

**DÖRT ROTORLU İNSANSIZ HAVA ARACI İÇİN GÖRÜNTÜ İŞLEME
TABANLI
AKILLI KONTROL ALGORİTMALARININ GELİŞTİRİLMESİ**

Yük. Müh. İsmail İLHAN

Yüksek Lisans Tezi

Bilgisayar Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Yrd. Doç. Dr. Mehmet KARAKÖSE

EYLÜL-2013

T.C
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DÖRT ROTORLU İNSANSIZ HAVA ARACI İÇİN
GÖRÜNTÜ İŞLEME TABANLI
AKILLI KONTROL ALGORİTMALARININ GELİŞTİRİLMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İsmail İLHAN

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 06 Eylül 2013

Tezin Savunulduğu Tarih : 26 Eylül 2013

Tez Danışmanı **Yrd. Doç. Dr. Mehmet KARAKÖSE (F.Ü)**
:
Diğer Jüri Üyeleri **Doç. Dr. A. Bedri ÖZER (F.Ü)**
:
 Yrd. Doç. Dr. Ayşegül UÇAR (F.Ü)

EYLÜL-2013

ÖNSÖZ

Günümüz birçok akıllı sistemlerde özellikle kontrol sistemlerinde bulanık mantık kullanılmaktadır ve kullanılmaya devam edecektir. Sistemlerdeki girişlerin ve etki eden faktörlerin kesin olmayışı yani belirsizliklerin yer alması veya insanlar gibi dilsel terimlerin kullanma zorunluluğun olması bulanık mantığın kullanılmasını kaçınılmaz kılmıştır.

Bu çalışmada bulanık mantık ve dört motorlu insansız hava aracı (UAV-Quadrotor) hakkında bilgi verilmiş ve matematiksel analizi yapılarak simülasyon modeli tasarlanmıştır. Görüntü işleme tabanlı quadrotorun kontrolü sağlanmaya çalışılmıştır. Sonuçlar incelenerek karşılaştırılmıştır.

Bu çalışma boyunca desteğini ve yardımlarını hiçbir zaman esirgemeyen danışmanım Sayın Yrd. Doç. Dr. Mehmet KARAKÖSE'ye, Fırat Üniversitesi Bilgisayar Mühendisliği'nin değerli öğretim üyelerine ve aileme sonsuz sevgi ve saygılarımı sunarım.

İsmail İLHAN
ELAZIĞ - 2013

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ	II
İÇİNDEKİLER.....	III
ÖZET	V
SUMMARY	VI
ŞEKİLLER LİSTESİ	VII
TABLolar LİSTESİ	X
SEMBOLLER LİSTESİ	XI
KISALTMALAR LİSTESİ	XII
1. GİRİŞ.....	1
1.1. İnsansız Hava Araçları.....	1
1.2. Quadrotor Kullanım Alanları ve Avantajları.....	2
1.3. Qudrotor Kontrolü ve Kullanılan Yöntemler	3
1.4. Bulanık Kontrol	6
1.5. Tezin Amacı ve Kapsamı	9
1.6. Tezin Yapısı.....	9
2. TİP-2 BULANIK SİSTEMLER VE OPTİMİZASYONU	11
2.1. Tip-1 Bulanık Sistemler.....	11
2.2. Tip-2 Bulanık Sistemler.....	13
2.2.1. Bulanıklaştırma.....	19
2.2.2. Çıkarım Mekanizması	20
2.2.3. Tip İndirgeme	23
2.2.3.1. Alan Merkezi Tip İndirgeme (Centroid Type Reduction).....	23
2.2.3.2. Yükseklik Tip İndirgeme (Height Type Reduction).....	24
2.2.3.3. Kümeler Merkezi Tip İndirgeme (Center of Sets Type Reduction).....	24
2.2.4. Durulaştırma	25
2.3. Tip-2 Bulanık Sistemlerin Optimizasyonu	26
3. QUADROTORUN MODELLENMESİ VE SİMÜLASYONU	32
3.1. Quadrotorun Geometrik ve Fiziksel Özellikleri	32
3.2. Quadrotorun Modellenmesi.....	33

3.2.1. Eksenlerin Tanımlanması	33
3.2.2. Matematik Analizi	35
3.2.3. Uçuş Kontrolü	39
3.3. Simülasyon Sonuçları	40
3.4. Bölüm Değerlendirmesi.....	45
4. TİP-2 BULANIK MANTIK TABANLI QUADROTOR KONTROLÜ.....	46
4.1. Önerilen Yöntem	46
4.2. Simülasyon Modeli.....	48
4.2.1. PID Kontrollü Sistem	48
4.2.2. Tip-1 Bulanık Mantık Kontrollü Sistem.....	50
4.2.3. Tip-2 Bulanık Mantık Kontrollü Sistem.....	52
4.3. Simülasyon Sonuçları	53
4.4. Bölüm Değerlendirmesi.....	57
5. GÖRÜNTÜ İŞLEME TABANLI QUDROTOR KONTROLÜ	58
5.1. Önerilen Yöntem	58
5.1.1. Görüntü İşleme	59
5.1.2. Nesne Tanıma	62
5.1.3. Nesne Takibi.....	64
5.2. Simülasyon Sonuçları	64
5.3. Bölüm Değerlendirmesi.....	69
6. SONUÇLAR.....	70
KAYNAKLAR.....	72
ÖZGEÇMİŞ	78

ÖZET

İnsansız hava araçları, son zamanlarda sivil ve askeri amaçlarla birçok alanda kullanımı artan ve bilimsel olarak önemli bir araştırma alanı oluşturan uygulamalardandır. Çok çeşitli modelleri bulunan insansız hava araçlarından dört rotorlu tipi yüksek hareket kabiliyeti ve belirli avantajlarıyla ön plana çıkmaktadır. Dört rotorlu insansız hava araçlarının özellikle modelleme ve kontrolüne yönelik birçok çalışma yapılmaktadır. Bu çalışmalarda akıllı sistem yaklaşımları da kullanılmaktadır.

Bu tez kapsamında dört rotorlu insansız hava araçları için görüntü işleme tabanlı akıllı kontrol algoritmalarının geliştirilmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla tezde öncelikle tip-2 bulanık sistemlerin incelemesi ve optimizasyon çalışması yapılmıştır. İkinci olarak dört rotorlu insansız hava aracının matematiksel modeli oluşturularak MATLAB simülasyonu ile doğrulama işlemleri gerçekleştirilmiş ve sonrasında tip-2 bulanık sistemlerle pozisyon kontrolü yapılmıştır. Tip-1 bulanık sistem, PD ve tip-2 bulanık sistem kullanılan pozisyon kontrolünde simülasyon sonuçları karşılaştırmalı olarak verilmiş ve başarılı sonuçlar alınmıştır. Tez çalışmasında son olarak dört rotorlu aracın görüntü işleme tabanlı pozisyon kontrolü gerçekleştirilmiştir. Bu yaklaşımda dört rotorlu aracın üzerinde bulunan bir kameradan alınan görüntülerin işlenmesi ile aracın bir nesneyi takip etmesi için gerekli kontrol algoritmaları sunulmaktadır. Üç eksenli (ileri-geri, sağ-sol, aşağı-yukarı) olarak gerçekleştirilen kontrol yaklaşımı için elde edilen simülasyon sonuçları, bir nesnenin tespit edilerek takip edilmesi için görüntü işleme tabanlı tip-2 bulanık kontrol algoritmasının doğru, sağlam ve başarılı sonuçlar verdiğini göstermektedir.

Sonuç olarak bu tez çalışması dört rotorlu bir insansız hava aracının modellenmesi ve simülasyonu, tip-2 bulanık sistemlerin gerçekleştirilmesi ve optimizasyonu, dört rotorlu insansız hava aracının tip-2 bulanık mantık tabanlı pozisyon kontrolü ve dört rotorlu insansız hava aracının görüntü işleme tabanlı pozisyon kontrolü olmak üzere dört temel katkı noktasına sahiptir. Bilimsel yayınların da yapıldığı tez kapsamında yapılan katkılar birçok simülasyon sonucu ile doğrulanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Dört Rotorlu İnsansız Hava Aracı, Tip-2 Bulanık Sistemler, Görüntü İşleme, Pozisyon Kontrolü, Nesne Takibi.

SUMMARY

Development of Image Processing Based Intelligent Control Algorithms for Quadrotors

Unmanned air vehicles are applications whose tenancy has increased in many fields recently with civil and military purposes. Quadrotor unmanned air vehicle having various models with high mobility and certain advantages looms large. A lot of research has been carried out particularly on the modelling and controlling of the quadrotor unmanned air vehicles so far. Intelligent system approaches have also been used in those studies.

In the scope of this thesis, we aimed to develop video recording based intelligent control algorithms for the unmanned air vehicles. In this respect, initially the investigation and optimization studies of the type-2 fuzzy systems were carried out. Next, justification processes were held with the MATLAB simulation by developing a mathematical model of the quadrotor unmanned air vehicle followed by a position controlling with type-2 fuzzy systems. The simulation results during the position control with type-1 fuzzy system, PD and type-2 fuzzy system were relatively assessed and successful results were obtained. In the study, finally, the video recording based position control of the quadrotor vehicle was conducted. In this approach, necessary control algorithms for the vehicle to follow any subject by processing the video recordings received from a video camera fixed on the quadrotor vehicles are suggested. The simulation results obtained for the control approach conducted in three axes (forward-back, right-left, up-down) show that video recording based type-2 fuzzy control algorithm provides correct, reliable and successful results.

Consequently, this study of thesis has four fundamental contributions involving modelling and simulation of a quadrotor unmanned air vehicle, the conduction and optimization of the type-2 fuzzy systems, the type-2 fuzzy logic based position controlling of the quadrotor unmanned air vehicle and the video recording based position control of the the quadrotor unmanned air vehicle. In the scope of this thesis, including the related scientific publications, the contributions are confirmed by many results of simulation.

Key words: Quadrotor Unmanned Air Vehicle, Qua, Type-2 Fuzzy Logic System, Image Processing, Position Control, Object Tracking.

ŞEKİLLER LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1.1. İnsansız hava aracı örnekleri [1-5].	1
Şekil 1.2. Quadrotor örnek modeller [1,11-13].	2
Şekil 1.3. Genel olarak kullanılan quadrotor kontrol blok diyagramı	3
Şekil 1.4. Tip-1 bulanık kontrol blok diyagramı [1].	5
Şekil 2.1. Klasik ve Bulanık Küme Gösterimi [33].	12
Şekil 2.2. Tip-1 bulanık sistem blok diyagramı [27-34].	13
Şekil 2.3. (a) Tip-1 üyelik fonksiyonu (b) bulanıklaştırılmış tip-1 üyelik fonksiyonu [27-34].	14
Şekil 2.4. Tip-2 üçgensel üyelik fonksiyonu [27-34].	14
Şekil 2.5 Örnek Tip-2 Üyelik Fonksiyonu Dereceleri [33-35].	16
Şekil 2.6. Aralık tip-2 üçgensel üyelik fonksiyonu [36].	17
Şekil 2.7. Tip-2 bulanık sistem blok diyagramı [27-38].	19
Şekil 2.8. (a) Yamuk üyelik fonksiyonu, (b) gaussian üyelik fonksiyonu, (c),(d) üçgen üyelik fonksiyonları [27].	19
Şekil 2.9. Aralık tip-2 bulanık sistemde bulanıklaştırma işlemi [27].	20
Şekil 2.10. Aralık tip-2 bulanık çıkış kümesinin şekilsel gösterimi [27].	23
Şekil 2.11. Aralık tip-2 bulanık üçgensel üyelik fonksiyonları	27
Şekil 2.12. PSO uygulamasının blok diyagramı.....	28
Şekil 2.13. PSO parçacıkların konum değişimi.....	29
Şekil 2.14. Quadrotor modelinde PSO algoritması uygulanırken elde edilen..... çıkış grafikleri.....	29
Şekil 2.14. Quadrotor modelinde PSO algoritması uygulanırken elde edilen çıkış grafikleri.....	29
Şekil 2.15. Üyelik fonksiyonun parçacık matrisi gösterimi	30
Şekil 2.16. Üyelik fonksiyonun POS ile değişimi	31
Şekil 2.17. Uygulanan yöntemin PSO genel gösterimi	31
Şekil 3.1. Qaudrotorun pervanesindeki itki kuvvetleri [20].	33
Şekil 3.2. Qaudrotor şematigi, kuvvetler ve açılar [20,21].	33
Şekil 3.3. Quadrotor hareket yönleri [20,44-47].	34

Şekil 3.4. Quadrotorun blok diyagramı	40
Şekil 3.5. Quadrotor simülasyon modeli	41
Şekil 3.6. Quadrotor modelinin omegasqr calculator alt blok modeli.....	41
Şekil 3.7. Quadrotor modelinin angles alt blok modeli.....	42
Şekil 3.8. Quadrotor modelinin positions alt blok modeli.....	43
Şekil 3.9. Rotorların açısal hızlarına göre z yükseklik grafiği	43
Şekil 3.10. Rotorların açısal hızlarına göre x konum grafiği.....	44
Şekil 3.11. Rotorların açısal hızlarına göre y konum grafiği.....	44
Şekil 3.12. Rotorların açısal hızlarına göre sapma açısı grafiği	45
Şekil 4.1. Quadrotor kontrol blok diyagramı.....	46
Şekil 4.2. Tip-2 bulanık sistemin giriş ve çıkış üyelik fonksiyonları grafiği	47
Şekil 4.3. PID kontrolör tabanlı quadrotor kontrol simülasyon modeli	48
Şekil 4.4. PID position control simülasyon modeli	49
Şekil 4.4. PID position control simülasyon modeli	49
Şekil 4.5. PD position control simülasyon modeli	50
Şekil 4.6. Tip-1 bulanık mantık kontrolör tabanlı quadrotor kontrol simülasyon modeli...	50
Şekil 4.7. Tip-1 FL position control simülasyon modeli.....	51
Şekil 4.8. Tip-1 FL angles control simülasyon modeli	51
Şekil 4.9. Tip-1_Controller for y simülasyon modeli.....	51
Şekil 4.10. Tip-2 bulanık mantık kontrolör tabanlı quadrotor kontrol simülasyon modeli.	52
Şekil 4.11. Tip-2 FL position control simülasyon modeli.....	52
Şekil 4.12. Tip-2 FL angles control simülasyon modeli	53
Şekil 4.13. Tip-2_Controller for y simülasyon modeli.....	53
Şekil 4.14. İstenilen yükseklik $z_d=3m$ için kontrolörlere göre quadrotorun konum grafiği	54
Şekil 4.15. İstenilen konum $x=1m$ için kontrolörlere göre quadrotorun konum grafiği	54
Şekil 4.16. İstenilen konum $y=2m$ için kontrolörlere göre quadrotorun konum grafiği	55
Şekil 4.17. Referans konum grafiğine göre quadrotorun konum grafiği.....	56
Şekil 4.18. Konum grafiğine göre quadrotorun açı grafiği.....	56
Şekil 4.19. Referans değerlere göre quadrotorun xyz eksenindeki hareketi	56
Şekil 5.1. Görüntü tabanlı quadrotor kontrolünün blok diyagramı	59
Şekil 5.2. Görüntü işleme blok diyagramı.....	59
Şekil 5.3. Görüntü alma işleminde alınan örnek resim.....	59
Şekil 5.4. Renkli resmin rgb2gray komutu ile renksiz hale dönüştürülmesi.....	60

Şekil 5.5. Resimdeki kırmızı renkli nesnelerin seçilmesi.....	60
Şekil 5.6. Resimdeki yeşil renkli nesnelerin seçilmesi.....	61
Şekil 5.7. Resimdeki mavi renkli nesnelerin seçilmesi	61
Şekil 5.8. Gri tonlama yapılarak ikili resme dönüştürülmesi	62
Şekil 5.9. Nesnelerin ölçüm değerlerine göre şekil tespitinin blok diyagramı.....	63
Şekil 5.10. Resimdeki nesnelerin tespiti.....	64
Şekil 5.11. Görüntü tabanlı quadrotor kontrolünün simülasyon modeli	65
Şekil 5.12. Görüntü işleme blok diyagramı.....	65
Şekil 5.13. Nesne takibinde yükseklik değişimi.....	66
Şekil 5.14. Nesne takibinde x konum değişimi	66
Şekil 5.15. Nesnenin yükseklik ve yön hareketlerinin gösterimi	67
Şekil 5.16. Referans görüntüye göre yükseklik ve yön koordinatları	68
Şekil 5.17. Referans görüntüye göre quadrotorun yükseklik ve yön hareketlerinin grafiği	68
Şekil 5.18. Görüntü işleme referanslarına göre quadrotorun xyz eksenindeki hareketi.....	69

TABLÖLAR LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 2.1. Kural tablosu	22
Tablo 2.2. PSO ile elde edilen giriş üyelik fonksiyonun parametre değerleri	31
Tablo 4.1. Önerilen yöntemin kural tablosu47	47
Tablo 4.2. Quadrotor modelinde	47
kullanılan PD çarpanları	47
Tablo 4.2. Quadrotor modelinde kullanılan PD çarpanları	49
Tablo 4.3. Bulanık mantık kontrolörde kullanılan giriş-çıkış çarpanları	52
Tablo 5.1. Resimde yer alan nesnelerin ölçüm değerleri	63

SEMBOLLER LİSTESİ

μ	: Üyelik fonksiyonu
z	: Hava aracının düşey doğrultudaki konumu $[m]$
x	: Hava aracının yatay düzlemdeki konum bileşeni $[m]$
y	: Hava aracının yatay düzlemdeki konum bileşeni $[m]$
Ω_i	: Her bir motorun açısal hızı rad/sn
Ψ	: Hava aracının sapması açısı (yaw)
θ	: Hava aracının yunuslama açısı (pitch)
ϕ	: Hava aracının yalpalama açısı (roll)
$\dot{\Psi}$	: Hava aracının sapma hızı (yaw)
$\dot{\theta}$	: Hava aracının yunuslaması hızı (pitch)
$\dot{\phi}$	: Hava aracının yalpalaması hızı (roll)
m	: Hava aracının ağırlığı $[kg]$
l	: Hava aracının bir şaftının uzunluğu $[m]$
I_x	: Hava aracının x eksenindeki atalet momenti $[m^4]$
I_y	: Hava aracının y eksenindeki atalet momenti $[m^4]$
I_z	: Hava aracının z eksenindeki atalet momenti $[m^4]$
j	: Hava aracına etkiyen jiroskopik etki
b	: Motorlara etkiyen düşey doğrultudaki itki kuvveti (thrust)
d	: Motorlara etkiyen dönel itki kuvveti (drag)

KISALTMALAR LİSTESİ

PID	: Proportional–integral–derivative
VTOL	: Dikey iniş ve kalkış (Vertical Take-Off and Landing)
KKK	: Kayan Kipli Kontrol
T1BK	: Tip-1 Bulanık Mantık Küme
T1FLS	: Type-1 Fuzzy Logic Set
T1BM	: Tip-1 Bulanık Mantık
T2BK	: Tip-2 Bulanık Mantık Küme
T2FLS	: Type-2 Fuzzy Logic Set
T1BM	: Tip-2 Bulanık Mantık
S	:Sıcak
BM	: Bulanık Mantık
FL	: Fuzzy logic
FLC	: Fuzzy logic control
FLS	: Fuzzy logic system
FOU	: Footprint of uncertainty
UMF	: Upper membership function,
LMF	: Lower of uncertainty
UAV	: Unmanned aerial vehicle

1. GİRİŞ

1.1. İnsansız Hava Araçları

Helikopterlerin ilk tasarımını yapan Leonardo Da Vinci'den bu zamana kadar helikopterler sürekli olarak gelişmekte ve farklı özelliklerde tasarlanmaktadır [1-5]. Helikopterlerin zamanla gelişmesiyle birlikte 1900' lü yıllarda İnsansız Hava Araçları (İHA) da tasarlanmış ve kullanılmaya başlanmıştır. Özellikle askeri alanlarda I. Dünya Savaşı'nda ve II. Dünya Savaşı'nda keşif, gözetleme ve hava bombardımanında kullanılmıştır [1-5]. Şekil 1.1'de son zamanlarda kullanılan İHA modelleri gösterilmiştir. Farklı çeşitleri olan İHA'ların bir tipi de dört rotorlu araçlardır.



Şekil 1.1. İnsansız hava aracı örnekleri [1-5].

Dört rotorlu insansız hava aracına (Unmanned Aerial Vehicle-UAV) Quadrotor denilmektedir. Adından da anlaşılacağı gibi birbirinden bağımsız dört rotordan oluşan, hızlı ve kontrollü manevra yapabilen bir hava aracıdır. Dört rotorun hızlarını değiştirerek bütün uzaysal hareketlerini yapabilmesi, dikey iniş ve kalkış (*VTOL-Vertical Take-Off and Landing*) yapabilmesi, askıda kalabilmesi quadrotorun daha çok tercih edilmesini sağlamıştır. Bu avantajlarından ötürü quadrotorun birçok modeli tasarlanmış, kontrol

algoritmaları yapılmış ve akademik çalışmalarda yer almıştır [1-5]. Şekil 1.2’de son zamanlarda kullanılan quadrotor örnekleri gösterilmektedir.



Şekil 1.2. Quadrotor örnek modeller [1,11-13].

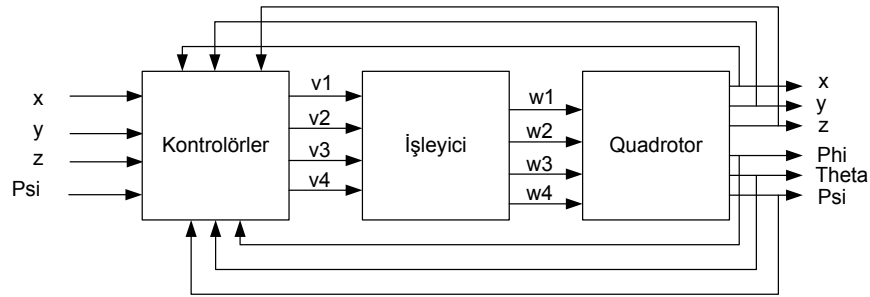
1.2. Quadrotor Kullanım Alanları ve Avantajları

Quadrotorun hareket kabiliyetinin yüksek, ebatlarının küçük ve maliyetinin düşük olmasından dolayı askeri uygulamalarda, doğal afetlerde, çeşitli spor faaliyetlerinde, trafik denetimi, şehrin yapılaşma denetiminde, görüntü kayıtları vb. birçok alanda kullanılabilmektedir. İnsanlar için tehlikeli olabilecek çalışma ortamlarında büyük avantajlar sağlayabilmektedir. Askeri uygulamalarda daha çok keşif ve gözetleme amaçlı kullanılmaktadır. Böylece fiziksel ortamın bilgilerini ve olası tehlikelerin bilgilerini daha önceden elde ederek hem maddi hem de personel kaybını önleyerek büyük bir avantaj sağlamaktadır. Ayrıca quadrotora silahlar monte edilerek saldırı amaçlı kullanılabilmektedir. Sinyal kesici gibi ek donanımlar takılarak olası saldırılar da önlenebilmektedir. Deprem, sel, fırtına ve yangın gibi doğal afetlerde yine keşif ve gözetleme amaçlı olarak maddi hasar tespiti veya kayıp arama gibi kullanım alanları vardır. Karada, suda ve havada yapılan çeşitli spor faaliyetlerinde quadrotor kullanılarak yarış bilgilerinin elde edilmesi, yarışçıların kontrol edilmesi ve kazaların önlenmesi sağlanabilir. Quadrotorlar denetim uygulamalarında da kullanılabilmektedir. Çünkü diğerlerine göre maliyet bakımından daha avantajlıdır. Trafik, yapılaşma ve güvenlik denetimleri quadrotor ile daha kolay ve hızlı bir şekilde yapılabilir. Quadrotorlar görüntü kayıtları için de kullanılabilmektedir. Bu görüntü kayıtlarının askeri ve polis

uygulamalarında, düğün veya miting gibi faaliyetlerde ve sinema çekimlerinde maliyet ve uygulanabilirlik açısından avantajları vardır. Yine quadrotorlar kişisel uygulamalarda oyun ve eğlence amaçlı olarak kullanılabilir [1-5].

1.3. Quadrotor Kontrolü ve Kullanılan Yöntemler

Quadrotorun yükseklik ve yön kontrolü için literatürde çok sayıda çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmalarda kullanılan yöntemlerden bazıları kayan kipli kontrol (KKK) , klasik oransal-integral-türevsel (PID) kontrol, pekiştirmeli öğrenmeli denetim, geri adımlamalı kontrol, geri beslemeli doğrusallaştırmalı kontrol ve bulanık mantık sistemli kontroldür. Quadrotor kontrolü için genel olarak kullanılan kontrol blok diyagramı Şekil 1.3’de verilmiştir.



Şekil 1.3. Genel olarak kullanılan quadrotor kontrol blok diyagramı

KKK doğrusal olmayan kontrol yöntemlerinde sıklıkla kullanılır. KKK yaklaşımında amaç; durum uzayında elde edilmiş bir kayma yüzeyi ile seçilen durum değişkenlerinin, hata ve hatanın zamana bağlı türevini sıfır yaparak durum değişkenlerini tanımlanan bir denge noktasına taşımaktır. Burada sistemin dış etkilere karşı duyarsız hale gelmesi için hatanın kayma yüzeyine itilerek belirli kipte tutulur. Patel’in quadrotor kontrolü için yaptığı model ve analiz çalışmasında, verilen komutlar ile quadrotorun kararlı bir şekilde hareket etmesi için kayma modlu PD kontrolör kullanılmış ve kararlı bir uçuşun ve yüksekliğin sağlandığı görülmüştür [6]. Waslander çalışmasında integral kayma modlu takviyeli öğrenme yöntemini kullanarak yükseklik kontrolünü sağlamaya çalışmıştır [7].

PID kontrol bir geri besleme mekanizması ile kolay ve hızlı tasarlanabilen bir yöntemdir. Bu yöntemin amacı hata, hatanın değişimi ve hatanın toplamından meydana gelen kontrol sinyali elde etmektir. PID kontrol yöntemi her ne kadar tasarımcıya sistem kontrolü hakkında kolaylık sağlasa da özellikle doğrusal olmayan sistemlerin kontrolünde

her zaman yüksek verim elde edilememektedir. PID kontrol yönteminde verimin daha da artması için birçok yaklaşım bulunmaktadır. Marcelo yüksek lisans tezinde quadrotorun matematiksel modelini, özelliklerini, dinamiklerini açıklayarak lineer kontrol tekniklerini uygulamıştır [8]. Quadrotor için PID kontrolörü tasarlayan Salih bunu rotorların her birinin hızını kontrol etmek için kullanmıştır [9]. Açık bir şekilde matematiksel modelini oluşturarak yaptığı simülasyonda olumlu sonuçlar almıştır. Önder çalışmasında dört motorlu bir dönerkanat sistemin dinamik modelini oluşturarak PD kontrolör ile yörünge kontrolünü yapmıştır [10].

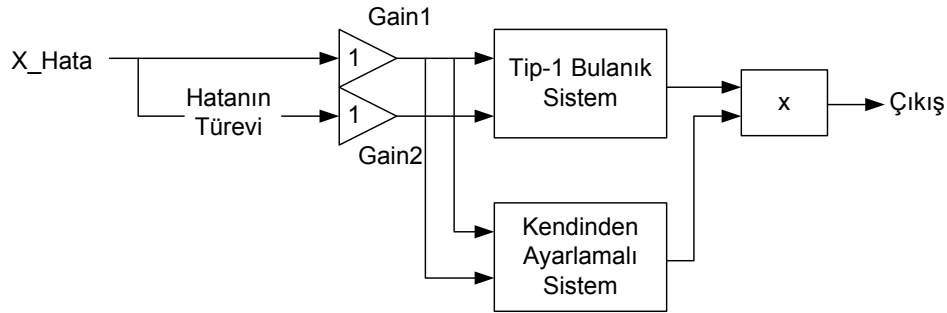
Quadrotor kontrolünde yer verilen bir başka yöntem ise doğrusal olmayan kontrol tekniklerinden biri olan geri adımlamalı kontroldür. Geri adımlamalı kontrol, doğrusal olmayan bir sistemi adım adım kararlı hale getirilerek kontrol etme temeline dayanır. Saif modifiyeli geri adım yaklaşımı ile quadrotor kontrolü yapmıştır [4]. Geleneksel quadrotor modeli ile doğrusal olmayan model karşılaştırılarak test edilmiştir. Keun çalışmasında ilk olarak Euler-Lagrange denklemleri ile quadrotorun sistem modelini çıkarmıştır. Sonra yükseklik kontrolü için dinamik yüzey kontrolü metodunu kullanmıştır. Sistem sinyallerinin düzensiz olduğunu ve önerilen yöntemin etkilerini göstermiştir [11]. Can ve arkadaşları quadrotorun durumsal ve hover kontrolleri üzerinde çalışmışlardır. Klasik PD kontrol, ters dinamik kontrol, geri adımlamalı kontrol ve kayma kipli kontrol tekniklerini uygulayarak sonuçlarını karşılaştırmışlardır [12].

Uygulanan diğer bir yöntem ise geri beslemeli doğrusallaştırma yöntemidir. Bu yöntem geri besleme yardımıyla doğrusal olmayan bir sistemi doğrusallaştırma temeline dayanmaktadır. Doğrusal model elde edildikten sonra doğrusal kontrol yöntemleri uygulanarak sistem kararlı duruma getirilmekte ve istenilen yörüngede takip etmesi sağlanmaktadır. Campbell yoğun ve karmaşık olan havaalanlarında hava araçlarının yer değişimi için geri beslemeli kontrollü bir otopilot algoritması yapmıştır [13]. Rashid yükseklik stabilizasyonu ve yükseklik asimptotiki için geri beslemeli kontrol kuralları tasarlamıştır [14]. Sonuçları uygulamanın basit ve etken olduğunu göstermiştir.

Quadrotor kontrolü için bulanık sistem kullanan modeller de vardır. Rabhi quadrotor stabilizasyonu için bir tip-1 bulanık kontrol algoritması tasarlamış ve Takagi-Sugeno bulanık model kullanarak simülasyonda uygulamıştır [15]. Sonuçlarına bakıldığında bulanık sistemin de kontrol için kullanılabildiği görülür. Santos ise quadrotor kontrolü için akıllı tip-1 bulanık kontrolör kullanmıştır [16]. Yine başka bir çalışmada Dinuka, quadrotor stabilizasyonu ve kontrolü için tip-1 bulanık sistem kontrolörünü simülasyonda

uygulayarak stabil gezintilerin bulanık mantık kontrolörleri ile istenilen kontrolün sağlanabildiğini göstermiştir [17].

Diğer kontrol yöntemleri ile birlikte bulanık sistem kullanan quadrotor modelleri de vardır. Sangyam kontrol yöntemi geliştirmek için bulanık sistem üzerine kendinden ayarlamalı PID kontrolörleri kullanarak denetleyiciler tasarlamış ve analiz ederek simülasyonda uygulamıştır [18]. Spesifik sistemlerde PID kontrolörünün performansı yüksek iken varyasyonun olduğu sistemlerde Sangyam'ın uyguladığı model daha iyi sonuçlar vermiştir. Al-Younes'in çalışmasında ise yükseklik stabilizasyonu için geri beslemeli bulanık sistem modelini kullanmıştır [19]. Nurullah çalışmasında bilgisayar ortamında quadrotorun matematiksel modelini tasarlayarak PID ve bulanık sistem denetleyicilerini sistem üzerinde denemiştir [20]. Ender lisans tez çalışmasında quadrotorun matematiksel modelini tasarlayarak PID ve Tip-1 bulanık sistem kullanarak yükseklik ve yön kontrolünü yapmaya çalışmıştır [1]. Enderin yaptığı çalışmadaki bulanık kontrolörün blok diyagramı Şekil 1.4'de verilmiştir. Sistemdeki katsayıları kendinden ayarlamalı bulanık sistem ile optimize ederek sistemin performansını arttırmıştır.



Şekil 1.4. Tip-1 bulanık kontrol blok diyagramı [1].

Dinuka ve arkadaşları bulanık mantık kontrol tabanlı bir quadrotor kontrol modeli tasarlayarak hız bozukluklarında daha istikrarlı bir sonuç elde etmişlerdir [21].

Görüntü tabanlı quadrotor kontrol yöntemleri de akademik çalışmalarda yer almıştır. Erdiñç ve arkadaşları çalışmalarında bir kamera quadrotor üzerinde, diğer kamera yerde olacak şekilde kontrolü sağlamak için kestirim algoritmaları yapmışlardır. Çalışmalarında geri adımlamalı yöntem, geri beslemeli yöntem ve PID kontrolörler kullanmışlardır [22]. Shuqun çalışmasında quadrotor görüntüsünde nesnelerin takibi için anahtarlama/kombine yöntemini kullanarak, küçük nesneler için spatiotemporal segmentation metodunu, büyük

nesneler için değiştirilmiş istatistiksel modeli uygulamıştır [23]. Zehra ve Erdinç çalışmasında kameradan alınan referans bilgilerine gre quadrotorun yn kontrolünü yapmaya çalışmışlardır [24]. Aryo ve arkadaşları yerdeki hareketli nesnelerin tespiti ve takibi için framework tasarlamışlardır [25]. Sang-hyun ve arkadaşları quadrotorun yükseklik ve yn kontrolü için geri beslemeli kontrol yöntemini kullanmışlar ve modeli nesne takibinde uygulayarak performansını değerlendirmişlerdir [26].

1.4. Bulanık Kontrol

Günlük hayatta ve işlerimizde kullandığımız makinelerde, elektronik cihazlarda, araçlarda, fabrikalarda ve buna benzer insanoğlunun yaşamını kolaylaştıran unsurlarda bazen sözel, bazen mantıksal bazen de matematiksel olarak işlemler yapılır. Özellikle belirsizliklerin olduğu bu işlemlerde bulanık mantık kullanılabilmektedir.

Bulanık mantık; terimlerin belirsiz olduğu veya kesin olmadığı ve bunun sonucunda da oluşan küme elemanlarının da belirsiz olduğu veya kesin olmadığı, doğrunun ve yanlışın arasında birçok değerin de olduğu bir mantıktır. Bulanık mantık yaklaşık akıl yürütmenin mantığıdır [27].

Bulanık mantık ilk olarak, California Berkeley niversitesi'nden Azeri kökenli Amerikalı Matematikçi Ltfi Askerzade Zadeh'in 1965'te yaptığı çalışmalarıyla ortaya çıkmıştır [28]. 1970'li yılların ikinci yarısından sonra yayınladığı makaleler ile bulanık küme kavramı ele alınmış ve belirsizlik içeren sistemlerde bulanık mantığın uygulanabileceğini göstermiştir [29,30]. A. Zadeh bu teorisinde, matematiğin, dil ve insan zekâsını ilişkilendirebileceğini ve bulanık mantığın gerçek hayatın daha iyi bir modelini oluşturduğunu göstermesine rağmen bilim camiasında pek ilgi görmedi. Daha sonraları 1972 yılında İngiltere'de İran kökenli Ebrahim Mamdani'nin bir buhar makinesinde buharı kontrol etmek için tasarladığı kontrol mekanizmasında bulanık mantık teorisini kullanması bilim camiasının dikkatini çekmiştir [31,32]. Bulanık mantığın ilk ticari uygulamasının, 1980'de, Danimarka'da bir imento fabrikasında imento kalitesinin hep aynı oranda çıkması için bir denetleyicinin kullanılmasından sonra, başta Japonya olmak üzere dünyadaki çoğu ülkeler araştırma ve mühendislik uygulamalarıyla bu konuya büyük ilgi göstermişler ve birçok gelişmeler sağlamışlardır. Özellikle, elektronik aletlerin ana yapılarını oluştıran transistör veya algoritmalar gibi anahtarlama araçlarında yoğun olarak bulanık mantık kullanılmaya başlamıştır.

Bulanık mantığın yoğun olarak kullanıldığı alanlardan biri de denetim sistemleridir. Bulanık denetimin işlenmesi tıpkı bir usta insanın denetlemesine benzer. Çünkü klasik denetim sistemlerinden farklı olarak, matematiksel modellemeye ihtiyaç duymadan istenilen çıkışı elde etmek için giriş işaretleri ayarlanır. Yani bulanık mantık ve bulanık küme kullanılarak makinelerin insan gibi davranmaları sağlanabilir. Sistemlerde yapay sinir ağları ve genetik algoritmalarla desteklenerek **nöral-bulanık** (*neural fuzzy, neuro-fuzzy* ve *artificial neural networks and fuzzy logic*) **sistemler** veya **genetik-bulanık sistemler** oluşturulmuştur. Böylece akıllı (*intelligent*) sistemler de hızlı bir şekilde gelişmiştir [33,34].

Bulanık mantığın başlıca özellikleri aşağıdaki gibi sıralanabilir [27]:

- “doğru” , ”çok doğru” , ”az çok doğru” v.b. gibi sözel olarak ifade edilen dilsel (linguistik) değişkenli doğruluk derecelerine sahip olması
- Geçerliliği kesin değil fakat yaklaşık olan çıkarım kurallarına sahip olması
- Her kavramın bir derecesi olması
- Her mantıksal sistemin bulanıklaştırılabilmesi
- Bilginin bulanık mantık ile yorumlanabilmesi

Sistemlerde veya denetimlerde bulanık mantığın kullanılması veya bulanık denetleyicilerin kullanılmasının sisteme sağladığı avantajlar veya dezavantajlar aşağıda yer almıştır [27,36-47].

Avantajlar

- Günlük hayatta kullandığımız belirsiz, zamanla değişen, karmaşık, iyi tanımlanmamış değişkenlerin sistemler denetiminde kullanılırken basit çözümler getirir.
- Matematiksel modeller ile tanımlanan sistemlerde denetimler basit olur. Karmaşık sistemlerde ise denetim çok maliyetli ve performansı düşüktür. Bulanık mantık ise çok karmaşık sistemlerde bile denetim sistemini kolay ve daha az maliyetli olarak gerçekleştirir.
- Bulanık mantıkta giriş değerlerinin bir ön işleme tabi tutulmaları ve oldukça geniş bir alana yayılan değerlerin üyelik fonksiyonları ile az sayıya indirgenmeleri nedeni ile bulanık denetim genellikle daha küçük bir yazılımla daha hızlı bir şekilde sonuçlanır.

- Bahsedilen az sayıda değerler üzerinde uygulanacak kural sayısı da az olduğundan sonuca ulaşmak daha da çabuklaşacaktır.
- Doğrudan kullanıcı girişlerine ve kullanıcının deneyimlerinden yararlanabilmesine olanak sağlamaktadır.

Dezavantajlar

- Bulanık denetimde kullanılan kurallar deneyime çok bağlıdır.
- Üyelik fonksiyonlarının seçiminde belirli bir yöntem yoktur. En uygun fonksiyon deneme ile bulunur. Bu da oldukça uzun bir zaman alabilir.
- Denetlenen sistemin bir kararlılık analizi yapılamaz ve sistemin nasıl cevap vereceği önceden kestirilemez. Yapılacak tek şey benzetim çalışmasıdır.

Günümüzde çoğu alanda kullanılabilen bulanık mantık, özellikle sanayi alanında yaygın olarak kullanılmaktadır. Japonlar bulanık mantığı özellikle bulaşık makineleri, çamaşır makineleri, elektrik süpürgeleri, video kameralara uygulamışlardır. Daha sonraları bulanık mantık, insansız hava uçakların kontrolünde, tren frenleme sistemlerinde, ABS (otomatik fren sistemi) ve ASC (otomatik vites kontrolü) kontrolünde, asansör yolcu denetiminde, çimento fabrikalarında kullanılmıştır [8,9].

Bulanık mantık, bir önermenin doğruluğunun önermelerle, kesin doğru ve kesin yanlış arasında sonsuz sayıda doğruluk derecesi içeren bir küme veya sonsuz sayıdaki doğruluk derecelerini sayısal olarak $[0,1]$ gerçel sayı aralığıyla ilişkilendiren bir fonksiyondur. Sözel olarak değişik sıfat dereceleri ile ifade edilen doğruluk tablosuyla doğruluk değerlerine sahip ve geçerliliği kesin olmayan fakat yaklaşık olan çıkarım kurallarına sahip oluşu bulanık mantığın özelliklerindendir.

Bulanık mantık, bulanık küme teorisine dayanır. Bulanık küme teorisi ve bulanık küme işlemleri bulanık işlemlerin yapılmasını sağlar. Yani bulanık işlemcileri oluşturmak için gerekli yapıyı oluşturur. Bulanık işlemcilere, *approximate reasoning* adı verilmektedir. Yaklaşık düşünme, yaklaşık neden olma, yaklaşık sonuçlandırma anlamlarına gelir. Bu tanımlama daha çok bulanık küme teorisini temsil etmektedir. *Approximate reasoning* ya da *yaklaşık düşünme* kavramı, bulanık mantık ve bulanık küme teorisi ile desteklendiğinde *fuzzy reasoning* ya da *bulanık düşünme* kavramını ortaya çıkarır [8]. Yaklaşık düşünme genellikle günlük hayatta kullandığımız bazı sözlerle uygulanır. Örneğin biraz fazla, azıcık soğuk, oldukça yaşlı, vb. tanımlamalar yaparken kullanılan biraz, azıcık, oldukça gibi terimler birer yaklaşık ya da bulanık düşünceyi tanımlamaktadırlar. Fazla, soğuk ve yaşlı

sözleri ise birer bulanık ifadedir ve bulanık kümelerle temsil edilip, bulanık mantık işlemlerine tabi tutulabilirler. Yaklaşık ve bulanık düşünme kavramları bulanık mantık ile birlikte kullanılarak ifadelerin sınırları ve bulanıklığın kapsamı ayarlanabilir.

1.5. Tezin Amacı ve Kapsamı

Tezin amacı, görüntü işleme tabanlı dört rotorlu insansız hava aracı modelini oluşturarak, bu hava aracının pozisyon ve yükseklik kontrolünü tip-2 bulanık sistemler ile gerçekleştirmektir. Tip-2 bulanık sistemlerin bir kontrolör olarak yüksek performansta ve doğrulukta, düşük maliyet ile kullanılabilirliğini ölçmektir. Ayrıca görüntü tabanlı quadrotor uygulamalarında farklı bir yöntem sunmaktır. Yükseklik ve pozisyon kontrolü için algoritmalar denenmiş ve modele uygun bir yöntem sunulmuştur. Tez kapsamında yer alan konular aşağıda maddeler halinde verilmiştir.

- İnsansız hava araçları ve özellikleri
- Quadrotorun fiziksel özellikleri ve matematiksel modeli
- Tip-2 bulanık sistemler ve yapısı
- Parçacık sürü optimizasyonunun çalışması
- Üyelik fonksiyonların optimize edilmesi
- Quadrotor kontrol algoritmaları
- Tip-2 bulanık sistem, tip-1 bulanık sistem ve PID kontrol tabanlı quadrotor kontrolü
- Görüntü işleme tabanlı quadrotor kontrol modeli
- Nesne tespiti için görüntü işleme yöntemleri
- Nesne takibi için algoritmalar
- Simülasyon testleri

1.6. Tezin Yapısı

Tezin birinci bölümünde bulanıklık kavramı ile birlikte quadrotorlar hakkında genel bilgi verilmiş ve literatürde yapılan çalışmalardan söz edilmiştir.

İkinci bölümde tip-1 bulanık mantık ve tip-2 bulanık mantık anlatılmıştır. Tip-1 bulanık sistemin ve Tip-2 bulanık sistemin yapısı açıklanmıştır. Tip-2 bulanık fonksiyonlar

PSO (Particle Swarm Optimization-Parçacık Sürü Optimizasyonu) metodu ile optimizasyon çalışmaları yapılmıştır. Bölüm değerlendirilmesi yapılmıştır.

    nc  bölümde quadrotor hakkında genel bilgi verilerek geometrik ve fiziksel özellikleri ele alınmıştır. Matematiksel ve simülasyon modeli oluşturularak test edilmiştir. Bölüm değerlendirilmesi yapılmıştır.

Dördüncü bölümde quadrotorun yükseklik ve hareket kontrolü için önerilen yöntemde PID kontrolör, tip-1 bulanık mantık kontrolör ve tip-2 bulanık mantık kontrolör kullanılmıştır. Oluşturulan modeller simülasyon ortamında test edilerek karşılaştırılmıştır. Bölüm değerlendirilmesi yapılmıştır.

Beşinci bölümde nesnelerin şekil ve rengine göre tespitini ve takibini yapabilecek bir yöntem tasarlanmıştır. Önerilen yöntemin simülasyon modeli oluşturularak dördüncü bölümdeki kontrolörler ile test edilmiştir. Simülasyon sonuçları karşılaştırılarak bölüm sonunda bölüm değerlendirilmesi yapılmıştır.

Altıncı bölümde bu çalışmada yapılan uygulamalar ve elde edilen bulgular sunulmuştur.

2. TİP-2 BULANIK SİSTEMLER VE OPTİMİZASYONU

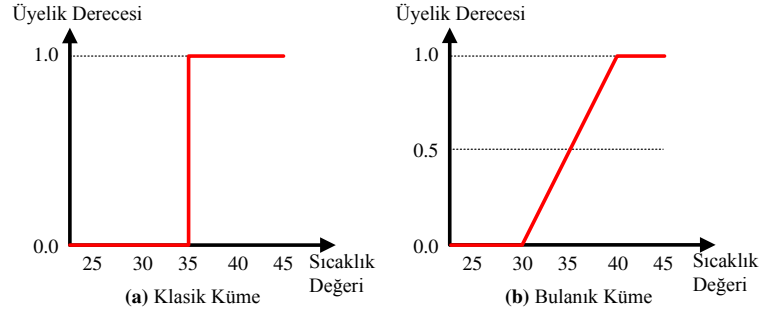
Matematiksel modelinin çıkarılmasının zor ve karmaşık olduğu sistemler için bulanık mantık bir çözümdür. Dilsel değişken gibi olan üyelik fonksiyonları ve uzman tecrübesine dayanan kontrol kuralları ile sistemin kontrol çıkışını üretir. Genellikle bulanık mantık kontrolörlerinde giriş olarak hata ve hatanın oranı ele alınır. Sistemin giriş parametrelerine göre bu sayı daha da fazla olabilir. Bu bölümde bulanık mantık tipleri açıklanarak bulanık mantığın oluşturduğu kontrol sistemlerin yapısı incelenmiştir.

2.1. Tip-1 Bulanık Sistemler

Bulanık mantığın temeli olan bulanık kümeyi oluşturanlar, küme elemanları ve küme elemanlarının üyelik dereceleridir. Bu iki unsurun da bulanık küme olma durumları olabilir. Üyelik fonksiyonu, değeri bulanık olmayan bir küme ise bu tip bulanık kümelere Tip-1 Bulanık Mantık Küme (T1BK), *Type-1 Fuzzy Logic Set (T1FLS)* denir. T1BK kullanan bulanık mantığa ise Tip-1 Bulanık Mantık (T1BM), *Type-1 Fuzzy Logic (T1FL)* olarak isimlendirilir [27,33,34].

Bulanık küme, farklı üyelik fonksiyonlarda farklı üyelik derecesinde öğeleri olan bir topluluktur. Bir bulanık küme elemanı, aynı değişken özelliğine sahip başka bir kümenin de elemanı olabilir. Bulanık küme, klasik kümelere göre belirsiz olan ve küme sınırları bulanık olan bir küme şeklindedir.

Kümenin elemanları üyelik değerlerinin kümeye dahil olma veya dahil olmama durumuna göre belirlenir. Kümeye dahil olmayan elemanlarının üyelik değerleri 0, tam dahil olan elemanların üyelik değerleri ise 1 olarak kabul edilmektedir. Dahil olup olmadığı belirsiz öğeler ise 0 ile 1 arasında bir değer alırlar. Şekil 2.1’de sıcaklık değerlerinin klasik küme teorisine göre ve bulanık küme teorisine göre S (*Sıcak*) küme öğelerinin sınırları gösterilmiştir. Şekil 2.1 (a)’da S küme elemanlarını 35’den büyük bütün sıcaklık değerleri oluşturmaktadır ve $S = \{35,36,37,...\}$ veya $S = \{x : x > 35, x \in E\}$ olarak tanımlanabilir. Diğer bir tanımlama olarak E sıcaklık değerlerini, μ_S , üyelik fonksiyonunu göstermek üzere $\mu_S = E \rightarrow \{0,1\}$ şeklinde yazılabilir [27].



Şekil 2.1. Klasik ve Bulanık Küme Gösterimi [33].

Şekil 2.1 (b)'de S küme elemanlarını belirlemek gerekirse, 30'dan küçük sıcaklık değerleri kümeye dahil olmayan elemanlardır. Sıcaklık değeri 39'dan büyük olanlar ise S kümesine tam dahil olan elemanlardır. Sıcaklık değeri 30 ile 40 arasında olanlar ise S kümesine dahil olma derecelerine göre alınır. Yani 0 ile 1 arasında bir üyelik derecesi alırlar. S kümesini $S = \{(\mu_S(x), x)\}$ şeklinde olacaktır. Burada $\mu_S(x)$ üyelik fonksiyonu ve x sıcaklık değeridir. Değerlerini yerine yazarsak $S = \{(0.0, 25), (0.0, 30), (0.5, 35), (0.6, 36), (1.0, 40), (1.0, 45)\}$ şeklinde yazılabilir. Üyelik fonksiyonunu $\mu_S = E \rightarrow [0, 1]$ olarak tanımlanır. Bu durumda E 'deki bulanık S kümesi (2.1)'deki gibidir [27-34].

$$S = \{(\mu_S(x), x)\} = \{(\mu_S(x) / x)\} \quad (2.1)$$

$$S = \{(\mu_S(x_1) / x_1) + (\mu_S(x_2) / x_2) + \dots + (\mu_S(x_n) / x_n)\}$$

$$S = \left\{ \sum_{i=1}^n (\mu_S(x_i) / x_i) \right\} \text{ bulanık kümenin parçalı olduğu durum,}$$

$$S = \left\{ \int_{i=1}^n (\mu_S(x_i) / x_i) \right\} \text{ bulanık kümenin sürekli olduğu durum olarak}$$

gösterilebilir. Denklemden kullanılan ifadeler sırası ile

E : Uzay kümesi (kesin küme),

x : Uzay kümesinin kesin küme elemanları,

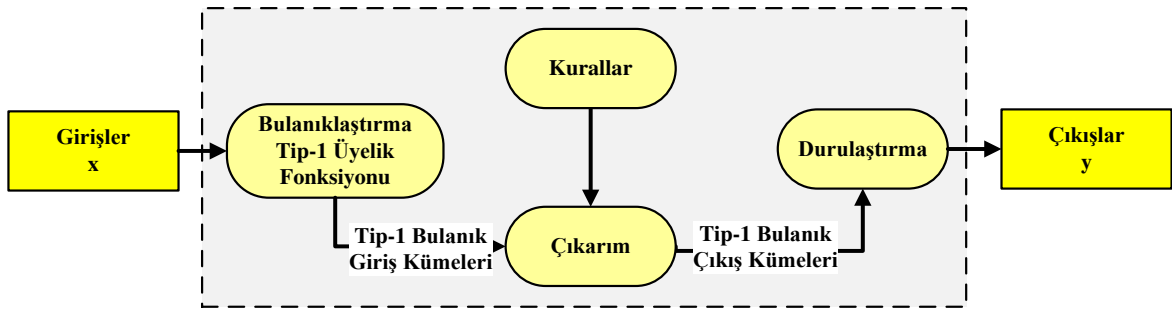
S : Bulanık küme,

$\mu_S(x)$: x kesin sayıların S bulanık kümesindeki üyelik dereceleridir.

Burada kullanılan bölüm işareti bölme işlemini değil, x küme öğesine karşılık gelen $\mu_s(x)$ üyelik derecesini göstermektedir. Kullanılan $\sum$ ve $\int$ işaretleri de toplam veya integral işlemlerini değil küme öğelerinin topluluğunu göstermektedir [27-34].

Tip-1 bulanık mantık sistemi, kesin girişleri alarak bulanık mantık sistemi içerisinde değerlendirilerek yine kesin çıkışlar veren bir sistemdir. Sistem içerisinde kısaca şu işlemler yapılmaktadır. Öncelikle kesin girişler, üyelik fonksiyonlarına göre işleme alınır ve her bir giriş elemanın üyelik derecesi bulunur. Bu üyelik dereceleri bulanık kümeleri oluşturur. Bulanık kümeler kural tablosuna göre değerlendirilir. Çıkarım yöntemleri ile bulanık kümelerden seçimler yapılır ve bulanık çıkış kümeleri oluşur. Son olarak da çıkarım işlemi ile ortaya çıkan bulanık küme durulaştırma yöntemleri ile bulanıklığı giderilir ve kesin sonuçları verir.

Tip-1 bulanık mantık sistemini Şekil 2.2'deki gibi gösterebiliriz. Tip-1 bulanık mantık sistemi dört bölümden oluşur. Bunlar bulanıklaştırıcı, kural tablosu, çıkarım mekanizması ve durulaştırıcıdır.

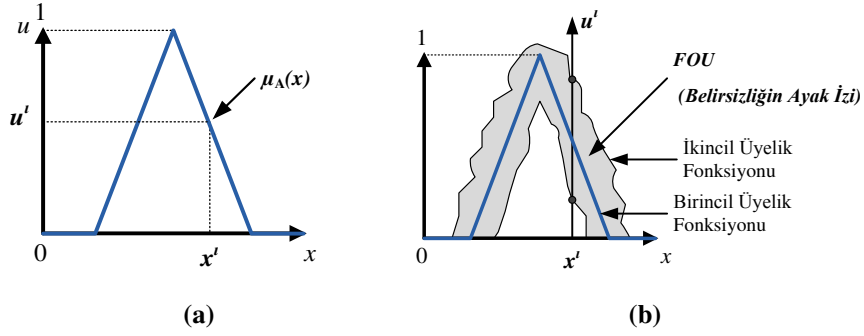


Şekil 2.2. Tip-1 bulanık sistem blok diyagramı [27-34].

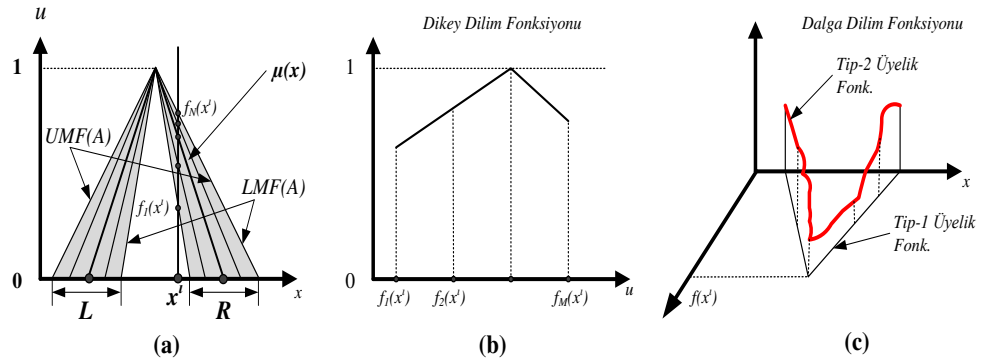
2.2. Tip-2 Bulanık Sistemler

Bulanık kümeleri oluşturan üyelik fonksiyonları ve üyelik dereceleridir. Şekil 2.3 (a)'da tip-1 üyelik fonksiyonu gösterilmektedir. Tip-2 bulanık mantıkta kullanılan üyelik fonksiyonu ise Şekil 2.3 (b)'de gösterilmiştir [27-34]. Tip-2 üyelik fonksiyonları tip-1 üyelik fonksiyonlarının bulanıklaştırılması ile oluşur. Bulanıklaştırma düzenli bir şekilde olmayabilir. Çizginin sağ ve sol tarafı aynı ölçüde taranmamış olabilir. Bulanıklaştırma ile oluşan bu alana **Belirsizliğin Ayak İzi (Footprint Of Uncertainty-FOU)** diyoruz. FOU belirleyen üyelik fonksiyonlarıdır. Şekil 2.3 (b)'de gösterilen üçgen üyelik fonksiyonuna

Birincil Üyelik Fonksiyonu (Primary Membership Function), üyelik fonksiyonunu bulanıklaştıran ikinci fonksiyona ise **İkincil Üyelik Fonksiyonu (Secondary Membership Function)** denir [27-32]. Tip-2 üyelik fonksiyonu adını ikincil üyelik fonksiyonundan alır. İkincil üyelik fonksiyonu üçgensel üyelik fonksiyonu ise, adlandırma Üçgensel Tip-2 Üyelik Fonksiyonu şeklinde olacaktır [27,31].



Şekil 2.3. (a) Tip-1 üyelik fonksiyonu (b) bulanıklaştırılmış tip-1 üyelik fonksiyonu [27-34].



Şekil 2.4. Tip-2 üçgensel üyelik fonksiyonu [27-34].

Şekil 2.4'de Tip-2 üyelik fonksiyonun kısımları şekilsel olarak gösterilmiştir. Şekilde verilen terimleri şöyle sıralayabiliriz [27].

$x' \in X$ giriş değişkenleri,

$\mu(x)$ birincil üyelik fonksiyonu ($J_{x'}$),

$A = J_x$ birincil bulanık küme,

$f_1(x'), f_2(x'), \dots, f_i(x')$ birincil üyelik fonksiyonların kesim noktaları,

$u \in J_x$ ikincil değişkenler ($f_1(x'), f_2(x'), \dots, f_i(x')$), $0 \leq J_x \leq 1$,

$f_{x^1}(u_1), f_{x^1}(u_2), \dots, f_{x^1}(u_m)$ ikincil üyelik fonksiyonları $0 \leq f_{x^1}(u) \leq 1$,

$\tilde{A} = f_{x^1}(u)$ ikincil bulanık küme,

$\tilde{A} = FOU(A^{\%})$ tüm birincil üyelik kümelerin birleşimi ile oluşan FOU da ikincil bulanık kümedir. $FOU(A^{\%})$ iki kısım arasındadır $UMF(A^{\%})$ ve $LMF(A^{\%})$,

$UMF(A^{\%})$ veya $\bar{\mu}_{A^{\%}}(x)$ Üst Üyelik Fonksiyonu - Upper Membership Function,

$LMF(A^{\%})$ veya $\underline{\mu}_{A^{\%}}(x)$ Alt Üyelik Fonksiyonu - Lower Membership Function,

Birincil bulanık küme aşağıdaki gibi tanımlanabilir [27].

$x_i \in X$, $i=1,2,\dots,N$ kesin girişler olmak üzere

μ_k , $k=1,2,\dots,M$ birincil üyelik fonksiyonları ve

$u_k = \mu_k(x_i)$, üyelik dereceleri olmak üzere; $k=1,2,\dots,M$ ve $i=1,2,\dots,N$

$A = J_x = \sum_{k=1}^M \sum_{i=1}^N \mu_k(x_i)$ birincil bulanık kümeyi verir.

İkincil bulanık küme tanımı ise aşağıdaki gibi yapılabilir [27,31];

$\mu_{\tilde{A}}(x,u)$ ikincil üyelik fonksiyonu,

$x_i \in X$ ve $u \in J_x \subseteq [0,1]$

$$\tilde{A} = \{(x,u), \mu_{\tilde{A}}(x,u) \mid \forall x \in X, \forall u \in J_x \subseteq [0,1]\} \text{ ve } 0 \leq \mu_{\tilde{A}}(x,u) \leq 1 \quad (2.2)$$

$\tilde{A} = \sum_{x \in X} \sum_{u \in J_x} \frac{\mu_{\tilde{A}}(x,u)}{(x,u)}$ fonksiyonların parçalı olması durumunda ikincil bulanık küme

$\tilde{A} = \int_{x \in X} \int_{u \in J_x} \frac{\mu_{\tilde{A}}(x,u)}{(x,u)}$ fonksiyonların sürekli olması durumunda ikincil bulanık küme

$x_i \in X$ için $x_i = x^1$ giriş değerini alırsak $\mu_{\tilde{A}}(x = x^1, u)$ 'a *dikey dilim fonksiyonu* denir.

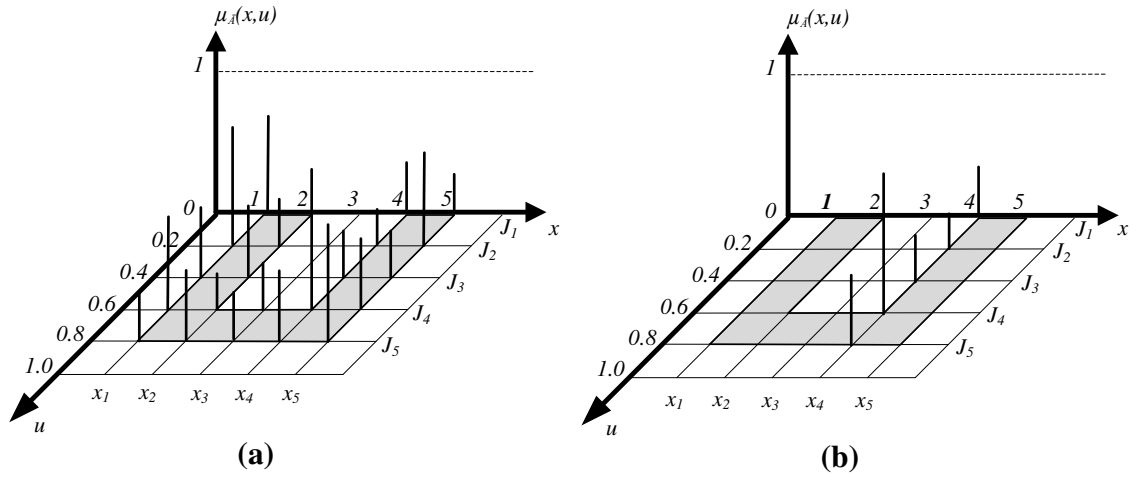
Şekil 2.4 (b)'de gösterilmiştir. Dikey dilim fonksiyonu aynı zamanda ikincil üyelik fonksiyonudur. İkincil üyelik fonksiyonu etiketini (domain) birincil üyelik fonksiyonundan alır. Şekil 2.4 (b)'de $x_i = x^1$ giriş değeri için birincil üyelik fonksiyonların kesim noktaları

gösterilmiştir. Kesim noktaları aynı zamanda birincil bulanık kümedir. Tip-2 üyelik fonksiyonları üç boyutludur. Birincil üyelik fonksiyonların kesim noktalarına karşılık gelen üçüncü boyutta olan ikincil üyelik fonksiyonların üyelik dereceleri vardır. Bu üyelik dereceleri ise ikincil bulanık kümeyi (2.4)'daki gibi oluşturur [27-34].

$$\mu_{\tilde{A}}(x = x^t, u) \equiv \mu_{\tilde{A}}(x^t, u) = \int_{u \in J_{x^t}} f(u) / u \quad J_{x^t} \subseteq [0,1] \quad (2.3)$$

İkincil bulanık kümeyi daha genel bir şekilde aşağıdaki gibi yazabiliriz.

$$\begin{aligned} \tilde{A} &= \sum_{x \in X} \left[\sum_{u \in J_x} f_x(u) / u \right] / x \\ \tilde{A} &= \sum_{i=1}^N \left[\sum_{u \in J_{x_i}} f_{x_i}(u) / u \right] / x_i \\ \tilde{A} &= \left[\sum_{k=1}^M f_{x_1}(u_{1k}) / u_{1k} \right] / x_1 + \dots + \left[\sum_{k=1}^{M_N} f_{x_N}(u_{Nk}) / u_{Nk} \right] / x_N \end{aligned} \quad (2.4)$$



Şekil 2.5 Örnek Tip-2 Üyelik Fonksiyonu Dereceleri [33-35].

Şekil 2.5 (a)'da $x = \{1, 2, 3, 4, 5\}$ için birincil üyelik fonksiyonları J_1, J_2, J_3, J_4, J_5 ve ikincil üyelik fonksiyonları $\mu_{\tilde{A}}(x, u)$ gösterilmektedir.

$x = \{1, 2, 3, 4, 5\}$ için ikincil üyelik fonksiyonları kümesi

$$J_1 = J_2 = J_4 = J_5 = \{0.0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8\}$$

$$J_3 = \{0.6, 0.8\}$$

Şekil 2.5 (b)'de $x = x' = 4$ giriş değeri için $J_4 = \mu(u, x')$ üyelik fonksiyonu için birincil bulanık küme

$$A_{X=4} = J_4 = \sum_{u \in J_4} \mu(u, x') = \{(0.0, 4), (0.2, 4), (0.4, 4), (0.6, 4), (0.8, 4)\}$$

$J_1 = \mu_{A_1}(x', u')$ dikey dilim fonksiyonu için ikincil bulanık küme

$$\tilde{A}_{X=1} = \sum_{u \in J_1} \mu_{\tilde{A}_{X=1}}(x', u') = \{(0.3, 0.0), (0.2, 0.2), (0.3, 0.4), (1, 0.6), (0.5, 0.8)\} \text{ olarak yazılabilir.}$$

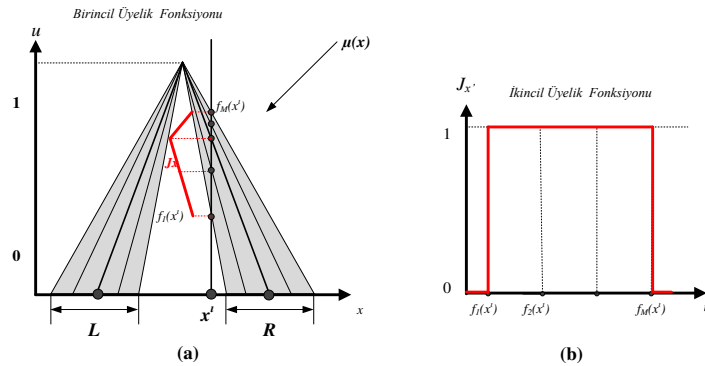
Birincil üyelik fonksiyonlardaki bulanık alan olan FOU'da $f_x(u)$ ikincil fonksiyonların 1'e eşit olarak kabul edilmesi durumunda ise ikincil bulanık kümeye **Aralık Tip-2 Bulanık Kümesi (Interval Type-2 Fuzzy Set-IT2FS)** denir [38].

Hesaplamanın daha kolay yapılması, kümeler üzerindeki işlemlerin ve tip indirgemenin daha kolay yapılması için IT2FS tasarlanmıştır.

İkincil üyelik fonksiyonu için $f_x(u) = 1, \forall u \in J_x \subseteq [0, 1]$ olması durumunda ikincil üyelik fonksiyonuna Aralık İkincil Üyelik Fonksiyonu denir. Aralık tip-2 bulanık kümesi (2.6),

$$\tilde{A} = \int_{x \in X} u_{\tilde{A}}(x) / x = \int_{x \in X} \left[\int_{u \in J_x} 1/u \right] / x = \int_{x \in X} \left[\int_{u \in (u_{\tilde{A}}(x), u_{\tilde{A}}(x))} 1/u \right] / x \quad (2.5)$$

olarak yazılır ve Şekil 2.6'da gösterilmiştir [27-34].



Şekil 2.6. Aralık tip-2 üçgensel üyelik fonksiyonu [36].

Birincil üyelik fonksiyonu üçgensel ise ikincil üyelik fonksiyonuna Aralık Tip-2 Üyelik Üçgen Fonksiyonu denir. Aralık tip-2 bulanık küme işlemleri aşağıdaki gibidir.

Aralık Tip-2 Bulanık Kümeler için Katılma (Join) işlemi (2.6); (max t-norm)

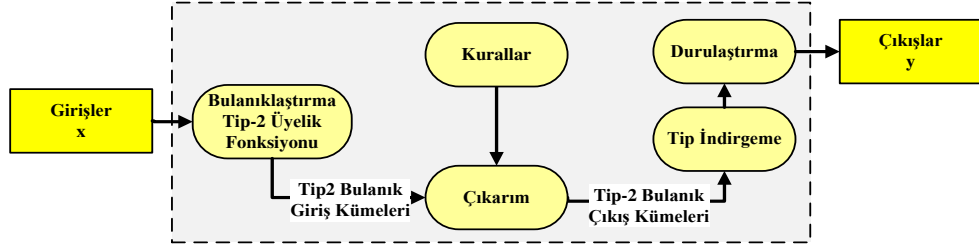
$$\tilde{A} \amalg \tilde{B} = \int_{x \in X} \left[\int_{u \in (\underline{u}_{\tilde{A}}(x), \bar{u}_{\tilde{A}}(x))} \int_{w \in (\underline{u}_{\tilde{B}}(x), \bar{u}_{\tilde{B}}(x))} 1/u \vee w \right] / x \quad (2.6)$$

Aralık Tip-2 Bulanık Kümeler için Buluşma (Meet) işlemi (2.7); (min t-norm veya çarpma t-norm)

$$\tilde{A} \Pi \tilde{B} = \int_{x \in X} \left[\int_{u \in (\underline{u}_{\tilde{A}}(x), \bar{u}_{\tilde{A}}(x))} \int_{w \in (\underline{u}_{\tilde{B}}(x), \bar{u}_{\tilde{B}}(x))} 1/u \wedge w \right] / x \quad (2.7)$$

Tip-2 bulanık mantık; Tip-1 bulanık mantığa benzer, Tip-1 bulanık mantığı kapsayan daha çok geliştirilmiş bir mantıktır. Şekil 2.7.'da Tip-2 Bulanık Mantık Sistemi gösterilmiştir. Tip-1 bulanık mantıkta üyelik fonksiyonları belirsiz değildir fakat Tip-2 bulanık mantıkta üyelik fonksiyonları kesin değil belirsizdir. Bu nedenle belirsizliğin olduğu modellerde Tip-2 bulanık mantık daha çok avantajlıdır. Tip-1 bulanık mantıkta üyelik fonksiyonları iki boyutlu iken Tip-2 bulanık mantıkta üyelik fonksiyonları üç boyutludur. Bu durumda iki adet üyelik fonksiyonu ortaya çıkar ve Tip-2 bulanık mantığın formüle edilmesi ve çizilmesi oldukça zorlaşır. Kural tabanı ise Tip-1 bulanık mantığa benzer. Üyelik fonksiyonların koşul ve sonuç kuralına göre olası tüm durumlar söz konusudur. Çıkarım mekanizması ise Tip-2 bulanık girişleri alır ve Tip-2 bulanık çıkışları verir. Bu bulanık çıkışlar Tip-2 bulanık kümelerdir. Tip-1 bulanık mantıkta durulaştırma Tip-1 bulanık kümelerden kesin sonuçlar çıkarır. Tip-2 bulanık mantıkta ise, çıkarım mekanizmasından oluşan tip-2 bulanık kümeler **“Tip İndirgeyici”** **“Type Reducer”** diye adlandırılan kısımdan geçerek Tip İndirgenmiş Kümeler veya tip-1 bulanık kümeler elde eder. Daha sonra durulaştırma yapılarak kesin kümeler oluşur.

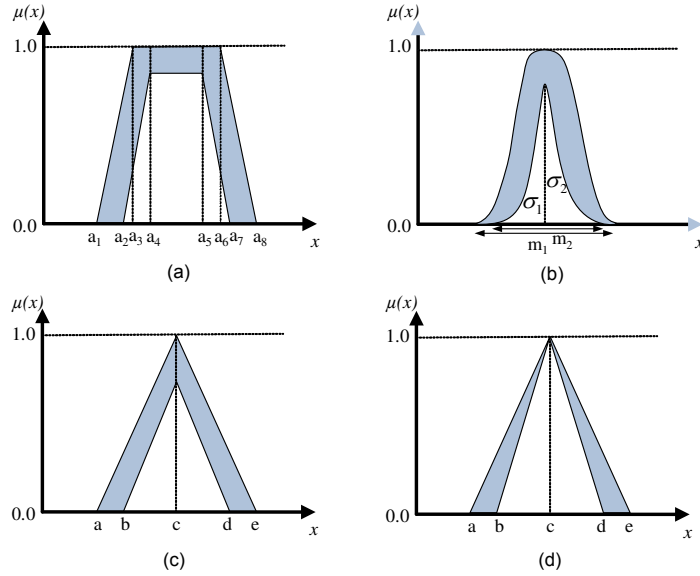
Bu çalışmada hesaplamaların daha kolay ve işlemlerin daha hızlı çalışması için tip-2 bulanık sistemde aralık tip-2 üyelik fonksiyonları kullanıldı. Bu tür bulanık sisteme Aralık Tip-2 Bulanık Sistem denir.



Şekil 2.7. Tip-2 bulanık sistem blok diyagramı [27-38].

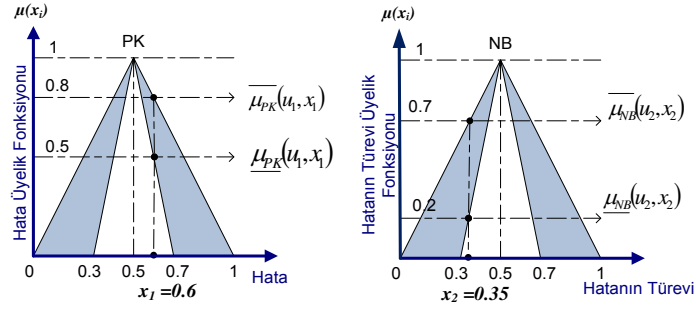
2.2.1. Bulanıklaştırma

Bulanıklaştırma işlemi, sistemin giriş değişkenlerinin değerlerine göre üyelik fonksiyonlarına karşılık gelen üyelik derecelerinin belirlenmesidir. Durulaştırma işleminde kullanılabilecek bazı üyelik fonksiyonları örnekleri Şekil 2.8’de gösterilmiştir.



Şekil 2.8. (a) Yamuk üyelik fonksiyonu, (b) gaussian üyelik fonksiyonu, (c),(d) üçgen üyelik fonksiyonları [27].

Bulanıklaştırma işleminden sonra tip-2 bulanık kümeler elde edilir. Bulanık kümelerin oluşturulması şekilsel olarak Şekil 2.9’da gösterilmiştir.



Şekil 2.9. Aralık tip-2 bulanık sistemde bulanıklaştırma işlemi [27].

İki adet giriş değişkenine sahip bir tip-2 bulanık sistemde $x_1 = 0.6$ hata değerini (H) ve $x_2 = 0.35$ hatanın türevi (G) değerini belirtmek üzere şekilde gösterildiği gibi bulanıklaştırılarak elde edilen tip-2 bulanık giriş kümelerin denklem (2.5)'de belirtildiği gibi oluşturulduğunda aşağıdaki sonuç elde edilir.

$$\tilde{H}_{x=0.6} = \{\overline{\mu_{PK}}(0.8, 0.6), \underline{\mu_{PK}}(0.5, 0.6)\}$$

$$\tilde{G}_{x=0.35} = \{\overline{\mu_{NB}}(0.7, 0.35), \underline{\mu_{NB}}(0.2, 0.35)\}$$

2.2.2. Çıkarım Mekanizması

Bu bölümde bulanıklaştırma işleminde elde edilen tip-2 bulanık giriş kümeler Mamdani Yöntemi ile giriş kümelerinden seçim yapılır ve kural tablosundaki değerlendirmeler ile tip-2 bulanık çıkış kümeleri oluşturulur.

Mamdani yönteminde, bulanık sistemde giriş değişkenlerinin sayısına bağlı olarak her bir giriş değişkeni için bulunan üyelik dereceleri diğer giriş değişkenlerin üyelik dereceleri ile olası tüm durumları karşılaştırılır. Şekil 2.9'daki örnek ele alınarak;

$$H = \int_{u \in H} 1/v \quad v[l_h, r_h] \subseteq [0,1] \text{ ve } G = \int_{u \in G} 1/w \quad w[l_g, r_g] \subseteq [0,1] \text{ olmak üzere; birleşim (meet)}$$

işlemi (2.8)'de ve kesişim (join) işlemi (2.9)'da belirtilmiştir.

$$Q = H \Pi G \int_{q \in [l_h * r_h, l_g * r_g]} 1/q \quad (2.8)$$

$$Q = H \Pi G \int_{q \in [l_h \vee r_h, l_g \vee r_g]} 1/q \quad (2.9)$$

Denklemdaki l üst üyelik fonksiyonunu, r alt üyelik fonksiyonunu belirtmektedir. Mamdani yönteminde üst ve alt üyelik fonksiyonları (2.10) ve (2.11)'deki denklemler ile ifade edilebilir [27,28,31].

$$\underline{u}_{Q_k^l}(x_k) = \int_{X_k} [\underline{u}_{H_k^l}(x_k) * \underline{u}_{G_k^l}(x_k)] / x_k \quad (2.10)$$

$$\bar{u}_{Q_k^l}(x_k) = \int_{X_k} [\bar{u}_{H_k^l}(x_k) * \bar{u}_{G_k^l}(x_k)] / x_k \quad (2.11)$$

Denklemden kullanılan üyelik fonksiyonları açılımı (2.12)'de verilmiştir.

$$u_{H_k^l}(x_k) = \int_{v^l \in [\underline{u}_{x_k}(x_k), \bar{u}_{x_k}(x_k)]} 1/v^l \quad (2.12)$$

$$u_{G_k^l}(x_k) = \int_{w^l \in [\underline{u}_{x_k}(x_k), \bar{u}_{x_k}(x_k)]} 1/w^l$$

Mamdani yönteminde ilk olarak üyelik derecesine sahip üyelik fonksiyonlarının alt ve üst üyelik fonksiyonları ayrı ayrı olmak üzere karşılaştırma yapılarak minimum üyelik derecesine sahip fonksiyonlar denklem (2.13) de belirtildiği gibi seçilir. Denklemden * minimum seçme işlemini belirtmektedir.

$$F^1 = \Pi_{x \in X} \left[\prod_{k=1}^n u_{\tilde{Q}_k^1}(x_k) \right] = \left[\frac{f^1}{\bar{f}^1} \right]$$

$$\underline{f}^1 = \sup_{x \in X} \int_{x_1} \dots \int_{x_n} [\underline{u}_{\tilde{H}_1}(x_1) * \underline{u}_{\tilde{G}_1}(x_1)] * \dots * [\underline{u}_{\tilde{H}_n}(x_n) * \underline{u}_{\tilde{G}_n}(x_n)] / \vec{x} \quad (2.13)$$

$$\bar{f}^1 = \sup_{x \in X} \int_{x_1} \dots \int_{x_n} [\bar{u}_{\tilde{H}_1}(x_1) * \bar{u}_{\tilde{G}_1}(x_1)] * \dots * [\bar{u}_{\tilde{H}_n}(x_n) * \bar{u}_{\tilde{G}_n}(x_n)] / \vec{x}$$

Minimum üyelik derecelerine sahip fonksiyonlar tespit edildikten sonra mamdani yönteminde kural tablosuna göre çıkış bulanık kümeler oluşturulur. Tablo 2.1’de örnek bir kural tablosu gösterilmiştir.

Tablo 2.1. Kural tablosu

Hatanın Türevi	Hata			
		NB	S	PK
	NB	PK	NB	S
	S	PK	S	NB
	PK	S	PK	NB

Kural tablosu bulanık sistemin kullanılacağı modelde edinilen tecrübelerle göre oluşturulur. Olası tüm durumlar değerlendirilir. Kural tablosunun işleyişi “Eğer Hata= ‘NB’ ve Hatanın Türevi= ‘NB’ ise sonra, Çıkış= ‘PK’ dır.” şeklindedir. Kural tablosuna göre seçilen çıkış üyelik fonksiyonları ve çıkarım işlemi ile belirlenen üyelik dereceleri ile oluşturulan kümelerin toplamı (maksimum) tip-2 bulanık çıkış kümesini oluşturur ve (2.14)’deki gibi ifade edilir [27,28,31].

$$u_{\tilde{B}^l}(y) = u_{\tilde{G}^l}(y) \prod F^l = u_{\tilde{G}^l}(y) \prod \int_{f^l \in [\underline{f}^l, \bar{f}^l]} 1/f^l \quad (2.14)$$

$$u_{\tilde{B}^l}(y) = \int_{b \in [\underline{f}^1 * u_{G^1}(y) \vee \dots \vee \underline{f}^N * u_{G^N}(y)] [\bar{f}^1 * u_{G^1}(y) \vee \dots \vee \bar{f}^N * u_{G^N}(y)]} 1/b$$

Mamdani yöntemini Şekil 2.9’daki ve Tablo 2.1’deki örneklerle uygularsak,

$$\tilde{H}_{x=0.6} = \{\overline{\mu_{PK}}(0.8,0.6), \underline{\mu_{PK}}(0.5,0.6)\}$$

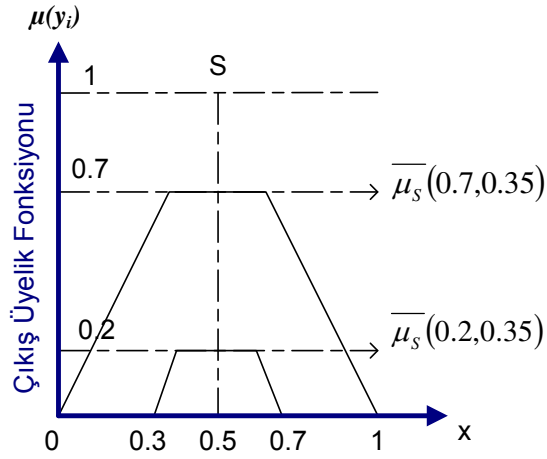
$$\tilde{G}_{x=0.35} = \{\overline{\mu_{NB}}(0.7,0.35), \underline{\mu_{NB}}(0.2,0.35)\}$$

giriş bulanık kümeler için uygulanır ise,

$$\bar{f} = \min(\overline{\mu_{PK}}(0.8,0.6), \overline{\mu_{NB}}(0.7,0.35)) = \overline{\mu_S}(0.7,0.35)$$

$$\underline{f} = \min(\underline{\mu_{PK}}(0.8,0.6), \underline{\mu_{NB}}(0.2,0.35)) = \underline{\mu_S}(0.2,0.35)$$

çıkış kümeleri elde edilir ve Şekil 2.10’daki gibi gösterilir.



Şekil 2.10. Aralık tip-2 bulanık çıkış kümesinin şekilsel gösterimi [27].

2.2.3. Tip İndirgeme

Bulanık sistemin çıkışında kesin değerler almak için bulanık kümelerin durulaştırılması gerekir. Bu nedenle çıkarım işleminde elde edilen tip-2 bulanık kümelere tip indirgeme işlemi uygulanarak durulaştırma işlemine uygun hale getirilir. Tip indirgeme işleminde uygulanabilecek farklı yöntemler vardır.

2.2.3.1. Alan Merkezi Tip İndirgeme (Centroid Type Reduction)

Çıkarım işleminde oluşturulan bulanık kümenin alt ve üst üyelik fonksiyonları için alan merkezi bulunarak bulanık küme indirgenir. Alan merkezi yöntemi (2.15)'deki gibi ifade edilir.

$$y_c(x) = \int_{\theta_l \in J_{y_l}} \dots \int_{\theta_N \in J_{y_N}} 1 / \frac{\sum_{i=1}^N y_i \theta_i}{\sum_{i=1}^N \theta_i} = [y_l^i, y_r^i] \quad (2.15)$$

$i = 1, 2, \dots, N$ farklı girişler,

2.2.3.2. Yükseklik Tip İndirgeme (Height Type Reduction)

Bulanık çıkış kümesinde $\max(\bar{y})^l$, l adet çıkış kümesindeki maksimum üyelik dereceleri olarak tanımlarsak M adet bulanık çıkış küme için her biri işleme alınarak tip indirgeme işlemi (2.16) gibi yapılır.

$$y_h(\underline{x}) = \int_{\theta_1 \in J_{\bar{y}^1}} \dots \int_{\theta_M \in J_{\bar{y}^M}} 1 / \frac{\sum_{l=1}^M \bar{y}^l \theta_l}{\sum_{l=1}^M \theta_l} = [y_l^i, y_r^i] \quad (2.16)$$

2.2.3.3. Kümeler Merkezi Tip İndirgeme (Center of Sets Type Reduction)

Tip indirgeme işleminde kullanılacak kümelerin $C_{\bar{G}^l}$ her biri için (2.17) işlemi yapılarak tip indirgeme işlemi gerçekleştirilir.

$$y_{\cos}(\underline{x}) = \int_{v_1 \in C_{\bar{G}^1}} \dots \int_{v_M \in C_{\bar{G}^M}} \int_{w_1 \in W_1} \dots \int_{w_N \in W_N} 1 / \frac{\sum_{l=1}^M v_l w_l}{\sum_{l=1}^M w_l} = [y_l^i, y_r^i] \quad (2.17)$$

Burada y_l ve y_r çıkışlarını (2.18)'deki gibi yazılabilir.

$$y_l = \frac{\sum_{i=1}^L \bar{f}^i \underline{y}_l^i + \sum_{i=L+1}^M \underline{f}^i \underline{y}_l^i}{\sum_{i=1}^L \bar{f}^i + \sum_{i=L+1}^M \underline{f}^i} \quad y_r = \frac{\sum_{i=1}^R \underline{f}^i \bar{y}_l^i + \sum_{i=R+1}^M \bar{f}^i \bar{y}_l^i}{\sum_{i=1}^R \underline{f}^i + \sum_{i=R+1}^M \bar{f}^i} \quad (2.18)$$

Burada üst ve alt üyelik fonksiyonların ağırlık merkezini bulan atlama noktaları önemlidir. Bunlar formüldeki L ve R değerleridir. Bu değerleri bulmak için yaygın olarak kullanılan KM (Karnik-Mendel Algorithms) Algoritmasını kullanabiliriz. Algoritmanın adımları aşağıda verildiği gibidir [3].

y_l değeri için;

Adım 1: $i = 1, \dots, N$ için tüm $\underline{y}^i$ değerleri sıralanır. $\underline{y}^1 \leq \underline{y}^2 \leq \dots \leq \underline{y}^i$ bu sıralaması için yeniden numaralandırma yapma gerekebilir. İndekslenmiş ise tekrar sıralamaya uygun olarak indekslenmelidir.

Adım 2: $i = 1, \dots, N$ için $f_i = \frac{\bar{f}_i + \underline{f}_i}{2}$ ve ardından $y = \frac{\sum_{i=1}^N y_i f_i}{\sum_{i=1}^N f_i}$ hesaplanır.

Adım 3: $\underline{y}^k \leq y \leq \underline{y}^{k+1}$ koşulunu sağlayan atlama noktası k bulunur.

Adım 4: $i = 1, \dots, N$ için $f_i = \begin{cases} \bar{f}_i & , i \leq k \\ \underline{f}_i & , i > k \end{cases}$ ve ardından $y' = \frac{\sum_{i=1}^N y_i f_i}{\sum_{i=1}^N f_i}$

hesaplanır.

Adım 5: Eğer $y' = y$ ise; $y_l = y$, $L = k$ olarak atanır ve algoritma son bulur. Eğer $y' \neq y$ ise; Adım 6'ya gidilir.

Adım 6: $y = y'$ olarak atanır ve Adım 3'e gidilir.

y_r değeri için;

Adım 1: $i = 1, \dots, N$ için tüm $\bar{y}^i$ değerleri sıralanır. $\bar{y}^1 \leq \bar{y}^2 \leq \dots \bar{y}^i$ bu sıralama için yeniden numaralandırma yapma gerekebilir. İndekslenmiş ise tekrar sıralamaya uygun olarak indekslenmelidir.

Adım 2: $i = 1, \dots, N$ için $f_i = \frac{\bar{f}_i + \underline{f}_i}{2}$ ve ardından $y = \frac{\sum_{i=1}^N \bar{y}_i f_i}{\sum_{i=1}^N f_i}$ hesaplanır.

Adım 3: $\bar{y}^k \leq y \leq \bar{y}^{k+1}$ koşulunu sağlayan atlama noktası k bulunur.

Adım 4: $i = 1, \dots, N$ için $f_i = \begin{cases} \bar{f}_i & , i \leq k \\ \underline{f}_i & , i > k \end{cases}$ ve ardından $y' = \frac{\sum_{i=1}^N \bar{y}_i f_i}{\sum_{i=1}^N f_i}$

hesaplanır.

Adım 5: Eğer $y' = y$ ise; $y_r = y$, $R = k$ olarak atanır ve algoritma son bulur. Eğer $y' \neq y$ ise; Adım 6'ya gidilir.

Adım 6: $y = y'$ olarak atanır ve Adım 3'e gidilir.

2.2.4. Durulaştırma

Aralık Tip-2 Bulanık Mantık Sistemlerde tip indirgeme işlemlerinde üst üyelik fonksiyonu ve alt üyelik fonksiyonları için y_l ve y_r çıkışları (2.19) elde edilir. Durulaştırma işleminde ise bu çıkışların ortalaması alınır.

$$y(x) = \frac{y_l + y_r}{2} \quad (2.19)$$

Tip-2 bulanık sistemlerin işleyişi algoritma şeklinde yazılırsa, aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

Adım 1: Sistem girişindeki x_i değişkenlerin değerlerini al.

Adım 2: Her bir x_i giriş değişkeni, tanımlanan üyelik fonksiyonlarındaki üyelik derecelerini bul ve üyelik fonksiyonun etiketini al.

Adım 3: Üyelik derecelerinden ve fonksiyon etiketinden oluşan, alt ve üst üyelik fonksiyonları ayrı olacak şekilde, tip-2 bulanık giriş kümesini oluştur.

Adım 4: Bulanık giriş kümelerindeki en küçük değere sahip üyelik derecelerini bul.

Adım 5: Seçilen minimum üyelik derecelerinin etiketlerini kural tablosuna göre değerlendir. Çıkış üyelik fonksiyonlarını bul.

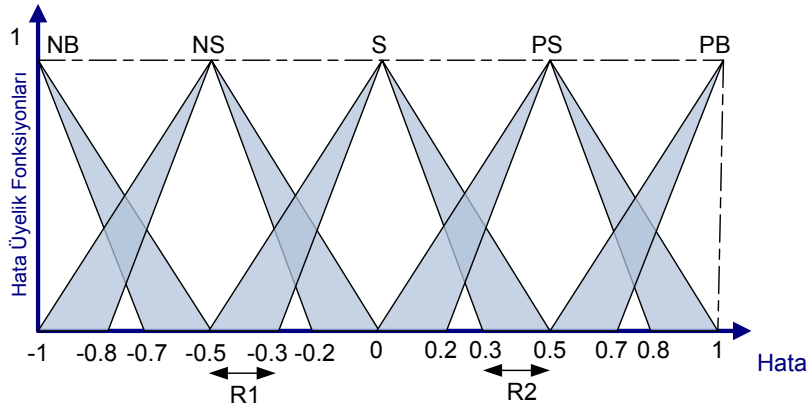
Adım 6: Üyelik derecelerinden ve çıkış üyelik fonksiyonlarının etiketlerinden tip-2 bulanık çıkış kümesini oluştur.

Adım 7: bulanık çıkış kümesinden tip indirgeme yöntemi ile y_l ve y_r değerlerini bul

Adım 8: y_l ve y_r değerlerinin ortalamalarını al.

2.3. Tip-2 Bulanık Sistemlerin Optimizasyonu

Bulanık sistemler karmaşık, çözülmesi zor ve belirsiz olan sistemlerde genellikle kullanılırlar. Bundan dolayı sisteme uygun bir bulanık sistem yapısını oluşturmak da zordur. Deneme yanılma veya tecrübelerle dayanarak üyelik fonksiyonlarının özelliklerinin, kurallar tablosunun ve durulaştırma yöntemlerinin belirlenmesi uzun zaman alan ve doğruluk tespitinin zor olduğu bir iştir. Bu tür durumlarda bulanık sistem optimize edilerek daha performanslı bir sonuç elde edilebilir. Optimizasyonun uygulanacağı alan ve yöntem farklı olabilmektedir. Bulanık sistemde; üyelik fonksiyonların sayısı, üyelik fonksiyonlarının parametreleri, kural sayısı veya kurallar optimize edilebilen unsurlardır. Bu çalışmada tip-2 bulanık sistemin üyelik fonksiyonları optimize edilmeye çalışılmıştır. Şekil 2.11’de gösterilen üyelik fonksiyonlarının R1 ve R2 taban değerleri her bir üyelik fonksiyon için optimizasyon işlemine alınmıştır.



Şekil 2.11. Aralık tip-2 bulanık üçgensel üyelik fonksiyonları

Literatürde kullanılan bir çok optimizasyon yöntemi vardır. Bunlardan bazıları “*Ant colony optimization (ACO)*”, “*Traditional Optimization (TO)*”, “*Chemical Optimization (CO)*”, “*Genetic Algorithms (GAs)*” ve “*Particle Swarm Optimization (PSO)*” optimizasyonlarıdır.

Bu çalışmada parçacık sürü optimizasyonu (PSO) tercih edilmiştir. Çünkü PSO doğrusal olmayan sistemler için tasarlanmıştır. Çok parametrelili ve değişkenli sistemlere kolaylıkla uygulanabilmektedir. Ayrıca PSO algoritmasının kısa ve karmaşık olmayışı tercih sebeplerindendir.

PSO, kuş veya balık sürülerinden esinlenerek ortaya konmuştur. PSO sistemi rastgele çözümler içeren bir popülasyon ile başlar ve en iyi çözüm popülasyonu bulmaya çalışır. PSO’da bahsedilen her bir parçacık muhtemel bir çözüm noktasıdır. Buradaki mantık sürü içerisindeki her bir parçanın bir biri ile iletişime girerek en iyi çözümü bulmasıdır. PSO algoritmasında değişken sayısı (d) optimizasyonun boyutunu belirler. Parçacık sayısı (p) algoritmanın performansına bağlı olarak belirlenir. Bu durumda oluşan parçacık matrisi (2.20)’de gösterilmiştir.

$$x = \begin{bmatrix} x_{11} & \dots & x_{1d} \\ x_{21} & \dots & x_{2d} \\ \vdots & \dots & \vdots \\ x_{p1} & \dots & x_{pd} \end{bmatrix}_{p \times d} \quad (2.20)$$

Matrise göre i’ninci parçacık $x_i = [x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{ip}]$ olarak yazılır ve i’ninci parçacığın en iyi çözüm pozisyonu $Pbest_i = [P_{i1}, P_{i2}, \dots, P_{ip}]$ şeklinde ifade edilir. Parçacıklar iterasyonlar ile güncellenerek sistemin en iyi genel çözüm pozisyonu olan $Gbest_i =$

$[P_1, P_2, \dots, P_p]$ bulunur. İterasyonda her bir parçacık, hızına göre yeni pozisyonlar alır. Parçacıkların hızı ve yeni konumları (2.21) ve (2.22)'de verilmiştir.

$$v_i^{k+1} = v_i^k + c_1 * Rand_1^k * (Pbest_i^k - x_i^k) + c_2 * Rand_2^k * (Gbest_i^k - x_i^k) \quad (2.21)$$

$$x_i^{k+1} = x_i^k + v_i^{k+1} \quad (2.22)$$

PSO algoritmasının adımları kısaca aşağıdaki gibidir.

PSO Algoritması

Adım 1. Başlangıç koşullarını yükle

Adım 2. Her parçacık için uygunluk değerini hesapla, her parçacığın en iyi uygunluk değeri için *Pbest* matrisini güncelle

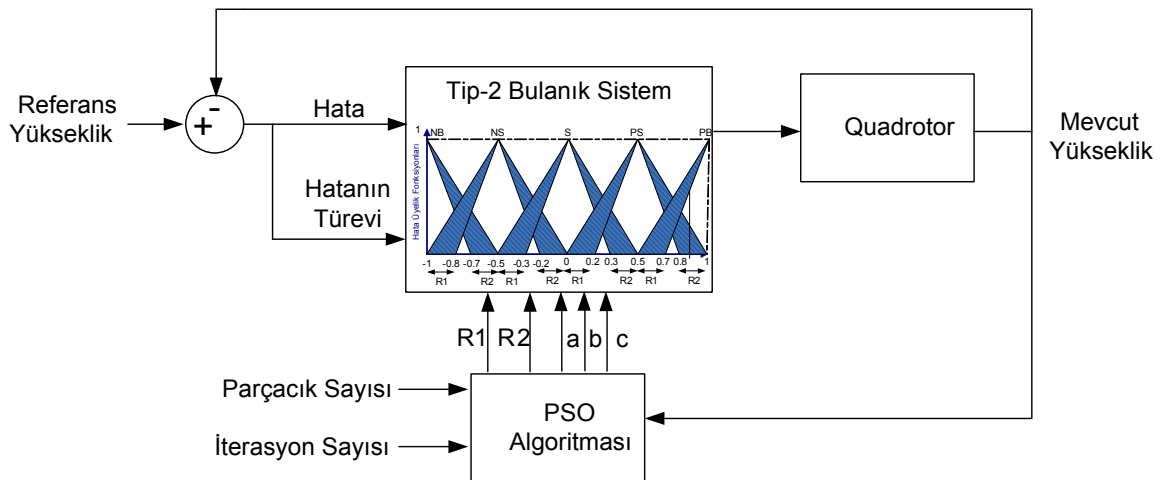
Adım 3. Tüm parçacıklar için hesaplanan *Pbest* değerlerinin en iyisi için *Gbest* matrisini oluştur.

Adım 4. Her parçacık için yeni değişim hızını hesapla

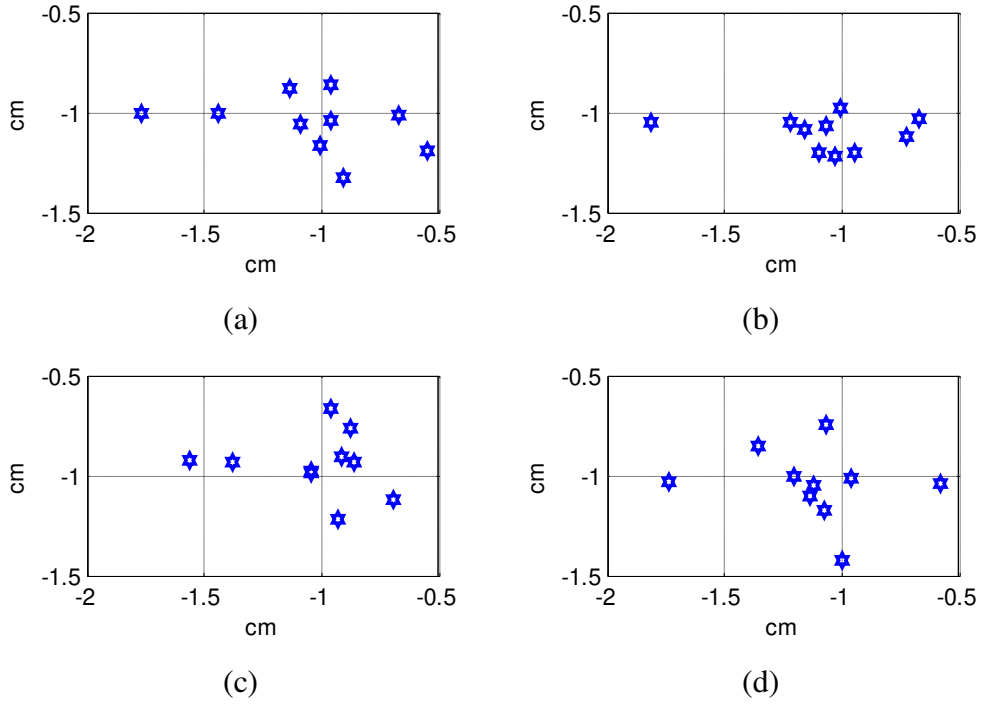
Adım 5. Her parçacık için yeni konumunu hesapla

Adım 6. Döngü sayısı veya hata koşulu sağlanmıyor ise Adım 2' ye git, sağlanıyor ise *Pbest* ve *Gbest* sonuçları gönder.

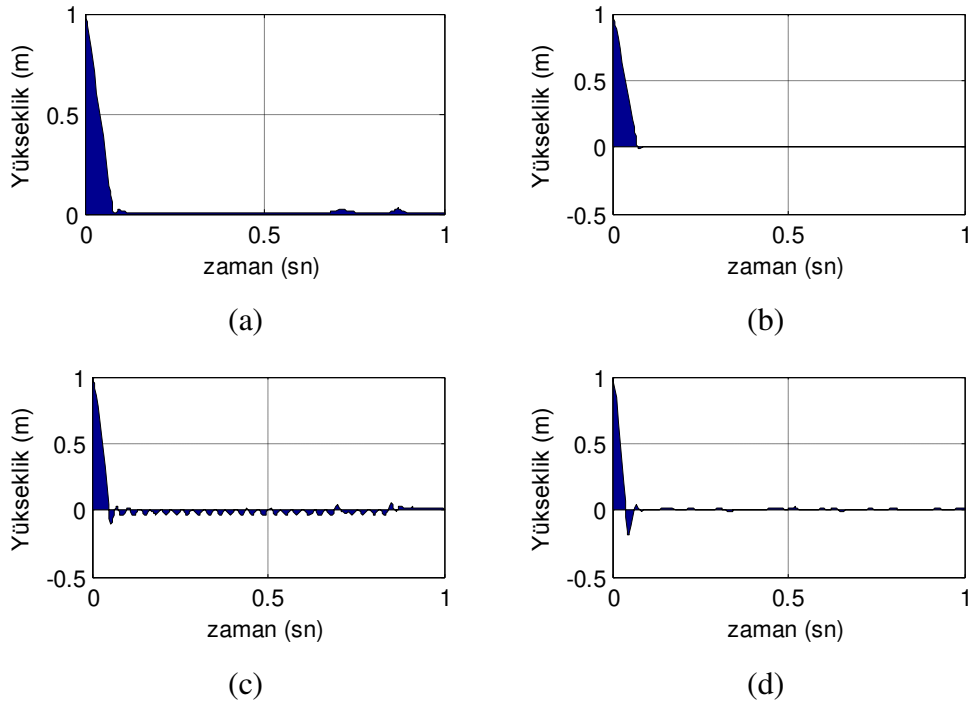
Üyelik fonksiyonlarının optimizasyonu quadrotorun yükseklik kontrolünde uygulanarak Şekil 2.11'daki üyelik fonksiyonlarının R1 ve R2 taban değerleri optimize edilmiştir. Optimizasyon işleminin blok diyagramı Şekil 2.12'de gösterilmiştir.



Şekil 2.12. PSO uygulamasının blok diyagramı



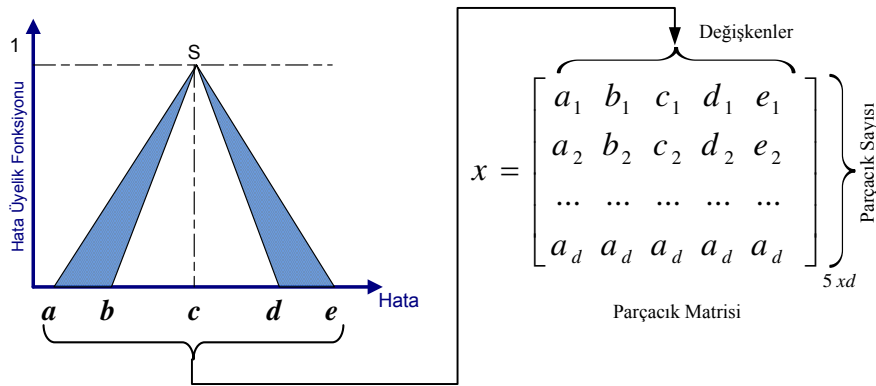
Şekil 2.13. PSO parçacıkların konum değişimi



Şekil 2.14. Quadrotor modelinde PSO algoritması uygulanırken elde edilen çıkış grafikleri

PSO algoritmasını iterasyon sayısı 10 ve parçacık sayısı 10 adet olacak şekilde uygulandığında parçacıkların yer değişimi Şekil 2.13’de gösterilmiştir. Uygulanan modelde optimizasyonun etkileri Şekil 2.14’de gösterilmiştir. Optimizasyon sonucunda $R1=0.29$ ve $R2=0.29$ taban değerleri bulunmuştur. Bu taban değerleri bütün üyelik fonksiyonları içindir.

Üyelik fonksiyonunu belirleyen tüm parametreler ele alındığında Şekil 2.15’de gösterildiği gibi 5 parametreden oluşur. Bu parametreler PSO algoritmasında değişken sayılarıdır. Tüm üyelik fonksiyon için değişken sayısı 25 adet olduğu görülür.



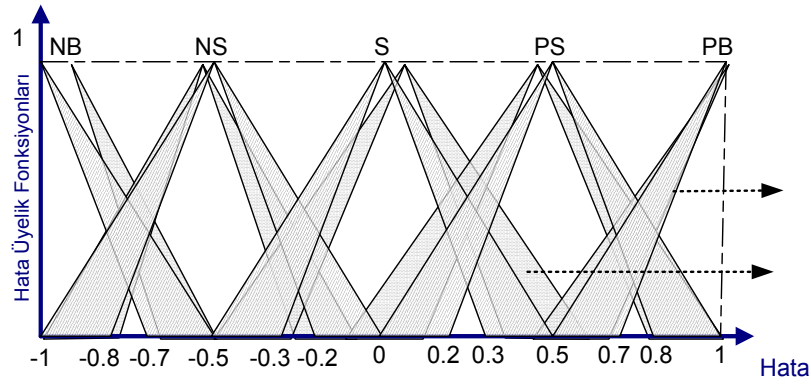
Şekil 2.15. Üyelik fonksiyonun parçacık matrisi gösterimi

Üyelik fonksiyonunda parametreler aşağıdaki gibi işlenir.

$$\mu_s(a, c, d, b, c, e)$$

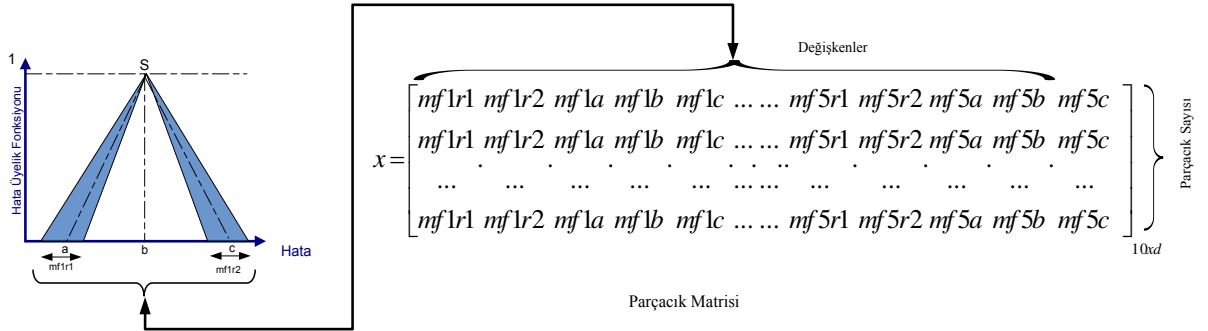
Üst Üyelik Fonksiyonu
Alt Üyelik Fonksiyonu

Tüm fonksiyonlar için PSO uygulandığında üyelik fonksiyonlarındaki değişimler örnek olarak Şekil 2.16’de gösterilmiştir. Bu çalışmada kullanılan üyelik fonksiyonlarında bu yöntem kullanılabilir.



Şekil 2.16. Üyelik fonksiyonun POS ile değişimi

Uygulanan yöntemin genel olarak gösterimi Şekil 2.17'deki gibidir. Taban genişlikleri için $r1$ ve $r2$ değerleri ve üyelik fonksiyonun taban değerleri için a, b ve c değerleri göz önüne alınarak aşağıdaki gibi bir kodlama yapılabilir. Burada 5 üyelik fonksiyonuna sahip bir giriş için verilmiştir.



Şekil 2.17. Uygulanan yöntemin PSO genel gösterimi

Bir giriş üyelik fonksiyonları için yukarıdaki önerilen parametreler kullanıldığında PSO'da 25 adet değişken oluşturulur. Rastgele oluşturulan 10 adet parçacık için PSO sistemde uygulandığında sonuç olarak üyelik fonksiyonların parametre değerleri Tablo 2'de verilmiştir. Bu değerler sistemin çıkışını optimum düzeyde tutan değerlerdir.

Tablo 2.2. PSO ile elde edilen giriş üyelik fonksiyonun parametre değerleri

NB					NK					S					PK					PB				
a	b	c	d	e	a	b	c	d	e	a	b	c	d	e	a	b	c	d	e	a	b	c	d	e
-1.02	-0.86	-0.15	-0.74	-0.78	-0.63	-0.44	-0.69	-0.60	-0.75	-0.43	-0.57	-0.15	-0.48	-1.03	-0.25	-0.51	0.00	0.10	-0.02	0.70	0.12	0.51	0.78	0.91

3. QUADROTORUN MODELLENMESİ VE SİMÜLASYONU

Quadrotor yüksek hareket kabiliyetine sahip, dört pervaneli, altı serbestlik dereceli ve dikey iniş-kalkış özelliğine sahip bir insansız hava aracıdır. Hareket için rotorlardan elde edilen pervanelerin itki kuvvetleri kullanılmaktadır. Birbirine dik iki şaft üzerine yerleştirilmiş dört rotor bulunmaktadır. Rotorlar elektrik motorları ile döndürülmektedir. Kullanım alanlarına ve uygulamalara göre farklı boyutlarda ve özelliklerde olabilirler. Örneğin yük taşıma için kullanılacak ise quadrotorun daha büyük ve güçlü olması gerekir. Arama veya görüntü işlemlerinde kullanacak ise daha hızlı olması gerekir. Güvenlik ve gizlilik ön planda ise çok küçük ve sessiz olan mikro quadrotorlar kullanılır.

3.1. Quadrotorun Geometrik ve Fiziksel Özellikleri

Quadrotorda kullanılan parçaların geometrik özelliklerinin, boyutlarının, etkenlerinin ve ağırlıklarının bilinmesi gereklidir. Modelde kullanılacak olan bu sabitler aşağıda belirtilmiştir [20,21].

$m=0.65 \text{ kg}$	hava aracının toplam kütlesi
$l=0.23 \text{ m}$	hava aracının her bir şaftının merkeze olan uzunluğu
$I_x=7.5 \times 10^{-3} \text{ m}^4$	x eksenindeki atalet momenti
$I_y=7.5 \times 10^{-3} \text{ m}^4$	y eksenindeki atalet momenti
$I_z=1.3 \times 10^{-2} \text{ m}^4$	z eksenindeki atalet momenti
$J=6.6 \times 10^{-5}$	Jiroskopik etki
$b=3.13 \times 10^{-5} \text{ N}$	Düşey doğrultudaki itki kuvveti (thrust) katsayısı
$d=7.5 \times 10^{-7} \text{ N}$	Dönel itki kuvveti (drag) katsayısı
$g=9.81 \text{ m/s}^2$	Yerçekimi kuvveti

Quadrotorun hareket etmesini sağlayan itki kuvvetleri Şekil 3.1’de gösterilmiştir.



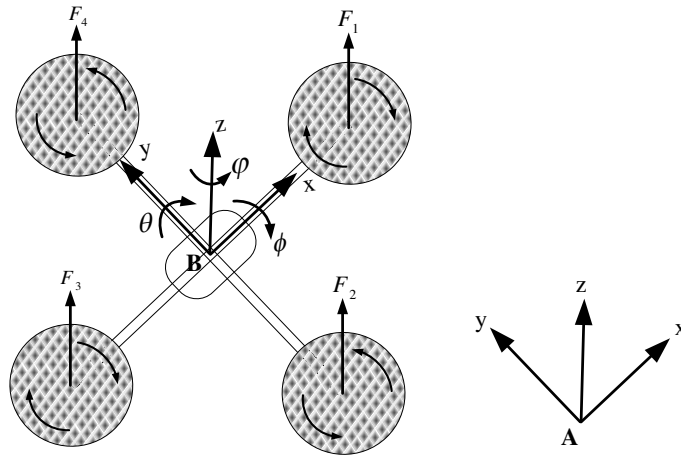
Şekil 3.1. Qaudrotorun pervanesindeki itki kuvvetleri [20].

3.2. Quadrotorun Modellenmesi

Literatürde kontrol yöntemine göre tasarlanmış farklı yapıda birçok model bulunmaktadır. Genel olarak modellerin oluşturulmasında quadrotorun kinematik ve dinamik denklemleri kullanılmaktadır. Literatürde genel olarak kullanılan matematiksel denklemler dikkate alınarak quadrotorun modellenmesi yapılmıştır.

3.2.1. Eksenlerin Tanımlanması

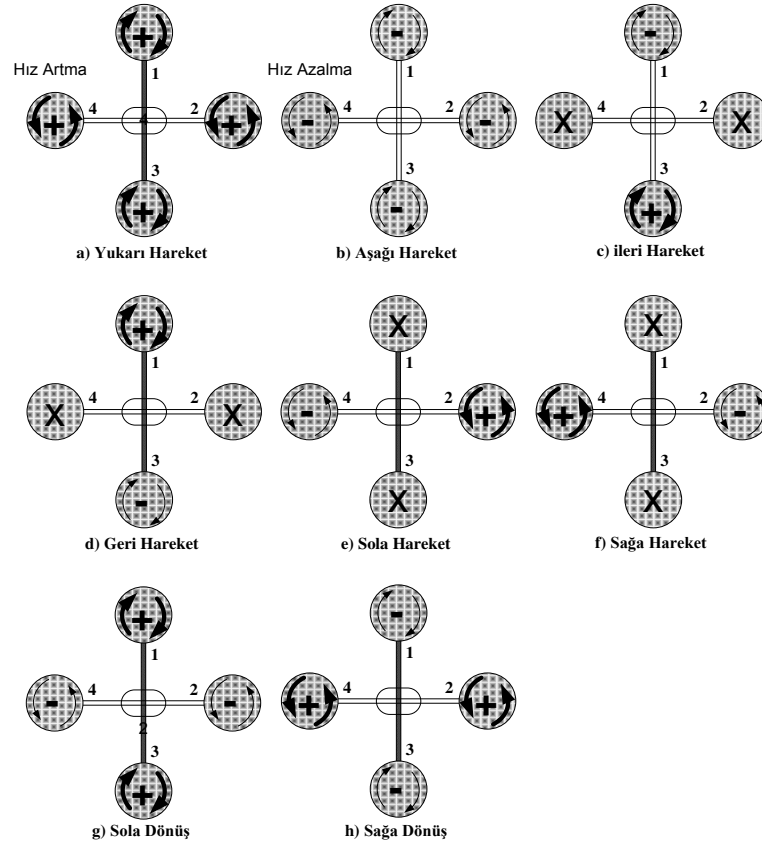
Quadrotorlar, altı serbestlik dereceli olup doğrusal eksen takımında (3 boyutta) ve açısal koordinatlarda (3 boyutta) hareket edebilmektedir. Açısal hareket yunuslama (roll), yalpalama (pitch) ve sapma (yaw) açıları ile ifade edilir. Quadrotor pervanelerinin dönme yönü, bu dönmeden dolayı oluşan kaldırma kuvvetleri (F_i), dönme açıları ve hareket koordinatları Şekil 3.2’de gösterilmiştir.



Şekil 3.2. Qaudrotor şematığı, kuvvetler ve açılar [20,21].

Rotorlar tarafından oluşturulan itki kuvveti hareketi sağlamaktadır. Ön ve arka pervaneler saatin tersi yönünde dönerken, sol ve sağ pervaneler saat yönünde dönerler. Bu sayede bütün pervaneler eşit hızda döndüğünde helikopterin merkezine uygulanan tork dengelenir ve helikopterin kendi eksenini etrafındaki dönme açısı olan yönelme açısı değişmez. Böylece havada askıda kalır.

Bütün pervanelerin hızlarını aynı oranda artırıp veya azaltmak ise quadrotoru kendi z-ekseni doğrultusunda hareket ettirir yani yüksekliği değiştirir. Şekil 3.3 (a) ve (b)'de gösterilmiştir. Ön ve arka pervanelerin hızları arasındaki fark kaldırma kuvvetleri arasında bir fark oluşturur ve helikopterin yunuslama açısını değiştirir ve ileri veya geri hareket ettirir. Şekil 3.3 (c)'de üçüncü pervanın hızı arttırılarak ileri doğru hareket ettirilir. Aynı mantıkla sol ve sağ pervaneler arasındaki hız farkı Şekil 3.3 (e) ve (f)'de gösterildiği gibi oluşturulduğunda yalpalama açısı değiştirir ve sağa veya sola hareket etmesini sağlar. Eğer, aynı yönde hareket eden iki pervanenin hızları, diğer yönde dönen iki pervaneye göre değiştirilirse, helikopter kendi eksenini etrafında dönmeye başlar yani sapma (yönelme) açısı değişir. Sapma açısı Şekil 3.3 (g) ve (h)'da gösterilmiştir.



Şekil 3.3. Quadrotor hareket yönleri [20,44-47].

Quadro rotorun pervanelerindeki hız farkı ile hareket etmesi ve yön değiştirmesi dikkate alındığında, matematiksel modelinin oluşturulmasında Newton – Euler denklemleri kullanılabilir.

3.2.2. Matematik Analizi

Quadro rotorun matematiksel modelinde kullanılan kuvvetler ve eksen takımları şekil 3.2’de gösterilmiştir. şekilde görüldüğü gibi yunuslama açısı θ , yalpalama açısı $\emptyset$ ve sapma açısı φ olarak nitelendirilir. Newton – Euler denklemleri kullanılarak elde edilen modelde iki eksen takımı kullanılmıştır. Birincisi dünya yerçekimi merkezine göre alınan yer eksen takımı olan A eksen, ikincisi ise quadro rotorun merkezine göre olan B eksenidir. Euler denklemine göre rotasyon matrisi (3.1)’deki gibidir [1,20].

$$R = \begin{bmatrix} \cos \varphi \cos \theta & \cos \varphi \sin \theta \sin \emptyset - \sin \varphi \sin \emptyset & \cos \varphi \sin \theta \cos \emptyset + \sin \varphi \sin \emptyset \\ \sin \varphi \cos \theta & \sin \varphi \sin \theta \sin \emptyset - \cos \varphi \cos \emptyset & \sin \varphi \sin \theta \cos \emptyset + \cos \varphi \sin \emptyset \\ -\sin \theta & \cos \theta \sin \emptyset & \cos \theta \cos \emptyset \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

Quadro rotorun A düzlemine göre 3 boyutlu uzaydaki konumu

$$\zeta = \begin{bmatrix} z \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

vektörü ile ifade edilir ve türevi alınırsa

$$v = \begin{bmatrix} \dot{z} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

Quadro rotorun A düzlemine göre olan hızı bulunur. Hızın da türevi alınırsa

$$\dot{v} = \begin{bmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{y} \\ \ddot{z} \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

Quadrorotorun A düzlemine göre olan doğrusal hareketinin ivmesi bulunur. Motorun açısal hızı Ω_i ve b düşey doğrultudaki itki kuvveti sabit katsayısı olmak üzere, her bir rotorda meydana gelen düşey doğrultudaki itki kuvveti (3.4)'teki gibidir [1,20].

$$F_i = b\Omega_i^2 \quad i=1,2,3,4 \quad (3.4)$$

Düşey doğrultudaki toplam itki kuvveti (3.5) ile ifade edilir.

$$F_T = b \sum_{i=1}^4 \Omega_i^2 \quad (3.5)$$

Aracın kütlesi m olmak üzere, itki kuvvetinin oluşturduğu ivme (3.6) ile ifade edilir.

$$a_F = \frac{b}{m} \sum_{i=1}^4 \Omega_i^2 \quad (3.6)$$

Yerçekimi ivmesi g ve A düzlemindeki a_F ivmesinin etkisi R_{a_F} olmak üzere, ivme dengesi (3.7)'teki gibidir [1,20].

$$\dot{v} = -g + R_{e_z a_F} \quad (3.7)$$

Buradaki $e_z = [0 \ 0 \ 1]^T$ şeklinde bir vektör olup z eksenini için kullanılır. Rotasyon matrisi ile gövde düzleminin açısal hızları ile arasındaki ilişki (3.8)'de verilmiştir [1,20].

$$\dot{R} = RS(\omega) \quad (3.8)$$

Buradaki ω gövde çerçevesinin açısal hız vektörü olup aşağıdaki gibidir.

$$\omega = \begin{bmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \\ \omega_3 \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

$S(\omega)$ ise skew symmetric matrisidir ve (3.10) ile ifade edilir.

$$S(\omega) = \begin{bmatrix} 0 & -\omega_3 & \omega_2 \\ \omega_3 & 0 & -\omega_1 \\ -\omega_2 & \omega_1 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

x,y ve z eksenlerdeki atalet momentleri (3.11) da verilmiştir.

$$I = \begin{bmatrix} I_x & 0 & 0 \\ 0 & I_y & 0 \\ 0 & 0 & I_z \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

Eksenlerdeki açısal momentumlar ise (3.12) gibidir [1,20].

$$L_{x,y,z} = I\omega \quad (3.12)$$

Quadrotorun torku açısal momentumların zaman göre değişimi ile oluşur ve (3.13) ve açık şekli ile (3.14) gibi ifade edilir.

$$\tau_B = \dot{L} = \omega \times I\dot{\omega} \quad (3.13)$$

$$\tau_B = \begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\varphi} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_x & 0 & 0 \\ 0 & I_y & 0 \\ 0 & 0 & I_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\varphi} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} I_x & 0 & 0 \\ 0 & I_y & 0 \\ 0 & 0 & I_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\phi} \\ \ddot{\theta} \\ \ddot{\varphi} \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

Denklemdaki $\times$ vektörel çarpım olarak kullanılmıştır. Motorların ve aracın kendi etrafında dönmesinden dolayı oluşan tork (3.15) ve açık şekli ile (3.16) ile ifade edilir.

$$\tau_G = \sum_{i=1}^4 J(\omega \times e_z) \Omega_i (-1)^i \quad (3.15)$$

$$\tau_G = J \begin{pmatrix} \dot{\phi} & 0 \\ \dot{\theta} \times 0 \\ \dot{\varphi} & 1 \end{pmatrix} (-\Omega_1 + \Omega_2 - \Omega_3 + \Omega_4) \quad (3.16)$$

Buradaki J rotorun atalet değeri olarak kullanılır. Düşey doğrultudaki itki kuvveti de bir tork oluşturur. Bu nedenle bir eksene ait tork, eksenindeki rotorların oluşturduğu torkların farkına eşittir ve x,y,x düzlemindeki bu torklar (3.17)'daki gibi ifade edilebilir.

$$\tau_a = \begin{bmatrix} \frac{l}{2}b(\omega_4^2 - \omega_2^2) \\ \frac{l}{2}b(\omega_3^2 - \omega_1^2) \\ d(-\omega_1^2 + \omega_2^2 - \omega_3^2 + \omega_4^2) \end{bmatrix} \quad (3.17)$$

Bu durumda tork dengesi (3.18) gibi yazılabilir.

$$\tau_a = \tau_B + \tau_G \quad (3.18)$$

Denklem (3.18) açık şekli ile yazılırsa (3.19) denklemi elde edilir.

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \frac{l}{2}b(\omega_4^2 - \omega_2^2) \\ \frac{l}{2}b(\omega_3^2 - \omega_1^2) \\ d(-\omega_1^2 + \omega_2^2 - \omega_3^2 + \omega_4^2) \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_x & 0 & 0 \\ 0 & I_y & 0 \\ 0 & 0 & I_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} I_x & 0 & 0 \\ 0 & I_y & 0 \\ 0 & 0 & I_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\phi} \\ \ddot{\theta} \\ \ddot{\psi} \end{bmatrix} \\ &+ J \begin{pmatrix} \dot{\phi} & 0 \\ \dot{\theta} \times 0 \\ \dot{\psi} & 1 \end{pmatrix} (-\Omega_1 + \Omega_2 - \Omega_3 + \Omega_4) \end{aligned} \quad (3.19)$$

Tork dengesi için gerekli denklem elde edilmiş olur. Eşitlikteki $\ddot{\phi}, \ddot{\theta}$ ve $\ddot{\psi}$ açısal ivmeleri sol tarafa atıp denklemi çözersek [1,20-27],

$$\ddot{\phi} = \dot{\psi} \dot{\theta} \left(\frac{I_y - I_z}{I_x} \right) - \frac{J}{I_x} \dot{\theta} (-\Omega_1 + \Omega_2 - \Omega_3 + \Omega_4) + \frac{l}{I_x} b (\Omega_4^2 - \Omega_2^2) \quad (3.20)$$

$$\ddot{\theta} = \dot{\psi} \dot{\phi} \left(\frac{I_x - I_z}{I_y} \right) + \frac{J}{I_y} \dot{\phi} (-\Omega_1 + \Omega_2 - \Omega_3 + \Omega_4) + \frac{l}{I_y} b (\Omega_3^2 - \Omega_1^2) \quad (3.21)$$

$$\ddot{\psi} = \dot{\theta} \dot{\phi} \left(\frac{I_x - I_y}{I_z} \right) + \frac{1}{I_z} d (-\Omega_1^2 + \Omega_2^2 - \Omega_3^2 + \Omega_4^2) \quad (3.22)$$

ayrıca denklem (4.7) ifadesi açılırsa (3.23) şeklinde gösterilir.

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{y} \\ \ddot{z} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -g \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c\phi c\theta & c\phi s\theta s\phi - s\phi s\phi & c\phi s\theta c\phi + s\phi s\phi \\ s\phi c\theta & s\phi s\theta s\phi - c\phi c\phi & s\phi s\theta c\phi + c\phi s\phi \\ -s\theta & c\theta s\phi & c\theta c\phi \end{bmatrix} \\ &\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \frac{b}{m} (\Omega_1^2 + \Omega_2^2 + \Omega_3^2 + \Omega_4^2) \end{aligned} \quad (3.23)$$

Eşitlikteki $\ddot{x}, \ddot{y}$ ve $\ddot{z}$ hareket ivmelerini sol tarafa atıp denklemi çözersek,

$$\ddot{x} = (\cos \psi \sin \theta \cos \phi + \sin \psi \sin \phi) \frac{1}{m} b(\Omega_1^2 + \Omega_2^2 + \Omega_3^2 + \Omega_4^2) \quad (3.24)$$

$$\ddot{y} = (\sin \psi \sin \theta \cos \phi - \cos \psi \sin \phi) \frac{1}{m} b(\Omega_1^2 + \Omega_2^2 + \Omega_3^2 + \Omega_4^2) \quad (3.25)$$

$$\ddot{z} = -g + (\cos \theta \cos \phi) \frac{1}{m} b(\Omega_1^2 + \Omega_2^2 + \Omega_3^2 + \Omega_4^2) \quad (3.26)$$

eşitliği elde edilir. Kolaylık olması bakımından aşağıdaki kısaltmaları kullanırsak quadrotorun matematiksel modeli oluşturulmuş olur [1,20-27].

$$U_1 = b(\Omega_1^2 + \Omega_2^2 + \Omega_3^2 + \Omega_4^2) \quad (3.27)$$

$$U_2 = b(\Omega_4^2 - \Omega_2^2) \quad (3.28)$$

$$U_3 = b(\Omega_3^2 - \Omega_1^2) \quad (3.29)$$

$$U_4 = d(-\Omega_1^2 + \Omega_2^2 - \Omega_3^2 + \Omega_4^2) \quad (3.30)$$

$$\ddot{\theta} = \dot{\psi} \dot{\theta} \left(\frac{I_y - I_z}{I_x} \right) - \frac{J}{I_x} \dot{\theta} (-\Omega_1 + \Omega_2 - \Omega_3 + \Omega_4) + \frac{l}{I_x} U_2 \quad (3.31)$$

$$\ddot{\theta} = \dot{\psi} \dot{\phi} \left(\frac{I_x - I_z}{I_y} \right) + \frac{J}{I_y} \dot{\phi} (-\Omega_1 + \Omega_2 - \Omega_3 + \Omega_4) + \frac{l}{I_y} U_3 \quad (3.32)$$

$$\ddot{\psi} = \dot{\theta} \dot{\phi} \left(\frac{I_x - I_y}{I_z} \right) + \frac{1}{I_y} U_4 \quad (3.33)$$

$$\ddot{x} = (\cos \psi \sin \theta \cos \phi + \sin \psi \sin \phi) \frac{1}{m} U_1 \quad (3.34)$$

$$\ddot{y} = (\sin \psi \sin \theta \cos \phi - \cos \psi \sin \phi) \frac{1}{m} U_1 \quad (3.35)$$

$$\ddot{z} = -g + (\cos \theta \cos \phi) \frac{1}{m} U_1 \quad (3.36)$$

olmak üzere x ekseninin açısal ivmesi (3.31), y ekseninin açısal ivmesi (3.32), z ekseninin açısal ivmesi (3.33), x eksenindeki hareket ivmesi (3.34), y eksenindeki hareket ivmesi (3.35), z eksenindeki hareket ivmesi (3.36) denklemleri ile ifade edilir.

3.2.3. Uçuş Kontrolü

Quadrotor doğrusal olmayan ve zamanla değişebilen bir dinamiğe sahiptir. Motor dinamiği, rotor dinamiği ve çevresel etkilerin doğrusal olmayan değişimleri sistemi karmaşık hale getirir. Bu nedenle gerçeğe yakın bir model tasarlamak ve kontrol etmek oldukça zordur.

Bu zorlukları azaltmak için bazı genellemeler kabul edilmiştir. Bunlar quadrotorun rijit ve simetrik bir yapıda olduğu, hava basıncının etkisinin olmadığı, eylemsizlik matrisinin köşegen olduğudur.

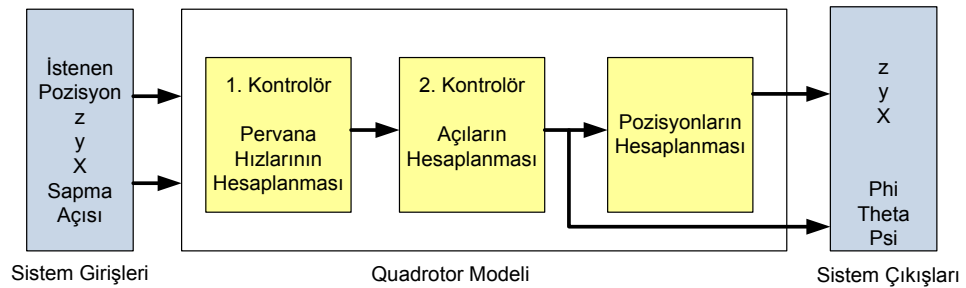
Quadrotoru hareket ettirecek olan U_1, U_2, U_3 , ve U_4 girdileri sırasıyla, z eksenindeki hareketi, y eksenindeki hareketi yani yalpalama açısını ϕ (phi), x eksenindeki hareketi yani yunuslama açısını θ ($teta$) ve z eksen etrafındaki yönelme açısını ψ (psi) kontrol eder.

Quadrotor sistemine asıl etki eden istenen düzlemdeki yeni değerler veya pervanelerin hızlarıdır. İstenen konuma gitmek için pervane hızları değişir, ivmeler oluşur. İstenen konuma gelindiğinde ise parametreler sabitlenir. Hız sabitlenir, ivmeler sıfır olur. Farklı olarak pervanelerin her birinin hızları değişirse pervanelere göre ve hız farklarına göre farklı konumlara doğru ve farklı hızlarda hareket eder ve hız değişimine göre ivmeler oluşur.

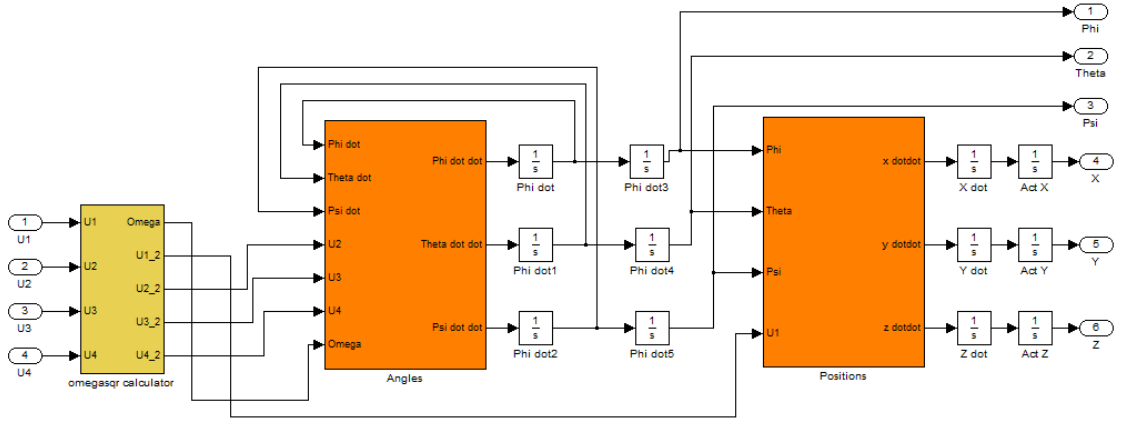
Bu çalışmada quadrotorun hareket kontrolünü sağlamak için eksenlerdeki ϕ (phi), θ ($teta$) ve ψ (psi) açıları kullanılmıştır. Açıların değerleri değiştirilerek araç istenilen konuma getirilebilmektedir. Kontrol için kullanılan değişkenler ne olursa olsun sonuçta quadrotoru hareket ettiren rotordaki pervane hızlarıdır.

3.3. Simülasyon Sonuçları

Matematiksel modeli oluşturulan quadrotorun blok diyagramı Şekil 3.4’de ve simülasyon modeli Şekil 3.5’de gösterilmiştir. Modelde dört giriş ve altı çıkış vardır. Girişler denklem (4.27), (4.28), (4.29), (4.30)’de ifade edilen U_1, U_2, U_3 ve U_4 değişkenleridir.

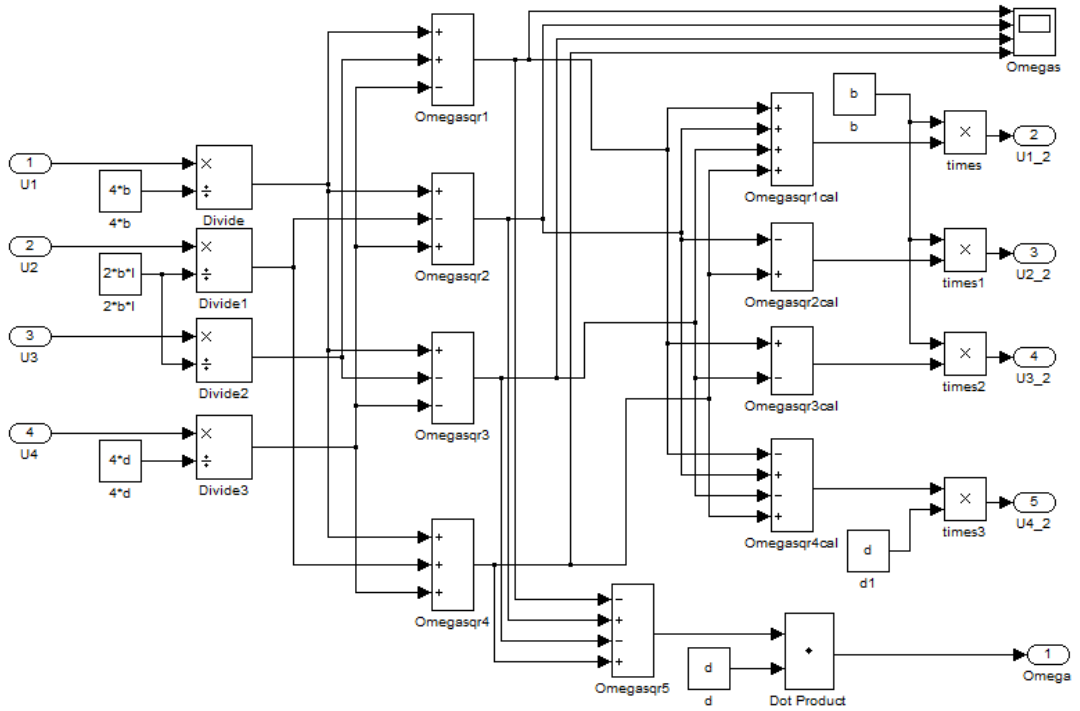


Şekil 3.4. Quadrotorun blok diyagramı



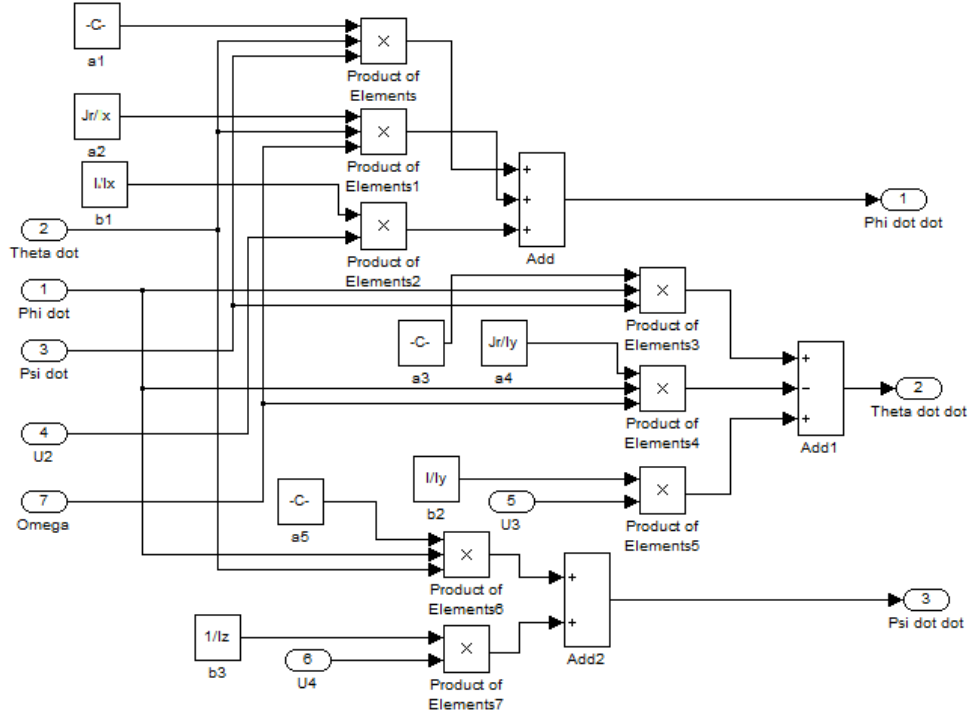
Şekil 3.5. Quadrotor simülasyon modeli

Simülasyon modelinde yer alan *omegasqr calculator* alt blok modelinde giriş değerleri alınarak $\Omega_{\text{total}} = (-\Omega_1 + \Omega_2 - \Omega_3 + \Omega_4)$ değeri hesaplanır ve U_1, U_2, U_3 ve U_4 değerleri tekrar hesaplanarak çıkış değerlerini verir.



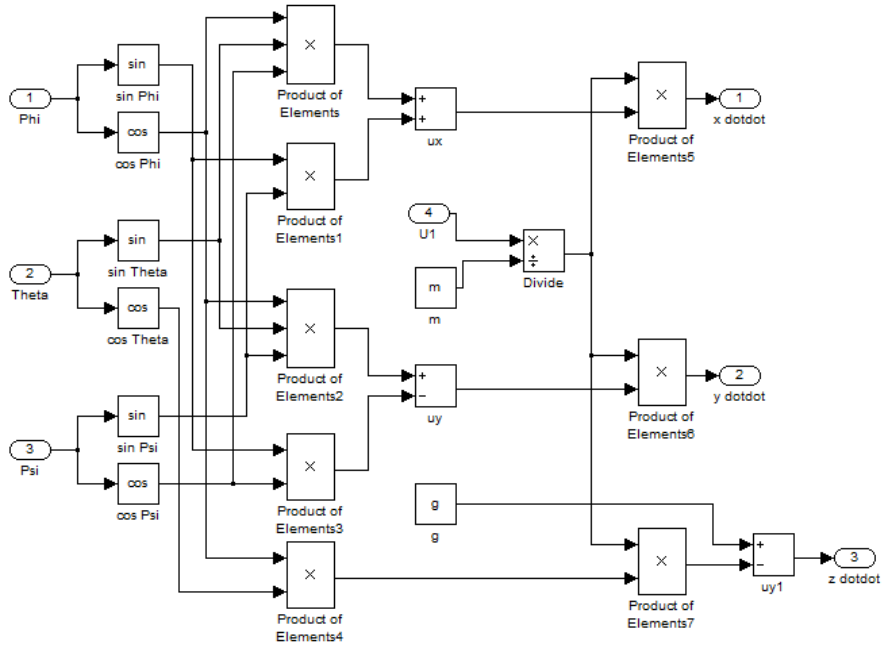
Şekil 3.6. Quadrotor modelinin omegasqr calculator alt blok modeli

Simülasyon modelinde yer alan *Angles* alt blok modelinde (Şekil 3.7) giriş değerleri alınarak (4.31), (4.32) ve (4.33) denklemlerinde olduğu gibi açıların ivmeleri bulunur ve çıkış olarak verilir.



Şekil 3.7. Quadrotor modelinin angles alt blok modeli

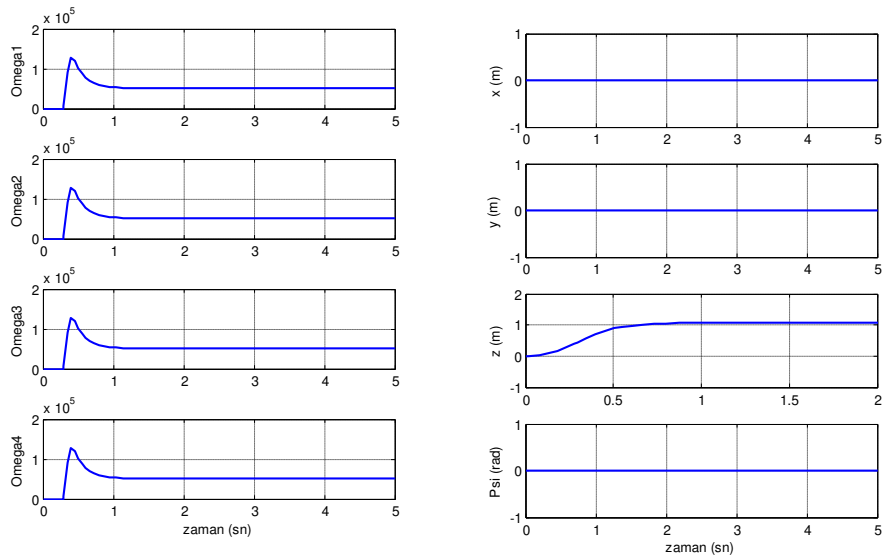
Simülasyon modelinde yer alan *Positions* alt blok modelinde (Şekil 3.8) giriş değerleri alınarak (4.34), (4.35) ve (4.36) denklemlerinde olduğu gibi quadrotorun hareket ivmeleri bulunur ve çıkış olarak verilir.



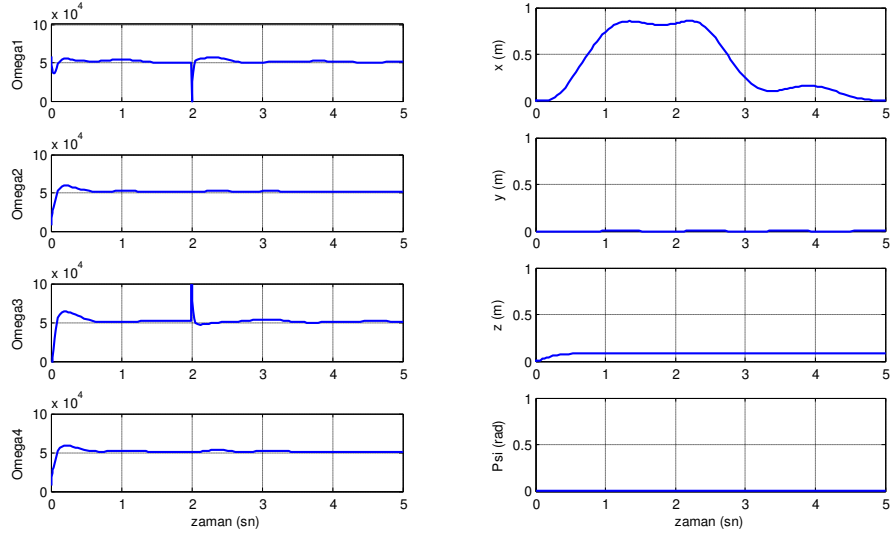
Şekil 3.8. Quadrotor modelinin *positions* alt blok modeli

Simülasyon modelindeki alt bloklardan elde edilen ivmelerin integralleri alınarak quadrotorun açısal hızları ve x,y ve z düzlemindeki hareket hızları elde edilir. Elde edilen hızların tekrar integralleri alınarak quadrotorun açıları ve konumu belirlenir.

Oluşturulan simülasyon modelinde, rotorun açısal hızı (rad/sn) olan $\Omega_1, \Omega_2, \Omega_3$ ve Ω_4 giriş parametrelerine eşit miktarda değer verdiğimizde z yükseklik konumunun değiştiğini görülür. Şekil 3.9’da referans olarak eşit olarak verilen açısal hız miktarlarına göre değişen yükseklik grafiği görülmektedir.

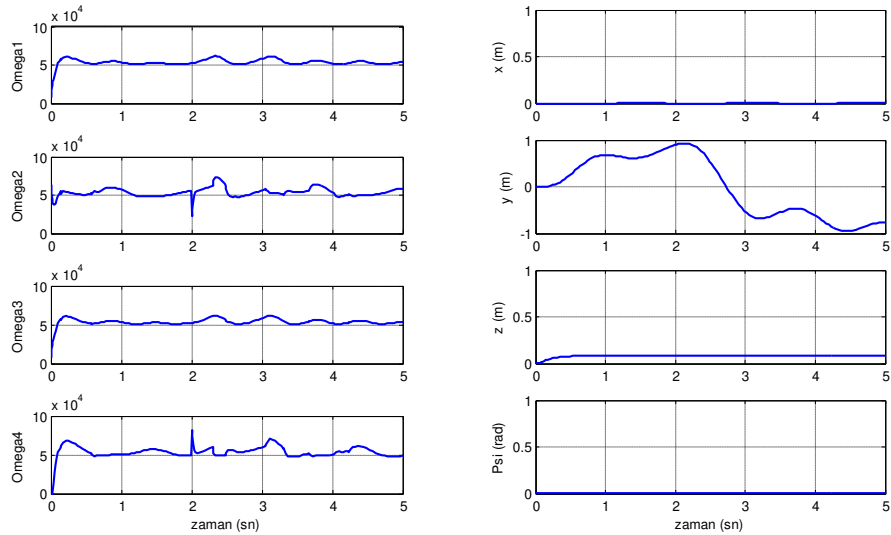


Şekil 3.9. Rotorların açısal hızlarına göre z yükseklik grafiği



Şekil 3.10. Rotorların açısal hızlarına göre x konum grafiği

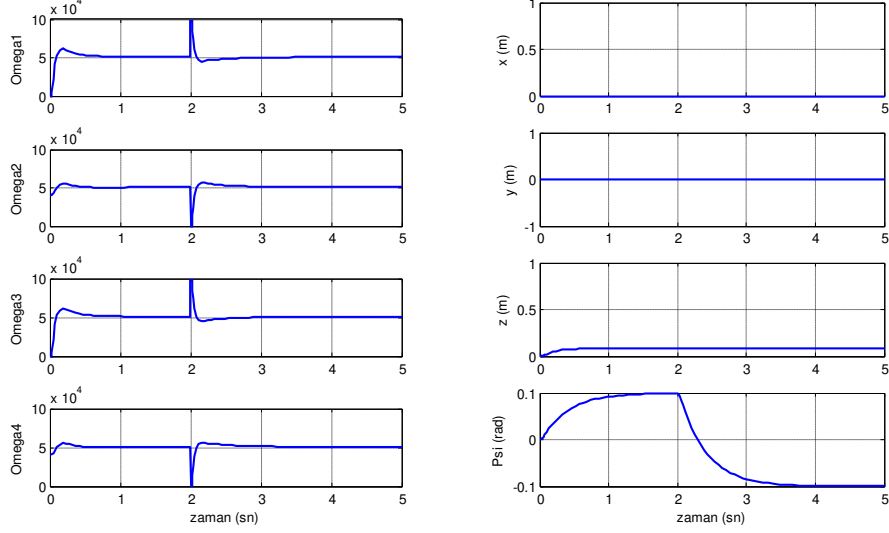
Quadrotorun x konum değişikliği için U_3 giriş parametresinin değişmesi gerekir. Yani Ω_1 ve Ω_3 açısal hızlarının değişmesi gerekmektedir. Şekil 3.10’da rotorların açısal hızlarına göre değişen konum grafiği görülmektedir. Grafikte Omega1 ile Omega3 değerlerinin değiştiği, diğerlerinin sabit olduğu görülür.



Şekil 3.11. Rotorların açısal hızlarına göre y konum grafiği

Quadrotorun y konum değişikliği için U_2 giriş parametresinin değişmesi gerekir. Yani Ω_2 ve Ω_4 açısal hızlarının değişmesi gerekmektedir. Şekil 3.11’de rotorların açısal

hızlarına göre değişen konum grafiği görülmektedir. Grafikte Omega2 ile Omega4 değerlerinin değiştiği, diğerlerinin sabit olduğu görülür.



Şekil 3.12. Rotorların açısal hızlarına göre sapma açısı grafiği

Quadrotorun sapma açısı için U_4 giriş parametresinin değişmesi gerekir. Yani $\Omega_1 - \Omega_3$ ile $\Omega_2 - \Omega_4$ açısal hızlarının değişmesi gerekmektedir. Şekil 3.12’de rotorların açısal hızlarına göre değişen sapma açısı grafiği görülmektedir.

3.4. Bölüm Değerlendirmesi

Günümüzde farklı özelliklerde quadrotorlar bulunmaktadır. Kullanım alanlarında göre geometrik ve fiziksel özellikleri değişmektedir. Bu çalışmada kullanılan quadrotorun geometrik ve fiziksel özellikleri sunulmuştur. Newton-Euler denklemleri ile matematiksel analizi yapılarak quadrotorun matematiksel modeli oluşturulmuştur. Modeli oluştururken çevresel etkenler gibi faktörler ihmal edilmiştir. Matematiksel modelde quadrotorun hareketini kontrol edebilmek için kullanılan parametreler incelenmiştir. U_1, U_2, U_3 ve U_4 parametrelerin hareket kontrolünde kolaylık sağladığı saptanmıştır.

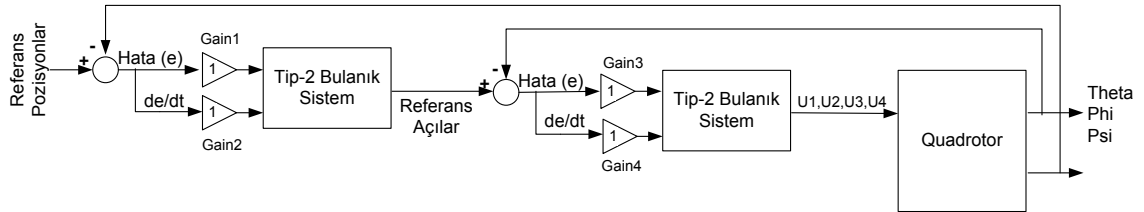
Quadrotorun simülasyon modeli oluşturularak ayrıntılarıyla anlatılmıştır. Pervane hızlarının quadrotorun konum ve sapma açısına etkileri grafiklerle verilmiştir.

Simülasyon çalışmalarında her bir parametrenin ve veri aktarımının sonuçları etkilediği görülmüştür. Bu nedenle matematiksel modelinin doğru bir şekilde yapılması veri aktarımında hassasiyet gösterilmesi gerekmektedir.

4. TİP-2 BULANIK MANTIK TABANLI QUADROTOR KONTROLÜ

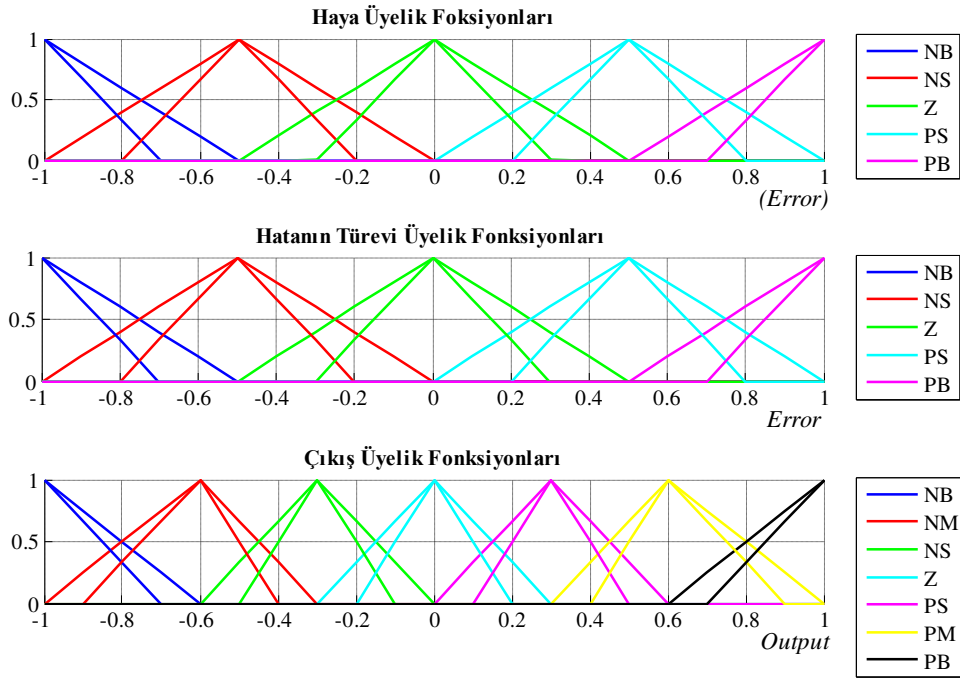
4.1. Önerilen Yöntem

Quadrotor ile ilgili akademik çalışmalarda birçok kontrol yöntemleri yer almaktadır. Bu çalışmada önerilen kontrol yöntemi Şekil 4.1’de gösterilmiştir. Quadrotorun kontrolünü sağlamak için öncelikle referans pozisyonlar ile quadrotorun mevcut pozisyonları karşılaştırılır. Pozisyonlar arasındaki fark ve farklardaki değişim miktarı tip-2 bulanık sistemde işlenerek quadrotorun referans düzlem açıları elde edilir. İkinci olarak referans açıları quadrotorun mevcut düzlem açıları ile karşılaştırılarak aralarındaki fark bulunur. Bu farklar ikinci kısımdaki tip-2 bulanık sistemde işlenerek quadrotorun giriş parametreleri olan U_1, U_2, U_3 ve U_4 değerleri elde edilir. Bu parametreler quadrotorun pervane hızlarını ayarlar. Pervane hızlarındaki değişim ile quadrotorun hareketi sağlanır. Böylece quadrotorun yükseklik ve yön kontrolü sağlanmış olur. Önerilen yöntemde kullanılan tip-2 bulanık sistemin özellikleri aşağıda belirtilmiştir.



Şekil 4.1. Quadrotor kontrol blok diyagramı

Sistemin ilk aşaması olan bulanıklaştırma işleminde üçgensel (triangular) üyelik fonksiyonları tercih edilmiştir. Sistemin iki girişi olduğu için iki adet bulanıklaştırma işlemi ve iki adet üyelik fonksiyonu grubu kullanılabilir. Sistemde kullanılan giriş ve çıkış üyelik fonksiyonları ve üyelik dereceleri grafiği Şekil 4.2’de gösterildiği gibidir. Üyelik fonksiyonları aralıklı üçgensel üyelik fonksiyonlarıdır. Sistemde yer alan hata, hatadaki değişim hızı ve çıkış kontrol kuvveti grafiklerinde belirtilen NÇ; negatif çok; NA; negatif az, NO; negatif orta, S; sıfır, PA; pozitif az, PO; pozitif orta, PÇ; pozitif çok üyelik fonksiyonlarını temsil etmektedir.



Şekil 4.2. Tip-2 bulanık sistemin giriş ve çıkış üyelik fonksiyonları grafiği

Çıkarım işleminde kullanılan kural tablosu kontrolör sisteminin giriş sayısı ve çıkış sayısına bağlı olarak üyelik fonksiyonların sayısına göre belirlenir. Giriş üyelik fonksiyonları ile çıkış üyelik fonksiyonlarının tüm olası durumları değerlendirilir. Kural tablosu, “Eğer $(x1=PK)$ ve $(x2=S)$ ise $y=NK$ ’ dır” şeklinde çalışmaktadır. Kullanılan kural tablosu Tablo 4.1’de verilmiştir.

Tablo 4.1. Önerilen yöntemin kural tablosu

		Hatanın Türevi				
		NB	NS	Z	PS	PB
Hata	NB	NB	NB	NO	NS	Z
	NS	NB	NO	NS	Z	PS
	Z	NO	NS	Z	PS	PO
	PS	NS	Z	PS	PO	PB
	PB	Z	PS	PO	PB	PB

Çıkarım işleminde Mamdani Yöntemi uygulanmıştır. Tip indirgeme işleminde Kümeler Merkezi Tip İndirgeme Yöntemi seçilmiştir. Yöntemde kümelerin ağırlık merkezini bulmak için Karnik Mendel (KM) algoritması uygulanmıştır.

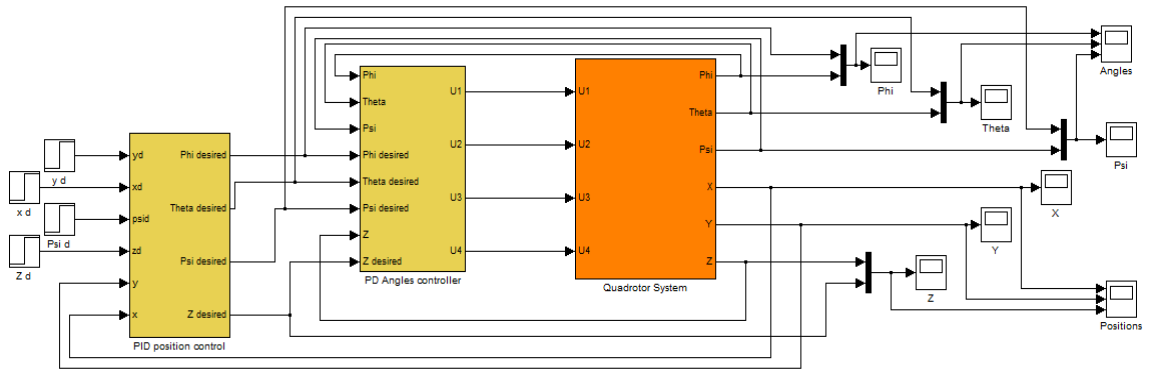
Durulaştırma işleminde ise tip indirgeme işleminde elde edilen değerlerin ortalaması alınarak çıkış değeri elde edilir.

4.2. Simülasyon Modeli

Quadrotorun yükseklik ve yön hareketlerinin kontrolünü sağlamak için iki adet kontrolör grubu kullanıldı. Birinci kontrolör grubunda istenilen pozisyon ile mevcut pozisyon arasındaki hatayı kontrol eden ve hatayı gidermek için sisteme referans açı değerlerini çıkış olarak veren kontrolörlerdir. Birinci kontrolör grubunda x ve y pozisyon değerleri için kullanılan iki adet kontrolör bulunmaktadır. İkinci kontrolör grubunda ise birinci kontrolörden gelen referans açı değerleri ile mevcut açı değerleri arasındaki hatayı kontrol eden ve açılar arasındaki farkı gidermek için sisteme U_1, U_2, U_3 ve U_4 değerlerini çıkış olarak vermektedir. İkinci kontrolör grubunda yunuslama, yalpalama, yönelme ve yükseklik değerleri için kullanılan dört adet kontrolör kullanılmıştır.

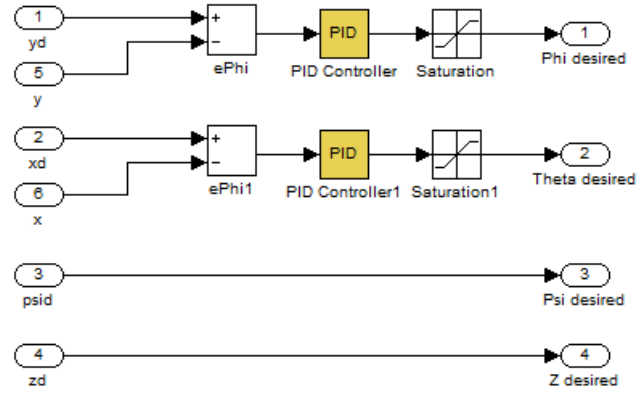
4.2.1. PID Kontrollü Sistem

PID (Proportional-Integral-Derivative, *oransal-integral-türevsel*) kontrolör kullanılarak quadrotor kontrolünün simülasyon modeli Şekil 4.3’de verilmiştir.



Şekil 4.3. PID kontrolör tabanlı quadrotor kontrol simülasyon modeli

PID position control blok diyagramının içeriği Şekil 4.4’de gösterilmiştir. y değeri için kullanılan PID kontrolörün çarpanları $P=-0.6$, $I=0$ ve $P=-0.6$ ’dır. x değeri için kullanılan PID kontrolörün çarpanları $P=-0.6$, $I=0$ ve $P=0.6$ ’dır.

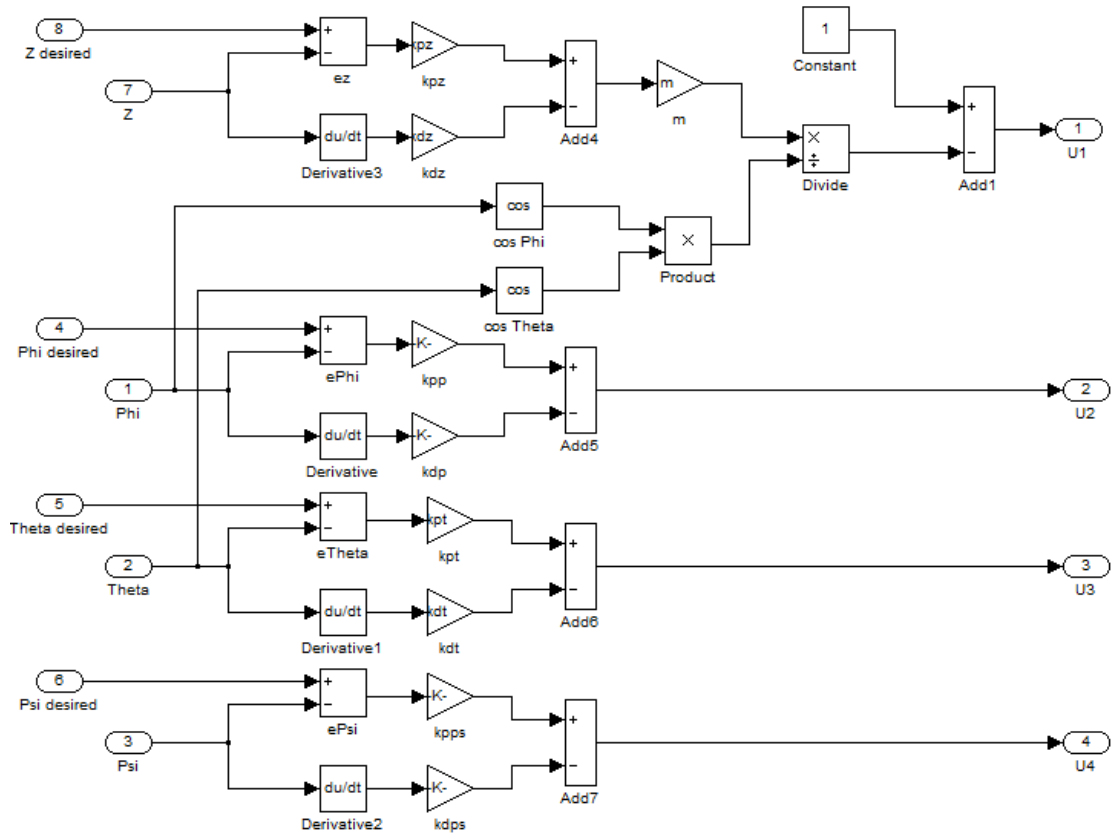


Şekil 4.4. PID position control simülasyon modeli

PD angles control blok diyagramının içeriği Şekil 4.5’de gösterilmiştir. Simülasyon modelinde kullanılan PD çarpanları Tablo 4.2’de verilmiştir.

Tablo 4.2. Quadrotor modelinde kullanılan PD çarpanları

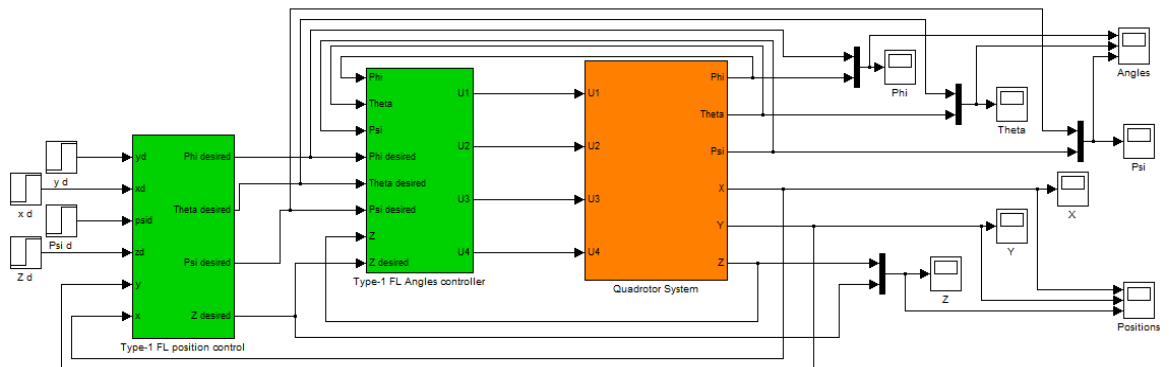
Çarpan adı	Değeri
kpz	100
kdz	20
kpp	0.8
kdp	0.4
kpt	1.2
kdt	0.4
kpps	1.0
kdps	0.4



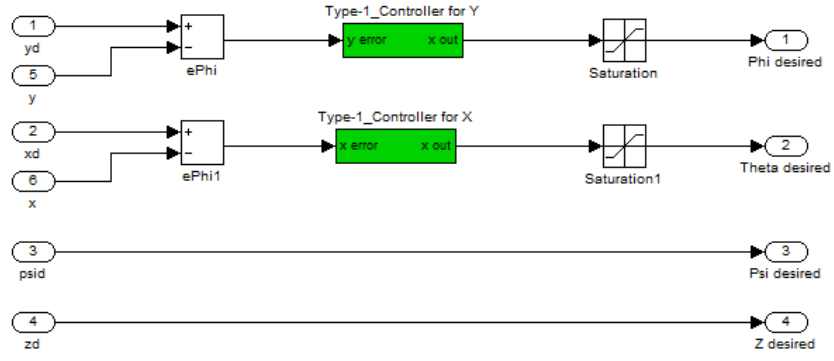
Şekil 4.5. PD position control simülasyon modeli

4.2.2. Tip-1 Bulanık Mantık Kontrollü Sistem

Quadrotor kontrolü için kullanılan kontrolörler Şekil 4.6'da gösterilmiştir. birinci bölümde kullanılan tip-1 bulanık mantık kontrolörün ayrıntılı blok diyagramı Şekil 4.7'de gösterilmiştir.

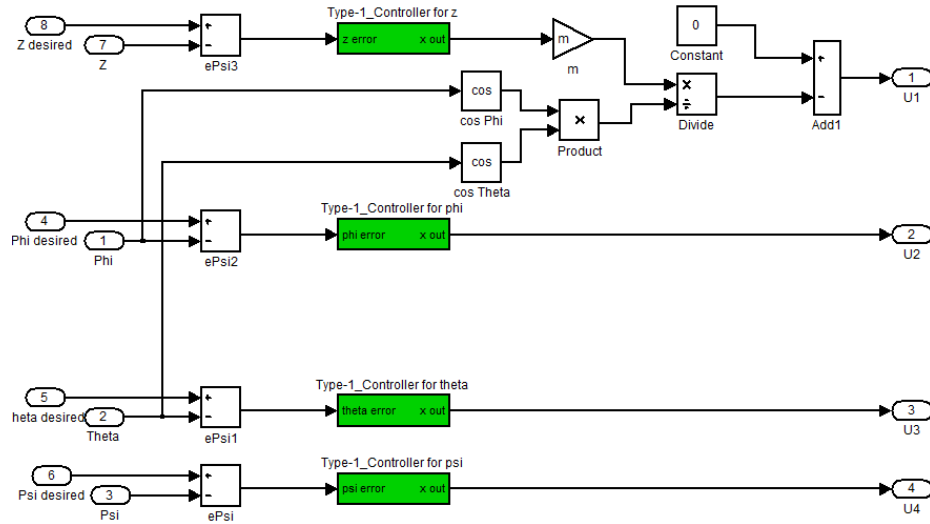


Şekil 4.6. Tip-1 bulanık mantık kontrolör tabanlı quadrotor kontrol simülasyon modeli



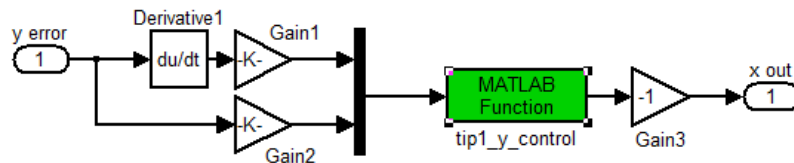
Şekil 4.7. Tip-1 FL position control simülasyon modeli

Modelde yer alan *Tip-1 FL angles control* adlı blok diyagramının içeriği Şekil 4.8’de verilmiştir.



Şekil 4.8. Tip-1 FL angles control simülasyon modeli

Pozisyon ve açı kontrolleri için kullanılan Tip-1 bulanık mantık kontrolörlerin ayrıntılı blok diyagramı Şekil 4.9’daki gibidir. Tip-1 bulanık mantık kontrolörlerde yer alan çarpanların değerleri Tablo 4.3’de verilmiştir.



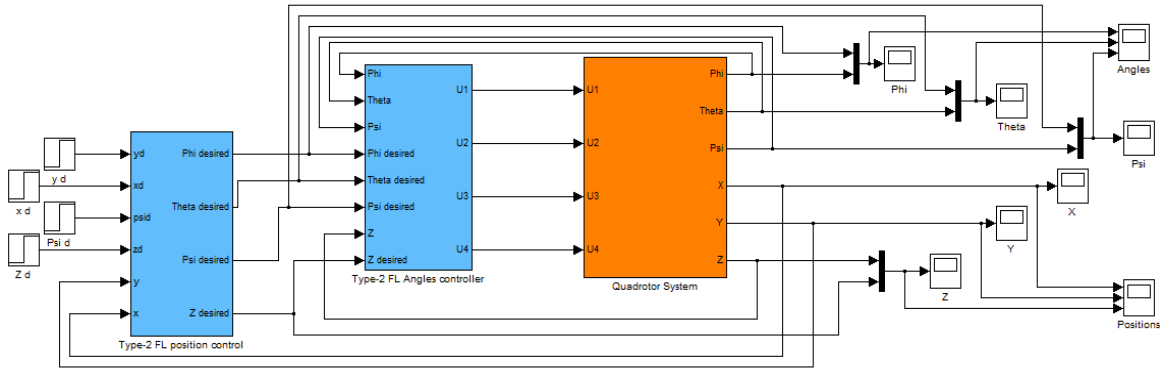
Şekil 4.9. Tip-1_Controller for y simülasyon modeli

Tablo 4.3. Bulanık mantık kontrolörde kullanılan giriş-çıkış çarpanları

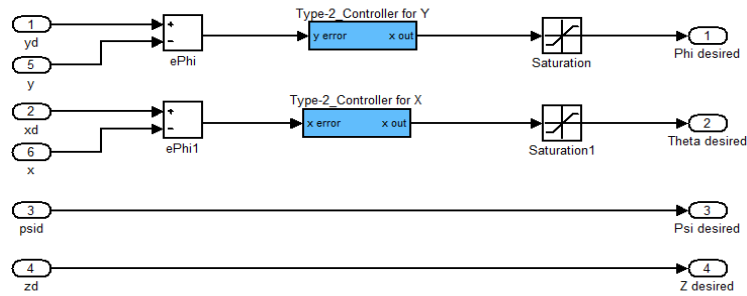
Kontrolör	Çarpan adı	Değeri	Kontrolör	Çarpan adı	Değeri
tip1_y_control	Gain1	1/20	tip1_Phi_control	Gain1	1/2
tip1_y_control	Gain2	1/5	tip1_Phi_control	Gain2	1/2
tip1_y_control	Gain3	-10	tip1_Phi_control	Gain3	1
tip1_x_control	Gain1	1/20	tip1_Theta_control	Gain1	1/2
tip1_x_control	Gain2	1/5	tip1_Theta_control	Gain2	1/2
tip1_x_control	Gain3	10	tip1_Theta_control	Gain3	1
tip1_z_control	Gain1	1/20	tip1_Psi_control	Gain1	1/2
tip1_z_control	Gain2	1/5	tip1_Psi_control	Gain2	1/2
tip1_z_control	Gain3	1000	tip1_Psi_control	Gain3	1

4.2.3. Tip-2 Bulanık Mantık Kontrollü Sistem

Tip-2 bulanık mantık kontrolörlerin kullanıldığı simülasyon modeli aşağıda verilmiştir. Pozisyon kontrolü için kullanılan blok diyagramının açılımı Şekil 4.10'deki gibidir.

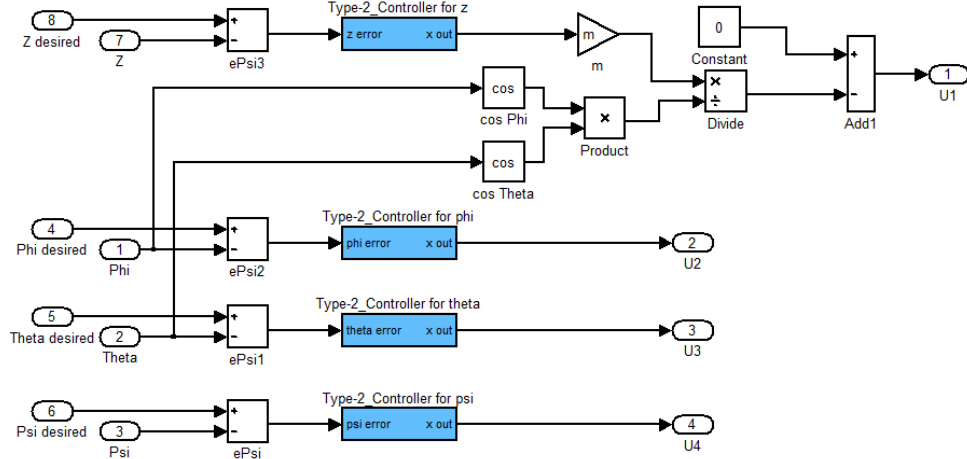


Şekil 4.10. Tip-2 bulanık mantık kontrolör tabanlı quadrotor kontrol simülasyon modeli

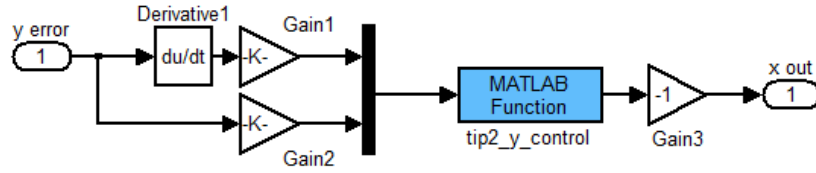


Şekil 4.11. Tip-2 FL position control simülasyon modeli

İkinci kısımda yer alan açı kontrol blok diyagramı Şekil 4.12’de gösterilmiştir. pozisyon ve açı kontrollerin yapıldığı her iki blokta kullanılan tip-2 bulanık mantık kontrolörün blok diyagramı Şekil 4.13’de verilmiştir.



Şekil 4.12. Tip-2 FL angles control simülasyon modeli



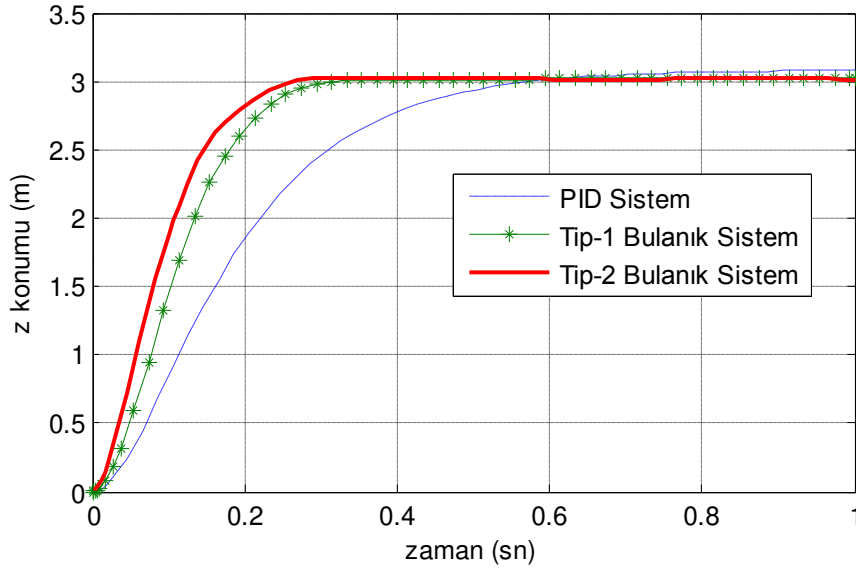
Şekil 4.13. Tip-2_Controller for y simülasyon modeli

Tip-2 bulanık mantık kontrolörlerde yer alan çarpanların değerleri Tablo 4.3’de yer alan tip-1 bulanık mantık ile aynı değerdedir.

4.3. Simülasyon Sonuçları

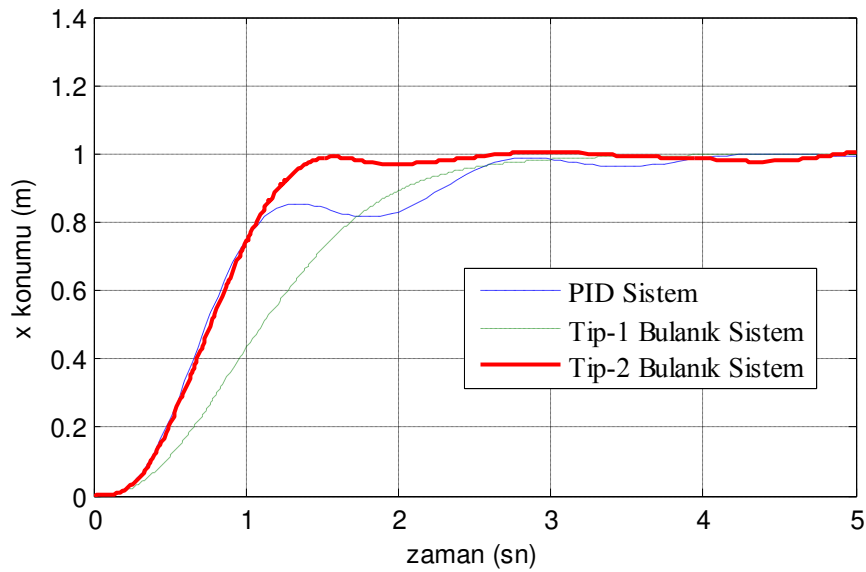
Bölüm 4.2’de verilen quadrotor modelleri test edilerek kullanılan kontrolörlerin performansları karşılaştırılmıştır. Modeller test edilirken bulanık mantık kontrolörlerde kullanılan giriş ve çıkış çarpanları ve PID kontrolörde kullanılan çarpanlar deneme yanılma ile bulunmuş değerlerdir.

Öncelikle quadrotorun yükseklik kontrolü ile simülasyon modelleri test edilmiştir. Üç kontrolör içinde istenilen yükseklik $z=3$ m olarak verilmiştir. Diğer x,y ve sapma açısı değerleri de sıfır olarak verilmiştir. Kontrolörlerin 1 saniyelik simülasyon testindeki sonuçları Şekil 4.14’de olduğu gibidir.



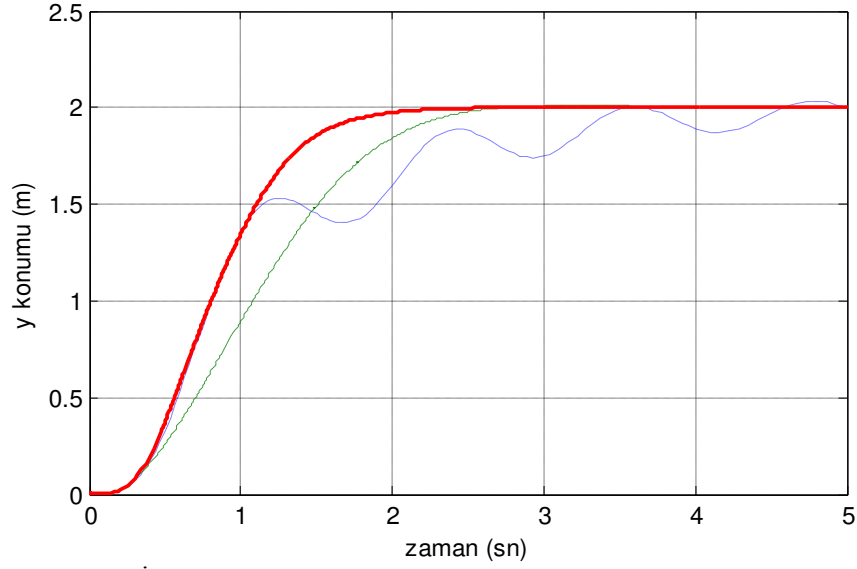
Şekil 4.14. İstenilen yükseklik $z_d=3m$ için kontrolörlere göre quadrotorun konum grafiği

Grafikte kontrolörlerin quadrotoru istenilen yükseklik konumuna getirildiği görülür. PID kontrolörün $z=3m$ değerine varma süresinin bulanık sistemlere göre daha fazla olduğu ve hata payının bir miktar fazla olduğu görülmüştür. Bulanık mantık kontrolörlerin istenilen değeri yüksek doğrulukta yakalamıştır. Grafiğe bakıldığında istenilen değere varma süresi, kararlı hal süresi ve hata payı değerlerinin tip-2 bulanık sistemde daha performanslıdır. Yatay konumda $x=1m$ için 5 sn süre ile simülasyon testi yapıldığında Şekil 4.15'deki grafik elde edilir. grafikte PID ve Tip-1 bulanık sistemin varma sürelerinin yakın olduğu tip-2 bulanık sistemin varma süresinin daha kısa olduğu gözlenmiştir.



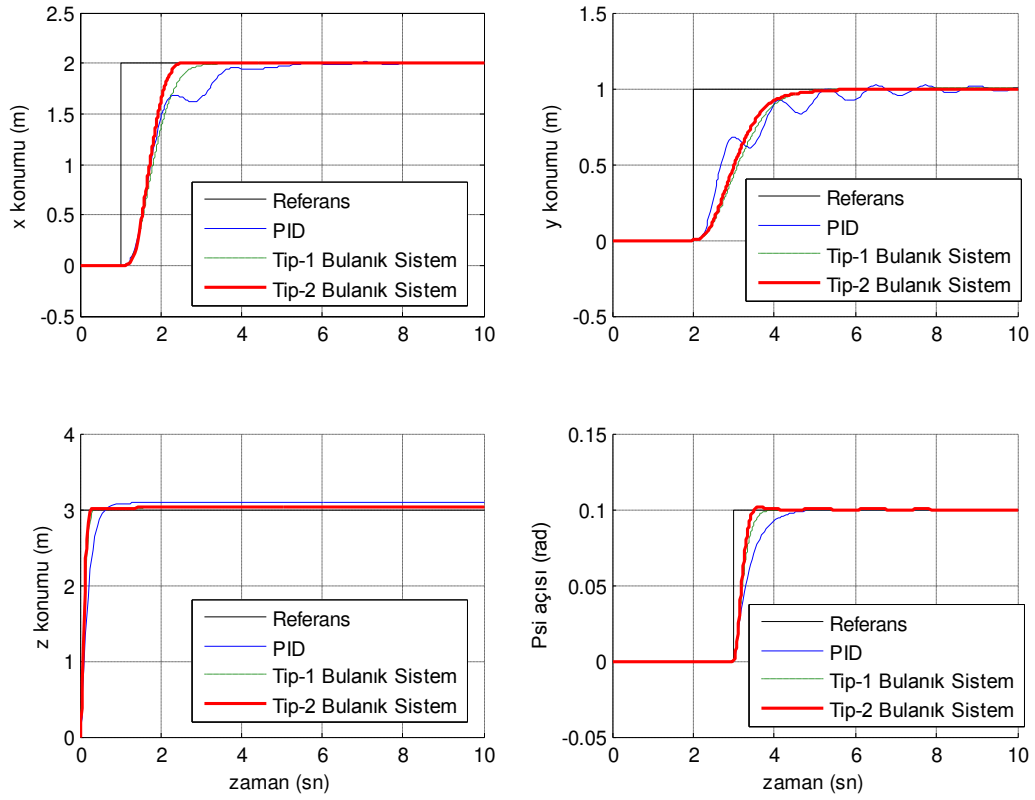
Şekil 4.15. İstenilen konum $x=1m$ için kontrolörlere göre quadrotorun konum grafiği

Yine yatay konumda $y=2\text{m}$ giriş değerini sisteme verdiğimizde y düzlemindeki pozisyon değişimi Şekil 4.16'deki grafikte gösterilmiştir.



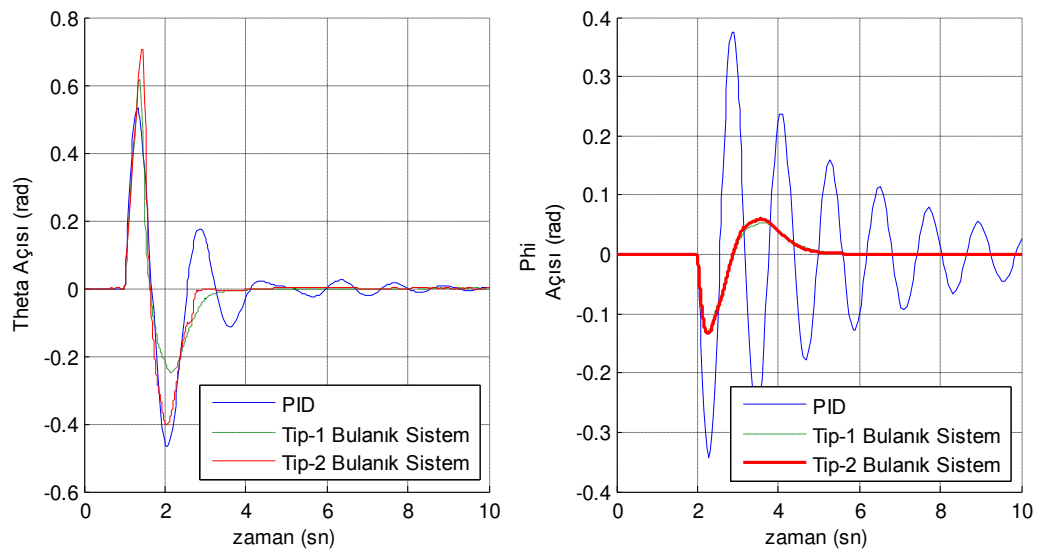
Şekil 4.16. İstenilen konum $y=2\text{m}$ için kontrolörlere göre quadrotorun konum grafiği

Quadrotorun yükseklik ve yön kontrolünü 10 saniye süre ile test edildiğinde referans konumlar ile kontrolörlerin performansları Şekil 4.17 ve Şekil 4.18'de gösterilmiştir.

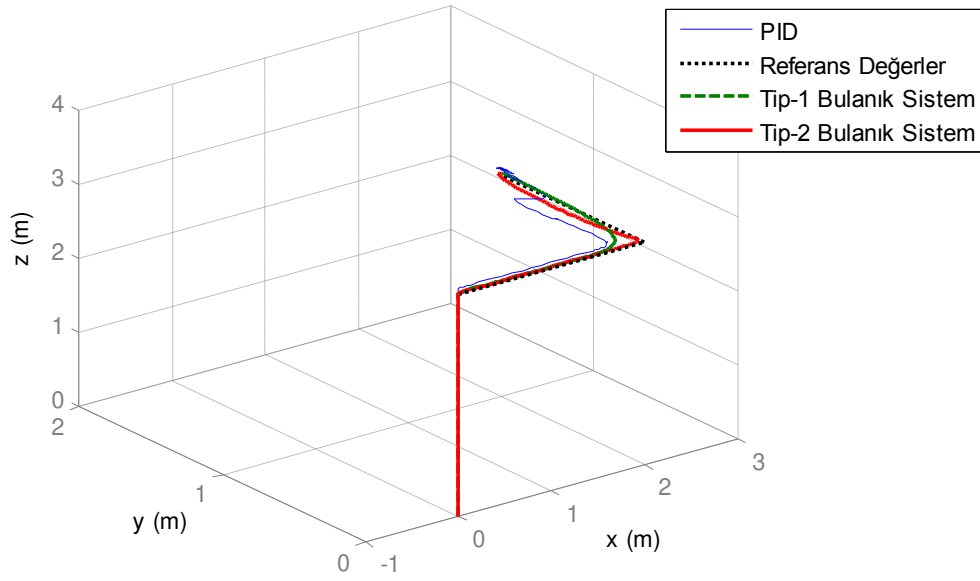


Şekil 4.17. Referans konum grafiğine göre quadrotorun konum grafiği

Referans değerlere göre quadrotorun xyz düzlemindeki 3 boyutta, pozisyonun zamanla değişimi Şekil 19’da gösterilmektedir.



Şekil 4.18. Konum grafiğine göre quadrotorun açı grafiği



Şekil 4.19. Referans değerlere göre quadrotorun xyz eksenindeki hareketi

4.4. Bölüm Değerlendirmesi

Simülasyon testlerine bakıldığında quadrotor kontrolü için önerilen yöntemlerin doğru olduğu görülmektedir. Akademik çalışmalarda quadrotor kontrolü için daha farklı yöntemler kullanılmış ve doğru sonuçlar da alınmıştır. Bu çalışmada kontrolü sağlayabilmek için quadrotor düzlemindeki açılar kullanıldı. Çünkü açılarının değişmesi rotorlardaki itme gücünün yönünü değiştirmektedir. Böylelikle aracın xyz düzleminde hareketi sağlanabilmektedir.

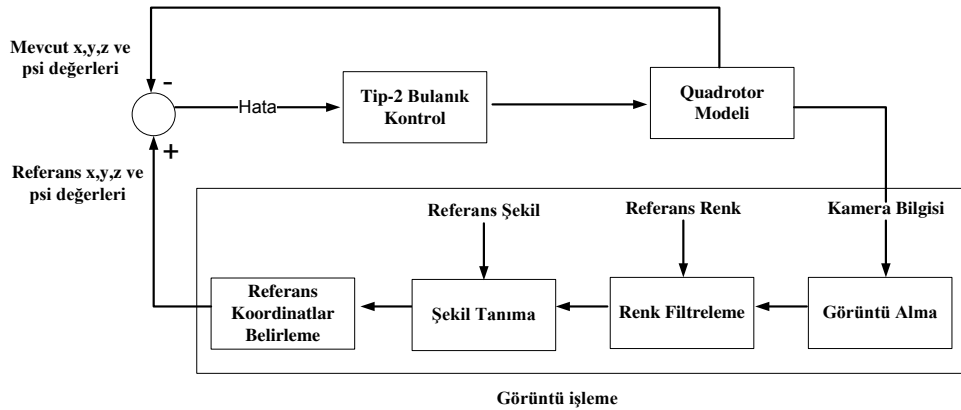
Her bir girişin farklı değerlerdeki simülasyon testlerinde kontrolörlerin performanslarının değiştiği görülmektedir. Özellikle kontrolördeki çarpanların performansı etkilediği saptanmıştır. Simülasyon sonuçlarına göre tip-1 kontrolörün PID kontrolöre göre daha performanslı olduğu saptanmıştır. Ayrıca tip-2 kontrolörün de tip-1 kontrolöre göre daha performanslı olduğu anlaşılmaktadır.

Kontrolörlerin daha etkin bir şekilde çalışabilmesi için çarpanlarının ayrıca optimize edilerek kendinden ayarlamalı bir sistem ile birlikte kullanılabilir.

5. GÖRÜNTÜ İŞLEME TABANLI QUDROTOR KONTROLÜ

5.1. Önerilen Yöntem

Önerilen yöntemde nesnenin rengine ve şekline göre takip edecek bir görüntü işleme tabanlı quadrotor kontrolü modellenmiştir. Nesnenin rengine göre tespit edilmesi için renk uzayında RGB (Red-Kırmızı, Green-Yeşil, Blue-Mavi) renk modeli referans alınmıştır. Nesne şekilsel olarak kare, yuvarlak ve üçgen şekilli olarak ayırt edilmektedir. Şekilleri tanıma işleminde şeklin çevresi ile alanı arasındaki ilişki kullanılmaktadır. Rengine ve şekline göre tespit edilen takip edilecek cismin görüntü içindeki xy koordinatları ve cismin alan değişimine göre z yükseklik değeri elde edilir. xyz koordinatları görüntünün büyüklüğüne göre ve takip mesafesi göz önüne alınarak quadrotor kontrolü için referans girişler elde edilir. Görüntü işleme ile quadrotorun kontrol aşamaları Şekil 5.1'deki blok diyagramında verilmiştir.

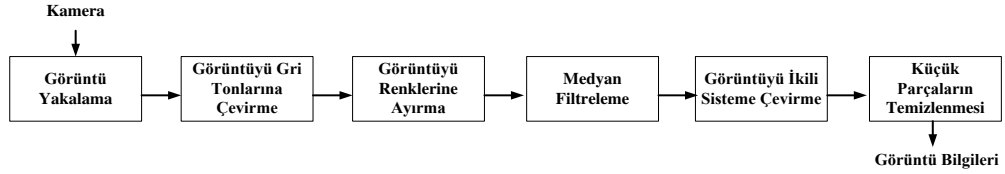


Şekil 5.1. Görüntü tabanlı quadrotor kontrolünün blok diyagramı

Quadrotora monte edilmiş görüntü cihazından görüntüler alınır. Tespit edilecek nesnenin renk ve şekil özelliklerine göre görüntüden bilgiler alınır. Bu bilgiler resmin büyüklüğü ve görüntü içerisindeki pozisyon bilgileridir. Bu bilgiler doğrultusunda quadrotora komut verecek referans koordinatlar ve sapma açısı hesaplanır. Hesaplanan bu parametreler quadrotorun mevcut konumu ile karşılaştırılır. Mevcut pozisyon ile istenen koordinatlar arasındaki fark tip-2 bulanık kontrolöre gönderilir. Kontrolörün çıkışı ile quadrotora gelen komutlar yükseklik ve yön hareketlerinin istenen konuma yüksek performansla gelmesini sağlar.

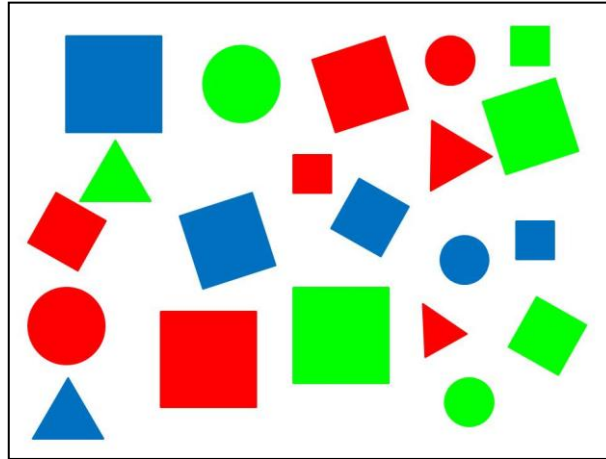
5.1.1. Görüntü İşleme

Görüntü işleme bölümünde kameradan görüntünün alınması ve filtreleme işlemi ile nesneleri tespit etme işlemleri yer almaktadır. Görüntü işlemenin blok diyagramı Şekil 5.2’de ifade edilmiştir.



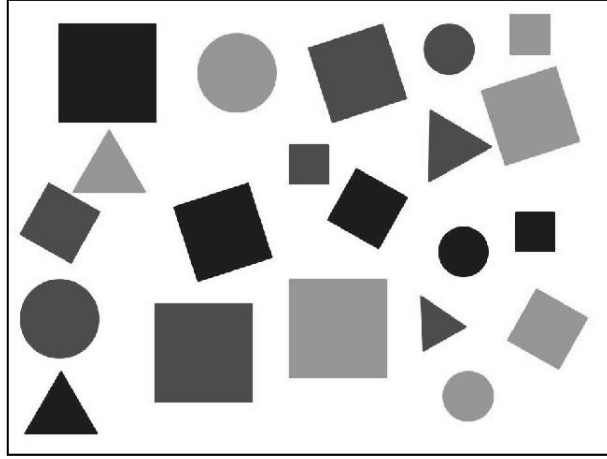
Şekil 5.2. Görüntü işleme blok diyagramı

Kameradan görüntü alma işleminde matlab programında kullanılan *getCameraInfo(imaqhwinfo)* komutu ile kamera bilgileri alınır. *vid = videoinput(camera_name, camera_id, format)* konutu ile kamera cihazı ile bağlantı kurulur. *set(vid, 'ReturnedColorspace', 'rgb')* komutu ile görüntülerin RGB renk modeli ile alınması sağlanır. *data = getsnapshot(vid)* komutu ile kameradan görüntü resmi alınır. Örnek görüntü Şekil 5.3’de verilmiştir.



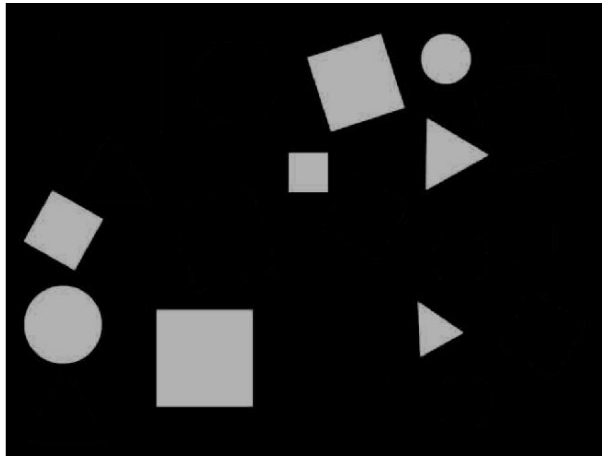
Şekil 5.3. Görüntü alma işleminde alınan örnek resim

Renkli resim *rgb2gray* komutu ile siyah ve beyaz renk tonlarından oluşan renksiz resim elde edilir. Resim Şekil 5.4’de gösterilmiştir.

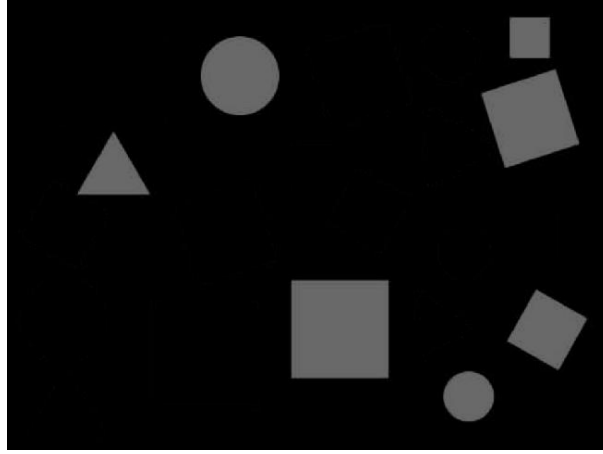


Şekil 5.4. Renkli resmin `rgb2gray` komutu ile renksiz hale dönüştürülmesi

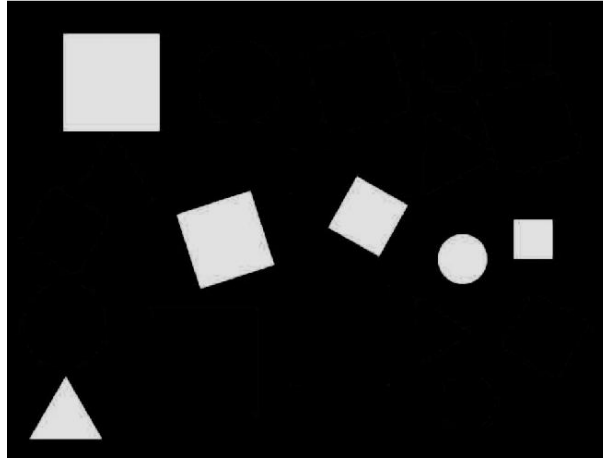
Şekil 5.4'deki resme `diff_im = imsubtract(data(:,:,1), rgb2gray(data))` komutu uygulanarak resimdeki nesneler renklerine göre ayırt edilir. komuttaki `data(:,:,1)` kırmızı renkli nesneleri, `data(:,:,2)` yeşil renkli nesneleri ve `data(:,:,3)` mavi renkli nesneleri ayırt eder. Renklerine göre ayırt edilen nesneler Şekil 5.5, Şekil 5.6 ve Şekil 5.7'da gösterilmiştir.



Şekil 5.5. Resimdeki kırmızı renkli nesnelerin seçilmesi

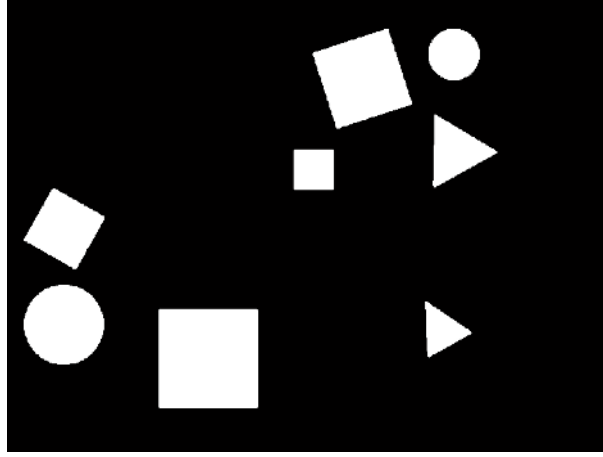


Şekil 5.6. Resimdeki yeşil renkli nesnelerin seçilmesi



Şekil 5.7. Resimdeki mavi renkli nesnelerin seçilmesi

Rengine göre ayırt edilmiş resme medyan filtre uygulanarak resmin merkezine göre çevresindeki piksellerin medyanları temizlenir. Medyan filtreleme için kullanılan komut $diff_im = medfilt2(diff_im, [3\ 3])$ dir. $[3\ 3]$ matrisini kullanarak iki boyutlu bir medyan filtreleme yapar. Resimlerin kenarlarını sıfırlar fakat matrisin orta kısmı bozuk görünebilir. Filtreleme işleminden sonra $diff_im = im2bw(diff_im, 0.18)$ komutu ile resim gri tonlarına ayrılarak ikili resme çevrilir. Gri tonlamada $[0,1]$ arasında bir değer seçilir. Aralıktaki 0 beyaz, 1 ise siyah tonlama yapar. Şekil 5.5'deki resme komutlar uygulandıktan sonra elde edilen resim Şekil 5.8'de gösterilmiştir.



Şekil 5.8. Gri tonlama yapılarak ikili resme dönüştürülmesi

Elde edilen resimde birçok parçacıklar olacaktır. Bu parçalardan gereksiz olanların çıkarılması gerekiyor. Önemsiz olan parçalar genellikle çok küçük olan parçalardır. Bu parçaları `diff_im = bwareaopen(diff_im, 300)` komutu temizlenir. Burada görüntüdeki 300 pikselin altında olan küçük parçalar temizlenmiştir. Resimde küçük parçalar olmadığından gözle görünür bir değişiklik olmamıştır ve elde edilen sonuç Şekil 5.8'deki gibidir.

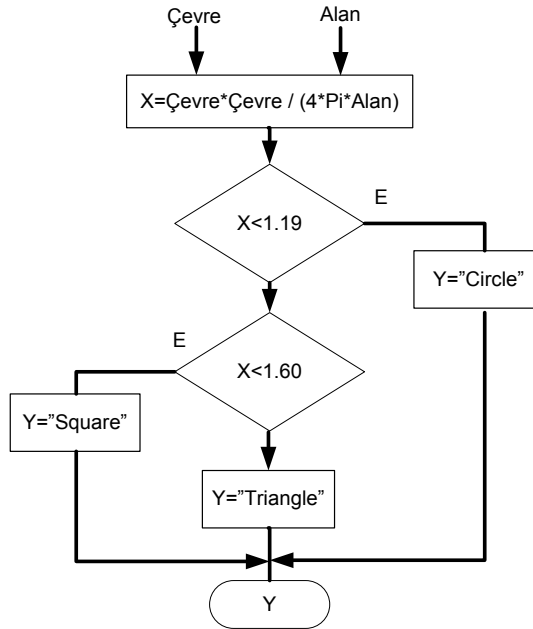
5.1.2. Nesne Tanıma

Nesne tanıma için öncelikle görüntü işlem ile elde edilen resimdeki her bir nesne etiketlenerek kayıt altına alınır. Bu işlemi yapmak için `bw = bwlabel(diff_im, 8)` komutu kullanılır. Buradaki komut iki boyutlu ikili resimdeki tercihe göre 4 veya 8 bağlı nesneyi bulur. Bir sonraki işlemde görüntü blob (damga-leke) analizi yapılır. Burada `stats = regionprops(BW, 'BoundingBox', 'Centroid', 'Perimeter', 'Area')` komutu kullanılarak resimdeki nesnelerin her biri için merkezi koordinatları, çevre uzunluğu ve alanı bulunur. Komuttaki `BW` özelliği, ikili resmindeki bağlı nesnelerin mantıksal dizi şeklinde değerlendirilmesidir. Komuttaki diğer parametreler nesnenin ölçümleridir ve daha bir çok farklı ölçümler de vardır. Nesnelerin ölçümlerine ait bilgiler Tablo 5.1'de verilmiştir.

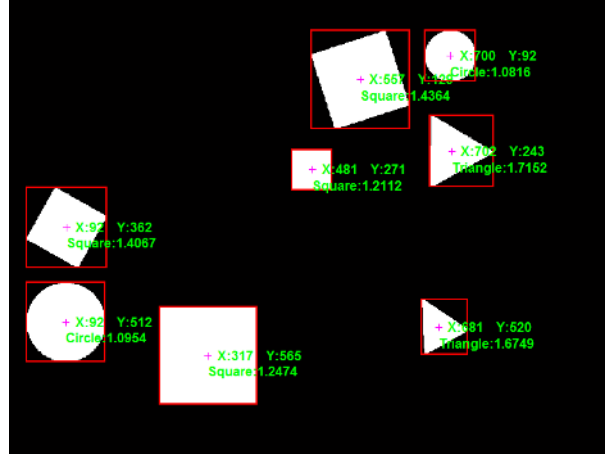
Tablo 5.1. Resimde yer alan nesnelerin ölçüm değerleri

Nesne No	Koordinatlar (x-y)	Çevresi	Alanı	$\frac{\zeta^2}{(4 \cdot \pi \cdot A)}$
1	92.36 - 362.44	395.1442	8833	1.4067
2	91.57 - 511.64	409.4041	12176	1.0954
3	316.50 - 564.50	609.6569	23712	1.2474
4	481 - 271	245.6569	3965	1.2112
5	556.73 - 129.28	527.5462	15418	1.4364
6	680.57 - 520.44	261.8650	3258	1.6749
7	699.60 - 91.66	262.6934	5077	1.0816
8	701.62 - 242.59	356.6346	5901	1.7152

Nesnelerin ölçümleri referans alınarak dairesellik durumu değerlendirilmiştir. Bir dairenin çevresi $\zeta = 2\pi r$ ve alanı $A = \pi r^2$ ise dairesellik durumunu sağlaması için $r^2 = \frac{\zeta^2}{4\pi^2} = \frac{A}{\pi}$ eşitliğinden $\frac{\zeta^2}{4\pi A} = 1$ olması gerekir. Burada hata paylarını da ele alınarak şekillerin tespiti Şekil 5.8'deki blok diyagramına göre yapılabilir. Uygulamanın sonunda Şekil 5.10'da gösterildiği gibi nesneler tespit edilmiştir.



Şekil 5.9. Nesnelerin ölçüm değerlerine göre şekil tespitinin blok diyagramı



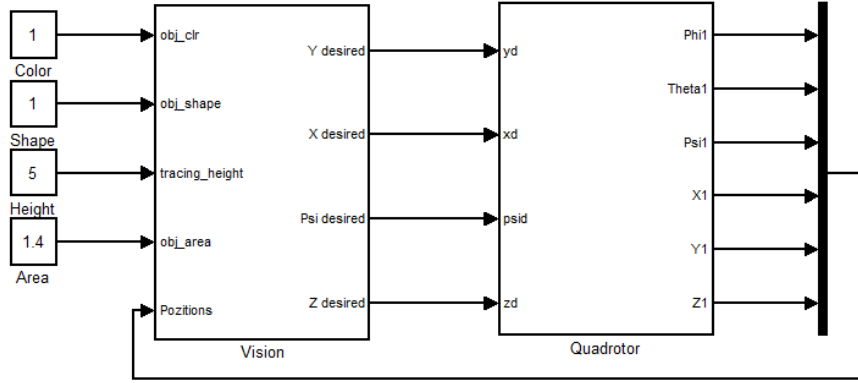
Şekil 5.10. Resimdeki nesnelerin tespiti

5.1.3. Nesne Takibi

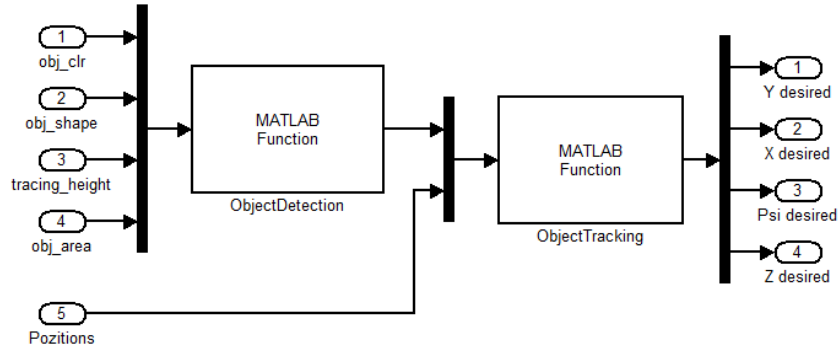
Nesne tanıma işleminde takibi yapılacak nesnenin resim içindeki sol-üst köşesine göre xy koordinatları elde edilmiştir. Bu koordinatlara göre takibi sağlamak için nesne merkez konuma getirilmelidir. Kameranın görüş alanı ve nesnelerin büyüklükleri takip mesafesi ile değişebilmektedir. Bu mesafeye göre xy koordinatları bir değer ile çarpılarak quadrotor için referans giriş değerleri oluşturulur. Ayrıca takip mesafesine göre nesnenin alanı görüntüdeki alan ile karşılaştırılarak yükseklik/irtifa mesafesi kontrol edilebilir. Nesnenin alanları arasındaki oran bir değer ile çarpılarak quadrotorun yükseklik kontrolü için giriş değeri oluşturulur.

5.2. Simülasyon Sonuçları

Önerilen yönteme göre oluşturulan simülasyon modeli Şekil 5.11’de gösterilmiştir. Takip edilecek nesnenin renk, şekil ve takip mesafesi verilen modelde giriş parametreleri olarak kullanılır. Görüntü işleme biriminde nesne tespiti ve nesne takibi birimleri yer alır. Bahsi geçen birimler Şekil 5.12’de gösterilmiştir. Quadrotor alt modelde yapılan işlemler dördüncü bölümde önerilen yöntemdeki simülasyon modelindekiler ile aynıdır.

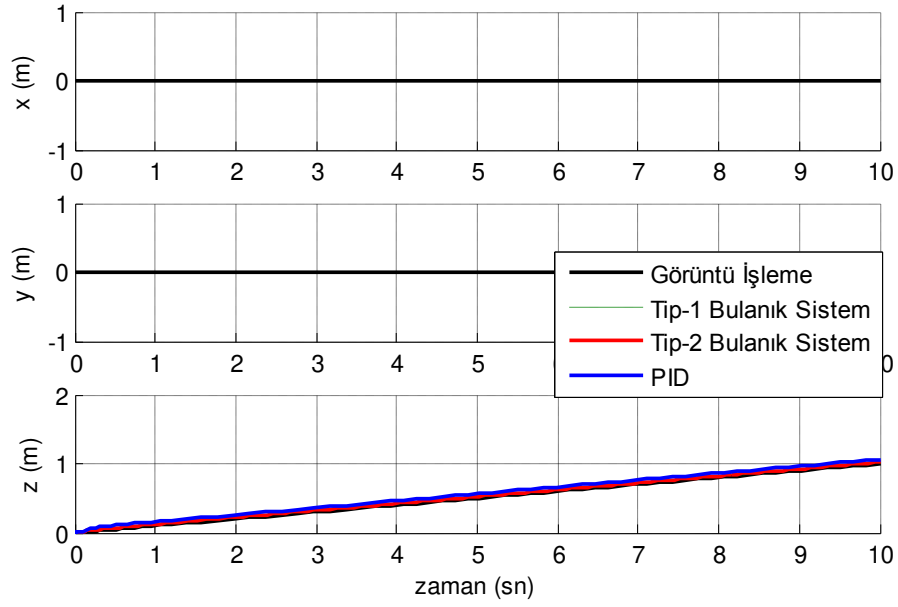


Şekil 5.11. Görüntü tabanlı quadrotor kontrolünün simülasyon modeli



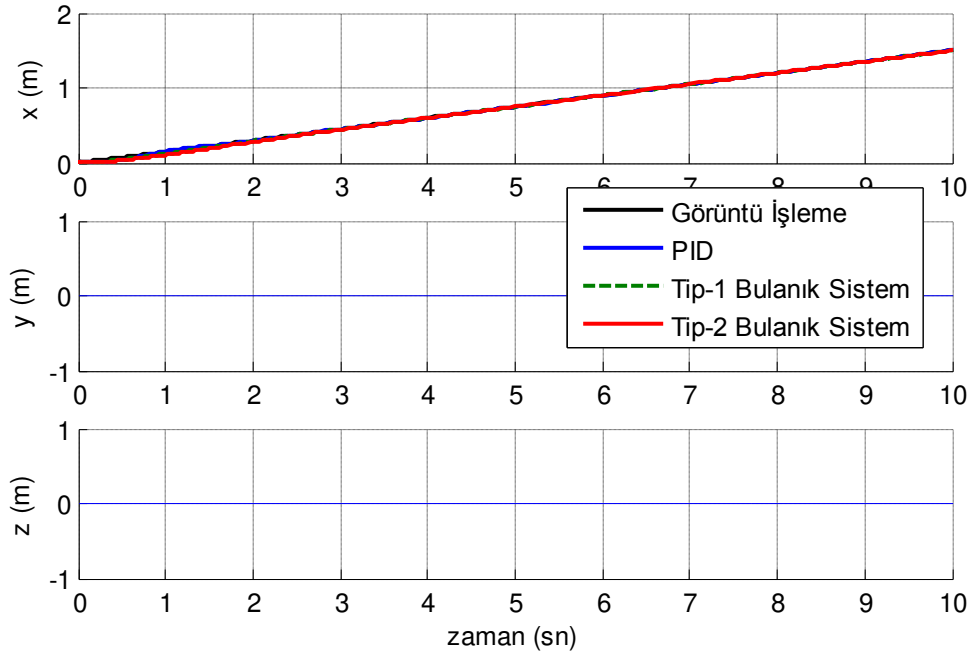
Şekil 5.12. Görüntü işleme blok diyagramı

Sistemin simülasyon modeli sanal ortamda test edilmiştir. Oda içerisinde kırmızı renkli ve kare şekilli bir kağıdın tespiti ve takibi yapılmıştır. Tek kamera kullanılarak yapılan simülasyonda nesnenin hareket yönü ve pozisyon değişikliği görüntü işleme metotları ile tespit edilerek, quadrotor modeline pozisyon parametreleri iletilmiştir. Görüntü sisteminden gelen sinyaller ile quadrotordan istenilen yükseklik ve yön hareketleri kontrolörler aracılığı ile gerçekleştirilmiştir.



Şekil 5.13. Nesne takibinde yükseklik değişimi

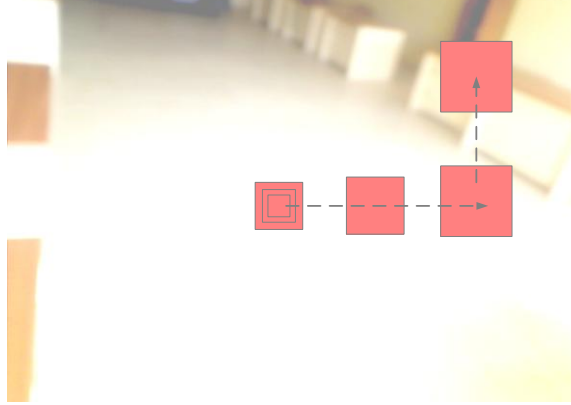
Takip edilen nesnenin görüntüdeki oluşturduğu alan büyüdükçe quadrotora yükselme komutu verilir. Şekil 5.13’de kontrolörlerin yükseklik hareketindeki performansları gösterilmektedir.



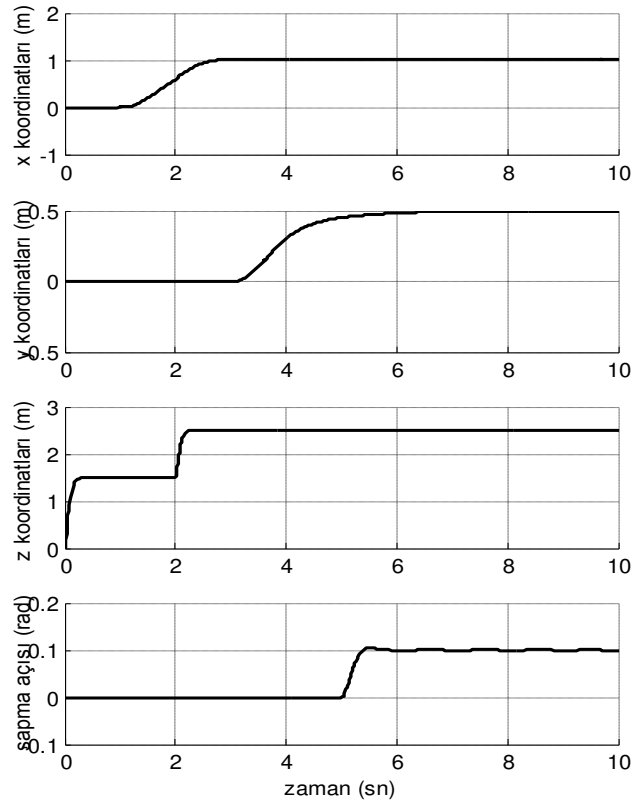
Şekil 5.14. Nesne takibinde x konum değişimi

Görüntüdeki resmin x eksenindeki hareketi ile quadrotorun da sağa doğru hareket etmesi gerekmektedir. Quadrotora verilen referans değerler ile kontrolörlerin gösterdiği performans Şekil 5.14’de gösterilmiştir.

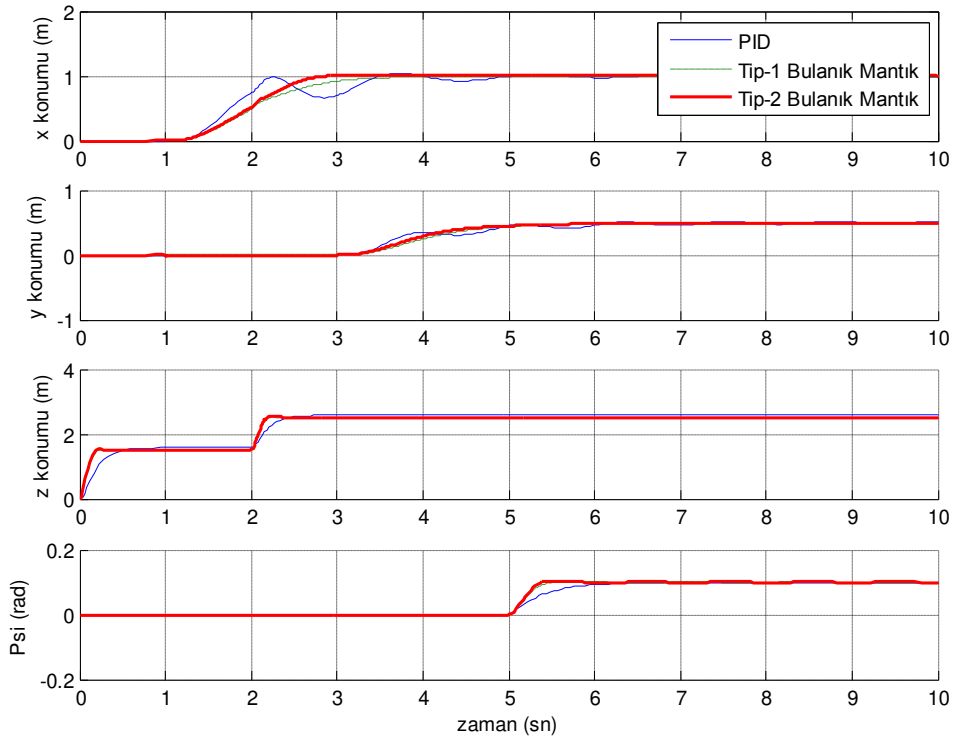
Görüntüdeki resmin xyz eksenindeki hareketleri Şekil 5.15’de gösterilmiştir. Referans görüntüden elde edilen referans pozisyon koordinatları Şekil 5.16’da gösterilmiştir. Quadrotorun simülasyon sonucunda yükseklik ve pozisyon grafiği, kontrolörlere göre performansları Şekil 5.17’de verilmiştir ve xyz eksenindeki hareketi Şekil 5.18’de görüldüğü gibidir. Görüntü tabanlı quadrotor modelinin bulanık mantık sistemi ile kontrolünün performanslı bir şekilde yapılabilindiği simülasyon sonuçlarında görülebilmektedir.



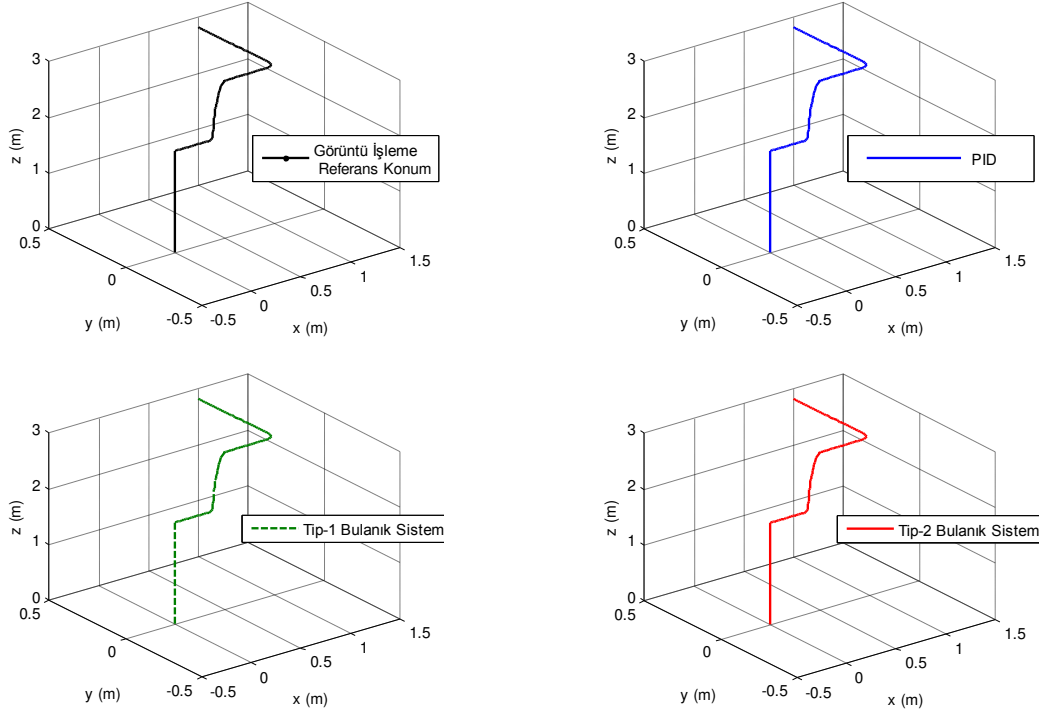
Şekil 5.15. Nesnenin yükseklik ve yön hareketlerinin gösterimi



Şekil 5.16. Referans görüntüye göre yükseklik ve yön koordinatları



Şekil 5.17. Referans görüntüye göre quadrotorun yükseklik ve yön hareketlerinin grafiği



Şekil 5.18. Görüntü işleme referanslarına göre quadrotorun xyz eksenindeki hareketi

5.3. Bölüm Değerlendirmesi

Görüntü tabanlı uygulamalarda birçok yöntem kullanılmaktadır. Görüntülü uygulamalarda çevresel faktörlerin etkilerinin olduğu görülür. Özellikle görüntü kirliliği, belirsizlikler ve nesne tespitindeki zorluklar uygulamalarda hatalara ve tutarsızlıklara neden olur. Bu çalışmada bahsedilen sebeplerden dolayı sistemde daha iyi sonuçlar vermesi için tip-2 bulanık mantık ile kontrolü yapılmıştır.

Bu bölümde nesne tespiti için yöntemler sunulmuş ve testler ile doğrulanmıştır. Tespit edilen nesnenin takibi için algoritma oluşturulmuştur. Yöntemin simülasyon sonuçlarında doğru bir şekilde uygulandığı görülmüştür.

Önerilen yöntemler quadrotor kontrolü ile kullanılarak test edilmiş ve uygulanabilirliği doğrulanmıştır.

6. SONUÇLAR

Bu çalışmada son yıllarda popülerliği hızla artan quadrotor insansız hava aracının modellemesi yapılmış ve kontrol algoritmaları kullanılarak yükseklik ve yön kontrolü simülasyon ortamında gerçekleştirilmiş ve sonuçlar yorumlanmıştır. Kontrol algoritmalarında tip-2 bulanık sistem, tip-1 bulanık sistem ve PID kontrolörler kullanılmıştır.

Bu çalışmada dört rotorlu insansız hava aracı olan quadrotorun Newton – Euler yöntemi ile matematik modeli detaylı olarak incelenmiş ve MATLAB/Simulink ortamında matematik model oluşturulmuştur.

Quadrotorun yükseklik ve yön kontrolü için önerilen kontrol algoritmasında iki kısımdan oluşan kontrolörler kullanılmıştır. Birinci kısımda, referans olarak alınan pozisyonlar ile quadrotorun mevcut pozisyonu arasındaki farklar kontrolörler tarafından işleme alınarak referans açıları oluştururlar. İkinci kısımda, oluşturulan referans açıları ile quadrotorun mevcut açıları arasındaki farklar ikinci kontrolörler tarafından işleme alınarak quadrotor için pervane hızlarını üretirler.

Kontrol algoritmasında kullanılan tip-2 bulanık sistem optimize edilerek daha iyi sonuçlar elde edilmiştir. Optimize çalışmasında tip-2 bulanık sistemde yer alana üyelik fonksiyonlarının taban genişlikleri kullanılmıştır. Optimizasyon yöntemi olarak PSO kullanılmıştır. PSO uygulamasında iterasyon sayısının ve parçacık sayısının etkili olduğu görülmüştür. Optimizasyon uygulamasında tip-2 bulanık sistemde en iyi sonucu veren üyelik fonksiyonların taban genişlikleri bulunmuştur. Simülasyon çalışmalarında, optimize edilmiş sistemin daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür.

Kontrol algoritmasında kullanılan kontrolörlerin performansları simülasyon çalışmalarında test edilmiştir. Testler sonucunda tip-2 bulanık sistemin, tip-1 bulanık sistemin ve PID sistemin quadrotor kontrolünü başarı ile sağladığı görülmüştür. Fakat kontrolörlerin gösterdiği performansta farklar saptanmıştır. Tip-1 bulanık sistemin PID kontrolöre göre daha etkin olduğu görülmüştür. Tip-2 bulanık sistemin de tip-1 bulanık sisteme göre daha etkin olduğu görülmüştür.

Simülasyonda yapılan testlerde kontrol sistemlerinde kullanılan katsayıların performanslarda etkili olduğu saptanmıştır. Çok sayıda yapılan denemeler ve karşılaştırmalar ile bu katsayılar iyileştirilmiştir.

Önerilen kontrol algoritmaları görüntü tabanlı quadrotor modelinde uygulanmıştır. Görüntü tabanlı quadrotor modelinde belirli bir nesnenin takip edilmesi sağlanmıştır. Bu uygulamanın yapılabilmesi için nesnenin tespit edilmesi ve hareketinin algılanması gerekir. Bu nedenle görüntü işlemede bazı algoritmalar kullanılmıştır. Bu algoritmalarda öncelikle nesnenin tespiti için görüntü renklerine ayrılır. İstenilen renkler görüntüden alınarak gri tonlama yapılır. Görüntüde filtreleme ve temizleme işlemleri yapıldıktan sonra görüntüdeki nesnelerin özellikleri saptanır. Bu özelliklere göre karşılaştırmalar yapılarak istenen nesne tespit edilir. Tespit edilen nesnenin hareketleri algılanarak takibi yapılır. Takip işleminde quadrotorun nesneyi takip etmesi için referans pozisyon parametreleri oluşturulur. Böylece quadrotorun nesneyi takip etmesi sağlanır.

Bu çalışmada, tasarlanan kontrol algoritmaları simülasyon ortamında gerçekleştirilmiş olması sebebiyle gerçek uygulamalarda karşımıza çıkabilecek bazı kısıtlar göz ardı edilmiştir.

Gelecek çalışmalarda, gerçek bir quadrotor sistemi üzerinde çalışmalar yapılarak karşılaşılabilecek belirsizlikler üzerinde ve bu çalışmada kullanılan kontrol yöntemlerinin tasarım kriterlerinin optimum olarak seçimi üzerinde durulması beklenebilir.

KAYNAKLAR

- [1] **Ortak E.**, 2010, 4 Rotorlu Bir İnsansız Hava Aracı (Quadrotor) İçin Bulanık Kontrolcü Tasarımı ve Simulasyonu, *Lisans Tezi*, Yıldız Teknik Üni., Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [2] **Erginer B.**, 2007, Quadrotor Vtol Aracının Modellenmesi ve Kontrolü, *Yüksek Lisans Tezi*, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- [3] **İlhan İ. and Karaköse M.**, 2013, Type-2 Fuzzy Based Quadrotor Control Approach, *Asian Control Conference 2013 (ASCC2013)*, İstanbul, Türkiye.
- [4] **Saif A., Dhaifullah M., Al-Malki M. ve El Shafie M.**, 2012, Modified Backstepping Control of Quadrotor, *9th International Multi-Conference on Systems, Signals and Devices*, Dhahran, Saudi Arabia, pp. 1-6.
- [5] **Lee G., Jeong D. Y. and Khoi N. D.**, 2011, Attitude Control System Design For A Quadrotor Flying Robot, *8th International Conference on Taesam Kang Ubiquitous Robots and Ambient Intelligence (URAI)*, Seoul, South Korea, pp. 74-78.
- [6] **Patel R., Patel M.A. and Vyas D. R.**, 2012, Modeling and Analysis of Quadrotor using Sliding Mode Control, *44th IEEE Southeastern Symposium on System Theory*, Florida, pp. 111-114.
- [7] **Waslander S. L., Hoffmann G., Jangand J. and S. Tomlin C. J.**, 2005. Multi-Agent X4-Flyer Testbed Control Design: Integral Sliding Mode vs. Reinforcement Learning, *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*.
- [8] **Oliveira M.**, 2011, Modeling, Identification and Control of a Quadrotor Aircraft, *Master's Thesis*, Czech Technical University, Prague.

- [9] **Salih A.L., Moghavvemi M., H. A Mohamed. F. and Gaeid K. S.,** 2010, Modelling and PID Controller Design for a Quadrotor Unmanned Air Vehicle, *IEEE International Conference on Automation Quality and Testing Robotics (AQTR)*, Kuala Lumpur, Malaysi, app. 1-5.
- [10] **Efe, M.Ö.,** 2007, Dört Motorlu Bir Dönerkanat Sisteminin Dinamik Modeli ve PD Kontrolör İle Yörünge Kontrolü, *TOK'07 Otomatik Kontrol Ulusal Toplantısı*, İstanbul, Türkiye.
- [11] **Lee K. U., Yun Y. H., Chang W., Park J. B. and Cho Y. H.,** 2011, Modeling and Altitude Control of Quad-rotor UAV, *11th International Conference on Control, Automation and Systems*, Korea, s:1897-1902.
- [12] **Dikmen İ. Can, Temeltaş H. ve Arısoy A.,** 2010, Dikey İniş-Kalkış Yapabilen Dört Rotorlu Hava Aracının (Quadrotor) Uçuş Kontrolü, *Havacılık ve Uzay Teknolojileri Dergisi*, Cilt 4 Sayı 3, s:33-40.
- [13] **Campbell J., Hamilton J., Iskandarani M. and Givigi S. Jr.,** 2012, A Systems Approach for the Development of a Quadrotor Aircraft, *IEEE International on Systems Conference (SysCon)*, Canada, pp. 1-7.
- [14] **Rashid M.I. and Akhtar S.,** 2012, Adaptive Control of a Quadrotor with Unknown Model Parameters, *9th International Bhurban Conference on Applied Sciences and Technology (IBCAST)*, Islamabad, Pakistan, pp. 8-14.
- [15] **Rabhi A., Chadli M. and Pegard C.,** 2011, Robust Fuzzy Control for Stabilization of a Quadrotor, *The 15th International Conference on Advanced Robotics*, Estonia, pp. 471-475.
- [16] **Santos M., V López. and Morata F.,** 2010, Intelligent Fuzzy Controller of a Quadrotor, *Intelligent Systems and Knowledge Engineering (ISKE)*, Madrid, Spain, pp. 141-146.

- [17] **Abeywardena D.M.W., Amaratunga L.A.K., Shakoor S.A.A. and Munasinghe S.R.**, 2009, A Velocity Feedback Fuzzy Logic Controller for Stable Hovering of a Quad Rotor VAV, *Fourth International Conference on Industrial and Information Systems, ICIIIS*, Sri Lanka, pp. 558-562.
- [18] **Sangyam T., Laohapiengsak P., Chongcharoen W., and Nilkhamhang I.**, 2010, Path Tracking of UAV Using Self-Tuning PID Controller Based on Fuzzy Logic, *SICE Annual Conference*, Taipei, Taiwan, pp. 1265-1269.
- [19] **AI-Younes Y. and Jarrah M.A.**, 2008, Attitude Stabilization Of Quadrotor UAV Using Backstepping Fuzzy Logic Backstepping Least-Mean-Square Controllers, *Proceeding of the 5th International Symposium on Mechatronics and its Applications (ISMA08)*, Amman, Jordan, pp. 1-11.
- [20] **Turgut M. N.**, 2011, Dört Rotorlu İnsansız Hava Aracının Modellenmesi ve Simülasyonu, *Yüksek Lisans Tezi*, Yıldız Teknik Üni., Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [21] **Abeywardena D.M.W., Amaratunga L.A.K., Shakoor S.A.A. and Munasinghe S.R.**, 2009, A Velocity Feedback Fuzzy Logic Controller for Stable Hovering of a Quad Rotor VAV, *Fourth International Conference on Industrial and Information Systems*, s:558-562, Sri Lanka.
- [22] **Altuğ E., Ostrowski P.J. and Taylor J.C.**, 2005, Control of a Quadrotor Helicopter Using Dual Camera Visual Feedback, *The International Journal of Robotics Research*, Vol. 24, No. 5, May, pp. 329-341.
- [23] **Zhang, S.**, 2005, Object Tracking in Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Videos Using a Combined Approach, *IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, v. 2, pp. 681-684.

- [24] **Ceren Z. ve Altuğ E.**, 2009, Vision-based Servo Control of a Quadrotor Air Vehicle, *IEEE International Symposium on Computational Intelligence in Robotics and Automation (CIRA2009)*, DCC, Daejeon, Korea.

- [25] **Aryo W. N. I., Pang W. C., Gerald S. G.L., Michael L. W.S. and Witold C.**, 2010, Moving Objects Detection and Tracking Framework for UAV-based Surveillance, *Fourth Pacific-Rim Symposium on Image and Video Technology*.

- [26] **Lee S., Kang S. Hoon and Kim Y.**, 2011, Trajectory Tracking Control of Quadrotor UAV, *11th International Conference on Control, Automation and Systems*, Gyeonggi-do, Korea, pp. 281-285.

- [27] **Baykal N. ve Beyan T.**, 2004, Bulanık Mantık İlke ve Temelleri, Bıçaklar Kitapevi, İstanbul.

- [28] **Zadeh L.A.**, 1965. Fuzzy sets, *Information and Control* 8, pp. 338-353.

- [29] **Zadeh L.A.**, 1973, Outline of a new approach to the analysis of complex systems and decision processes, *IEEE Transactions on Systems, man, and Cybernetics*, Vol. SMC-3, No. 1, pp. 28-44.

- [30] **Zadeh L.A.**, 1975, The concept of linguistic variable and its application to approximate reasoning, *Part 1, 2, and 3. Information Sciences*, 8: 199-249, 8: 301-357-, 9: 43-80.

- [31] **Mamdani E.H.**, 1974. Application of fuzzy algorithms for control of simple dynamic plant, *Proc. IEE*, Vol.121, No.12, pp. 1585-1588.

- [32] **Mamdani E.H. and Assilian S.**, 1975, An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller, *Int. J. Man-Machine Studies* 7, pp. 1-13.

- [33] **Karnik N. and Mendel J. M.**, 1998, Introduction to type-2 fuzzy logic systems, *Proc. 1998 IEEE FUZZ Conf.*, May, pp. 915–920.
- [34] **Karnik N., Mendel J. M., and Liang Q.**, 1999, Type-2 fuzzy logic systems, *IEEE Trans. Fuzzy Syst.*, vol. 7, Dec, pp. 643–658.
- [35] **Aliasghary M., Eksin İ., Güzelkaya M. and Kumbasar T.**, 2012, Design of an interval type-2 fuzzy logic controller based on conventional PI controller, *Control & Automation (MED), 2012 20th Mediterranean Conference*, pp. 627-632.
- [36] **Kayacan E., W Saeys., Ramon H., and Kaynak O.**, 2012, Intelligent control of a tractor-implement system using type-2 fuzzy neural networks, *Fuzzy Systems (FUZZ-IEEE), 2012 IEEE International Conference*, pp. 1-8.
- [37] **Karaköse M.**, 2010, Sine-square Embedded Fuzzy Sets, *Systems Man and Cybernetics (SMC), 2010 IEEE International Conference*, pp. 3628- 3631.
- [38] **Mendel J.M.**, 2007, Advances in type-2 fuzzy sets and systems, *Information Sciences*, vol. 177, 84–110.
- [39] **Mendel J.M.**, 2001, Uncertain Rule-Based Fuzzy Logic Systems: Introduction and New Directions, *Prentice-Hall*, Upper-Saddle River, NJ.
- [40] **Karaköse M., Akın E.**, 2004, Type-2 fuzzy activation function for multilayer feedforward neural networks, *Systems, Man and Cybernetics, 2004 IEEE International Conference*, vol. 4, pp. 3762 - 3767.
- [41] **Mendel J.M.**, 2003, Type-2 fuzzy sets: some questions and answers, *IEEE Connections, Newsletter of the IEEE Neural Networks Society*, vol. 1, 10–13.

- [42] **Mendel J.M. and John R.I.**, 2002, Type-2 fuzzy sets made simple, *IEEE Trans. on Fuzzy Systems*, vol. 10, April, 117–127.
- [43] **Bresciani T.**, 2008, Modelling, Identification and Control of a Quadrotor Helicopter, *Master of Science Thesis*, Department of Automatic Control Lund University, Italy.
- [44] **Neff A.**, 2007, Linear And Non-Linear Control Of A Quadrotor UAV, *Master's Thesis*, Graduate School of Clemson University, South Carolina.
- [45] **Erginer B., Altuğ E.**, 2007, Modeling and PD Control of a Quadrotor VTOL Vehicle, *IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, İstanbul, Türkiye
- [46] **Santos M., V. López, F. Morata**, 2008, Intelligent Fuzzy Controller of a Quadrotor, *World Automation Congress*, WAC 2008.

ÖZGEÇMİŞ

İsmail İLHAN, 1980 yılında Şanlıurfa'da doğdu. İlk ve orta öğrenimini Şanlıurfa'da yaptı. Lise öğrenimini Şanlıurfa'da İngilizce yabancı dil hazırlıklı Davut Zeki Akpınar Lisesi'nde yaptı. 1999 yılında Sakarya Üniversitesi Bilgisayar Mühendisliği Bölümü'nde lisans öğrenimine başladı. Üniversitede Akademik Personel Programı konulu bitirme tezini verdi. 2003 yılında lisans programını bitirerek askerlik görevine başladı. Bir yıllık askerlik görevinden sonra Malatya'ya yerleşerek kendi özel şirketinde çalıştı. Özel sektörde web yazılımı, tasarım ve sunucu yönetimi işlerini yaptı. 2007 yılında evlendi. 2008 yılının sonunda Muş Alparslan Üniversitesi'nde öğretim görevlisi olarak atandı. Üniversitede dersler ile birlikte Bilgi İşlem Dairesi Başkanlığı'nda görevler aldı. 2009 yılında bir erkek çocuğu oldu. Ayrıca 2009 yılında Fırat Üniversitesi'nde Bilgisayar Mühendisli Anabilim Dalı'nda Yazılım Programı'nda tezli yüksek lisansa başladı. Halen Muş Alparslan Üniversitesi'nde öğretim görevlisi olarak çalışmaktadır.