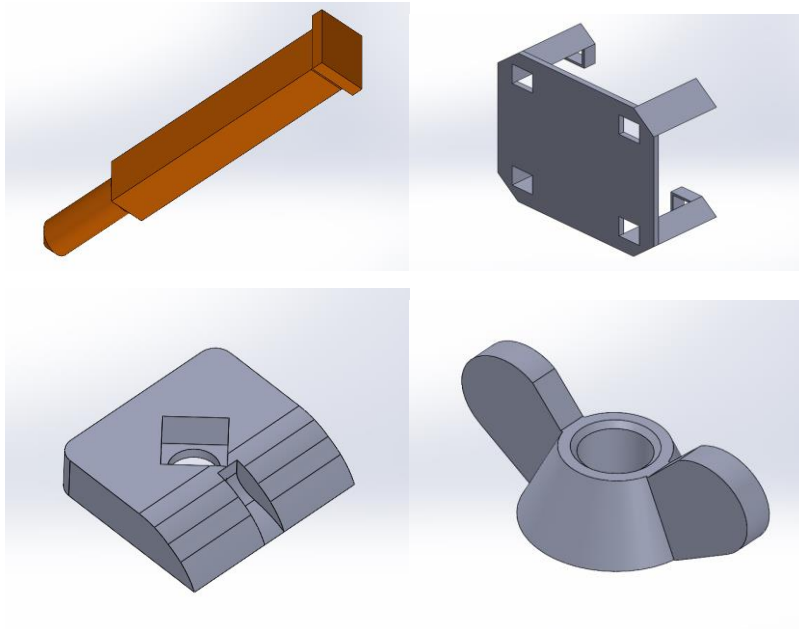
Şekil 2.1’ de gösterilen insansız hava aracının kolu gösterilmektedir. Gösterilen kolda bulunan bağlantı noktası kare şekilde seçilmiştir ve diğer gövde ekipmanları ile bağlanabilecek şekilde düzenlenmiştir. Kolların bağlanacak olduğu

gövdede bu geçme delikleri hazırlanmıştır. Hazırlanan alt ve üst gövde ekipmanları Şekil 2.2.de gösterilmektedir.



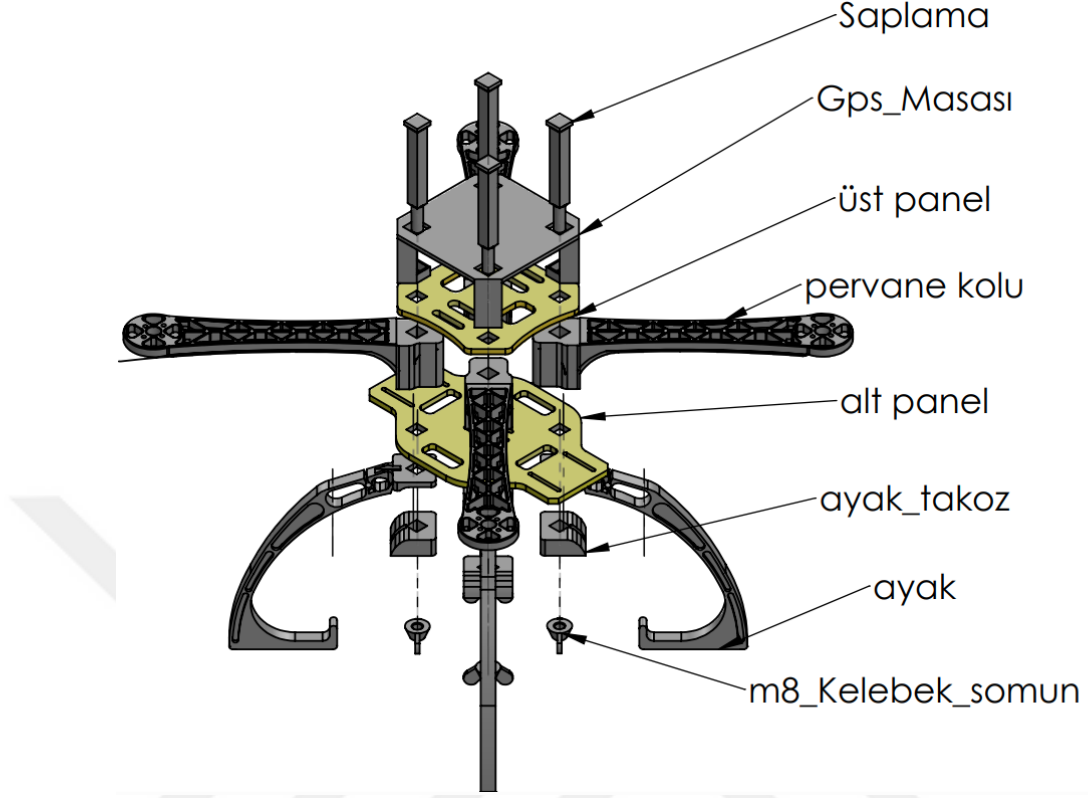
Şekil 2.2. Gövde Ekipmanları

Gövde ve kol sistemlerinin bağlantı sisteminin oluşturulması ve imal edilmesi ve elektronik ekipmanların kullanılabilmesi için bir GPS aparatı tasarlanmıştır. Bu tasarım sayesinde oluşturulan saplama modelinin baş kısmının konik şekilde basabileceği bir yüzey oluşturulmuştur. Oluşturulan bu yüzey ile GPS aparatı, Üst gövde, Kol, alt gövde, ayak ve ayak desteğinin kelebek somun ile birbirine bağlanması sağlanmıştır.



Şekil 2.3. Bağlantı Elemanları

Tasarlanan ekipmanlar ve bağlantı Şekli 2.3 de gösterilmektedir. Şekil 2.4 nolu görselde bulunan patlatma resmi ve tam montaj hali gösterilmektedir.



Şekil 2.4. Montajı Tamamlanmış İHA Görseli

Montaj ile tamamlanan İHA taşıma kapasitesi ve Statik dayanımlarının incelenmesi için statik analizler yapılmıştır. Yapılan Montaj işleminden sonra toplam ağırlığın hesaplanması için Solidworks Kütle özellikleri kullanılmıştır. İHA'nın toplam kütlesi 884.8 gram olarak hesaplanmıştır.

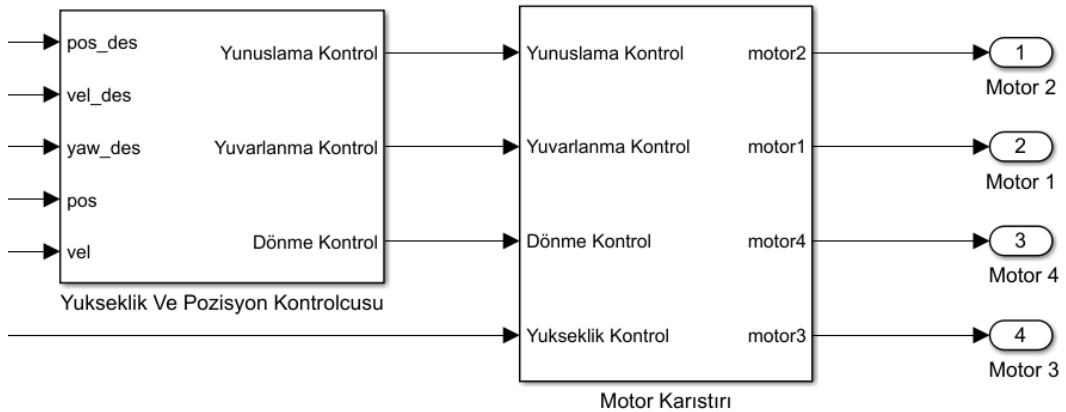
2.2. Matlab, Simulink ve Simscape

Matlab, Matris Laboratuvarı olarak bilinen ve matematiksel hesaplamalar, veri analizi, görselleştirme ve algoritmaları uygulamak için kullanılan bir yüksek düzeyde programlama dilidir. Özellikle mühendislik, bilimsel araştırmalar ve akademik çalışmalarda yaygın olarak kullanılan Matlab, kolay kullanımı ve geniş işlevsellikleri ile tanınır. Matlab, matris ve dizi işlemlerini doğrudan destekler ve bu da lineer cebir, diferansiyel denklemler, istatistiksel analizler gibi birçok matematiksel problemin çözümünü kolaylaştırır. Ayrıca, Matlab, grafikler oluşturmak, verileri görselleştirmek, simülasyonlar yapmak ve modeller oluşturmak için zengin bir grafik arayüzü sunar.

Matlab'ın güçlü yanlarından biri de Simulink ve Simscape gibi araçları içermesidir. Simulink, Matlab ile entegre bir simülasyon ortamıdır ve dinamik sistemleri modellemek, simüle etmek ve analiz etmek için kullanılır. Simulink, blok diyagramları kullanarak sistem modelleri oluşturmanıza olanak tanır ve ardından bu modelleri simüle edebilirsiniz. Simscape ise fiziksel sistemleri modellemek için kullanılır ve elektriksel, mekanik, hidrolik ve diğer türdeki sistemlerin davranışlarını analiz etmenize olanak sağlar.

Bu nedenle, Matlab, Simulink ve Simscape gibi araçlarla birlikte, mühendislik uygulamaları, simülasyonlar, kontrol sistemleri tasarımı ve diğer birçok alanda kullanılabilir geniş bir platform sunar.

Simulink, kullanıcıların sistemleri grafiksel olarak modellemelerine ve bu modelleri düzenlemelerine olanak tanır. Bu, karmaşık sistemlerin daha kolay anlaşılmasını ve görselleştirilmesini sağlar. Simulink, sistemi oluşturmak için çeşitli bloklar sağlar. Bu bloklar, matematiksel işlemlerden, mantıksal operasyonlara, sinyal işleme algoritmalarından, kontrol sistemlerine kadar geniş bir yelpazede bulunabilir. Bloklar, girişleri ve çıkışları arasında bağlantılar kurarak sistemdeki veri akışını temsil eder. Örnek blok, giriş ve çıkışlar Şekil 2.5 gösterilmektedir. Şekilde yükseklik ve pozisyon kontrolcü bloğu ayrıca motor karıştırıcı bloğu göstermektedir.

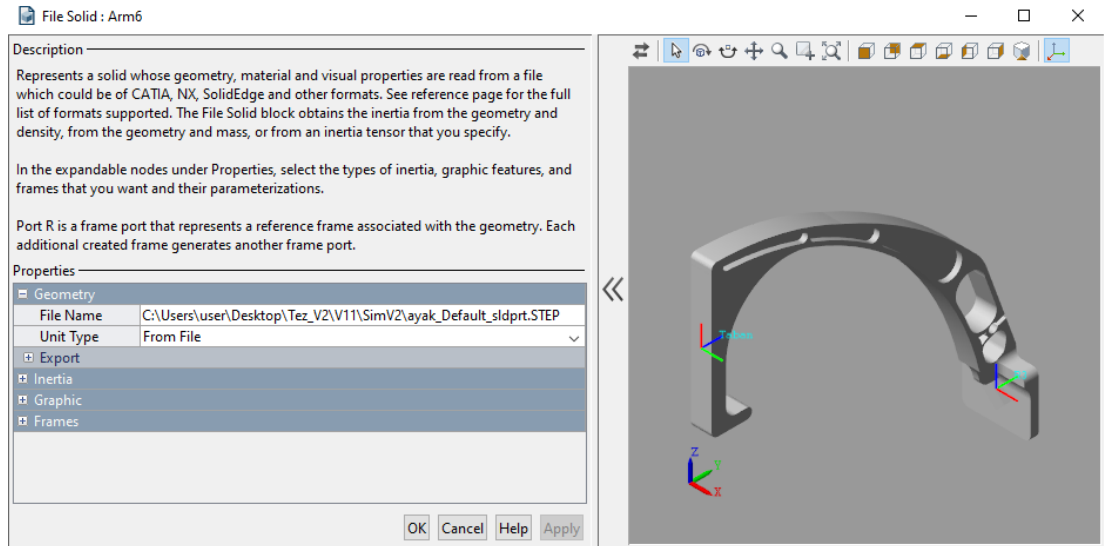


Şekil 2.5. Matlab, Simulink Yükseklik ve Pozisyon Kontrolcüsü ve Motor Karıştırıcı Blok gösterim

Simulink, model oluşturduktan sonra, çeşitli girişler altında nasıl davranacağını simüle etmenize olanak tanır. Bu, sistemin performansını test etmek, tasarımınızı optimize etmek ve farklı senaryolar altında davranışını incelemek için kullanılabilir. Ayrıca, Simulink, modelinizin doğruluğunu analiz etmek için çeşitli araçlar sunar. Simulink, kontrol sistemleri, sinyal işleme, görüntü işleme, iletişim sistemleri, otomotiv sistemleri ve daha pek çok alanda yaygın olarak kullanılır. Simulink, mühendislerin ve araştırmacıların karmaşık sistemlerin davranışlarını modellemelerine, simüle etmelerine ve analiz etmelerine olanak tanır. Bu da ürün geliştirme sürecinde verimliliği artırır ve tasarım hatalarının erken aşamalarda tespit edilmesine yardımcı olur.

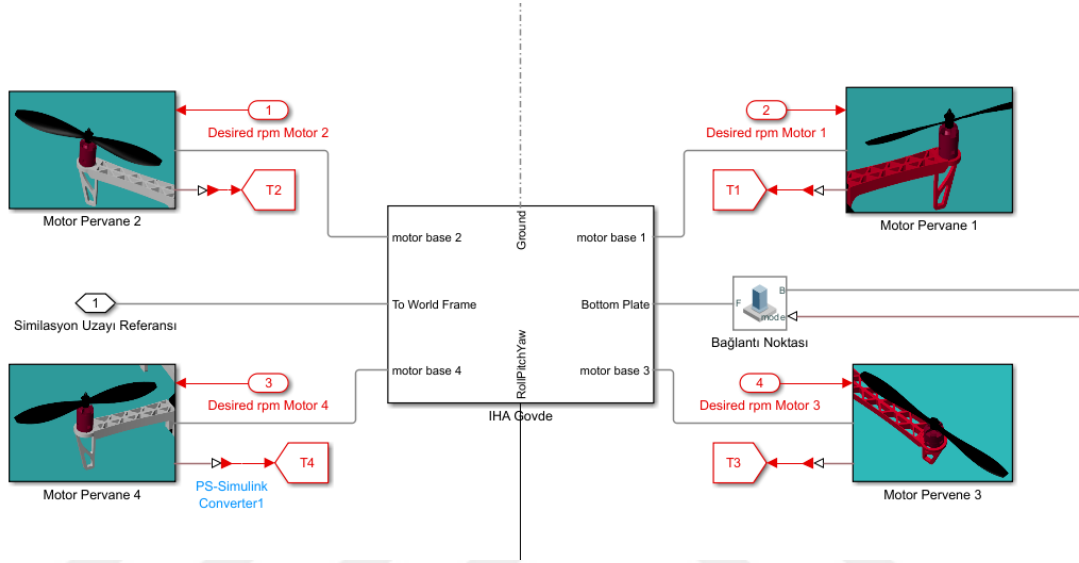
2.2.1. İHA'nın Simscape Ortamına Aktarılması

Matlab Simulink ile SolidWorks(CAD)'de tasarlanan İHA bir simülasyon ortamı oluşturulmuştur. Simülasyon ortamı oluşturulurken Simscape simülasyon ortamı kullanılmıştır. Tasarlanan İHA STL dosya formatı ile Simscape Multibody'e aktarılmıştır. Dosyaların aktarımını File Solid fonksiyonu ile gerçekleştirilmiştir.



Şekil 2.6. File Solid Fonksiyon Görseli

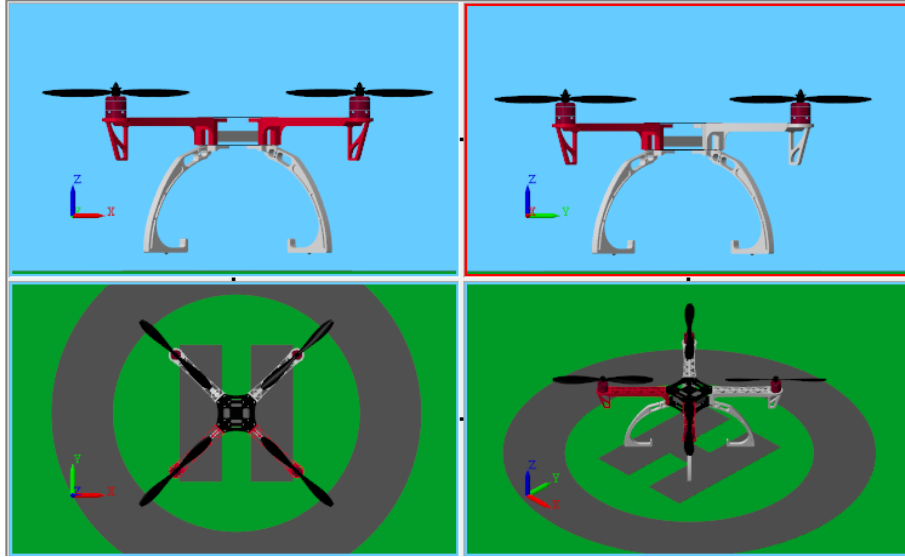
Hareketsiz kısımların montajından sonra hareketli parçaların montajı gerçekleştirilmiştir. Hareketli parçaların montajı sırasında Revolute Joint fonksiyonu kullanılmıştır. Kullanın saturasyon bloğu ile gelen komut maksimum ve minimum değerleri sınırlandırılmıştır. Saturasyon blokundan sonra Simulink-PS Converter ile sinyal fiziksel sinyale dönüştürerek kullanılmıştır.



Şekil 2.9. Alt Bağlantıların Oluşturulması

Kol montaj ve gövdenin montaj katı model olarak aktarımı tamamlandıktan sonra Simulink ortamında bağlantılarının kolaylaştırılması için alt sistemler olarak tasarlanmıştır. Tasarlanan alt sistemler kendi aralarında bağlantıları gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen bağlantılar Alt Bağlantı Şekil 2.9. de gösterilmiştir.

Simscape ortamında montajı tamamlanan İHA Şekil 2.10 de gösterilmiştir.



Şekil 2.10. İHA'nın Simscape Uzayında Görünümü

2.2. Kargo Kutusunun Simscape Ortamına Aktarılması

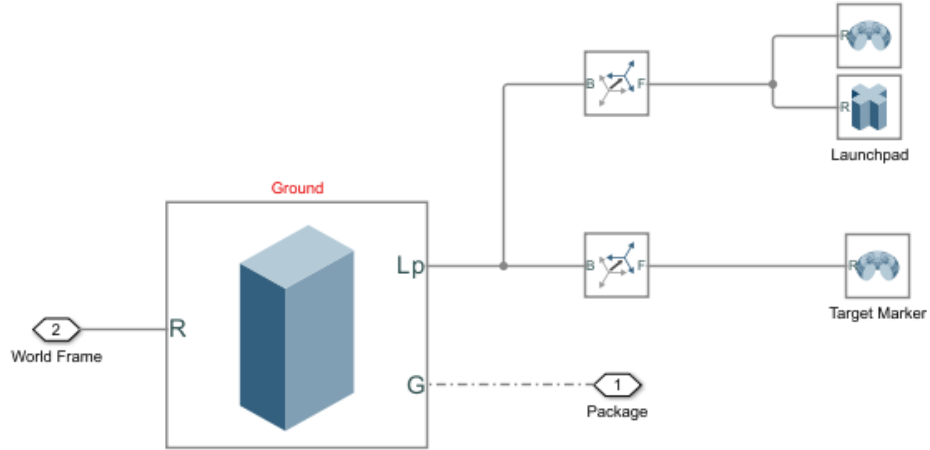
Taşınacak olan kargo kutusu için Simscape'in içerisinde bulunan hazır küp kullanılarak hazırlanmıştır. Hazırlanan kutunun sekiz köşesine zemin ile temasını sağlanabilmesi için Uzaysal Temas Kuvvet kullanılarak alt sistemler oluşturulmuştur. Alt sistem örneği Uzaysal Temas Kuvvet Bağlantı Şekil 2.11. de gösterilmiştir.



Şekil 2.11. Uzaysal Temas Kuvvet Bağlantısı

Tutucu kol ise SolidWorks programı kullanılarak tasarlanmıştır. Bundan dolayıdır ki File Solid blogu ile simülasyon ortamına eklenmiştir. Eklendikten sonra ise referans noktası tanımlanmış ve kutu ile bağlantısı gerçekleştirilmiştir. Örnek bağlantı şekli Kutu Bağlantı Şekli 2.12. de gösterilmiştir.

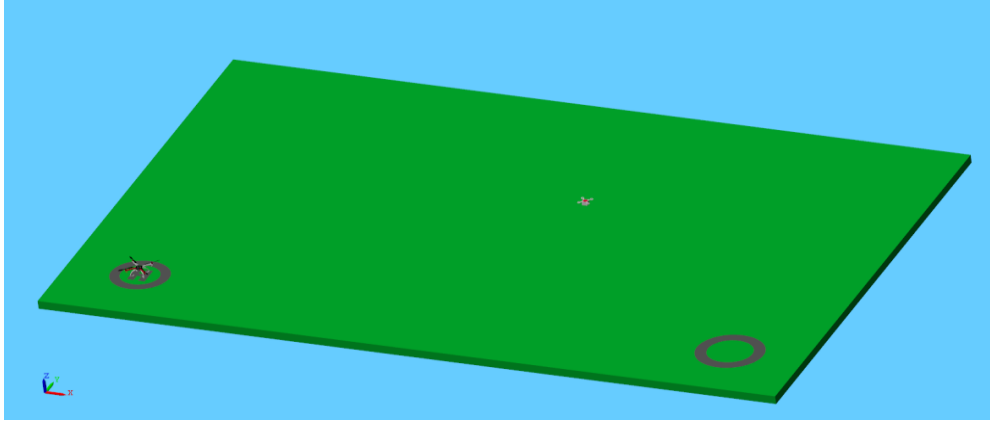
Zemin tasarımı kutu tasarımda ki gibi Simscape içerisinde bulunan Kutu ile gerçekleştirilmiştir. Kalkış ve İniş için kullanılacak noktaya ‘H’ şekli eklenmiştir. Kutuyu bırakma noktası için ise ‘O’ şekli eklenmiştir. Oluşturulan zemin montajı Simulink ortamında Simulink Zemin Bağlantı Şekli 2.14 de gösterilmiştir.



Şekil 2.14. Simulink Zemin Bağlantı Şekli

Montajı tamamlanan İHA, kargo kutusu, zemin Simscape simülasyon ortamına aktarımından sonra hareket kontrol algoritması ve görev kontrol sistemi Simulink ile tasarlanmıştır.

Hazırlanan Simscape simülasyon ortamı, Şekil 2.15. Simscape İHA simülasyon ortamı'nda gösterilmiştir. Oluşturulan Simülasyon ortamında bir kalkış noktası bir adet Kutu alma noktası bir adet de kutu bırakma noktası bulunmaktadır. Simülasyon ortamının Simscape ortamında oluşturulmasından sonra Görev kontrol algoritması ve Uçuş kontrol Algoritmasının oluşturulması gereklidir.



Şekil 2.15. Simscape’de İHA Simülasyon Ortamı

2.3. Görev Kontrol Sistemi

Görev Kontrol Sistemi oluşturulurken simülasyon belirli parametrelere ihtiyaç duymaktadır. Bunlar kalkış pozisyonu, uçuş yüksekliği, kutunun tahmini olarak alınacağı pozisyon ve kutunun bırakılacağı noktadır. Bu verilerin rahat şekilde değiştirilmesi için bir kullanıcı arayüzü hazırlanmıştır. Hazırlanan Görev Kontrol Sistemi Şekil 2.16. de gösterilmektedir.



Şekil 2.16. Görev Kontrol Sistemi

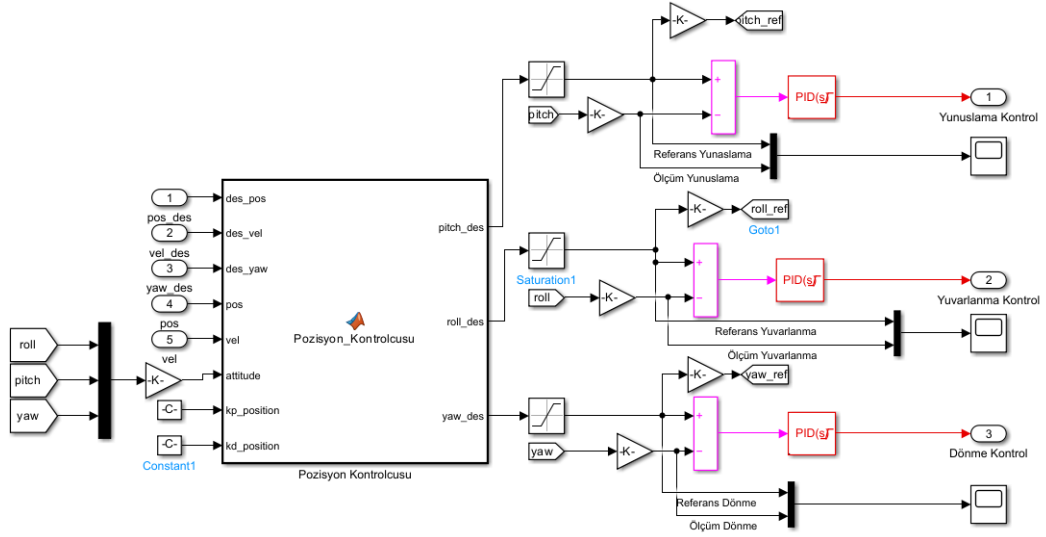
Tasarlanan görev bilgisayarı gideceği konumları anlık olarak karşılaştırarak hedef konuma ulaşmış olup olmadığını denetleyecektir ve konuma ulaşmış ise bir sonraki hedef konumu X-Y-Z olarak hareket uçuş kontrol algoritmasına verecektir. Görev bilgisayarının ihtiyaç duyduğu anlık pozisyon verisi ise gövdeye montajlanmış bir Transform sensörü ile sağlanmıştır. Transform sensörü ile simülasyon ortamının referans noktası ile arasındaki mesafeyi metre olarak iletilecektir. Transform sensörü

ile elde edilen konum bilgisi Uçuş Kontrol algoritmasında kullanılarak İHA'nın motor komutları oluşturulacaktır.

2.3.1. Uçuş Kontrol Algoritması

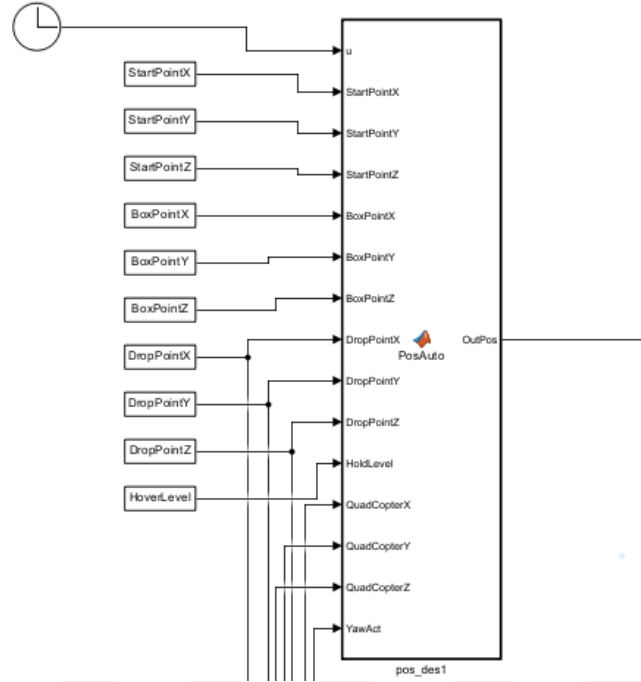
Görev kontrol sisteminden elde edilen konum ve hız bilgileri kullanılarak, görev bilgisayarından gelen hedef konum ve transform sensöründen gelen bilgiler eşliğinde sistemin kontrolünü gerçekleştirecektir. Kontrol metodu olarak PID algoritması tercih edilmiştir.,

Şekil 2.17 de gösterilen Pozisyon kontrol bloğu ile sistem içerisinde Doğrudan Kosinüs Matrisi(DKM) kullanılarak EULER açı transformu kullanılarak sistemin Simscape uzayında yapmış olduğu Yunuslama, Yuvarlanma ve Dönme eksenlerinin radyan cinsinden açılarını hesaplamaktadır. Hesaplanan Yunuslama, yuvarlanma ve dönme eksenleri PID bloklarına giriş sinyali kullanılarak stabil tutulması amaçlanmıştır.



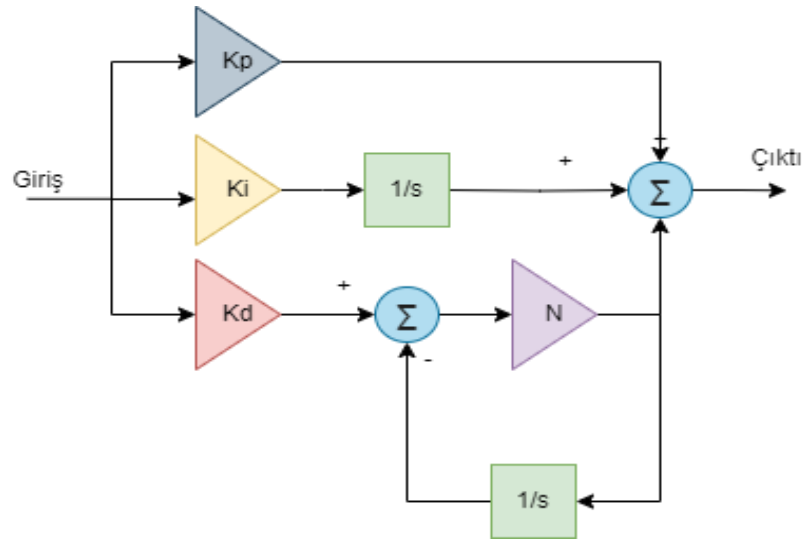
Şekil 2.17. Pozisyon Kontrolcüsü ve PID Blokları

PID bloklarında kullanılan referans değerleri Pozisyon kontrol algoritmasından gelmektedir. Pozisyon kontrol algoritmasından çıkan referans değerleri ile İHA'nın Simscape uzayındaki anlık verileri kullanarak PID bloklarında kullanılmaktadır.



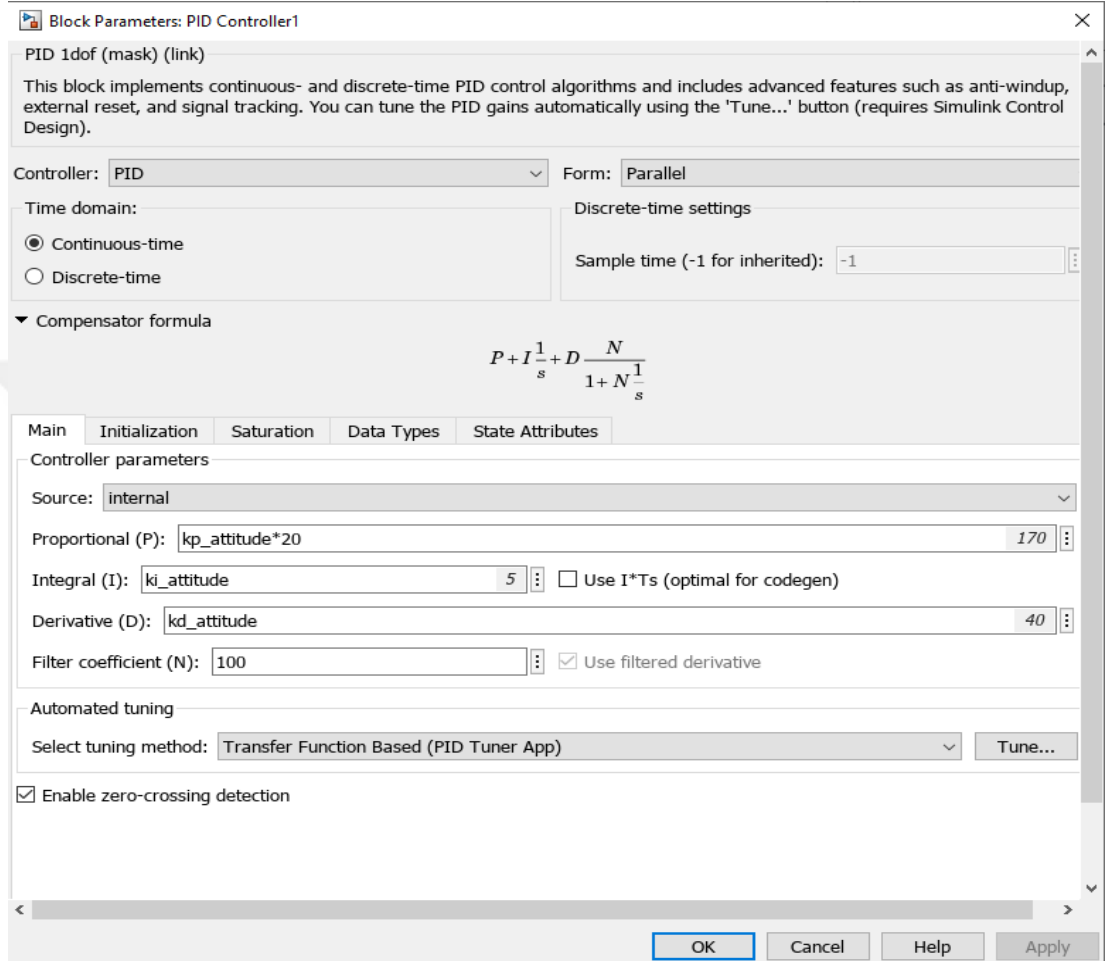
Şekil 2.18. Görev Kontrol Algoritması Görseli

MATLAB’da kullanılmış olan filtrelili PID fonksiyonunun fonksiyon blok diyagramı Şekil 2.19 göstermektedir. Bu PID yunuslama, yatış, sapma eksenlerinde ve yükseklik için kullanılmıştır. Kullanılan PID bloğu sayesinde sistemin stabil şekilde tutulması hedeflenmiştir. PID bloğunda kullanılan filtre ile PID denetleyicinin türev kısmı gürültüye karşı korunması hedeflenmiştir.



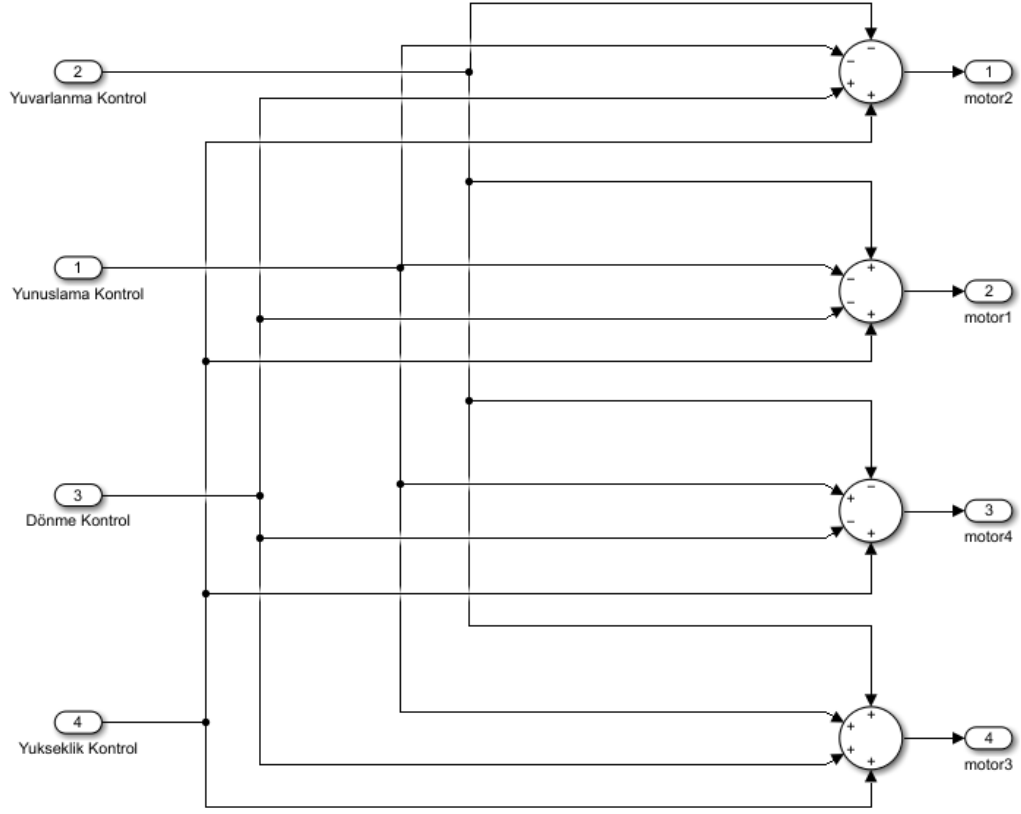
Şekil 2.19. Filtrelili PID

Matlab Simulink ortamında PID bloklarının parametre ayarı için bir görsel arayüz sistemi sunmaktadır. Bu arayüz ile PID'nin ihtiyaç duymuş olduğu gerekli parametreler rahat bir şekilde erişebilmesi ve güncellenmesi sağlanmıştır. PID arayüzü Şekil 2.20 gösterilmektedir.



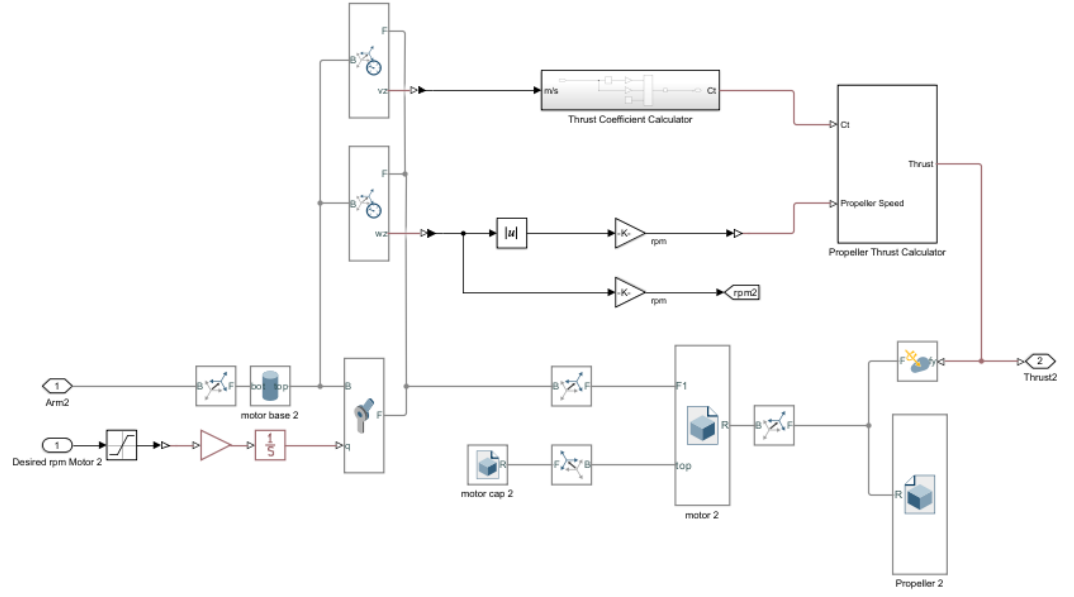
Şekil 2.20. MATLAB PID Arayüzü

PID kontrolcüsünden çıkan kontrol sinyallerinin bir motor kombinasyonuna bağlanması gerekmektedir. Motorların dönme hızları kontrol edilerek sistemin hareket etmesi sağlanacaktır. Kullanılan her bir motor için bir kontrol sinyali oluşturulmuştur. Oluşturulan Şekil 2.21 Motor karıştırıcı bloğunun iç görseli gösterilmektedir. Şekilde gösterilen Simulink Blokları kullanılmıştır. Kullanılan simulink blokları sayesinde motorlara gönderilecek olan sinyallerin oluşturulması sağlanmıştır. Görsel incelendiğinde kullanılan motorların farklı yönlerde döndüğü anlaşılabilir.



Şekil 2.21. Matlab Simulink Motor Karıştırıcı Blok İç Gösterimi

Hesaplanan motor hızlarına göre sistemde oluşturulan fiziksel kaldırma kuvvetinin hesaplanması için kullanılan Şekil 2.22’de Motor Kuvvet bloğu gösterilmektedir. Motor karıştırıcı fonksiyonundan gelen motor hız parametre sınırlandırılmıştır. Bir motorun maksimum çıkabileceği dönme hızı belirlenmiştir. Bu sayede oluşabilecek olan fazladan kaldırma kuvvetinin önüne geçilmiştir. Matlab Simscape uzayına bulunan IHA’nın dinamik şekilde kontrol edilmesi için ihtiyaç duyulan kontrolcüler ve algoritmalar Simulink ile simülasyon sistemine eklenmiştir. Sistemde ihtiyaç duyulan görüntü çıktısı için VRML kullanılmıştır.

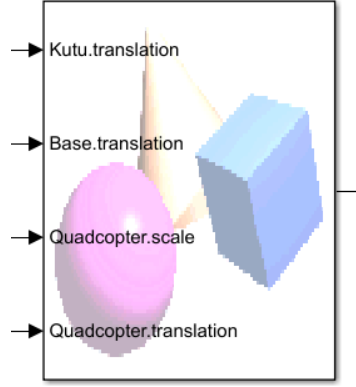


Şekil 2.22. Motor Kuvvet Bloğu

Virtual Reality Modeling Language (VRML) sanal gerçeklik uygulamaları oluşturmak için kullanılan bir 3B modelleme ve görselleştirme dili olarak tanımlanır. VRML, internet tarayıcılarında 3 boyutlu dünyaları ve nesnelere görselleştirmek için kullanılan bir standarttır. Bu dil, 1994 yılında geliştirilmiş olup, sanal gerçeklik deneyimlerinin erişilebilirliğini artırmak ve interaktif 3B içeriklerin paylaşılabilirliğini sağlamak amacıyla ortaya çıkmıştır.

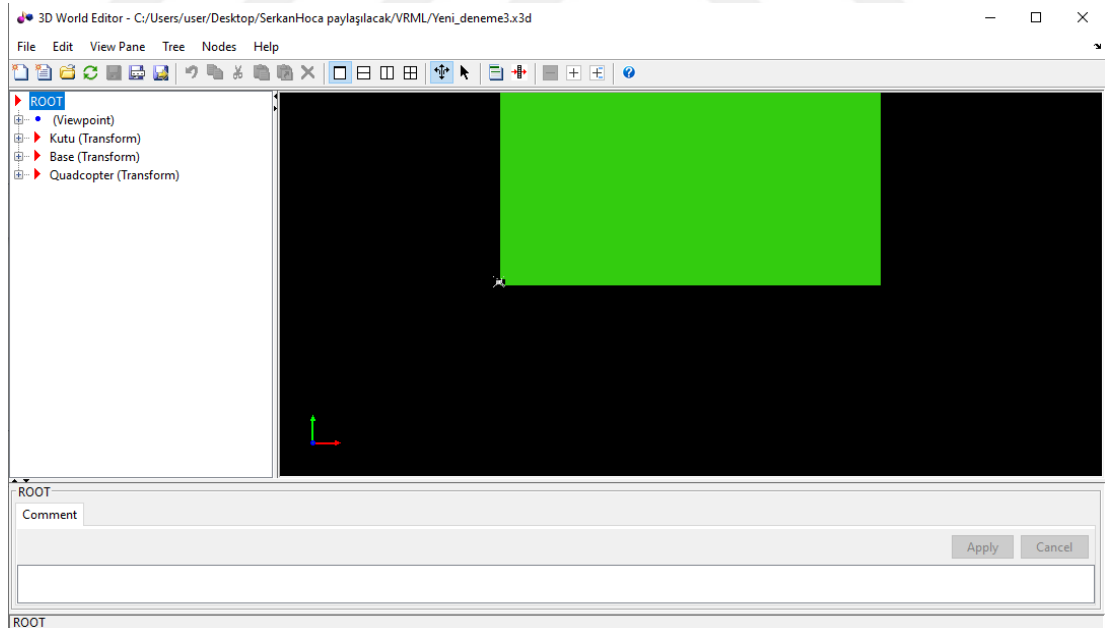
VRML, MATLAB tarafından kullanılan bir dosya biçimidir ve MATLAB'da veya dış ortamda oluşturulan 3 boyutlu grafiklerin veya modellerin görselleştirilmesi için kullanılır. Simülasyon ortamında kullanılacak olan Görüntü analiz sürecinin ve gerekli hesaplamaların yapılabilmesi için bir görüntü çıktısına ihtiyaç duyulmaktadır.

İhtiyaç duyulan görsellerin oluşturulması için VRML tercih edilmiştir. Tercih edilmesinde Simulink ile senkron çalışabilme özelliği ve dahili olarak Bilgisayarlı görü algoritmalarında işlenebilir bir görüntü matrisi(RGB) çıktı olarak vermesidir. Yukarıdaki Şekil 2.23 Matlab içerisinde VRML uzayının aktarılması ve kontrol edilmesi için ihtiyaç duyulan fonksiyon bloğu göstermektedir.



Şekil 2.23. Matlab Simulink Vr To Video Blogu

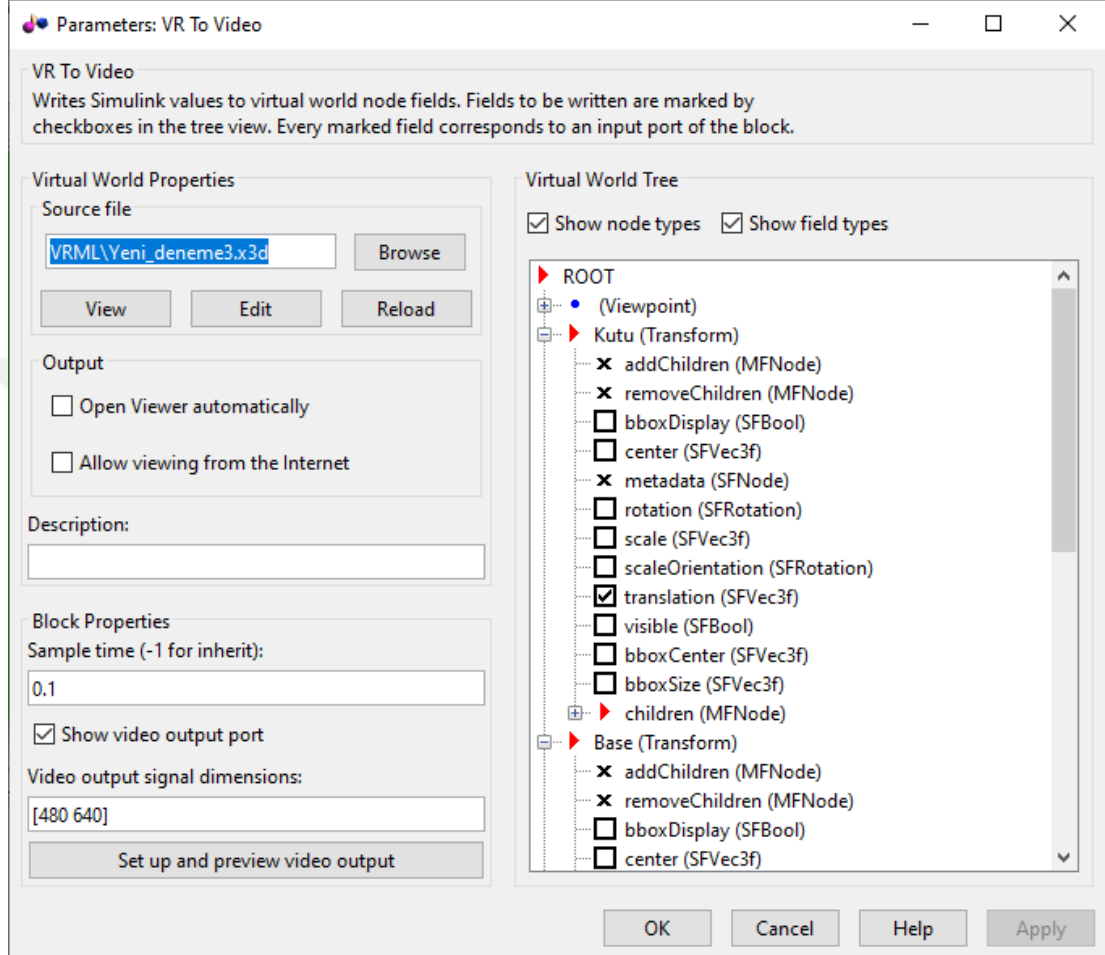
VRML'e ile oluşturulacak olan simülasyon ortamına gerekli objelerin aktarılması için BLENDER programı tercih edilmiş olup FBX formatında dosya aktarımı gerçekleştirilmiştir. Blender programına yüzey giydirmesi yapılan objelerin VRML' aktarılmıştır. Şekil 2.24.'de gösterilmekte olan VRML'nın matlab düzenleme arayüzüdür.



Şekil 2.24. Matlab VRML Düzenleyici Görself

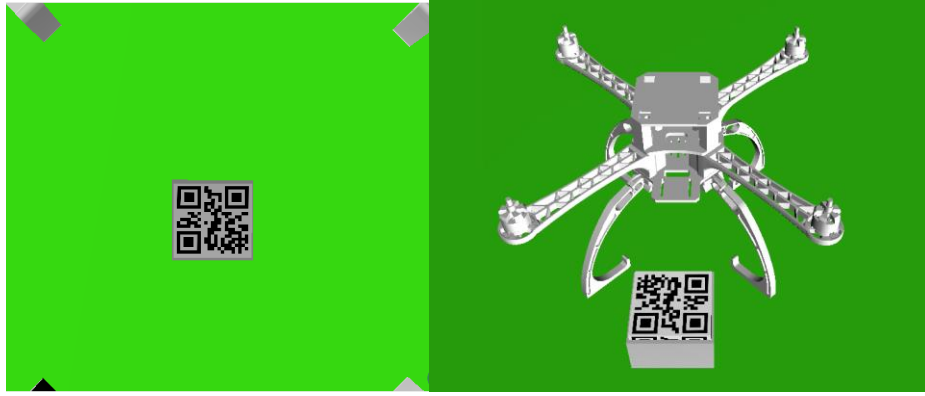
Matlab VRML parametre sayfası Şekil 2.25.'de gösterilmektedir. Matlab VRML parametre sayfası ile eklenen objelerin Transfer vektörlerine veri girişi

yapılabilmektedir. Bu sayede VRML uzayına aktarılan objelerin dinamik olarak simülasyon ile senkron şekilde hareket ettirilmesi sağlanmıştır. Ayrıca görüntü matrisi çıktısında elde edilmiştir. Görüntü matrisinin elde edilebilmesi için MATLAB VRML düzenleyicisi içerisinde İHA'nın alt plakasına bakış açısı kamerası eklenmiştir.



Şekil 2.25. Matlab VRML Parametre Sayfası

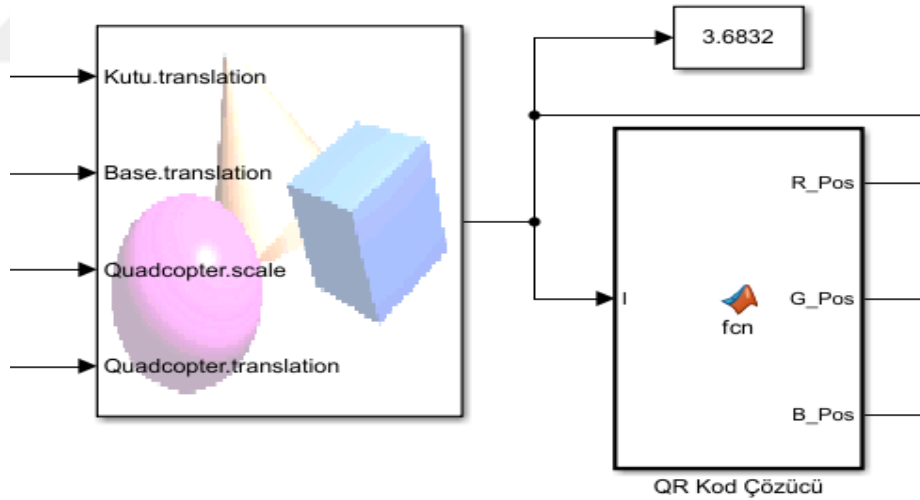
VRML'e aktarılan İHA ve Kutu objelerinin VRML uzayındaki görselleri Şekil 2.26 da gösterilmektedir. İHA üzerinde oluşturulan bir bakış açısı kamerası ile Simulink ortamına görüntü çıktısı elde edilmiştir. Bu elde edilen görüntü işleme algoritmaları tarafından işlenmesi sonucu ihtiyaç duyulan veriler elde edilecektir.



Şekil 2.26. Bakış Açısı Kamerası Çıktısı ve VRML uzayında İHA-Kutu Görseli

2.3.2. Görüntü Analizi

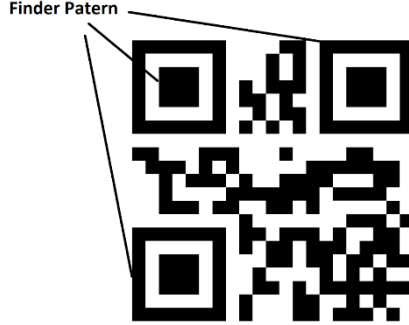
İHA üzerinde bulunan bakış açısı kamerası ile kutunun tespiti yapılacaktır. Kameranın doğru ölçüm yapabilmesi için kameranın kalibrasyonu yapılması gerekmektedir. Kalibrasyon datası toplanabilmesi için İHA simülasyon uzayında kutun üzerine getirilerek, kutu üzerinde bulunan QR kodun kamera üzerinde ne kadarlık bir alan kapladığı hesaplanmıştır.



Şekil 2.27. QR Kod Çözücü

QR kodun tespit edilebilmesi için Matlab Computer Vision Toolbox' ın QR kod çözümleyicisi tercih edilmiştir. Bu sayede QR kodun Bulucu Desen(Finder Patern) merkezleri tespit edilerek bakış açısı kamerası üzerinde ne kadarlık bir alan

kapladığı hesaplanmıştır. Kullanılan QR kod ve bulucu desen noktaları şekil 2.28 de gösterilmiştir.



Şekil 2.28 QR Kod

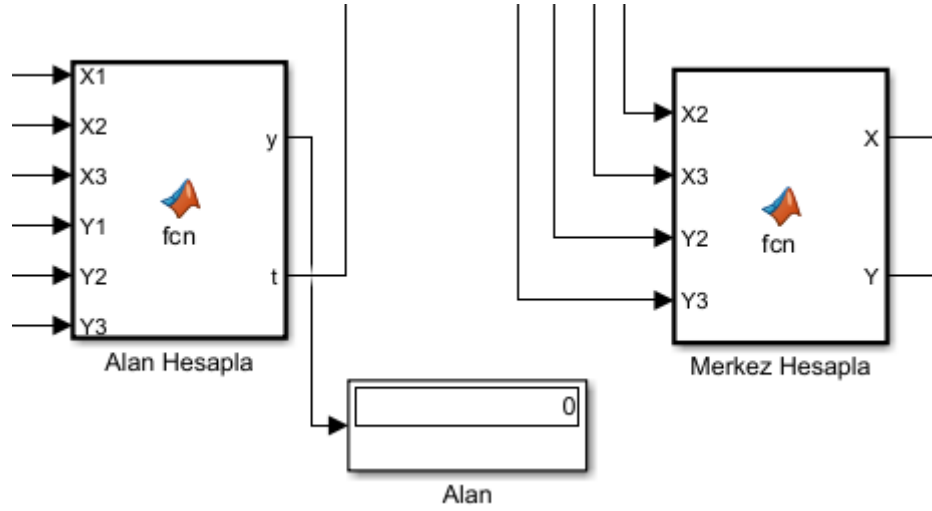
Bakış açısı kamerası üzerinde QR kodun kaplamış olduğu alanın hesaplanması için QR kod da bulunan üç adet bulucu desen noktalarının geometrik uzaklıklarının hesaplanması ve çarpılması ile elde edilmiştir.

Formül:

$$Alan = \sqrt{(Y2 - Y1)^2 + (X2 - X1)^2} \times \sqrt{(Y3 - Y1)^2 + (X3 - X1)^2}$$

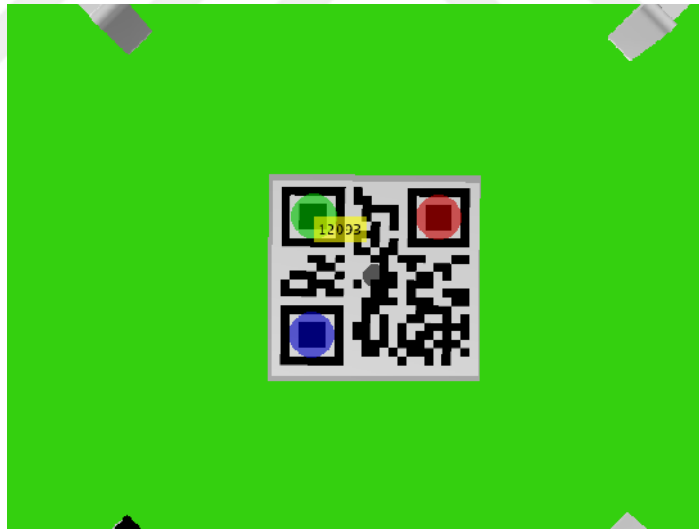
Denklem 2.1. Uzaklık Hesaplama Denklemi

Ayrıca görüntü de tespit edilen QR kodun merkez noktasının hesaplanması gerekmektedir bunun için bir simulink bloğu kullanılmıştır. Bu blok içerisinde bulucu desen noktalarını orta noktasını hesaplayarak QR kodun merkez noktasını hesaplamaktadır. Hesaplanan merkez noktası ile kutunun simülasyon uzayındaki pozisyonunu hesaplamak için kullanılmıştır.



Şekil 2.29. Matlab Alan ve Merkez Hesaplama Fonksiyonu

Alan hesabı ve merkez hesaplama işlemlerinden sonra görüntü üzerine İHA'nın kutuya olan mesafesini yazabilecek bir program eklenmiştir. Bu sayede görüntü işleme sırasında ve sonrasında takip edilebilmesi sağlanmıştır. Görüntü işleme sonrası Şekil 2.30 Görüntü İşleme Sonrası Sonuç görselidir.



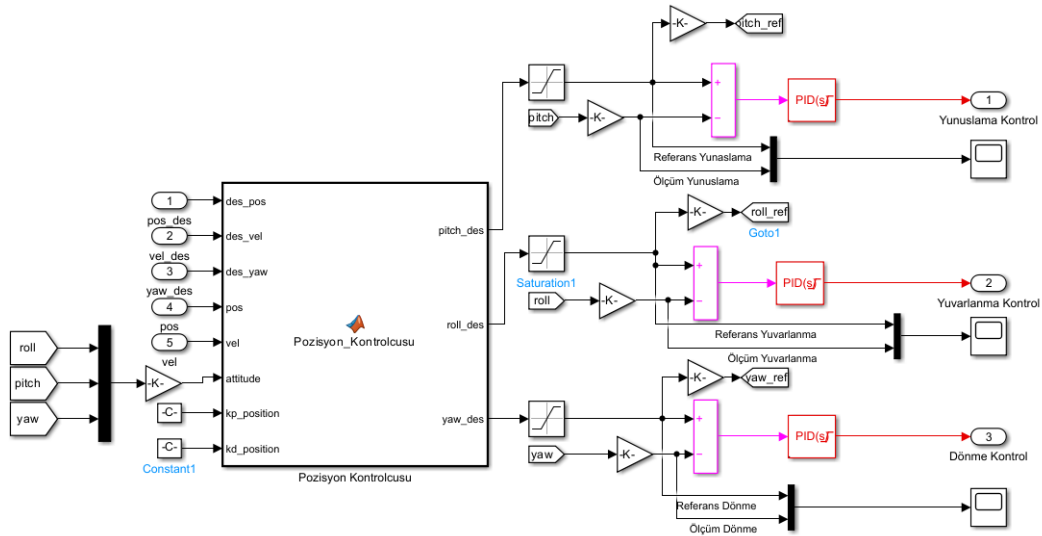
Şekil 2.30. Görüntü İşleme Sonrası Sonuç

2.3.3. PID Optimizasyonu

Bu tez çalışmasında, PID optimizasyonu için kullanılacak olan 3 adet meta-sezgisel algoritma tercih edilmiştir. Tercih edilen MS algoritmalar doğadan esinlenmiş algoritmalarıdır. Bu algoritmalar Afrika Akbabaları Optimizasyon Algoritması(African

Vultures Optimization Algorithm-AAO),. Ateş Şahini Optimizasyoncusu(Fire Hawk Optimizer-AŞO), Puma Optimizasyoncusu(Puma optimizer-PO) tercih edilmiştir. Bu optimizasyonlar Yunuslama ve Yuvarlanma eksenleri için ortak bir optimizasyon ve dönme eksenini için ayrı bir optimizasyon parametresi kullanılmıştır. Yunuslama ve yuvarlanma eksenleri için Oransal katsayı(Kp) 0 ile 250 arasında, İntegral(Ki) 0 ile 5 arasında, Türevsel(Kd) 0 ile 150 arasında belirlenmiştir. Dönme eksenini için ise Kp değeri 0-50000, Ki değeri 0-1500, Kd değeri ise 0-1500 değerleri arasında optimize edilmiştir. Yükseklik eksenini için Oransal katsayı(Kp) 0 ile 2 arasında, İntegral(Ki) 0 ile 1 arasında, Türevsel(Kd) 0 ile 2 arasında belirlenmiştir.

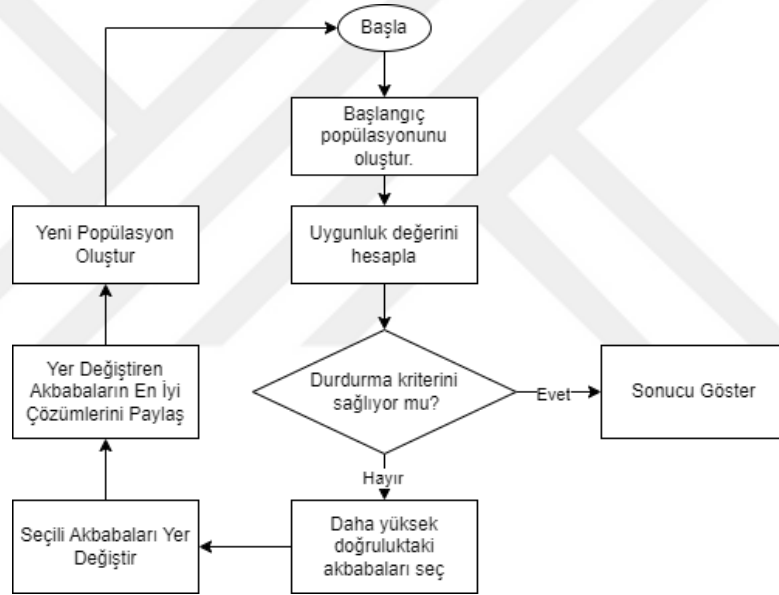
Optimizasyon sistemi oluşturulurken yunuslama yuvarlanma ve dönme eksenini PID lerin hedef değeri için bir adım giriş fonksiyonu kullanılmıştır. Sistem 10 saniyelik çalışma süresi belirlenmiş ve 5. saniyede 0.5 Radyanlık bir açı hedeflenmiştir. Yükseklik eksenini için ise birinci saniyeden itibaren 10 metrelik bir yükseklik hedeflenmiştir. Sistem tekrarlı çalıştırılarak sistemin kendi optimize etmesi sağlanmıştır. Matlab Simulink şekil gösterimi Şekil 2.31 de gösterilmiştir.



Şekil 2.31. Optimizasyon Sistemin Görseli

Kullanılan optimizasyon algoritmalar AAO, AŞO ve PO akış şematığı şekilde gösterilmektedir. Bu akış şeması ve Matlab kodu kullanılarak sistemin çıktıları optimize edilmiştir.

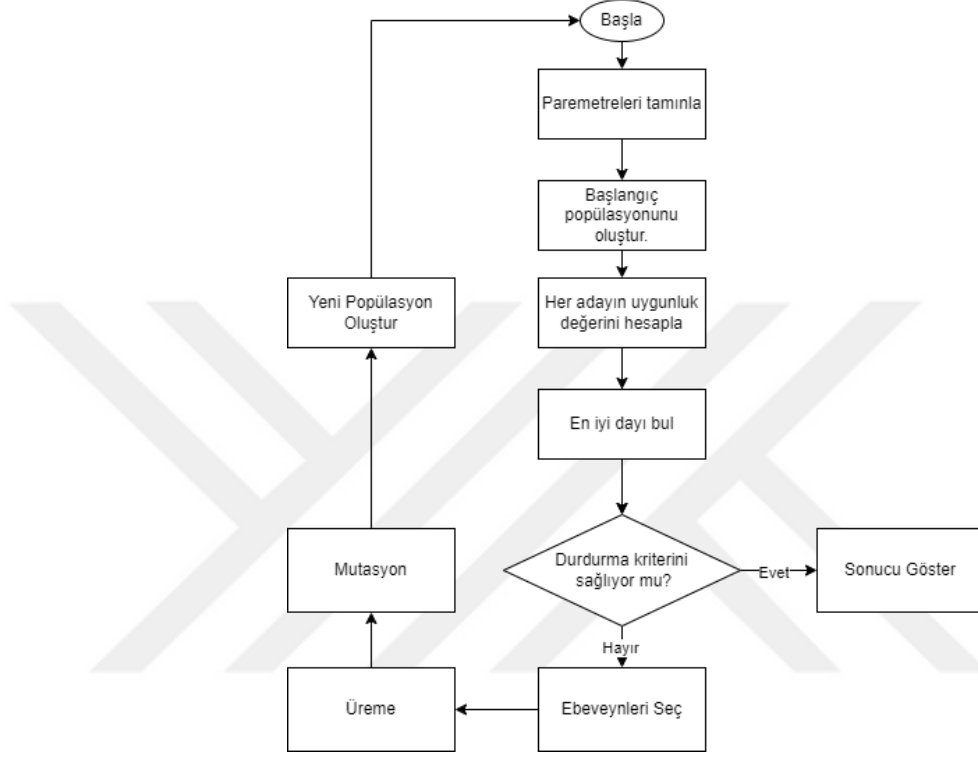
Şekil 2.32.'de Afrika Akbaba Optimizasyon Akış şemasında gösterildiği gibi bir başlangıç popülasyon tanımlaması yapılır. Rastgele olarak çözümler ile bir başlangıç popülasyonu oluşturulur. Oluşturulan popülasyon için her akbabanın uygunluk değeri hesaplanır. Uygunluk derecesinin hesaplanması için probleme özgü bir fonksiyon kullanılır. Uygunluk dereceleri hesaplandıktan sonra önceden belirlenen iterasyon sınırına veya uygunluk seviyesine ulaşıldı işe çözümlenmiş en yüksek doğruluklu sonuç gösterilir eğer iterasyon sayısına ulaşılmamış ise yüksek doğrulukta akbabalar seçilir. Seçilen akbabalar diğer akbabalar ile yer değiştirilir ve hareket ettirilir. Yer değiştiren akbabalar buldukları en iyi sonuçları popülasyon ile paylaşır ve yeni popülasyon oluşturulur. Popülasyon oluşturulurken yer değiştiren akbabaların paylaşmış olduğu çözümler ve en iyi çözümler birleştirilerek oluşturulur.



Şekil 2.32. Afrika Akbabalar Optimizasyonu Akış şeması

Şekil 2.33'de Puma Optimizasyonun akış şemasında gösterilen parametre tanımlanarak gerçekleştirilir bunlar popülasyon boyutu, maksimum iterasyon sayısı, mutasyon oranı gibi parametrelerdir. Oluşturulan popülasyon rastgele çözümler gerçekleştirir ve her adayın uygunluk değeri hesaplanır. Oluşturulan popülasyondaki en iyi çözüm bulunur ve iterasyon sınırına ulaşıp ulaşılmadığı kontrol edilir. İterasyon sınırına ulaşılmış ise sistemin çözmüş olduğu en iyi çözüm gösterilir. Eğer iterasyon sayısına ulaşılmamış ise bir sonraki aşamada üreme için bir ebeveyn seçilir. Ebeveyn seçiminde rastgele veya en yüksek uygunluk dereceli birey seçilebilir.

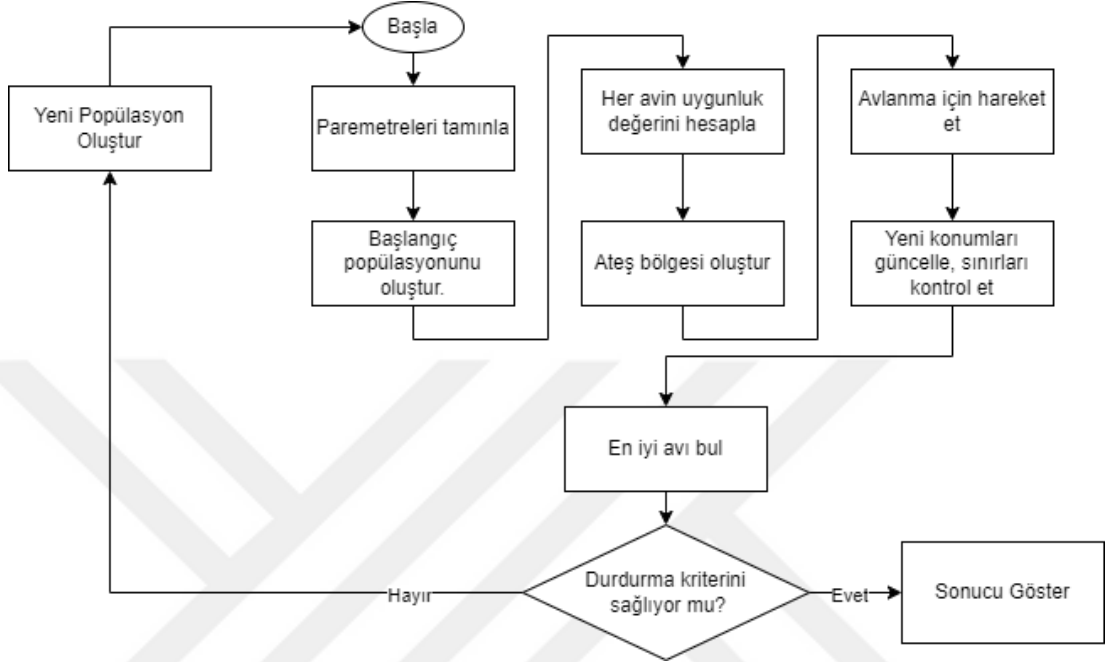
Ebeveynlerden yeni aday çözümler (yavrular) üretilir. Üreme için farklı yöntemler kullanılabilir. Yavrular, rastgele bir şekilde değiştirilerek mutasyona uğratılabilir. Mutasyon oranı önceden belirlenir. Yeni popülasyon, en iyi aday, ebeveynler ve yavruların birleşimiyle oluşturulur.ve bu işlem en iyi sonuç bulunana kadar veya iterasyon sınırına kadar tekrarlanır.



Şekil 2.33. Puma Optimizasyoncusu Akış Şeması

AŞO optimizasyonu gerçekleştirilirken öncelikli olarak sistem giriş parametreleri tanımlanır. Tanımlama işlemi sırasında rastgele seçilen çözümlerden oluşan bir başlangıç popülasyonu oluşturulur. Oluşturulan popülasyona ait her akbabanın(aday) uygunluk değerleri hesaplanır ve bir ateş bölgesi atanır. Bu atanan bölgenin kontrolünü uygunluk kriteri ile belirlenebilir. Her akbaba, kendi ateş bölgesi içinde bulunan diğer akbabaların konumlarına göre hareket eder. Bu hareket, daha iyi çözümlerin keşfedilmesini sağlar. Bazı AŞO varyasyonlarında, akbabalar belirli bir olasılıkla ateş bölgeleri dışında da hareket edebilir. Avlanma hareketlerine göre her akbabanın yeni konumu hesaplanır. Yeni konumlar problem tarafından belirlenen sınırları aşarsa, sınır değerlerine çekilir. Popülasyondaki en iyi uygunluk değerine sahip çözüm yani av bulunur. Önceden belirlenen iterasyon sayısına veya uygunluk

seviyesine ulaşıp ulaşılmadığı kontrol edilir. Eğer ulaşılmış ise algoritma durur, değilse döngü devam eder. Yeni popülasyon, önceki popülasyondaki tüm akbabalar kullanılarak oluşturulur. AŞO algoritmasına ait akış şeması şekil 2.34 de gösterilmektedir.



Şekil 2.34. Ateş Şahini Optimizasyonu Akış Şeması

Kullanılan optimizasyon algoritmaları için ortak uygunluk fonksiyonu kullanılmıştır. Kullanılan doğrulama formülü Şekil 2.35 de gösterilmiştir.

$$UF = IMH$$

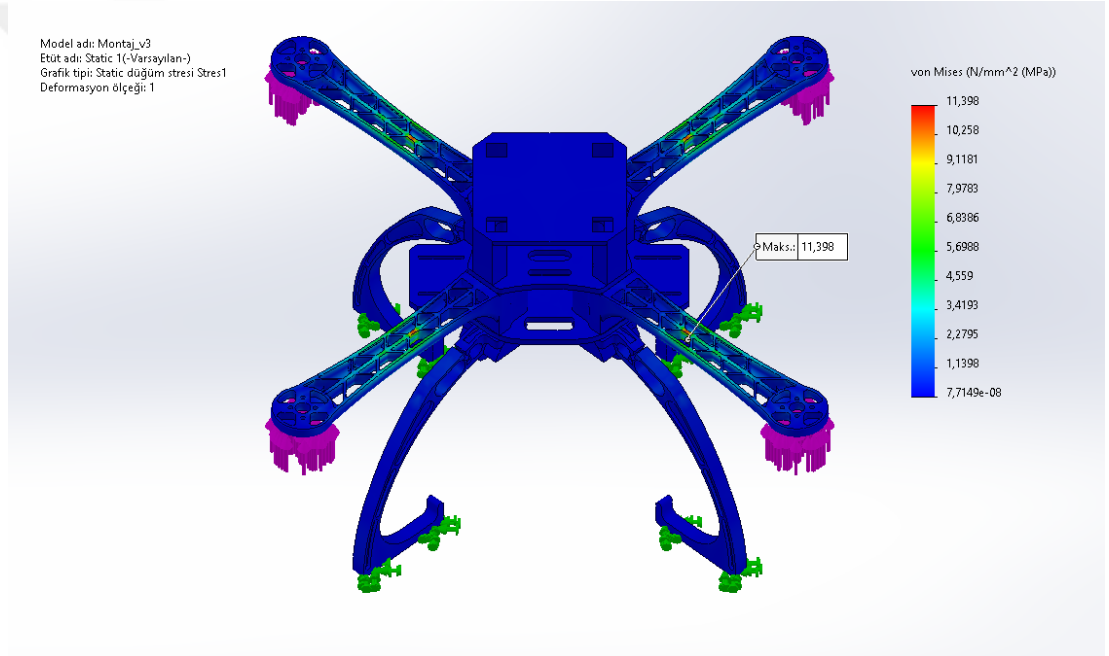
Şekil 2.35. Doğrulama Fonksiyonu

PID optimizasyonu için bu üç algoritma seçilmiştir. Seçilen algoritmalar kendi aralarında karşılaştırılarak performansları incelenecektir. Oluşturulan doğrulama fonksiyonu İntegral mutlak hatası olarak kullanılmıştır. Optimizasyon algoritmaları minimum hata için optimizasyon uygulanmıştır.

3. BULGULAR

3.1. Statik Analiz Bulguları

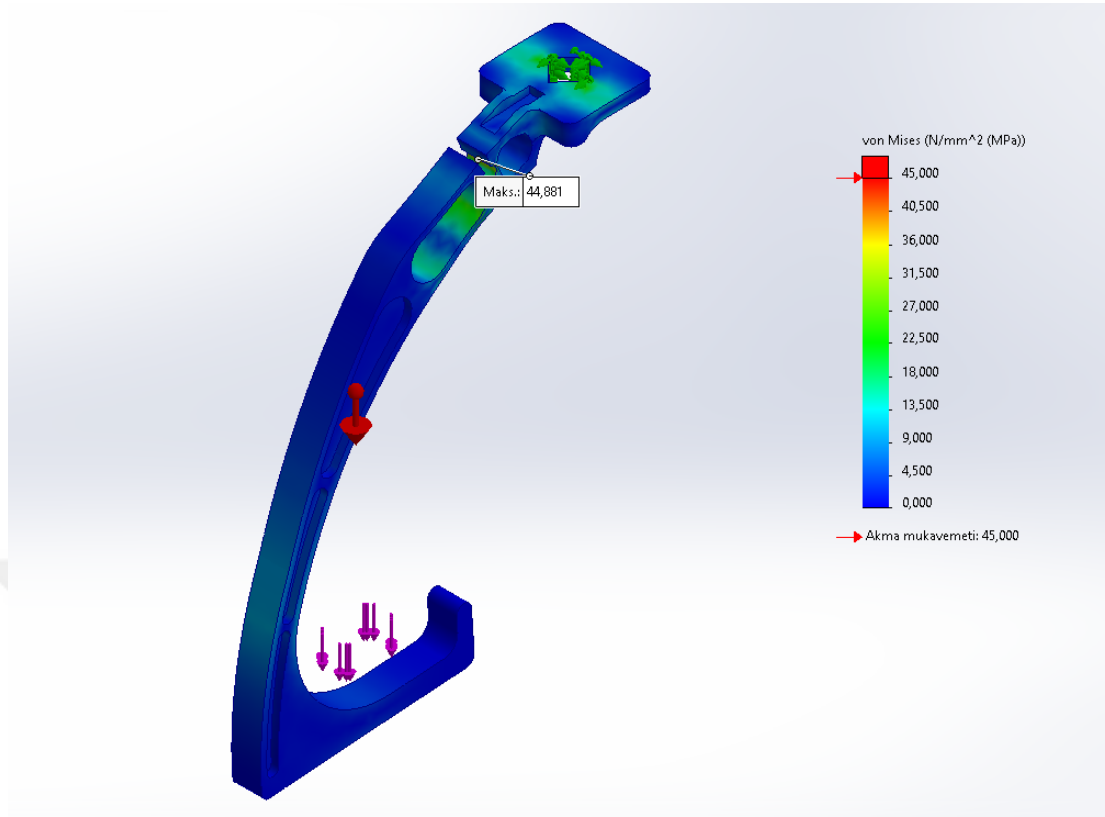
Statik analizlerin gerçekleştirilmesi için SolidWorks Similasyon kullanılmıştır. Simülasyonun gerçekleştirilmesi için tasarlanan dört rotorlu insansız hava aracı nın parçaları belirli yükler altında simülasyona sokulmuştur. Kutuyla taşımakla görevli olan Ayak parçalarının farklı yükler altında ABS malzemesi ile test edilmiştir. İHA'nın statik analiz görseli şekil 3.1 gösterilmiştir.



Şekil 3.1. İHA Statik Analiz Görseli

Abs malzeme data verileri MatWeb [311] sitesinden elde edilmiştir ve simülasyon da malzeme olarak tanımlanmıştır. Malzeme tanımlaması yapıldıktan sonra ise modelin fikstürlenmesi gerçekleştirilmiş ve uygulanacak yük yüzeyi

tanımlanmıştır. Gerekli tanımlamalar sonrasında Meshleme işlemi gerçekleştirilmiştir



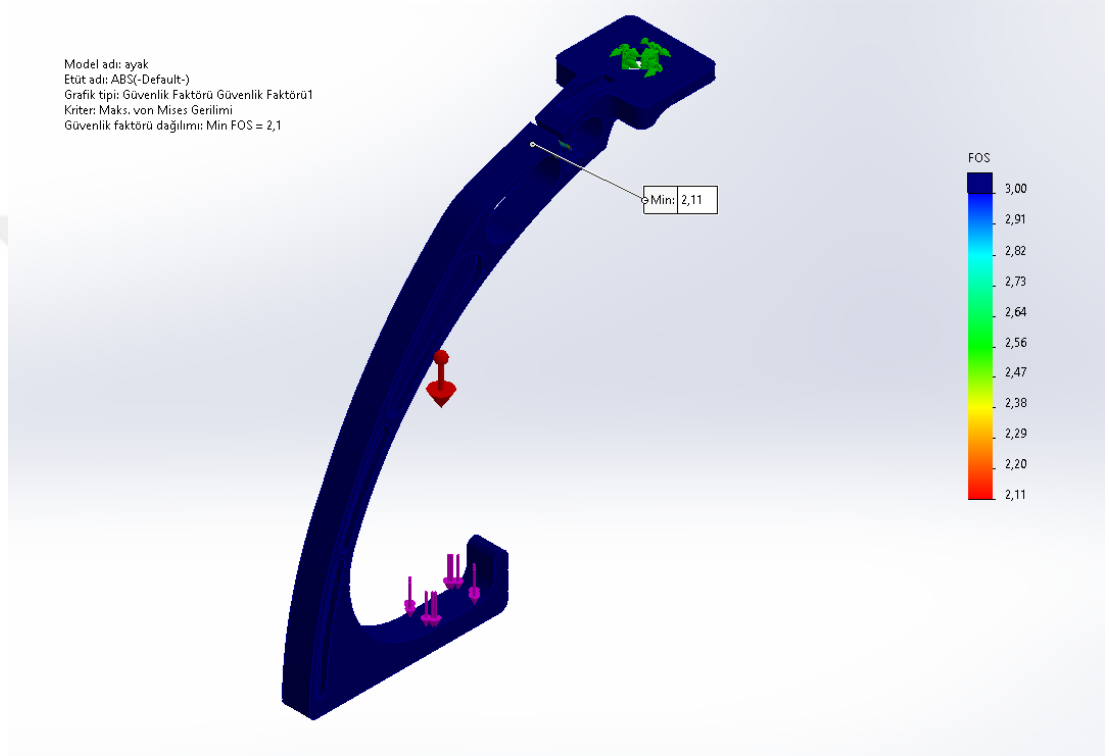
Şekil 3.2. Ayak Statik Analiz Görseli

Şekil 3.2 gösterilmekte olan görselde yeşil oklar fikstürleme yüzeylerini, kırmızı ok yerçekimin yönünü, mor okalar ise kuvvetin uygulandığı yüzeyi göstermektedir. Yapılan analizler sonucu Ayak Yük/Stres tablosunda belirtilen sonuçlar elde edilmiştir.

Tablo 3.1 Ayak Yük/Stres Tablosu

Uygulanan Kuyvvet (Newton)	Von Mises (Newton/mm ²)	Akma Mukavemeti (Newton/mm ²)
25	46,179	45
24	44,881	45
22	42,199	45
20	39,393	45
15	31,76	45
10	23,092	45
5	13,394	45
0	1,347	45

Elde edilen veriler ile akma mukavemetini geçen kuvvet değerleri kalıcı deformasyona sebebiyet verdiği için ayak başına düşecek olan maksimum yük değerini güvenlik katsayısı 2 olarak hedeflenmiştir. Bunun sonucu olarak ayaklarda dikey olarak yüklenebilecek maksimum kuvvetin yaklaşık 9 N olduğu gözlemlenmiştir. Simülasyon görseli Şekil 3.3 de gösterilmiştir.



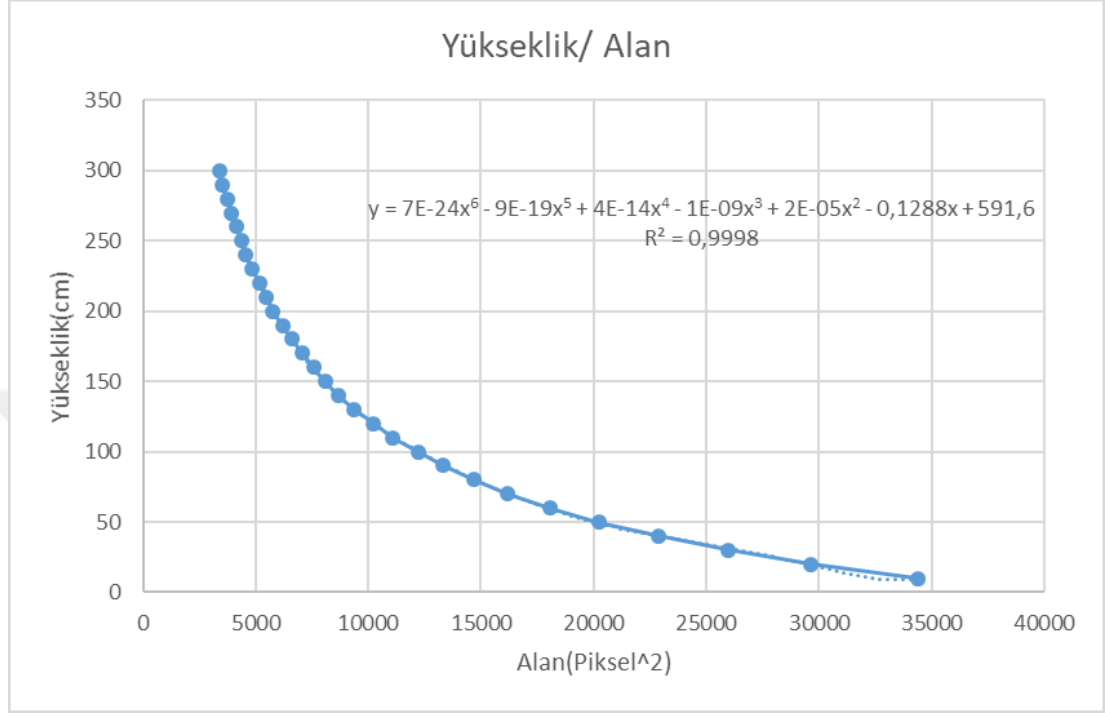
Şekil 3.3. Ayak FOS Analizi

Şekil AA da gösterilmekte olan görselde mor oklar kuvvetin uygulandığı yer ve yönü göstermektedir. Yeşil oklar ise bağlantı noktasıdır. Kuvvet 9 N olarak uygulanmıştır. Uygulanan kuvvet sonucunda FOS değeri 2.11 olarak sonuç vermiştir.

3.2. Görüntü Analizinde Ulaşılan Bulgular

Simülasyon İHA ile toplanan veriler kullanılarak küçük kareler eğri uydurma metodu ile 6. dereceden bir polinom elde edilmiştir. Elde edilen polinom ile QR kodum kamerada kapladığı alan ile İHA'nın cisim ile arasındaki mesafenin anlaşılması ve sonraki adımlarda kullanılması sağlanmıştır.

Hesaplanan mesafe sayesinde İHA'ın X-Y düzleminde QR code ile arasındaki mesafe de hesaplanabilecektir. Oluşturulan Yükseklik/ Alan Grafiği 3.4.1 de gösterilmektedir.



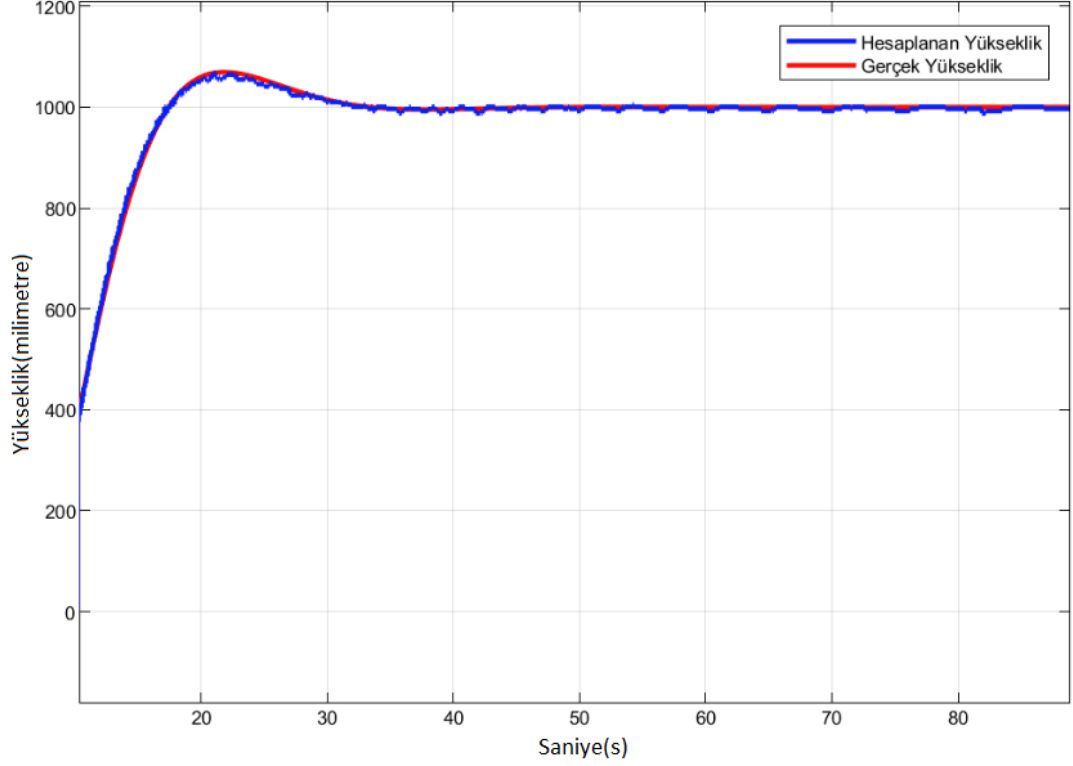
Grafik 3.1. Yükseklik/ Alan Grafiği

Oluşturulan eğrinin Belirleme katsayısı R^2 ifade edilmektedir. R^2 değeri ise (1-toplam hatalar karesi) ile (tüm toplam kareler) oranıdır. R^2 değeri uyum iyiliği uygun olduğu sonucu çıkarılır.

$$R^2 \equiv 1 - \frac{SS_{err}}{SS_{tot}}$$

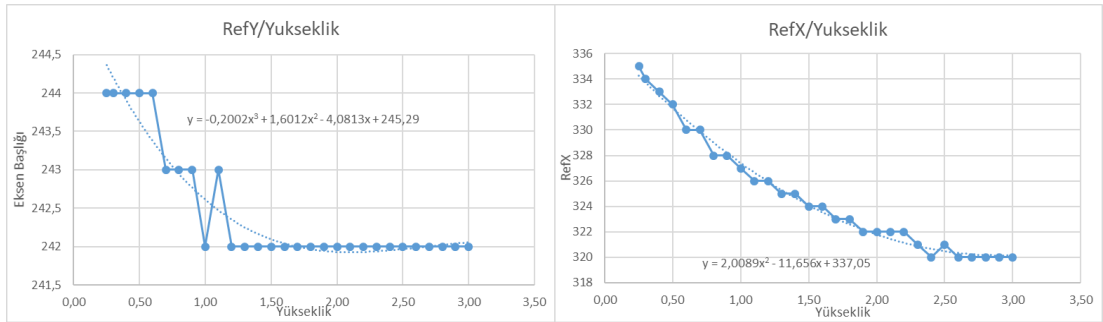
Denklemler 3.1. Belirleme Katsayısı Denklemleri

Oluşturulan polinom kullanılarak yapılan denemelerde sistemin 12 mm. olarak hesaplanmıştır. Grafik 3.2. de gerçek yükseklik ile kamera ile ölçülen yükseklik grafiği gösterilmiştir.



Grafik 3.2. Hesaplana/Gerçek Yükseklik Grafiği

İHA X-Y uzaklığının hesaplanması için ise İHA'nın fiziksel merkezi ile kameranın bulunduğu konumlandırma farkından dolayı bir eksen problemi oluşmaktadır. Bu eksen farkının giderilmesi için tekrardan ölçüm alınmıştır.



Grafik 3.3. RefX ve RefY

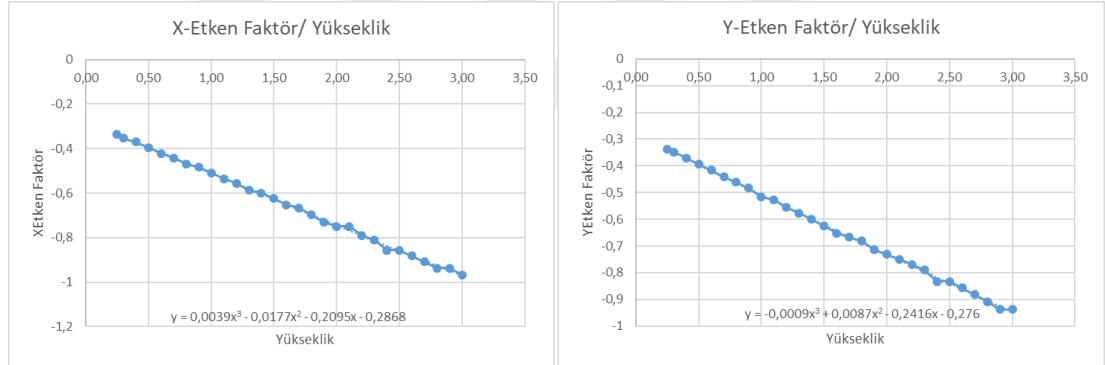
Grafik 3.3 de RefX ve RefY görsel olarak farklı yüksekliklerdeki QR kodun piksel olarak konumunu göstermektedir. Oluşturulan grafiklerde küçük kareler eğri uydurma metodu kullanılarak 3. ve 2. dereceden polinomlar elde edilmiştir. Bu

polinomlar kullanılarak farklı yüksekliklerde görsel merkezi ile İHA'nın merkezi arasındaki fark tolere edilmiştir.

İHA'nın X-Y düzleminde düzgün ölçüm yapılabilmesi için farklı yüksekliklerdeki piksel başına düşen mm hesaplanması gerekmektedir. Hesaplamalar için İHA simülasyon uzayında (1,1,1)_{x,y,z} koordinat düzlemine getirilmiştir, QR etiketli kutu ise simülasyon uzayının (1,1,0)_{x,y,z} konumlandırılmıştır. İHA farklı yüksekliklere taşınarak 3 metre ile 0.25 m arasında veriler toplanmıştır.

Bu veriler kullanılarak farklı yükseklikteki piksel başına düşen mm hesaplanmıştır. Hesaplama sırasında İHA'nın farklı yükseklikteki merkez yükseklikleri de dahil edilmiştir. Hesaplanan değerler X-Etken Faktör ve Y-Etken Faktör olarak adlandırılmıştır.

Etken Faktörler ve yükseklik parametreleri kullanılarak küçük kareler eğri uydurma metodu kullanılarak bir eğri uydurma işlemi gerçekleştirilmiştir. İşlem sonucu elde edilen polinomlar ile yüksekliğe bağlı olarak etken faktörleri vermektedir. Etken Faktör/ Yükseklik grafikleri Grafik 3.4. gösterilmiştir.



Grafik 3.4. Etken Faktör/ Yükseklik Grafikleri

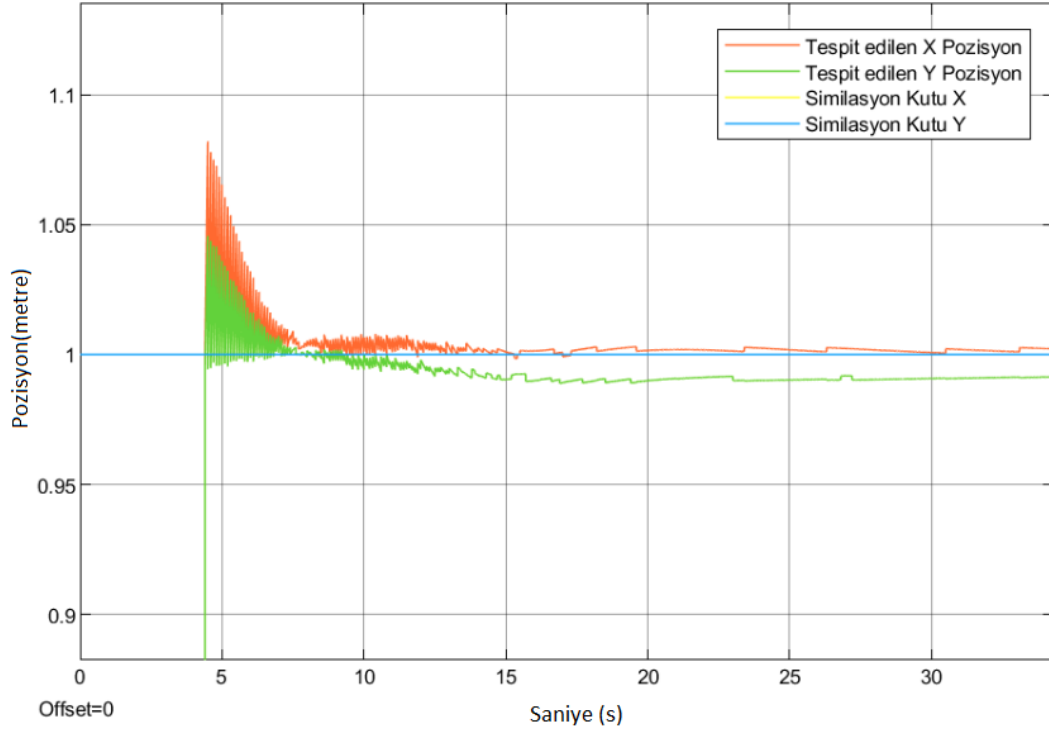
Bu süreçler sonucunda elde edilen polinomlar kullanılarak yüksekliğe parametresi ve QR kodun kameradaki konumu kullanılarak İHA'nın ve kutunun simülasyon uzayındaki anlık olarak pozisyonları hesaplanmıştır. Hesaplama kullanılan formül ise gösterilmiştir.

$$X_{Mesafe} = P_{Etken Faktör}(x)(P_{Ölçülen}(x) - P_{Referans}(x))$$

Denklem 3.2. İHA ile Kutu Arasındaki Uzaklık Denklemi

İHA de bulunan kamera ile kutunun uzaydaki anlık pozisyonu ve uzaklığı hesaplanmıştır.

Grafik 3.5. İHA üzerinden bulunan kamera ile kutunun simülasyon uzayındaki hesaplanan X-Y pozisyonu gösterilmektedir. İHA üzerindeki kameranın kalibrasyonu ile hata oranı minimuma düşürülmüştür.



Grafik 3.5. Kutunun Görüntü Analizi İle Elde Edilen Pozisyon Verisi

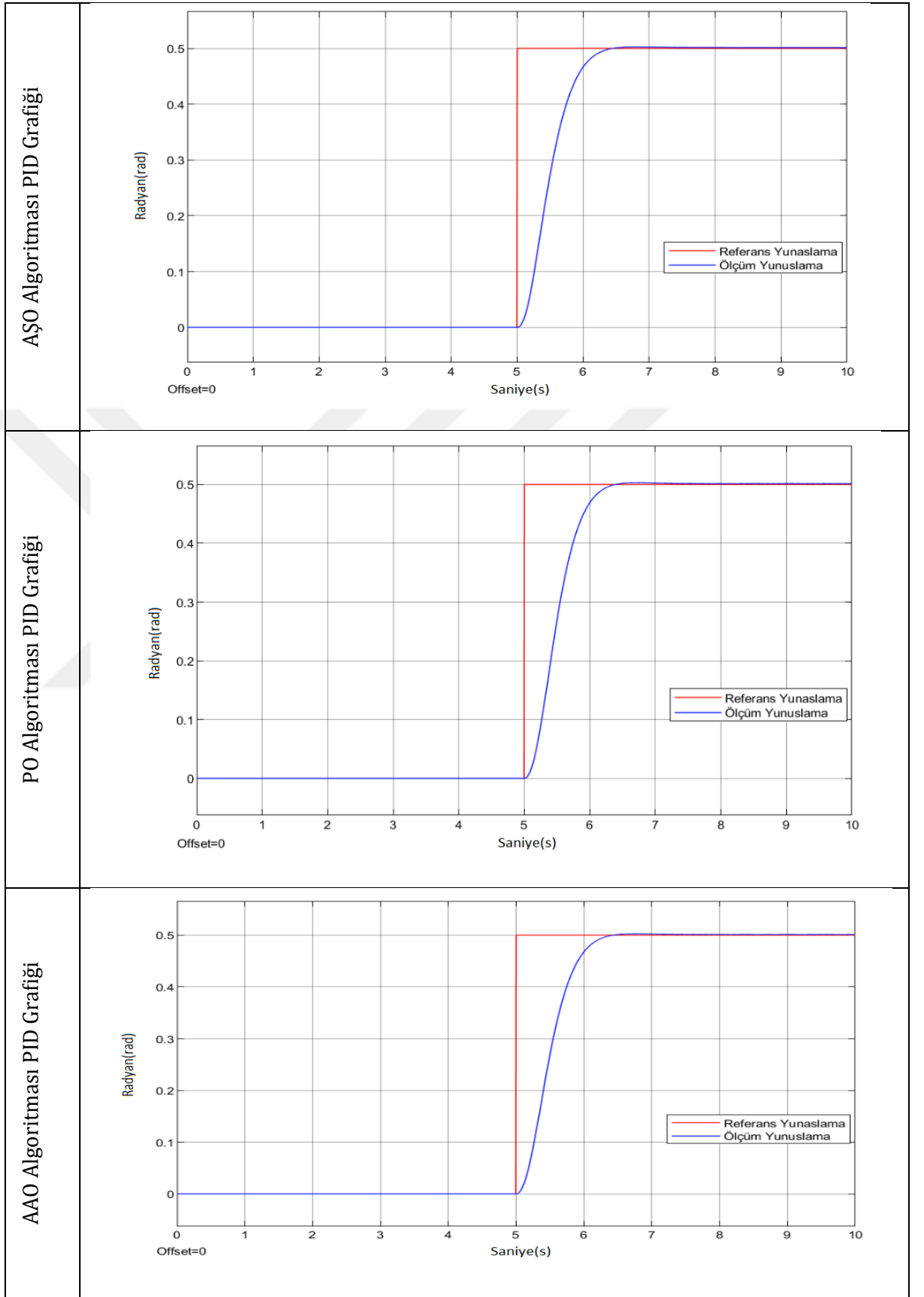
4.3. PID Optimizasyonunda Elde Edilen Bulgular

Optimizasyon sonrası algoritmalar hesaplamış olduğu K_p , K_i ve K_d değerleri Yunuslama ve Yuvarlanma eksenleri için AŞO algoritması $K_p=215.981$, $K_i=1.297$ ve $K_d=98,96$. PO algoritması için $K_p=221,358$, $K_i=1,193$, $K_d=98,851$. AAO algoritması için $K_p=223,357$, $K_i=1,098$, $K_d=100,152$ olarak hesaplamıştır.

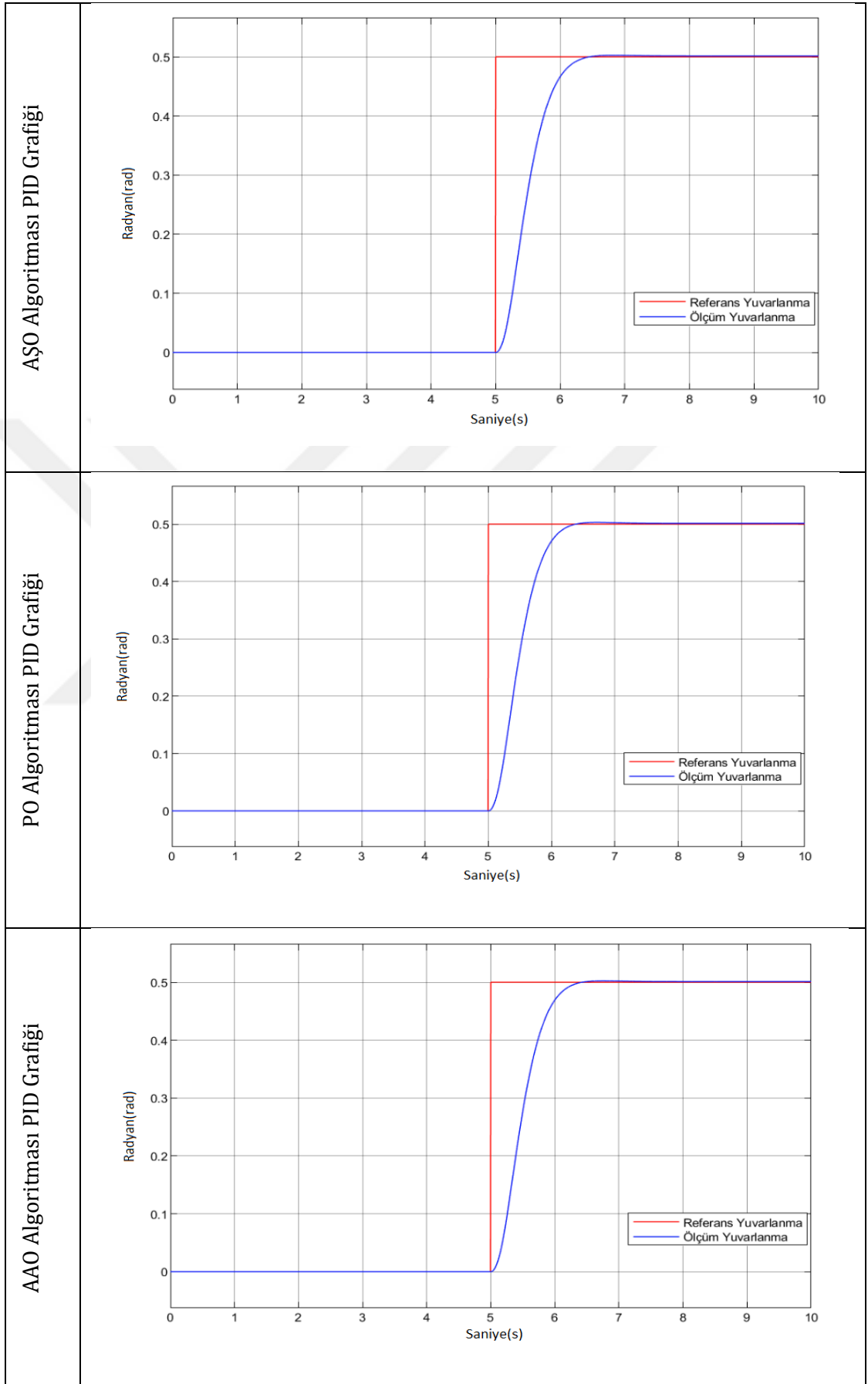
Dönme eksenini için ise AŞO algoritması $K_p=45980.48$, $K_i=1355.462$ ve $K_d=1191.350$, PO algoritması için $K_p=46883.521$, $K_i=1451.930$, $K_d=1480.990$, AAO algoritması için $K_p=48329.950$, $K_i=1109.631$, $K_d=1327.227$ olarak hesaplamıştır.

Yükseklik eksenini için ise AŞO algoritması $K_p=1.58$, $K_i=0.035$ ve $K_d=1.817$, PO algoritması için $K_p=1.993$, $K_i=0.039$, $K_d=1.299$, AAO algoritması için $K_p=1.775$, $K_i=0.023$, $K_d=1.158$ olarak hesaplamıştır.

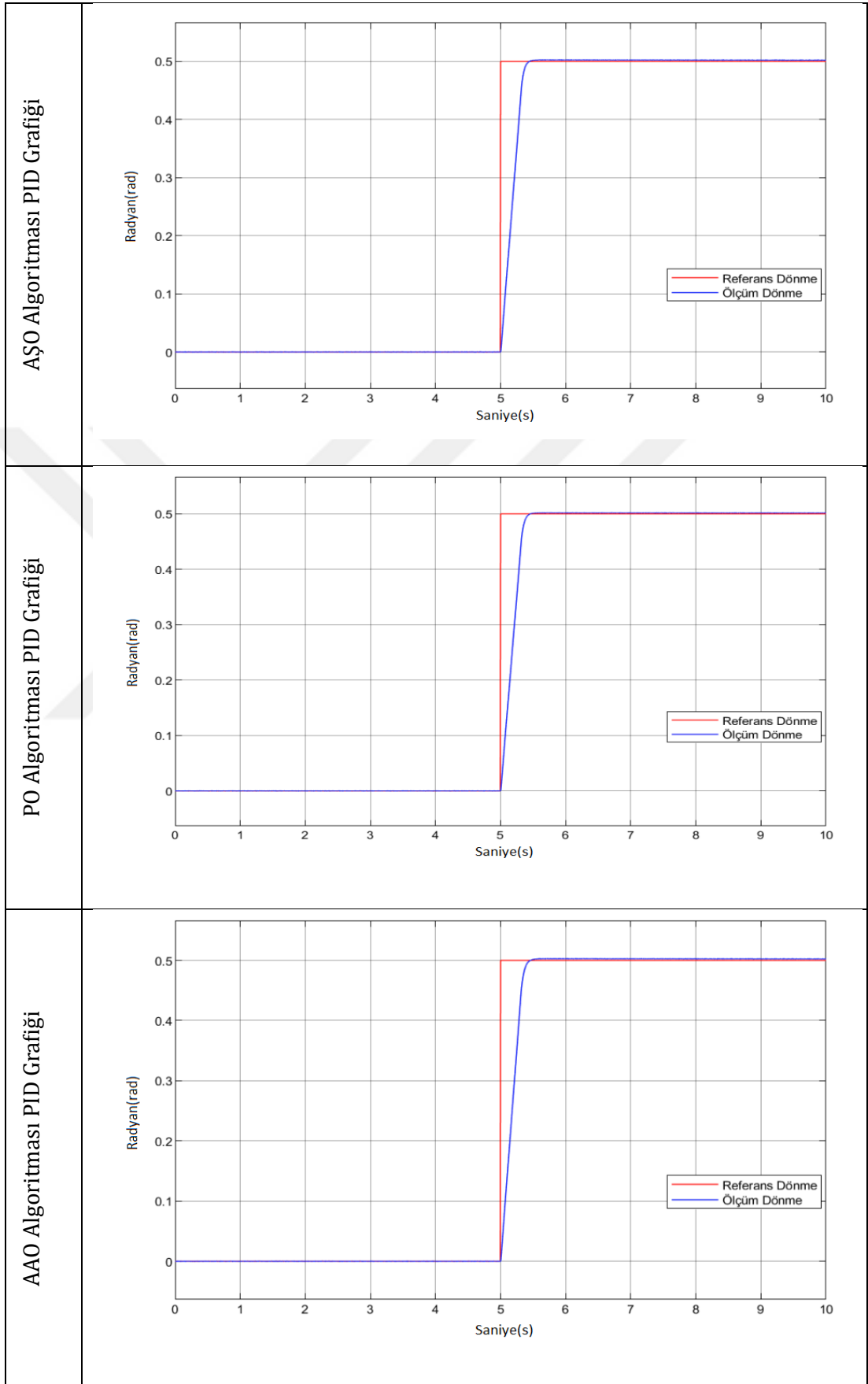
Grafik 3.6. PID Fonksiyonunun AŞO-PO-AAO Verileri: Yunuslama Eksenı



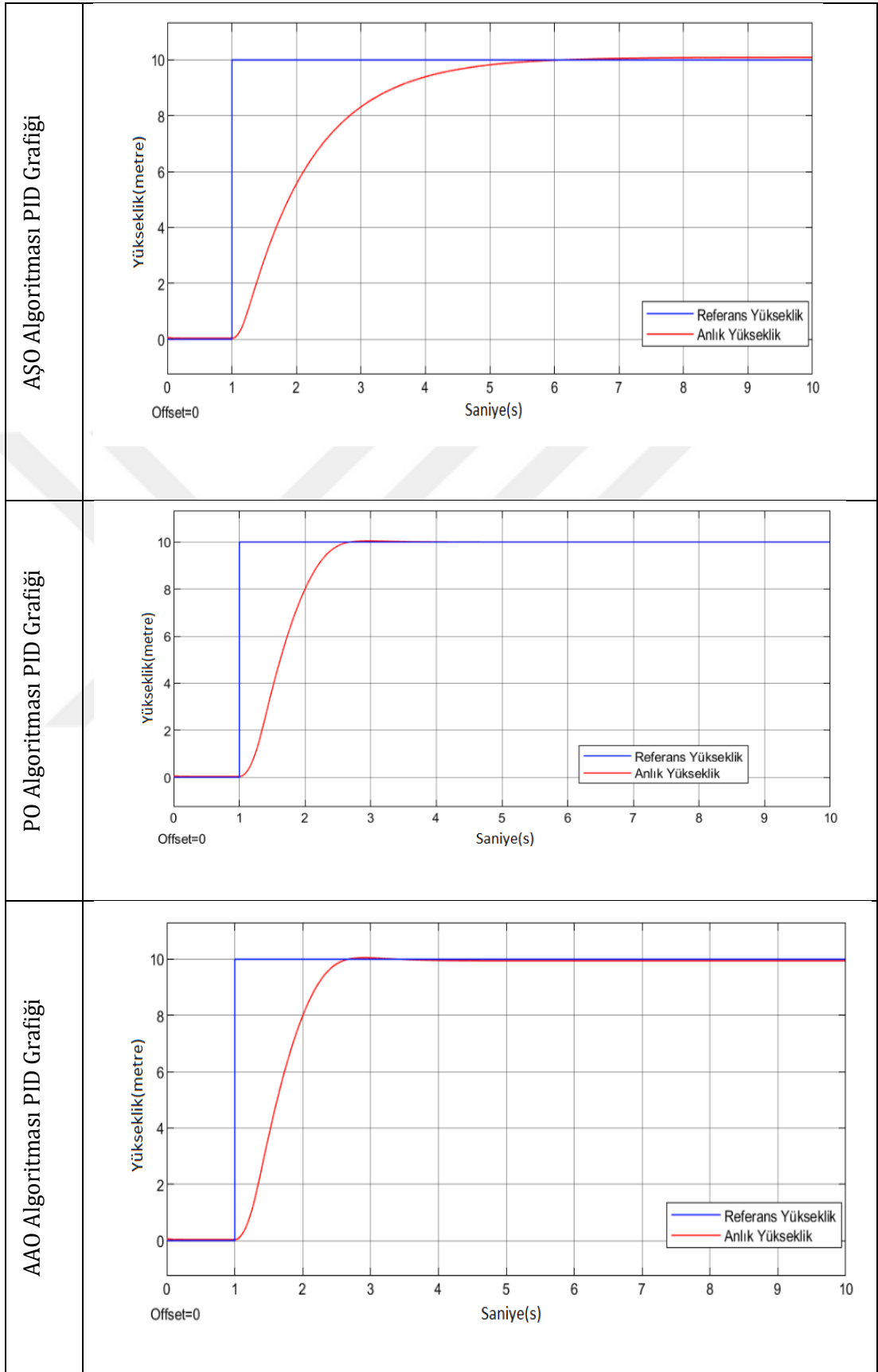
Grafik 3.7. PID Fonksiyonunun AŞO-PO-AAO Verileri: Yuvarlanma



Grafik 3.8. PID Fonksiyonunun AŞO-PO-AAO Verileri: Dönme



Grafik 3.9. PID Fonksiyonunun AŞO-PO-AAO Verileri: Yükseklik



Tablo 3.2. Optimizasyon Sonrası PID Performans Analiz Tablosu

	AŞO		PO		AAO	
Yunuslama	Tr(s)	1.451	Tr(s)	1.384	Tr(s)	1.430
	Tp(s)	1.814	Tp(s)	1.711	Tp(s)	1.758
	Mp(%)	0.052	Mp(%)	0.058	Mp(%)	0.048
	Ts(s)	3.192	Ts(s)	3.102	Ts(s)	3.062
	Ess(%)	0.03	Ess(%)	0.02	Ess(%)	0.024
Yuvarlanma	Tr(s)	1.449	Tr(s)	1.382	Tr(s)	1.430
	Tp(s)	1.811	Tp(s)	1.712	Tp(s)	1.758
	Mp(%)	0.052	Mp(%)	0.058	Mp(%)	0.048
	Ts(s)	3.136	Ts(s)	3.112	Ts(s)	3.136
	Ess(%)	0.03	Ess(%)	0.026	Ess(%)	0.024
Dönme	Tr(s)	0.493	Tr(s)	0.438	Tr(s)	0.453
	Tp(s)	0.732	Tp(s)	0.707	Tp(s)	0.757
	Mp(%)	0.05	Mp(%)	0.062	Mp(%)	0.064
	Ts(s)	0.745	Ts(s)	0.732	Ts(s)	0.770
	Ess(%)	0.05	Ess(%)	0.062	Ess(%)	0.064
Yükseklik	Tr(s)	5.138	Tr(s)	1.678	Tr(s)	1.671
	Tp(s)	5.938	Tp(s)	1.962	Tp(s)	1.902
	Mp(%)	1.0	Mp(%)	1.0	Mp(%)	0.5
	Ts(s)	5.994	Ts(s)	2.803	Ts(s)	3.143
	Ess(%)	1.0	Ess(%)	0.001	Ess(%)	0.5

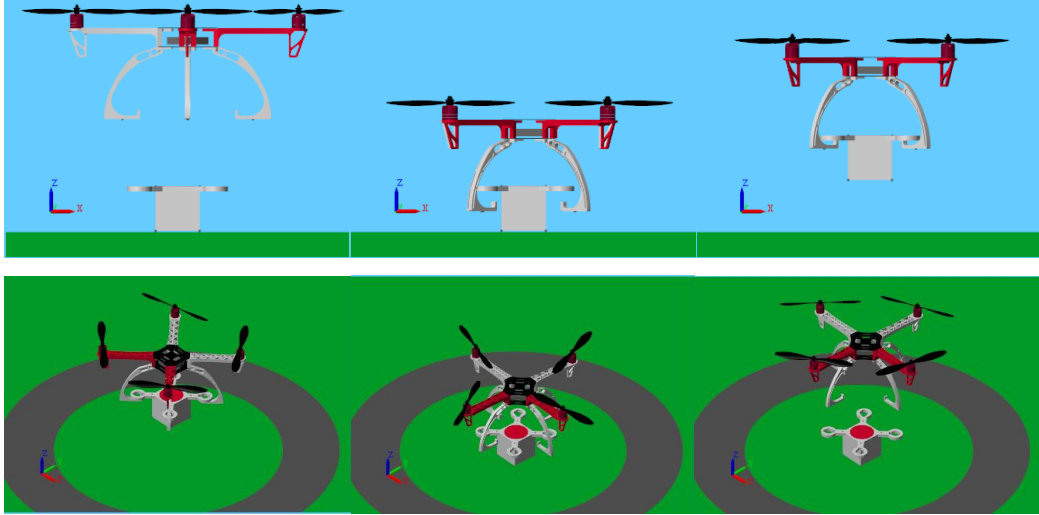
Tablo 3.3’de sunulan veriler, PID optimizasyonunun performans analizi için kullanılmaktadır. Oluşturulan veriler, referans değerine ulaşma süresi (Tr), maksimum salınım değerine ulaşma süresi (Tp), referans değerini maksimum aşma oranı (Mp), sistemin stabilizasyona ulaşma süresi (Ts), referansla kalıcı durum hatasının oranı (Ess) olarak belirtilmiştir.

SONUÇ ve ÖNERİLER

Uygulamanın ilk aşamasında İHA modeli geliştirilmiştir. Tasarım aşamasında minimum metal parça kullanımı hedeflenmiştir. Bu doğrultuda metal olma zorunluluğu olmayan parçaların tümü 3D yazıcılarla imal edilebilir şekilde tasarlanmıştır. Kol, alt ve üst gövde ekipmanları, GPS aparatı, kutu, ayak ve ayak destekleri, bağlantı somunları vb parçalar SolidWorks'de modellenerek montajı gerçekleştirilmiştir. Montajı tamamlanan İHA'nın statik analizleri SolidWorks Simülasyon ortamında gerçekleştirilmiştir. Ayrıca kutu taşımakla görevli ayak parçaları farklı yükler altında ABS malzemesi ile test edilmiştir. Ayak yük stres tablosu oluşturularak, ayaklara dikey olarak yüklenebilecek maksimum kuvvet belirlenmiştir.

İkinci aşamada SolidWorks'de tasarlanan İHA için MATLAB/Simulink aracılığıyla bir simülasyon ortamı oluşturulmuştur. Simülasyon ortamı oluşturulurken Simscape simülasyon ortamı kullanılmıştır. Tasarlanan İHA STL dosya formatı ile Simscape Multibody'e aktarılmıştır. Dosyaların aktarımını File Solid fonksiyonu ile gerçekleştirilmiştir.

Aşağıda yer alan Şekil 4.1 tasarlanan İHA'nın uçuş, iniş ve kavrama süreçlerinin simülasyonunu göstermektedir. Görsellerde gösterilen İHA ile kutunun alınması ve istenilen noktaya teslim edilmesi gösterilmiştir. Kutunun alınması için İHA alma noktası yüksekliğine alçalarak 45 derece Z ekseninde açısal hareket yaparak kutuda bulunan deliklere İHA'nın ayaklarında bulunan tırnak mekanizmasına gelecek şekilde hareket ettikten sonra yükselerek kutuyu alma işlemini tamamlamıştır. Kutunun bırakılması için İHA'nın taşımakta olduğu kutunun yere temas etmesi ve İHA'nın kutunun temasından sonra 45 derecelik bir dönüş hareketi yapması gereklidir. bu dönüş ile kutunun üzerinde bulunan çentiklerden uzaklaşarak tekrardan hedef yüksekliğe yükselmesi gerekmektedir bu süreç şekilde gösterilmektedir.



Şekil 4.1. İHA'nın Kutu Alma-Bırakma Süreçlerinin Görüntüleri

Kalkış pozisyonu, uçuş yüksekliği, kutunun tahmini olarak alınacağı pozisyon ve kutunun bırakılacağı noktanın belirlenebilmesi için Görev kontrol sistemi oluşturulmuştur. Kontrolör olarak PID kullanılmıştır. Alınması hedeflenen kutunun tespiti için kamera sensörü ve QR kod teknolojileri kullanılmış, yükseklik/piksel pozisyonları belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar doğrultusunda kamera kalibrasyonu yapılarak hata oranı minimuma indirilmiştir.

PID optimizasyonu için Puma Optimizasyoncusu, Afrika Akbaba Optimizasyonu ve Ateş Şahini Optimizasyoncusu meta-sezgisel algoritmalarının performansları karşılaştırılmıştır. Karşılaştırmanın yapılabilmesi için Yunuslama ve Yuvarlanma eksenleri için ortak bir optimizasyon ve dönme eksenini için ayrı bir optimizasyon parametresi oluşturulmuştur. PID hedef değerleri için adım giriş fonksiyonu kullanılmıştır.

Optimizasyon Sonrası PID Performans Analiz Tablosunu ifade eden Tablo 3.2'de yer alan değerler incelendiğinde, kullanılan optimizasyon algoritmalarının yaklaşık olarak benzer sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir.

AŞO-PID'nun verdiği değerler Yunuslamada: $T_r(s)$: 1.451, $T_p(s)$: 1.814, $M_p(\%)$: 0.052, $T_s(s)$: 3.192, $Ess(\%)$: 0.03; Yuvarlanmada: $T_r(s)$: 1.449, $T_p(s)$: 1.811, $M_p(\%)$: 0.052, $T_s(s)$: 3.136, $Ess(\%)$: 0.03; Dönmede: $T_r(s)$: 0.493, $T_p(s)$: 0.732, $M_p(\%)$: 0.05, $T_s(s)$: 0.745, $Ess(\%)$: 0.05; Yükseklikte: $T_r(s)$: 5.138, $T_p(s)$: 5.938, $M_p(\%)$: 1.0, $T_s(s)$: 5.994, $Ess(\%)$: 1.0 olarak hesaplanmıştır.

PO-PID'nun verdiği değerler Yunuslamada: $Tr(s)$ 1.384, $Tp(s)$: 1.711, $Mp(\%)$: 0.058, $Ts(s)$: 3.102, $Ess(\%)$: 0.02; Yuvarlanmada: $Tr(s)$: 1.382, $Tp(s)$: 1.712, $Mp(\%)$: 0.05, $Ts(s)$: 3.112, $Ess(\%)$: 0.026; Dönmede: : $Tr(s)$: 0.438, $Tp(s)$: 1.707, $Mp(\%)$: 0.062, $Ts(s)$: 0,732, $Ess(\%)$: 0.062; Yükseklikte: Yükseklikte: $Tr(s)$: 1.678, $Tp(s)$: 1.962, $Mp(\%)$: 1.0, $Ts(s)$: 2.803, $Ess(\%)$: 0.001 olarak hesaplanmıştır.

AAO-PID'nun verdiği değerler ise Yunuslamada: $Tr(s)$: 1,430, $Tp(s)$: 1.758, $Mp(\%)$: 0.048, $Ts(s)$: 3.062, $Ess(\%)$: 0.024; Yuvarlamada: $Tr(s)$: 1,430, $Tp(s)$: 1,758, $Mp(\%)$: 0.048, $Ts(s)$: 3,136, $Ess(\%)$: 0.024; Dönmede: $Tr(s)$: 0,453, $Tp(s)$: 0,757, $Mp(\%)$: 0.064, $Ts(s)$: 0,770, $Ess(\%)$: 0.064; Yükseklikte: $Tr(s)$: 1,671, $Tp(s)$: 1,902, $Mp(\%)$: 0.5, $Ts(s)$: 3,143, $Ess(\%)$: 0.5 olarak hesaplanmıştır.

Performansın analiz edilebilmesi için dikkate alınan değerlerin yakın olması sebebiyle $Tr(s)$, $Tp(s)$ ve $Ess(\%)$ değerleri kontrol edilmiştir.

Yunuslama eksenini için referans değerine ulaşma süresi, maksimum salınım değerine ulaşma süresi ve kalıcı durum hata oranında en yüksek başarımlı performans değerleri PO algoritmasında elde edilmiştir. Yuvarlama eksenini için kalıcı hata oranı sonuçlarına göre PO algoritması AAO algoritmasından daha düşük performansa sahiptir. Ancak referans değerine ulaşma süresi, maksimum salınım değerine ulaşma süresi ve stabilizasyona ulaşma süresinde daha yüksek performans sergilediği için, PO'nun daha üstün olduğu belirtilebilir. Dönme eksenini için AŞO algoritması en düşük kalıcı konum hata oranına sahiptir. Ayrıca maksimum aşma oranında da daha yüksek performans göstermiştir. Diğer algoritmaların verileri de incelendiğinde belirgin bir farklılık olmaması nedeniyle dönme eksenini için en iyi performansın AŞO tarafından sergilendiği ifade edilebilir. Yükseklik eksenini için ise referans değerine ulaşma süresi, maksimum değere ulaşma süresi ve kalıcı konum hata oranında PO algoritması bariz bir üstünlük sergilemektedir.

PO algoritması diğer algoritmalara göre tırmanma süresi, maksimum aşma oranı ve kalıcı hata oranı açısından daha düşük değerler göstermiştir. Ancak, dönme ekseninde gerçekleştirilen optimizasyonda PO algoritması diğer algoritmalara göre $Tr(s)$ ve $Tp(s)$ parametrelerinde daha başarılı olduğu, $Ess(\%)$ parametresinde ise daha düşük bir performans sergilediği gözlemlenmiştir. Bununla birlikte, bu $Ess(\%)$

farkının çok küçük olması nedeniyle, dönme ekseninde PO algoritmasının en başarılı optimizasyon algoritması olduğu anlaşılmıştır.

Uçuş dinamiğinin simüle edilmesini sağlayan yunuslama, yuvarlanma, dönme ve yükseklik eksenlerinde uygulanan üç farklı meta sezgisel algoritmaların sonuçları incelendiğinde dört parametrenin üçünde PO algoritmasının daha iyi performans gösterdiği gözlemlenmiştir. Bu doğrultuda İHA kontrolü için incelenen bu üç algoritma arasında en iyi sonuç veren algoritmanın PO olduğu ifade edilebilir.

Bu tez çalışması teorik bir nitelik taşımaktadır. İleri çalışmalar için öncelikle geliştirilen İHA fiziksel olarak imal edilmeli ve gerçek saha testlerine tabi tutularak performans analizleri yapılabilir.



KAYNAKLAR

- [1] Özbek, Emre, Durmuş, S., Şöhret, Y., Karakoç, T. H.. “Elektrik Motorlu ve Yüksek Faydalı Yük Oranlı Mikro Sınıfı Bir İHA Tasarımı, Üretimi ve Testleri”, Sürdürülebilir Havacılık Araştırmaları Dergisi, (2016), 1(2), 80-91.
- [2] Demiryürek, Ahmet. “Bir Dört Pervanelinin Modellenmesi ve Denetimi”, Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.(2018)
- [3] Kaçar, Alp, Tok, B., Kahvecioğlu, A. C., Albostan, O., Köse, S., İrfanoğlu, B., Arıkan, K. B.. “Üç Dönerkanatlı ve Döner-Rotorlu İnsansız Hava Aracının Tasarımı”, EMO Bilimsel Dergi, (2013), 3 (5), 107-113.
- [4] D’antonio, Diego S., Gustavo A. Cardona, and David Saldana. "The catenary robot: Design and control of a cable propelled by two quadrotors." IEEE Robotics and Automation Letters 6.2 (2021): 3857-3863.
- [5] Şahin, Hüseyin, Oguz Kose, and Tugrul Oktay. "Simultaneous autonomous system and powerplant design for morphing quadrotors." Aircraft Engineering and Aerospace Technology 94.8 (2022): 1228-1241.
- [6] Idrissi, Moad, Mohammad Salami, and Fawaz Annaz. "Modelling, simulation and control of a novel structure varying quadrotor." Aerospace Science and Technology 119 (2021): 107093.
- [7] Zhao, N., Luo, Y., Wang, G., Shen, Y. : "A deployable articulated mechanism enabled in-flight morphing aerial gripper." Mechanism and Machine Theory 167 (2022): 104518
- [8] Jalloh, Mohamed Sherif. Optimum design of unmanned aerial vehicles using structural optimization techniques. Diss. Bursa Uludag University (Turkey) (2021).
- [9] Türk Hava Kurumu, İHA <https://www.thk.org.tr/iha>
- [10] Türk Hava Kurumu, İHA <https://www.thk.org.tr/iha>
- [11] Mairaj, Aakif, Asif I. Baba, and Ahmad Y. Javaid. "Application specific drone simulators: Recent advances and challenges." Simulation Modelling Practice and Theory 94 (2019): 100-117.
- [12] Mohsan, S. A. H., Othman, N. Q. H., Li, Y., Alsharif, M. H., & Khan, M. A. "Unmanned aerial vehicles (UAVs): Practical aspects, applications, open challenges, security issues, and future trends." Intelligent Service Robotics 16.1 (2023): 109-137.
- [13] Mohsan, S. A. H., Othman, N. Q. H., Li, Y., Alsharif, M. H., & Khan, M. A. "Unmanned aerial vehicles (UAVs): Practical aspects, applications, open challenges, security issues, and future trends." Intelligent Service Robotics 16.1 (2023): 109-137
- [14] Mohsan, S. A. H., Othman, N. Q. H., Li, Y., Alsharif, M. H., & Khan, M. A. "Unmanned aerial vehicles (UAVs): Practical aspects, applications, open challenges, security issues, and future trends." Intelligent Service Robotics 16.1 (2023): 109-137.
- [15] Mohsan, S. A. H., Othman, N. Q. H., Li, Y., Alsharif, M. H., & Khan, M. A. "Unmanned aerial vehicles (UAVs): Practical aspects, applications, open challenges, security issues, and future trends." Intelligent Service Robotics 16.1 (2023): 109-137.
- [16] Mohsan, S. A. H., Othman, N. Q. H., Li, Y., Alsharif, M. H., & Khan, M. A. "Unmanned aerial vehicles (UAVs): Practical aspects, applications, open challenges, security issues, and future trends." Intelligent Service Robotics 16.1 (2023): 109-137.
- [17] Noor F, Khan MA, Al-Zahrani A, Ullah I, Al-Dhlan KA "A review on communications perspective of flying ad-hoc networks: key enabling wireless technologies, applications, challenges and open research topics." Drones 4.4 (2020): 65.

- [18] Guan, S.; Huang, Y.; Wang, G.; Sirianni, H.; Zhu, Z. An Error Prediction Model for Construction Bulk Measurements Using a Customized Low-Cost UAS-LIDAR System. *Drones* (2022), 6, 178.
- [19] Guan, S.; Zhu, Z.; Wang, G. A Review on UAV-Based Remote Sensing Technologies for Construction and Civil Applications. *Drones* (2022), 6, 117.
- [20] Molina, Andres Acero, Yilei Huang, and Yuhan Jiang. "A Review of Unmanned Aerial Vehicle Applications in Construction Management: 2016–2021." *Standards 3.2* (2023): 95-109.
- [21] Reinecke, Marthinus, and Tania Prinsloo. "The influence of drone monitoring on crop health and harvest size." 2017 1st International conference on next generation computing applications (NextComp). IEEE, 2017.
- [22] Maes, Wouter H., and Kathy Steppe. "Perspectives for remote sensing with unmanned aerial vehicles in precision agriculture." *Trends in plant science* 24.2 (2019): 152-164.
- [23] Tiansawat, Pimonrat, and Stephen Elliott. "Unmanned aerial vehicles for automated forest restoration." Faculty of Science, Chiang Mai University (2020).
- [24] Ubina, Naomi A., and Shyi-Chyi Cheng. "A review of unmanned system technologies with its application to aquaculture farm monitoring and management." *Drones* 6.1 (2022): 12.
- [25] Menouar H, Guvenc I, Akkaya K, Uluagac AS, Kadri A, Tuncer A "UAV-enabled intelligent transportation systems for the smart city: Applications and challenges." *IEEE Communications Magazine* 55.3 (2017): 22-28.
- [26] Tükenmez, Fatih, and Murat Yakar. "Production of road maps in highway projects by unmanned aerial vehicle (UAV)." *Advanced Engineering Days (AED)* 6 (2023): 94-96.
- [27] Zhang Y, Yuan X, Li W, Chen S "Automatic power line inspection using UAV images." *Remote Sensing* 9.8 (2017): 824
- [28] Foudeh, Husam A., Patrick Chi-Kwong Luk, and James F. Whidborne. "An advanced unmanned aerial vehicle (UAV) approach via learning-based control for overhead power line monitoring: A comprehensive review." *IEEE Access* 9 (2021): 130410-130433.
- [29] Sharma M, Gupta A, Gupta SK, Alsamhi SH, Shvetsov AV Sharma, Manjula, et al. "Survey on unmanned aerial vehicle for Mars exploration: deployment use case." *Drones* 6.1 (2022): 4.
- [30] Alqurashi FS, Trichili A, Saeed N, Ooi BS, Alouini MS "Maritime communications: A survey on enabling technologies, opportunities, and challenges." *IEEE Internet of Things Journal* 10.4 (2022): 3525-3547.
- [31] Kourani, Ahmad, and Naseem Daher. "Marine locomotion: A tethered UAV-buoy system with surge velocity control." *Robotics and Autonomous Systems* 145 (2021): 103858.
- [32] Hill, Austin Chad, Elise Jakoby Laugier, and Jesse Casana. "Archaeological remote sensing using multi-temporal, drone-acquired thermal and Near Infrared (NIR) Imagery: A case study at the Enfield Shaker Village, New Hampshire." *Remote Sensing* 12.4 (2020): 690.
- [33] Miyoshi GT, Arruda MDS, Osco LP, Marcato Junior J, Gonçalves DN, Imai NN et al "A novel deep learning method to identify single tree species in UAV-based hyperspectral images." *Remote Sensing* 12.8 (2020): 1294.
- [34] Lin YC, Cheng YT, Zhou T, Ravi R, Hasheminasab SM, Flatt JE et al Evaluation of UAV LiDAR for mapping coastal environments. *Remote Sens* 11(24) (2019):2893

- [35] Liu Z, Zhang Y, Yu X, Yuan C et al. "Evaluation of UAV LiDAR for mapping coastal environments." *Remote Sensing* 11.24 (2019): 2893.
- [36] Mohsan, Syed Agha Hassnain, et al. "Unmanned aerial vehicles (UAVs): Practical aspects, applications, open challenges, security issues, and future trends." *Intelligent Service Robotics* 16.1 (2023): 109-137.
- [37] Lim, H.; Park, J.; Lee, D.; Kim, H.J."Build your own quadrotor: Open-source projects on unmanned aerial vehicles." *IEEE Robotics & Automation Magazine* 19.3 (2012): 33-45.
- [38] Wood, R. J., Finio, B., Karpelson, M., Ma, K., Pérez-Arancibia, N. O., Sreetharan, P. S. & Whitney, J. P. "Progress on "pico" air vehicles." *Robotics Research: The 15th International Symposium ISRR*. Springer International Publishing, (2017)
- [39] Ahmed, F., Mohanta, J. C., Keshari, A., & Yadav, P. S. "Recent advances in unmanned aerial vehicles: a review." *Arabian Journal for Science and Engineering* 47.7 (2022): 7963-7984.
- [40] Bucki, N., Tang, J., Mueller, M.W.: Design and control of a midair reconfigurable quadcopter using unactuated hinges. arXiv:2103.16632 (2021)
- [41] Zhao, M., Anzai, T., Okada, K., Kawasaki, K., & Inaba, M. "Singularity-free aerial deformation by two-dimensional multilinked aerial robot with 1-DoF vectorable propeller." *IEEE Robotics and Automation Letters* 6.2 (2021): 1367-1374.
- [42] M. Zhao, K. Kawasaki, X. Chen, S. Noda, K. Okada and M. Inaba, "Whole-body aerial manipulation by transformable multirotor with two- multilinks", *International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, (2017): 5175-5182,
- [43] Su, Y., Ruan, L., Yu, P., Pi, C.H., Gerber, M.J., Tsao, T.C.: A fast and efficient attitude control algorithm of a tilt-rotor aerial platform using inputs redundancies. *IEEE Robot. Autom. Lett.* <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9664339> (2021)
- [44] Marques, Felipe Machini Malachias. "Effects of endowing tilt-rotor mechanisms in the context of multi-copters." *Universidade Federal de Uberlândia* (2022).
- [45] Mughees, Abdullah, and Iftikhar Ahmad. "Multi-optimization of novel conditioned adaptive barrier function integral terminal SMC for trajectory tracking of a quadcopter System." *IEEE Access* (2023).
- [46] Belmouhoub, A., Bouzid, Y., Medjmadj, S., Derrouaoui, S. H., & Guiatni, M. "Boosted backstepping control by disturbance observer for reconfigurable quadrotor." *2022 2nd International Conference on Advanced Electrical Engineering (ICAEE)*. IEEE, 2022.
- [47] Derrouaoui, S.H., Bouzid, Y., Guiatni, M.: Nonlinear robust control of a new reconfigurable unmanned aerial vehicle. *Robotics* 10(2), 76. <https://www.mdpi.com/2218-6581/10/2/76> (2021)
- [48] Yu, L., He, G., Wang, X., Zhao, S.: Robust fixed-time sliding mode attitude control of tilt tri-rotor uav in helicopter mode. *IEEE Trans. Ind. Electron.* <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9570130> (2021)
- [49] Gu, Xun, Bin Xian, and Jieqi Li. "Model free adaptive control design for a tilt trirotor unmanned aerial vehicle with quaternion feedback: Theory and implementation." *International Journal of Adaptive Control and Signal Processing* 36.1 (2022): 122-137.
- [50] Wang, Xuerui, and Sihao Sun. "Incremental fault-tolerant control for a hybrid quad-plane UAV subjected to a complete rotor loss." *Aerospace Science and Technology* 125 (2022): 107105.

- [51] Yi, Shilin, Keigo Watanabe, and Isaku Nagai. "Backstepping-based super-twisting sliding mode control for a quadrotor manipulator with tiltable rotors." *Journal of Robotics and Control (JRC)* 3.2 (2022): 128-137.
- [52] Belmouhoub, A., Medjmadj, S., Bouzid, Y., Derrouaoui, S., Guiatni, M.: "Enhanced backstepping control for an unconventional quadrotor under external disturbances." *The Aeronautical Journal* 127.1310 (2023): 627-650.
- [53] Liang, X., Wang, Q., Xu, B., Dong, C.: Back-stepping faulttolerant control for morphing aircraft based on fixed-time observer. *Int. J. Control. Autom. Syst.* 19(12), 3924–3936. [https:// link.springer.com/article/10.1007/s12555-020-0764-3](https://link.springer.com/article/10.1007/s12555-020-0764-3) (2021)
- [54] Derrouaoui, S.H., Bouzid, Y., Guiatni, M., Kada, H., Dib, I., Moudjari, N.: Backstepping controller applied to a foldable quadrotor for 3d trajectory tracking. In: *ICINCO*, pp. 537–544. <https://www.scitepress.org/Papers/2020/98902/98902.pdf> (2020)
- [55] Madani, Tarek, and Abdelaziz Benallegue. "Sliding mode observer and backstepping control for a quadrotor unmanned aerial vehicles." 2007 American control conference. IEEE, 2007.
- [56] Mohd Basri, Mohd Ariffanan, Abdul Rashid Husain, and Kumeresan A. Danapalasingam. "Enhanced backstepping controller design with application to autonomous quadrotor unmanned aerial vehicle." *Journal of Intelligent & Robotic Systems* 79 (2015): 295-321
- [57] Tal, Ezra, and Sertac Karaman. "Global incremental flight control for agile maneuvering of a tailsitter flying wing." *Journal of Guidance, Control, and Dynamics* 45.12 (2022): 2332-2349.
- [58] Dellemann, Lars FA, and Christophe De Wagter. "Hybrid UAV Attitude Control using INDI and Dynamic Tilt-Twist." *Proceedings of the 12th International Micro Air Vehicle Conference.* (2021): 131-136
- [59] Hamandi, Mahmoud, Lakmal Seneviratne, and Yahya Zweiri. "Static hovering realization for multirotor aerial vehicles with tiltable propellers." *Journal of Mechanisms and Robotics* 16.3 (2024): 031004
- [60] Chen, L., Lv, Z., Shen, X., Wu, Y., Sun, X.-M.: "Adaptive attitude control for a coaxial tilt-rotor UAV via immersion and invariance methodology." *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica* 9.9 (2022): 1710-1713.
- [61] Marshall, Julius A., Grant I. Carter, and Andrea L'Afflitto. "Model reference adaptive control for prescribed performance and longitudinal control of a tail-sitter uav." *AIAA SCITECH 2022 Forum.* (2022): 1380.
- [62] Derrouaoui, Saddam Hocine, Yasser Bouzid, and Mohamed Guiatni. "Adaptive integral backstepping control of a reconfigurable quadrotor with variable parameters' estimation." *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering* 236.7 (2022): 1294-1309.
- [63] He, A., Zhang, Y., Zhao, H., Wang, B., Gao, Z. "Adaptive fault-tolerant control of a hybrid VTOL UAV against actuator faults and model uncertainties under fixed-wing mode." *International Journal of Aerospace Engineering* 2022 (2022): 1-11.
- [64] Papadimitriou, A., Mansouri, S.S., Kanellakis, C., Nikolakopoulos, G.: Geometry aware nmpc scheme for morphing quadrotor navigation in restricted entrances. In: 2021 European Control Conference (ECC). IEEE. <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9655205> (2021): 1597–1603.
- [65] Song, Yunlong, and Davide Scaramuzza. "Policy search for model predictive control with application to agile drone flight." *IEEE Transactions on Robotics* 38.4 (2022): 2114-2130.

- [66] Zhou, W., : Modelling and controlling of an autonomous tailsitter vertical take-off and landing (vtol) unmanned aerial vehicles (uavs). Polyu Electronic theses (2021)
- [67] Zahn, O., Bustamante Jr, J., Switzer, C., Daniel, T., Kutz, J.N.: Pruning deep neural networks generates a sparse, bio-inspired nonlinear controller for insect flight. arXiv:2201.01852 (2022)
- [68] Lee, Hyungyu, Jeong, M., Kim, C., Lim, H., Park, C., Hwang, S., Myung, H.: "Low-level pose control of tilting multirotor for wall perching tasks using reinforcement learning." 2021 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). IEEE, (2021): 9669–9676.
- [69] Lee, Hyungyu, Jeong, M., Kim, C., Lim, H., Park, C., Hwang, S., Myung, H.: "Low-level pose control of tilting multirotor for wall perching tasks using reinforcement learning." 2021 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). IEEE, (2021): 9669–9676.
- [70] Shakernia, O., Ma, Y., Koo, T. J., Hespanha, J., Sastry, S. S., "Vision guided landing of an unmanned air vehicle." Proceedings of the 38th IEEE Conference on Decision and Control (Cat. No. 99CH36304). Vol. 4. IEEE, (1999): 4143-4148..
- [71] Saripalli, Srikanth, James F. Montgomery, and Gaurav S. Sukhatme. "Visually guided landing of an unmanned aerial vehicle." IEEE transactions on robotics and automation 19.3 (2003): 371-380.
- [72] Tribou, Michael, Adeel Akhtar, and Steven Waslander. "Relative position-based visual servoing control for quadrotors." AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference. (2012): 5049.
- [73] Ling, Kevin. Precision landing of a quadrotor uav on a moving target using low-cost sensors. MS thesis. University of Waterloo, (2014).
- [74] Shen, Shaojie, Mulgaonkar, Y., Michael, N., & Kumar, V. "Vision-Based State Estimation and Trajectory Control Towards High-Speed Flight with a Quadrotor." Robotics: Science and Systems. Vol. 1. (2013): 32.
- [75] Sani, Mohammad Fattahi, Maryam Shoaran, and Ghader Karimian. "Automatic landing of a low-cost quadrotor using monocular vision and Kalman filter in GPS-denied environments." Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences 27.3 (2019): 1821-1838.
- [76] Briod, Adrien, Jean-Christophe Zufferey, and Dario Floreano. "A method for ego-motion estimation in micro-hovering platforms flying in very cluttered environments." Autonomous Robots 40 (2016): 789-803.
- [77] Wenzel, Karl E., Paul Rosset, and Andreas Zell. "Low-cost visual tracking of a landing place and hovering flight control with a microcontroller." Journal of Intelligent and Robotic Systems 57 (2010): 297-311.
- [78] Corke, Peter, Jorge Lobo, and Jorge Dias. "An introduction to inertial and visual sensing." The international journal of robotics research 26.6 (2007): 519-535.
- [79] Kelly, Jonathan, and Gaurav S. Sukhatme. "Visual-inertial sensor fusion: Localization, mapping and sensor-to-sensor self-calibration." The International Journal of Robotics Research 30.1 (2011): 56-79.
- [80] Jones, Eagle S., and Stefano Soatto. "Visual-inertial navigation, mapping and localization: A scalable real-time causal approach." The International Journal of Robotics Research 30.4 (2011): 407-430.
- [81] Martinelli, Agostino. "Vision and IMU data fusion: Closed-form solutions for attitude, speed, absolute scale, and bias determination." IEEE Transactions on Robotics 28.1 (2011): 44-60.

- [82] Blösch, M., Weiss, S., Scaramuzza, D., & Siegwart, R. "Vision based MAV navigation in unknown and unstructured environments." 2010 IEEE International Conference on Robotics and Automation. IEEE, (2010): 21–28.
- [83] Taylor, C. N., Veth, M., Raquet, J., & Miller, M. "Comparison of two image and inertial sensor fusion techniques for navigation in unmapped environments." IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems 47.2 (2011): 946-958.
- [84] Diel, David D., Paul DeBitetto, and Seth Teller. "Epipolar constraints for vision-aided inertial navigation." 2005 Seventh IEEE Workshops on Applications of Computer Vision (WACV/MOTION'05)-Volume 1. Vol. 2. IEEE (2005): 221-228.
- [85] Mourikis, Anastasios I., and Stergios I. Roumeliotis. "A multi-state constraint Kalman filter for vision-aided inertial navigation." Proceedings 2007 IEEE international conference on robotics and automation. IEEE, (2007): 3565-3572.
- [86] Taylor, Clark. N., Veth, M., Raquet, J., & Miller, M. "Comparison of two image and inertial sensor fusion techniques for navigation in unmapped environments." IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems 47.2 (2011): 946-958.
- [87] Weiss, S., Achtelik, M., Lynen, S., Chli, M., & Siegwart, R. "Real-time onboard visual-inertial state estimation and self-calibration of MAVs in unknown environments." 2012 IEEE international conference on robotics and automation. IEEE. (2012): 957-964.
- [88] Briod, Adrien, Jean-Christophe Zufferey, and Dario Floreano. "A method for ego-motion estimation in micro-hovering platforms flying in very cluttered environments." Autonomous Robots 40 (2016): 789-803.
- [89] Lucas, Bruce D., and Takeo Kanade. "An iterative image registration technique with an application to stereo vision." IJCAI'81: 7th international joint conference on Artificial intelligence. Vol. 2. (1981): 121–130.
- [90] Srinivasan, Mandyam V. "An image-interpolation technique for the computation of optic flow and egomotion." Biological cybernetics 71.5 (1994): 401-415.
- [91] Floreano, D., Pericet-Camara, R., Viollet, S., Ruffier, F., Brückner, A., Leitel, R., et al. "Miniature curved artificial compound eyes." Proceedings of the National Academy of Sciences 110.23 (2013): 9267-9272.
- [92] Zufferey, J-C., and Dario Floreano. "Fly-inspired visual steering of an ultralight indoor aircraft." IEEE transactions on robotics 22.1 (2006): 137-146.
- [93] Barrows, Geoffrey. L., Humbert, S., Leonard, A., Neely, C. W., & Young, T. "Vision Based Hover in Place." 50th AIAA Aerospace Sciences Meeting including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition. (2006): 586.
- [94] Bristeau, P., Callou, F., Vissière, D., & Petit, N. (2011). "The navigation and control technology inside the ar. drone micro uav." IFAC Proceedings Volumes 44.1 (2011): 1477-1484.
- [95] Honegger, D., Meier, L., Tanskanen, P., & Pollefeys, M. "An open source and open hardware embedded metric optical flow cmos camera for indoor and outdoor applications." 2013 IEEE International Conference on Robotics and Automation. IEEE, (2013): 1736-1741.
- [96] Briod, Adrien, Jean-Christophe Zufferey, and Dario Floreano. "A method for ego-motion estimation in micro-hovering platforms flying in very cluttered environments." Autonomous Robots 40 (2016): 789-803.
- [97] Wenzel, Karl E., Paul Rosset, and Andreas Zell. "Low-cost visual tracking of a landing place and hovering flight control with a microcontroller." Journal of Intelligent and Robotic Systems 57 (2010): 297-311.

- [98] Gui, Y., Guo, P., Zhang, H., Lei, Z., Zhou, X., Du, J., Yu, Q., "Airborne vision-based navigation method for UAV accuracy landing using infrared lamps." *Journal of Intelligent & Robotic Systems* 72 (2013): 197-218.
- [99] Yang, S., Ying, J., Lu, Y., Li, Z., "Precise quadrotor autonomous landing with SRUKF vision perception." 2015 IEEE international conference on robotics and automation (ICRA). IEEE, (2015): 2196-2201.
- [100] Gautam, Alvika, P. B. Sujit, and Srikanth Saripalli. "A survey of autonomous landing techniques for UAVs." 2014 international conference on unmanned aircraft systems (ICUAS). IEEE, (2014): 1210-1218.
- [101] Gautam, Alvika, P. B. Sujit, and Srikanth Saripalli. "Autonomous quadrotor landing using vision and pursuit guidance." *IFAC-PapersOnLine* 50.1 (2017): 10501-10506.
- [102] Patrino, C., Nitti, M., Petitti, A., Stella, E., D'Orazio, T., "A vision-based approach for unmanned aerial vehicle landing." *Journal of Intelligent & Robotic Systems* 95.2 (2019): 645-664.
- [103] Zhang, Xuetao., Jiang, J., Fang, Y., Zhang, X., Chen, X., "Enhanced fiducial marker based precise landing for quadrotors." 2019 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM). IEEE, (2019):1353-1358.
- [104] Sun, Liang., Huang, Y., Zheng, Z., Zhu, B., Jiang, J., "Adaptive nonlinear relative motion control of quadrotors in autonomous shipboard landings." *Journal of the Franklin Institute* 357.18 (2020): 13569-13592.
- [105] Badakis, Giannis, Manos Koutsoubelias, and Spyros Lalis. "Robust precision landing for autonomous drones combining vision-based and infrared sensors." 2021 IEEE Sensors Applications Symposium (SAS). IEEE. (2021): 1-6.
- [106] Wang, Guanzheng, Zhihong Liu, and Xiangke Wang. "UAV autonomous landing using visual servo control based on aerostack." *Proceedings of the 3rd International Conference on Computer Science and Application Engineering*. (2019): 1-6.
- [107] Li, Zhou., Chen, Y., Lu, H., Wu, H., Cheng, L., "UAV autonomous landing technology based on AprilTags vision positioning algorithm." 2019 Chinese Control Conference (CCC). IEEE. (2019): 8148-8153..
- [108] Nedungadi, Ashwin Suresh, and Martin Saska. "Design of an active-reliable grasping mechanism for autonomous unmanned aerial vehicles." *Modelling and Simulation for Autonomous Systems: 6th International Conference, MESAS 2019, Palermo, Italy, October 29–31, 2019, Revised Selected Papers* 6. Springer International Publishing, (2020): 162-179.
- [109] Lin, Shijie, Lin, S., Wang, J., Yang, W., & Xia, G. "Toward autonomous rotation-aware unmanned aerial grasping." *arXiv preprint arXiv:1811.03921* (2018).
- [110] Fiaz, Usman A., Nouredine Toumi, and Jeff S. Shamma. "Passive aerial grasping of ferrous objects." *IFAC-PapersOnLine* 50.1 (2017): 10299-10304.
- [111] Pounds, Paul EI, and Aaron Dollar. "Hovering stability of helicopters with elastic constraints." *Dynamic Systems and Control Conference*. Vol. 44182. (2010): 781-788.
- [112] Mellinger, D., Lindsey, Q., Shomin, M., & Kumar, V. "Design, modeling, estimation and control for aerial grasping and manipulation." 2011 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. IEEE, (2011): 2668-2673.
- [113] Pounds, Paul EI, Daniel R. Bersak, and Aaron M. Dollar. "Grasping from the air: Hovering capture and load stability." 2011 IEEE international conference on robotics and automation. IEEE, (2011): 2491-2498.

- [114] Ghadiok, Vaibhav, Jeremy Goldin, and Wei Ren. "Autonomous indoor aerial gripping using a quadrotor." 2011 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. IEEE, (2011): 4645-4651.
- [115] Pounds, Paul EI, and Aaron Dollar. "Hovering stability of helicopters with elastic constraints." *Dynamic Systems and Control Conference*. Vol. 44182. (2010): 781-788.
- [116] Mellinger, Daniel, Lindsey, Q., Shomin, M., & Kumar, V. "Design, modeling, estimation and control for aerial grasping and manipulation." 2011 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. IEEE, (2011): 2668–2673.
- [117] Pounds, Paul EI, Daniel R. Bersak, and Aaron M. Dollar. "Grasping from the air: Hovering capture and load stability." 2011 IEEE international conference on robotics and automation. IEEE, (2011): 2491-2498
- [118] Pounds, Paul EI, Daniel R. Bersak, and Aaron M. Dollar. "Stability of small-scale UAV helicopters and quadrotors with added payload mass under PID control." *Autonomous Robots* 33 (2012): 129-142.
- [119] Nguyen, Hai-Nguyen, and Dongjun Lee. "Hybrid force/motion control and internal dynamics of quadrotors for tool operation." 2013 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. IEEE, (2013): 3458-3464
- [120] Bellens, Steven, Joris De Schutter, and Herman Bruyninckx. "A hybrid pose/wrench control framework for quadrotor helicopters." 2012 IEEE International Conference on Robotics and Automation. IEEE. (2012): 2269-2274.
- [121] Mersha, Abeje Y., Stefano Stramigioli, and Raffaella Carloni. "Variable impedance control for aerial interaction." 2014 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. IEEE, (2014): 3435-3440.
- [122] Cruz, Patricio J., and Rafael Fierro "Autonomous lift of a cable-suspended load by an unmanned aerial robot." 2014 IEEE conference on control applications (CCA). IEEE, (2014): 802-807.
- [123] Cruz, Patricio J., and Rafael Fierro. "Cable-suspended load lifting by a quadrotor UAV: hybrid model, trajectory generation, and control." *Autonomous Robots* 41 (2017): 1629-1643.
- [124] Foehn, Philipp, Falanga, D., Kuppuswamy, N., Tedrake, R., & Scaramuzza, D. "Fast trajectory optimization for agile quadrotor maneuvers with a cable-suspended payload." (2017).
- [125] Sandino, Luis A., Santamaria, D., Bejar, M., Kondak, K., Viguria, A., & Ollero, A. "First experimental results on enhancing hovering performance of unmanned helicopters by using a tethered setup." *Robotics and Autonomous Systems* 79 (2016): 147-155.
- [126] Tognon, Marco, Testa, A., Rossi, E., & Franchi, A. "Takeoff and landing on slopes via inclined hovering with a tethered aerial robot." 2016 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). IEEE, (2016): 1702-1707.
- [127] Tognon, Marco, and Antonio Franchi. "Dynamics, control, and estimation for aerial robots tethered by cables or bars." *IEEE Transactions on Robotics* 33.4 (2017): 834-845.
- [128] Bernard, Marcus, Kondak, K., Maza, I., & Ollero, A "Autonomous transportation and deployment with aerial robots for search and rescue missions." *Journal of Field Robotics* 28.6 (2011): 914-931.
- [129] Michael, Nathan, Jonathan Fink, and Vijay Kumar. "Cooperative manipulation and transportation with aerial robots." *Autonomous Robots* 30 (2011): 73-86.

- [130] Fink, Jonathan, Michael, N., Kim, S., & Kumar, V. "Planning and control for cooperative manipulation and transportation with aerial robots." *Robotics Research: The 14th International Symposium ISRR*. Springer Berlin Heidelberg, (2011): 643-659
- [131] Sreenath, Koushil, and Vijay Kumar. "Dynamics, control and planning for cooperative manipulation of payloads suspended by cables from multiple quadrotor robots." *rn 1.r2* (2013): r3.
- [132] Wang, Fei, Liu, P., Zhao, S., Chen, B. M., Phang, S. K., Lai, S., Pang, T., Wang, B., Cai, C., Lee, T.H. "Development of an unmanned helicopter for vertical replenishment." *Unmanned Systems* 3.01 (2015): 63-87.
- [133] Kornatowski, Przemyslaw M., Stefano Mintchev, and Dario Floreano. "An origami-inspired cargo drone." *2017 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*. IEEE, (2017): 6855-6862.
- [134] Çaşka, Serkan, Gök, K., Aydın, M. "3D yazıcı destekli üretilen dört rotorlu şasesinin sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak yapısal analizi ", *4 th International Congress On 3d Printing Technologies And Digital Industry*, (2019): 25-30.
- [135] Saska, Martin, Tomas Krajník, and Libor Pfeucil. "Cooperative μ UAV-UGV autonomous indoor surveillance." *International Multi-Conference on Systems, Signals & Devices*. IEEE (2012): 1-6.
- [136] Cantelli, L., Presti, M. L., Mangiameli, M., Melita, C. D., & Muscato, G. "Autonomous cooperation between UAV and UGV to improve navigation and environmental monitoring in rough environments." *10th International Symposium on Humanitarian Demining coupled with the 11th IARP WS HUDEM*. Vol. 23. (2013)
- [137] Giakoumidis, Nikolas, Bak, J. U., Gómez, J. V., Llenga, A., & Mavridis, N. "Pilot-scale development of a UAV-UGV hybrid with air-based UGV path planning." *2012 10th International Conference on Frontiers of Information Technology*. IEEE, (2012): 204-208.
- [138] Panda, Rames C., Cheng-Ching Yu, and Hsiao-Ping Huang. "PID tuning rules for SOPDT systems: Review and some new results." *ISA transactions* 43.2 (2004): 283-295.
- [139] Çınar, Said Mahmut, Zekeriya Balcı, and Ismail Yabanova. "Performing speed control of a DC motor with auto-tuning PID." *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi* 19.3 (2019): 690-696.
- [140] Bansal, Hari Om, Rajamayoor Sharma, and P. R. Shreeraman. "PID controller tuning techniques: a review." *Journal of control engineering and technology* 2.4 (2012)., 168–176.
- [141] Åström, K. J., and Tore Hägglund. "PID controllers: theory, design, and tuning, vol. 2." *Instrument society of America Research Triangle Park, NC* (1995)..
- [142] Abbasi, Ehsan, and Nader Naghavi. "Offline auto-tuning of a PID controller using extended classifier system (XCS) algorithm." (2017): 39-44.
- [143] Johnson, Michael A., and Mohammad H. Moradi. *PID control*. London, UK: Springer-Verlag London Limited, (2005).
- [144] Borase, R. P., Maghade, D. K., Sondkar, S. Y., & Pawar, S. N. "A review of PID control, tuning methods and applications." *International Journal of Dynamics and Control* 9 (2021): 818-827.
- [145] Joseph, S. B., Dada, E. G., Abidemi, A., Oyewola, D. O., & Khammas, B. M. "Metaheuristic algorithms for PID controller parameters tuning: Review, approaches and open problems." *Heliyon* 8.5 (2022).
- [146] Fong-Chwee, Teng, and H. R. Sirisena. "Self-tuning PID controllers for dead time processes." *IEEE Transactions on industrial electronics* 35.1 (1988): 119-125.

- [147] Rad, A. Besharati, Wai Lun Lo, and K. M. Tsang. "Self-tuning PID controller using Newton-Raphson search method." *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 44.5 (1997): 717-725.
- [148] Porter, Brian, and A. H. Jones. "Genetic tuning of digital PID controllers." *Electronics letters* 9.28 (1992): 843-844.
- [149] Ziegler John G, Nichols Nancy B, Optimum settings for automatic controllers. *J Dyn Syst Meas Control Trans ASME* 115 (1942):220–222
- [150] Ruano AEB, Fleming PJ, Jones DI "Connectionist approach to PID autotuning." *IEE Proceedings D (Control Theory and Applications)*. Vol. 139. No. 3. IET Digital Library, (1992): 279-285.
- [151] Mann GKI, Hu B-G, Gosine RG "Time-domain based design and analysis of new PID tuning rules." *IEE Proceedings-Control Theory and Applications* 148.3 (2001): 251-261.
- [152] Visioli, Antonio. "Tuning of PID controllers with fuzzy logic." *IEE Proceedings-Control Theory and Applications* 148.1 (2001): 1-8.
- [153] Huang, H-P., M-L. Roan, and J-C. Jeng. "On-line adaptive tuning for PID controllers." *IEE Proceedings-Control Theory and Applications* 149.1 (2002): 60-67.
- [154] Huang, H-P., M-L. Roan, and J-C. Jeng. "On-line adaptive tuning for PID controllers." *IEE Proceedings-Control Theory and Applications* 149.1 (2002): 60-67.
- [155] Joseph, Stephen Bassi, Dada, E. G., Abidemi, A., Oyewola, D. O., & Khammas, B. M. "Metaheuristic algorithms for PID controller parameters tuning: Review, approaches and open problems." *Heliyon* 8.5 (2022).
- [156] Ho-Huu, Vinh, Nguyen-Thoi, T., Nguyen-Thoi, M. H., & Le-Anh, L. "An improved constrained differential evolution using discrete variables (D-ICDE) for layout optimization of truss structures." *Expert Systems with Applications* 42.20 (2015): 7057-7069.
- [157] Gharehchopogh, Farhad Soleimanian, and Hojjat Gholizadeh. "A comprehensive survey: Whale Optimization Algorithm and its applications." *Swarm and Evolutionary Computation* 48 (2019): 1-24.
- [158] Gharehchopogh, Farhad Soleimanian, Isa Maleki, and Zahra Asheghi Dizaji. "Chaotic vortex search algorithm: metaheuristic algorithm for feature selection." *Evolutionary Intelligence* 15.3 (2022): 1777-1808.
- [159] Dhiman, Gaurav, and Vijay Kumar. "Spotted hyena optimizer: a novel bio-inspired based metaheuristic technique for engineering applications." *Advances in Engineering Software* 114 (2017): 48-70.
- [160] Blum, Christian, and Andrea Roli. "Metaheuristics in combinatorial optimization: Overview and conceptual comparison." *ACM computing surveys (CSUR)* 35.3 (2003): 268-308.
- [161] Mirjalili, Seyedali, and Andrew Lewis. "The whale optimization algorithm." *Advances in engineering software* 95 (2016): 51-67.
- [162] Beheshti, Zahra, and Siti Mariyam Hj Shamsuddin. "A review of population-based meta-heuristic algorithms." *Int. j. adv. soft comput. appl* 5.1 (2013): 1-35.
- [163] Shaheen, Abdullah. M., Spea, S. R., Farrag, S. M., & Abido, M. A. "A review of meta-heuristic algorithms for reactive power planning problem." *Ain Shams Engineering Journal* 9.2 (2018): 215-231.
- [164] Hussien, Abdelazim G., Mohamed Amin, and Mohamed Abd El Aziz. "A comprehensive review of moth-flame optimisation: variants, hybrids, and applications." *Journal of Experimental & Theoretical Artificial Intelligence* 32.4 (2020): 705-725.

- [165] Joseph, Stephen Bassi, Dada, E. G., Abidemi, A., Oyewola, D. O., & Khammas, B. M. "Metaheuristic algorithms for PID controller parameters tuning: Review, approaches and open problems." *Heliyon* 8.5 (2022)..
- [166] Jackson, Warren G., Ender Özcan, and Robert I. John. "Move acceptance in local search metaheuristics for cross-domain search." *Expert Systems with Applications* 109 (2018): 131-151.
- [167] Kumar, Ajay, and Seema Bawa. "Generalized ant colony optimizer: swarm-based meta-heuristic algorithm for cloud services execution." *Computing* 101.11 (2019): 1609-1632.
- [168] Kumar, Ajay, and Seema Bawa. "Generalized ant colony optimizer: swarm-based meta-heuristic algorithm for cloud services execution." *Computing* 101.11 (2019): 1609-1632.
- [169] Ribeiro, J., Santos, M., Carmo, M., Silva, M., "Comparison of PID controller tuning methods: analytical/classical techniques versus optimization algorithms." 2017 18th international Carpathian control conference (ICCC). IEEE, (2017): 533–538.
- [170] Ribeiro, J., Santos, M., Carmo, M., Silva, M., "Comparison of PID controller tuning methods: analytical/classical techniques versus optimization algorithms." 2017 18th international Carpathian control conference (ICCC). IEEE, (2017): 533–538..
- [171] Jalloh, Mohamed Sheriff. Optimum design of unmanned aerial vehicles using structural optimization techniques. Diss. Bursa Uludag University (Turkey), (2021).
- [172] Jalloh, Mohamed Sheriff. Optimum design of unmanned aerial vehicles using structural optimization techniques. Diss. Bursa Uludag University (Turkey) (2021).
- [173] Martinez Leon, A. S., Rukavitsyn, A. N., & Jatsun, S. F. "UAV airframe topology optimization." *Proceedings of the 6th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2020) Volume I* 6. Springer International Publishing (2021). 338-346.
- [174] Yap, Y. L., Toh, W., Giam, A., Yong, F. R., Chan, K. I., Tay, J. W. S., ... & Ng, T. Y. "Topology optimization and 3D printing of micro-drone: Numerical design with experimental testing." *International Journal of Mechanical Sciences* 237 (2023): 107771.
- [175] Magnussen, Øyvind, Geir Hovland, and Morten Ottestad. "Multicopter UAV design optimization." 2014 IEEE/ASME 10th International Conference on Mechatronic and Embedded Systems and Applications (MESA). IEEE, (2014): 1-6.
- [176] Cheng, Fen, Zhang, S., Li, Z., Chen, Y., Zhao, N., Yu, F. R., & Leung, V. C. "UAV trajectory optimization for data offloading at the edge of multiple cells." *IEEE Transactions on Vehicular Technology* 67.7 (2018): 6732-6736.
- [177] Xu, Jie, Yong Zeng, and Rui Zhang. "UAV-enabled wireless power transfer: Trajectory design and energy optimization." *IEEE transactions on wireless communications* 17.8 (2018): 5092-5106.
- [178] Chowdhury, S., Shahvari, O., Marufuzzaman, M., Li, X., & Bian, L. "Drone routing and optimization for post-disaster inspection." *Computers & Industrial Engineering* 159 (2021): 107495.
- [179] Latha, K., V. Rajinikanth, and P. M. Surekha. "PSO-based PID controller design for a class of stable and unstable systems." *International Scholarly Research Notices* 2013 (2013).
- [180] Çelik, Y. Yıldız, İ. Karadeniz, A.T. "A brief review of metaheuristic algorithms improved in the last three years." *Eur. J. Sci. Technol* (2019): 463-477.
- [181] Joseph, S. B., Dada, E. G., Abidemi, A., Oyewola, D. O., & Khammas, B. M. "Metaheuristic algorithms for PID controller parameters tuning: Review, approaches and open problems." *Heliyon* 8.5 (2022).

- [182] Chow, Chi Kin, and Shiu Yin Yuen. "An evolutionary algorithm that makes decision based on the entire previous search history." *IEEE Transactions on Evolutionary Computation* 15.6 (2011): 741-769.
- [183] Bonabeau, Eric, Marco Dorigo, and Guy Theraulaz. *Swarm intelligence: from natural to artificial systems*. Oxford university press, (1999).
- [184] Bonabeau, Eric, Marco Dorigo, and Guy Theraulaz. *Swarm intelligence: from natural to artificial systems*. Oxford university press, (1999).
- [185] Storn, Rainer, and Kenneth Price. "Differential evolution—a simple and efficient heuristic for global optimization over continuous spaces." *Journal of global optimization* 11 (1997): 341-359.
- [186] J. H. Holland, C. Langton, S. W. Wilson, F. J. Varela, P. Bourguine, J. R. Koza, and A. B. Book, "Genetic programming complex adaptive systems genetic programming on the programming of computers by means of natural selection." *Massachusetts Institute of Technology* (1992)..
- [187] M. Kumar, M. Husian, N. Upreti, and D. Gupta, "Genetic Algorithm: Review and Application", *Int. J. Inf. Technol. Knowl. Manag.*, vol. 2., (2010): 451–454,.
- [188] Storn, Rainer, and Kenneth Price. "Differential evolution—a simple and efficient heuristic for global optimization over continuous spaces." *Journal of global optimization* 11 (1997): 341-359.
- [189] Dhiman, Gaurav, and Vijay Kumar. "Spotted hyena optimizer: a novel bio-inspired based metaheuristic technique for engineering applications." *Advances in Engineering Software* 114 (2017): 48-70.
- [190] L. Syafaah, Widiyanto, I. Pakaya, D. Suhardi, and M. Irfan, "PID designs using DE and PSO algorithms for damping oscillations in a DC motor speed", in *2017 4th International Conference on Electrical Engineering, Computer Science and Informatics (EECSI)*, (2017), pp. 1–5.
- [191] Bosco, Maycon Chimini, J. J. Guedes, M. F. Castoldi, A. Goedel, E. R. Pires Da Silva, and L. F. S. Buzachero, Estimation of parameters and tuning of a speed PI of permanent magnet DC motor using differential evolution, in *2017 IEEE International Electric Machines and Drives Conference (IEMDC)*, Miami, FL, (2017): 1–6.
- [192] Rodríguez-Molina, Alejandro, Miguel Gabriel Villarreal-Cervantes, and Mario Aldape-Pérez. "Optimal adaptive control of a DC motor using differential evolution variants." *2017 IEEE 7th Annual International Conference on CYBER Technology in Automation, Control, and Intelligent Systems (CYBER)*. IEEE, (2017): 283–288
- [193] Jigang, Huang, Fang Hui, and Wang Jie. "A PI controller optimized with modified differential evolution algorithm for speed control of BLDC motor." *Automatika: časopis za automatiku, mjerenje, elektroniku, računarstvo i komunikacije* 60.2 (2019): 135-148.
- [194] Ma, Haiping, Simon D., Siarry P., Yang Z., and Fei, M. "BiogeographyBased Optimization: A 10-Year Review", *IEEE Trans. Emerg. Top. Comput. Intell.*, vol. 1, no. 5 (2017): 391–407
- [195] Mo, Hongwei, and Lifang Xu. "Biogeography optimization algorithm for DC motor PID control." *Advances in Swarm and Computational Intelligence: 6th International Conference, ICSI 2015, held in conjunction with the Second BRICS Congress, CCI 2015, Beijing, China, June 25-28, 2015, Proceedings, Part I* 6. Springer International Publishing, (2015): 385–394.
- [196] Shneen, Salam Waley. "BBO_PI Controller for DC Motor." *Int. Res. J. Adv. Eng. Sci* 4.1 (2019): 271-274.

- [197] Awad, Noor H, Ali M. Z., Suganthan, P. N. and Jaser, E. "Differential evolution with stochastic fractal search algorithm for global numerical optimization." 2016 IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC). IEEE, (2016): 3154–3161.
- [198] Khanam, Iram, and Girish Parmar. "Application of SFS algorithm in control of DC motor and comparative analysis." 2017 4th IEEE Uttar Pradesh Section International Conference on Electrical, Computer and Electronics (UPCON). IEEE, (2017): 256-261
- [199] Çelik, Emre, and Halil Gör. "Enhanced speed control of a DC servo system using PI+ DF controller tuned by stochastic fractal search technique." Journal of the Franklin Institute 356.3 (2019): 1333-1359.
- [200] Rao, R. Venkata. "Jaya: A simple and new optimization algorithm for solving constrained and unconstrained optimization problems." International Journal of Industrial Engineering Computations 7.1 (2016): 19-34.
- [201] Pandey, Hari Mohan. "Jaya a novel optimization algorithm: What, how and why?." 2016 6th international conference-cloud system and big data engineering (confluence). IEEE, (2016): 728730.
- [202] Achanta, Ravi Kiran, and Vinay Kumar Pamula. "DC motor speed control using PID controller tuned by jaya optimization algorithm." 2017 IEEE International Conference on Power, Control, Signals and Instrumentation Engineering (ICPCSI). IEEE, (2017).
- [203] Atashpaz-Gargari, Esmaeil, and Caro Lucas. "Imperialist competitive algorithm: an algorithm for optimization inspired by imperialistic competition." 2007 IEEE congress on evolutionary computation. Ieee, (2007): 4661–4667.
- [204] Ghalehpardaz L. and Shafiee M, "Speed control of DC motor using imperialist competitive algorithm based on PI-Like FLC." 2011 Third International Conference on Computational Intelligence, Modelling & Simulation. IEEE, (2011): 28–33.
- [205] Afra, S. Aidin, and G. Jafar, "Position Control of DC Motor Using Imperialist Competitive Algorithm Based PID Controller", in First National Conference on Advances in Computer Science and Information Retrieval Approaches, (2013): 1–5.
- [206] Sharifi, MohammadAli, and Hamed Mojallali. "Multi-objective modified imperialist competitive algorithm for brushless DC motor optimization." IETE Journal of Research 65.1 (2019): 96-103..
- [207] Fogel, David B., Lawrence J. Fogel, and J. Wirt Atmar. "Meta-evolutionary programming." Conference record of the twenty-fifth asilomar conference on signals, systems & computers. IEEE computer Society, (1991): 540-545.
- [208] Lai, Loi Lei, and J. T. Ma. "Application of evolutionary programming to reactive power planning-comparison with nonlinear programming approach." IEEE Transactions on power systems 12.1 (1997): 198-206..
- [209] Chang, Guang-hui, Yan-fei Li, and Quan Gang. "Intelligent controller design for PM DC motor position control using evolutionary programming." 2011 IEEE 2nd International Conference on Computing, Control and Industrial Engineering. Vol. 1. IEEE, (2011): 37–40.
- [210] Back, Thomas. Evolutionary algorithms in theory and practice: evolution strategies, evolutionary programming, genetic algorithms. Oxford university press, 1996.
- [211] Oladipo, Stephen, Yanxia Sun, and Zenghui Wang. "Optimization of PID controller with metaheuristic algorithms for DC motor drives." Int. Rev. Electr. Eng 15.5 (2020): 352-381.

- [212] Chun-Liang, and Horn-Yong Jan. "Evolutionarily multiobjective PID control for linear brushless DC motors." IEEE 2002 28th Annual Conference of the Industrial Electronics Society. IECON 02. Vol. 3. IEEE, (2002): 2033–2038.
- [213] Yang, Xin-She,, Fong, S. He, X. Deb, S. and Zhao, Y. "Swarm intelligence: today and tomorrow." 2016 3rd International Conference on Soft Computing & Machine Intelligence (ISCMI). IEEE, (2016): 219–223.
- [214] Oladipo, Stephen, Yanxia Sun, and Zenghui Wang. "Optimization of PID controller with metaheuristic algorithms for DC motor drives." *Int. Rev. Electr. Eng* 15.5 (2020): 352-381.
- [215] Das, Swagatam,, Biswas, A., Dasgupta, S., & Abraham, A. "Bacterial foraging optimization algorithm: theoretical foundations, analysis, and applications." *Foundations of computational intelligence volume 3: Global optimization* (2009): 23-55.
- [216] Mirjalili, Seyedali, Seyed Mohammad Mirjalili, and Andrew Lewis. "Grey wolf optimizer." *Advances in engineering software* 69 (2014): 46-61.
- [217] Zhou, Xuanwu. "Research on immune pathology in artificial immune system." 2009 Chinese Control and Decision Conference. IEEE, (2009): 1366–1370
- [218] Cuevas, Eric, Cienfuegos, M., Zaldívar, D. and Pérez-Cisneros M., "A swarm optimization algorithm inspired in the behavior of the social-spider." *Expert Systems with Applications* 40.16 (2013): 6374-6384
- [219] Das, Swagatam,, Biswas, A., Dasgupta, S., & Abraham, A. "Bacterial foraging optimization algorithm: theoretical foundations, analysis, and applications." *Foundations of computational intelligence volume 3: Global optimization* (2009): 23-55.
- [220] Abed, W. N. A. "Speed control of DC motors using PID-controller tuned by bacterial foraging optimization technique." *J. Sci. Eng. Res* 1.2 (2014): 55-63.
- [221] Oshaba, A. S. and Ali, E. S. "Bacteria foraging: a new technique for speed control of DC series motor supplied by photovoltaic system." *Int J WSEAS Trans Power Syst* 9 (2014): 185-195.
- [222] Oladipo, Stephen, Yanxia Sun, and Zenghui Wang. "Optimization of PID controller with metaheuristic algorithms for DC motor drives." *Int. Rev. Electr. Eng* 15.5 (2020): 352-381.
- [223] Daryabeigi, Ehsan, and Behzad Mirzaeian Dehkordi. "Smart bacterial foraging algorithm based controller for speed control of switched reluctance motor drives." *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* 62 (2014): 364-373..
- [224] Diao, Xiaoyan, Huangqiu Zhu, and Duo Zhang. "Speed and displacement control system of bearingless brushless DC motor based on improved bacterial foraging algorithm." *MATEC Web of Conferences*. Vol. 75. EDP Sciences, (2016): 1–5.
- [225] Zhou, Xuanwu. "Research on immune pathology in artificial immune system." 2009 Chinese Control and Decision Conference. IEEE, (2009): 1366–1370
- [226] Saleh, Muna Hadi, and Saad Zaid Saad. "Artificial immune system based PID tuning for DC servo speed control." *International Journal of Computer Applications* 155.2 (2016): 23-26.
- [227] Mirjalili, Seyedali, Seyed Mohammad Mirjalili, and Andrew Lewis. "Grey wolf optimizer." *Advances in engineering software* 69 (2014): 46-61.
- [228] Bhatnagar, Upma, and Abhishek Gupta. "Application of grey wolf optimization in optimal control of DC motor and robustness analysis." *SKIT Research Journal* 8.1 (2018): 19-25.

- [229] Potnuru, Devendra, and Ayyarao SLV Tummala. "Grey wolf optimization-based improved closed-loop speed control for a BLDC motor drive." *Smart Intelligent Computing and Applications: Proceedings of the Second International Conference on SCI 2018, Volume 1*. Springer Singapore, (2019): 145–152.
- [230] Cuevas, Eric, Cienfuegos, M., Zaldívar, D. and Pérez-Cisneros M., "A swarm optimization algorithm inspired in the behavior of the social-spider." *Expert Systems with Applications* 40.16 (2013): 6374-6384
- [231] Yaacob, N. D., Othman, W. A. F. W., Wahab, A. A. A., & Alhady, S. S. N. "Social Spider Optimization (SSO) for Tuning PID Controller on DC Motors." *Alhady School of Electrical & Electronic Engineering, Universiti Sains Malaysia: Penang, Malaysia* 5 (2018): 5.
- [232] Zang, Hongnian, Shujun Zhang, and Kevin Hapeshi. "A review of nature-inspired algorithms." *Journal of Bionic Engineering* 7.4 (2010): S232-S237.
- [233] Fister, Iztok, Yang X.-S., Fister, I. Brest, J. and D Fister, A Brief Review of Nature-Inspired Algorithms for Optimization, *Elektroteh. Vestnik/Electrotechnical Rev.*, vol. 80, no. 3, (2013): 116122
- [234] Udaiyakumar, K. C., and M. Chandrasekaran. "Application of firefly algorithm in job shop scheduling problem for minimization of makespan." *Procedia Engineering* 97 (2014): 1798-1807.
- [235] Salgotra, Rohit, and Urvinder Singh. "Application of mutation operators to flower pollination algorithm." *Expert Systems with Applications* 79 (2017): 112-129.
- [236] Tsai, Pei Wei, Pan, J. S. Liao, B. Y. Tsai, M. J. and Istanda, V. "Bat algorithm inspired algorithm for solving numerical optimization problems." *Applied mechanics and materials* 148 (2012): 134-137.
- [237] Jayabarathi, T., Afshin Yazdani, and V. Ramesh. "Application of the invasive weed optimization algorithm to economic dispatch problems." *Frontiers in Energy* 6 (2012): 255-259.
- [238] Sopa, Mana, and Niwat Angkawisittpan. "An application of cuckoo search algorithm for series system with cost and multiple choices constraints." *Procedia Computer Science* 86 (2016): 453-456.
- [239] Abdollahzadeh, B., Khodadadi, N., Barshandeh, S., Trojovský, P., Gharehchopogh, F. S., El-kenawy, E. S. M., ... & Mirjalili, S. "Puma optimizer (PO): A novel metaheuristic optimization algorithm and its application in machine learning." *Cluster Computing* (2024): 1-49
- [240] Azizi, Mahdi, Siamak Talatahari, and Amir H. Gandomi. "Fire Hawk Optimizer: A novel metaheuristic algorithm." *Artificial Intelligence Review* 56.1 (2023): 287-363.
- [241] Abdollahzadeh, Benyamin, Farhad Soleimani Gharehchopogh, and Seyedali Mirjalili. "African vultures optimization algorithm: A new nature-inspired metaheuristic algorithm for global optimization problems." *Computers & Industrial Engineering* 158 (2021): 107408.
- [242] Yang, Xin-She. *Nature-inspired metaheuristic algorithms*. Luniver press, 2010.
- [243] Yang, Xin-She. "Firefly algorithms for multimodal optimization." *International symposium on stochastic algorithms*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2009. 169–178
- [244] Wang, Wen-chuan, et al. "Yin-Yang firefly algorithm based on dimensionally Cauchy mutation." *Expert Systems with Applications* 150 (2020): 113216.
- [245] A. Vashistha and S. (Guide) Ganguli, *Parameter Identification and Control of DC Motor using Firefly Algorithm*, Electrical and Instr. Engr., M.S. thesis, Thapar Unvi., Patiala, (2013).

- [246] Pal, Pikaso, et al. "Optimal PID controller design for speed control of a separately excited DC motor: A firefly based optimization approach." *International Journal of Soft Computing, Mathematics and Control (IJSCMC)* 4.4 (2015): 39–48.
- [247] Jaber, Aqeel S. "A novel tuning method of PID controller for a BLDC motor based on segmentation of firefly algorithm." *Indian Journal of Science and Technology* (2017): 1–5.
- [248] Klempka, Ryszard, and Bogusław Filipowicz. "Optimization of a DC motor drive using a firefly algorithm." *2018 International Symposium on Electrical Machines (SME). IEEE*, (2018):1–6
- [249] Yang, Xin-She. "Flower pollination algorithm for global optimization." *International conference on unconventional computing and natural computation*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, (2012): 240–249.
- [250] Dwi, Lastomo, Muhammad, R. D., Widodo, W., & Imam, R., "Optimization of PID Controller Design for DC Motor Based on Flower Pollination Algorithm", in *The 2015 International Conference on Electrical, Telecommunication and Computer Engineering (ELTICOM 2015)*, (2016): 1–5.
- [251] Mehrabian, Ali Reza, and Caro Lucas. "A novel numerical optimization algorithm inspired from weed colonization." *Ecological informatics* 1.4 (2006): 355-366.
- [252] Khalilpour, M., Razmjooy, N., Hosseini, H., & Moallem, P., "Optimal Control of DC motor using Invasive Weed Optimization (IWO) Algorithm", in *Majlesi Conference on Electrical Engineering*, Isfahan, Iran (2011): 1–7.
- [253] Misaghi, Mojgan, and Mahdi Yaghoobi. "Improved invasive weed optimization algorithm (IWO) based on chaos theory for optimal design of PID controller." *Journal of Computational Design and Engineering* 6.3 (2019): 284-295..
- [254] Joshi, Akshata S, Kulkarni, O. Kakandikar, G. M. and Nandedkar, V. M. "Cuckoo search optimization-a review." *Materials Today: Proceedings* 4.8 (2017): 7262-7269.
- [255] Yang, Xin-She, and Suash Deb. "Cuckoo search via Lévy flights." *2009 World congress on nature & biologically inspired computing (NaBIC). Ieee*, (2009): 210–214.
- [256] Vishal, Vikrant, Kumar, V. Rana K. P. S., and Mishra, P. "Comparative study of some optimization techniques applied to DC motor control." *2014 IEEE International Advance Computing Conference (IACC). IEEE*, (2014): 13421347.
- [257] Singh, KSM Jagindar, Elamvazuthi, I., Shaari, K. Z. K., & Lima, F. V. "PID tuning control strategy using Cuckoo Search algorithm." *2015 IEEE Student Conference on Research and Development (SCOREd). IEEE*, (2015): 129–133
- [258] Singh, KSM Jagindar, Elamvazuthi, I., Shaari, K. Z. K., and S. Pranavanand, "Tuning of PID Controller for DC Servo Motor using Improved Cuckoo Search Algorithm." *International Journal of Simulation--Systems, Science & Technology* 18.2 (2017): 1-9.
- [259] Abdollahzadeh, Benyamin, Farhad Soleimanian Gharehchopogh, and Seyedali Mirjalili. "African vultures optimization algorithm: A new nature-inspired metaheuristic algorithm for global optimization problems." *Computers & Industrial Engineering* 158 (2021): 107408.
- [260] Salah, Basma, Hasanien, H. M., Ghali, F. M., Alsayed, Y. M., Abdel Aleem, S. H., & El-Shahat, A. (2022). "African vulture optimization-based optimal control strategy for voltage control of islanded DC microgrids." *Sustainability* 14.19 (2022): 11800.

- [261] Swain, Nirojakanta, Nidul Sinha, and Sadasiva Behera. "Stabilized frequency response of a microgrid using a two-degree-of-freedom controller with African vultures optimization algorithm." *ISA transactions* 140 (2023): 412-425.
- [262] Tripathy, Surya Narayan,, Kundu, S., Pradhan, A., & Samal, P. "Optimal design of a BLDC motor using African Vulture Optimization Algorithm." *e-Prime-Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy* (2024): 100499.
- [263] Abdollahzadeh, B., Khodadadi, N., Barshandeh, S., Trojovský, P., Gharehchopogh, F. S., El-kenawy, E. S. M., ... & Mirjalili, S. "Puma optimizer (PO): A novel metaheuristic optimization algorithm and its application in machine learning." *Cluster Computing* (2024): 1-49.
- [264] Azizi, Mahdi, Siamak Talatahari, and Amir H. Gandomi. "Fire Hawk Optimizer: A novel metaheuristic algorithm." *Artificial Intelligence Review* 56.1 (2023): 287-363.
- [265] Bonabeau, Eric, Marco Dorigo, and Guy Theraulaz. *Swarm intelligence: from natural to artificial systems*. Oxford university press, (1999).
- [266] Das, Swagatam, Ajith Abraham, and Amit Konar. "Swarm intelligence algorithms in bioinformatics." *Computational Intelligence in Bioinformatics*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, (2008). 113-147.
- [267] Chakraborty, Amrita, and Arpan Kumar Kar. "Swarm intelligence: A review of algorithms." *Nature-inspired computing and optimization: Theory and applications* (2017): 475-494.
- [268] Yang, X. S., Cui, Z., Xiao, R., Gandomi, A. H., & Karamanoglu, M. (Eds.), *Swarm Intelligence and Bio-Inspired Computation*. Hendon: Elsevier Inc., (2013).
- [269] Yang, Xin-She. "Engineering optimizations via nature-inspired virtual bee algorithms." *International Work-Conference on the Interplay Between Natural and Artificial Computation*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, (2005): 317–323.
- [270] Pham, D. T., Ghanbarzadeh, A., Koc, E., Otri, S., Rahim, S., & Zaidi, M. "The bees algorithm-technical report." Cardiff: Manufacturing Engineering Centre, Cardiff University (2005).
- [271] Karaboga, Dervis. An idea based on honeybee swarm for numerical optimization, Technical Report TR06, Erciyes University, Engineering Faculty, Computer Engineering Department, (2005).
- [272] Karaboga, Dervis, and Bahriye Akay. "A comparative study of artificial bee colony algorithm." *Applied mathematics and computation* 214.1 (2009): 108-132.
- [273] Tereshko, Valery. "Reaction-diffusion model of a honeybee colony's foraging behaviour." *International conference on parallel problem solving from nature*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, (2000): 807–816.
- [274] Tereshko, Valery, and Andreas Loengarov. "Collective decision making in honey-bee foraging dynamics." *Computing and information systems* 9.3 (2005): 1.
- [275] Pham, D. T., Ghanbarzadeh, A., Koc, E., Otri, S., Rahim, S., & Zaidi, M. "The bees algorithm-technical report." Cardiff: Manufacturing Engineering Centre, Cardiff University (2005).
- [276] Yang, Xin-She. "Engineering optimizations via nature-inspired virtual bee algorithms." *International Work-Conference on the Interplay Between Natural and Artificial Computation*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, (2005): 317–323.
- [277] Karaboga, Dervis. An idea based on honeybee swarm for numerical optimization, Technical Report TR06, Erciyes University, Engineering Faculty, Computer Engineering Department, (2005).

- [278] Basturk, Bahriye. "An artificial bee colony (YAKO) algorithm for numeric function optimization." IEEE Swarm Intelligence Symposium, Indianapolis, IN, USA, 2006. Vol. 2006. (2006.): 12.
- [279] Karaboga, Dervis, and Bahriye Basturk. "A powerful and efficient algorithm for numerical function optimization: artificial bee colony (YAKO) algorithm." Journal of global optimization 39 (2007): 459-471.
- [280] Karaboga, Dervis, and Bahriye Akay. "A comparative study of artificial bee colony algorithm." Applied mathematics and computation 214.1 (2009): 108-132.
- [281] Pham, D. T., Ghanbarzadeh, A., Koç, E., Otri, S., Rahim, S., & Zaidi, M. "The bees algorithm—a novel tool for complex optimisation problems". In Intelligent production machines and systems (2006):454-459.
- [282] Huang, Liangsong, and Yulin Wang. "Design for motor speed fractional order controller based on improved artificial bee colony algorithm." 2016 Chinese Control and Decision Conference (CCDC). IEEE, (2016): 3244–3249.
- [283] Abu-Mouti, Fahad S., and Mohamed E. El-Hawary. "Overview of Artificial Bee Colony (YAKO) algorithm and its applications." 2012 IEEE International Systems Conference SysCon 2012. IEEE, (2012): 1–6.
- [284] Mishra, Akhilesh Kumar, et al. "Speed control of DC motor using artificial bee colony optimization technique." 2013 International conference on control, automation, robotics and embedded systems (CARE). IEEE, (2013): 1-6.
- [285] Liao, Wudai, Yingyue Hu, and Haiquan Wang. "Optimization of PID control for DC motor based on artificial bee colony algorithm." Proceedings of the 2014 International Conference on Advanced Mechatronic Systems. IEEE, (2014): 23–27.
- [286] Geng, Dongshan, et al. "A research of DC motor dual close-loop PID speed-tuning system on the basis of YAKO Algorithm." The 26th Chinese Control and Decision Conference (2014 CCDC). IEEE, (2014): 3450–3454.
- [287] Yang, Xin-She. "A new metaheuristic bat-inspired algorithm." Nature inspired cooperative strategies for optimization (NCSO 2010). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, (2010): 65-74..
- [288] Singh, Kelvinder. Vasant, P., Elamvazuthi. I. and Kannan R., "PID tuning of servo motor using bat algorithm." Procedia computer science 60 (2015): 1798-1808.
- [289] Merugumalla, Manoj Kumar, and Navuri, Prema Kumar. "PSO and firefly algorithms based control of BLDC motor drive." 2018 2nd International Conference on Inventive Systems and Control (ICISC). IEEE, (2018): 994–999.
- [290] Eberhart, Russell, and James Kennedy. "A new optimizer using particle swarm theory." MHS'95. Proceedings of the sixth international symposium on micro machine and human science. Ieee, (1995): 39–43.
- [291] Kohler, Manoela, Marley MBR Vellasco, and Ricardo Tanscheit. "PSO+: A new particle swarm optimization algorithm for constrained problems." Applied Soft Computing 85 (2019): 105865.
- [292] Bayoumi, Ehab HE, and Hisham M. Soliman. "PID/PI tuning for minimal overshoot of permanent-magnet brushless DC motor drive using particle swarm optimization." ELECTROMOTION-CLUJ NAPOCA- 14.4 (2007): 198–208.
- [293] Payakkawan, Poomyos, Kitdakorn Klomkarn, and Pitikhate Sooraksa. "Dual-line PID controller based on PSO for speed control of DC motors." 2009 9th International Symposium on Communications and Information Technology. IEEE, (2009): 134–139.
- [294] El-Gammal, Adel AA, and Adel A. El-Samahy. "Adaptive tuning of a PID speed controller for DC motor drives using multi-objective particle swarm

- optimization." 2009 11th International Conference on Computer Modelling and Simulation. IEEE, (2009): 398–404
- [295] Roy, Ayan, and Saurabh Srivastava. "Design of optimal PI λ D δ controller for speed control of DC motor using constrained particle swarm optimization." 2016 International Conference on Circuit, Power and Computing Technologies (ICCPCT). IEEE, (2016): 1–6.
- [296] Hu, Xiaohui, and Russell Eberhart. "Solving constrained nonlinear optimization problems with particle swarm optimization." Proceedings of the sixth world multiconference on systemics, cybernetics and informatics. Vol. 5. Citeseer, (2002): 203--206
- [297] Dorigo, Marco, and Luca Maria Gambardella. "Ant colony system: a cooperative learning approach to the traveling salesman problem." IEEE Transactions on evolutionary computation 1.1 (1997): 53-66.
- [298] Dorigo, Marco, Gianni Di Caro, and Luca M. Gambardella. "Ant algorithms for discrete optimization." Artificial life 5.2 (1999): 137-172.
- [299] Blum, Christian. "Ant colony optimization: Introduction and recent trends." Physics of Life reviews 2.4 (2005): 353-373.
- [300] Ibrahim, H., and Ahmed A. Hakim Mahmoud. "DC motor control using PID controller based on improved ant colony algorithm." International Review of Automatic Control (IREACO) 7.1 (2014): 1-6.
- [301] Li, Xiao-lei., Shao Z.J. and Qian, J.X. "An optimizing method based on autonomous animats: fish-swarm algorithm." Systems engineering-theory & practice 22.11 (2002): 32-38.
- [302] Zhang , Meifeng, Shao, Cheng, Li, Fuchao, Gan , Yong, Sun, "Junman Evolving Neural Network Classifiers and Feature Subset Using Artificial Fish Swarm", Proceedings of the 2006 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (2006): 25 – 28.
- [303] Zhu, Jun Lin, Hui Liu, and Zhi Bin Ren. "Optimization Design of Permanent-Magnetism Brushless DC Motor Governing System Based on Artificial Fish Swarm Algorithm." Advanced Materials Research 546 (2012): 278-283.
- [304] Biswas, Anupam, Mishra, K. K., Tiwari, S., & Misra, A. K. "Physics-inspired optimization algorithms: a survey." Journal of Optimization 2013 (2013): 1-16.
- [305] Rashedi, Esmat, Hossein Nezamabadi-Pour, and Saeid Saryazdi. "GSA: a gravitational search algorithm." Information sciences 179.13 (2009): 2232-2248.
- [306] Nacer, Tabib, and Saidouni Djamel Eddine. "Newton's law of universal gravitation based genetic algorithm for graph distribution." International Journal of Computational Intelligence and Applications 15.04 (2016): 1650022.
- [307] Duman, Serhat, Diñçer Maden, and Uğur Güvenç. "Determination of the PID controller parameters for speed and position control of DC motor using gravitational search algorithm." 2011 7th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO). IEEE, (2011): 225-229.
- [308] Kaveh, Ali, and Siamak Talatahari. "A novel heuristic optimization method: charged system search." Acta mechanica 213.3 (2010): 267-289.
- [309] Precup, Radu-Emil, David, R. C., Petriu, E. M., Preitl, S., & Rădac, M. B. (2014). "Novel adaptive charged system search algorithm for optimal tuning of fuzzy controllers." Expert Systems with Applications 41.4 (2014): 1168-1175.
- [310] Sakulin, Anusorn, and Deacha Puangdownreong. "A novel meta-heuristic optimization algorithm: current search." RN 2.1 (2012): 125–130.
- [311] Puangdownreong, Deacha. "Current search: performance evaluation and application to dc motor speed control system design." (2013): 42–54.

[311]MatWeb,<https://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=80e68a5d67624a17ab6a2d6d1d3e4d4c>)

