

**ÇOK ROTORLU İNSANSIZ HAVA ARACI TASARIMI VE KABLOSUZ
ALGILAYICI AĞLARDA KAYNAK ATAMASI ENİYİLEMESİ**

ANIL UFUK BATMAZ

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRİK - ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**TOBB EKONOMİ VE TEKNOLOJİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**HAZİRAN 2013
ANKARA**

Fen Bilimleri Enstitü onayı

Prof. Dr. Ünver KAYNAK
Müdür

Bu tezin Yüksek Lisans derecesinin tüm gereksinimlerini sağladığını onaylarım.

Doç. Dr. Hamza KURT
Anabilim Dalı Başkanı

Anıl Ufuk BATMAZ tarafından hazırlanan “Çok Rotorlu İnsansız Hava Aracı Tasarımı ve Kablosuz Algılayıcı Ağlarda Kaynak Ataması Eniyilemesi” adlı bu tezin Yüksek Lisans tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Doç. Dr. Bülent TAVLI
Tez Danışmanı

Doç. Dr. Coşku KASNAKOĞLU
Tez Danışmanı

Tez Jüri Üyeleri

Başkan : Doç. Dr. Hamza KURT

Üye : Doç. Dr. Coşku KASNAKOĞLU

Üye : Doç. Dr. Bülent TAVLI

Üye : Yrd. Doç. Dr. Tolga GİRİCİ

Üye : Yrd. Doç. Dr. Yiğit TAŞÇIOĞLU

TEZ BİLDİRİMİ

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

Anıl Ufuk BATMAZ

Üniversitesi : TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi
Enstitüsü : Fen Bilimleri
Anabilim Dalı : Elektrik-Elektronik Mühendisliği
Tez Danışmanı : Doç. Dr. Coşku KASNAKOĞLU
: Doç. Dr. Bülent TAVLI
Tez Türü ve Tarihi : Yüksek Lisans – Haziran 2013

Anıl Ufuk BATMAZ

ÇOK ROTORLU İNSANSIZ HAVA ARACI TASARIMI VE KABLOSUZ ALGILAYICI AĞLARDA KAYNAK ATAMASI ENİYİLEMESİ

ÖZET

Bu tez, Doç. Dr. Coşku Kasnakoğlu ve Doç. Dr Bülent Tavlı ile yapılan iki farklı ana daldaki çalışmaları içermektedir.

Tezin ilk kısmında, günümüzde yaygın olarak geliştirilmeye çalışılan insansız hava araçlarından dört pervaneli hava aracının özgün tasarımının yapılış ve uygulanış aşamaları ele alınmıştır. Sistemin donanımı sıfırdan var edilmiştir. Geliştirici tabanlı bir yazılım geliştirilecek, eksenler üzerinde deneysel ve sayısal yöntemlerle kontrolü yapılmıştır. Sonrasında sistem verilerinin kullanılması ile daha iyi bir kontrolcü tasarlanması sağlanmıştır. Son olarak ise tasarlanan cihaz, hazır bir otopilot sistemi ile denenmiş ve daha iyi bir kontrolcü tasarımı için üzerinde çalışmalar yapılmıştır.

Tezin ikinci kısmında ise Kablosuz Algılayıcı Ağ'lardaki (KAA) geri dönüş yol uzunluğunun tek yönlü bağlantılar üzerindeki yaşam süresi etkisi özgün bir Karmaşık Tamsayı Programlama (KTP) ile incelenmiştir. Kablosuz ağ çalışmalarında, bağlantıların önemli bir kısmının fiziksel sebeplerden dolayı (*örneğin*, alıcı-verici karakteristiği) tek yönlü bağlantı olduğu gösterilmiştir. Tek yönlü bağlantıların ağ üzerinde kullanılabilmesi için tokalaşmanın tamamlanması, yani çok atlamalı geri dönüş yolunun kurulması gerekmektedir. Oluşturulan özgün KTP modelinin üzerinde sayısal olarak çalışılmasıyla, KAA'nın parametre uzayı incelenmiştir. Sonuçlar geri dönüş yol uzunluğunun, ağ yaşam süresini önemli derece etkilediğini göstermiştir. Ayrıca, geri dönüş yollarında birden fazla röle düğümünün kullanılması, ağ yaşam süresini önemli ölçüde arttırmadığı gözlemlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Hava Araçları, Dört Rotorlu Helikopter, Doğrusal Tahmin, Araç Kontrolü, Kablosuz Algılayıcı Ağlar, Doğrusal Programlama, Ağ Yaşam Süresi Eniyilemesi

University : TOBB University of Economics and Technology
Institute : Institute of Natural and Applied Sciences
Science Programme : Electrical and Electronics Engineering
Supervisor : Assoc. Prof. Dr. Coşku KASNAKOĞLU
: Assoc. Prof. Dr. Bülent TAVLI
Degree Awarded and Date : M.Sc. – June 2013

Anıl Ufuk BATMAZ

**DESIGN OF MULTI-ROTOR UNMANNED AERIAL VEHICLE AND
OPTIMIZATION OF RESOURCE ALLOCATION IN WIRELESS SENSOR
NETWORKS**

ABSTRACT

This thesis contains two different main research topics prepared Doç.Dr Coşku Kasnakoğlu and Doç.Dr Bulent Tavli.

The first part of the thesis explains the construction phases and implementation of a propeller-driven unmanned aerial vehicle which is one of the most researched subjects of our time. The hardware of the system was created from scratch. It was initially controlled by a developer based software language. Various experiments were carried out, numerical methods and measures were used to control the axes of the vehicle. Subsequently, the system was controlled by means of the data obtained and developed from these experiments. Finally, the designed vehicle used with an present autopilot system and have been studied for a better controller design.

In the second part of the thesis, the impact of link unidirectionality and reverse path hop length on Wireless Sensor Network (WSN) lifetime is investigated through a novel Mixed Integer Programming (MIP) framework. A significant portion of links in various wireless network testbeds are shown to be unidirectional due to several physical factors (e.g., transceiver characteristics). Utilization of a unidirectional link necessitates the establishment of multi-hop reverse path for the completion of handshaking. Through the numerical evaluation of the created novel MIP model, the parameter space of WSNs is explored. The results show that reverse path length affects the network lifetime significantly. Furthermore, utilization of reverse paths consisting of more than a single relay node does not increase the network lifetime, considerably.

Key Words: Aerial Vehicles, Four Rotor Helicopter, Linear Estimation, Vehicle Control, Wireless Sensor Networks, Linear Programming, Network Lifetime Optimization

TEŞEKKÜR

Bu çalışmayı tamamlamamda emeği geçen ve tüm kaynaklarını benimle paylaşan danışman hocalarım, Doç.Dr. Coşku Kasnakoğlu ve Doç.Dr. Bülent Tavlı'ya,

Lisansüstü öğrenimini bizlerden önce bitiren ve bilgi birikimlerini her sıkıştığımda benimle paylaşan büyüklerim Koray Kerimoğlu ve Davut İncebacak'a,

Çok rotorlu insansız hava aracı tasarımımda birlikte çalıştığım vn Elbir'e ve Z-09 alışma laboratuvarında gerektiğinde her türlü yardım ile bana destek çıkan Onur Baki Ertin, H.Deniz Karaca, Halim Korkmaz ve Arif nder Işıkman'a,

Bugüne kadar maddi, manevi her zaman ve her koşulda beni asla yalnız bıraktıran, destek olan başta babam olmak üzere tüm aileme,

Yüksek lisansım boyunca güler yüzleri ve yardımları ile bana her daim yol gösteren Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölüm hocalarıma,

Bu tezin iyileştirilmesi ve geliştirilmesi için vakit ayıran ve uğraşan, bana destek olan herkese, özellikle de Gözde Güngör'e

Tüm minnettarlığım ile sonsuz teşekkürlerimi iletmek isterim.

İyi ki varsınız...

Anıl Ufuk BATMAZ

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT	v
TEŞEKKÜR	vi
ÇİZELGELERİN LİSTESİ	x
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	xi
KISALTMALAR	xiii
1. BÖLÜM	
ÇOK ROTORLU İNSANSIZ HAVA ARACI TASARIMI	1
1. GİRİŞ	2
1.1 İHA'ların Sınıflandırılması.....	3
1.2 VTOL Hava Araçları	6
1.3 Geçmişten Günümüze Quadrotor Tasarımları.....	7
1.4 Günümüzde Yapılan Quadrotor Çalışmaları	10
2. UÇUŞ DİNAMİKLERİ ve DİĞER TEMEL BİLGİLER	13
2.1 Euler Açılımları	13
2.2 Hava Araçlarına Etki Eden Kuvvetler	14
2.3 Darbe Genlik Modülasyonu.....	16
2.4 Otopilot Sistemleri.....	17
3. GENEL QUADROTOR MİMARİSİ.....	19
3.1 Ana İskelet.....	19
3.2 Motorlar	20
3.3 Pervaneler	22
3.4 Batarya.....	23
3.5 Motor Kontrol Devresi	23
3.6 Atalet Ölçümü için Kullanılan Sistemler.....	24
3.7 Haberleşme Sistemi	26
3.8 Uçuş Kontrol Sistemi (UKS).....	27

4.	DONANIMSAL TASARIM	29
4.1	Gövde.....	29
4.2	Motorlar	29
4.3	Pervaneler	30
4.4	Batarya.....	31
4.5	Motor Kontrol Devresi	31
4.6	Atalet Ölçümü için Kullanılan Sistemler.....	32
4.7	Haberleşme Sistemi	33
4.8	Uçuş Kontrol Sistemi.....	34
4.9	Donanımsal Tasarımı Tamamlanan İHA'lar	36
5.	YAZILIMSAL TASARIM	37
5.1	ChipKit ile Yapılan Çalışmalar	37
5.1.1	Ataletsel Ölçüm Biriminden Veri Okuma.....	37
5.1.2	Yunuslama, yuvarlanma ve sapma açılarını elde etme	39
5.1.3	Veri filtreleme	41
5.1.4	Kontrolcü tasarımı.....	45
5.1.5	Motorlarla ve YKİ ile iletişim.....	46
5.2	Arducopter ile Çalışmalar.....	47
5.3	MATLAB/Simulink ile Çalışmalar	49
6.	İHA KONTROLÜ.....	53
6.1	Yuvarlanma Ekseninin Kontrolü	53
6.2	Yunuslama ve Yuvarlanma Eksenlerinin Kontrolü.....	57
6.3	Yunuslama, Yuvarlanma ve Sapma Eksenlerinin Kontrolü	61
7.	SONUÇLAR	67
2.	BÖLÜM	
	KABLOSUZ ALGILAYICI AĞLARDA KAYNAK ATAMASI ENİYİLEMESİ	69
1.	GİRİŞ	70
1.1	Günümüzde KAA Çalışmaları.....	70
1.2	KAA Yapısı	71

1.2.1	Düğüm yapısı	71
1.2.2	Baz istasyonu.....	73
1.2.3	Ağ yapısı	73
1.3	KAA'larda Enerji Eniyilemesi	74
1.4	Eniyileme, Doğrusal Programlama ve Karmaşık Tamsayı Programlama.....	77
1.5	Problem Tanımı	79
2.	KAA'LARDA TEK VE ÇİFT YÖNLÜ BAĞLANTILAR.....	81
3.	MODEL.....	83
4.	ANALİZLER	90
4.1	Küçük Topoloji Çalışması	90
4.2	Büyük Topoloji Çalışması	95
5.	SONUÇ	103
	KAYNAKLAR.....	104
	ÖZGEÇMİŞ	111

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 5.1. Eğim Düzeltme Sembolleri	41
Çizelge 6.1. Sistem Kontrolü için Kullanılan Basamaklar.....	53
Çizelge 3.1. Doğrusal Programlama Formülündeki Terimler.....	84

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 1.1. Harrier VTOL	6
Şekil 1.2. Gyroplane No.1	7
Şekil 1.3. De Bothezat Helikopteri.....	8
Şekil 1.4. Oemichen No.2	8
Şekil 1.5 Convertawings Model A	9
Şekil 1.6. Curtiss-Wright VZ-7	10
Şekil 2.1. Quadrotor Uçuş Dinamikleri.....	13
Şekil 2.2. Uçağa etki eden kuvvetler	15
Şekil 2.3. Darbe Genlik Modülasyonu	17
Şekil 3.1. Quadrotor İskelet Tipleri.....	20
Şekil 3.2. Uçuş Kontrol Sistemi Görevleri.....	27
Şekil 4.1. Mirco Strain 3DM-GX2 Inertia Link Teknik Çizimi.....	32
Şekil 4.2. Baskı Devre Tasarımı.....	34
Şekil 4.3. Genel Donanım Tasarımı	35
Şekil 4.4. İkinci İHA Tasarımı ve Kullanılan Donanım	36
Şekil 4.5. Tasarımı Tamamlanan Quadrotorlar	36
Şekil 5.1. 3-GX2 Inertia Link Haberleşme Protokolü.....	38
Şekil 5.2. AÖB'den Gelen Veriler	39
Şekil 5.3. Kalman Filtresi.....	42
Şekil 5.4. Kalman Filtresi Denklemleri.....	43
Şekil 5.5. 3 Eksen Örnek Kalman Filtresi Çıktıları	45
Şekil 5.6. Kullanılan Kontrolcü Tasarımı	46
Şekil 5.7. Arducopter Yazılımı için Kontrolcü - İlk Bölüm.....	47
Şekil 5.8. Arducopter Yazılımı için Kontrolcü – İkinci Bölüm	49
Şekil 5.9. Sistem Tanımlama Aracı Arayüzü	50
Şekil 5.10. Sistem Tanımlama İçin Verilerin Ayırıştırılması.....	51
Şekil 5.11. Uygun Transfer Fonksiyonunun Bulunması	52
Şekil 6.1. Yuvarlanma Eksenini için Hazırlanan Deneysel Quadrotor Test Platformu	54
Şekil 6.2. Yuvarlanma Açısı için Ölçüm ve Benzetim Sonuçları	55
Şekil 6.3. Benzetimden Önce ve Sonra Sistem Cevabı	56
Şekil 6.4. Yuvarlanma ve Yunuslama Açılımları için Ölçüm ve Benzetim Sonuçları.....	58
Şekil 6.5. İki Eksen Kontrolü için Hazırlanan Düzenek	59
Şekil 6.6. Benzetimden Önce ve Sonra Sistem Cevabı	60
Şekil 6.7. Yuvarlanma Ekseninin Yazılımsal Benzetimi	61

Şekil 6.8. Üç Eksen Kapalı Çevrim ve Benzetim Sonuçları	63
Şekil 6.9. PID Kontrol Bloğu (Yuvarlanma Eksenini).....	64
Şekil 6.10. Benzetimden Önce ve Sonra Üç Eksen Sistem Cevabı	65
Şekil 7.1. Tasarımı Yapılan Quadrotorun Uçuşu	68
Şekil 1.1. Basit Bir KAA Düğümü.....	72
Şekil 1.2. Ağ Yapısı	74
Şekil 1.3. Çeşitli Veri Aktarım Yöntemleri.....	75
Şekil 1.4. Eniyileme Problem Örneği.....	78
Şekil 3.1. KTP Yapısı (D-modeli).....	86
Şekil 3.2. Geliştirilmiş KTP Yapısı (P-modeli)	88
Şekil 4.1. Küçük Topoloji Örneği	91
Şekil 4.2. Geliştirilmiş Küçük Topoloji Örneği	93
Şekil 4.3. LRPHD = 1 için normalize yaşam süreleri.....	96
Şekil 4.4. $N = 20$ için Büyük Topoloji D-Model Çalışması	97
Şekil 4.5. $N = 25$ için Büyük Topoloji D-Model Çalışması	98
Şekil 4.6. $N = 30$ için Büyük Topoloji D-Model Çalışması	99
Şekil 4.7. $N = 20$ için Büyük Topoloji P-Model Çalışması	100
Şekil 4.8. $N = 25$ için Büyük Topoloji P-Model Çalışması	101
Şekil 4.9. $N = 30$ için Büyük Topoloji P-Model Çalışması	102

KISALTMALAR

Kısaltmalar Açıklama

AÖB	Ataletsel Ölçüm Sistemi- (İng. Inertial Measurement Unit- IMU)
UAV	Unmanned Aerial Vehicle
İHA	İnsansız Hava Aracı
İHAS	İnsansız Hava Aracı Sistemleri
VTOL	Vertical Take-off and Landing - Dikey Olarak Havalanan ve Konabilen
GPS	Global Positioning System - Küresel Yer Belirleme Sistemi
YKİ	Yer Kontrol İstasyonu
MEMS	Microelectromechanical Systems - Mikro Elektro-Mekanik Sistemler
DCM	Direction Cosine Matrix
KF	Kalman Filtresi
ESC	Electronic Speed Controller- Elektronik Hız Kontrolcüsü
PID	Proportional Integral Derivative – Oransal İntegral Türevsel
PI	Propotional Integral – Oransal İntegral
MATLAB	Matrix Laboratory - Matris Labratuarı
KAA	Kablosuz Algılayıcı Ağlar – Wireless Sensor Networks
DP	Doğrusal Programlama – Linear Programming
KTP	Karmaşık Tamsayılı Programlama- Mixed Integer Programming
MAC	Medium Access Control- Katman Erişim Kontrolü
GAMS	The General Algebraic Modeling System-Genel Cebirsel Modelleme Sistemi

1. BÖLÜM

ÇOK ROTORLU İNSANSIZ HAVA ARACI TASARIMI

1. GİRİŞ

Toplumların gelişmesi ile birlikte insan gücünün önem kazanması ve insana verilen değerin artması, teknoloji içinde doğrudan kullanılan insan gücünün azaltılmasına neden olmuştur. Bu sayede insanı doğrudan risk faktöründen uzaklaştırılması ve sistemin insan kontrolünden ayrıklaştırılması sağlanmıştır. Bu alanda yeni teknolojiler her gün daha da geliştirilmektedir. Bu kapsamda, üzerinde 'insan' olmayan sistemlere insansız araç denmektedir. Buna göre insansız bir aracın aşağıdaki özelliklere sahip olması beklenir:

- Sistem uzaktan kontrol edilebilir olmalıdır.
- Sistemin kendi başına karar verme ve bu kararı uygulayabilme yetisi olmalıdır.

İnsansız araçlar, kullanım alanlarına göre farklı özelliklere ayrılmıştır. Bunlardan bazıları İnsansız Kara Araçları, İnsansız Hava Araçları (İHA)¹, İnsansız Su Üstü Araçları, İnsansız Su Altı Araçları ve İnsansız Uzay Araçları olarak sayılabilir. Bu sistemlerin temel bileşenleri birbirine benzer olsa da, hepsinin kendine has ve ayrıcalıklı özellikleri sayesinde kullanım alanlarında tarihsel birer yapı taşı olmuşlardır.

İnsansız araçların en yaygın kullanım alanlarından biri de havadır. Bunun en önemli sebeplerinden biri ise gökyüzünde önde giden toplumların, muharebelerde başarılı olmasından kaynaklanmaktadır. Bu gözlem dikkate alındığında, ilerlemeye ve gelişmeye açık her toplumun havacılık konusuna önem verdiği gözden kaçmamaktadır.

İHA'ların, sistemi havada tutabilmesi, yönetebilmesi ve görevini icra edebilmesi için araç üzerinde bulunan sistemlere İnsansız Hava Aracı Sistemleri (İHAS) denmektedir. Günümüzde bu sistemler, aracı kontrol eden yapının tamamen elektronik cihazlardan oluşturulmuş hali olarak tanımlanabilir.

¹ İng. Unmanned Aerial Vehicle - UAV

1.1 İHA'ların Sınıflandırılması

Her geçen gün askeri ve sivil kullanım alanlarında İHA'ların farklı türleri, değişik amaçlarla hizmet vermektedir. Farklı amaçlar için değişik gereksinimleri karşılayan İHA'ları çeşitli başlıklar altında alt dallarda incelemek mümkündür (taşınabilen faydalı yüke göre, çıkabilecek en yüksek irtifaya göre, dayanıklılık ve menzile göre, ağırlığa göre,... [1]). Bu sınıflandırmanın en uygun olanlarından biri sivil ve askeri alanlarda kullanımlarına göre İHA'ların sınıflandırılmasıdır [2].

• Sivil amaçlı

- Hava fotoğrafçılığı (*film, video, fotoğraf, vb*)
- Ziraî amaçlı (*ürün izleme, ilaçlama, sürü gözlemleme ve yönetme*)
- Kıyı güvenliği (*arama ve kurtarma, sahil ve deniz izleme*)
- Koruma (*kirlilik ve toprak izleme*)
- Gümrük (*yasadışı girişlerin gözlenmesi*)
- Enerji sektörü (*nakil hatlarının kontrolü*)
- İtfaiye ve ormancılık (*yangın tespiti ve ilk müdahale*)
- Deniz mahsülleri üretim firmaları (*üretim ve kontrol*)
- Gaz ve petrol şirketleri (*boru hattı güvenliği*)
- Coğrafi araştırmalar (*yeryüzü şekillerinin gözlenmesi, haritalama*)
- Yerel yönetimler (*doğal afet*)
- Meteoroloji servisleri
- Trafik yetkilileri
- Güvenlik yetkilileri
- Akarsu yetkilileri
- İstatistik kurumları

• Askerî amaçlı

- Deniz Kuvvetleri
 - Elektronik istihbarat
 - Radyo sinyal yayını
 - Denizden gelecek saldırılara karşı limanları korumak
 - Sonar, şamandıra gibi denizaltılara karşı kullanılacak diğer teçhizatların yerleştirilmesi ve gözlemlenmesi

- Yapay izler kullanarak düşman füzelerini yanıltmak
- Düşman donanmasını gözlemek
- Kara Kuvvetleri
 - Keşif
 - Düşman aktivitelerini gözlemek
 - Nükleer, biyolojik ya da kimyasal (*NBC*) yayılımı gözlemek
 - Elektronik istihbarat
 - Hedef tayini ve görüntüleme
 - Kara mayınlarının yerlerinin belirlenmesi ve yok edilmesi
- Hava Kuvvetleri
 - Uzun mesafe, yüksek irtifa gözetleme
 - Radar sistemlerine karşı sinyal bozma (*jamming*) ve yok etme
 - Elektronik istihbarat
 - Hava alanı, üs güvenliği
 - Hava alanı hasar tespiti
 - Patlamamış mühimmatın yok edilmesi

Bu sınıflandırmanın yanında, İHA'lar için genelde tercih edilen sınıflandırma, İHA'ların büyüklükleri ve kabiliyetlerine göre yapılan sınıflandırmadır. Buna göre İHA'lar dokuz ayrı kategori altında incelenebilir [3].

- **Yüksek İrtifa ve Uzun Süreli Uçuş** — 15.000 metre üzerinde 24 saatten uzun süre uçabilen İHA'lara verilen isimdir. Bir çok ülkenin hava kuvvetleri tarafından daha çok tercih edilen bu tür uçaklar, kıtalar arası keşif ve gözlem yapabilen uçaklardır.
- **Orta İrtifa ve Uzun Süreli Uçuş** —5.000-15.000 metre irtifaya çıkabilen 24 saat süre ile uçabilen ve sabit bir yer kontrol merkezinden, yaklaşık 500 km uzaklıktan kontrol edilen İHA'lardır.
- **Orta Mesafeli veya Taktiksel Uçuş** - 100 ile 300 kilometre mesafe içerisinde kullanılan kara ve deniz kuvvetleri tarafından sıkça kullanılan İHA'lara verilen isimdir.

- **Kısa Mesafeli Uçuş** - 100 kilometreye kadar olan mesafelerde, günümüzde en yaygın olarak kullanılan İHA'lardır. Sivil amaçlarla kullanıldığı kadar, seyir halindeki küçük savaş grupları tarafından da sıkça kullanılmaktadır. Gözetleme, keşif, hedef belirleme, güvenlik, zirai ilaçlama, trafik kontrolü gibi amaçlarla kullanılabilirler.
- **Mini İHA** – Ağırlığı 20 kilograama kadar olan 30 kilometre menzilli hava araçlarıdır. Hem sivil hem de askeri bir çok alanda görev almaktadırlar.
- **Mikro İHA** – Kanat genişliği 1.5 metreden az olan İHA'lara verilen isimdir. Bu İHA'lar günümüzde şehir içinde kullanılmak üzere tasarlanmışlardır. Yavaş uçma, havada durma ve gerektiğinde bir duvara yapışma ya da duvara oturabilme özellikleri vardır. Bu İHA'ların kanat genişlikleri az olduğu için atmosferik türbülanslara dayanıklılıkları daha azdır ve elden atılarak havalandırılırlar.
- **Nano İHA** – Bir bitki tohumu büyüklüğünde sürüler halinde çalışmak üzere tasarlanmış hava araçlarıdır. Kısa mesafede gözetleme amaçlı kullanılabilirler.

Buraya kadar bahsedilen İHA'larda Orta Mesafeli ya da Taktiksel İHA'lara kadar olan sınıflandırmalarında, döner kanat hava araçları da kullanılmaktadır ve bunlar, uzaktan kontrollü helikopter ismi ile anılırlar. Bu İHA'ların sınıflandırılması ise aşağıda belirtilmiştir [3].

- **Dikey Kalkış İniş Yapabilen İHA'lar** – Bir sistem dikey olarak kalkış yapabiliyorsa, bu sistemin dikey olarak inebildiği de varsayılmaktadır. Bu tarz döner kanatlı hava araçları, düşük kanat yüklü sabit kanatlı hava araçlarına göre atmosfer türbülanslarından daha az etkilenmektedir. Ayrıca bu İHA'ların diğer bir önemli özelliği havada sabit olarak asılı durabilmesidir.
- **İnsansız Savaşan Hava Araçları** – Bu araçlar havadan havaya saldırılarda sabit kanatlı hava araçlarına karşı kullanılmak üzere geliştirme aşamasında çalışılan araçlardır. Bu İHA'ların havadan mühimmat temin etmesi, silah kullanması gibi çeşitli amaçlarda kullanılması planlanmaktadır.

1.2 VTOL Hava Araçları

Hava araçlarının havalanması için kullanılan iki ana yöntem vardır. Bunlardan biri geleneksel iniş kalkış², diğeri ise dikey kalkış iniş (VTOL)³'tir. VTOL özelliği sayesinde, geleneksel uçuşun ihtiyaç duyduğu pist yapısının geride bırakılması ve bu özelliğe sahip araçların daha dar bir alan içerisinde hareket kabiliyetine sahip olmaları sağlanmıştır.

Geleneksel kalkış ve iniş yapısında kalkış anına kadar geçen süre içerisinde, kanatlarda alçak basınç oluşturularak uçağın yerden havalanmasını sağlayacak kaldırma kuvvetinin meydana gelmesi gerekmektedir. Benzer şekilde, uçağın süratinin azaltılması için de yerde belli bir mesafe içerisinde fren yapılması gerekmektedir. Bu yapının yerine VTOL'larda uçağı havaya kaldıran sistem, sadece motor gücüyle oluşturulan ve yer çekimini yenmek için kullanılan itkidir. İniş için ise VTOL'a etki eden yer çekiminden faydalanılır.

Günümüzde geleneksel uçuş sistemi ile VTOL bileşimi hava araçları kullanılmakta, ağır yükü olan VTOL araçları için bu sayede kısa mesafeden kalkış ve iniş gerçekleştirilebilmektedir. Şekil 1.1'de görülen Harrier uçağı VTOL olarak kullanılan uçaklardan biridir [4]. Bunun yanında helikopter de rotorları sayesinde VTOL olarak ileri, geri, sağa ve sola kıvrak manevralar yapabilen bir hava aracıdır.



Şekil 1.1. Harrier VTOL

Helikopter (Yunanca 'kavisli kanat' kelimesinden gelir) tabanlı VTOL araçları rotor sayısına göre adlandırılır. Birden çok rotorlu araçlara "multicopter" ya da "multirotor" denir. Üç

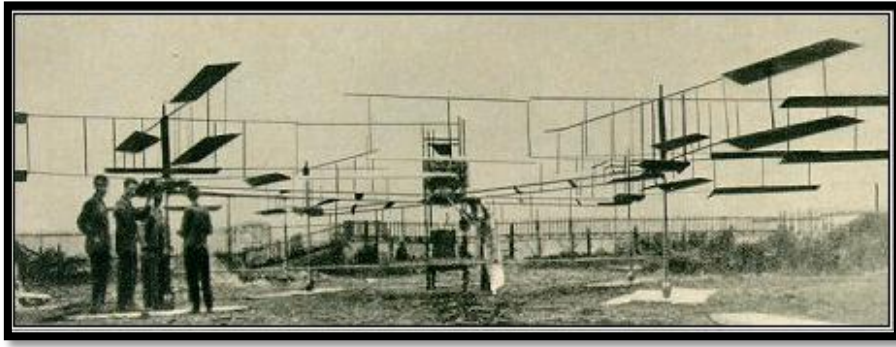
² İng. Conventional Take-off and Landing - CTOL

³ İng. Vertical Take-off and Landing - VTOL

rotorlu sistemlere “tricopter”, dört rotorlu sistemlere “quadrotor” denir. Bunun yanında “hexacopter” (altı rotorlu) ve “octocopter” (sekiz rotorlu) sistemler de bulunmaktadır. Bu sistemlerin en büyük özelliği, dikey eksen etrafında dönen pervanelere sahip olmalarıdır.

1.3 Geçmişten Günümüze Quadrotor Tasarımları

1904 yılında Fransız bilim adamı ve akademisyen Charles Richet insansız küçük bir helikopter tasarlasa da başarılı olamamıştır [5]. Ancak bu başarısızlık öğrencisi Louis Brèguet için büyük bir ilham olmuştur. 1907 yılında insan taşıyan ilk helikopteri, dört rotorlu Brèguet-Richet Gyroplane No. 1 inşa edilmiştir. Bu sistemin esas amacı pilotu ve kendisini yerden kaldırmak olsa da sistemin dengede kalması da göz önünde bulundurulmuş sınırlardan biri olmuştur. Bu araç Şekil 1.2’de [6] görülmektedir.



Şekil 1.2. Gyroplane No.1

Gyroplane, 24 Ağustos 1907 tarihinde (Bazı kaynaklarda 29 Eylül 1907 olarak da geçmektedir.) 1 dakika boyunca havada kalarak, tarihte dikey uçuşu gerçekleştiren ilk hava aracı olarak kabul edilmiştir [7]. 45 beygirgücündeki motoru ile yerden 60 santimetre havalanan bu aracın kontrol ve denge üzerine bir çok eksiği olması nedeniyle uçuşun yapıldığı süre içerisinde dört kişi aracı düzgün tutmaya çalışmıştır.

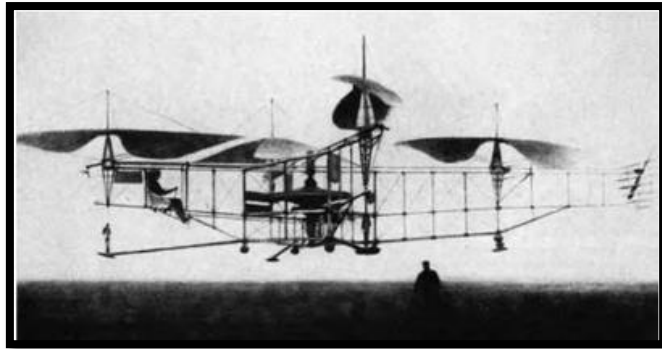
Dört rotorlu hava araçlarından biri de Şekil 1.3’te gösterilen De Bothezat helikopteridir [8].



Şekil 1.3. De Bothezat Helikopteri

Dört rotorlu bu araç yaklaşık 18 aylık bir çalışma sonunda yapılmıştır. 1600 kilogram ağırlığında, X şeklinde iskelete sahip, 18.3 metre genişlikli bu araç için her bir pervanenin yaftası pilot tarafından ayrı ayrı kontrol edilmekte, ayrıca araç üzerinde iki kişi bulunabilmektedir. 19 Ocak 1923 tarihinde 1.42 saniye boyunca yerden yaklaşık 1.8 metre kadar havalanan ve havada gezinen araç, 170 beygircüde Le Rhone motoru kullanmıştır. Cihaz, dikey olarak kalkıp yatay olarak gezinebilme özelliğine sahiptir. Bu çalışma, aracın yeterince güçlü ve güvenli olmaması, ayrıca istenen ihtiyaçları karşılayamamasından dolayı yarıda bırakılmıştır [9].

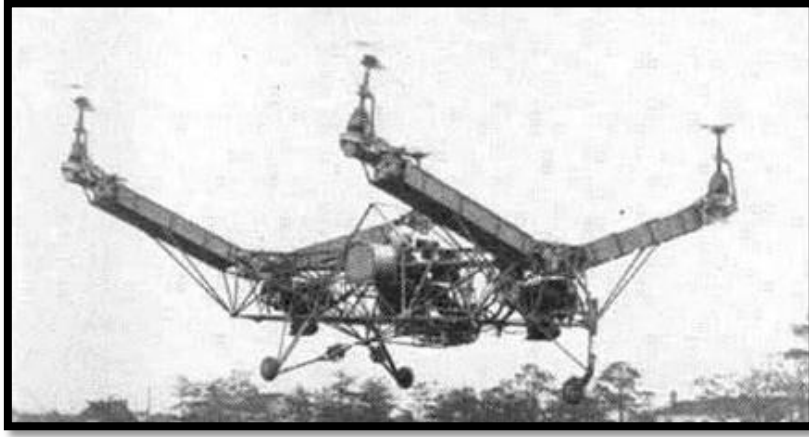
Quadrotorlar için önemli bir başka olay da 14 Nisan 1924 tarihinde gerçekleşmiştir. 180 beygir gücündeki Rhone motoru ile 360 metre havalanan Fransız Etienne Oemichen, ilk mesafe rekorunu ortaya koyan aracı tasarlamıştır [7]. Oemichen, Şekil 1.4'de görülen araç ile 4 Mayıs 1924 tarihinde 15 metre yükseklikte, 14 dakika boyunca en az bir kilometre havada durarak, 1.4 kilometrelik kapalı çevrim uçuşunu başarı ile gerçekleştirmiştir.



Şekil 1.4. Oemichen No.2

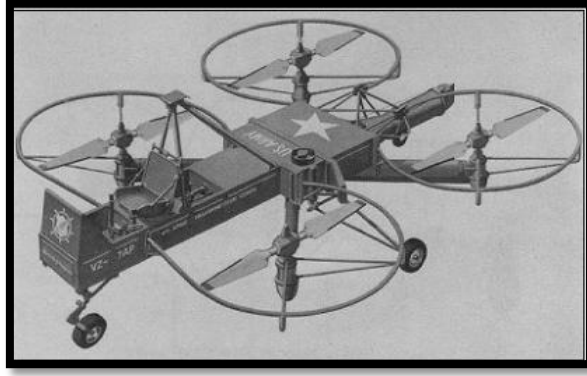
Oemichen'in kurduğu sistem pratik kullanıma elverişli değildir ve daha sonra geliştirmeye çalıştığı sistemler de ne yazık ki başarılı olamamıştır.

Convertawing modelleri ise 1950'li yıllarda Amerika tarafından sivil ve askeri alanda geliştirilmeye çalışan quadrotorlardan biridir. Bu araçlar için yapılan tasarımlara A-F arasında isimler verilmiştir. Bu modellerden A için olanın resmi şekil 1.5'te gösterilmektedir [10]. Bu model 1922'de Oemichen tarafından geliştirilen modelin yeniden gözden geçirilmesi ile geliştirilmiştir. 1956 yılında ilk uçuşu gerçekteşen bu modeller arasında E Modeli'nin saatte 278 kilometre hız yapacak şekilde 630 kilometre menzil ile tasarlanması düşünölmüş; fakat maddi olarak destek alamadığı için bu proje yarıda bırakılmıştır [11].



şekil 1.5 Convertawings Model A

1950'lerde üzerinde çalışılan ve geliştirilen bir diğer quadrotor ise Curtiss Wright VZ-7'dir. Bu sistem, Amerikan ordusu destekli geliştirilse de esas amacın quadrotorlu bir jip olması ve Curtiss Wright VZ-7'nin ordunun standartlarını karşılayamaması sorun yaratmıştır. Manevra kabiliyeti olan ve kolay uçuş sağlayan araçtan iki adet üretilmiş olup, bir daha üretilmemek üzere yapımcıya geri gönderilmiştir [12]. Bu cihaz şekil 1.6'da görölmektedir.



Şekil 1.6. Curtiss-Wright VZ-7

Benzer bir talihsizliği Bell serisi X-19 ve X-22'ler de yaşamıştır. Bu uçaklar ordunun istediği özellikleri taşıyamadıkları için, sadece birer prototip olarak kalmışlardır. X-19 ve X-22, quad-tilt olarak adlandırılan bir mekanizma ile çalışmaktadır. Dört pervane yapısına sahip bu araçlar, 45 dereceye kadar yukarı açıyla bakan motorlar sayesinde daha kısa pistlerden havalanabilmektedir.

1.4 Günümüzde Yapılan Quadrotor Çalışmaları

Günümüzde yapılan quadrotor çalışmaları, geçmişte yapılan quadrotor çalışmalarına göre farklılık göstermektedir. Helikopterin bulunmasına kadar geçen süreç içerisinde birçok bilim adamı quadrotorlar için ciddi çalışmalar yapmışsa da geleneksel helikopterlerin üretiminin kolaylığı, ağırlık olarak uygunluğu ve taşıma kapasitesi nedeniyle quadrotorlara olan ilgi bir süre farklı yönere kaymıştır.

Gelişen silikon teknolojisi, yüksek hızda veri transferi, aracın ataletinin çok kısa sürede ve çok yüksek hızda güncellenebilmesi gibi birçok gelişme, mekanik olarak tasarımı zor yapılan quadrotorların, elektronik ortamda rahatça geliştirilebilmesine elverişli bir zemin hazırlamıştır.

Son yıllarda quadrotorlara olan talebin artması ile mikroişlemci⁴-mikrokontrolcülerin⁵ piyasa fiyatının makul değerlere inmesi sayesinde quadrotor çalışmaları daha da ivmelenmiştir. Özellikle üniversiteler bünyesinde yapılmaya başlanan çalışmalara, hobi olarak ilgilenen

⁴ İng. Microprocessor - μp

⁵ İng. Microcontroller - μc

kişilerin de eklenmesi ile quadrotorların pazar payı artmış ve seri üretim setleri sayesinde daha ucuza mal edilebilen radyo kontrollü İHA'lar olarak günümüzdeki son şeklini almıştır. Dünya çapında bilenen bazı quadrotor çalışmaları şu şekilde sıralanabilir:

- Parrot AR. Drone: Mobil ağlar üzerinden, akıllı cep telefonu yardımı ile kontrol edilebilen, kamerası sayesinde etraftan görüntü almayı sağlayan İHA'dır. Sivil amaçla kullanılmakta ve marketlerde rahatlıkla bulunabilmektedir. Açık kaynak olmaması⁶ ve ticari amaçla hizmet vermesinden dolayı araştırma konularında pek yer almamaktadır [13].
- Mesicopter: Küçük ölçekte hazırlanan İHA'lara verilebilecek en önemli örneklerdendir. Stanford Üniversitesi tarafından geliştirilen Mesicopter, bir bozuk para ebadında hazırlanmıştır [14].
- DraganFlyer: Parrot AR. Drone düzeneğine benzer, ticari amaçla kullanılmakta olan quadrotorlardan biridir. Kendi radyo kumandası ile kontrol edilebilen bu sistem rahatlıkla ticari olarak satın alınabilmektedir [15].
- Starmac: Stanford Üniversitesi tarafından geliştirilen İHA'dır. İki versiyon halinde çıkartılmıştır. Özellikle PID tarzı çalışmalarda öne çıkan Starmac quadrotorları, araştırma alanında öne çıkan başarılı projelerden biridir [16].
- Pensilvanya Eyalet Üniversitesi: Quadrotorların sürü olarak hareketini inceleyen çalışmalara son yıllarda önem veren üniversitelerdendir. Görsel olarak tek bir merkezden kontrol ve quadrotorların birbiri ile haberleşerek kontrolü üzerine başarılı çalışmalar yapılmaktadır [17].
- Cornell Üniversitesi : Amerika Birleşik Devletleri Savunma Bakanlığı İleri Araştırma Projeleri⁷ tarafından desteklenen çalışmaları ile son yıllarda öne çıkmıştır. Quadrotorların bir engeli aşması ve yoluna devam etmesi ile ilgili araştırmaları ciddi önem taşımaktadır. Bu sayede ileride quadrotorların kuşlar gibi hareket etme yetenekleri olacağı öngörülmektedir [18], [19].
- Avustralya Ulusal Üniversitesi: X – 4 flyer adlı quadrotor çalışması ile başarılı olmuş üniversitelerden biridir. Bir kilogram ağırlığı ve yaklaşık 15 dakikalık uçuş süresi ile hala geliştirme aşamasında olan bu çalışma özellikle yerleşim alanlarındaki sıkıntıların dikkate alınarak tasarlanmasından dolayı çok rağbet görmektedir [20].

⁶ İng. Open Source (Yazılımın kullanıcı ile paylaşılması)

⁷ İng. The Defense Advanced Research Projects Agency - DARPA

- İsviçre Federal Teknoloji Enstitüsü: Geleneksel ve optimal kontrol alanlarındaki karşılaştırmalı çalışmalar ile [21] öne çıkan İsviçre Federal Teknoloji Enstitüsü, bu çalışmaya yaptığı masraf ile de dünya çapında ünlenmiştir.

Dünya çapında yapılan bu araştırmalar yanında, ülkemizde de üniversitelerde quadrotorlar için çeşitli çalışmalar yapılmaktadır. Sabancı Üniversitesi, ODTÜ, THK Üniversitesi, Atılım Üniversitesi, Ankara Üniversitesi, Fırat Üniversitesi gibi birçok üniversitede, quadrotor ve quadrotor benzeri İHA'ları geliştirmeye çalışan programlar bulunmaktadır.

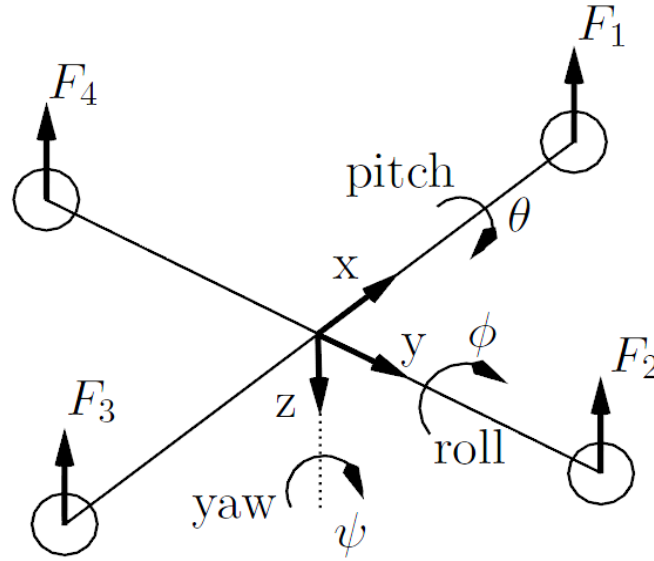
Bu çalışmalardan biri de TOBB ETÜ'de gerçekleştirilmektedir. Bu tezde, İHA'ların bir alt grubu olan quadrotorlar hakkında TOBB ETÜ'de sıfırdan başlanarak yapılan çalışmalar anlatılacaktır. Sistemin kurulması ve kurulmasından önceki tasarım aşamaları, donanımsal sistem tasarımı, mimari tercihler ve bunların sebepleri, haberleşme için kullanılan yöntemler, genel yapı itibariyle sistemin çalışması ile birlikte bu sistemin çalışır hale getirilmesi sürecinde elde edilen bulgular, test düzenekleri, testlerden elde edilen veriler ve bu veriler üzerinden tasarlanan yeni yapı hakkında detaylı bilgilendirme yapılacaktır.

2. UÇUŞ DİNAMİKLERİ ve DİĞER TEMEL BİLGİLER

Uçuş dinamiği, bir hava aracını üç eksende kontrol etme ve yönlendirme (oryantasyon)⁸ bilimidir [22]. Aracın geliştirilmesi daha etkin kullanılabilmesi için zorunludur. Bunu yaparken de her araçta sabit ve var olan fizik kurallarına bağlı bazı terimler bilinmelidir. Bu terimler sayesinde iletişim daha kolay sağlanmaktadır. Araştırma- geliştirme yapılırken bu ifadeler üzerinden gidilir.

2.1 Euler Açıları

Uçuş dinamiğinde en önemli parametreler aracın ağırlık merkezine göre üç eksende dönme açısı olarak belirtilen yunuslama⁹, yuvarlanma¹⁰ ve sapma¹¹ açılarıdır. Bu açıların ifadesi Şekil 2.1'de görülmektedir [23].



Şekil 2.1. Quadrotor Uçuş Dinamikleri

Bu dinamiklerin tanımlanabilmesi için, referans olarak yer eksenlerinin tanımlanması gerekmektedir.

⁸ İng. Orientation

⁹ İng. Pitch

¹⁰ İng. Roll

¹¹ İng. Yaw

- x_e = Pozitif kuzey yönü
- y_e = Pozitif doğu yönü
- z_e = Dünyanın merkezine doğru

Bu tanımlara göre sapma açısı, x_e ve y_e eksenlerinin z_e eksenini etrafında döndürülmesi ile elde edilen açıdır. Bu şekilde x_1, y_1, z_1 olacak şekilde geçiş eksenleri oluşturulur. Burada sağ el kuralı uygulanarak $z_1 = z_e$ ataması yapılabilir. İkinci olarak x_1 ve z_1 eksenleri etrafında y_1 eksenini döndürülürse yunuslama açısı elde edilir. Bu sayede x_2, y_2, z_2 için $y_2 = y_1$ olacak şekilde ikinci bir ara geçiş eksenini elde edilir. Son olarak ise y_2 ve z_2 eksenlerinin x_2 eksenini etrafında döndürülmesi sonucunda yuvarlanma açısı elde edilir [24, 25, 26, 27].

Daha basit bir anlatım ile Kartezyen düzlemi üzerinde gösterilen Şekil 2.1'deki quadrotor incelenirse, cihazın x eksenini etrafında döndürülmesi sonucu elde edilen açıya yuvarlanma açısı, y eksenini etrafında döndürülmesi sonucu elde edilen açıya yunuslama açısı ve z eksenini etrafında döndürülmesi sonucu elde edilen açıya sapma açısı denilmektedir.

2.2 Hava Araçlarına Etki Eden Kuvvetler

Bir hava aracına etki eden dört kuvvet vardır. Bunlar, kaldırma¹², ağırlık¹³, sürüklenme¹⁴ ve itkidir¹⁵. Kaldırma ve ağırlık karşılıklı iki kuvvet iken, sürtünme ve itki de karşılıklı iki kuvvettir. Bu kuvvetlerin uçak üzerinde gösterimi Şekil 2.2'de yapılmıştır [28]. Şekil 2.2'de etki eden kuvvetler sadece uçaklara değil, her türlü hava aracına etki etmektedir.

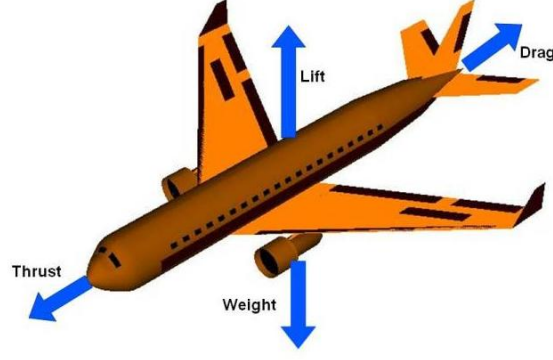
Ağırlık: Ağırlık her zaman dünyanın merkezine doğru etki eden kuvvettir. Ağırlığın değeri, aracın tüm parçalarının, yakıtının ve yükünün kütesinin büyüklüğüdür. Ağırlık tüm araç boyunca yayılmaktaysa da “ağırlık merkezi” adı ile tek bir noktada toplandığı düşünülebilir. Uçuş sırasında cihaz ağırlık merkezi etrafında döner.

¹² İng. Lift

¹³ İng. Weight

¹⁴ İng. Drag

¹⁵ İng. Thrust



Şekil 2.2. Uçağa etki eden kuvvetler

Kaldırma: Ağırlık kuvvetine karşı oluşturulan kuvettir. Kaldırma, cihazın havada hareketi ile elde edilir ve aerodinamik bir kuvettir. Uçuş yönüne dik olarak etki eder. Kaldırma kuvveti aracın şekline, ölçüsüne ve hızına göre değişir. Ağırlık gibi kaldırma kuvveti de tüm araç üzerine yayılmakla birlikte esas kanatlar üzerinde oluşmaktadır. Ağırlık merkezi gibi, aracın kaldırma kuvveti “basınç merkezi” adlı tek bir noktada toplanabilir.

Araç üzerindeki kaldırma kuvveti, kontrol probleminin çözümü için önemlidir. Aerodinamik yüzeyler cihazın yunuslama, yuvarlanma ve sapma açılarının kontrolü için kullanılmaktadır.

Sürüklenme: Araç havada hareket ettiği sürece, sürüklenme kuvveti cihaza etki eder. Aracın hareketine karşı oluşan hava direncine “sürüklenme kuvveti” denir. Sürüklenme uçuş yönünde ve uçuş yönüne karşı etki eder. Kaldırma kuvveti gibi sürüklenme kuvvetinin büyüklüğüne cihazın şekli, havanın yoğunluğu, aracın hızı gibi birçok etki bağlıdır. Kaldırma kuvvetinde olduğu gibi araç üzerine etki eden sürüklenme, cihazın tüm parçalarına etki etmektedir; fakat bunlar basınç merkezi etrafında tek bir kuvvet şeklinde toplanabilir.

İtki: Hava araçları, sürüklenme etkisinin üstesinden gelebilmek için itme sisteminin yarattığı itki kuvvetini kullanır. İtki kuvveti, motorların hava aracına bağlandığı yöne göre değişmektedir. Eğer motorlar Şekil 1.3'teki gibi gövdeye paralel bağlanırsa, itki gövde merkez çizgisi boyunca araca etki eder. Eğer motorlar Şekil 1.1'deki gibi bağlanırsa, cihazın kısa sürede havalanmasını sağlayacak bir kuvvet oluşturulması sağlanabilir. İtkinin büyüklüğü motor türüne, motor sayısına ve gaz ayarına göre değişir.

Aracın havadaki hareketi, belirtilen kuvvetlerin yönüne ve göreceli gücüne göre değişir. Eğer bu kuvvetler dengeli ise uçak sabit bir hızda hareket ederken, quadrotor gibi araçlarda havada asılı durur. Eğer bu kuvvetler dengesiz ise, araç en büyük kuvvetin olduğu yönde hızlanır.

Quadrotorlarda bu kuvvetlerin oluşturduğu etkiler Şekil 2.2'de görülen uçak üzerindeki kuvvetlerden biraz daha farklıdır.

Döner kanatlı araçlarda kanat olarak pervanenin kanatları bulunmaktadır. Bunlara döner-kanat denilmektedir [29]. Bu sayede araç üzerinde bir kaldırma kuvveti oluşturulmaktadır. İtki de pervanelerin açışal hızının karesi ile doğru orantılı olarak değişmektedir; fakat hızın değişmesi ile birlikte pervanenin şekli bozulmakta (uzaması, yamulması, vs) ve bu yüzden toplam itki, dört motorun toplam itkisine eşit olmamaktadır. Bu durum özellikle pervaneden pervaneye ve motordan motora değişmektedir. Bu yüzden de modellemede helikopter pervanesine göre daha rahat bir modelleme sağlansa, da yer etkisi¹⁶ (cihazın yere yakın uçuşu sırasında oluşan etki), cihazın iskeletinin etkisi, temiz hava akışının pervanelerin etkileri ile bozulup diğer pervaneleri etkilemesi, havadaki girdaplar¹⁷, ileri hareket gibi bir çok sebepten dolayı tek motorla yapılan kontrollü itki testleri, toplam itki için pek başarılı olamamaktadır.

Havada asılı duran bir quadrotorda itki ve kaldırma kuvveti cihaza dik olarak pervanelerin baktığı yönde etki eder. Sürtünme ve ağırlık ise pervanelerin baktığı yönün tersinde yere dik olarak cihaza etki eder.

2.3 Darbe Genlik Modülasyonu

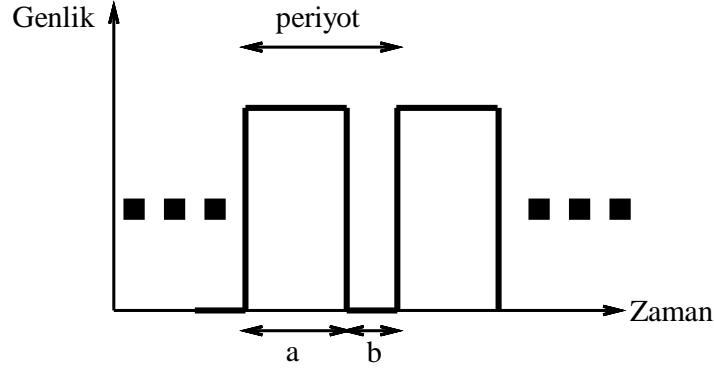
Darbe Genlik Modülasyonu¹⁸ (PWM), kısaca bir kare dalgaının darbe kısmının genişliği olarak tanımlanabilir. Şekil 2.3'te bunun bir örneği görülmektedir.

Darbe genlik modülasyonu için önemli olan değerlerden biri de Şekil 2.3 üzerinde "a" ve "b" olarak görülen kısımlardır. "a" ile gösterilen kısım, darbenin ulaştığı en yüksek genlik değeri olup ve yüksekte kalma süresi olarak adlandırılır. "b" ise darbenin en düşük değeridir ve düşükte kalma süresi adıyla tanımlanır.

¹⁶ İng. Ground Effect

¹⁷ İng. Turbulance

¹⁸ İng. Pulse Width Modulation



Şekil 2.3. Darbe Genlik Modülasyonu

Dalganın yüksekte kalma süresinin periyoda oranı, doluluk boşluk yüzdesi¹⁹ ile ifade edilir. Bir başka deyişle, bir periyot boyunca dalganın ne kadar süre tam genlikte olduğunu belirtir.

PWM, quadrotorlar motorları sürmek için kullanılır. İki milisaniye periyotlu PWM değerinin %50 olması ($a=b$) motorun durmasını, %100 olması ise ($b=0$) motorun tam hızda çalışmasını sağlamaktadır.

2.4 Otopilot Sistemleri

Otopilot²⁰ sistemi, otomatik pilot kelimelerinin kısaltılmasından meydana gelmiştir. Günümüzde otopilot sistemi, bir pilotun yapacağı tüm işlemlerin otomatik bir cihaz tarafından yapılması anlamına gelmektedir. Otopilotlar, hava, kara, deniz ve uzay taşıtlarında kullanılabilir.

Hava araçlarında otopilot tasarımı ilk kez 1912 yılında, kullanımı ise 1914 yılında Sperry ve Cachin tarafından yapılmıştır [30]. Bu sistem gemilerdeki jiroskopun küçültülerek uçağa uygulanmış halidir ve ilk olarak Paris'te ortaya konulmuştur.

Gelişmiş otopilot sistemleri İHA'nın uçuşu süresince pilota eşlik edecek şekilde tasarlanmaktadır. Aracı indirmek, kaldırmak, havada tutmak, yöneltmek, noktalar arasında götürüp getirmek, bir yolu takip etmek, pistte gezinmek [31] gibi birçok işlem yanında, hava aracının en iyi hızda uçmasını sağlayarak daha düşük yakıt tüketimine ve uygun tanklardan

¹⁹ İng. Duty Cycle

²⁰ İng. Autopilot

yakıt alınması ile dengeli ve konforlu bir uçuşun gerçekleşmesine yardımcı olurlar. Ayrıca acil durumlarda uçağın kontrolünde pilota yardımcı olmak gibi diğer hayati uygulamalarda da otopilotlar kullanılır [2].

İHA’larda otopilot sisteminin en önemli yapı taşı uçuş kontrol sistemidir. Araca ait tüm verileri inceleyen ve bu verileri düzenleyerek uçağın kontrolünü sağlayan ana merkez, uçuş kontrol sistemidir²¹. Uçuş kontrol sistemi, çeşitli sensörlerden (ivmeölçer, jiroskop, manyetometre, hız sensörleri, basınç sensörleri, küresel konumlama sistemi²², radyo alıcısı, vs) verileri alır ve bu verileri işleyerek aracın kontrol yüzeylerine, motorlarına ve diğer elektronik sistemlerine yeniden komut olarak üretir. Bu sırada veri kaydını da yaparak yerde bulunan bir kontrol sistemine (yer kontrol istasyonuna²³-YKİ) verilerini iletir. Benzer şekilde, bir radyo kontrol alıcısı veya pilot kumandası ile uçak için referans değerleri alınır [32].

²¹ İng. Flight Control System - FCS

²² İng. Global Positioning System - GPS

²³ İng. Ground Control Station -GCS

3. GENEL QUADROTOR MİMARİSİ

Yapılan çalışmaların ilk aşamasında donanımsal olarak quadrotor mimari parçalarının elde edilmesi gerekmektedir. Bunun için quadrotorların sahip olduğu genel mimari yapının bilinmesi ve donanımın ona göre alınması gerekmektedir.

3.1 Ana İskelet

Quadrotorların ana iskeleti iki temel şekilde tasarlanmaktadır. Bunlar H tipi ve X tipi olarak geçmektedir.

X tipi iskelete sahip olan quadrotorların en büyük özelliği, yapım aşamasında sistemin daha dengeli ve rahatça tasarlanabilmesidir. İlk tasarlanan quadrotorların da bu iskelet yapısına sahip olmasının temel sebebi budur. Ayrıca bu tarz tasarımlarda sistemin kontrolcü tasarımı yapılırken daha az efor sarf edilmektedir. Çünkü eksenler üzerinde tüm momentler eşittir ve ağırlık merkezi ortadadır. Şekil 3.1(a)'da X iskeletine sahip quadrotor görülmektedir.

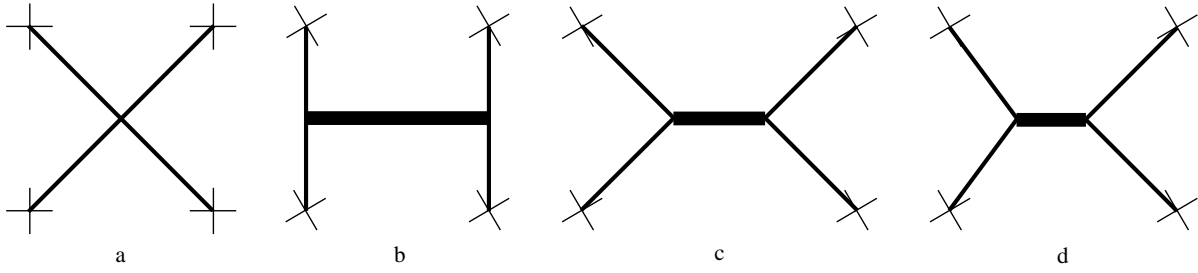
Şekil 3.1(b)'de ise H tipi iskelet bulunmaktadır. H tipi iskelet yapısına sahip olan sistemler ise daha yakın zamanda tasarlanan quadrotor iskeletleridir. Bu quadrotor yapısının en büyük özelliği daha dayanıklı olmasıdır. Ayrıca, kullanıcının alet üzerine ekleyeceği faydalı yük için daha fazla yer bulunmaktadır. Bu da kullanıcıya önemli bir ayrıcalık sağlamaktadır.

Bu tip quadrotor tasarımları yanında, Şekil 3.1(c)'de görülen genişletilmiş²⁴ X tipi ve Şekil 3.1(d)'de görülen örümcek tipi²⁵ quadrotor iskeletleri de bulunmaktadır. Genişletilmiş X tipi quadrotorların şekilleri, H tipi ve X tipi iskelet modellerinin karışımı olarak düşünebilir. Örümcek iskelette ise iki motor ağırlık merkezine daha yakın iken iki motor da ağırlık merkezinden daha uzakta bulunmaktadır.

X tipi ve H tipi tasarımlar arasındaki en büyük fark, yönelim sırasında motorlara uygulanması gereken farklı kuvvetlerden meydana gelmektedir. Sistemin sabit ve durağan kalması istenen pozisyonlarda, H tipi ve X tipi iskelete sahip quadrotorlarda tüm motorlara uygulanan kuvvet yaklaşık olarak aynıdır.

²⁴ İng. Stretched X frame

²⁵ İng. Spider Frame



Şekil 3.1. Quadrotor İskelet Tipleri

X tipi quadrotorların yunuslama veya yuvarlanma hareketleri sırasında, motorların merkez eksenenden olan uzaklıkları aynı olduğu için, eşit miktarda bir moment uygulanır.

H tipi quadrotorda ise ağırlık merkezine etki eden kuvvetin değişimi sorun yaratmaktadır. Aracın yunuslama ve yuvarlanma açılarını, aynı açısal hızda dönebilmesi için aynı moment değerlerinin oluşturulması gerekmektedir. Bu yüzden dönüş sırasında, dönüş eksenine uzak olan motorlara daha fazla itki vermek gerekmektedir. Bu da kontrolcü tasarımını zorlaştırmaktadır.

3.2 Motorlar

Motorlar, quadrotorlarda itkiyi oluşturmaya yarayan sistemdir. Quadrotorların motorları hakkında çok çeşitli tercih yelpazesi bulunmaktadır. Geçmişte kullanılan quadrotorlar, benzinle çalışacak şekilde tasarlanmış olsa da günümüzde elektrik motorları, ucuz ve daha çevreci olmaları sebebiyle tercih edilir hale gelmiştir. Quadrotorlar genelde fırçasız doğru akım²⁶ motor kullanacak şekilde tasarlanmaktadır [33].

Fırçalı motorlar H- köprüleri ile sürülen bir yapıya sahiptir. Fırçalı denmelerinin sebebi ise armatür ile güç kabloları arasında bir bağlantının olmasından kaynaklanmaktadır. Bu durumda fırçalı motorlarda verim kaybı çok fazla olmaktadır. Bağlantının yaptığı etkiden dolayı motorlar daha kısa sürede tahrip olmaktadır.

²⁶ İng. Direct Current - DC

Fırçasız motorlar ise ESC- Elektronik Hız Kontrolcüsü²⁷ (ESC) ile sürülmektedir. Şaft üzerine kurulu sistemde armatür ile güç kabloları arasında üç fazlı elektromanyetik alan oluşturularak dönüş kuvveti elde edilir. Bu durumda daha az sürtünme katsayısı oluşması ve motorun daha verimli dönmesi sağlanır (genelde fırçasız motorlarda verim %80'in üzerindedir). Bu durum fırçasız motorların daha pahalı olmasına ve ESC'lerin maliyetlerinin yükselmesine neden olmaktadır [34].

Quadrotorların kullanımında ise genelde fırçasız motorlar seçilmeye çalışılır. Daha uzun çalışabilmeleri ve verimli olmaları yanında, fırçalı motorlarda yüksek hızlarda istenen torkun elde edebilmesi için fazladan dişli kutusunun eklenmesi gerekmektedir.

Motor seçiminde sadece motorun fırçalı ya da fırçasız olması değil aynı zamanda sistem tasarım parametrelerinin de dikkate alınması gerekmektedir. Örneğin, quadrotor tasarımı için motorlarda özel bir ayırım yapılmıştır. İskelet üzerinde motorların monte edileceği noktalarda üç giriş bulunursa, bu sistem Mikro İHA'dır. Eğer dört giriş bulunursa bu sistem diğer yapılara aittir anlamına gelir. Mikro İHA'lar için hafif motorlar kullanılsa da diğer İHA'lar için daha güçlü ve ağır motorların kullanılması gerekmektedir.

Bir diğer önemli tasarım parametresi ise motorun çektiği akımın göz önüne alınmasıdır. Daha büyük motorlar, daha yüksek akım çekerler. Yüksek akım çeken motorlar, düşük hızla dönerken daha az verimle çalışırlar. Bu durumda daha küçük bir motor ile İHA'nın kolaylıkla havalanması sağlanabilirken, daha büyük bir motorda daha fazla akım kullanılması gerekebilir.

Motorlara ait bir diğer özellik de Kv oranıdır. Bu değer RPM/Volt değeri olarak verilmektedir. Buna göre 1.000 Kv için şu şekilde bir bağlantı kurulabilir: 10 V gerilim %100 PWM ile motora uygulandığında motor dakikada 10.000 devir²⁸ (RPM) yapmalıdır. Teoride bu ifade ne kadar basit olsa da pratikte bu durum geçerli değildir; çünkü motorların dönüş hızını etkileyen bir diğer önemli faktör de pervanedir. Hangi motora hangi pervanenin uyduğu hakkında kullanıcıya genelde bilgi verilmez. Ancak birçok satıcı, sattıkları motorların özellikleri arasına tavsiye ettikleri pervane seçeneklerini de eklemektedir. Genelde yüksek

²⁷ İng. Electronic Speed Controller - ESC

²⁸ İng. Round Per Minute

Kv'li motorlar daha az tork ve daha yüksek maksimum hıza sahip iken, düşük Kv'li motorlar daha yüksek tork ve daha az maksimum hıza sahip olurlar.

Motorların pervanelerle eşlemesi de önemli bir tasarım parametresidir. İHA'larda kullanılan motorların genelde içten dönmeli²⁹ veya dıştan dönmeli³⁰ olduğu görülmektedir. Fark olarak, içten dönmeli motorlarda motorun içindeki rotor dönmekteyken, dıştan dönmeli motorda motorun dış yüzeyi dönmektedir. Pervanenin rahat takılması için genelde dıştan dönmeli motorlar seçilir; bunları sisteme entegre etmek daha kolaydır. Pervanelerin de motora bağlanması için plastik bantlar, bağlantı ekleri ya da motor ucuna pervanenin sıkıştırılması yöntemlerinden biri kullanılabilir. Burada önemli olan pervanenin uçuş sırasında titreşim yapmayacak şekilde motorlara bağlanmış olmasıdır.

Motor tercihindeki en son konu ise ağırlıktır. Tasarım olarak en hafif motor her zaman tercih sebebi olmuştur. Ancak aynı özelliklere sahip motorlardan daha hafif olanın maliyeti her zaman daha fazla olacaktır.

3.3 Pervaneler

Normal helikopterlerde pervanenin dönüşü, dikey eksen üzerinde helikopterin kendisini ters tarafa döndürecek bir moment yaratmaktadır. Bu kuvveti engellemek için helikopterlerde sapma açısını etkileyen ve kuvvete dik bir pervane bulunmaktadır. Quadrotorlarda ise bu sorun çift sayıda pervane kullanılarak aşılmaya çalışılır. Karşılıklı iki motor, saat yönünde döndürülürken diğer karşılıklı iki motor saat yönünün tersinde döndürülür ve bu kuvvetin etkisi ortadan kaldırılmaya çalışılır. Sapma açısındaki değişiklik, karşılıklı iki motor çiftinin uyguladığı itkinin değişimi ile olur.

Pervane seçimindeki bir diğer konu ise pervanelerin çapı ve eğimidir. Bir pervanenin çapı, iki uç noktası arasındaki mesafedir ve pervanenin ne kadar büyük olduğunu gösterir. Eğimi ise pervanenin jel gibi bir sıvı içerisinde bir tur ilerlediği zaman kat ettiği mesafedir.

Pervane seçimi, motor seçimine bağlı önemli bir değişkendir. Motora göre pervane seçilmesi daha uygundur. Normal boyutta bir quadrotor için genellikle 20-30 santimetre çapında

²⁹ İng. Inrunner

³⁰ İng. Outrunner

pervane seçilir. Yüksek eğimli bir pervane kullanılırsa daha fazla itki elde edilir; fakat bataryadan daha yüksek akım çekilir.

3.4 Batarya

İHA'lar yüksek enerji yoğunluklu bataryalara ihtiyaç duymaktadır. Bunun için Nikel-Kadmiyum pillerden çok fazla sayıda kullanılması gerekmektedir. Bu durum da, cihazın ağırlığının azaltılmasına çalışılırken, artırılmasına sebep olmaktadır. Günümüzde Nikel-Kadmiyum piller yerine Lityum-Polimer (li-po) piller kullanılmaktadır. Bu piller ticari olarak satılan en yüksek yoğunlukta enerjiye sahip pillerdendir.

Li-po piller hücreler şeklinde tasarlanmıştır. Her bir hücre, 3.7 Volt gerilim vermektedir. Bir pilin sahip olduğu toplam voltaj, hücre sayısı kadar verdiği gerilimdir. Örneğin, üç hücreli bir pil, 11.1V gerilim verebilmektedir. Piller şarj edildikten sonra herbir hücre 4.2V'a kadar gerilim verebilirken, kullanım sırasında 3.4V altına düşürülmemeye gayret edilmelidir; yoksa pillerin ömrü kısalmış olur. Eğer hücrenin gerilimi 3V değerinin altına düşerse, bu hücrenin kısa sürede kullanımdan çıkması muhtemeldir.

Li-po pillerin verebileceği akım için mili-amper-saat anlamına gelen mAh ifadesi kullanılır. Bu ifade, pilin bir saat boyunca kaç amper akım verebileceğini göstermektedir. İkinci bir diğer önemli ifade ise "C" derecelendirmesidir. Bir pilin verebileceği anlık en yüksek akım bu C derecesine göre belirlenir ve C*mAh şeklinde hesaplanır. Örneğin, 3000mAh (bir saat boyunca 3A akım verebilen) bir pil için 25C kullanımı, anlık $3000 \times 25 = 75000 \text{mA}$ (75A) akım verebileceği anlamına gelir.

Bir li-po pilden verebileceğinden daha fazla akım çekilmesi, pilin uzun süre kullanılmadan boş bırakılması, biten pilin daha fazla kullanılmaya çalışılması gibi durumlarda pil şişer. Bu durumda pilin kullanılmaması gerekmektedir; aksi takdirde yangın tehlikesi yaşanabilir.

3.5 Motor Kontrol Devresi

Quadrotorun motorları ile ilgili olarak Bölüm 3.2'de anlatılan bilgilerde, fırçalı ve fırçasız DC motorların İHA'larda kullanabildiğinden ve fırçalı bir DC motor kullanılıyorsa, H-köprüsü ile motor kontrolünün sağlandığından bahsedilmiştir. Ayrıca fırçasız motorların daha yaygın

olarak quadrotorlarda kullanılmasından dolayı ESC yapısı hakkında da kısaca açıklamalar yapılmıştır.

ESC, motorun ürettiği ters elektromanyetik kuvveti algılayarak bir sonraki hangi kutba gerilim vermesi gerektiğine karar veren, üzerinde kendi işlemcisi olan bir elektronik alettir.

ESC'ler genellikle motorun çekeceği akıma göre seçilir. Motorun vereceği en yüksek anlık akımın yaklaşık 1.2-1.5 katı kadar bir akımı geçirecek ESC'nin kullanılması yeterli olacaktır.

ESC'ler PWM ile çalışmaktadır. PWM değerinin güncelleme hızı 50 Hz olarak belirlenmiştir. Normal bir quadrotorun hareket ettirilmesi için bu değer yeterlidir. Ama atik ve yüksek hareket kabiliyeti isteyen uygulamalar için ise daha yüksek hızda ESC'ler kullanılmalıdır. Bu durumda 450 Hz'e kadar kullanılabilen özel yapım ya da ticari olarak satılan ESC'ler veya I2C protokolü ile haberleşen 1kHz değerinde ESC'ler bulunabilir [35].

3.6 Atalet Ölçümü için Kullanılan Sistemler

İHA'da kullanılan en önemli sistemlerden biri ataletsel ölçüm için kullanılan sistemdir. Ataletsel ölçüm sistemi, hava aracı üzerine etki eden doğrusal ve dairesel hareketin ölçümünü gerçekleştirmektedir. Bunun için de ataletsel ölçüm yapan algılayıcılar kullanılır. Bunlar gövde eksenleri üzerinde İHA'ya etki eden açısal hız ve ivmelerin ölçümünü yapmaktadırlar.

Ataletsel olarak veri ölçen cihazlar üç ana başlık altında incelenebilir [36]. Bunlardan ilki “inertial sensor assembly” ismi ile geçer ve ham olarak açısal hız ve ivmelerin değerlerini ölçer. Ayrıca içerisinde bulundurduğu termometreler sayesinde ölçümlerde yapılan hataların hesaplanmasına yardımcı olur. Bu sistemin üzerine, ham verilerdeki kayma, sapma gibi değerlerin incelenerek uygun değerlerle çarpılması gibi ölçüm sonrası işlemleri yapan ataletsel ölçüm birimi³¹ (AÖB) kullanılır. AÖB'lerin verilerini, yönelim algoritmasını kullanarak cihazın pozisyon, hız ve konum gibi bilgilerini kullanıcıya sağlayan “inertial navigation systems” kullanılmaktadır [37].

³¹ İng. Inertial Measurement Unit - IMU

AÖB genellikle quadrotorların en orta noktasına, ağırlık merkezinin olduğu noktaya monte edilmeye çalışılır. Bu sayede, ağırlık merkezi etrafında dönme hareketi yapan İHA'nın açısız hız ve ivmesinin değerleri, AÖB'nin açısız hız ve ivmesine eşit olarak alınabilir.

AÖB'nin içinde birbirine dik jiroskop ve ivmeölçerler bulunmaktadır. Bunların yanında, bazı AÖB'lere fazladan manyetometre de eklenmiştir.

İvmeölçer, cihazın ne kadar hızlı yavaşlayıp hızlandığını ölçer. Ölçüm aralığı için genelde (m/s^2) ya da "g" kuvveti ($9.8 m/s^2$) kullanılır. İvmeölçer seçiminde, kullanıcının hangi aralıkta ivmelenmeyi ölçeceği önemlidir. Eğer ölçüm yapılacak aralık küçük bir aralık olarak belirlenmişse, yüksek aralığa sahip ivmeölçerlerin hassasiyeti yeterli olmayabilir. Örneğin -5g ve +5g aralığında bir çalışma yapılacaksa, -500g ve +500g aralığında bir ivmeölçer kullanılmamalıdır. İvmeölçerlerin bir diğer özelliği ise yerçekiminden etkilenmesidir. Bu sayede ivmeler herbir eksen üzerinde ayrı ayrı kolaylıkla hesaplanabilir.

Jiroskop, cihazın açısız dönme hızını ölçmektedir. Ölçüm olarak dakikada devir dönüş sayısı (RPM) ya da saniyede kaç derece döndüğünü gösteren ($^{\circ}/s$) değeri kullanılmaktadır. Kullanılan İHA'nın tasarım olarak saniyede kaç derece döndüğünün hesaplanması, sisteme entegre edilecek jiroskop için büyük önem taşır. Jiroskopta herbir ekseninde yapılan ölçüm yerçekiminden bağımsız olduğu için birbirini tamamlayıcı niteliktedir.

İvmeölçer ve jiroskopun birbirinden ayrı olarak kullanılmasıyla cihazın dönme açılarının hesaplanması veya konumu hakkında yorumda bulunması çok zordur. Bunun için, bu iki sistemin birlikte kullanılması gerekmektedir. Bu yüzden de AÖB kullanılır. AÖB biriminin bir diğer özelliği ise ivmeölçer ve jiroskoptan gelen başlangıç hataları, kayma hataları ve ayarlama hataları gibi hataları düzelterek kullanıma sunmasıdır. Bir quadrotor için AÖB alınırken de 6-eksen (3-eksen ivmelenme ve 3-eksen hızlanma) bilgisinin olduğuna dikkat edilmelidir.

Quadrotorların kullanımı sırasında manyetometre de kullanılmaktadır. Manyetometre, AÖB'nin bir alt parçası olmadığı halde, kolaylık sağlanması açısından AÖB ile aynı set üzerine entegre edilmeye başlanmıştır. Manyetometreler, dünya üzerindeki akı hatlarından yararlanarak yön bulurlar. Bu hatlar dünya üzerindeki konumuna göre farklı frekanslarda titreşir. Bu titreşime göre de manyetometreler kuzeye göre yön bulabilirler.

3.7 Haberleşme Sistemi

Haberleşme sistemi, İHA'larda iki ana başlık altında incelenmektedir. Bunlardan birisi, İHA'ya veri gönderilmesi ile ilgili iken, diğeri İHA'dan haber alınması ile ilgilidir.

Haberleşme sisteminin oluşturulmasının ilk aşaması, İHA ile hangi koşullarda haberleşme sağlanacağı konusunda karar verilmesidir. Tasarıma göre İHA'ların uçuş süresince kullanıcıya veri göndermesi ya da uçuş bitince, uçuş boyunca sakladığı verileri kullanıcıya iletmesi seçilebilir. Benzer şekilde, uçuş öncesinde istenen görevlerin İHA'ya yüklenmesi sonucunda, uçuş süresince İHA'ya müdahale edilmeden uçuşun tamamlanması beklenebilir ya da uçuş anında istenen zamanda kullanıcının İHA'ya komut göndermesi sağlanabilir.

Quadrotorlar bu yapılara uygun tasarımlara sahiptir; fakat büyük ölçekte tasarlanmadıkları için genellikle kullanıcı tarafından idare edilirler. İstenildiği takdirde uçuş süresi boyunca yer kontrol istasyonuna veri gönderimini sağlayan yapılara sahiptirler.

Çoğunlukla, quadrotorlarda radyo sinyalleri kullanılarak uzaktan kontrol sağlanır. Bu sisteme Radyo Kontrollü³² (RC) sistem denir. Bir alıcı ve vericiden oluşur. Alıcı cihaz üzerinde bulunurken, verici olarak da kumanda kullanılır. RC kumandalar, ticari olarak rahatlıkla bulunabilir. Bir başka özellikleri ise, RC kumandaların çok geniş bir fiyat aralığında bulunabilmesidir.

RC kumanda seçilirken, kaç kanallı olduğuna dikkat edilmelidir. Genellikle dört kanallı kumandalar (Yunuslama, yuvarlanma ve sapma hareketi ile birlikte itki de bir kanal ile alıcıya iletilir.) kullanılsa da fazladan istenen özellikler için kanal sayısı arttırılmış kumandalar kullanılmalıdır. Piyasada ticari olarak altı kanallı kumandalar en çok tercih edilen kumandalardandır. İkinci olarak ise vericinin ne kadar mesafede alıcı ile haberleştiği önemli bir seçim parametresidir. RC kumandanın menzili, kullanılacak olan İHA'nın ne kadar uzağa gitmesi isteniyorsa, ona göre seçilmelidir.

RC kumandalar yanında, quadrotorların yerdeki kontrol ünitesi ya da başka quadrotorlarla haberleşmesini sağlamak için modüller kullanılmaktadır. Bu modüller, quadrotorun çalışması için zaruri olmasa da görüş alanından çıkan bir quadrotor için kullanıcıya çok faydası

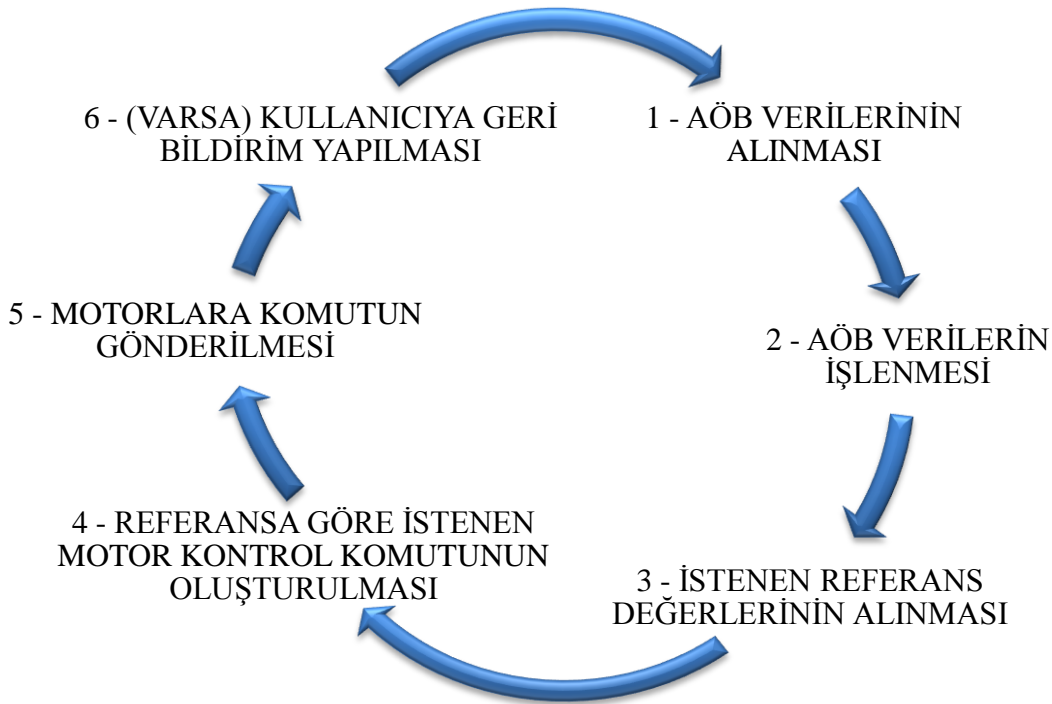
³² İng. Radio Control System

dokunabilir. Aracın yönü, açısız hızı, açısız ivmesi, pozisyonu ve bataryanın kalan enerjisi gibi birçok farklı bilgi kullanıcıya sunulabilir.

3.8 Uçuş Kontrol Sistemi (UKS)

Quadrotorun havada durmasındaki en önemli etken uçuş kontrol sistemidir. Bu sistem için “İHA'nın beyni” ifadesi kullanılabilir. Bir quadrotor uçuş kontrol sistemi olmadan havada çok zor kontrol edilir. Cihazı dengede tutan ve düzgün bir şekilde yönlendirilmesini sağlayan sisteme uçuş kontrol sistemi denir.

Bir quadrotorun sahip olduğu uçuş kontrol sisteminin yaptığı işlemler genel olarak Şekil 3.2'de görülmektedir.



Şekil 3.2. Uçuş Kontrol Sistemi Görevleri

Şekil 3.2 incelendiği zaman, quadrotorun sürekli aynı döngüde çalıştığı ve bu döngü sayesinde sistemin istenen şekilde kullanılabilirdiği görülmektedir.

Şekil 3.2'de UKS'nin ilk görevi AÖB'den verilerin alınması olduğu görülmektedir. AÖB'nin ürettiği veriler, UKS'ye çeşitli haberleşme kanalları aracılığı ile iletilir. Bunlar UART, SPI,

RS-232, I2C, CAN gibi protokoller ile haberleşen yapılara sahip olabilir ya da analog olarak veriyi iletebilir. Her türlü durumda UKS'nin işlenecek veriyi AÖB'den alması gerekmektedir.

İkinci olarak ise bu verilerin işlenmesi gerekmektedir. AÖB'nin ürettiği veriler, genelde ham olarak sunulmaktadır ve içerisinde eksen açılarını bulundurmamaktadır. Ayrıca, ölçüm olarak alınan veri hassasiyetindeki gürültü yüzünden hesap olarak bazı hatalar oluşabilir. Ölçülen sinyalin gürültüden ayrıştırılması için de ayrı bir çalışma yapılmalıdır.

Üçüncü olarak, kumandadan veya kod yığınınından bir sonraki referans değerinin alınması gerekir. Cihazın referans olarak bir sonraki geçiş noktasını alması ya da takla atması gibi görevleri de alması mümkündür. Bu durumda farklı kod gruplarının çalıştırılması sağlanır. RC kumandadan gelen referanslar 1000 ile 2000 (50 Hz frekans = 2000 μ s periyot) mikro saniye arasında olur. Bunun sebebi PWM ile çalışan ESC'lerin çalışma aralığının bu değerlerde olmasıdır. Eğer UKS kullanılmazsa, RC kumandadan gelen komutlar ESC'lere, oradan da motorlara aktarılabilir. Bu yapı, hobi için kullanılan uçaklara daha uygundur.

Dördüncü olarak ise referans değerine göre sistemi dengede tutacak komutların oluşturulması gerekmektedir. Çeşitli kontrol sistemleri uygulamaları ile quadrotorun istenen hareketi yapmasını sağlayacak veri bu kısımda üretilir.

Beşinci olarak da, UKS'nin ürettiği bu komut dizisi, quadrotordaki dört farklı motora iletilmelidir. Her bir motor için farklı bir veri dizisi üretilmeli ve her seferinde sadece o komutu uygulayacak motor ile haberleşilmelidir.

Son olarak, bağlanan bir haberleşme seti ile bu süreç içerisinde yaşanan olayları anlatan veriler kullanıcıya gönderilebilir ya da geçici olarak bir hafızada tutulabilir. Bu işlem, fazladan yapılan bir işlemdir ve kullanıcının bu uygulamayı yapması zorunlu değildir.

UKS için kullanılan sistemler, genellikle mikroişlemci, mikrodeneteleyici çeperinde sistemlerdir. Örneğin, bir quadrotor Atmega, ARM, Cortex mikrodenetleyicisi ile ya da bir FPGA ile ya da bunlara benzer herhangi bir mimari ile yönetilebilir. Bunun için önemli olan programlayıcının bu mimariyi kodlayacak programlama dilini bilmesi gerekmektedir. Bunun yanında, işlemcinin ne kadar hızda veri işlediği de önemlidir. Çoğu işlemci 8MHz ile 100 MHz arasında veri işlerken, ARM tabanlı işlemcilerde bu değer 1 GHz üzerine çıkabilir.

4. DONANIMSAL TASARIM

Quadrotorun çalışması için gerekli tasarım dizaynı kullanıcı tarafından belirlenir. Kullanış amacına göre farklı tasarım parametreleri söz konusudur. Quadrotorların üniversite çalışmaları için kullanılanları, olabildiğince faydalı yük taşıyacak şekilde ve birden çok işlevi üstelenmek üzere tasarlanmaya çalışılır.

Araştırma süresi boyunca iki ana quadrotor sistemi üzerinde durulmuştur. Bunlar için seçilen malzemeler ve bu malzemelerin seçim nedenleri aşağıda belirtilmiştir.

4.1 Gövde

Gövde için özellikle bir tasarım yapılmamıştır. Daha önce elde edilen tecrübelerden yola çıkılarak gövdenin X yapısında olmasının uygun olacağı kanaatine varılmıştır. Bu gövdenin taşıma kapasitesi az olsa da moment olarak yunuslama ve yuvarlanma açılarında kontrol edilmesi daha kolay olmaktadır.

İlk olarak 666 milimetrelik gövde tercih edilmiştir [38]. Alüminyum ve cam elyafı ile tasarlanmış bu yapının, ilk kontrol tasarımları için dayanıklı olacağı düşünülmüştür. İkinci olarak 498 milimetrelik daha küçük ve tamamen cam elyafından bir gövde tercih edilmiştir [39]. Bunun sebebi, yeni ve daha dayanıklı bir gövdeye ihtiyaç olacağı öngörüsündendir. En son olarak ise köpük gövde tercih edilmiştir. [40]. Köpük gövdenin esas tercih sebebi içeride yapılacak olan çalışmalarda daha güvenli bir test ortamı sağlıyor olmasıdır. İlk iki gövdeyle elde edilen sonuçlar bu çalışmada incelenmiştir.

4.2 Motorlar

Motor olarak elektrik motorlarından fırçasız motorlar tercih edilmiştir. Sistemin benzin motorunu ve yakıtını taşıyacak kadar ağır olmaması amaçlanmıştır. Fırçasız motorlar Bölüm 3.2’de verilen sebeplerden dolayı düşük verimle çalışmalarından ötürü tercih edilmemiştir.

Tercih edilen motorların fırçasız DC motor olmalarından dolayı, bu motorları çalıştıracak özellikler Bölüm 4.5’te anlatılacaktır. Sistem maliyetini en aza indirmek amacıyla

kullanılan motorlar ve motor kontrol devrelerinden en kaliteli ve en yüksek verimde çalışanlar tercih edilmiştir.

Buna göre iki gövde için iki ayrı çeşit ana motor seçilmiştir. Bunlar sırasıyla Turnigy D3536/9 [41] ve Turnigy Aerodrive SK3 [42] olarak belirlenmiştir. Her iki motor da fırçasız DC motordur ve altlarında dört adet monte deliği bulunmaktadır.

Bu motorların uygulayabildikleri itki kuvvetinin 1.000 gramdan fazla olması göz önüne alınmıştır. Her bir dört motor için, toplamdaki itkinin hatalarla birlikte 4.000 gramdan daha fazla olması beklenmiştir.

Bu motorların çektikleri en fazla akım sırasıyla 25.5 ve 13 A iken, uygulayabildikleri dakikada dönüş sayıları 910 ve 1130 kV olarak belirlenmiştir. Motorların yüksek akımlarda çalıştırılmayacağı ve test çalışmaları nedeniyle de yüksek hızlara ulaşılmayacağı düşüncesi sebebiyle düşük hızda daha verimli dönen, küçük motorlar tercih edilmiştir. Bunun sonucunda daha yüksek torkla çalışabilen bir sistem tasarımı yapılmıştır.

4.3 Pervaneler

Kullanılan pervane olarak gövdelere göre sırasıyla 12x4.5'lik [43] ve 10x4.5'lik [44] pervaneler seçilmiştir. Bu pervaneler seçilirken, kullanılacak motorlarla uyumlu ve titreşim yapmayacak şekilde motorların döndürebileceği yapıda olmalarına dikkat edilmiştir. Karşılıklı iki motorun saat yönünde, diğer iki motorun saat yönünün tersinde döneceği şekilde ayarlamalar yapılmıştır.

Seçilen pervanelerin eğimlerinin fazla olmasıyla, daha yüksek değerlerde itki elde edilmesi sağlamıştır. Bu, motor seçimindeki özelliklerle birlikte düşük hızda yüksek torkla çalışan ve daha fazla itki elde edilmesini sağlayan bir karakteristik oluşturmuştur. Bu sayede yüksek dönme hızlarında motor kullanılmamış fakat düşük hızda dönen bir motora göre daha fazla verim elde edilmesi planlanmıştır.

Seçilen pervanelerin santimetre cinsinden dönüşümleri 25.4x11.43 ve 30.48x11.43 santimetredir.

4.4 Batarya

Sistemin kullanımı sırasında batarya seçiminde birden fazla batarya kullanılmıştır. Kullanılan bataryaların motorlara uygun olarak seçilmesine dikkat edilmiştir.

Batarya seçiminde, motorlar için belirtilen özelliklere göre Li-po piller kullanılmıştır. Benzinli motor yerine elektrik motorlu bir sistem kurulması ve Nikel-Kadmiyum pillerin istenen performansı sağlaması için gerekli adet sayısının fazlalığı dolayısıyla ağırlığı çok arttıracığı için, bu sonuca varılmıştır. Bu yapının yaygın olarak kullanılması da bir tercih sebebidir.

Seçilen piller, motorlara uygun olması açısından üç hücreli olarak seçilmiştir. Bu sayede 11.1 V değerinde bir enerji kaynağı elde edilmiştir.

Kullanılan bataryalardan bazıları 3700 mAh, 25C [45] 2700 mAh, 25C [46] ve 2800 mAh 25C [47] olarak seçilmiştir.

Her ne kadar az akım çeken motorlar kullanılmaya çalışılsa da pervanelerin eğiminin fazla olmasından dolayı yüksek akımı uzun süre verebilecek bataryalar seçilmiştir. Bunun mümkün olmadığı durumlarda pillerin uzun süre çalışacağı şekilde ikisinin birlikte bağlanarak kullanılması sağlanmıştır. Bu sayede, iki motorun çekebileceği en yüksek akım olan 51 A (25.5x2) değerine, en fazla 67.5 A (25x2.7) [45] ve 70 A (2.8x25) [47] verebilen iki pil ile ulaşılabildiği gibi, 52 A (13x4)'lik en yüksek akıma, 92.5A akım verebilen pillerle ulaşılabilmektedir.

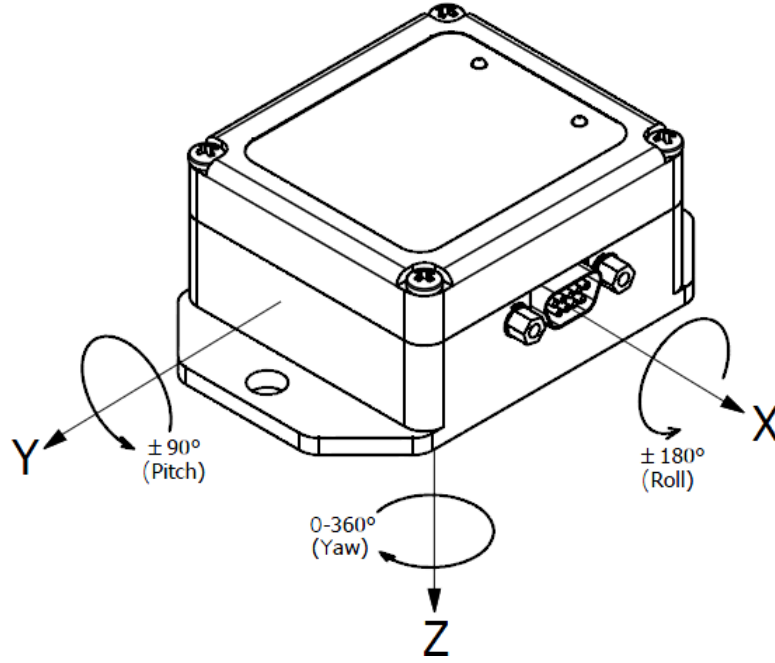
4.5 Motor Kontrol Devresi

Tasarım aşamasında Bölüm 4.2'de DC fırçasız motor kullanılması sebebiyle, kullanılacak motor kontrol devresi olarak ESC'ler seçilmiştir. Motorlar için kullanılan en yüksek akım değerlerine göre sırasıyla 30 A'lik [48] ve 25 A'lik [49] ESC'ler kullanılmıştır. Bu seçim, motorun kullanabileceği en yüksek akıma belirli bir hata miktarı (+%10 ve daha fazlası) eklemesi ile yapılmıştır.

Kullanılan ESC'ler 50 Hz değerinde güncellenen ve darbe genlik modülasyonu ile alışan ESC'lerdir.

4.6 Atalet lm için Kullanılan Sistemler

Quadrotor tasarımında kullanılan AB için Micro Strain Inertia Link 3DM-GX2 kullanılmıştır. Bu AB için yapılan teknik resim izimi Şekil 4.1'de [50] görülmektedir.



Şekil 4.1. Mirco Strain 3DM-GX2 Inertia Link Teknik izimi

Kullanılan AB aslında bir İstikamet ve Durum Referans Sistemi³³ idir. Bunun anlamı, içindeki bir işlemeci ile sistemin durum ve yönelimi kullanıcıya verilmektedir. AB'lerin ise sadece işlenmiş sensör verisi kullanıcıya gösterilir.

3DM-GX2, MEMS³⁴ algılayıcı teknolojisini kullanarak jiroskoplu oryantasyon algılayıcılarını içermektedir. İçinde 3-eksen ivme ölçer, 3-eksen jiroskop, 3-eksen manyetometre, sıcaklık algılayıcıları ve algılayıcı birleştirme algoritması içeren bir yazılımlı işlemciye sahiptir. Bu sayede 9-eksen verisi bu AB'den elde edilir.

³³ İng. Attitude Heading Reference System - AHRS

³⁴ İng. Microelectromechanical Systems

Kullanılan AÖB'nin -5g ve +5g aralığında ivmeölçer hassasiyeti ve -300°/s ve +300°/s'lik jiroskobu bulunmaktadır.

AÖB'nin bir başka özelliği ise algılayıcı sapmalarını düzeltmesidir. Sıcaklık ve diğer özellikler kullanarak (üçüncü dereceden doğrusal olmama, G-hassaslığı gibi), hatalar giderilmeye çalışılır. 1 Hz'den 250 Hz'e kadar veri gönderim hızına ve 1Hz'den 100Hz'e kadar bant genişliğine sahip AÖB'nin çıkışı olarak Euler açıları, dönüşüm matrisi, açı değişimi, hız değişimi, açısal ivme ve hız gösterilmiştir [51].

Sistemin bilgisayarla ya da sunucu ile bağlantısı sırasında RS 232, RS 422, USB 2.0 ve kablosuz 2.4 Ghz RF bağlantı seçeneklerinden biri kullanılabilir.

Kullanılan ikinci AÖB ise Ardupilot [52] üzerindeki devrelerdir. Manyometre olarak I^2C protokolü ile haberleşen HMC5883L [53] ve 3-eksen ivmelenme, 3-eksen hızlanma verisi için de I^2C veya SPI ile haberleşen MPU-600 entegresi [54] kullanılmıştır.

Bu iki entegrenin birlikte kullanılması ile sistemin 9-eksen verisi elde edilmektedir.

50 Hz'e kadar veri iletişimi sağlayan Ardupilot üzerinde $\pm 250^\circ/s$ ile $\pm 2000^\circ/s$ hassasiyetinde jiroskop ve $\pm 2g$ ile $\pm 16g$ arası hassasiyete sahip ivmeölçer bulunmaktadır.

4.7 Haberleşme Sistemi

Haberleşme sisteminin iki ayrı ana modül altında kurulması planlanmıştır. Quadrotor ile YKİ arasında iletişimi sağlayan haberleşme takımı³⁵ için [55]'de belirtilen sistemler ve radyo kontrolü ile quadrotorun kullanıcı tarafından kontrolü için Turnigy RC kumanda alıcı vericileri [56], [57], [58] kullanılmıştır.

Quadrotorun yuvarlanma, yunuslama ve sapma açıları, motorlara iletilen PWM değerleri gibi uçuş süresince elde edilen veriler, haberleşme takımıyla YKİ'ye iletilmiştir.

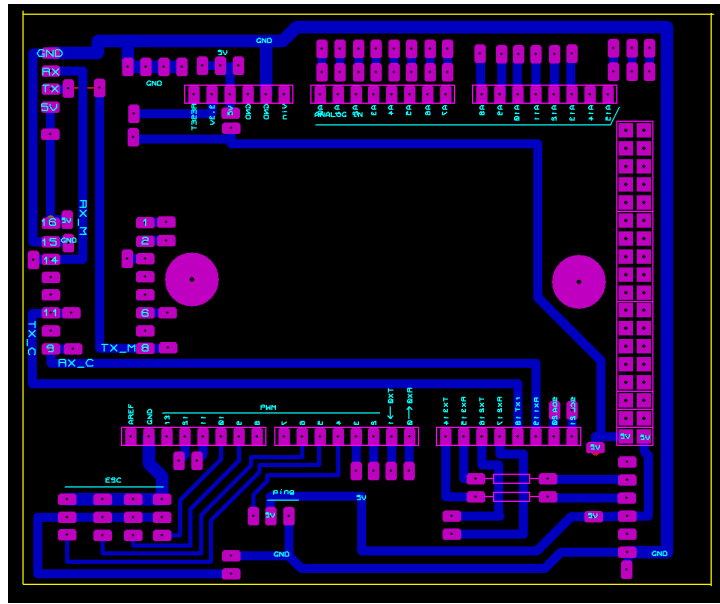
Kullanıcının gönderdiği referans değerlerine göre sistemin hareket etmesi için de RC kumanda seti kullanılmıştır. Kullanılan RC kumanda setleri en az altı kanallı seçilmiştir.

³⁵ İng. Telemetry

4.8 Uçuş Kontrol Sistemi

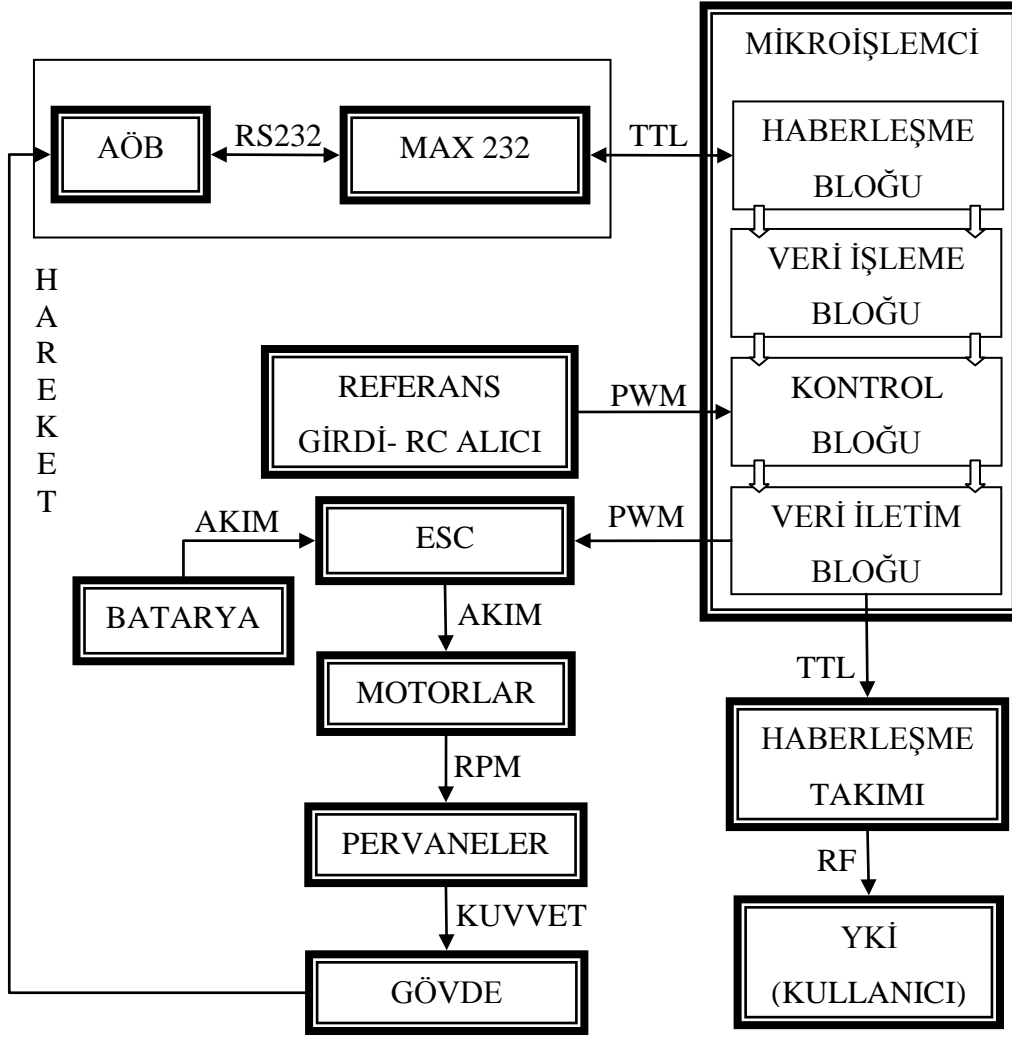
“Quadrotorun beyni” tabiri olarak kullanılan UKS için iki farklı sistem ile çalışılmıştır. Bunlardan ilki, üzerinde PIC32MX795F512L bulunan ChipKit [59] ile yapılan özgün UKS sistemi ve ikincisi, üzerinde ATMEGA2560 ve ATMEGA32U-2 taşıyan ArduPilot [52]’tur.

ChipKit ile yapılan çalışmalarda quadrotor kullanımı için hazır donanım olmadığından, baskı devre üzerine UKS kurulumu yapılmıştır. Yapılan baskı devre, Şekil 4.2’de görülmektedir. Şekil 4.2’deki devre tasarımında, AÖB, haberleşme takımı, yükseklik sensörleri, motor çıkışları ve gelecekte kullanılmak üzere çeşitli entegre bacakları dikkate alınmıştır. Ayrıca, AÖB’nin haberleşmesinde RS-232 haberleşme protokolünü TTL’e çevirmek için kullanılan MAX232 ara devre elemanı da bu tasarımda yer almaktadır.



Şekil 4.2. Baskı Devre Tasarımı

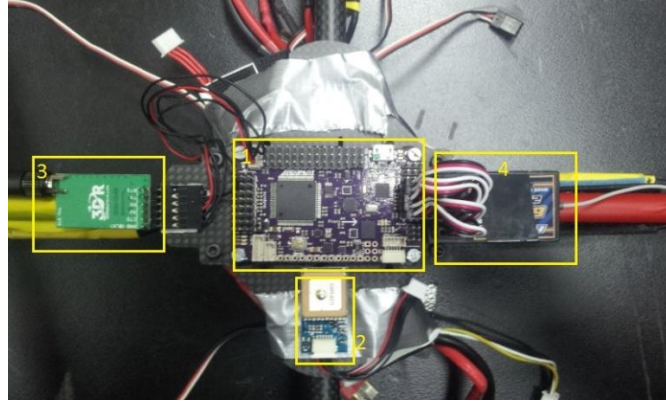
Şekil 3.2’deki algoritmanın yeni tasarlanan sistemde de çalışabilmesi için Şekil 4.3’deki genel UKS yapısı oluşturulmuştur. Sistem tasarımında kullanılan tüm donanımsal parçalar, Şekil 4.3’teki etrafı çizgili karelerle belirtilmiştir. Mikroişlemcinin içerisindeki algoritma ve bölümler, UKS’nin yazılımsal ve donanımsal tümleşik bir sistem olmasından ötürü bu kısımda sadece genel bilgi amaçlı verilmiştir. Söz konusu bölümler Bölüm 5.1’de incelenecektir.



Şekil 4.3. Genel Donanım Tasarımı

Şekil 3.2'deki AÖB'den veri alınması görevi, Şekil 4.3'de tasarlanan UKS'de RS 232 protokolü ile haberleşen Micro Strain entegresinden 9-eksen ham veri alınması ile başlar. Mikroişlemci üzerinde, Şekil 3.2'deki AÖB verilerinin işlenmesi veri işleme bloğunda gerçekleşir. Burada, ham verilerden yunuslama, yuvarlanma ve sapma açıları elde edilir ve bu açı değerleri filtrelenir. Şekil 3.2'deki istenen referans değerleri, ya RC alıcıdan ya da yazılımsal olarak ilk başta yazılıma gömülü olarak alınır. Referansa göre istenen motor kontrol komutu işlemci içerisindeki kontrol bloğu ile hesaplanır ve veri iletim bloğu ile motorlara ESC üzerinden iletilir. Kullanıcıya geri bildirim ise haberleşme takımı ile RF kullanarak YKİ'na yapılır fakat bu işlem Şekil 3.2'de de belirtildiği gibi zorunlu değildir; UKS bu kısım olmadan da çalışabilir.

Kullanılan ikinci UKS olan Ardupilot da Şekil 3.2'deki algoritmayı ve Şekil 4.3'deki tasarımı kullanmaktadır. Çalışma yapısı olarak herhangi bir fark bulunmamaktadır. Şekil 4.4'deki tasarım Ardupilot ile yapılan tasarımdır. 1 numara ile gösterilen karede Ardupilot [52], 2 numara ile gösterilen yerde GPS modülü, 3 numara ile gösterilen yerde haberleşme setinin verici-alıcısı [55] ve 4 numarada RC kumanda alıcısı [56] bulunmaktadır. Kullanılan GPS modülü, 10 Hz veri gönderim hızına sahip dahili antenli, 66 kanallı bir modüldür [60]. GPS modülü ile yapılan çalışmalar, quadrotor projesinin bir ileriki aşamasında kullanılacaktır.



Şekil 4.4. İkinci İHA Tasarımı ve Kullanılan Donanım

4.9 Donanımsal Tasarımı Tamamlanan İHA'lar

Donanımsal olarak tasarımı tamamlanan İHA'lar Şekil 4.5'de görülmektedir. Şekil 4.5(a)'daki tasarım Bölüm 6.1 ve Bölüm 6.2'deki kontrol edilen sistemler için kullanılmıştır. Bölüm 6.3'deki çalışma için ise Şekil 4.5(b)'deki quadrotor kullanılmıştır.



(a)



(b)

Şekil 4.5. Tasarımı Tamamlanan Quadrotorlar

5. YAZILIMSAL TASARIM

Yazılımsal tasarım amacı ile yapılan çalışmalar iki ana başlık altında toplanabilir. Bunlardan ilki, ChipKit ile yapılan tasarımlar ve Arducopter [61] üzerinde yapılan çalışmalardır. Ayrıca, quadrotorun verdiği kapalı çevrim sistem cevabının iyileştirmesi için kullanılan araçlar da yazılımsal tasarım altında incelenmektedir.

5.1 ChipKit ile Yapılan Çalışmalar

Yunuslama ve yuvarlanma eksenlerinde kullanılan ChipKit devresi ile sistem mimarisi ve tasarımından sonra, yazılımsal olarak geliştirme aşamasına geçilmiştir. Bu yüzden de özgün bir yazılım ile cihazın uçar hale getirilmesi planlanmıştır.

5.1.1 Ataletsel Ölçüm Biriminden Veri Okuma

Micro Strain'e ait AÖB'nin kendine özgün bir haberleşme yapısı vardır. RS 232 altyapısı ile haberleşen AÖB için kullanılan haberleşme protokolü Şekil 5.1'de görülmektedir [62].

Şekil 5.1 incelendiğinde AÖB'nin çalışması sırasında sürekli veri gönderebileceği ve gönderdiği verilerin yunuslama, yuvarlanma ve sapma açılarını içerebileceği görülmektedir. AÖB'nin içindeki işlemcide gömülü olarak kullanıcıya hazır verilen bu eksen açılarının, algoritma içerisinde bir filtreden geçirilmesi gerekmektedir. Kullanılan filtrenin güncelleme hızının çok yavaş olması ve elde edilen 3 eksen açılarının, gerçek açı değerlerine çok geç oturması, oturan bu değerlerde sürekli hal hataları oluşması gözlemlenmiştir. Bu yüzden, AÖB'den direkt olarak 3 eksen verisi alınmamıştır. İvme ölçer, jiroskop ve manyetometreden alınan ham verilerin, özgün yazılım içinde kullanılması ile 3 eksen verilerinin elde edilmesi sağlanmıştır.

AÖB içindeki gömülü yazılımın sürekli olarak kullanıcıya veri göndermesi için Şekil 5.1'deki planlama yapılmıştır. Bu seçenek kullanılmak istendiğinde, ChipKit'in veri işleme hızı ne yazık ki yeterli olmamıştır ve ChipKit'in ara belleği bu durumda taşmakta, yani en güncel verileri alamamaktadır. Okunan değerlerin eski veriler kalması durumunda da sistemin iyi çalışması beklenemez. Bu yüzden, yazılan yazılımda AÖB'nin sadece istendiğinde veri göndermesi planlanmıştır.

Command	Definition
0x02	Wireless Ping (wireless units only)
0xC1	Raw Accelerometer and Angular Rate Sensor Outputs
0xC2	Acceleration & Angular Rate
0xC3	DeltaAngle & DeltaVelocity
0xC4	Set Continuous Mode
0xC5	Orientation Matrix
0xC6	Attitude Update Matrix
0xC7	Magnetometer Vector
0xC8	Acceleration, Angular Rate & Orientation Matrix
0xC9	Write Accelerometer Bias Correction
0xCA	Write Gyro Bias Correction
0xCB	Acceleration, Angular Rate & Magnetometer Vector
0xCC	Accel, Ang Rate & Mag Vectors & Orientation Matrix
0xCD	Capture Gyro Bias
0xCE	Euler Angles
0xCF	Euler Angles and Angular Rates
0xD0	Transfer Quantity to Non-Volatile Memory
0xD1	Temperatures
0xD2	Gyro Stabilized Acceleration, Angular Rate & Magnetometer Vector
0xD3	DeltaAngle & DeltaVelocity & Magnetometer Vectors
0xE4	Write Word to EEPROM
0xE5	Read Word from EEPROM
0xE9	Read Firmware Version Number
0xFA	Stop Continuous Mode (no reply)
0xFB	Built-in-Test

Şekil 5.1. 3-GX2 Inertia Link Haberleşme Protokolü

Şekil 5.1'deki haberleşme Protokolü, işlemcinin AÖB'ye göndermesi gereken verileri içermektedir. İstenilen şekilde 3 eksen verisinin elde edilememesi ve ara belleğin taşması yüzünden her seferinde tek bir komut gönderilmesi kararı ile, AÖB'den istenilen ham verilerin alınması için onaltılık tabanda 0XCB yani 203 değeri gönderilmektedir. Bu veri her gönderildiğinde, AÖB cevap olarak 43 baytlık Şekil 5.2'deki veri kümesini gönderir [62].

Acceleration, Angular Rate & Magnetometer Vector (0xCB)

version 2.1.00 or greater

Function:	The Inertia-Link® or 3DM-GX2™ will output a data record containing the acceleration, angular rate, and magnetometer vectors. On the Inertia-Link, magnetometer values will be NaN.
Command Byte:	0xCB
Command Data:	None
Response:	43 bytes defined as follows
Byte 1	<i>Header = 0xCB</i>
Bytes 2-5	<i>Accel_x</i>
Bytes 6-9	<i>Accel_y</i>
Bytes 10-13	<i>Accel_z</i>
Bytes 14-17	<i>AngRate_x</i>
Bytes 18-21	<i>AngRate_y</i>
Bytes 22-25	<i>AngRate_z</i>
Bytes 26-29	<i>Mag_x</i>
Bytes 30-33	<i>Mag_y</i>
Bytes 34-37	<i>Mag_z</i>
Bytes 38-41	<i>Timer</i>
Bytes 42-43	<i>Checksum</i>

Şekil 5.2. AÖB'den Gelen Veriler

Şekil 4.3'deki mikroişlemci içerisindeki haberleşme bloğu AÖB ile veri iletiminden sorumlu kısımdır. Tasarımda, Şekil 5.1'deki haberleşme protokolünden uygun olan 0xCB komut verisinin AÖB'ye gönderilmesi ve Şekil 5.2'deki verilerin alınması, haberleşme bloğuna ait bir bölümdür. Haberleşme bloğunun bir diğer görevi ise, Şekil 5.2'de verilen 43 baytlık veri bloğunun parçalara ayrılmasıdır. Okunan ilk bayttan sonraki veriler alınarak, her bir bayta göre ayrıştırılır. Her bir eksen verisinin 4 bayt olmasının sebebi, bu verilerin IEEE 754 formatında olmasından kaynaklanır. Bu veriler, kayan noktalı veri tipinden kullanıcının anlayacağı yapıya çevrilir.

5.1.2 Yunuslama, yuvarlanma ve sapma açılarını elde etme

Yunuslama, yuvarlanma ve sapma açılarının elde edilmesinin, AÖB'deki işlemciden direkt olarak alınması yerine, ivmeölçer, jiroskop ve manyetometreden ham veriler alınarak elde edilmesi Bölüm 5.1.1'de anlatılmıştır.

Her bir ivmeölçer ve jiroskop için farkı yunuslama ve yuvarlanma açıları elde edilmesi mümkündür. Kullanılan MEMS'in çalışma aralığı, hassasiyeti ve ortam şartları, elde edilecek açı değerlerini değiştirecektir. Bu yüzden de, bu açıların elde edilmesinden önce farklı deneyler yapılarak, en iyi sonuçları veren formüllerle bu açıları elde edilmeye çalışılmıştır.

Yapılan çalışmalardan sonra, kullanılan AÖB'ye en uygun eksen açıları belirlenmiştir. Yunuslama açısı için kullanılan formül (5.1)'de, yuvarlanma açısı için kullanılan formül ise (5.2)'de ifade edilmiştir [23]. Burada a_x , x yönündeki açısal ivmeyi, a_y , y yönündeki açısal ivmeyi ve a_z de z yönündeki açısal ivmeyi ifade etmektedir. Kullanılan denklemler sayesinde, sistemin eğiminin de işin içine katıldığına dikkat edilmelidir [63].

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{a_x}{a_z} \right) \quad (5.1)$$

$$\phi = \frac{a_y}{a_x \sin \theta - a_z \cos \theta} \quad (5.2)$$

Elde edilen bu sonuçlar Bölüm 6.1 ve 6.2'de kullanılmıştır. Sapma açısı, bu bölümlerde kullanılmasa da doğrulama amacı ile hesaplanmıştır. Sapma açısının dikkate alındığı çalışma Bölüm 6.3'de Ardupilot donanımı üzerinden Arducopter yazılımı ile yapılmıştır.

Sapma açısının elde edilmesi için eğim kompanzasyonu³⁶ yapılmalıdır. Dünya üzerindeki manyetik alan vektörleri düz bir şekilde uzanmadığı için, bir yöne doğru eğiltiren manyetometre istenen sonucu vermeyecektir. Bu problemin çözülmesi için bilinen yuvarlanma ve yunuslama açıları ile bunların yatay bileşenlerinin kullanılması gerekmektedir. Bunun için Çizelge 5.1'deki işaretler kullanılarak (5.5)'daki formül ile hesaplanır [2]. Elde edilen ölçümlere göre de sapma açısı derece cinsinden, (5.4)'deki formül ile hesaplanmaktadır.

3 eksen verisinin içinde gürültü barındıran veriler, Bölüm 5.1.3'de gürültüden arındırılmaya çalışılmıştır. Gürültüden arındırılmış sinyaller kontrolcü üzerinde işlem yapılmıştır.

³⁶ İng. Tilt Compensation

Çizelge 5.1. Eğim Düzeltme Sembolleri

X_h, Y_h, Z_h	Eksenler üzerindeki manyetik alan bileşenleri
X_m, Y_m, Z_m	Manyetometre eksenleri üzerindeki alan bileşenleri
θ	Yunuslama açısı
ϕ	Yuvarlanma açısı

$$\begin{bmatrix} X_h \\ Y_h \\ Z_h \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta\sin\phi & -\sin\theta\cos\phi \\ 0 & \cos\phi & \sin\phi \\ \sin\theta & -\cos\theta\sin\phi & \cos\theta\cos\phi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_m \\ Y_m \\ Z_m \end{bmatrix} \quad (5.3)$$

$$\psi = \tan^{-1}\left(\frac{Y_m}{X_m}\right) + \pi \quad (5.4)$$

5.1.3 Veri filtreleme

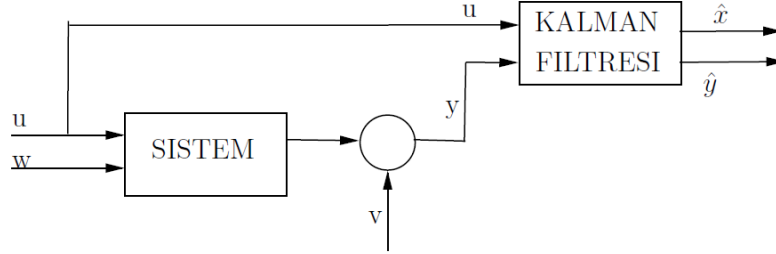
Filtre olarak, Kalman filtresi³⁷ (KF) kullanılmıştır. KF'nin bir çok sabit kanatlı sistem üzerinde en iyi sonucu veren filtre olduğu bilinmektedir. Sadece sabit kanatlı uçaklarda değil, yer taşıtlarında, deniz taşıtlarında, ekonomide, biyomedikal ve diğer bir çok alanda, sinyal filtreleme olarak KF kullanılır. KF, Rudolf Emil Kalman tarafından 1958'de ortaya atılmıştır.

KF, sistemin üzerine iki ana gürültünün etki ettiğini hesaba koymaktadır. Bunlardan bir tanesi, sistemin iç gürültüsüdür. Sistemin çalışması sırasında oluşan sıcaklık, titreşim gibi farklı sebeplerden dolayı sistemin üzerine bir gürültü bindiği hesap edilir. Ayrıca sistemde var olan bazı dinamiklerin modelde göz ardı edilmesi, sistem parametrelerinin doğru seçilememesi gibi sebepler de gerçek sistem cevabından sapmalara neden olabilir. Diğer gürültü ise, ölçüm üzerinde oluşan gürültüdür. Ölçüm aletinin hassasiyeti, ölçüm sırasında oluşacak hatalar gibi birçok sebep de ölçülmesi istenen sinyalin üzerine gürültü bindirebilmektedir.

Uygulamada KF için iki adet sinyal girişi kullanılmaktadır. Bunlardan ilki, sisteme verilen giriş sinyalidir. İkincisi de sistemden elde edilen gürültülü çıkış sinyalidir. Kalman filtresi,

³⁷ İng. Kalman Filter

çıkış olarak sistemin durumlarını ve çıkışını tahmin etmektedir. Yani KF, sisteme verdiğimiz girişe (u) ve ölçülen gürültü sistem çıkışına (y) bakarak sistemin gerçek çıkışını (\hat{y}) ve durumunu (\hat{x}) tahmin etmeye çalışır. Bu durum Şekil 5.3’de görülmektedir [64].



Şekil 5.3. Kalman Filtresi

Şekil 5.3’de görülen w ’ya işlem gürültüsü adı verilir ve sistemde meydana gelen idealden sapmaları temsil eder. v ’ye ise ölçüm gürültüsü adı verilir ve ölçümde meydana gelen idealden sapmaları temsil eder. w ve v ’nin birbirinden bağımsız, normal olasılık dağılımına sahip beyaz gürültü oldukları varsayımı yapılır [65]. Buna göre KF’de bu gürültüler sisteme (5.5) ve (5.6)’daki gibi etki eder [64]. (5.5) ve (5.6)’nın ayrık zamanlı ifadesi ise (5.7) ve (5.8)’de görülmektedir.

$$\dot{x} = Ax + Bu + Gw \quad (5.5)$$

$$y = Cx + Du + Hw + v \quad (5.6)$$

$$x[n + 1] = Ax[n] + Bx[n] + Gw[n] \quad (5.7)$$

$$y[n] = Cx[n] + Du[n] + Hw[n] + v[n] \quad (5.8)$$

KF, olası³⁸ durum tahmini yapmaktadır. Yani, her ne kadar şimdiki zaman diliminde bir durum tahmini yapıyorsa da şu anki zaman diliminin gözlemlenmiş bilgisi bu tahmin içinde yer almaz. Şu anki zaman diliminin gözlemlenen bilgisi ile sonsal tahmin birleştirilerek,

³⁸ İng. A priori

durum tahmini iyileştirilmesi yapılması sonucunda da sonsal³⁹ durum tahmini oluşturulmaktadır.

KF çalışırken iki ana aşamadan oluşur. Bunlardan ilki durum tahminidir. O anki durum ve hata kovaryansı ile bir sonraki adımın sonucu tahmin edilir. Olası durum tahmini de burada kullanılır. İkinci aşama ise güncelleme aşamasıdır. Algılayıcılardan alınan ölçümler ve sistem girişi ile durum güncellemesi yapılır ve alınan önsel tahmin ile sonuç birleştirilerek yeni bir tahmin kovaryansı oluşturulur. Sonsal durum tahmini de bu kısımda gerçekleştirilir. Kalman filtresini oluşturan denklemler Şekil 5.4’de gösterilmiştir [66], [2].

Tahmin		
Öngörülen (olası) durum tahmini	$\hat{x}_{(k+1 k)} = A_k \hat{x}_{(k k)} + B_k u_k$	(5.9)
Öngörülen (olası) kovaryans tahmini	$P_{k+1 k} = A_k P_{k k} A_k^T + Q_k$	(5.10)
Güncelleme		
Artık ⁴⁰ Ölçümü	$\tilde{y}_k = y_k - C_k \hat{x}_{k+1 k}$	(5.11)
Artık Kovaryansı	$S_k = C_k P_{k+1 k} C_k^T + R_k$	(5.12)
Optimal Kalman Kazancı	$K_k = P_{k+1 k} C_k^T S_k^{-1}$	(5.13)
Güncellenmiş (sonsal) durum tahmini	$\hat{x}_{k+1 k+1} = \hat{x}_{k+1 k} + K_k \tilde{y}_k$	(5.14)
Güncellenmiş (sonsal) kovaryans tahmini	$P_{k+1 k+1} = (I - K_k C_k) P_{k+1 k}$	(5.15)

Şekil 5.4. Kalman Filtresi Denklemleri

Şekil 5.4’deki $\hat{x}_{k|k}$ verilen “k” anında, “k” anı dahil olmak üzere gözlemlerden oluşturulan sonsal durum tahminini, $P_{k|k}$ sonsal hata kovaryans matrisini ifade etmektedir. “Q” matrisi işlem gürültüsünün kovaryans matrisi, “R” ise ölçüm gürültüsünün kovaryans matrisi olarak tanımlanır. Q ve R gürültü kovaryans matrisleri tam olarak bilindiği durumlarda, Kalman filtresinin çok iyi sonuçlar verdiği ispatlanabilmesine rağmen, gerçek değerlerde bu değerlerin bilinmesi ve hesaplanması genelde mümkün değildir. Bu yüzden bu kovaryans matrislerinin kullanıcı tarafından belirlenmesi gerekir ve sonuçlara bakıp Q ve R’nin tekrar denenmesi sayesinde birkaç iterasyonla istenilen sonuca ulaşılmaya çalışılır. Eğer giriş olarak $Q > R$

³⁹ İng. A posteriori

⁴⁰ İng. Residual

alınıyorsa modelle ilgili sıkıntıların daha baskın olduğu, $R > Q$ alınıyorsa da ölçümle ilgili sıkıntıların daha baskın olduğu anlamına gelmektedir.

KF'nin bir diğer özelliği de özyinemeli olmasıdır. Yani, hesaplamann yapıldığı ana kadar olan bilgilere ve bu bilgilerle tekrar işlem yapılmasına gerek yoktur. Daha önceki ölçümlere göre, matris değerlerinin değiştirilmesi ile istenen sonuçlar elde edilir. [67]

Filtreleme işleminin 3 eksen verisi üzerinde yapılması için (5.16)'daki ifadeler kullanılmıştır. Burada ϕ , θ ve ψ sırasıyla yunuslama, yuvarlanma ve sapma açılarını, $\dot{\phi}$, $\dot{\theta}$ ve $\dot{\psi}$ sırasıyla yunuslama, yuvarlanma ve sapma eksenlerindeki açısal hızı, b ise öngerilim⁴¹ değerini belirtmektedir. Kullanılan AÖB sebebi ile öngerilim 0 alınmıştır.

$$\begin{bmatrix} \phi_{k+1} \\ \dot{\phi}_{k+1} \\ b_{\phi(k+1)} \\ \theta_{k+1} \\ \dot{\theta}_{k+1} \\ b_{\theta(k+1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & T_s & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & T_s & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phi_k \\ \dot{\phi}_k \\ b_{\phi(k)} \\ \theta_k \\ \dot{\theta}_k \\ b_{\theta(k)} \end{bmatrix}$$

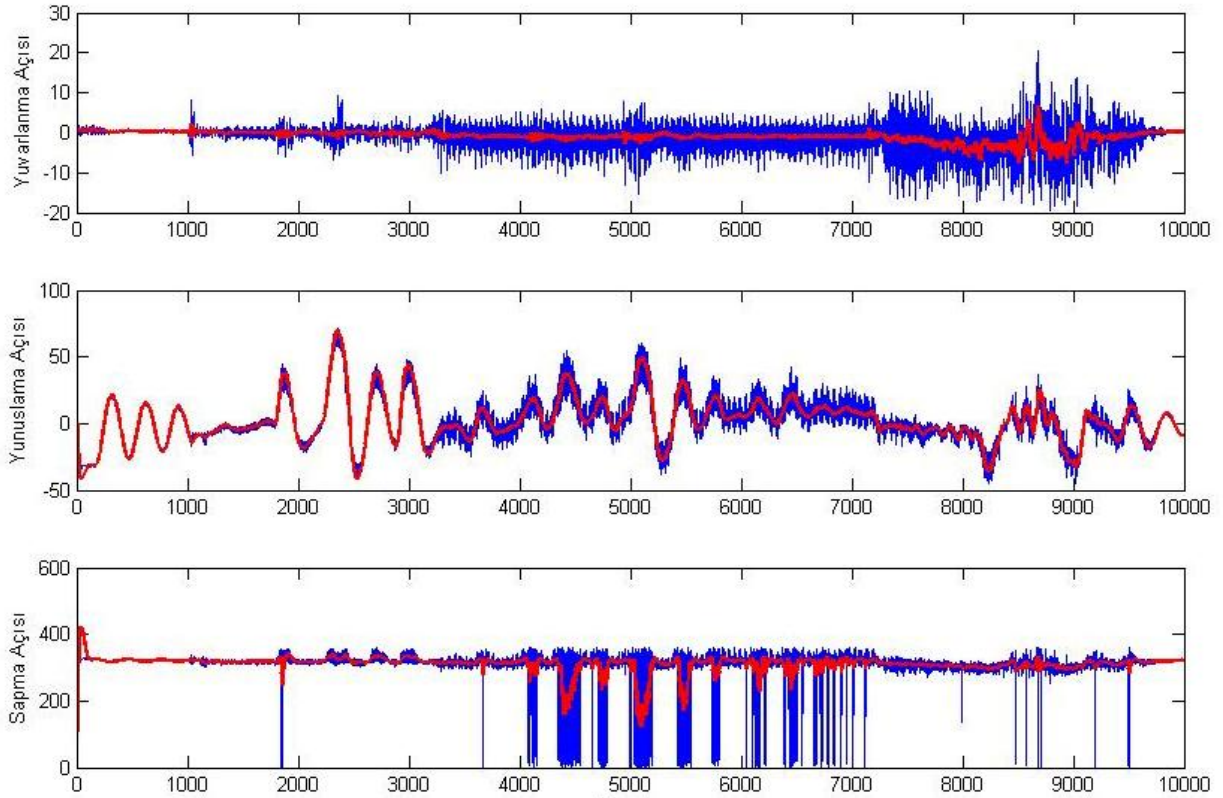
$$\begin{bmatrix} \phi \\ \dot{\phi} \\ \theta \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phi_k \\ \dot{\phi}_k \\ b_{\phi(k)} \\ \theta_k \\ \dot{\theta}_k \\ b_{\theta(k)} \end{bmatrix} \quad (5.16)$$

$$\begin{bmatrix} \psi_{k+1} \\ \dot{\psi}_{k+1} \\ b_{\psi(k+1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & T_s & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \psi_k \\ \dot{\psi}_k \\ b_{\psi(k)} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \psi \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \psi_k \\ \dot{\psi}_k \\ b_{\psi(k)} \end{bmatrix}$$

⁴¹ İng. Bias

(5.16)'daki ifadeleri kullanarak, AÖB'den yapılan ölçümlerin örnek filitrelenmiş grafiği Şekil 5.5'de görülmektedir. Mavi ile yapılan çizimler AÖB'den gelen verilere göre oluşturulan açı değerlerini, kırmızılar ise bu açı değerlerinin filitrelenmiş halini göstermektedir. Şekil 5.5 incelenirse mavi ile gösterilen gürültülü sinyalin kırmızı ile gösterilen gürültüden daha az etkilenmiş sinyale dönüşmesi fark edilebilir.

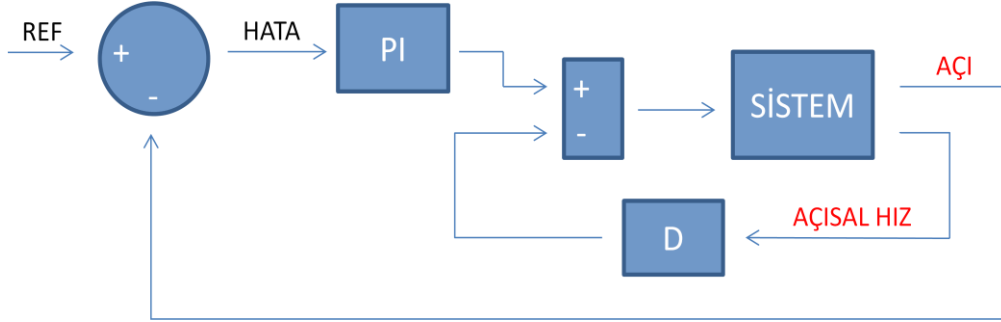


Şekil 5.5. 3 Eksen Örnek Kalman Filtresi Çıktıları

5.1.4 Kontrolcü tasarımı

Sistem kontrolü için PID kontrolcü kullanılmıştır. Dengeleme için yapılan çalışmalarda, her aşamada PID katsayısı tekrar güncellenmiştir. Yazılım aşamasında, aracın dengede durabilmesini sağlayan kontrolcü katasyılarının numerik olarak sisteme girilmesi için ayrıca bir yazılım hazırlanmış ve dışarıdan kullanıcının girdiği katsayılara göre kapalı çevrim sisteminin tekrar çalışması sağlanmıştır.

Şekil 4.3'deki donanım tasarımındaki mikroişlemci içerisindeki veri işleme bloğu, filtrelenmiş 3 eksen verisini kontrol bloğuna iletmektedir. Kontrol bloğu ise, RC alıcıdan aldığı referans girdi değerlerini kullanarak Şekil 5.6'deki kontrolcüyü çalıştırmaktadır.



Şekil 5.6. Kullanılan Kontrolcü Tasarımı

Şekil 5.6'deki kontrolcü için PID elemanları rahatlıkla görülebilmektedir. Kullanılan kontrolcü için P ve I kontrolcü elemanlarının değerleri hesaplanmaktadır. Numerik olarak daha doğru bir sonuç alınması için türev terimi hata sinyalinin numerik türevi şeklinde alınmamıştır; AÖB tarafından ölçülen açısız hız doğrudan D kontrolcü girişine verilmiştir. D teriminin başında bulunan eksi işareti ise $\frac{derr}{dt} = \frac{d}{dt}(\text{ref} - \text{err}) = -\frac{d}{dt}\text{err}$ işleminden dolayı formüle eklenmiştir.

5.1.5 Motorlarla ve YKİ ile iletişim

Şekil 5.6'deki kontrol bloğu çıkışından elde edilen sonuçlar, motorlara gönderilmeden önce, sistem içerisinde belirlenen bir gaz değerinin üzerine eklenir. Buradaki gaz değerini, RC kumandadaki gaz kolunun değeri olarak düşünmek mümkündür. PID çıkışı, bu gaz değerine eklenir ve bu şekilde ESC'lere PWM şeklinde iletilir.

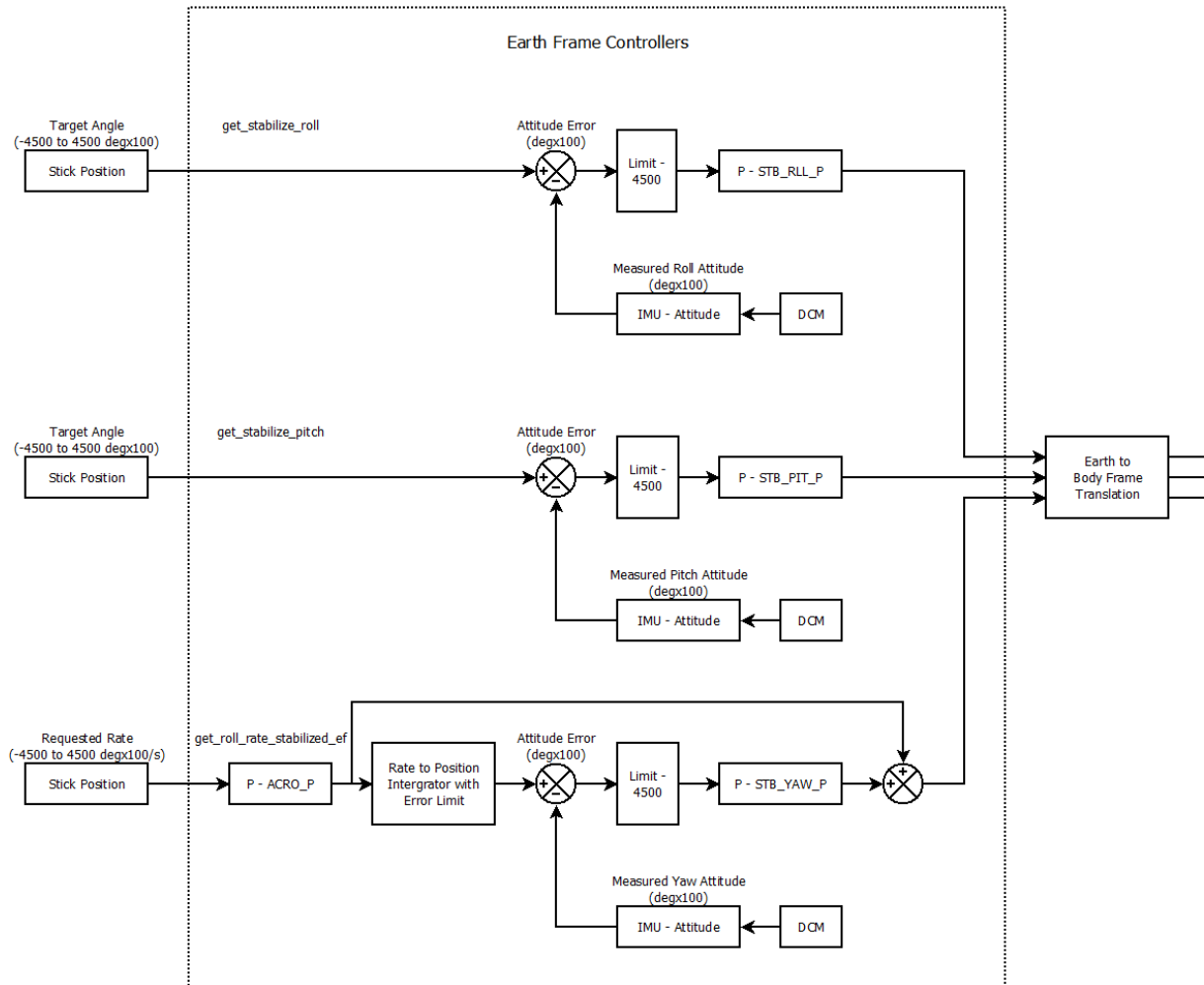
ESC'lere iletilen bu PWM'ler, bataryadan çekilecek akımı belirler ve motorun dönüşü için yeterli akım değerinin bataryadan çekilmesini sağlar. Motorların dönmesi ile birlikte, motorlara bağlı pervaneler de döner ve böylece gövdenin hareketi sağlanmış olur.

Sistemin çalışması sırasında oluşan veriler ise YKİ'ye aktarılır. Bunların arasında, yunuslama, yuvarlanma, sapma açıları, motorlara iletilen PWM değerleri, PID çıkışları, geçen süre, yazılım içindeki PID katasayıları ve her bir terimin PID çıkışına etkisi bulunmaktadır. Elde

edilen veriler TeraTerm [68] programı ile kayıt altına alınmakta ve daha sonra geliştirme için kullanılmaktadır.

5.2 Arducopter ile Çalışmalar

Arducopter, Ardupilot üzerinde çalışan ve birden fazla rotorlu VTOL araçların kontrolü için kullanılan yazılıma verilen addır [61]. Kullanılan ChipKit'de 4 adet PWM çıkışının bulunması ve bunların yeterli olmaması, ESC'lerin kullanılan program ile yeterli sıklıkla güncellenememesi ve AÖB'nin aldığı darbeler yüzünden istenen 9 eksen verisini hatalı vermesi gibi sebeplerden dolayı, çalışmalara Ardupilot donanımı üzerinde çalışan Arducopter yazılımı ile devam edilmiştir.



Şekil 5.7. Arducopter Yazılımı için Kontrolcü - İlk Bölüm

Ardupilot'ın sahip olduğu donanımsal çalışma algoritması, Şekil 4.3 ile aynı özelliklere sahiptir. Bunun yanında, sahip olduğu yazılım, Bölüm 5.1'e göre farklılık gösterir.

Bu değişiklik istenilen referans değeri, RC kumanda değerlerinin 100 ile çarpılmış değeridir. Alınan bu referans değerleri dünya eksen kontrolcüsüne⁴² girer. 100 ile çarpılmış, Doğrultu Eşdikme Matrisi⁴³'nden alınan filtrelenmiş veriler ile kontrolcü girişine uygulanacak hata belirlenir ve bu hata sadece oransal kontrolden geçirilir. Bu kontrolcü çıkışından alınan değerler, yer ekseninden gövde eksenine çevrilir. Buraya kadar anlatılan kısımlar Şekil 5.7'de görülmektedir.

Gövde eksenine çevrilen üç eksen verisi üzerine DCM kullanılarak AÖB'den elde edilen açılal hız değerleri ile gövde eksen kontrolü uygulanır. Buna göre, AÖB'den gelen veriler ile gövde ekseninden gelen veriler arasındaki farktan hata sinyali bulunur. Hata sinyalinin üzerine P ve I kontrolcüler direkt uygulamada çalışmaktayken, D türevinin elde edilmesi için 20Hz'de çalışan bir alçak geçiren filtre kullanılır. Gövde eksen üzerinde gerçekleşen gövde eksen kontrolü⁴⁴ şeması Şekil 5.8'de görülmektedir.

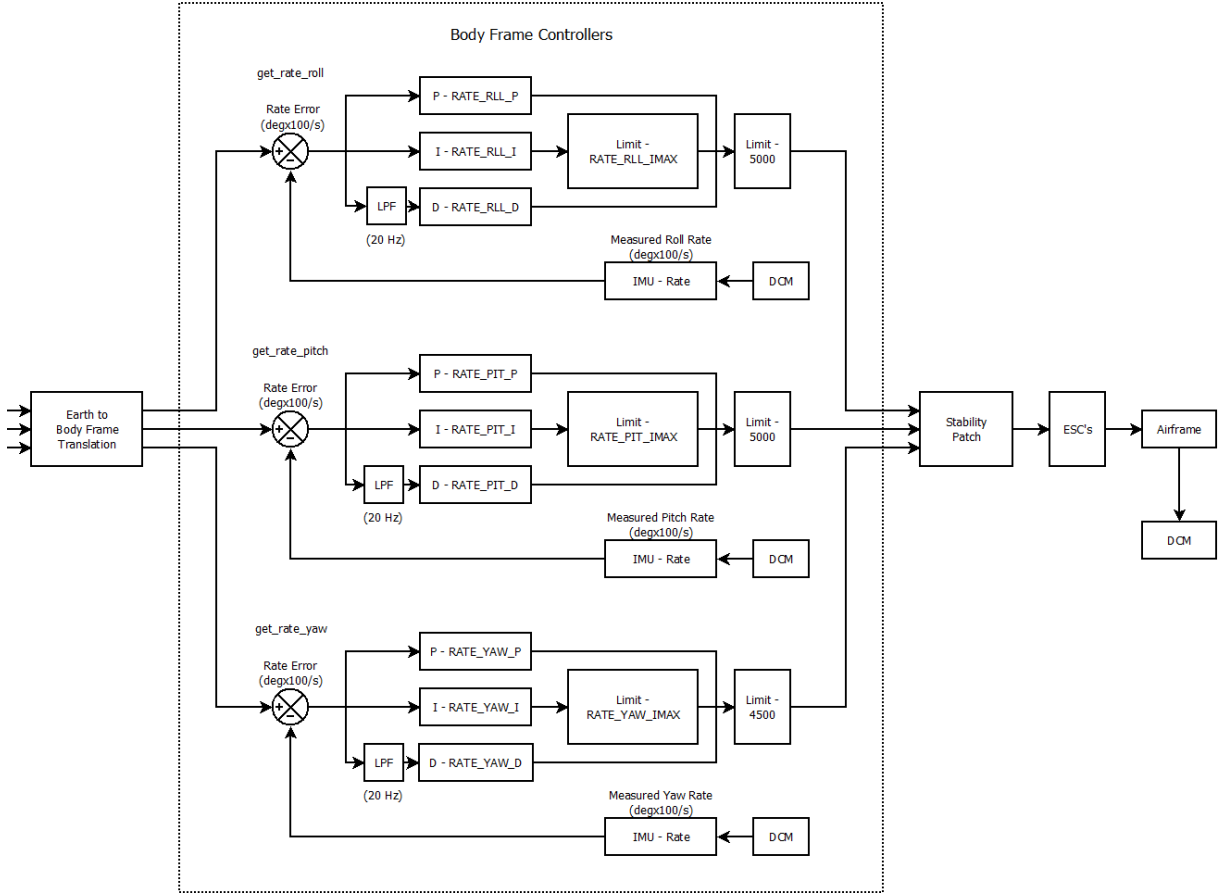
Arducopter yazılımı kendi içerisinde 100 Hz'de veri güncelleme hızına sahipken, kullanıcıya daha az ve farklı sıklıkta veri gönderir. İşlemci, yapacağı ana işleri yaptıktan sonra arta kalan zamanda kullanıcıya veri iletir. Bu yüzden de hesaplaması zor işlemlerin sonuçları fazla olduğunda, veri setinin boyutu azalabilmektedir.

Arducopter yazılımının YKİ olarak kullanıldığı bilgisayar programı olarak Mission Planner [69] seçilmiştir. Mission Planner, içerisindeki hazır yazılım sayesinde Ardupilot bağlantısını direkt yapabilmekte ve uçuş sırasındaki bilgileri kullanıcıya iletibilmektedir. Ayrıca, uçuş sırasındaki bilgiler de Mission Planner tarafından toplanır ve daha sonra kullanıcıya ulaştırılmak üzere saklanır.

⁴² İng. Earth Frame Controller

⁴³ İng. Direction Cosine Matrix - DCM

⁴⁴ İng. Body Frame Controller



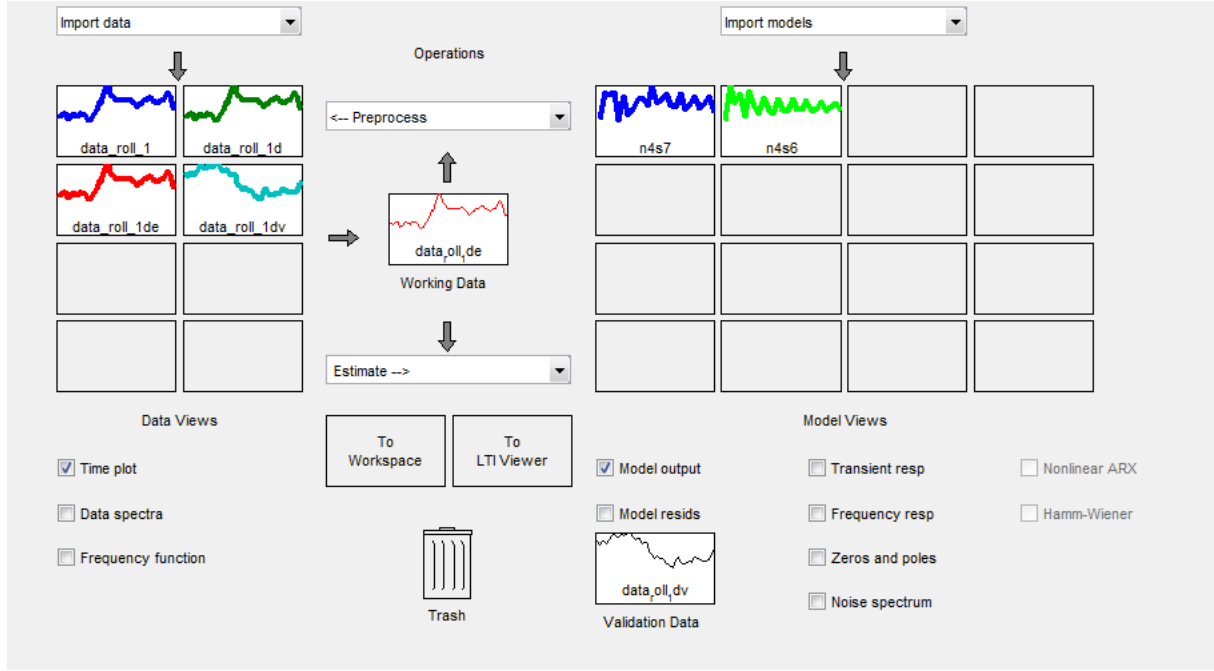
Şekil 5.8. Arducopter Yazılımı için Kontrolcü – İkinci Bölüm

5.3 MATLAB/Simulink ile Çalışmalar

MATLAB/Simulink ile yapılan çalışmalar, İHA tasarımında ciddi bir rol üstlenmiştir. Genel yapı itibari ile sistemin düzgün çalışması MATLAB ile sağlanmıştır.

3 eksen açılarının düzgün olarak bulunması için yapılan test yazılımları, bulunan açıların filtrelenmesi için yapılan test yazılımları, kapalı sistem cevabının geliştirilmesi için kullanılan verilerin aktarılması, sistem tanımlama ve yeni PID katsayılarının bulunması, görsel olarak sistem cevabının çizilmesi, Arducopter yazılımının ürettiği PID çıkışlarının bulunması gibi birçok konuda MATLAB/Simulink kullanılmıştır.

MATLAB’da kullanılan önemli araçlardan biri de Sistem Tanımlama Aracı⁴⁵’dir. Sistem tanımlama aracı bir çok uygulamada kullanılmaktadır [70]. Bölüm 6.1, 6.2 ve 6.3’de sistem tanımlama ile quadrotor için uygun kapalı çevrim sonuçlarına ulaşılmıştır. Şekil 5.9’da kullanılan sistemin MATLAB’da arayüzü gösterilmiştir.



Şekil 5.9. Sistem Tanımlama Aracı Arayüzü

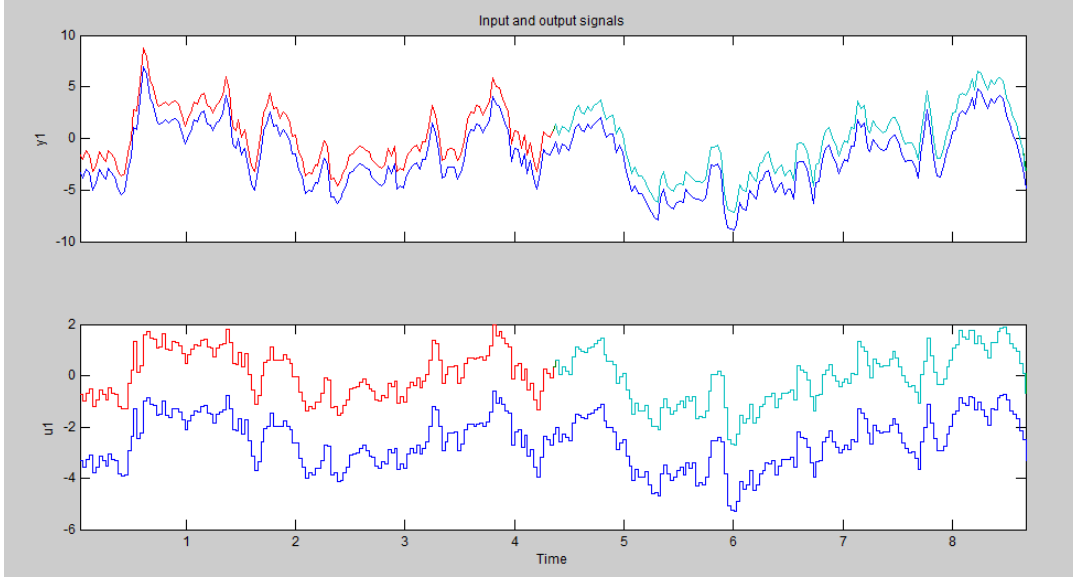
Sistem girişi olarak sol tarafta bulunan kısma sistemin giriş, çıkış ve örnekleme zamanını belirten değerlerden bir veri grubu eklenir. Amaç bu veri grubu için en uygun transfer fonksiyonunu elde etmektir.

Sistem için uygun transfer fonksiyonu oluşturulmadan önce, sistem tanımlama aracına verilen veriler çeşitli ön işlemlerden geçirilir. Öncelikle sistemin giriş ve çıkışlarının ortalaması verilerden çıkartılarak kullanılacak verilerin sıfır etrafına getirilmesi sağlanır.

İkinci olarak ise, ortalaması verilerden çıkartılmış yeni veri seti iki parçaya ayrılır. İlk parça, sistemin giriş-çıkış ilişkisinden bir transfer fonksiyonu bulur. Bulunan bu transfer fonksiyonuna ikinci parçanın giriş değerlerine verilir ve elde edilen sonuçlar ikinci parçanın çıkışı değerleri ile karşılaştırılır.

⁴⁵ İng. System Identification Toolbox

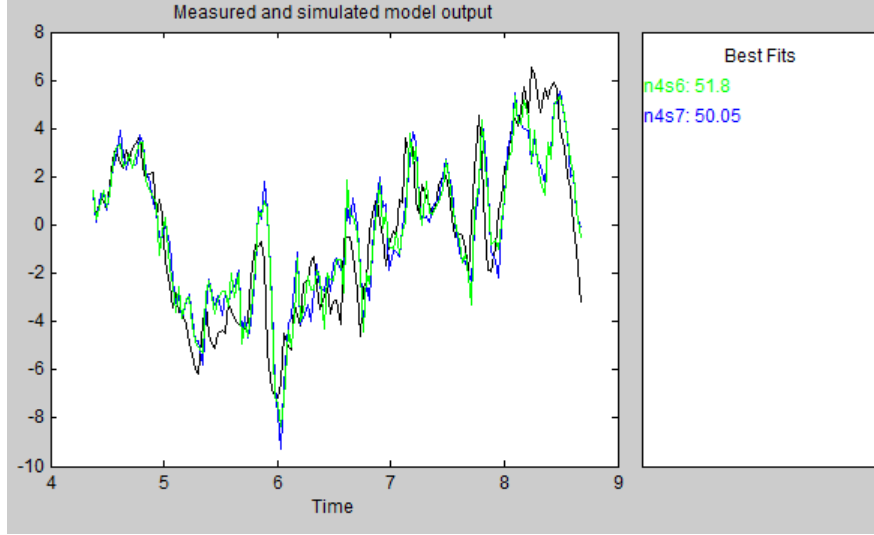
Karşılaştırılacak veriler Şekil 5.10'de görülmektedir. Buna göre, koyu mavi renkli sinyal orjinal verileri temsil etmektedir. Kırmızı renkli sinyal, transfer fonksiyonunun bulunması için kullanılacak çalışma verisidir. Açık mavi renkli sinyal ise bulunan transfer fonksiyonun üzerinde denenecek veri grubunu göstermektedir. Açık mavi ve kırmızı sinyallerin arkasında yeşil renk ile mavi sinyalin ortalamasının, bu veri grubundan çıkarılmış hali bulunmaktadır.



Şekil 5.10. Sistem Tanımlama İçin Verilerin Ayrıştırılması

Şekil 5.10'de verilen bilgiler ışığında, farklı yöntemler denenerek yeni transfer fonksiyonlarının bulunması yönünde çeşitli çalışmalar yapılır. Şekil 5.11'de elde edilen sonuçlar üzerinden bir örnek görülmektedir.

Buna göre, Şekil 5.11'un sağ tarafında belirlenen transfer fonksiyonlarının verilen veri setine ne kadar uygun olduğu gösterilmektedir. Grafik üzerinde gösterilen siyah renkli sinyal doğrulama verisini göstermektedir. Şekil 5.11'un 4-9 saniye arasındaki cevapları kullanıcıya sunmasının sebebi, Şekil 5.10'deki açık mavi ile gösterilen ikinci veri parçası ile karşılaştırılmasıdır. Bölüm 6.1, 6.2 ve 6.3'de elde edilen sonuçların da bu şekilde olması, bölünen ikinci doğrulama veri grubu ile işlem yapıldığını göstermektedir.



Şekil 5.11. Uygun Transfer Fonksiyonunun Bulunması

Elde edilen sonuçlar için sadece transfer fonksiyonun çıkışına bakmak bazen yeterli olmayabilir. Bu tür durumlarda model artığı⁴⁶ gibi sonuçlar da incelenmelidir. Bu durumda model çıkışı ile doğrulama veri setinin arasındaki fark incelenir.

⁴⁶ İng. Model Residuals

6. İHA KONTROLÜ

İHA'nın kontrolü için yapılan çalışmalar üç aşamaya ayrılmıştır. Sistemin her bir ekseninde ayrı özellikleri olduğu için aşamalı olarak eksen kontrolü ile ilerlemeli olarak sistemin dengede kalmasına çalışılmıştır. Sistem öncelikle yuvarlanma ekseninde, sonrasında yuvarlanma ve yunuslama ekseninde ve en son olarak yuvarlanma, yunuslama ve sapma ekseninde aşamalı olarak kontrol edilmiştir. Kontrol için sadece PID kontrolcü kullanılmıştır.

Kontrolcülerin tasarımı sırasında dört adet aşamadan geçilmiştir. Bunlar Çizelge 6.1'de görülmektedir.

Çizelge 6.1. Sistem Kontrolü için Kullanılan Basamaklar

1) Deneysel olarak PID katsayılarının bulunması
2) Veri toplanması
3) Sistem tanımlama
4) Katsayıların numerik arama ile ayarlanarak kontrolcünün tekrar tasarlanması

Sistem dengede tutulurken, her eksen için bu aşamalar tekrardan yapılmıştır.

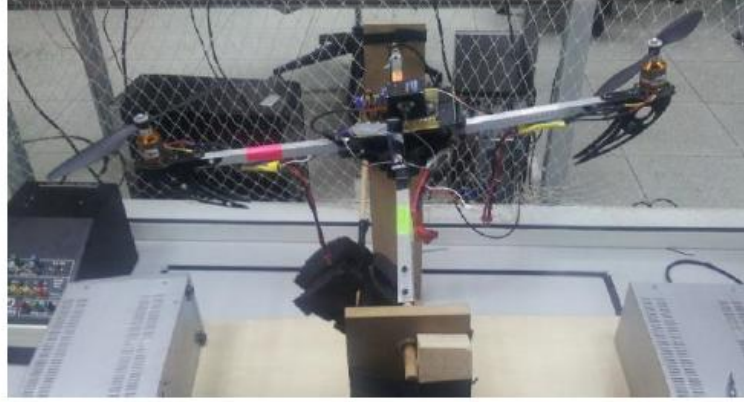
6.1 Yuvarlanma Ekseninin Kontrolü

Yuvarlanma ekseninde yapılan çalışmalar Şekil 6.1'da gösterilen test platformunda gerçekleştirilmiştir.

Sistemin bu şekilde sabitlenmesinin sebebi, daha önce de belirtildiği gibi, öncelikle tek eksen üzerinde sistem kontrolünün gerçekleştirilecek olmasıdır.

Deneysel olarak PID katsayılarının bulunması için öncelikle hüristik yöntemler kullanılmıştır. Sistemin yatay ekseninde salınım yapana kadar P katsayısı arttırılmıştır. Daha sonra D terimi eklenerek salınımların azalması sağlanmıştır ve son olarak sürekli hal hatasını yok etmek için

I terimi eklemiştir. Bu prosedür sonucu elde edilen katsayılar $K_p = 0.5, K_i = 0.001$ ve $K_d = 0.45$ olarak bulunmuştur. Bu şekilde Çizelge 6.1'deki ilk aşama tamamlanmıştır.



Şekil 6.1. Yuvarlanma Ekseni için Hazırlanan Deneysel Quadrotor Test Platformu

Bu katsayılarla elde edilen kapalı çevrim, sistemi yuvarlanma ekseninde dengede tutabilmişse de sistem cevabı istenenden çok daha yavaş ve agresif tepki vermiştir. Bu sorunu düzeltmek amacıyla Çizelge 6.1'deki ikinci aşama kullanılmıştır.

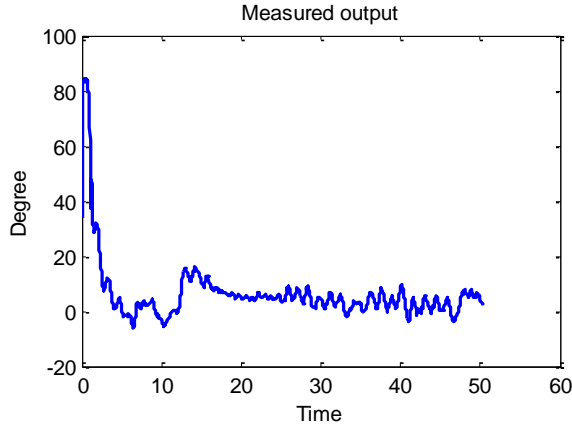
PID katsayılarla elde edilen sistem üzerinden deneysel veri kullanarak çalışma noktası $\phi \approx 0$ etrafında bir sistem tanımlama yapılarak doğrusal model bulunmaya çalışılmıştır. Sistem girişi olarak pervaneleri döndüren motorların ayarını yapan darbe genlik modülasyon (PWM) değerleri seçilmiştir. Bu değerlerin, sistem tanımlama için sıfır etrafında kaydırılmış değerleri kullanılmıştır. Sistem çıkışı olarak ise yuvarlanma açısı ϕ seçilmiştir. Bu şekilde verilerin toplanması ile Çizelge 6.1'deki ikinci aşama da tamamlanmıştır.

MATLAB kullanılarak, çeşitli numerik sistem tanıma teknikleri bu değerlere uygulanmış ve sonuç olarak bir alt uzay üzerinde en iyi sonuçlara ulaşılmıştır (N4SID) [70]. Bu modelin ayrık zamanlı transfer fonksiyonu (6.1)'de verilmiştir.

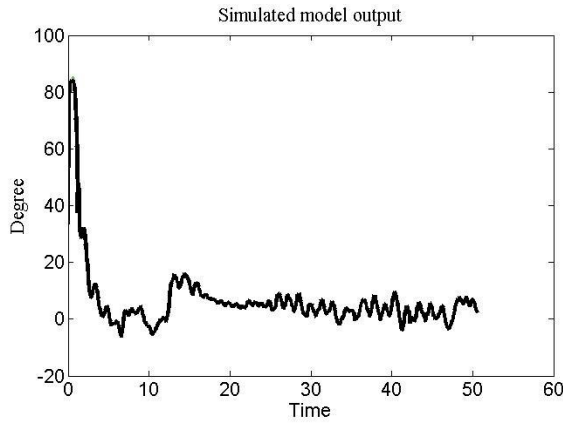
$$G(z) = \frac{0.02526z^{-1} - 0.02892z^{-2} - 0.01516z^{-3} + 0.01881z^{-4}}{1 - 3.415z^{-1} + 4.299z^{-2} - 2.352z^{-3} + 0.4682z^{-4}} \quad (6.1)$$

(6.1)'de verilen fonksiyonun örnekleme periyodu olarak $T_s = 0.025$ saniye seçilmiştir. Bu değer, bizim yazılımsal/donanımsal uygulamamızda var olan değerdir. Sistemin ölçülen

deneysel değeri ile model benzetiminden elde edilen sonuçlar Şekil 6.2’de görölmektedir [71]. Şekil 6.2(a)’da model üzerinde ölçümü yapılan sonuçlar, Şekil 6.2(b)’de ise benzetim sonucu elde edilen veriler sunulmuştur. Benzetim ve uygulama sonuçları arasında %90’ın üzerinde benzerlik çıkmıştır. Çizelge 6.1’deki üçüncü aşama da bu şekilde tamamlanmıştır.



(a)



(b)

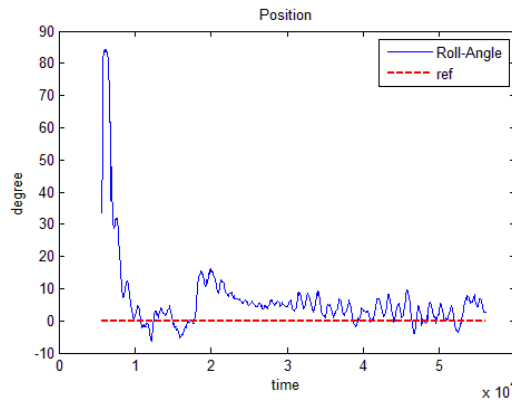
Şekil 6.2. Yuvarlanma Açısı için Ölçüm ve Benzetim Sonuçları

Çizelge 6.1’in son aşamasında ise sistemin PID katsayılarının tekrar bulunması ve bu sayede kapalı çevrim sisteminin performansının iyileştirilmesi vardır. Bu amaçla MATLAB’da numerik bir hesaplama programı hazırlanmıştır. Bu programla, numerik katsayıların %5’lik komşuluğu altında, ölçülen değerlere yakın oturma zamanını kısaltmaya çalışan bir cevap bulunmaya çalışılmıştır. Bunun sonucunda ise $K_p = 0.5259$, $K_i = 0.081$ and $K_d = 0.53$ olan katsayı değerleri elde edilmiştir. Bu katsayılarla oluşturulan ayrık zamanlı PID kontrolcünün ifadesi (6.2)’de açıklanmıştır.

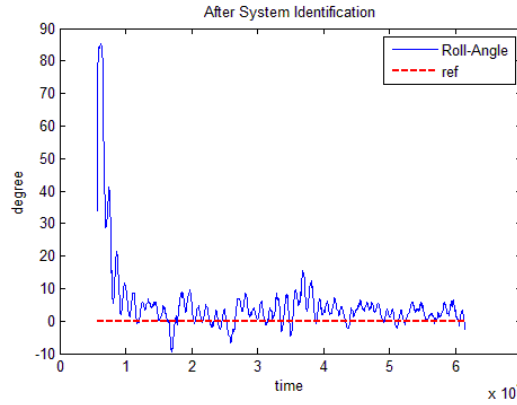
$$C(z) = K_p + K_i \frac{1+z^{-1}}{1-z^{-1}} \frac{T_s}{2} + K_d \frac{1-z^{-1}}{T_s} \quad (6.2)$$

(6.2)'de verilen ifade için ayrık zamanlı türev elemanı $y(k) = \frac{u(k)-u(k-1)}{T_s}$ ve integral elemanı $y(k) = y(k-1) + \frac{u(k)+u(k-1)}{2} T_s$ şeklinde yaklaşık olarak hesaplanmıştır.

Elde edilen yeni katsayılarla ve eski katsayılarla birlikte oluşturulan kapalı çevrim sisteminin cevabı Şekil 6.3'de görülmektedir.



(a)



(b)

Şekil 6.3. Benzetimden Önce ve Sonra Sistem Cevabı

Şekil 6.3(a)'da numerik PID katsayıları ile birlikte kapalı çevrim transfer fonksiyonunun sistem cevabı gösterilirken, Şekil 6.3(b)'de ise sistem tanımlamadan elde edilen model ile ayarlanmış PID katsayıları ile çalışan kapalı çevrim transfer fonksiyonunun cevabı verilmiştir.

Şekil 6.3 (a) ve (b)'deki karşılaştırmadan da görüleceği gibi, ayarlanmış PID katsayıları ile elde edilen kapalı çevrim transfer fonksiyonu cevabı, istenen sonucu geliştirmiştir; yunuslama açısı daha hızlı istenen referans değerine oturmakta ve sürekli haldeki salınım genlikleri daha az olmaktadır.

6.2 Yunuslama ve Yuvarlanma Eksenlerinin Kontrolü

Yunuslama ve yuvarlanma eksenlerinin kontrolü için de öncelikle Şekil 6.1'de gösterilen test platformu kullanılmıştır. Sistemin yuvarlanma eksenindeki kontrolü sonrasında yunuslama eksenini için kontrol prosedürü, yuvarlanma eksenindeki prosedür ile aynı olmuştur. Sistemin referans değeri $\theta \approx 0$ olacak şekilde hüristik yöntemlerle PID katsayısının bulunması sağlanmıştır. Sistem öncelikle çalışma noktası etrafında salınım yapacak bir P değeri bulunana kadar çalıştırılmış, salınımın fazla olması D katsayısı ile azaltılmış ve en son I katsayısı ile sistemin sürekli hal hatası giderilmeye çalışılmıştır.

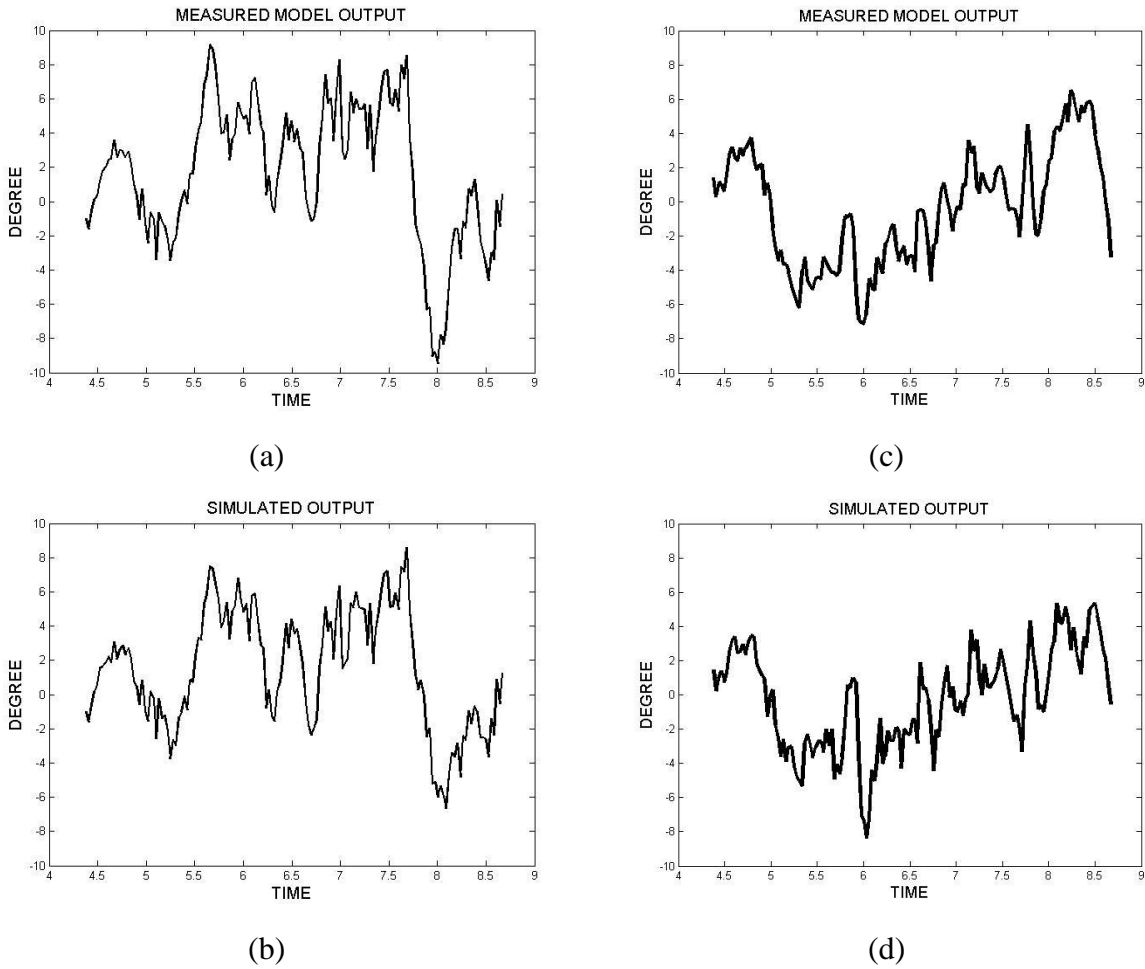
Bu işlemler takip edildiği zaman $K_p = 0.35$, $K_i = 0.01$ ve $K_d = 0.05$ olarak PID katsayıları bulunmuştur. Bu şekilde Çizelge 6.1'deki ilk aşama tamamlanmıştır. Ancak sistemin istenen referans değerinde salınımlar ve bazen de sert hareketler oluşmuştur. Bu durumu düzeltmek için Çizelge 6.1'deki ikinci saffa için yunuslama ve yuvarlanma eksen verileri toplanmıştır ve diğer aşamalar sırasıyla takip edilmiştir.

Kapalı çevrim sisteminin daha iyi cevap verebilmesi için deneysel elde edilen verilerle sistem tanımlama yapılması aşamasında, $\phi \approx 0$ ve $\theta \approx 0$ çalışma noktalarına göre bir sonuç bulunmaya çalışılmıştır. Sistem girişi olarak, yine pervanelere bağlı motorların hızını ayarlayan darbe genişlik modülasyonu değerleri alınmıştır. Sistem çıkışları olarak ise yuvarlanma açısı ϕ ve yunuslama açısı θ alınmıştır. MATLAB'da Sistem Tanımlama Aracı kullanılarak çeşitli çalışmalar yapılmış ve sonuç olarak N4SID sonucu kabul edilmiştir. Çizelge 6.1'deki sistem tanımlama aşaması için elde edilen transfer fonksiyonları (6.3) ve (6.4)'de verilmiştir.

$$H_{roll}(z) = \frac{2.881 z^5 - 2.501 z^4 - 0.1687 z^3 + 0.3733 z^2 + 1.51 z - 0.9951}{z^6 - 0.8117 z^5 - 0.006187 z^4 - 0.02259 z^3 + 0.3682 z^2 + 0.201 z - 0.298} \quad (6.3)$$

$$H_{pitch}(z) = \frac{-2.402z^6 + 1.522z^5}{z^6 - 0.6012z^5 - 0.07561z^4 - 0.01995z^3 + 0.03405z^2 + 0.04376z - 0.04997} \quad (6.4)$$

(6.3) ve (6.4)'de gösterilen denklemler elde edilirken, ayrık zamanlı sistem için $T_s = 0.029$ kullanılmıştır. Bu değer, sistem üzerinde kullanılan yazılım/donanım tarafından verilen değer ile aynıdır. Bu denklemlerin elde edilmesi sonucu oluşan sistem çıkışları ve benzetim çıkışları karşılaştırması Şekil 6.4'de yapılmıştır [23].



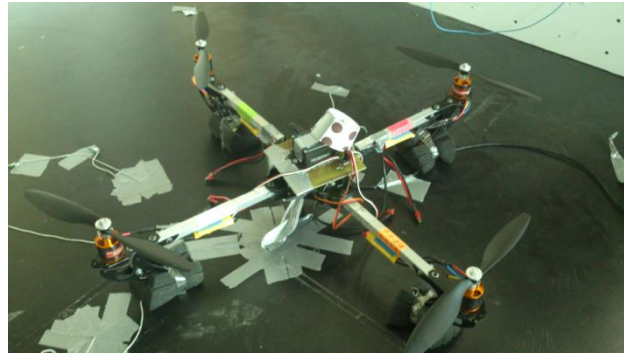
Şekil 6.4. Yuvarlanma ve Yunuslama Açılırları için Ölçüm ve Benzetim Sonuçları

Şekil 6.4(a)'da yunuslama açısının sistem kontrolü sırasında verdiği sonuçlar gözlemlenmektedir. Bu sonuçları kullanarak sistem tanımlama sonucu elde edilen (6.3)'teki

transfer fonksiyonuna aynı giriş değerleri verilince elde edilen çıkış ise Şekil 6.4(b)'de gösterilmiştir. Benzer bir yapı, yuvarlanma eksenini için Şekil 6.4(c) ve Şekil 6.4(d)'de verilmiştir. Kapalı çevrim sisteminin verdiği cevap Şekil 6.4(c)'de gösterilmişken, benzetim sonucu alınan sistem cevabı Şekil 6.4(d)'de ifade edilmiştir. Model çıkışlarında ve benzetim çıkışlarında %70'in üzerinde benzerlik bulunmuştur.

Bu sonuçları kullanarak, Çizelge 6.1'deki son işlem olan sistemin daha düzgün olarak kontrol noktalarına oturması için kontrolcünün tekrar tasarımı aşamasına geçilmiştir. MATLAB kullanılarak, numerik katsayı değerlerinin %5'lik aralığında sistem için oturma zamanını azaltan bir sonuç bulunmaya çalışılmıştır. Bunun sonucunda ise yeni katsayılar $K_p = 0.4$, $K_i = 0.03$ ve $K_d = 0.05$ olarak bulunmuştur. Bunu yaparken de (6.2)'deki PID kontrolcü kullanılmıştır. Bu kontrolcü için ayrık zamanlı türev ifadesi elemanı $y(k) = \frac{u(k)-u(k-1)}{T_s}$ ve integral elemanı $y(k) = y(k-1) + \frac{u(k)+u(k-1)}{2}T_s$ olarak kullanılmıştır.

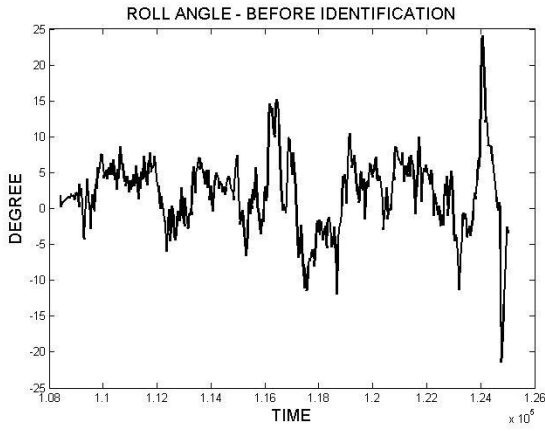
Yunuslama ve yuvarlanma eksenlerinin kontrolcülerinin yeniden kontrolünden sonra Şekil 6.5'de test düzeneği kullanılmıştır. Bu sayede sistemin yerden doğrudan kalkması sağlanmıştır. Sistem, güvenlik amacı ile beklenmedik olaylar yaşanmaması için yere ipe bağlanmıştır. Bu ipler ne kadar gevşek bırakılsa da sistemin hareketi ile etkileşim içinde olması, ileriki aşamalarda dikkate alınmıştır.



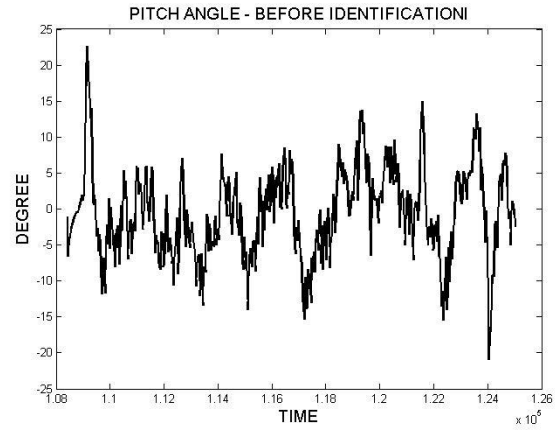
Şekil 6.5. İki Eksen Kontrolü için Hazırlanan Düzenek

Şekil 6.6'da ise sistemin Şekil 6.5'de kurulan düzeneğe göre alınan sonuçları ifade edilmiştir. Şekil 6.6(a)'da yunuslama ekseninin, sistem tanımlama ve MATLAB ile yeni katsayıların bulunmasından önceki hali, Şekil 6.6(b)'de ise bu çalışmalardan sonraki nihai hali verilmiştir.

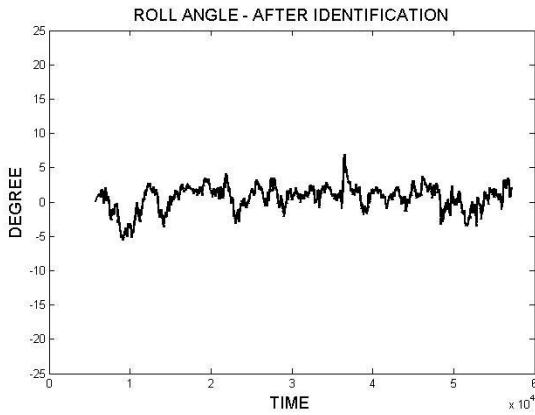
Yuvarlanma ekseninde alınan sistem tanımlama öncesi sonucu Şekil 6.6(c)'de, sonrasında alınan sonucu ise Şekil 6.6(d)'de ifade edilmiştir.



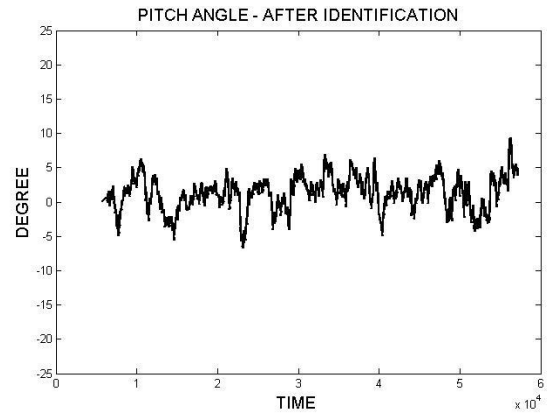
(a)



(c)



(b)



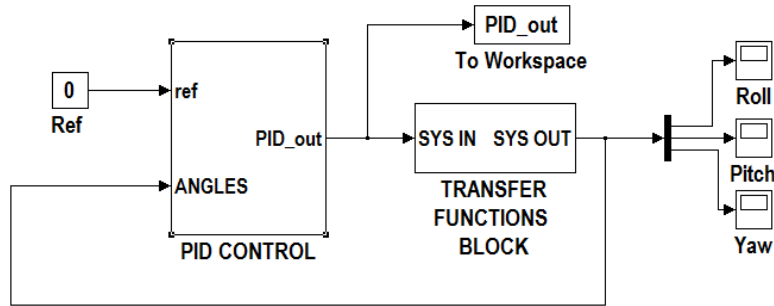
(d)

Şekil 6.6. Benzetimden Önce ve Sonra Sistem Cevabı

Şekil 6.6'daki sonuçlar incelendiğinde sistem tanımlamadan sonra ayarlanmış PID katsayılarla, numerik olarak bulunan kapalı çevrim sisteminin PID katsayıları ile verdiği sonuca göre daha iyi olduğu anlaşılmıştır. Sistemin kapalı çevrim cevabının önemli bir şekilde gelişme gösterdiği, buna bağlı olarak yuvarlanma ve yunuslama açılarında istenen referans değerine daha hızlı oturduğu, ayrıca sistemin sürekli haldeki salınımların azaldığı görülmektedir.

6.3 Yunuslama, Yuvarlanma ve Sapma Eksenlerinin Kontrolü

Üç eksen üzerindeki sistem kontrolü Ardupilot donanımı üzerinde, Arducopter yazılımı ile gerçekleştirilmiştir. Çizelge 6.1'deki tüm işlem saffaları burada da gerçekleşmiştir; fakat üç eksen açıların oluşturulmasında Arducopter yazılımı farklı bir algoritma izlediği için tek tek sistem çıkış verileri deneysel olarak alınamamıştır. Bunun üzerine, numerik olarak cihazı dengede tutan PID katsayıları ile Arducopter algoritması MATLAB'da tekrar modellenmiş ve buna göre de sistem modelleri elde edilmeye çalışılmıştır. Yunuslama eksenini için Arducopter'de bulunan yazılım benzetimi Şekil 6.7'de [72] görülmektedir.



Şekil 6.7. Yuvarlanma Ekseninin Yazılımsal Benzetimi

Şekil 6.7'de kurulan sistemin amacı, var olan sistem PID çıkışlarını, Arducopter algoritması ile çalışan bir yazılımla uçuş verileri şeklinde oluşturmaktır. Bu uçuş verileri, kapalı çevrim sistem girişi olarak kullanılarak sistem tanımlama aracında sistemin transfer fonksiyonun oluşturulması için sağlanmıştır. Sistem çıkışı olarak, ölçülen açı değerleri kullanılmışken, sistem girişi olarak Şekil 6.7'de oluşturulan sistemin ürettiği PID çıkışları alınmıştır.

Bu çalışmalar sonucu elde edilen transfer fonksiyonları (6.5), (6.6) ve (6.7)'de görülmektedir. (6.5), yuvarlanma ekseninde elde edilen transfer fonksiyonunu belirtmektedir. (6.6) yunuslama eksenindeki transfer fonksiyonunu ve son olarak da (6.7) sapma ekseninde transfer fonksiyonunu göstermektedir.

$$H_{roll}(z) = \frac{-953.2 s^5}{s^{10} + 14.78 s^9 + 121.5 s^8 + 669.7 s^7 + 3250 s^6 + 8328 s^5} \dots$$

$$\frac{+ 579.7 s^4 - 1.04e04 s^3 - 1951 s^2 - 409.5 s + 2024}{\dots + 2.148e04 s^4 + 2.614e04 s^3 + 1.994e04 s^2 + + 1.08e04 s + 962.4}$$
(6.5)

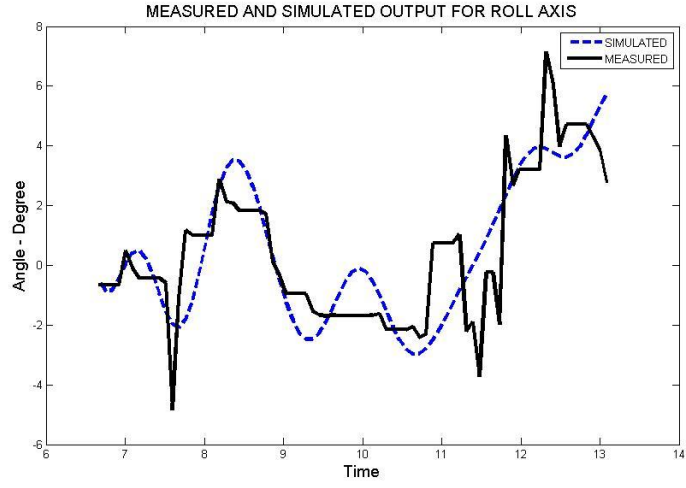
$$H_{pitch}(z) = \frac{1.599 s^4}{s^8 + 3.79 s^7 + 67.1 s^6 + 141.5 s^5 + 1198 s^4} \dots$$

$$\frac{- 3.212 s^3 + 77.97 s^2 - 17.44 s + 276.8}{\dots + 1018 s^3 + 3454 s^2 + 854.3 s + 469.2}$$
(6.6)

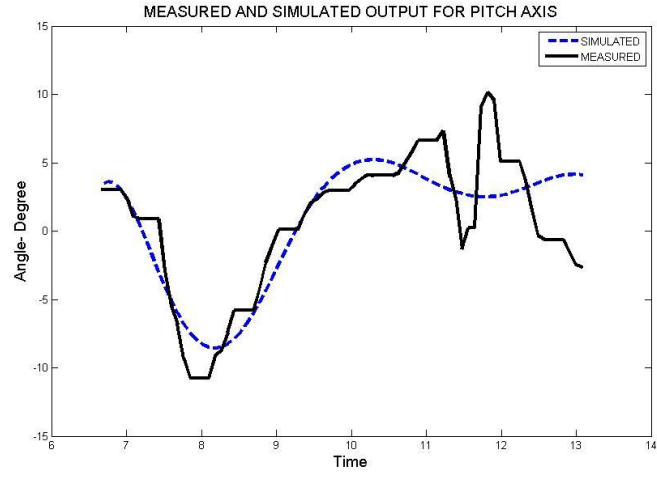
$$H_{yaw}(z) = \frac{- 5.145 s + 2.629}{s^5 + 3.165 s^4 + 7.98 s^3 + 9.194 s^2 + 7.042 s + 1.077}$$
(6.7)

(6.5), (6.6) ve (6.7)'de görülen denklemlerin sistem ile uyumları ise Şekil 6.8'de görülmektedir. Şekil 6.8(a), (6.5)'deki yuvarlanma eksenindeki çıkış değerlerini ve benzetim sonuçlarını karşılaştırmaktadır. Şekil 6.8(b), yunuslama eksenindeki gerçek verileri ve sistem tanımlama sonucunda (6.6)'daki transfer fonksiyonunun sistem girişlerine verdiği tepkiyi göstermektedir. Son olarak ise Şekil 6.8(c)'de (6.7)'de verilen giriş değerleri sonucu oluşan çıkış sonuçları ve sistemin fiziksel olarak bu girişlere verdiği tepki ifade edilmiştir.

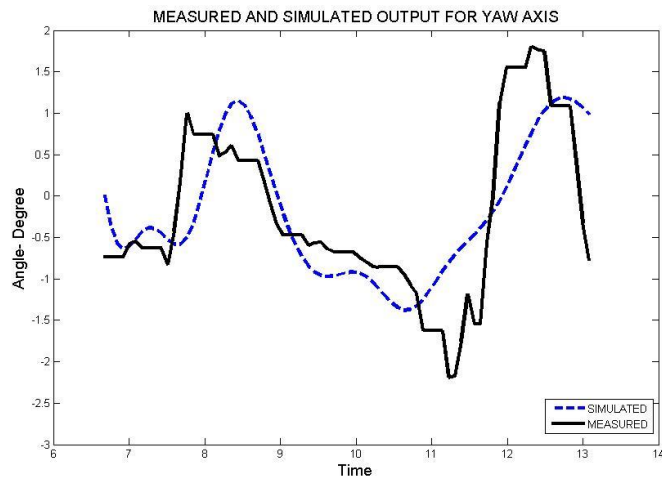
Benzetim sonuçlarına göre fiziksel sistemin çıkışları ile transfer fonksiyonunun çıkışları arasında %50'nin üzerinde benzerlik gözlemlenmiştir.



(a)



(b)

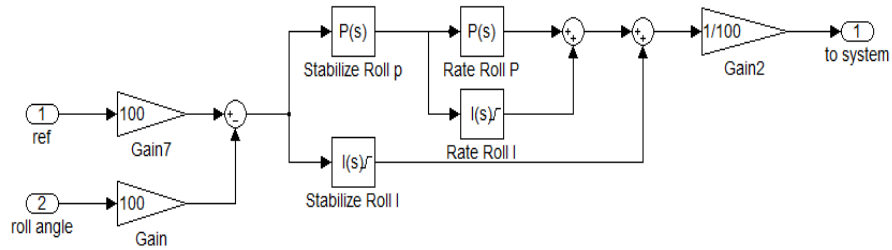


(c)

Şekil 6.8. Üç Eksen Kapalı Çevrim ve Benzetim Sonuçları

Kapalı çevrim fonksiyonunun sistem cevabının iyileştirilmesi için Arducopter yazılımının içindeki kontrolcü benzetimi, MATLAB/Simulink kullanılarak yeniden yapılmıştır.

Bu işlem için kullanılan blok digram Şekil 6.9'da görülmektedir. Sistemde kullanılan PID kontrolcünün içerisinde üç adet PI kontrolcü bulunduğu ve bunlar aynı algoritma ile yuvarlanma, yunuslama ve sapma eksenlerinde uygulandığı için tek bir eksendeki gösterim yapılmıştır.



Şekil 6.9. PID Kontrol Bloğu (Yuvarlanma Eksen)

Sistem referansı olarak yunuslama ve yuvarlanma eksenlerinde sıfır (0) derece seçilmiştir. Diğer taraftan sapma eksenini için sistemin başlangıçta sahip olduğu sapma açısı, sistemin referans değeri olarak seçilmiştir.

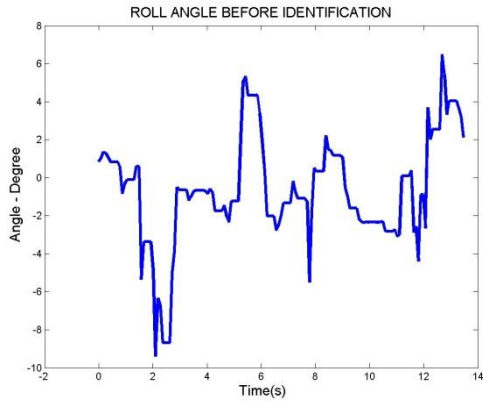
Sistem modelleri elde edildikten sonra sistemdeki kontrolcünün tekrar tasarlanması aşamasına geçilmiştir. Bu sayede sistemin daha kısa sürede istenen referans değerine oturması ve sürekli hal salınımlarının azaltılması planlanmıştır.

Yapılan çalışmalar sonucunda yunuslama ve yuvarlanma açılarında dengeleme kontrolü için $K_p = 4.00$, $K_i = 0.1418$, açısal hız kontrolü için $K_p = 4.50$, $K_i = 0.0$ ve sapma ekseninde açısal hız kontrolü için $K_p = 0.13$, $K_i = 0.015$ bulunmuştur. Bu sonuçlar bulunurken, MATLAB'daki denkleştirme tasarım aracı⁴⁷ kullanılmıştır.

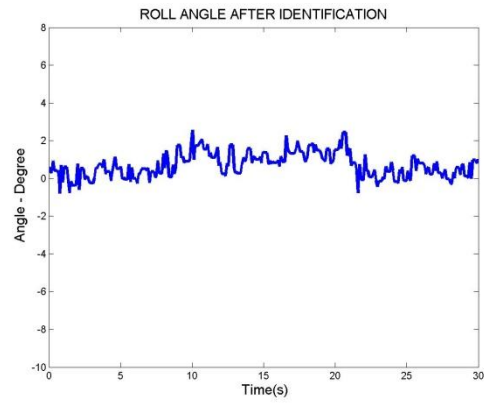
Yeni katsayılarla birlikte sistemin tepkisi ile ayarlamadan önce sistemin tepkisi Şekil 6.10'da görülmektedir. Şekil 6.10'un sol tarafında yapılan çalışmadan önce dengeleme için alınan

⁴⁷ İng. Compensator Design Tool

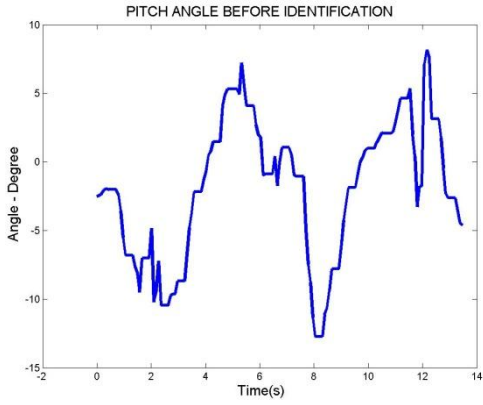
sonuçlar, sağ tarafında katsayı ayarlaması sonucu elde edilen dengeleme için alınan sonuçlar bulunmaktadır.



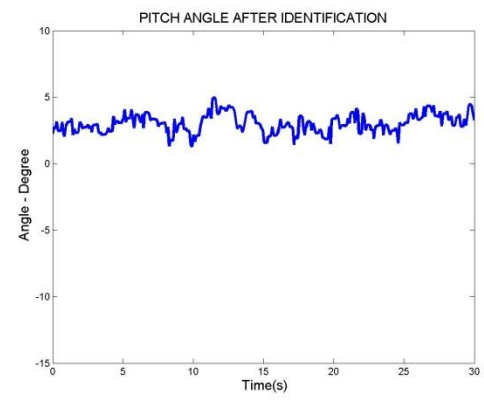
(a)



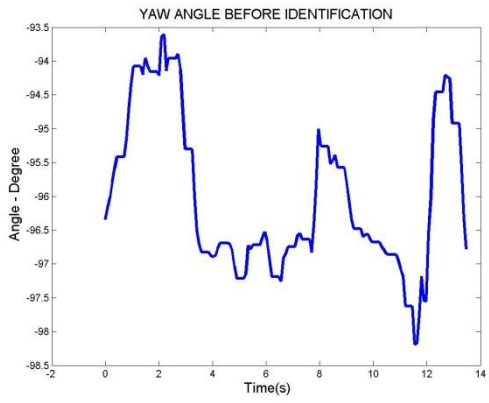
(b)



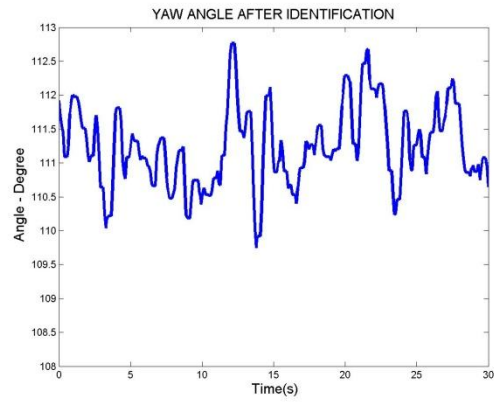
(c)



(d)



(e)



(f)

Şekil 6.10. Benzetimden Önce ve Sonra Üç Eksen Sistem Cevabı

Şekil 6.10(a)'da ve Şekil 6.10(c)'de sırasıyla, yuvarlanma ve yunuslama eksenlerinde deneysel olarak bulunan PID katsayılarıyla elde edilen sistem cevabı görülmektedir. Buna ek olarak, Şekil 6.10(d)'da ve Şekil 6.10(d)'de ise sırasıyla yuvarlanma ve yunuslama eksenlerinde sistem tanımlama ile tekrardan PID katsayıları ayarlanmış kontrolcünün sistem cevabı verilmiştir. Bu eksenler için kullanılan referans değeri sıfır (0) derece olarak seçilmiştir.

Şekil 6.10(e)'de ve Şekil 6.10(f)'de ise sapma eksenindeki sistem tanımlamadan önceki ve sonraki sonuçlar gösterilmiştir. Sapma eksenindeki referans değeri, sistemin çalışmaya başladığında, sapma eksenindeki açısı olarak kabul edilmiştir. Daha iyi anlaşılır olması için, sapma açısı eksenindeki limit aralıklar Şekil 6.10(e)'de ve Şekil 6.10(f)'de eşit olarak tutulmuştur.

Şekil 6.10 incelendiğinde, Şekil 6.3 ve Şekil 6.6'deki sonuçlara benzer olarak sistemin kapalı çevrim cevabının önemli ölçüde iyileştirildiği görülmüştür. Sistemin çok daha hızlı bir şekilde oturduğu ve sürekli hal salınım genliklerinin azaldığı dikkat çekmiştir.

7. SONUÇLAR

Tezin bu kısmında çok rotorlu insansız hava aracı olan bir quadrotorun tasarımının nasıl yapıldığı anlatılmıştır. Bunu yaparken de iki farklı quadrotor mimarisi üzerinden çalışmalar anlatılmıştır.

Bir quadrotor yapımı için gerekli olan tasarım bilgileri verilerek sistemin tasarımı için nelere dikkat edilmesi gerektiğinden bahsedilmiştir. Daha sonra, sistem tasarımı anlatılarak, kullanılan donanımsal malzemeler ve bunların seçim sebepleri anlatılmıştır. Donanımsal tasarım hakkında verilen bilgilerin yanında, yazılımsal tasarıma ait veriler de paylaşılmıştır. AÖB tarafından kullanılan veriler için hazırlanan yazılımlar ve o verilerin filtrelenmesi için kullanılan yazılımlar hakkında bilgi verilerek, üç eksendeki sistem açılarının nasıl elde edildiği anlatılmıştır. Ayrıca, Arducopter yazılımının kısaca anlatımı ve ilerleyen aşamalarda kullanılan ve MATLAB üzerinde çalışan sistem tanımlama aracının çalışması da verilen bilgiler arasındadır.

İleriki aşamalarda, tasarımı yapılan quadrotor üzerinde iyileştirme çalışmalarından bahsedilmiştir. Kontrolcü ilk başta deneysel olarak ayarlanmıştır, bu sayede sistem cevabının yatay eksende sıfır (0) kalması sağlanmıştır. Bu sırada, quadrotorun sistem tanımlaması için giriş ve çıkış verileri alınmıştır.

Yunuslama ve yuvarlanma eksenlerinin kontrolü sırasında giriş değerleri olarak sisteme verilen PWM değerleri, çıkış olarak AÖB tarafından sistemin ürettiği açılar alınmıştır. Üç eksen üzerindeki kontrolü için ise giriş olarak PID kontrolcünün çıkışı, sistem girişi olarak ise gene AÖB'den ölçülen değerler kullanılmıştır.

Bu değerler kullanılarak her eksen için birer transfer fonksiyonu ve bu transfer fonksiyonları ile de numerik olarak bulunan PID kontrolcü katsayılarının tekrar ayarlanması ile yeni kontrolcü katsayıları bulunmuştur.

Bulunan bu katsayı değerleri sistem çıkışı için tekrar ölçüm alınmış ve sistem tanımlama öncesine göre kapalı çevrim sisteminden daha iyi sonuçlar elde edildiği görülmüştür. Bu sonuçlar, sistemin daha kısa sürede istenilen referans değerine oturduğunu ve sistemin sürekli hal hatalarının genliklerinin daha az olduğunu göstermiştir.

Sistemin son halini göstermek amaçlı olarak, uçan quadrotorun bir görüntüsü Şekil 7.1’de görülmektedir.

Uçuş ile ilgili daha detaylı bir videoya aşağıdaki link üzerinden ulaşılması mümkündür:

<http://youtu.be/VDnLcXa-K0g>



Şekil 7.1. Tasarımı Yapılan Quadrotorun Uçuşu

2. BÖLÜM

KABLOSUZ ALGILAYICI AĞLARDA KAYNAK ATAMASI ENİYİLEMESİ

1. GİRİŞ

Kablosuz algılayıcı ağlar⁴⁸ (KAA), bir alan hakkında bilgi toplamak amacı ile kurulan yapılardır. Ekolojik çevre gözlemlenmesi [73], tabiat izlenmesi [74], tesis altyapısının korunması [75] gibi birçok kullanım aracına sahip bu uygulamaların uzun yaşam sürelerine sahip olmaları beklenmektedir.

Kablosuz algılayıcı ağların kullanım amacı, ortamdaki sıcaklık, nem, ses, titreşim, basınç gibi fiziksel değişkenleri, düğümlerde bulunan algılayıcılar tarafından ölçülüp elde edilen verinin işlenerek baz istasyonuna ulaştırılmasıdır [76]. Baz istasyonu da aldığı veriyi merkezi bir birime ulaştırmaktadır.

1.1 Günümüzde KAA Çalışmaları

Sivil ve askeri birçok alanda kullanılan kablosuz ağların yapısı gerçek dünyada sıkça uygulanmaktadır. Bunlardan biri Harvard Üniversitesi'nin Ekvator'da, aktif olan Reventador yanardağındaki 19 günlük algılayıcı ağ çalışmasıdır.

Bu çalışma için 16 adet algılayıcı sürekli olarak 100 Hz hızında sismik ve akustik veri akışını örnekleyerek baz istasyonuna iletmiştir. Çalışma süresince 229 adet deprem, sismik aktivite ve benzer diğer aktivitelerin bilgisi ağ tarafından toplanmıştır [77].

Bir diğer önemli çalışma ise Büyük Ördek Adaları⁴⁹'ndaki KAA dağıtımidir. Kaliforniya Berkley Üniversitesi tarafından kuşların yuvalama için göçlerini gözlemlemek amacıyla toplamda 36 adet düğüm ile bilgi toplanmıştır [78]. Buradaki çalışma, hayvanların yuva yaptığı mikro iklimleri ve hayvanların vahşi yaşamlarını gözlemlemektir.

Bir diğer önemli çalışmada gene Kaliforniya Berkley Üniversitesi tarafından Altın Kapı Köprüsü⁵⁰'nün 1.2 kilometre uzunluğundaki gövdesi ve güney kulesinde yapılmıştır. 64 düğüm tarafından 1 kHz hızında aynı anda veri alışverişi yapılması sağlanmıştır [75].

⁴⁸ İng. Wireless Sensor Networks - WSN

⁴⁹ İng. Great Duck Island

⁵⁰ İng. Golden Gate Bridge

Norveç'in kuzey denizinde yapılan uygulamada ise üç petrol platformu için kurulan KAA çalışmasında 90 adet düğüm kullanılmıştır. 30 saniye aralıklarla veri alınması ile akış kaybının önceden fark edilmesi sağlanmıştır. Ölçülen sıcaklık değerine göre de akış değeri ayarlanmış, bu sayede üretimin artması sağlanmıştır [79].

Bir diğer büyük çalışma ise 330 düğüm ile GreenOrbs adıyla tanınan büyük ölçekli bir yapıdır. Çin'de gerçekleştirilen bu çalışmada, nem, karbondioksit oranı, sıcaklık, ışık gibi birçok bilgi sene boyunca toplanmıştır. Bunun yanında, yangın riskini önlemek ve imdat çağrılarını önceden algılamak gibi önemli anlık görevler için de bu sistem kullanılmıştır [73].

KAA'ların çalışma alanını sadece yukarıdaki örneklerle sınırlandırmak doğru olmayacaktır. Akıllı şebekelerde, sağlık sistemlerinde, akıllı binalarda, lojistikte, tarımsal kontrolde, kriz yönetiminde, askeri alanda, makine gözetiminde, üretimde, kirlilik ölçümünde, şehir hayatında, biyolojik çeşitlilik gözlemlerinde ve sayılamayacak kadar olasılıkta uygulamada kullanımları bulunmaktadır.

1.2 KAA Yapısı

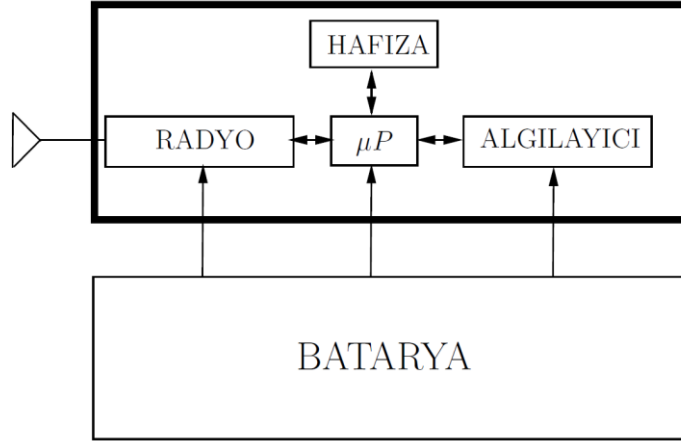
KAA için kurulan sistemin esas olarak iki ana temel parçası bulunmaktadır. Bunlardan ilki düğümler ya da kaynaklar olarak adlandırılan sistemdir. Diğeri ise baz istasyonu adı ile adlandırılan ve diğer düğümlerden verilerin gönderildiği yerdir. Bu iki temel yapının ortaklaşa birleştirilmesinden de ağ yapısı oluşmaktadır.

1.2.1 Düğüm yapısı

KAA'larda oluşturulan düğüm yapısı genelde dört ana birleşenden oluşmaktadır [80]. Bunların gösterimi Şekil 1.1'de görülmektedir.

Şekil 1.1'deki yapıda ilk eleman bataryadır. Batarya tasarımı KAA'lardaki önemli tasarım parametrelerinin başında gelmektedir. Düğümlerin bir alana dağıtılması veya bırakılması sonucu, düğümlerdeki batarya değişiminin sıkça yapılamayacağı göz önünde bulundurulmaktadır. Bu yüzden batarya enerjisinin uzun süre devam etmesi ve bu sayede düğümden daha uzun süre veri alınabilmesi, düğüm tasarımı için başlıca bir sorundur. Ayrıca,

bataryasının enerjisi biten düğümlerin, çevreye zarar vermeden doğada yok olabilecek şekilde tasarlanmak istenmesi, bu sorunu daha da karmaşık hale getirmektedir.



Şekil 1.1. Basit Bir KAA Düğümü

Düğümü oluşturan parçalardan bir diğeri algılayıcı⁵¹ dır. Algılayıcı, düğümden iletmesi istenen verilerin çevreden toplanmasını sağlayan, kısaca algılama işini fiziksel bir değişkeni elektriksel bir değişkene çeviren parçadır. Ses, ışık, elektrik, su, kirlilik, sıcaklık, elektromanyetik alan gibi birçok değişkeni ölçen algılayıcılar vardır. Sadece aç-kapa olarak çalışan algılayıcıların yanı sıra, çevresel faktörlerin şiddetine göre de enerji tüketimi değişen algılayıcılar da bulunmaktadır. Bu çeşitlilikten dolayı, her bir algılayıcının aynı değerde elektrik tükettiği varsayımı yapılamamaktadır.

Gelen verilerin gürültülü olması ya da çevresel etmenlerden dolayı algılayıcının hassasiyet değerini etkileyen faktörlerinin etkilerinin azaltılması için, algılayıcı yapısında tümleşik olarak çeşitli filtreler kullanılabilir.

Düğüm yapısının temel elemanlarından üçüncüsü ise radyodur. Radyonun amacı, kablosuz olarak düğümün topladığı verileri doğrudan veya dolaylı olarak baz istasyonuna göndermektir. Genelde kısa mesafeli, düşük veri gönderim hızında çalışan ve lisanssız 2.4 GHz band değerinde çalışmaktadırlar. Alıcı, verici, boşa ve beklemede olmak üzere dört ana modda çalışırlar. Yapılan çalışmalarda, boşa çalışan bir düğümün harcadığı enerji ile alıcı olarak çalışan düğümün harcadığı enerji yaklaşık olarak aynı değerdedir [81]. Düğüm için çok

⁵¹ İng. Sensor

değerli olan enerjinin daha düzgün harcanması açısından, düğümlerin kullanılmadığı zamanlarda beklemede bulundurulması gerekmektedir.

Düğümü oluşturulan son parça ise mikroişlemcidir. Mikroişlemci, düğümün beynidir. Algılayıcıların kontrolü, haberleşme protokollerinin işleme konulması, alınan verilere göre sinyal işleme algoritmalarının çalıştırılması gibi birçok önemli göreve sahiptir. Genellikle üzerlerinde bir işletim sistemi bulundurulmaktadır. Bu sayede çeşitli çalışma modları arasında düğümün işlemesine karar verilmesini sağlamaktadır. Dışarıdan gelen olaya bağlı olarak tetiklenen işlemciler yanında, sürekli olarak veri gönderimi yapan işlemciler de kullanılmaktadır.

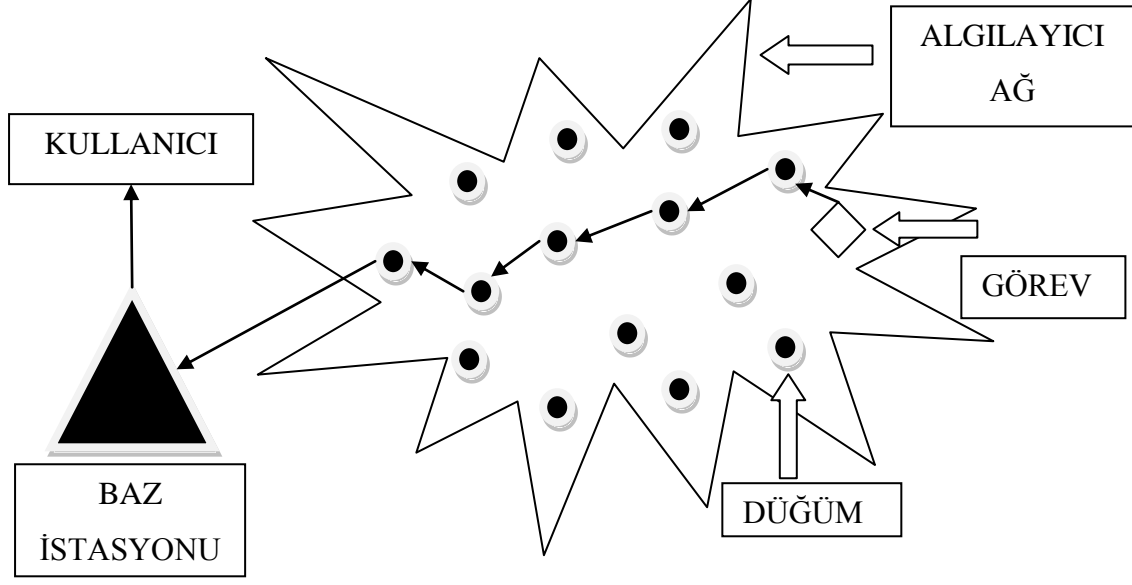
Bazı düğüm tasarımlarında, veri akışının radyo üzerinden yapılması yerine işlemcinin bağlı olduğu bir hafızada da verilerin toplanması sağlanabilir. Bu tür durumlarda, düğümün bulunduğu yerin belirli olması ve belirli aralıklarla ya da iş bitiminde verilerin toplandığı hafızadan bilgilerin alınması gerekmektedir.

1.2.2 Baz istasyonu

Baz istasyonu verilerin aktarımı için bitiş noktası olarak alınmaktadır. Ağ üzerindeki düğümlerden gelen verilerin hepsi baz istasyonunda toplanmaktadır. Baz istasyonları, genellikle harici bir güç kaynağı ile beslenmektedir. Bu yüzden de enerji tüketimi konusunda düğümler kadar hassasiyet gerektirmemektedirler. Baz istasyonu bir düğüm tasarımına sahip olabilir. Baz istasyonunu bir dizüstü bilgisayar ya da cep bilgisayarının oluşturması muhtemeldir. Uygulamalarda genelde bir adet baz istasyonu bulunması planlanır; fakat çeşitli sebeplerden dolayı ağ üzerinde birden fazla baz istasyonu olabilir.

1.2.3 Ağ yapısı

KAA'ları oluşturan düğüm ve baz istasyonu yapısının birleşmesi ile ağ yapısı oluşmaktadır. Bu durumu ifade etmesi için Şekil 1.2 kullanılmıştır. Buna göre, bir ağ yapısında birden fazla düğüm olabilmektedir. Bu düğümlerin amacı, ağ içerisinde algılanmak istenen olayın baz istasyonuna iletilmesini sağlamaktır. Ağ üzerindeki düğümler, birbirleri üzerinden veri aktarımı yapabilirler. Bunun yanında, veri akışının baz istasyonunda bitirilmesi lazımdır. Veri akışının, bir düğüm üzerinde sonlanmaması gerekmektedir.



Şekil 1.2. Ağ Yapısı

Baz istasyonunun ağ yapısı dışında olması ya da ağın merkezinde olması bir tasarım parametresidir. Baz istasyonuna yakın olan düğümler, genelde, dar boğaz⁵² oluşturmaktadır. Veri aktarımı sırasında, tüm ağ verilerinin öncelikle baz istasyonuna en yakın düğümlerde toplanması yüzünden, bu düğümlerin enerji harcamaları genel olarak daha yoğun olmaktadır.

Baz istasyonunda toplanan verilerin kullanıcıya iletilmesi için internet üzerinden veya yerel bir ağ üzerinden veri aktarımı da gerçekleştirilebilir. Ağ yapısında son nokta, verilerin toplandığı kullanıcıdır.

1.3 KAA'larda Enerji Eniyilemesi

KAA'ların yapısı gereği baz istasyonu hariç diğer düğümlerde enerji akışının kısıtlı olmasından dolayı, bu enerjinin en iyi şekilde kullanılması gerekmektedir.

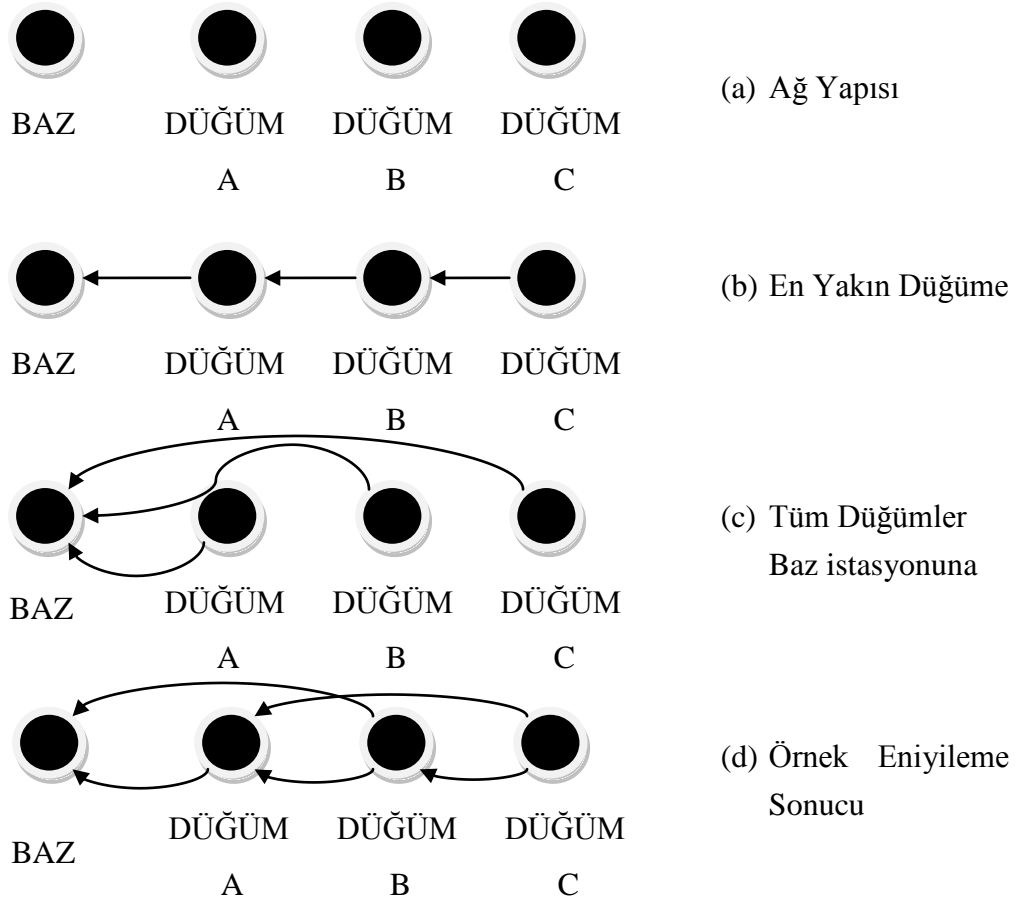
Ağ üzerindeki düğümlerden herhangi birinde enerjinin bitmesi halinde, ağ üzerinde veri akışının yapılamadığı varsayımına varılır. Çünkü o düğümün menzili içerisindeki çevresel bir faktör değişimi baz istasyonuna bildirilemediği gibi, o düğümü aracı düğüm olarak kullanan ve verisini, erken enerjisi biten düğüm üzerinden geçirmek isteyen akımlar başarılı

⁵² İng. Bottleneck

olamayacaktır. Veri akışının iletilmemesi, diğer düğümlerin de verilerini baz istasyonuna gönderemeyeceği anlamına gelir. O yüzden, en çok enerji harcayan düğümlerin daha uzun süre çalışması istenmektedir.

Özellikle baz istasyonuna yakın düğümlerde toplanacak verilerin çevre düğümlere iletilmesi ve bu sayede daha uzun süreli bir ağ yaşamı elde edilmesi için yapılan çalışmalar yanında, bağlantı sırasında diğer düğümlerle haberleşerek düğümlerin sınırlı enerjilerinin daha dengeli bir şekilde harcanması sağlanabilir.

Bu durumu daha kolay anlatmak için Şekil 1.3 kullanılmıştır. Şekil 1.3(a)'da aralarında yaklaşık olarak aynı mesafe olan, üç düğüm ve bir baz istasyonundan oluşan örnek bir ağ yapısı görülmektedir. Verilecek olan örnekler, bu yapı kullanılarak anlatılacaktır.



Şekil 1.3. Çeşitli Veri Aktarım Yöntemleri

Şekil 1.3(b)'de tüm düğümlerin, en yakınındaki düğüme veri aktararak akışın sağlandığı görülmektedir. Bu durumda A düğümü, tüm ağ akışını üzerinde toplayacak ve en erken bu düğümün enerjisi bitecektir. Bunun yanında, C düğümü ise en az enerji harcayan düğüm olacaktır. Zira B düğümü kendi verisini ve C düğümünün verisini baz istasyonu ve A düğümü ile paylaştıracakken, tüm akımını A düğümüne iletecektir.

Bu örneğin teorik olarak açıklamasının yapılması için (1.1) ve (1.2) numaralı denklemler kullanılmıştır. (1.1) Bir bitin gönderilmesi için harcanan enerjiyi temsil ederken, (1.2) bir bitin alınması sırasında harcanan enerjiyi göstermektedir [82].

$$E_{tx,ij} = \rho + \epsilon d_{ij}^{\alpha} \quad (1.1)$$

$$E_{rx,ij} = \rho \quad (1.2)$$

(1.1) ve (1.2)'de adı geçen “ ρ ” devre üzerinde harcanan enerjiyi, “ ϵ ” gönderici etkinliğini, “ α ” yol kaybını ve “ d_{ij} ” ise alıcı düğümü “i” ve verici düğümü “j” arasındaki mesafeyi temsil eder. Bu ifadeleri kullanarak eşit sayıda veri üreten düğümlerden oluşan bir ağ içerisinde, en fazla veri alımı ve gönderimi için enerji harcayan düğümün A düğümü olduğu görülebilir.

Şekil 1.3(c)'de ise her düğümün verisinin doğrudan baz istasyonuna iletildiği durum görülmektedir. Bu durumda, (1.1) 'e göre en fazla enerjiyi harcayacak düğüm C düğümüdür. Bu durumda, ağ üzerinde darboğazı oluşturacak ve en kısa sürede enerjisi bitecek düğüm C düğümüdür. A düğümü ise, diğer düğümlere nazaran baz istasyonuna daha yakın olmasından dolayı, enerjisini en az kullanacak (kullanamadığı enerjisi en fazla olacak) düğümdür.

Şekil 1.3(d)'de ise, KAA'larda eniyileme probleminin getirdiği çözüm görülmektedir. Bu durumda, düğümlerin veri akışlarını akıllıca kullanarak, en az enerji harcanması ile verinin ne kadar ileri iletebileceği görülmektedir. Düğümlerin zorunlu olarak diğer tüm düğümlerle ilişkisinin olmasına gerek yoktur; fakat verilerinin farklı yüzdelik kısımlarını farklı düğümlere göndererek veri akışını sağlayabilirler. Bu durumda daha adil bir veri akışı sağlandığı gibi ağ üzerinde enerjisi ilk bitecek düğümün de daha uzun süre çalışmasına yardımcı olunur.

1.4 Eniyileme, Doğrusal Programlama ve Karmaşık Tamsayı Programlama

Eniyileme⁵³, kısıtlı kaynaklar altında en iyi sonucun bulunma sanatı ve bilimidir. Belirli kısıtlar altında oluşturulan elemanlar kümesinden, en iyi sonucu sağlayan elemanın seçilmesi olarak tanımlanabilir [83]. Eniyileme problemi ise olası sonuçlar içinden en iyi sonucun bulunması problemidir.

Doğrusal programlama⁵⁴ ise, doğrusal ilişkiler içerisinde kısıtlarla verilen gereksinimler listesinin oluşturduğu matematiksel modelin, belirli bir amaç fonksiyonu doğrultusunda en iyi sonucunu bulmak için kullanıldığı matematiksel yöntemdir. Başka bir söylem ile, eşitlik ve eşitsizliklerle gösterilen bir takım doğrusal kısıtların, belirli bir amaç fonksiyonu için en iyi sonucunu bulmaya yarayan tekniğe doğrusal programlama denir [84]. Doğrusal programlama, eniyileme problemlerinin bir alt kümesidir ve eniyileme probleminin doğrusal ifadelerle çözüleceğini belirtir.

Doğrusal programlama, çok geniş bir tanım kümesine ve kullanım alanına sahiptir. Endüstride, lojistikte, yerleşimde ve daha bir çok alanda sıkça kullanılmaktadır.

Bir doğrusal programlama probleminin veya eniyileme probleminin ana elemanları aşağıdaki gibidir [83]:

- **Değişkenler:** Problemin başında değeri bilinmeyen değerlerdir. Değişkenler ayarlanabilen veya kontrol edilebilen şeyleri (*örneğin*, bir ağ üzerindeki veri gönderim akımlarının değerleri) temsil eder. Hedef, amaç fonksiyonunu sağlayan en iyi değişkenlerin bulunmasıdır.
- **Amaç Fonksiyonu:** Bu, değişkenlerle amacı birlikte ifade etmek için kullanılan matematiksel bir ifadedir. Örneğin kazanç bir amaç fonksiyonunu temsil eder. Amaç fonksiyonunun numerik olarak enbüyüklenmesi⁵⁵ ya da enküçüklenmesi⁵⁶ ile sonuca ulaşılır.
- **Kısıtlar:** Değişkenlerin olası sonuç için değerlerini limitleyen matematiksel ifadedir. Örneğin, ağ üzerinde herbir düğümün gönderebileceği veri miktarının kısıtlanması buna bir örnek olabilir.

⁵³ İng. Optimization

⁵⁴ İng. Linear Programming - LP

⁵⁵ İng. Maximizing

⁵⁶ İng. Minimizing

- **Değişken Sınırları:** Değişkenlerin artı sonsuz ve eksi sonsuz arasında değer almasına izin verilse de bazı durumlarda bu değerlerin sınırlandırılması gerekir. Örneğin, bir düğümün her zaman veri göndermesi (akımın sıfırdan büyük olması) değişken sınırı için bir örnektir.

Bu ifadeleri kullanarak Şekil 1.4'teki örnek üzerinde bir çalışma yapılmıştır [83]. Bu çalışmada, "x" ve "y" ifadeleri değişkenleri temsil etmektedir. Değişkenlerin sınırı olarak, sıfırdan büyük olmaları gerektiği ifade edilmiştir. Problem tanımında üç adet kısıt verilmiştir. Bunlar (1.3), (1.4) ve (1.5)'te görülmektedir.

$$y \leq 3 \quad (1.3)$$

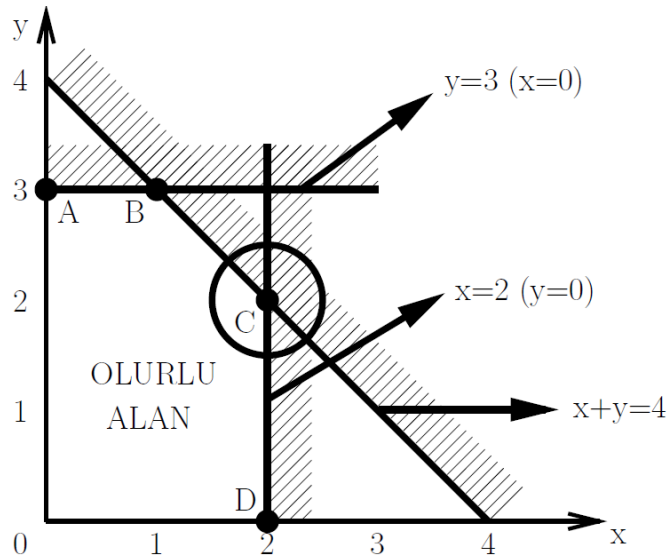
$$x \leq 2 \quad (1.4)$$

$$x + y \leq 4 \quad (1.5)$$

Bunun yanında, bir amaç fonksiyonu belirlenmiştir. Bu fonksiyon (1.6)'da görülmektedir.

$$Z = 15x + 10y \quad (1.6)$$

Bu kısıtlar altında hazırlanan eniyileme problemi Şekil 1.4'te gösterilmiştir.



Şekil 1.4. Eniyileme Problem Örneği

Şekil 1.4'deki çizim incelendiğinde, kısıtlar ve sınırlar doğrultusunda değişkenlerin fonksiyon çizimlerinin yapıldığı görülmektedir. Matematiksel bir ifade olarak, sonuçların olurlu alan⁵⁷ içerisindeki kısıt-sınır ve kısıt-kısıt kesişimlerinin oluşturduğu köşelerde olacağı aşikardır. Eniyileme sonucu için ise, bu kesişim noktalarındaki “x” ve “y” değerlerinin amaç fonksiyonunda yerine konması gerekir. Elde edilecek en yüksek sonuç, çözümü verecek olan sonuçtur. Bu durumda, C (2,2) noktası, diğer noktadaki değerlere göre daha yüksek bir sonuç verdiği için, bu problemin en iyi sonucudur.

Karmaşık Tamsayılı Programlama⁵⁸ ise içerisinde birden fazla değişken türü bulunduran bir yapıdır. İkili değişkenleri⁵⁹ ve tamsayılı değişkenleri⁶⁰ bir arada kullanan ve gene doğrusal programlama yapısına sahip bir çalışma alanıdır. Temelde çalışma prensibi aynıdır; fakat sonuç olarak değişkenlerin alabileceği sonuçlar tamsayı olmalıdır. Çalışma mekanizması olarak, doğrusal program vasıtasıyla bulunan eniyileme sonucunu sağlayan tamsayılı değişkenlerin aranması üzerine kurulmuştur. Örneğin, uçak yapımı ile ilgili bir çalışmada 4.2 gibi bir sonuç çıkamaz; çünkü 4.2 adet uçak yapımı gibi bir durum söz konusu değildir.

İkili değişkenler ise verilen kararları ifade etmek için “1” ve “0” değerlerini alırlar. Bu kullanım karar ifadeleridir. Eğer ikili değişken “1” değerini alırsa, kararın geçerli olduğu; “0” değerini alırsa da kararın sisteme etki etmeyeceği anlamını taşır.

1.5 Problem Tanımı

KAA'larda tek yönlü bağlantıların⁶¹ oluşması kablosuz haberleşmenin getirdiği uygulamalardan biridir. Alıcı karakteristikleri, asimetrik girişim ve elektromanyetik yayılımın çevresel birçok etkisinin sonucunda tek yönlü bağlantılar oluşmaktadır; fakat gönderim güç ayrıklığı tek yönlü bağlantıların oluşmasındaki temel faktördür. Bunun yanında, tek yönlü bağlantıların oluşması, ağ üzerinde rastgele bağlantıların akımı taşıyamamasından dolayı da oluşabilir.

⁵⁷ İng. Feasible Region

⁵⁸ İng. Mixed Integer Programming - MIP

⁵⁹ İng. Binary Variables

⁶⁰ İng. Integer Variables

⁶¹ İng. Unidirectional Link

Kablosuz ağlar için tasarlanan birçok veri transfer mekanizması çift yönlü bağlantılar⁶² ile çalışır; fakat tek yönlü bağlantıları da içeren bazı mekanizmalar da bulunmaktadır. Bu tür mekanizmalarda teyit paketinin⁶³, çok atlamalı geri dönüş yolunu⁶⁴ kullanıp kullanmayacağı; kullanılacaksa da geri dönüş yolunun kaç atlama ile gerçekleştirileceği bir tasarım kistasıdır. Eğer geri dönüş yol uzunluğunun çok yüksek değerler almasına izin verilirse, kullanılabilir tek yönlü bağlantı sayısının artmasına da sebep olur. Veri akışına uygun bağlantı sayısının artması daha iyi bir enerji dengelemesine ve daha uzun ağ yaşam süresine yol açar.

Peki, en yüksek ağ yaşam süresine ulaşılması için geri dönüş yol uzunluğunun⁶⁵, yüksek tutulması gerekir mi? Tez çalışmasının bu kısmında, güç ayrışıklığı ile oluşan ve rastgele oluşan tek yönlü bağlantılarının geri dönüş yol uzunluklarının KAA'daki yaşam süresine etkisinin, karmaşık tamsayılı programlama ile incelenmesi üzerinde durulmuştur.

⁶² İng. Bidirectional Link

⁶³ İng. Acknowledgment Packet

⁶⁴ İng. Multi-Hop Reverse Path Length

⁶⁵ İng. Reverse Path Hop Distance - RPHD

2. KAA’LARDA TEK VE ÇİFT YÖNLÜ BAĞLANTILAR

Kablosuz ağlarda haberleşme ağlarının, genellikle, çift yönlü oldukları kabul edilmektedir. Bu durumda düğümler birbirlerine paket gönderip alabilirler; fakat pratik ağ uygulamalarında çift yönlü bağlantıların var olduğu varsayımı genelde tutmamaktadır. Hatta yapılan çalışmalarda bağlantıların birçoğunun tek yönlü olduğu ortaya konulmuştur [85]. Bağlantı tek yönlülüğü fiziksel birçok sebebe dayandırılabilir. Kullanılan radyonun karakteristiği, eşit olmayan girişim bu sebeplerden birkaçıdır.

Bu sebeplerden en öne çıkan ve tek yönlü bağlantının oluşmasına en çok sebep olan durum ise verici gönderim güç ayrıklığıdır. Bu durum, yüksek verici gücüne sahip olan düğümün düşük verici gücüne sahip olan düğüme ulaşmasını sağlarken, ters yönde haberleşmenin sağlanamamasına sebep olmaktadır [86].

Birçok Katman Erişim Kontrol⁶⁶ protokolü (*örneğin*, IEEE 802.11) çift yönlü bağlantılar üzerinden çalışacak şekilde tasarlanmıştır. Bu da tokalaşma protokolü için geçerli olan verici tarafından bir teyit paketinin - ACK - alıcıya geri gönderilmesi ile gerçekleşmektedir [87].

Performans eniyilemesi için tek yönlü bağlantıların ve çift yönlü bağlantıların birlikte kullanılması gerekmektedir. Bunun için de tek yönlü bağlantıların çift yönlü bağlantılarla birlikte kullanılabileceği birçok Katman Erişim Kontrol protokolü tanımlanmıştır. Tanımlanan protokoller tek yönlü bağlantılar üzerinden tokalaşmayı gerçekleştirmektedir. Bunun için teyit paketlerinin alıcıya birden çok röle düğümü üzerinden gönderilmesi gerekmektedir [85].

Buradaki önemli bir diğer tasarım problemi de, tek yönlü bağlantı için geri dönüş yol uzunluğu değerinin belirlenmesidir. Dikkat edilmesi gereken husus, tek yönlü bağlantılarda en düşük geri dönüş yol uzunluğunun iki atlama ile gerçekleştiriliyor olmasıdır. Bu durumu alıcıdan vericiye teyit paketlerinin bir röle yardımı ile ilettiği düşünülebilir. Öbür taraftan da geri dönüş yol uzunluğu gereksiz artırılabilir; fakat pratik KAA uygulamalarında uzun geri dönüş yollarının kullanılması istenmemektedir.

KAA’lardaki en önemli tasarım konularından biri de yaşam süresi eniyilemesidir. Herhangi bir algılayıcı düğümünün enerji yayılımının erkenden bitmesini önlemek için, ağdaki enerji

⁶⁶ İng. Medium Access Control - MAC

dağılımı en iyi şekilde dengelenmiş akımlardan oluşturulmalıdır. Ağ yaşam süresi, tek ve çift yönlü bağlantıların birlikte kullanılmasıyla maksimize edilebilir. Bu sayede enerji dengelemesini engelleyen bağlantılar ortadan kaldırılmış olur.

Tek yönlü bağlantılarda kullanılan teyit paketleri çok atlamalı geri dönüş yollarını kullanmaktadır. Dolayısıyla çift yönlü bağlantılara göre daha masraflı olma durumları vardır. Ayrıca, tek yönlü bağlantıların artması, geri dönüş yol uzunluğunun artmasına da sebep olmaktadır.

Geçmişte tek yönlü bağların, KAA'ların yaşam süresi üzerine etkileri bir çok çalışmada yer almıştır [85], [88]. Bunun yanında, yapılan bu çalışmalarda geri dönüş yol uzunluğunun etkilerine ait herhangi bir irdeleme gerçekleştirilmemiştir.

Bu sorunu çözmek amacıyla özgün karmaşık tamsayılı bir programlama (KTP) geliştirilerek tek yönlü bağlantıların geri dönüş yolu uzunluklarının KAA'ların yaşam süresi üzerindeki etkileri irdelenmiştir.

KAA'lar için yapılan daha önceki birçok çalışmada KTP programlama kullanılmıştır ve yapılar KAA'lara özel karakteristik modeller incelenmiştir [89].

3. MODEL

Bu çalışmada esas amacımız çeşitli sebeplerden (güç ayrışıklığı ve olasılıklar) oluşan tek yönlü bağlantılardaki geri dönüş yol uzunluğunun KAA yaşam süresine etkisini incelemektir. Bu çalışmada düğümlerdeki haberleşme kaynaklı enerji yayılımı, diğer işlemlere göre daha çok enerji tüketmektedir. Örneğin Telos algılayıcı düğümlerinde haberleşme için kullanılan enerji, tüm enerjinin %91'ini oluşturmaktadır [90]. Bu çalışmada kullanılan enerji yayılım modeli ise (1.1) ve (1.2)'de gösterilmiştir.

Kullanılan sistem modelinde tek bir baz istasyonu ve N adet düğüm olduğu varsayımı yapılmıştır. Zamanın turlara bölüdüğü ve tur süresinin (T_{rnd}) sabit olduğu varsayılmıştır. Her algılayıcı düğüm- i her turda aynı miktarda veri üretmektedir (s_i) ve veriler baz istasyonuna iletilmektedir. Her düğümün ürettiği veri doğrudan veya başka bir algılayıcı düğümünün röle olarak kullanılmasıyla baz istasyonunda son bulur. Ağ çizgesi, $G = (V, A)$ yönlendirilmiş çizgesi ile gösterilmektedir. V kümesi, algılayıcı tüm düğümleri ve baz istasyonunu, yani düğüm-1'i içine alan gösterimdir. W kümesi ise tüm algılayıcı düğümleri ifade eder ($W = V \setminus \{1\}$). $A = \{(i, j) : i \in V, j \in V \setminus \{i\}\}$ kümesi ise bağlantı kümesidir. Burada, A kümesinin tanımında hiçbir düğümün kendisine veri göndermeyecek şekilde tanımlanmış olmasına dikkat edilmelidir. Düğüm- i 'den düğüm- j 'ye ağ yaşam süresi boyunca gönderilen toplam sabit veri paket sayısı tamsayı f_{ij} değişkeni ile gösterilmiştir. S_i ise düğüm- i 'nin her bir turda ürettiği sabit veri paket sayısını ifade eder. f_{ji} veri paketi akımına teyit için gönderilen ACK paketi akımının “ k ” düğümü tarafından gönderilmesi (“ i ” düğümü veya aktarıcı düğümü) ve “ l ” düğümü tarafından alınması (“ j ” düğümü ya da aktarıcı düğümü) g_{ij}^{kl} tamsayı değişkeniyle gösterilmiştir.

Düğümlerin nominal veri gönderim mesafesi R_{nom} olarak ifade edilmiştir. Nominal veri gönderim mesafesindeki güç ayrışıklığı $[R_{het}, -R_{het}]$ arasında düzgün rastgele dağılımlı değişim ile ifade edilmektedir. Bu durumda, her düğüm- i en fazla $R_{max,i} = R_{nom} + R_{dev,i}$ kadar veri gönderim mesafesine sahip olabilir. $R_{dev,i}$ bu ifadede $[-R_{het}, R_{het}]$ aralığındaki her düğüm- i için ayrı olarak ifade edilen nominal veri güç ayrışıklığı için kullanılan değişimdir. Buna göre bir düğüm en fazla $R_{max,i} = R_{nom} + R_{het}$, en az da $R_{max,i} = R_{nom} - R_{het}$ kadar veri gönderim mesafesine sahip olabilir. Bu model, tek yönlü bağlantılarda güç ayrışıklığını oluşturmak için kullanılan ve D-modeli olarak anılan bir modeldir [85]. Link asimetrisini

yaratmak için güç ayrışıklığını (düğümlerin farklı gönderim mesafelerine sahip olması) kullanır [85] [86].

Sistem modelinde kullanılan tüm değişkenler Çizelge 3.1’de gösterilmiştir.

Çizelge 3.1. Doğrusal Programlama Formülündeki Terimler

Değişken	Tanım
T	Turlar cinsinden ağ yaşam süresi
N	Algılayıcı düğüm sayısı
f_{ij}	i düğümünden j düğümüne akan akım (paket cinsinden- tamsayı)
g_{ij}^{kl}	k düğümünden gönderilen l düğümü tarafından alınan, i düğümünden j düğümüne ACK akımı (ACK paket sayısı cinsinden-tamsayı değişkeni)
b_{ij}^k	g_{ij}^{kl} ACK akımında k düğümünün aktarıcı düğüm olduğunu belirten değişken (ikili değişken)
M	Büyük bir sayı
L_{data}	Veri paket boyutu (bit cinsinden- $L_{data} = 2048 \text{ bit}$)
L_{ACK}	ACK paket boyutu (bit cinsinden – $L_{ACK} = 160 \text{ bit}$)
s_i	Her turda i düğümü tarafından üretilen veri miktarı (paket sayısı cinsinden – $s_i=1$)
E_{rx}	Bir biti alabilmek için gerekli enerji tüketimi (J/bit)
$E_{tx,ij}$	i düğümünden j düğümüne bir biti göndermek için gerekli olan enerji tüketimi (J/bit)
d_{ij}	i düğümünden j düğümüne olan mesafe (m)
ρ	Elektronik devre üzerinde harcanan enerji (J/bit – $\rho=50\text{nJ/bit}$)
ϵ	Gönderici verimliliği (J/bit/ m^2 – $\epsilon = 100 \text{ pj/bit}/m^2$)
α	Yol kaybı üssü ($\alpha = 2$)
e_i	Algılayıcı düğümde depolanan enerji (J)
ζ	Batarya enerjisi (J- $\zeta = 25 \text{ KJ}$)
$G = (V, A)$	Ağ topolojisini belirten yönlendirilmiş çizge
V	Baz istasyonu (düğüm-1) dahil tüm düğümleri ifade eden küme
W	Baz istasyonu (düğüm-1) hariç tüm düğümleri ifade eden küme

A	Arklar (bağlantılar) kümesi
T_{rnd}	Bir turun süresi (s)
R_{nom}	Tanımlı en yüksek veri gönderim mesafesi (m)
R_{het}	R_{nom} 'daki en yüksek değişim (m)
$R_{max,i}$	i düğümündeki gerçek en yüksek veri gönderim mesafesi (m)
$R_{dev,i}$	i düğümündeki tanımlı veri gönderim mesafesinin, gerçek veri iletimi mesafesindeki değişimi (m)
$LRPHD$	Geri dönüş atlama uzunluğunun en büyük değeri

Şekil 3.1'de ise eniyileme probleminin KTP ile yapılmış modellenmesi görülmektedir. Bu modeldeki amaç, ağın yaşam süresini, kısıtları sağlayan f_{ij} 'ler (veri akımları) ve g_{ij}^{kl} 'ler (ACK akımları) cinsinden bulmaktır. Burada kullanılan T değişkeni ağ yaşam süresini turlar cinsinden belirlemektedir ve ağın gerçek yaşam süresi $T \times T_{rnd}$ çarpımı ile bulunabilir.

(3.1) ve (3.2) bütün akımların negatif olamayacağını belirtmektedir. (3.3) algılayıcı düğümlerinde akım dengelemesi için kullanılmıştır. Başka düğümlerden gelen akımlar ile röle veya baz istasyonuna gitmek için düğümden çıkan akımların farkı, o düğümden üretilen veriye eşit olmalıdır. Bu ifadedeki $Tx s_i$, düğüm- i 'de üretilen toplam veri paketi sayısına eşittir. s_i , her düğüm- i 'de sabit olarak tur başına üretilen veri paketi sayısıdır.

(3.4) algılayıcı düğümlerde üretilen tüm verilerin baz istasyonunda sonlanmasını garanti altına almaktadır. Baz istasyonunun başka bir düğüme veri göndermemesi (3.5) ile sağlanmaktadır. Birçok KAA uygulamasında veriler periyodik olarak toplanmaktadır ve toplanan verilerin boyutu daha önceden belirlenen paket boyutlarındadır [88], [82].

(3.6) tek ve çift yönlü bağlantıların veri yollarını oluşturur. Eğer alıcı ve verici arasındaki mesafe (d_{ij}) düğüm- i 'nin en fazla veri gönderim mesafesinden daha büyükse f_{ij} akımı sıfırlanır. Düğüm- i 'nin geriye aldığı ACK paket sayısının, düğüm- j 'ye gönderdiği toplam veri paketi sayısına eşit olması (3.7) tarafından sağlanmıştır. Gönderilen verilerin direkt olarak ya da bir röle düğümü üzerinden aktararak düğüm- i 'ye ulaşması da bu ifade içinde yer almaktadır. (3.8), düğüm- j 'den düğüm- i 'ye gelen ACK paket sayısının, düğüm- i 'den düğüm- j 'ye gönderilen veri paketi sayısına eşit olduğunu belirtir.

En Büyükle T

Kısıtlar:

$$f_{ij} \geq 0 \forall (i,j) \in A \quad (3.1)$$

$$g_{ij}^{kl} \geq 0 \forall (i,j) \in A \forall k \in V \forall l \in W \quad (3.2)$$

$$\sum_{j \in W} f_{ji} + T s_i = \sum_{j \in V} f_{ij} \quad \forall i \in W \quad (3.3)$$

$$\sum_{j \in W} f_{j1} - \sum_{j \in W} f_{1j} = T \sum_{i \in W} s_i \quad (3.4)$$

$$\sum_{j \in V} f_{1j} = 0 \quad (3.5)$$

$$f_{ij} = 0 \text{ eğer } R_{max,i} < d_{ij} \forall (i,j) \in A \quad (3.6)$$

$$f_{ij} = \sum_{k \in V} g_{ji}^{kl} \quad \forall i \in W \quad \forall j \in V \quad (3.7)$$

$$f_{ij} = \sum_{k \in V} g_{ji}^{jk} \quad \forall i \in W \quad \forall j \in V \quad (3.8)$$

$$\sum_{k \in V} g_{ij}^{ki} = 0 \quad \forall i \in V \quad \forall j \in V \quad (3.9)$$

$$\sum_{k \in V} g_{ij}^{jk} = 0 \quad \forall i \in V \quad \forall j \in V \quad (3.10)$$

$$\sum_{k \in V} g_{ij}^{kl} - \sum_{m \in V} g_{ij}^{lm} = 0 \quad \forall i \in V \quad \forall j \in V \quad \forall l \in V \setminus \{i,j\} \quad (3.11)$$

$$\sum_{l \in V} g_{ij}^{kl} \leq M b_{ij}^k \quad \forall i \in V \quad \forall j \in V \quad \forall k \in V \setminus \{i,j\} \quad (3.12)$$

$$g_{ij}^{kl} = 0 \text{ eğer } R_{max,k} < d_{kl} \quad \forall i \in V \setminus \{i\} \quad \forall k \in V \quad \forall l \in V \setminus \{k\} \quad (3.13)$$

$$\sum_{k \in V} b_{ij}^k \leq L_{RPHD} \quad \forall i \in V \quad \forall j \in V \quad (3.14)$$

$$L_{data} \sum_{j \in V} E_{tx,ij} f_{ij} + L_{ACK} \sum_{j \in V} \sum_{k \in V} \sum_{l \in V} E_{tx,ij} g_{ij}^{kl} + E_{rx} L_{data} \sum_{j \in W} f_{ji} \quad (3.15)$$

$$+ E_{rx} L_{ACK} \sum_{j \in V} \sum_{k \in V} \sum_{l \in V} g_{ji}^{kl} \leq e_i \quad \forall i \in W$$

$$e_i = \xi \quad \forall i \in W \quad (3.16)$$

Şekil 3.1. KTP Yapısı (D-modeli)

(3.9), ACK akımlarının veriyi gönderen düğüm-i'den başka yere gitmemesini ve (3.10) da ACK akımlarının varış noktası olan düğüm-j'ye iletilmesini sağlamaktadır. ACK akımlarının röle düğümlerinde dengelenmesi (3.11) ile sağlanmıştır. Düğüm-k'nın g_{ij}^{kl} için bir röle düğümü olup olmadığını belirten ikili değişken b_{ij}^k 'nin değeri (3.12)'de ifade edilmiştir. (3.13) ise verici düğüm-k ile alıcı düğüm-l arasındaki mesafenin düğüm-k'nın gönderim mesafesinden fazla olması durumunda ACK akımlarının sıfır olması için kullanılmıştır.

(3.14), geri dönüş yol uzunluğunun en yüksek değerini sınırlamaktadır. Buna göre, eğer $L_{RPHD} = 1$ olursa, ağda sadece tek yönlü bağlantıların kullanılabileceği anlamına gelmektedir. (3.15), baz istasyonu hariç tüm düğümlerin veri gönderimi için sabit bir enerjiye sahip olduklarını ve bataryalarda bulunan enerjinin e_i olduğunu ifade etmek için kullanılmıştır. Son olarak ise, (3.16)'nın kullanılma amacı tüm algılayıcı düğümlerinin enerjisini eşit olarak sabit bir batarya enerjisine eşitlenmesidir.

Bu çalışmaya ek olarak, bir de tek yönlü bağlantıların rastgele sebeplerden oluşmasından kaynaklı bir çalışma yapılmıştır. Çift yönlü bağlantıların sinyal kaybı, gürültü, girişim ya da engel gibi herhangi bir sebepten dolayı tek yönlü bağlantıya dönüşmesi sonucu elde edilecek sonuçlar incelenmiştir.

Bu amaçla yapılan çalışmada, çift yönlü bir bağlantının tek yönlü bir bağlantıya dönüşme ihtimali olarak pl_i değişkeni atanmıştır. Herhangi bir veri gönderim gücü farklılığı olmaksızın ($R_{het} = R_{dev,i} = 0$), çeşitli sebeplerden dolayı ağ üzerinde herhangi bir bağlantının kopması ihtimali için pl değişkeni kullanılmıştır. Eğer, pl_i değeri p_l değerinden küçük ise, iki düğüm arasındaki bağlantının tek yönlü bağlantıya dönüştüğü varsayımı yapılmıştır.

Şekil 3.2 üzerine eklenen bir başka geliştirme ise, paket işleme için harcanan gücün ve algılayıcı verilerinin sayısal hale geçmesi için harcanan gücün hesaplara katılmasıdır. Bu durum için Çizelge 3.1'e, E_{PP} yani paket işleme⁶⁷ için harcanan enerji değişkeni ($120 \mu J$) ve E_{DA} , yani algılayıcının fiziksel dünyadan aldığı veriyi sayısal hale dönüştürürken harcadığı veri işleme⁶⁸ enerji değişkeni ($600 \mu J$) eklenmelidir. Bu eklemelerle birlikte hazırlanan yeni KTP yapısı Şekil 3.2'de gösterilmiştir.

⁶⁷ İng. Packet Processing

⁶⁸ İng. Data Acquisition

En Büyükle T

Kısıtlar:

$$f_{ij} \geq 0 \quad \forall (i,j) \in A \quad (3.17)$$

$$g_{ij}^{kl} \geq 0 \quad \forall (i,j) \in A \quad \forall k \in V \quad \forall l \in W \quad (3.18)$$

$$\sum_{j \in W} f_{ji} + T s_i = \sum_{j \in V} f_{ij} \quad \forall i \in W \quad (3.19)$$

$$\sum_{j \in W} f_{j1} - \sum_{j \in W} f_{1j} = T \sum_{i \in W} s_i \quad (3.20)$$

$$\sum_{j \in V} f_{1j} = 0 \quad (3.21)$$

$$f_{ij} = 0 \text{ eğer } R_{max,i} < d_{ij} \text{ ve } pl_i < pl \quad \forall (i,j) \in A \quad (3.22)$$

$$f_{ij} = \sum_{k \in V} g_{ji}^{kl} \quad \forall i \in W \quad \forall j \in V \quad (3.23)$$

$$f_{ij} = \sum_{k \in V} g_{ji}^{jk} \quad \forall i \in W \quad \forall j \in V \quad (3.24)$$

$$\sum_{k \in V} g_{ij}^{ki} = 0 \quad \forall i \in V \quad \forall j \in V \quad (3.25)$$

$$\sum_{k \in V} g_{ij}^{jk} = 0 \quad \forall i \in V \quad \forall j \in V \quad (3.26)$$

$$\sum_{k \in V} g_{ij}^{kl} - \sum_{m \in V} g_{ij}^{lm} = 0 \quad \forall i \in V \quad \forall j \in V \quad \forall l \in V \setminus \{i,j\} \quad (3.27)$$

$$\sum_{l \in V} g_{ij}^{kl} \leq M b_{ij}^k \quad \forall i \in V \quad \forall j \in V \quad \forall k \in V \setminus \{i,j\} \quad (3.28)$$

$$g_{ij}^{kl} = 0 \text{ eğer } R_{max,k} < d_{kl} \text{ ve } pl_k < pl \quad \forall i \in V \setminus \{i\} \quad \forall k \in V \quad \forall l \in V \setminus \{k\} \quad (3.29)$$

$$\sum_{k \in V} b_{ij}^k \leq L_{RPHD} \quad \forall i \in V \quad \forall j \in V \quad (3.30)$$

$$\begin{aligned} & \sum_{j \in V} (L_{data} E_{tx,ij} + E_{pp}) f_{ij} + \sum_{j \in V} \sum_{k \in V} \sum_{l \in V} (L_{ACK} E_{tx,ij} + E_{pp}) g_{ij}^{kl} \\ & + \sum_{j \in W} (E_{rx} L_{data} + E_{pp}) f_{ji} + \sum_{j \in V} \sum_{k \in V} \sum_{l \in V} (E_{rx} L_{ACK} + E_{pp}) g_{ji}^{kl} + E_{DAT} \\ & \leq e_i \quad \forall i \in W \end{aligned} \quad (3.31)$$

$$e_i = \xi \quad \forall i \in W \quad (3.32)$$

Şekil 3.2. Geliştirilmiş KTP Yapısı (P-modeli)

Şekil 3.2'deki veri işleme ve paket oluşturma amacıyla harcanan enerjiler için ayrıca bir D-modeli daha oluşturulmuştur.

Enerjisi biten ilk düğüm ile birlikte ağın yaşam süresinin de bittiği varsayılmaktadır. Bu tanımın doğru yorumlanması gerekmektedir. Eğer KTP yapısı dikkatlice incelenirse, bütün düğümlerin enerjilerini dengeli bir şekilde harcamaya ve ağın yaşam süresini eniyilecek şekilde kullanmaya yönlendirildiği görülebilir. Bunun sonucunda da ağdaki tüm algılayıcı düğümler birlikte çalışarak, enerji kaynağını çok fazla kullanan algılayıcı düğümlerin ölümünün erken gerçekleşmesini engellemeye çalışır. Global ağ üzerindeki bilgiye göre de kullanılan KTP yapısının eniyileme sonuçlarını verdiği dikkat edilmelidir. Ağ protokollerinin yerel yönlendirme bilgisine göre performans eniyilemesi bu çalışmanın dışında bırakılmıştır.

KAA'ların sabit algılayıcılar içerdiği ve mobil ağ topolojileri gibi sürekli hareket halinde olmadığı kabul edilmiştir. Bundan dolayı topoloji taraması ve yolların ataması tek seferde gerçekleşmiştir — önemsenmeyecek kadar zaman tutan (tur/devir) bu fonksiyonların tekrar hesaplanması yapılmamıştır [82]. Eğer ağın tekrardan organizasyon periyodu yeterince uzunsa bu operasyonlar, ağın toplam enerji kullanımının çok küçük bir kesimini (%1'den daha az) kullanmaktadır [91].

4. ANALİZLER

Geliştirilen KTP modelinin sayısal analizi için Genel Cebirsel Modelleme Sistemi⁶⁹ [92] kullanılmıştır. Analizlerde her algılayıcı düğüm her turda bir veri paketi ($s_i = 1$) üretmekte ve bunu baz istasyonuna iletmektedir. Veri ve ACK paket boyutları sırasıyla 256 Bayt ve 20 Bayt olarak tanımlanmıştır ($L_{data} = 2048$ bit ve $L_{ACK} = 160$ bit) . Haberleşme parametreleri ise [82]'deki gibi $\epsilon = 100$ pJ/bit/m², $\rho = 50$ nJ/bit ve $\alpha = 2$ olarak belirlenmiştir. Her düğümün iki adet AA pil enerjisi ile beslendiği ($\xi = 25$ KJ) varsayılmıştır.

4.1 Küçük Topoloji Çalışması

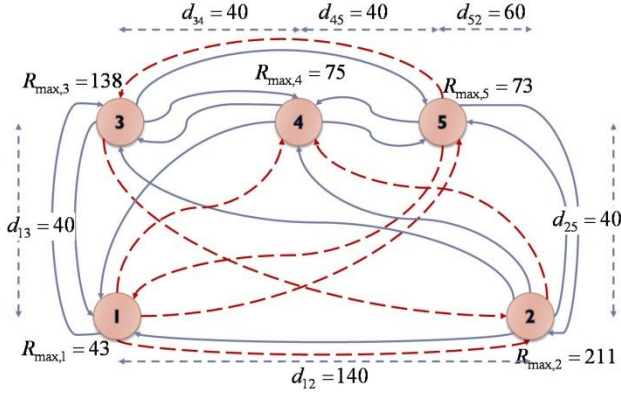
Grafiksel olarak geri dönüş yol uzunluğunun en yüksek değerinin sınırlandırılmasının etkisini göstermek amacı ile Şekil 4.1'deki küçük ölçekli bir topoloji örneği üzerinde gösterim yapılmıştır [93]. Şekil 4.1, belirlenen parametreler sonucu elde edilen en iyi yol sonuçlarını göstermektedir. Her ağ yapısında, algılayıcı düğümlerin ürettiği veri bire göre normalize edilerek, her bir bağlantının üstünde veri akışında gerçekleşen değeri yazılmıştır. Baz istasyonu düğüm-1 olarak gösterilmektedir.

Şekil 4.1(a), ağ topolojisi üzerindeki kullanılabilir linkleri göstermektedir. Buna göre, $R_{het} = R_{nom} = 125$ için alıcı ve verici arasındaki mesafe, kaynak düğümün menzilinden daha fazla ise veri iletimi gerçekleştirilememektedir. Bu durumu ifade etmek için kesikli çizgi; alıcı ve verici arasında veri iletimi yapılabiliriyorsa da düz çizgi ile gösterim yapılmıştır.

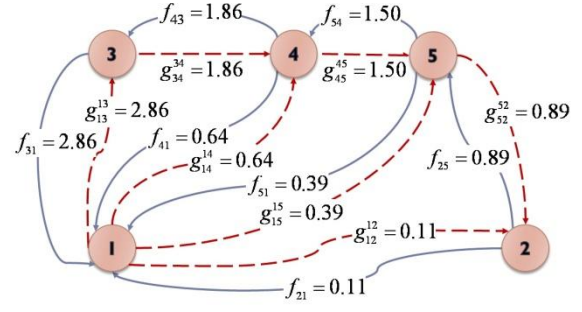
Şekil 4.1'deki tüm topolojilerin ağ yaşam süreleri Şekil 4.1(c)'deki ağ yaşam süresine göre normalize edilmiştir.

$R_{nom} \rightarrow \infty$ için elde edilen eniyileme sonuçları Şekil 4.1(b)'de gösterilmiştir. Bu durumda vericilerin gönderim güçlerinde herhangi bir sınırlama yapılmadığı gibi, verici gönderim gücünün sonsuz olduğu kabul edilmiştir

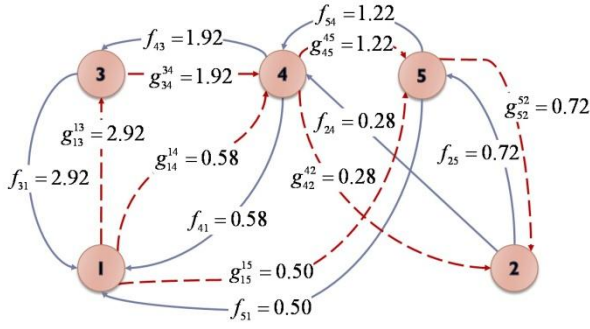
⁶⁹ İng. General Algebraic Modelling System – GAMS



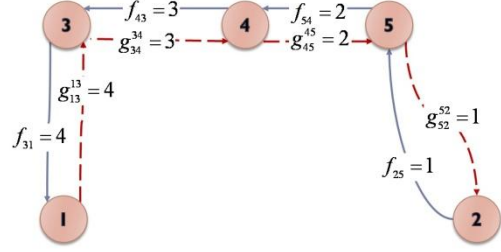
(a)



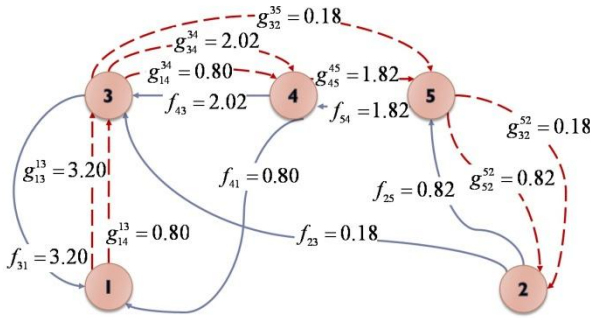
(b)



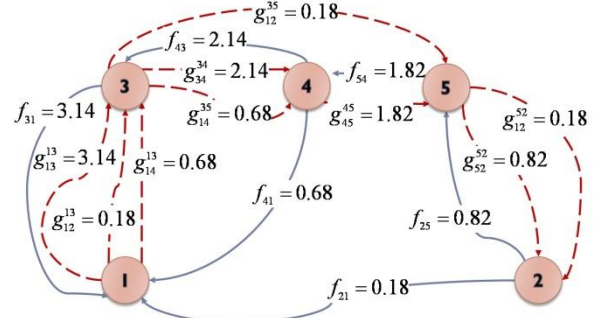
(c)



(d)



(e)



(f)

Şekil 4.1. Küçük Topoloji Örneği

Şekil 4.1(c)'de ise veri gönderim gücünün herhangi bir güç ayrışıklığı olmadan kısıtlanmasının etkileri görülmektedir ($R_{het} = 0$). Veri gönderim gücünün kısıtlanması, bazı bağlantıların kullanılmamasına ve ağ yaşam süresinde %2'lik azalma yaşanmasına sebep olmuştur. Bu durumda, $R_{nom} \rightarrow \infty$ ve $R_{nom} = 125$ için $R_{het} = 0$ iken normalize ağ yaşam süreleri sırasıyla 1.02 ve 1.00 çıkmıştır.

Veri gönderim gücündeki farklılık değeri ($R_{het} = 125$) için yapılan çalışmalarda, ağ yaşam süresi $L_{RPHD} = 1$ için Şekil 4.1(d)'de 0.71, $L_{RPHD} = 2$ için Şekil 4.1(e)'de 0.88 ve $L_{RPHD} = 3$ için Şekil 4.1(f)'de 0.90 olarak bulunmuştur. $L_{RPHD} > 3$ için yapılan çalışmalarda, ağ yaşam süresinin $L_{RPHD} = 3$ ile aynı olduğu görülmüştür.

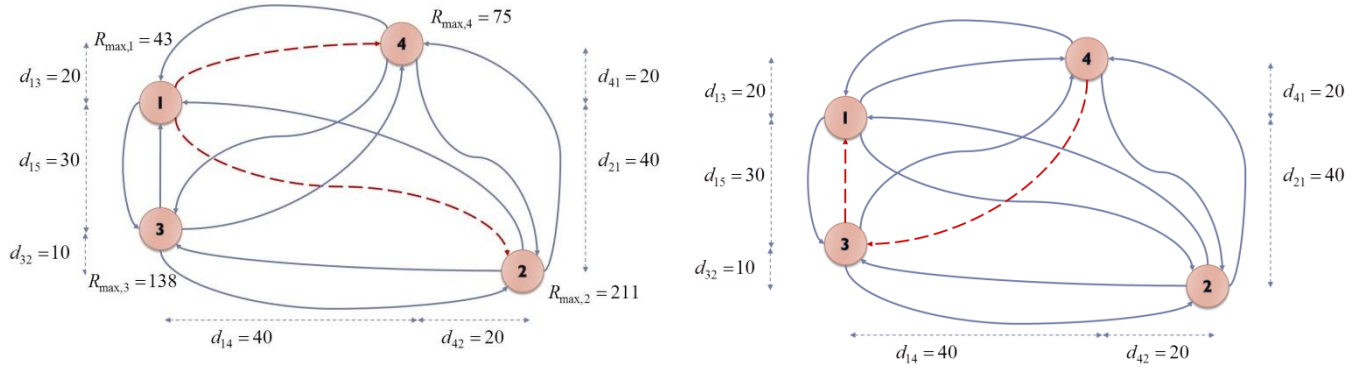
Tek yönlü bağlantıların ağ üzerinde kullanımına izin verilmesi sonucunda ağdaki enerji dağılımı daha dengeli bir hal almış ve ağ yaşam süresinde dikkate değer bir gelişme sağlanmıştır. Fakat bu gelişmenin önemli bir kısmı tek bir röle düğümünün geri dönüş yolunda kullanılması yoluyla da sağlanabilmektedir. Örneğin, Şekil 4.1(d)'deki $L_{RPHD}=1$ için 3 numaralı düğüm diğer algılayıcı düğümlerden gelen veriler için ağır bir röle durumunda olduğundan, darboğaz haline gelmiştir. Buna karşı Şekil 4.1(e)'deki $L_{RPHD} = 2$ için 3 ve 4 numaralı düğümler bu ağır yükü paylaşarak, 3 numaralı düğümün enerjisinin erkenden bitmesini önlemişlerdir.

L_{RPHD} 'nin daha fazla artırılmasının ağ yaşam süresine ciddi bir etkisi olmadığı görülmektedir.

$L_{RPHD} = 3$ için düğüm-2 verisinin küçük bir kısmını (0.18) doğrudan baz istasyonu düğüm-1'e iletmekteyken, düğüm-2'nin çoğu verisi (0.82) diğer düğümler tarafından iletilmektedir. Bunun iki sebebi vardır:

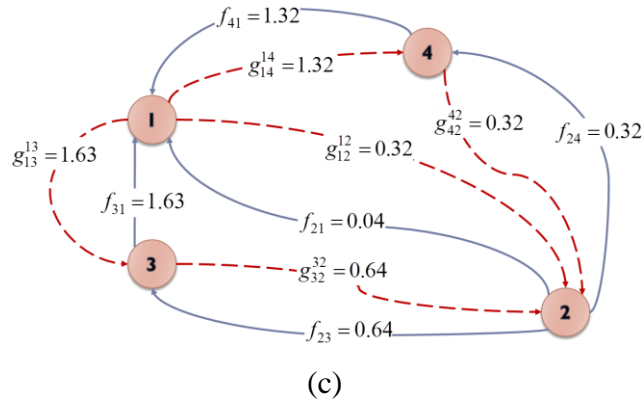
- (i) Düğüm-1'den düğüm-2'ye gerçekleşen ACK akımının 3 atlama ile gerçekleşmesi ve ağ üzerindeki diğer düğümlerde fazladan enerji harcanmasına sebep olması
- (ii) Düğüm-1 ve düğüm-2 arasındaki mesafenin çok fazla olması ve doğrudan veri göndermenin, röle kullanmaktan daha fazla enerji harcamasına sebep olması

Şekil 4.2'de ise paket işleme ve veri edinme işlemleri ile tekrardan yapılandırılarak farklı bir örnek topolojide elde edilen sonuçlar gösterilmiştir. Şekil 4.2, Şekil 4.1 ile aynı özellikleri taşımaktadır; yani belirlenen parametreler sonucu elde edilen en iyi yol atama sonuçları gösterilmektedir. Her ağ yapısında, algılayıcı düğümlerin ürettiği veri 1'e göre normalize edilmiş, her bağlantının üstüne veri akışında gerçekleşen değerler yazılmıştır. Baz istasyonu düğüm-1 olarak gösterilmektedir.

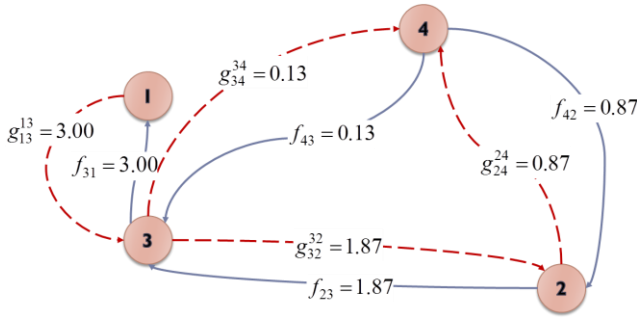


(a)

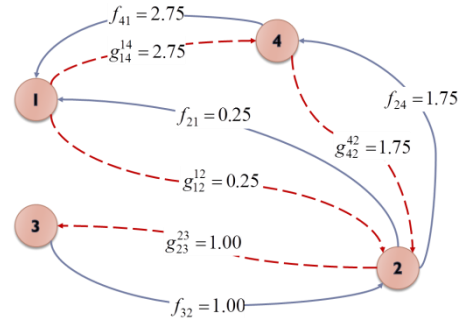
(b)



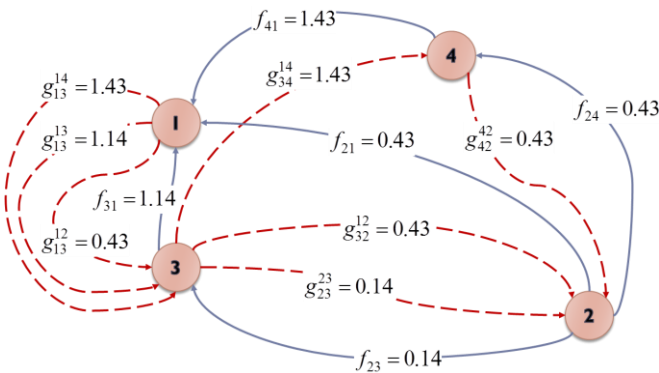
(c)



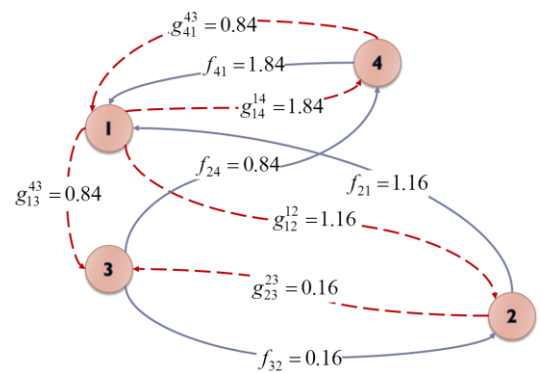
(d)



(e)



(f)



(g)

Şekil 4.2. Geliştirilmiş Küçük Topoloji Örneği

Şekil 4.2(a), düğümlerde oluşturulan veri gönderim gücü ayrışıklığı sonucu oluşan tek yönlü bağlantıları içermektedir. Burada, $R_{nom} = 125$ ve $R_{het} = 125$ olarak belirlenmiştir. Ağ üzerinde birbiri ile bağlantı kurabilecek düğümler arasında düz çizgi ile bir gösterim yapılmışken, birbirine veri gönderemeyecek düğümler arasında kesikli çizgi çizilmiştir.

Şekil 4.2(b) ise ağ üzerinde oluşan çeşitli sebeplerden dolayı bağlantı kopmasını tasvir eden çalışmayı içermektedir. Burada ise tüm düğümlerin veri gönderim mesafesi için $R_{max} = R_{nom} = 125$ ve $pl = 0.2$ olarak belirlenmiştir. Bu pl değerinden daha küçük pl_i değerine sahip bağlantılarda tek yönlülük oluşturulmuş ve kopan bağlantılar kesikli çizgi ile gösterilmişken, daha yüksek değerlere sahip pl_i bağlantıları çift yönlü olarak bırakılmıştır.

Şekil 4.2'de elde edilen sonuçlar Şekil 4.2(c)'ye göre normalize edilmişlerdir. Şekil 4.2(c)'deki düğümler $R_{nom} = 125$ ve $R_{het} = 0$ özelliğine sahip olup herhangi bir P-model çalışması uygulanmadan elde edilen sonuçları içermektedirler.

Şekil 4.2(d) ve Şekil 4.2(f), geliştirilmiş KTP yapısı ile oluşturulan D-Model sonuçlarını içermektedir. Şekil 4.2(d)'de $R_{het} = R_{nom} = 125$ ve $L_{RPHD} = 1$ iken, yaşam süresi 0.57 olarak bulunmuştur.

Şekil 4.2(f)'de $R_{het} = R_{nom} = 125$ ve $L_{RPHD} = 2$ iken yaşam süresi ise 0.93 olarak bulunmuştur. Bu kadar büyük bir artış Şekil 4.2(d)'deki 3 numaralı düğümün dar boğaz olmasından ve dolayısıyla Şekil 4.2(f)'de 4 ve 2 numaralı düğümlerin, 3 numaralı düğümdeki veri akışının bir kısmını üstlenerek erkenden enerjisinin bitmesini önlemeleri ile mümkün olmuştur.

Şekil 4.2(e) ve Şekil 4.2(g), geliştirilmiş KTP yapısı ile oluşturulan P-Model sonuçlarını içermektedir. Şekil 4.2(e)'de $pl = 0.2$ ve $L_{RPHD} = 1$ iken yaşam süresi 0.51 olarak bulunmuştur.

Şekil 4.2(g)'de $pl = 0.2$ ve $L_{RPHD} = 2$ iken yaşam süresi ise 0.71 olarak bulunmuştur. Bu artışın, D-model çözümüne göre daha az olmasının sebebi ise 1 ve 3 numaralı düğümler arasındaki bağlantının tek yönlü olarak gerçekleşmesinden kaynaklanmaktadır. Baz istasyonuna en yakın düğümün, baz istasyonu ile veri iletişimi içinde olmaması sonucunda,

daha uzaktaki düğümler, daha çok güç harcayarak verilerini baz istasyonuna iletmek durumunda kalmışlardır. Bu durumda ağdaki enerji hedeflendiği kadar iyi kullanılamamıştır.

Şekil 4.2'deki çalışmalar için, $L_{RPHD} \geq 2$ değerlerinde, $L_{RPHD} = 2$ ile aynı sonuçlar elde edilmiştir. Bu yüzden bu sonuçlar grafiksel olarak eklenmemiştir.

4.2 Büyük Topoloji Çalışması

Geri dönüş yol uzunluğunun ağ yaşam süresi üzerindeki etkisini daha büyük topolojilerde incelemek üzere sabit yerleştirilmiş algılayıcılardan oluşan ve merkezde baz istasyonu olan bir yapı üzerinde çalışılmıştır. Bu çalışma yapılırken 1.000 metre çapındaki bir disk içine eşit aralıklarla en iyi şekilde yerleştirilmiş N noktanın koordinatları kullanılmıştır [94].

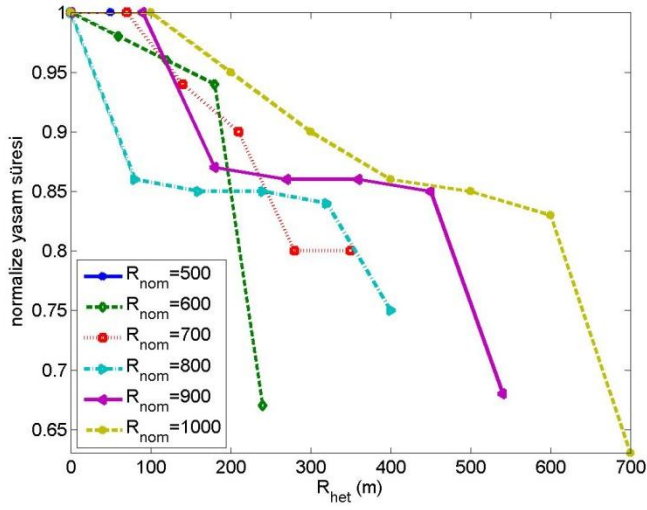
Şekil 4.3'de $L_{RPHD} = 1$ için farklı N , R_{nom} ve R_{het} için sonuçlar yer almaktadır [95].

Şekil 4.3 için elde edilen değerler normalize değerlerdir. Bunun için $L_{RPHD} = 1$ için elde edilen ağ yaşam süreleri $L_{RPHD} \rightarrow \infty$ 'a göre elde edilen ağ yaşam sürelerine bölünmüştür.

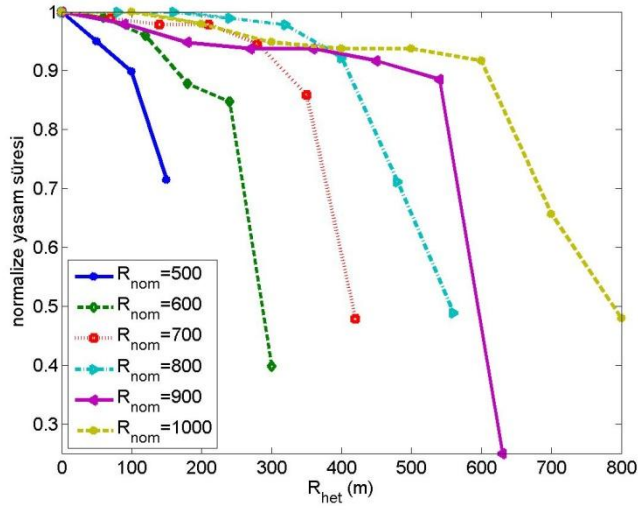
KTP problemi rastgele her bir düğüm için seçilen 20 farklı rastgele veri gönderim gücü için çözülmüş ve ortalamaları alınarak Şekil 4.3'te gösterilmiştir. R_{het} 'in tüm değerleri için ağ yaşam süreleri gösterilmemiştir. Zira R_{het}/R_{nom} 'un yüksek değerlerinde $L_{RPHD} = 1$ için herhangi bir bağlı topoloji bulunamamaktadır. Örneğin $N = 20$ ve $R_{nom} = 800 m$ 'de $R_{het} > 400 m$ için topolojilerde bağlantı bulunamamıştır.

$L_{RPHD} = 1$ için veri gönderim gücündeki ayrışıklık arttıkça, ağ yaşam süresinde azalma gözlemlenmektedir. Başka bir deyişle, özellikle yüksek veri gönderim gücü ayrışıklığında, tek yönlü bağlantıların kullanılması, ağın mümkün olan yüksek yaşam süresine ulaşmasını engellediği gibi, yaşam süresini de azaltmaktadır.

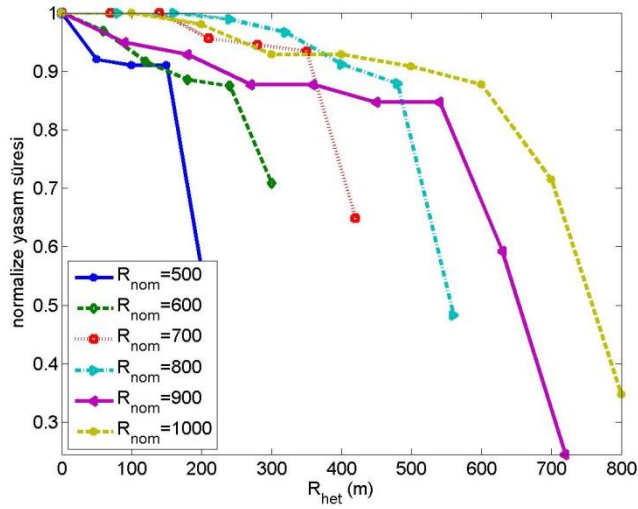
$L_{RPHD} = 2$ için yapılan çalışmalarda, normalize yaşam süresinin bütün parametre uzayında %2'den daha az bir düşüş gösterdiği görülmüştür. Bu durum, grafiksel olarak ifade edilmemiştir; fakat tek yönlü bağlantılarda geri dönüş yolunda bir adet röle düğümü kullanılması, ağ yaşam süresini ciddi anlamda eniyilenmiş sonuca götürmektedir.



(a) $N=20$



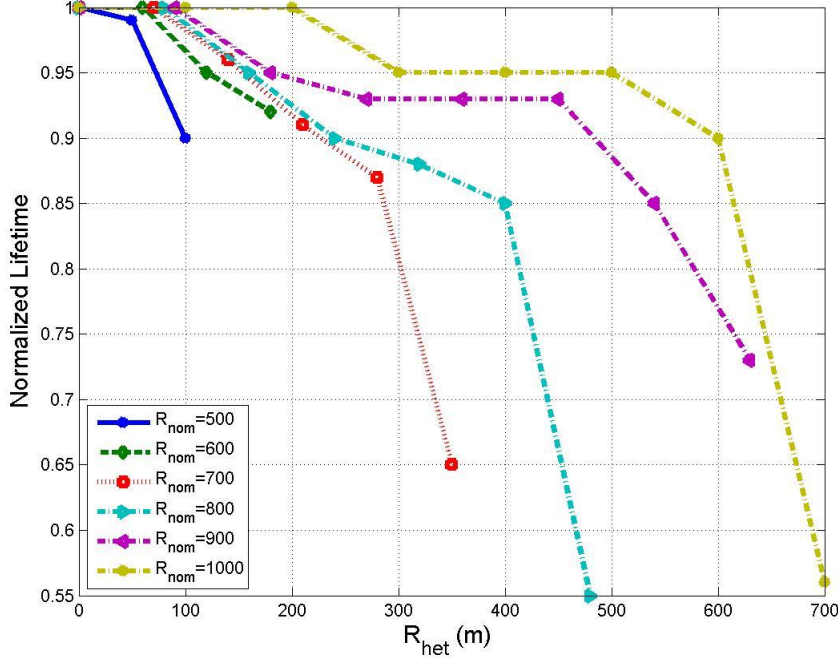
(b) $N=25$



(c) $N=30$

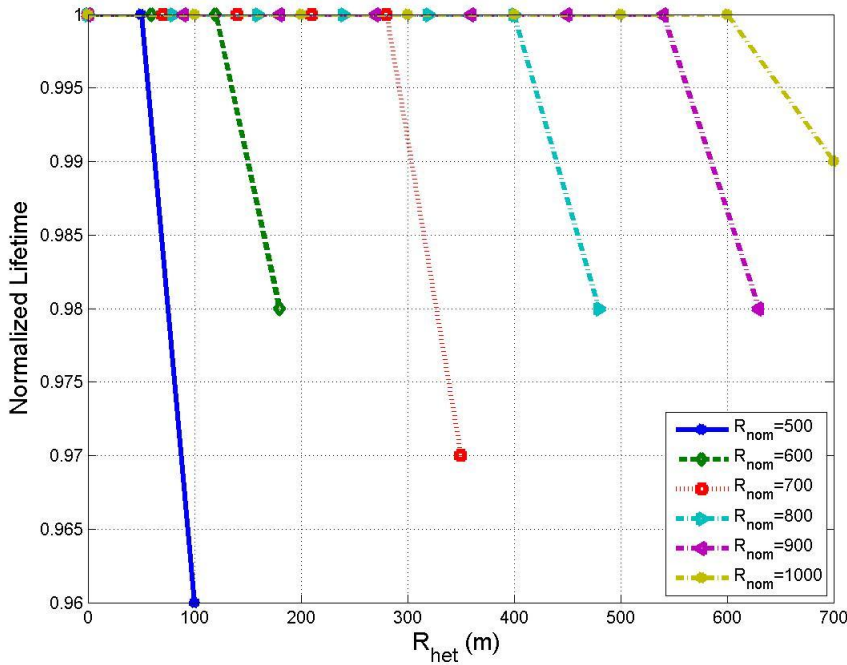
Şekil 4.3. $L_{RPHD} = 1$ için normalize yaşam süreleri

Şekil 4.4, Şekil 4.5 ve Şekil 4.6’da ise geliştirilmiş KTP yapısı ile sırasıyla $N = 20, N = 25$ ve $N = 30$ için elde edilmiş değerler gösterilmiştir. Şekillerin üst kısımlarında $L_{RPHD} = 1$ için elde edilen sonuçlar, alt kısımlarında ise $L_{RPHD} = 2$ için elde edilen sonuçlar vardır.



(a)

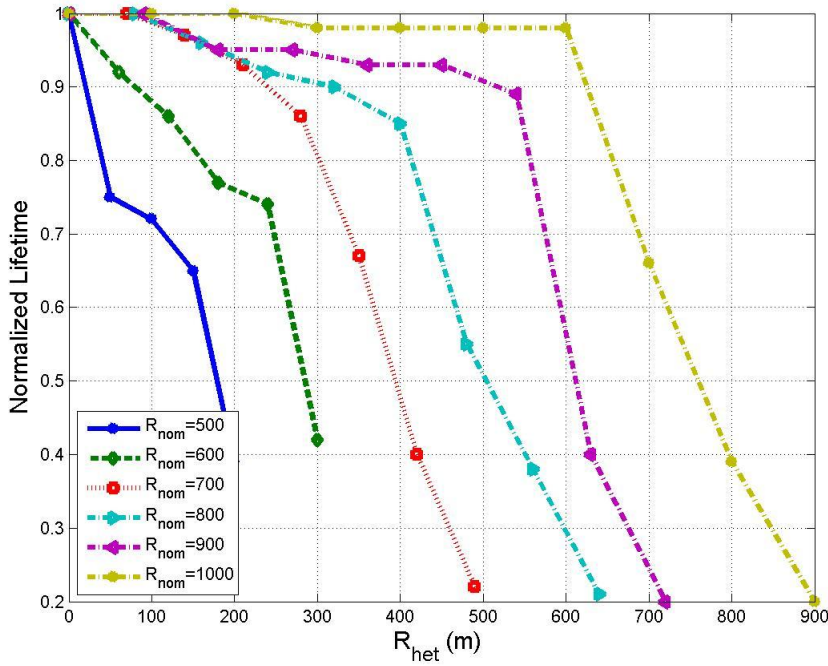
$L_{RPHD} = 1$



(b)

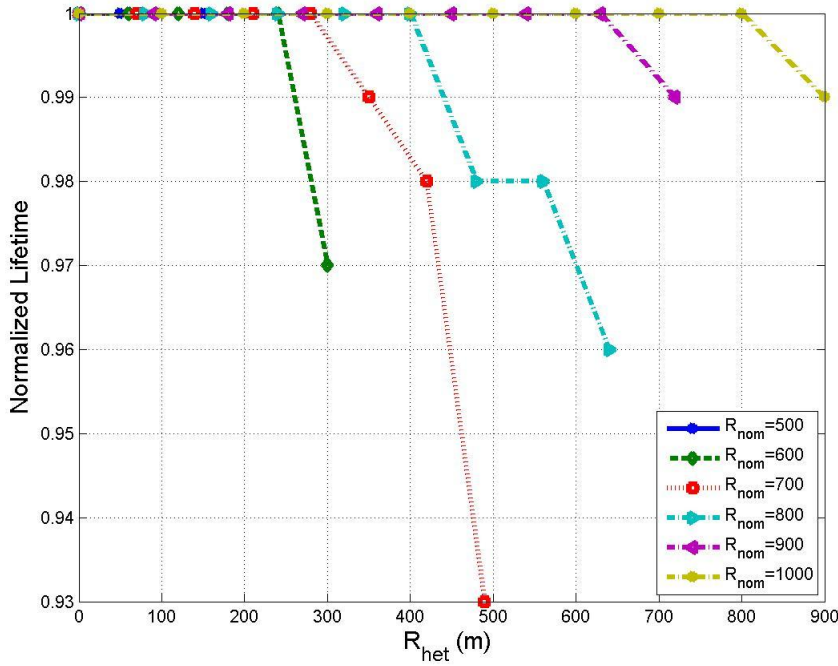
$L_{RPHD} = 2$

Şekil 4.4. $N = 20$ için Büyük Topoloji D-Model Çalışması



(a)

$$L_{RPHD} = 1$$

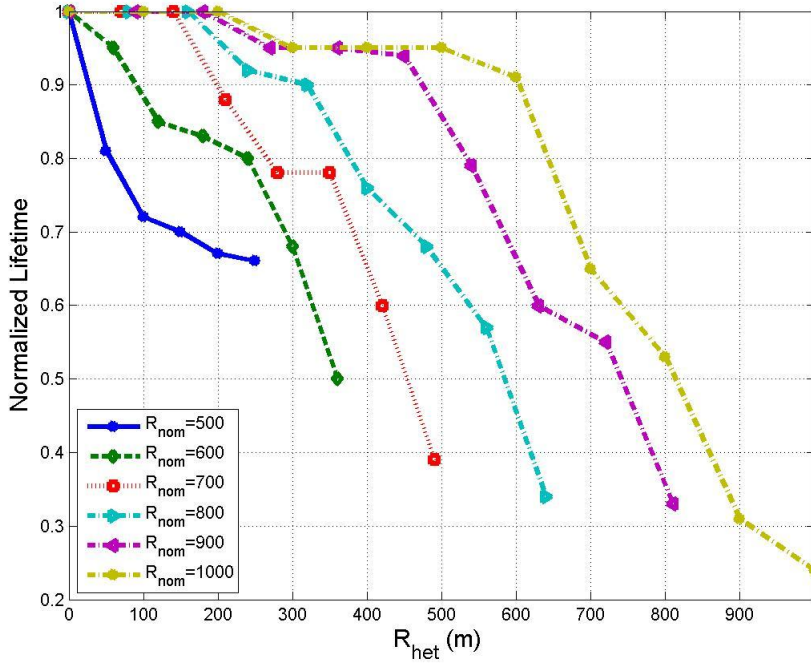


(b)

$$L_{RPHD} = 2$$

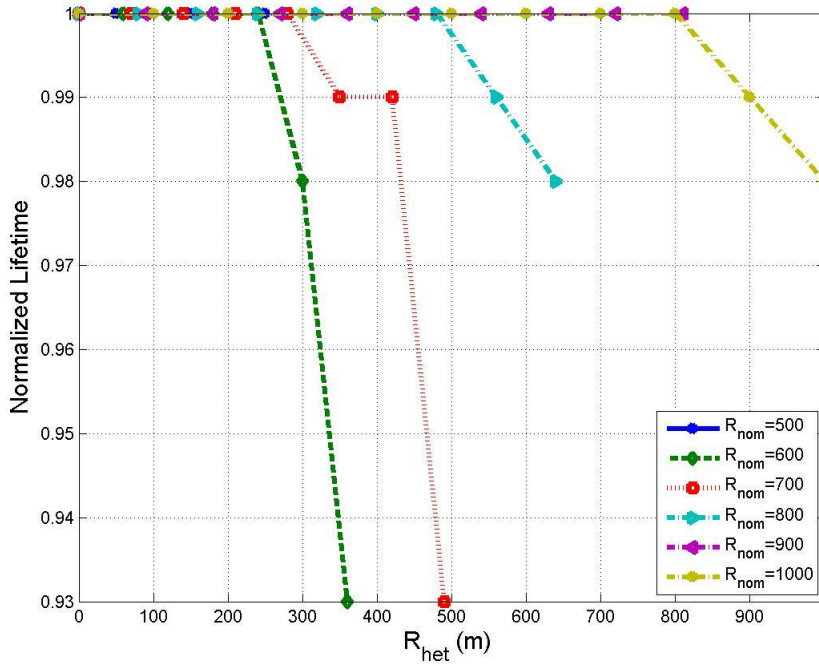
Şekil 4.5. $N = 25$ için Büyük Topoloji D-Model Çalışması

Bu çalışmaların üstüne, geliştirilmiş KTP yapısı kullanılarak farklı düğüm sayılarında P-Model çözümleri de yapılmıştır. Bu çalışmalar sırasıyla Şekil 4.7 Şekil 4.8 ve Şekil 4.9'da gösterilmiştir. Şekil 4.7'de $N = 20$ düğüm için, Şekil 4.8'de $N = 25$ ve Şekil 4.9'da ise



(a)

$$L_{RPHD} = 1$$

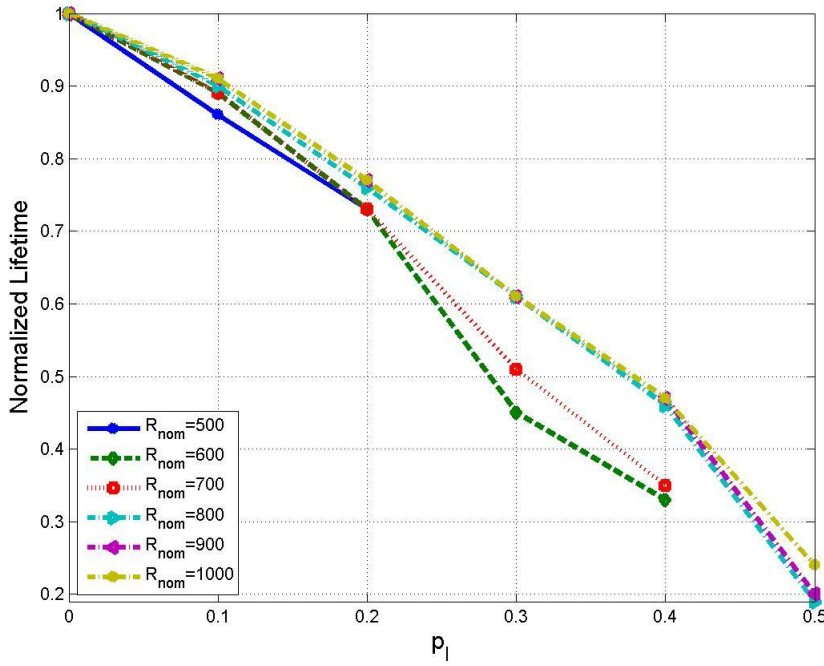


(b)

$$L_{RPHD} = 2$$

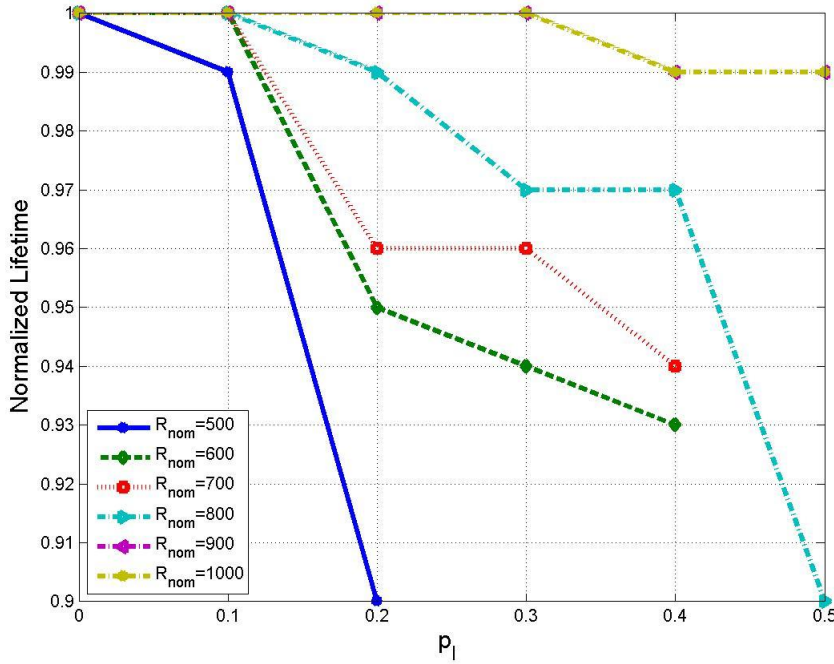
Şekil 4.6. $N = 30$ için Büyük Topoloji D-Model Çalışması

$N = 30$ düğüm için sonuçlar verilmiştir. Bu şekillerin üst tarafları $L_{RPHD} = 1$ için ayrılmışken alt taraflarında $L_{RPHD} = 2$ için yapılan çözümler gösterilmiştir.



(a)

$$L_{RPHD} = 1$$

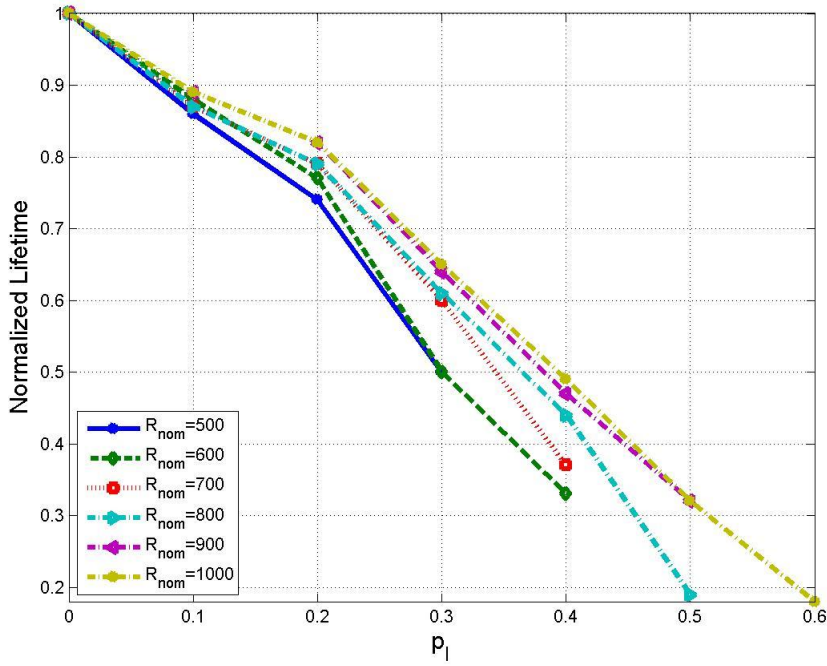


(b)

$$L_{RPHD} = 2$$

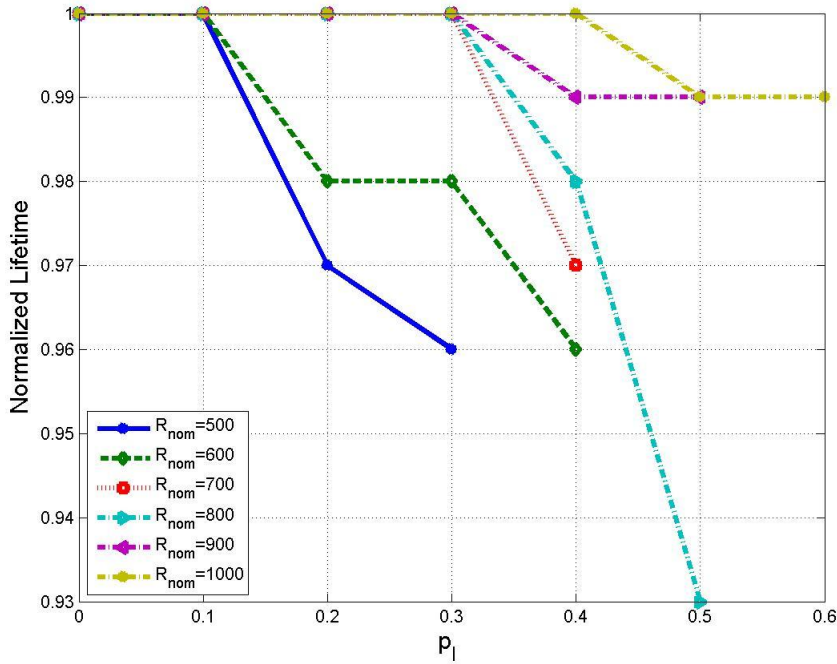
Şekil 4.7. $N = 20$ için Büyük Topoloji P-Model Çalışması

Bu çalışmalarda, Şekil 4.3'te ifade edilen özelliklerin aynısı geçerli sayılmıştır. Kullanılan topoloji koordinatları, ilk çalışmadaki gibi, 1.000 metre çapında sabit bir diskin içerisine eşit aralıklarla en iyi şekilde yerleştirilmiş N adet düğüm için çözülmüştür [92]. Gösterimi yapılan değerler $L_{RPHD} \rightarrow \infty$ göre normalize edilmiş değerlerdir.



(a)

$$L_{RPHD} = 1$$

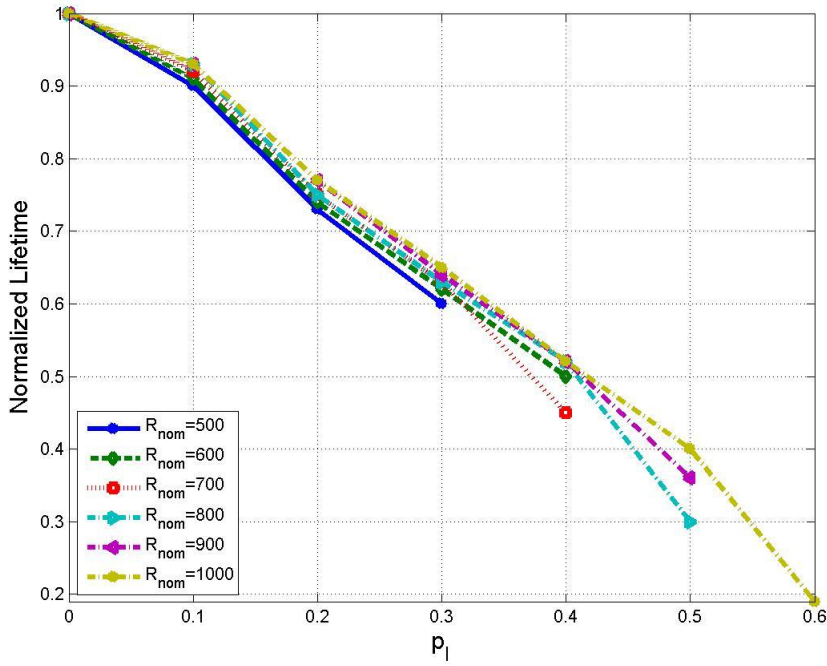


(b)

$$L_{RPHD} = 2$$

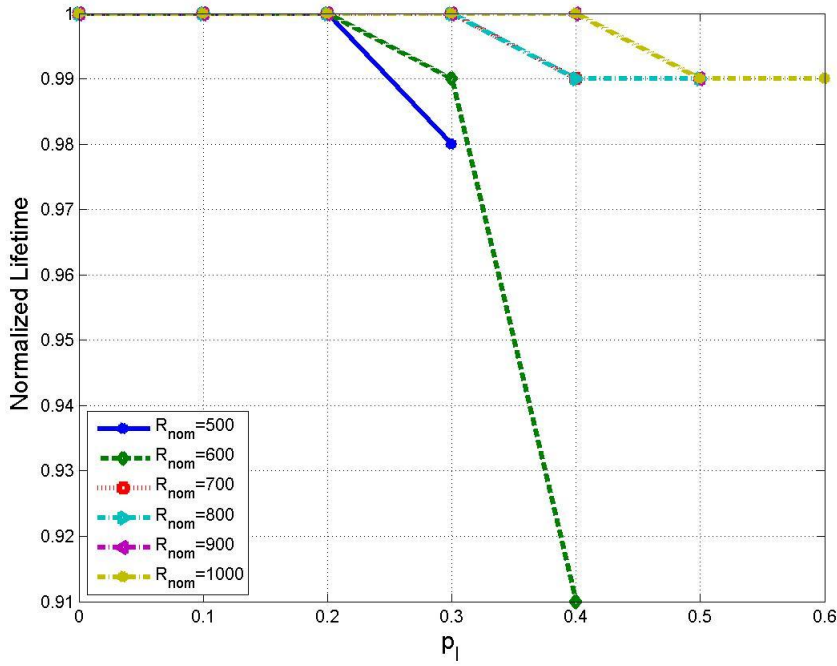
Şekil 4.8. $N = 25$ için Büyük Topoloji P-Model Çalışması

Bütün şekillerde dikkate değer bir sonuç, $L_{RPHD} = 1$ için veri gönderim gücü ayrışıklığı veya tek yönlü bağlantı oluşma ihtimali arttıkça yaşam süresinin sürekli azalır olması ve en iyi yaşam süresi sonucundan uzaklaşılmasıdır. $L_{RPHD} = 2$ için elde edilen sonuçlarda yaşam süresinin en fazla %90 değerine düştüğü ve bundan daha fazla azalmadığı görülmüştür.



(a)

$$L_{RPHD} = 1$$



(b)

$$L_{RPHD} = 2$$

Şekil 4.9. $N = 30$ için Büyük Topoloji P-Model Çalışması

Geliştirilmiş KTP yapısı ve daha önce hazırlanan KTP çalışması arasında benzer özellikler gözlenmesi, ağ üzerinde sadece bir röle düğümü kullanılması ile ağ yaşam süresinin %70 kadar arttırılabileceğini ortaya koymuştur. $L_{RPHD} \geq 3$ için elde edilen sonuçlar $L_{RPHD} \rightarrow \infty$ ile aynıdır.

5. SONUÇ

Tezin bu kısmında, ilk olarak KAA'larda tek yönlü bağlantıların geri dönüş yol uzunluğunun sınırlandırılması sonucu, ağ yaşam süresine etkileri özgün bir KTP çalışması ile incelenmiştir.

Çalışmada, geri dönüş yol uzunluğunun "1" ile kısıtlanmasının, geri dönüş yol uzunluğunun kısıtlanmamasına göre ağ yaşam süresinin %70'e kadar azaldığı görülmüştür.

Bunun yanında, eğer geri dönüş yol uzunluğu "2" ile kısıtlanırsa, ağ yaşam süresinde dikkate alınmayacak kadar (%2'lik) bir azalma yaşanmıştır.

Buna ek olarak, tek yönlü bağlantıların geri dönüş yolunda tek bir röle kullanılmasıyla optimal sonuca yakın bir sonuç elde edilirken, birden fazla röle düğümü kullanmanın dikkate değer bir ağ yaşam süresi kazancı sağlamadığı ortaya çıkmıştır.

İkinci olarak yapılan çalışmada, var olan KTP programı geliştirilmiş ve üzerine daha gerçekçi bir model oluşturmak amacıyla veri ve paket işlemek üzere harcanan güçler için eklemeler yapılmıştır. Bunun yanında, ağ üzerindeki çift yönlü bağlantıların tek yönlü bağlantılara dönüşmesi olasılığı ile ilgili olan bir KTP daha oluşturulmuştur.

Bu yeni çalışmalarda elde edilen sonuçlara göre, $L_{RPHD} = 1$ için ağdaki yaşam süresinin ilk çalışmaya benzer olarak %70-%80 düştüğü gözlemlenmiştir.

Bu sonuçlara rağmen tek yönlü bağlantı oluşması durumunda bir röle kullanılması ağın yaşam süresini olası en iyi yaşam süresinden en az %10'luk bir farklılıkla yakınlaştırmaktadır.

Eğer geri dönüş yol uzunluğunda "2" adet röle düğümü kullanılırsa, ağın yaşam süresi en iyi sonucuna kavuşmaktadır. Geri dönüş yol uzunluğunda ikiden fazla röle kullanmak ağın yaşam süresini etkilememektedir.

KAYNAKLAR

- [1] D. M. Arjomadi, *Classification of Unmanned Aerial Vehicles*, Avusturalya: University of Adelaide.
- [2] K. Kerimoğlu, *Sabit Kanatlı Bir İnsansız Hava Aracı İçin Düşük Bütçeli Otopilot Sistemi Tasarımı*, Yüksek Lisans Tezi, FBE: TOBB ETÜ, 2012.
- [3] A. R, *Unmanned Aircraft Systems UAVS Design, Development and Deployment*, Chippenham, Wiltshire, UK: Wiley, 2010.
- [4] "AV-8A", erişim adresi: <http://www.marines.mil/>, erişim tarihi: 14.04.2013.
- [5] J. Leishman, *The Brèguet-Richet Quad-Rotor Helicopter of 1907*.
- [6] "Brèguet-Richet Gyroplane-No.1", erişim adresi, http://www.aviastar.org/helicopters_eng/breguet_gyro.php, erişim tarihi: 15.04.2013.
- [7] "History of The Helicopter", erişim adresi: <http://www.century-of-flight.net/>, erişim tarihi: 15.04.2013.
- [8] «Flight Global,» p. 125, 1 Mart 1923.
- [9] B. Erginer, *Quadrotor VTOL Aracının Modellenmesi ve Kontrolü*, İstanbul: FBE, İstanbul Teknik Üniversitesi, 2007.
- [10] "Convertawings Model-A", erişim tarihi: 15.04.2013, erişim adresi: <http://homepages.paradise.net.nz/jameskea/>.
- [11] «Flight Global,» p. 722, 2 Kasım 1956.
- [12] "Curtiss-Wright VZ-7", erişim adresi: http://www.aviastar.org/helicopters_eng/curtiss_vz-7.php, erişim tarihi: 15.04.2013.
- [13] "Parrot AR. Drone", erişim adresi: <http://ardrone2.parrot.com/>, erişim tarihi: 16.04.2013.
- [14] Kroo, Ilan, et al, *The Mesicopter: A miniature rotorcraft concept-phase ii interim report*, 2000.
- [15] "DroganFly", erişim adresi: <http://www.draganfly.com/uav-helicopter/drganflyer-x4/>, erişim tarihi : 16.04.2013 .
- [16] G. Hoffmann, «The Stanford testbed of autonomous rotorcraft for multi agent control (STARMAC),» *Digital Avionics Systems Conference*, cilt 2, no. The 23rd, 2004.

- [17] "Pennsilvanya Eyalet Üniversitesi, GRASP", erişim adresi: <https://www.grasp.upenn.edu/>, erişim tarihi: 30.05.2013.
- [18] Lenz, Ian, Mevlana Gemici, and Ashutosh Saxena, Low-power parallel algorithms for single image based obstacle avoidance in aerial robots, Intelligent Robots and Systems (IROS), 2012 IEEE/RSJ International Conference on. IEEE, 2012.
- [19] Bills, Cooper, Joyce Chen ve Ashutosh Saxena, Autonomous MAV flight in indoor environments using single image perspective cues, Robotics and automation (ICRA), 2011 IEEE international conference on. IEEE, 2011..
- [20] P. Pounds, Design of a four-rotor aerial robot, Australasian Conference on Robotics and Automation, Vol.27.2002.
- [21] Bouabdallah, Samir, Andre Noth, and Roland Siegwart, PID vs LQ control techniques applied to an indoor micro quadrotor, 2004.(IROS 2004). Proceedings. 2004 IEEE/RSJ International Conference on. Vol. 3. IEEE, 2004.
- [22] Abzug, Malcolm J., and E. Eugene Larrabee, Airplane stability and control: a history of the technologies that made aviation possible, Vol.14: Cambridge University Press , 2005.
- [23] Anıl Ufuk Batmaz, Övünç Elbir, Coşku Kasnaoğlu , QUADROTOR ROLL AND PITCH STABILIZATION USING SYSTEM IDENTIFICATION BASED REDESIGN OF EMPIRICAL CONTROLLERS, Innsbruck, Austria: MIC 2013.
- [24] "Flight Dynamics", erişim adresi [http://en.wikipedia.org/wiki/Flight_dynamics_\(fixed-wing_aircraft\)](http://en.wikipedia.org/wiki/Flight_dynamics_(fixed-wing_aircraft)), erişim tarihi : 18.04.2013.
- [25] A. W. Babister, Aircraft dynamic stability and response, Oxford: Pergamon Press, 1980.
- [26] McCormick, Barnes Warnock, Barnes Warnock McCormick, and Barnes Warnock McCormick, Aerodynamics, aeronautics, and flight mechanics, Vol. 2, New York: Wiley, 1995.
- [27] Etkin, Bernard, and Lloyd Duff Reid, Dynamics of flight: Stability and control, New York: Wiley, 1982.
- [28] "Four Forces on an Airplane", erişim adresi: <http://www.grc.nasa.gov/WWW/k-12/airplane/forces.html>, erişim tarihi:18.04.2013.
- [29] S. Bouabdallah, Design and control of quadrotors with application to autonomous flying, Lausanne: EPFL, 2007.
- [30] "Lawrence Sperry: Autopilot Inventor and Aviation Innovator", erişim adresi : <http://www.historynet.com/lawrence-sperry-autopilot-inventor-and-aviation-innovator.htm>, erişim tarihi : 22.04.2013.

- [31] Chao, HaiYang, YongCan Cao, and YangQuan Chen, «Autopilots for small unmanned aerial vehicles: a survey,» *International Journal of Control, Automation and Systems*, cilt 8, no. 1, pp. 36-44, 2010.
- [32] O. B. Ertin, Sabit Kanatlı Bir İnsansız Hava Aracı İçin Otopilot Sistemi Geliştirmede Döngüde Donanım Tabanlı Yaklaşım Ve Örnek Bir Sistemin Oluşturulması, TOBB ETU.: Yüksek Lisans Tezi, FBE, 2013.
- [33] A. e. a. Sanchez, «Hovering flight improvement of a quad-rotor mini UAV using brushless DC motors,» *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, cilt 61, no. 1-4, pp. 85-101, 2011.
- [34] "Airhacks", erişim adresi: http://airhacks.org/?page_id=204, erişim tarihi:19.04.2013.
- [35] "Airhacks", erişim adresi: http://airhacks.org/?page_id=219, erişim tarihi:20.04.2013.
- [36] Cappelle C., Pomorski D., Yang Y., GPS/INS Data Fusion for Land Vehicle Localization, Beijing, China: Computational Engineering in Systems Applications, Ekim 2006.
- [37] Barnea, Alexandru, et al., «IMU (Inertial Measurement Unit) Integration for the Navigation and Positioning of Autonomous Robot Systems,» *Journal of Control Engineering and Applied Informatics*, cilt 13, no. 2, pp. 38-43, 2011.
- [38] "Turnigy Talon Carbon Fiber Quadcopter Frame", erişim adresi: http://www.hobbyking.com/hobbyking/store/__22397__Turnigy_Talon_Carbon_Fiber_Quadcopter_Frame.html, erişim tarihi: 27.04.2013.
- [39] "Hobbyking X666 Glass Fiber Quadcopter Frame 666mm", erişim adresi: http://www.hobbyking.com/hobbyking/store/__24227__Hobbyking_X666_Glass_Fiber_Quadcopter_Frame_666mm.html, erişim tarihi:27.04.2013.
- [40] "Extra Large EPP Quadcopter Frame 450mm", erişim adresi: http://www.hobbyking.com/hobbyking/store/__25420__Extra_Large_EPP_Quadcopter_Frame_450mm_835mm_total_width_.html, erişim tarihi: 27.04.2013.
- [41] "Turnigy D3536/9 910KV Brushless Outrunner Motor", erişim adresi:http://www.hobbyking.com/hobbyking/store/__18229__Turnigy_D3536_9_910_KV_Brushless_Outrunner_Motor.html, erişim tarihi: 27.04.2013.
- [42] "Turnigy Aerodrive SK3", erişim adresi : http://www.hobbyking.com/hobbyking/store/uh_viewItem.asp?idProduct=18152, erişim tarihi : 19.05.2013.
- [43] 12x4.5 Quadrocopter Pervanesi, erişim adresi: <https://thkmodelucak.com/store/product/1311-12x45-quad-pervane>, erişim tarihi: 20.05.2013.

- [44] "10x4.5 SF Props 2pc Standard Rotation/2 pc RH Rotation (Blue)", erişim adresi: http://www.hobbyking.com/hobbyking/store/__25819__10x4_5_SF_Props_2pc_Standard_Rotation_2_pc_RH_Rotation_Blue_.html, erişim tarihi: 19.05.2013.
- [45] ZIPPY Compact 3700mAh 3S 25C Lipo Pack, erişim adresi: http://www.hobbyking.com/hobbyking/store/uh_viewitem.asp?idproduct=21355, erişim tarihi: 20.05.2013.
- [46] "Li-Po ZIPPY Compact 2700mAh 3S 25C Lipo Pack", erişim adresi: http://www.hobbyking.com/hobbyking/store/uh_viewitem.asp?idproduct=21349, Erişim tarihi: 20.05.2013.
- [47] "THK Model Uçak", erişim adresi: <http://thkmodelucak.com/>, erişim tarihi: 20.05.2013.
- [48] "TURNIGY Plush 30amp Speed Controller", erişim adresi: http://www.hobbyking.com/hobbyking/store/__2164__TURNIGY_Plush_30amp_Speed_Controller.html, erişim tarihi: 20.05.2013.
- [49] "25 A ESC", erişim adresi : http://www.hobbyking.com/hobbyking/store/uh_viewitem.asp?idproduct=2163, erişim tarihi: 19.05.2013.
- [50] "Microstrain 3DM-GX2 IMU", erişim adresi: <http://www.microstrain.com/inertial/3DM-GX2>, erişim tarihi: 20.05.2013.
- [51] "3DM-GX2 Datasheet", erişim adresi: http://files.microstrain.com/3dm-gx2_datasheet_v1.pdf, erişim tarihi: 20.05.2013.
- [52] "ARDUPILOT", erişim adresi: <http://www.diydrones.com/notes/ArduPilot>, erişim tarihi: 27.04.2013.
- [53] "HMC5883", erişim adresi: http://www51.honeywell.com/aero/common/documents/myaerospacelog-documents/Defense_Brochures-documents/HMC5883L_3-Axis_Digital_Compass_IC.pdf, erişim tarihi: 21.05.2013.
- [54] "MPU 6000", erişim adresi: <http://www.invensense.com/mems/gyro/mpu6050.html>, erişim tarihi: 21.05.2013.
- [55] "3DR Telemetry Kit", erişim adresi: <http://store.3drobotics.com/t/parts/telemetry>, erişim tarihi: 21.05.2013.
- [56] "HK6S", erişim adresi: http://www.hobbyking.com/hobbyking/store/__16238__HobbyKing_HK6S_2_4Ghz_FHSS_6Ch_Tx_Rx_Mode_1_.html, erişim tarihi: 22.05.2013.
- [57] "Telemetry", erişim adresi: http://www.hobbyking.com/hobbyking/store/__8991__Turnigy_9X_9Ch_Transmitter_

- w_Module_8ch_Receiver_Mode_1_v2_Firmware_.html, erişim tarihi: 21.05.2013.
- [58] "Telemetry", erişim adresi: http://www.hobbyking.com/hobbyking/store/__24968__Turnigy_4X_FHSS_2_4ghz_Transmitter_and_Receiver_Mode_2_.html, erişim tarihi:21.05.2013.
- [59] "ChipKit Max32", erişim adresi: <http://www.digilentinc.com/Products/Detail.cfm?Prod=CHIPKIT-MAX32>, erişim tarihi: 22.05.2013.
- [60] "MediaTek MT3329 GPS 10Hz", erişim adresi: <http://www.robotshop.com/MediaTek-MT3329-GPS-10Hz-Adapter-Basic,PR-813.html>, erişim tarihi: 22.05.2013.
- [61] "ARDUCOPTER", erişim adresi: <https://code.google.com/p/arducopter/wiki/ArduCopter>, erişim tarihi: 27.04.2013.
- [62] "3DM-GX2 Data Communications Protocol ", Williston,VT: MircoStrain, INC, 01.11.2010.
- [63] "Tilt Sensing Using 3-axis ACC", erişim adresi: http://www.freescale.com/files/sensors/doc/app_note/AN3461.pdf, erişim tarihi: 23.05.2013.
- [64] "ELE 515 Kalman Filtresi", erişim adresi: http://kasnakoglu.etu.edu.tr/ders/ele598/HAFTA%207/html/DERS7_CK01.html, erişim tarihi: 23.05.2013.
- [65] Grewal M. S., Andrews A. P., Kalman Filtering, Theory and Practise Using MATLAB, Hoboken NJ : Wiley, 2008.
- [66] "Kalman Filtresi Denklemleri", erişim adresi: http://en.wikipedia.org/wiki/Kalman_filter, erişim tarihi:23.05.2013.
- [67] Ribeiro M. I., Lima P. , "Introduction to Kalman Filtering", Instituto Superior Técnico / Instituto de Sistemas e Robótica, Ekim 2008.
- [68] "TeraTerm", erişim adresi: <http://logmett.com/index.php?/download/tera-term-477-freeware.html>, erişim adresi: 22.05.2013.
- [69] "Mission Planer", erişim adresi: <https://code.google.com/p/ardupilot-mega/wiki/Mission>, erişim tarihi: 27.04.2013.
- [70] P. Van Overschee and B. De Moor, Subspace identification for linear systems: Theory-Implementation-Applications, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 1996.
- [71] Anıl Ufuk Batmaz, Övünç Elbir ve Coşku Kasnakoğlu, Design of a Quadrotor Roll Controller Using System Identification to Improve Empirical Results, IJMMM 2013 Vol.1(4): 347-349 ISSN: 1793-8198 , Kasım 2013.

- [72] Övünç Elbir, Anıl Ufuk Batmaz, Coşku Kasnakoğlu, IMPROVING QUADROTOR 3-AXES STABILIZATION RESULTS USING EMPIRICAL RESULTS AND SYSTEM IDENTIFICATION, İstanbul, Türkiye: ASCC 2013, 2013.
- [73] Y. Liu, Y. He, M. Li, J. Wang, K. Liu, L. Mo, W. Dong, Z. Yang, M. Xi, J. Zhao ve X. yang Li., Does Wireless Sensor Network Scale? A Measurement Study on GreenOrbs, Proceedings of INFOCOM, 2011.
- [74] R. Szewczyk, J. Polastre, A. Mainwaring ve D. Culler, Lessons from a sensor network expedition, in Proceedings of EWSN, 2004.
- [75] S. Kim, S. Pakzad, D. Culler, J. Demmel, G. Fenves, S. Glaser ve M. Turon, Health Monitoring of Civil Infrastructures Using Wireless Sensor Networks, in Proceedings of ACM/IEEE IPSN, 2007.
- [76] Mehmet Burak Akgün, KABLOSUZ ALGILAYICI AĞLARDA BAĞLANTI SAYISININ SINIRLANDIRILMASININ AĞ ÖMRÜ ÜZERİNDEKİ ETKİLERİNİN İNCELENMESİ, Ankara: TOBB ETÜ, FBE, 2010.
- [77] Geoff Werner-Allen, Konrad Lorincz, Jeff Johnson, Jonathan Lees ve Matt Welsh, Fidelity and yield in a volcano monitoring sensor network, OSDI '06 Proceedings of the 7th symposium on Operating systems design and implementation, Pages 381-396 .
- [78] Kazem Sohraby, Daniel Minoli, Taieb Znati, Wireless Sensor Networks: Technology, Protocols, and Applications, New Jersey: Wiley, 2007.
- [79] Emerson's Smart Wireless Products, erişim adresi: http://www2.emersonprocess.com/siteadmincenter/PM%20Central%20Web%20Documents/SmartWirelessApps_StatoilGullfaks.pdf, erişim tarihi: 08.05.2013.
- [80] Kiran Maraiya, Kamal Kant ve Nitin Gupta, Application based Study on Wireless Sensor Network, International Journal of Computer Applications (0975 – 8887), Volume 21– No.8, May 2011.
- [81] J. Feng, F. Koushanfar, M. Potkonjak, System Architectures for Sensor Networks Issues, Alternatives and Directions, IEEE International Conf on Computer Design (ICCD), Germany, 2002. pp. 226- 231.
- [82] W. Heinzelman, A. Chverakasan, ve H. Balakrishnan, An application specific protocol architecture for wireless microsensor networks, IEEE Transactions on Wireless Communications, vol.1, pp. 660-670, 2002.
- [83] John W. Chinneck, PRACTICAL OPTIMIZATION: A GENTLE INTRODUCTION, Ottawa, Canada: Online kitap: www.sce.carleton.ca/faculty/chinneck/po.html., 2012.
- [84] "Linear Programming", erişim adresi: http://en.wikipedia.org/wiki/Linear_programming, erişim tarihi: 15.05.2013.

- [85] V.Ramasubramanian ve D.Mosse, BRA: a bidirectional routing abstraction for asymmetric mobile ad hoc networks, *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol.16, pp. 116-129, 2008..
- [86] G.Wang, D.Turgut, L.Boloni, Y.Ji, ve D.C. Marinescu, A MAC layer protocol for wireless networks with asymmetric links, *Ad Hoc Networks*, vol.6, pp. 424-440, 2008.
- [87] B. B. Chen, S. Hao, M. Zhang, M. C. Chan, ve A. L. Ananda, DEAL:discover and exploit asymmetric links in dense wireless sensor networks, in *Proceedings of the IEEE Conference on Sensor, Mesh and Ad Hoc Communications and Networks (SECON)*, 2009, pp. 1-9..
- [88] J.Yick, B.Mukherjee, and D.Ghosal, Wireless sensor network survey, *Computer Networks* vol.52, pp. 2292-2330, 2008.
- [89] F.Ishmanov, A.S. Malik, and S.M. Kim, Energy consumption balancing (ECB) issues and mechanisms in wireless sensor networks (WSNs): a comprehensive overview, *European Transactions on Telecommunications*, vol.22, pp. 151-167, 2011.
- [90] R. O. J. J. D. v. M. M.Rahimi, Cyclops: in situ image sensing ve interpretation in wireless sensor networks, in *Proceedings of the ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys)*, 2005, pp. 192-204.
- [91] K.Bicakci, H.Gultekin ve B.Tavli, The impact of one-time energy costs on network lifetime in wireless sensor networks, *IEEE Communications* vol.13, pp. 905-907, 2009.
- [92] "General Algebraic Modeling System (GAMS)", erişim adresi:<http://www.gams.com/>, erişim tarihi: 03.05.2013.
- [93] Anıl Ufuk Batmaz, Bülent Tavlı, Davut İncebacak ve Kemal Bıçakçı, The Impact of Link Unidirectionality and Reverse Path Length on Wireless Sensor Network Lifetime, Budapeşte, Macaristan: ICC 2013 konferansı.
- [94] "E.Specht (2010) The best known packings of equal circles in the unit circle", erişim adresi: <http://hydra.nat.uni-magdeburg.de/packing/>, erişim tarihi: 03.05.2013.
- [95] Anıl Ufuk Batmaz, Bülent Tavlı, Davut İncebacak ve Kemal Bıçakçı, Tek Yönlü Bağlantı Tokalaşma Atlama Uzunluğunun Kablosuz Algılayıcı Ağ Yaşam Süresine Etkileri, Girne, Kıbrıs : ICC 2013 Konferansı, 2013.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : BATMAZ, Anıl Ufuk
Uyruğu : T.C.
Doğum tarihi ve yeri : 17.02.1988 Ankara
Medeni hali : Bekar
Telefon : 0 (535) 453 06 42
e-posta : ufukbatmaz@gmail.com

Eğitim

<i>Derece</i>	<i>Eğitim Birimi</i>	<i>Mezuniyet tarihi</i>
Lisans	TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi	2011
Yüksek Lisans	TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi	2013

İş Deneyimi

<i>Yıl</i>	<i>Yer</i>	<i>Görev</i>
2011-2013	TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi	Araştırma Görevlisi

Yabancı Dil

İngilizce (Çok iyi)
Fransızca (Orta)
Rusça (Orta)

Yayımlar

A.U.Batmaz, B.Tavlı, D.Incebacak, K. Bıçakçı "The Impact of Link Unidirectionality and Reverse Path Length on Wireless Sensor Network Lifetime" Proceedings of the IEEE International Conference on Communications (ICC), 2013, pp. 388–392.

A.U.Batmaz, O.Elbir, C.Kasnakoglu "Design of a Quadrotor Roll Controller Using System Identification to Improve Empirical Results" IJMMM 2013 Vol.1(4): 347-349

A.U.Batmaz, O.Elbir, C.Kasnakoglu "Quadrotor Roll and Pitch Stabilization Using System Identification Based Redesign of Empirical Controllers" Proceedings of the MIC 2013, Innsbruck, Austria

O.Elbir, A.U.Batmaz, C.Kasnakoglu "Improving Quadrotor 3-Axes Stabilization Results Using Empirical Results and System Identification" Proceedings of the ASSC 2013, Istanbul, Turkey

A.U.Batmaz, B.Tavlı, D.Incebacak, K. Bıçakçı "Effects of Handshake Hop Length of Unidirectional Links on the Lifetime of Wireless Sensor Networks" Proceedings of the IEEE Signal Processing and Telecommunications Applications conference 2013, Kyrenia, Cyprus

A.U.Batmaz, O.Ertin, O.Elbir, "Preliminary Design of Remote Mine Sweeping and Identification Systems" Proceedings of the Mechatronics Engineering Student Congress 2013, pp. 9-16.